

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Vhodné kmitočty pro tavení různých materiálů ve
studeném kelímku**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Zuzana HAVLOVÁ**
Osobní číslo: **E09N0048K**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Vhodné kmitočty pro tavení různých materiálů ve studeném kelímku**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Uveďte stručně teorii indukčního tavení ve studeném kelímku.
2. Stanovte základní rozdíly pro tavení elektricky vodivé a elektricky nevodivé vsázky.
3. Uveďte metody k určování geometrických parametrů a kmitočtu vhodného pro tavení požadovaného množství vsázky.
4. Stanovte závěry pro praxi při využití provozních zkušeností z provozu "studeného kelímku" (z odborné literatury).

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na indukční tavení ve studeném kelímku. Popisuje stručně princip indukčního tavení a zařízení k tomu používané. Zabývá se rozdílem mezi tavbou elektricky vodivé a nevodivé vsázky. Dále se zabývá geometrickými parametry a frekvencemi používanými pro tavbu různých materiálů.

Klíčová slova

Indukční tavení, studený kelímek, frekvence, vsázka, pevná slinutá druhově specifická vrstva „skull“, lamely, elektromagnetické pole, induktor, tavenina, Maxwellovy rovnice.

Abstract

The master thesis presents the induction melting in cold crucible. It describes shortly the principle of induction melting and equipment to be used. It deals with the difference between the melting electrically conductive and nonconductive batch. It also deals with geometric parameters and frequencies used for melting different materials.

Key words

Induction melting, cold crucible, frequency, batch, species-specific solid sintered layer „skull ", segments, electromagnetic fields, inductor, melt, Maxwell's equation.

Prohlášení

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

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala 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 bakalářské/diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 5.5.2012

Bc. Zuzana Havlová

.....

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu diplomové práce Prof. Ing. Jiřímu Koženému, CSc. za cenné profesionální rady a připomínky.

Obsah

| | |
|--|-----------|
| OBSAH..... | 7 |
| ÚVOD..... | 8 |
| SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK. | 9 |
| 1 HISTORIE..... | 10 |
| 2 INDUKČNÍ TAVENÍ VE STUDENÉM KELÍMKU..... | 11 |
| 2.1 POPIS INDUKČNÍHO TAVENÍ..... | 12 |
| 2.2 ZAŘÍZENÍ PRO INDUKČNÍ TAVENÍ..... | 14 |
| 2.2.1 Tavicí komora..... | 14 |
| 2.2.2 Zdroj energie..... | 15 |
| 2.2.3 Studené kelímky..... | 16 |
| 2.2.4 Chladicí systém..... | 20 |
| 3 ZÁKLADNÍ ROZDÍLY MEZI TAVENÍM ELEKTRICKY VODIVOU A ELEKTRICKY NEVODIVOU VSÁZKOU..... | 22 |
| 3.1 STARTOVACÍ PROCES..... | 22 |
| 3.2 TUHNOUCÍ PROCES..... | 23 |
| 3.3 VYUŽITÍ INDUKČNÍHO TAVENÍ NEVODIVÉ VSÁZKY..... | 24 |
| 4 URČENÍ GEOMETRICKÝCH PARAMETRŮ A KMITIČTU VHODNÉHO PRO TAVENÍ POŽADOVANÉHO MNOŽSTVÍ VSÁZKY..... | 26 |
| 4.1 ELEKTRICKÉ PARAMETRY PRO NEKONEČNĚ DLOUHÝ SYSTÉMU INDUKTORU A VSÁZKY..... | 27 |
| 4.2 ELEKTRICKÉ PARAMETRY PRO KRÁTKÉ SYSTÉMY INDUKTORU A VSÁZKY..... | 33 |
| ZÁVĚR..... | 39 |
| SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ..... | 40 |

ÚVOD

Předkládaná práce je zaměřena na vhodné kmitočty a geometrické parametry pro tavení různých materiálů ve studeném kelímku.

Je rozdělena do tří hlavních částí; první je zaměřena princip indukčního tavení ve studeném kelímku a popisu používaného zařízení; druhá část je zaměřena na hlavní rozdíl mezi tavením elektricky vodivé a elektricky nevodivé vsázky; ve třetí části jsou určeny geometrické parametry vsázky, frekvence použité pro různé materiály a jejich výpočty.

Seznam symbolů a zkratk

| | |
|----------------------------|--|
| ISMT | Induktive-Skull_Melting_Technologie |
| Skull | Pevná slinutá druhově specifická vrstva |
| δ_m | Elektromagnetická hloubka průniku do vsázky [m] |
| f | Frekvence [Hz] |
| m | Relativní průměr tavené válcové vsázky |
| H | Intenzita magnetického pole [$A \cdot m^{-1}$] |
| E | Intenzita elektrického pole [$V \cdot m^{-1}$] |
| J_0, Y_0, J_1, Y_1 | Besselovy funkce |
| C_1, C_2 | Integrační konstanty Besselových funkcí |
| Φ_m | Celkový magnetický tok [Wb] |
| η_t | Účinnost [%] |
| Z | Impedance [Ω] |
| $\cos\varphi_i$ | Účinič |
| P_i | Výkon [W] |
| S_i | Zdánlivý výkon [VA] |
| P_w | Ztráty tepla ve stěnách kelímku |
| P_b | Ztráty tepla ve dně kelímku |
| P_{rad} | Ztráty tepla zářením |

1 HISTORIE

Již ve 20. letech minulého století se začaly zkoumat možnosti řízení a ovlivňování procesů v tekutých kovech pomocí elektromagnetického pole. K dalšímu rozvoji došlo v 60. letech minulého století, kdy došlo k položení základů technologií jako elektromagnetické míchání tekutých kovů, jejich přečerpání, dávkování a odlévání, levitační tavení a další. V těchto technologiích se zpracovávalo jen malé množství materiálu, byla nákladná a často neefektivní.

V roce 1982 na konferenci v Cambridgi o teoretické a aplikované mechanice se tyto procesy zaštitily pod jeden název „Magnetohydrodynamika kovů“ a tím se výzkum těchto fyzikálních dějů přes dílčí odlišnosti dostal pod jeden rámeček. Pod pojmem Magnetohydrodynamika kovů se skrývají silové účinky zpravidla vnějšího magnetického pole na částice tekutého kovu, jímž protéká elektrický proud. [2]

V současné době si technický rozvoj v různých odvětvích klade stále vyšší nároky na parametry používaných materiálů, na jejich čistotu nebo mechanické vlastnosti. Ať už je to u náročných dílů pro energetiku, namáhané ventily spalovacích motorů nebo nekovových materiálů, mezi které patří technická keramika, optická skla nebo krystaly pro laserovou techniku. U vzniku těchto materiálů je důležitý proces tavení, tady jsou často požadovány teploty až 3000°C.

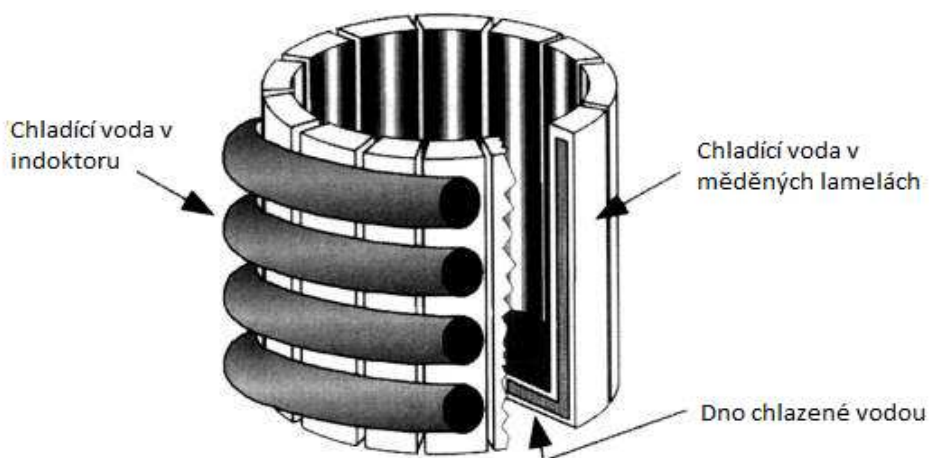
Indukční tavicí proces – Induktiv Skull-melting-technik (ISMT) – byl vyvinut v Institutu elektrotermických procesů Hannoverské univerzity. K hlavním přednostem této metody patří ekologická stránka procesu, čistota tavení a účinnost. [6]

2 INDUKČNÍ TAVENÍ VE STUDENÉM KELÍMKU

Pomocí indukčního tavicího procesu (ISMT) mohou být indukčně taveny jak vodivé, tak nevodivé anorganické materiály. Indukční tavicí proces (ISMT) je zatím uplatňován spíše v menších měřítkách, což znamená kilogramy až desítky kilogramů, a pro speciální aplikace jako, je např.: příprava superčistých kovů a slitin, které obsahují titan, hliník, zirkon a některé kysličníky vzácných zemin pro letecké, kosmické a lékařské účely. [2]

Indukční tavení ve studeném kelímku (ISMT) je unikátní proces, který má základ v bezkontaktním přenosu energie do tavené látky při vysoké frekvenci elektromagnetického pole o vysoké intenzitě. Pomocí tohoto elektromagnetického pole, které je určeno induktivní cívkou, je možné roztavit ve studeném kelímku i takové materiály jako jsou oxidy, sklo a keramika. Tyto materiály jsou při pokojových teplotách slabě vodivé. Proto se musí před samotným tavením predehřát, aby se zvýšila jejich vodivost. K tomu se používají speciální startovací procesy. Dno a stěny kelímku jsou intenzivně ochlazovány vodním chlazením. Díky intenzivnímu chlazení vzniká mezi taveninou a kelímkem pevná slinutá druhově specifická vrstva, která je nazývána „Skull“. Tato vrstva chrání taveninu před znečištěním.

Studený kelímek je vyroben z měděných lamel, které jsou každá zvlášť ochlazovány vodou, také je ochlazován vodou i induktor, který je z dutého měděného vodiče. Elektromagnetické pole vniká do vsázky mezerami mezi lamelama. Induktor je spirálovitě navinut na venkovní straně kelímku obr. [2.1]



Obr. 2.1 Chlazení studeného kelímku [7]

2.1 Popis indukčního tavení

Po vyrobení první dávky taveniny a dostatečném zvětšení jejího objemu se čistě indukčně nataví výchozí materiál, až zůstane mezi taveninou a kelímkem úzká pevná druhově specifická vrstva „Skull“.

Se zvyšující se teplotou stoupá elektrická vodivost materiálů. „Skull“ drží oproti tavenině nepatrnou vodivost a proto je pro elektromagnetické pole prakticky neznatelná. Proto je všechna energie z vysokofrekvenčního generátoru zachycena v tavenině a proto vždy zbyde pevná vrstva z výchozího materiálu „skull“. Tato vrstva zamezuje kontaktu mezi kelímkem a taveninou a také zamezuje klesání teploty v tavenině, které je způsobeno ochlazováním stěn a dna kelímku. Zamezení kontaktu mezi kelímkem a taveninou vede k extrémní chemické čistotě taveniny. Tímto způsobem lze vyrábět superčisté homogenní slitiny, můžeme také řídit i řadu dalších parametrů např. přesné nastavení transformační teploty pro materiály s tvarovou pamětí jako je slitina Ni-Ti.

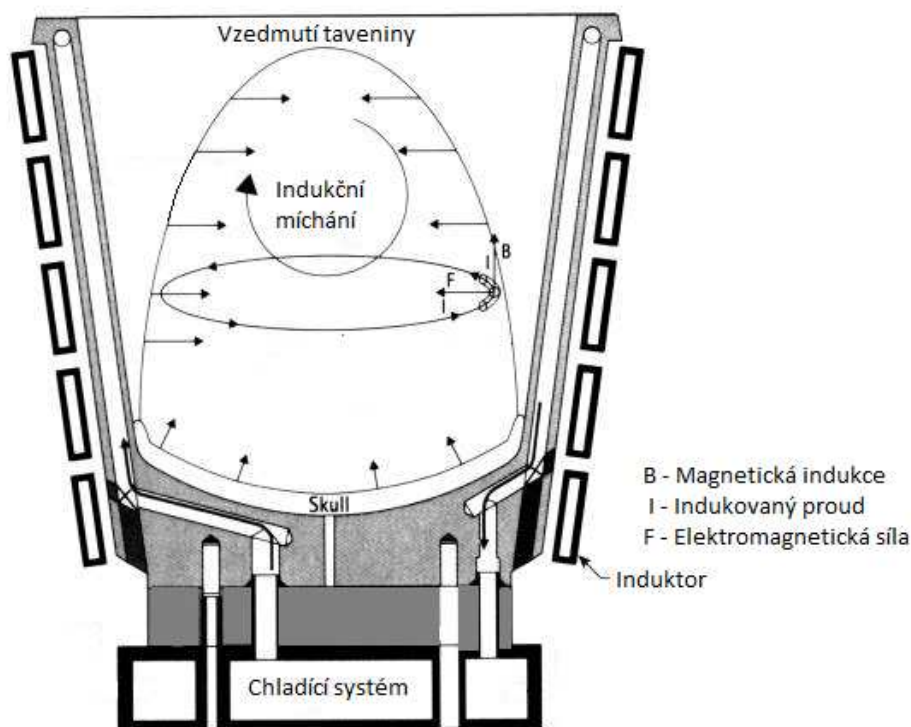
Tepelné proudění se udržuje ve vnější oblasti taveniny (Skin efekt). Tím je ve vnější oblasti vyšší teplota i vodivost. V důsledku toho vnější oblast částečně brání vniknutí elektromagnetického pole do vnitřní oblasti taveniny. V tomto případě musí být vedením a prouděním tepla, teplo dodáno do vnitřní oblasti.

Rozhodující roli pro stabilitu procesu tavení hraje teplotní rovnováha v kelímku. energii, o kterou se přichází tepelnými ztrátami při ochlazování stěn a dna kelímku, musíme permanentně přivádět z vysokofrekvenčního generátoru tak, aby tavenina nestihla ztuhnout. Hlavně u malých objemů taveniny mohou už menší odchylky od teplotní rovnováhy způsobit částečnou nebo úplnou krystalizaci taveniny. Odchylka od teplotní rovnováhy může být způsobena např. stoupáním teploty chladicí vody. Pokud objem taveniny spadne pod spodní kritickou hranici, dojde k přerušení procesu tavení, který už poté nemůže být obnoven ani pomocí zvýšení výkonu generátoru.

Během tavení musí být s ohledem na objem tavenina postupně doplňována dalším výchozím materiálem. Při tomto procesu se na povrchu vytvoří pevná krusta, která omezuje ztráty sáláním z povrchu taveniny. Aby se dal doplnit další základní materiál, musí být tato pevná krusta po každé znovu mechanicky narušena, k tomu se používá keramická nebo kovová tyč.

Výchozí materiál (např. u keramiky se jedná o prášek) se v závislosti na své hustotě může objemově zmenšit až o 25% svého původního objemu. Když je dosaženo stavu rovnováhy může být udržen po dobu, po kterou unikají rozpuštěné plyny z taveniny, nebo než dojde k úplné homogenizaci látky [1].

Při mimořádně vysokých procesních teplotách dojde k vyčištění výchozího materiálu, ale ten se při těchto teplotách při smíchání se vzduchem relativně rychle vypařuje. Neplatí to pouze pro prchavé sloučeniny (např. Cl, S a K) a alkalických kovů, ale také rovněž pro mnohé těžké kovy. Např. u taveniny Al_2O_3 , která je přehřátá na 200K, vyprchá 80% základního chromového dílu [1]. Pokud je povrch taveniny uzavřen krustou, je zamezeno odpařovacím procesům.



Obr. 2.2 Průřez studeným kelímkem, působení elektromagnetických sil [7]

2.2 Zařízení pro indukční tavení

Pro popis součástí zařízení pro technologii procesu indukčního tavení bude použito zařízení, které bylo vyvinuto na Institutu elektrotermických procesů Hannoverské univerzity. Toto zařízení může být použito ke komplexním tavícím procesům, které jsou v této práci popsány. Zařízení se sestává z tavící komory (pece), vysokofrekvenčního zdroje energie, tavící jednotky, systému chlazení a řídicích systémů.

2.2.1 Tavící komora

Jako první bude popsána tavící komora. Jedná se vlastně o vakuovou komoru, která je chlazená ze dvou stran. Má tvar položeného válce o délce 1350 mm a průměru 1700 mm. Uzávěr je chlazen vodou, což umožňuje jednoduchý přístup dovnitř komory. Během tavby je komora uzavřena, aby bylo zabráněno úniku silného tepelného záření a elektromagnetického pole a bylo tím ochráněno zdraví obsluhy. V uzavřené komoře je možné provádět tavící proces v rozdílných atmosférách (vzduch, redukční plyny, vakuum). K vytvoření vakua se používá tzv. vakuová pumpa.

Při tavícím procesu dochází ke změně hustoty taveného materiálu. Počátek přeměny je realizován ve vzduchu s jednoduchými prostředky. Ovšem u přeměny realizované ve vakuu je zapotřebí redukčního zařízení, které těsně přiléhá na vakuovou komoru. K použité vakuové komoře je použita ještě zádržná komora se sedmi otáčivými komorami o objemech 0,5l. Prach a nežádoucí plyny, které vznikají během tavby ve vzduchu uvnitř kelímku, jsou z velké části odsávány komerčním, průmyslovým vysavačem. Tím je zajišťováno, že můžeme kontrolovat průběh tavby.

Uvnitř tavící komory jsou připevněné otáčivé deskové, elektricky vodivé vedení, na kterých je položena tavící jednotka a kondenzátorová baterie, která slouží ke kompenzaci jalového výkonu.

Pro provoz vakuové komory se používají i další součásti jako diverzní průhledné sklo nebo průrazky k prorážení krusty tvořené na povrchu taveniny během tavného procesu.

2.2.2 Zdroj energie

Jako zdroje energie se používají vysokofrekvenční generátory resp. měniče frekvence. Mohou to být generátory pracující na bázi polovodičových součástek, jako jsou tyristory nebo tranzistory. Tyto generátory jsou používány pro vysoké výkony a frekvence. Obsahují MOSFETy a IGBT tranzistory, které rychle spínají a mají vysoké napětí při nízkých proudech. Nevýhodou takových generátorů je jejich krátká životnost cca 2000 – 4000 hodin a velmi nízká účinnost (50% - 60%), která klesá s přibývajícím délkou životnosti. Nebo to mohou být tranzistorové měniče, které na rozdíl od elektronkových generátorů dosáhnou při jmenovitém výkonu až 90% účinnosti, mají vyšší spolehlivost a jednodušší obsluhu. Tranzistorové měniče se používají pro nižší frekvence. Zdroje energie musí u Indukčního procesu tavení (ISMT) pracovat stabilně na velkém rozsahu napětí tzn., že jak při startovacím procesu tak při samotné tavně by nemělo dojít ani k malému výkyvu výkonu. To se týká pěstování krystalů, kdy i při nízkém kolísání výkonu může dojít k jejich narušení.

Elektronkový generátor se používá pro vysoké frekvence v oblastech MHz. Frekvence o velikosti MHz ovlivňuje hloubku pronikání elektromagnetického vlnění do vsázky. Kromě toho potřebuje elektronkový generátor nižší napětí a je schopný při poklesu zatížení dodat potřebné napětí. Tranzistorové měniče pracují s frekvencí maximálně 1 MHz, pro vyšší frekvence nebyly postaveny. Ovšem oproti elektronkovým generátorům jsou při stejné frekvenci a stejném výkonu kompaktnější a cenově výhodnější.[1]

2.2.3 Studené kelímky

Existují dvě varianty studeného kelímku. U první varianty tvoří induktor samotná stěna kelímku, ta musí být intenzivně chlazena, jde o tzv. induktorový kelímek. Druhá varianta je studený kelímek se separovaným induktorem, jedná se o kelímek tvořený z dutých měděných lamel, kterými protéká chladicí voda, a induktor je umístěn vně kelímku.

- **Kelímek se separovaným induktorem**

Studený kelímek musí být transparentní pro elektromagnetické pole a to proto, aby mohla být do taveniny přivedena energie. Musí být buď vyroben z nějakého

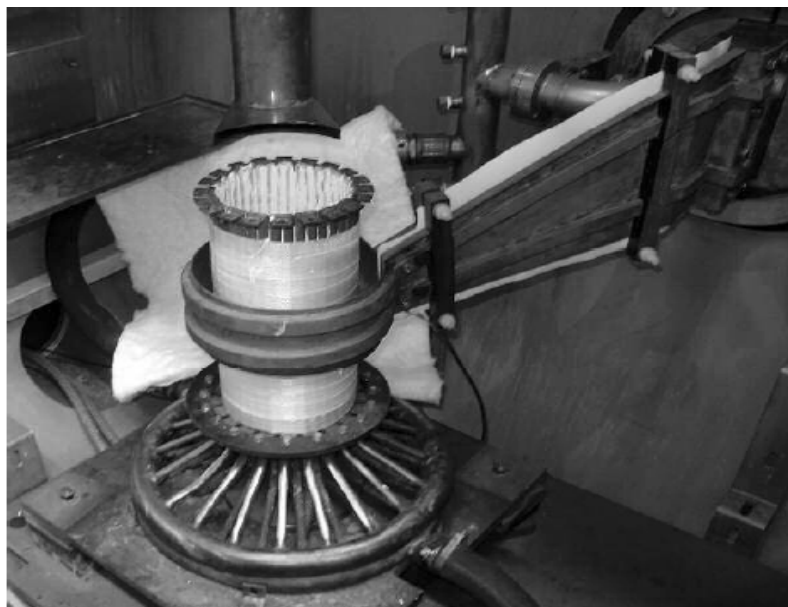
nevodivého materiálu, nebo kovového materiálu odděleného drážkami. Pokud je studený kelímek z kovového materiálu, jsou jeho stěny zhotoveny z jednotlivých lamel, které nejsou ve vzájemném kontaktu. Mezerami mezi lamelami vniká elektromagnetické pole do vsázky. A také v každé jednotlivé lamele vznikají vířivé proudy, tyto proudy jsou orientované proti indukovanému proudu. Kvůli tomu, že jsou lamely odděleny mezerami, se na stěnách lamely z vnitřní strany kelímku uzavře proudová smyčka, kde směr proudu odpovídá indukovanému proudu. Vnitřní stěna studeného kelímku tím funguje jako dodatečný induktor, který indukuje proudy do taveného materiálu.

Vysoký počet drážek také umožňuje zmenšení rozestupu mezi lamelami. Studený kelímek by měl být z materiálu, který má vysokou tepelnou vodivost. A to kvůli vytvoření úzké pevné druhově specifické vrstvy „skull“, která vzniká při ochlazení stěn kelímku. Jako chladicí médium se nejčastěji používá voda. Jako materiál kelímku se nejčastěji používá měď.

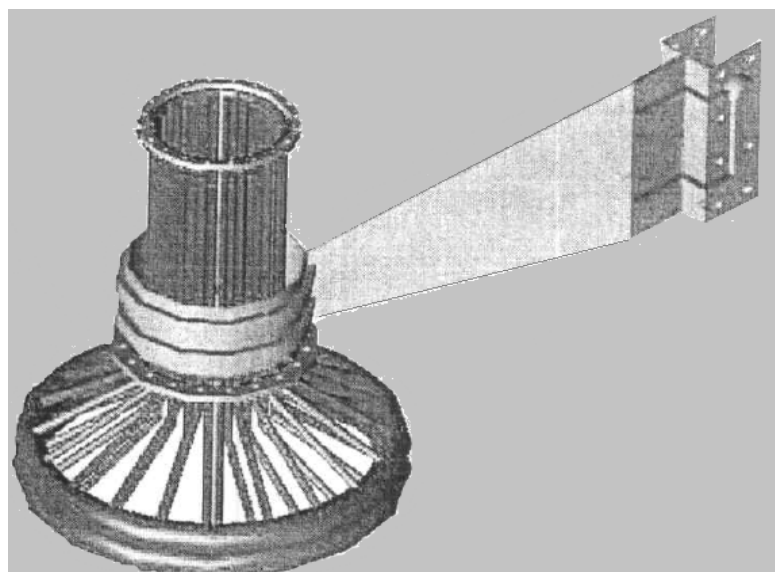
Co se týká velikosti kelímku můžeme rozlišovat dvě velikosti. Závislé na parametrech použitého měniče a fyzikálních a chemických vlastnostech taveného materiálu.

- **Malý studený kelímek** se sestává ze 40 měděných lamel kruhového průřezu. Vnější průměr jedné lamely je 12mm. Lamely jsou párovitě spojeny na vrchním konci a spodním konci jsou spojeny s vodními kolektory. Spojení s kolektory je realizováno pomocí měděných trubek. První „vstupní“ kolektor rozděluje chladicí vodu do jednotlivých lamel a druhý kolektor je výstupní, kterým se vrací voda z lamel zpět do chladicího systému. Lamely jsou uspořádány do kruhu, svým uspořádáním tvoří dutý válec. Tento dutý válec je vlastní studený kelímek o vnějším průměru 15 cm. Celková výška kelímku je 56 cm. Jako induktor jsou použity závity indukční cívky, jejichž počet a rozstup musí být navrhnut tak, aby se docílilo maximální elektrické účinnosti. Musí být přihlédnuto ke geometrii kelímku, k vodivosti taveniny, k objemu taveniny a k rozdělení teplot v tavenině. Induktor pro malý studený kelímek, který byl navrhnut na universitě v Hannoveru, byl použit 11cm vysoký o průměru 22cm. Je vyroben z měděného 3mm plechu. Z vnější strany jsou k induktoru připájeny měděné trubky, aby mohl být chlazen.

Dno kelímku je ze dvou kruhovitých masivních měděných desek, na jejichž vnitřní strany byly vyfrézovány kanály pro chlazení a po té byly sletovány. V malém studeném kelímku se vyrobí objem taveniny o dvou až třech litrech.

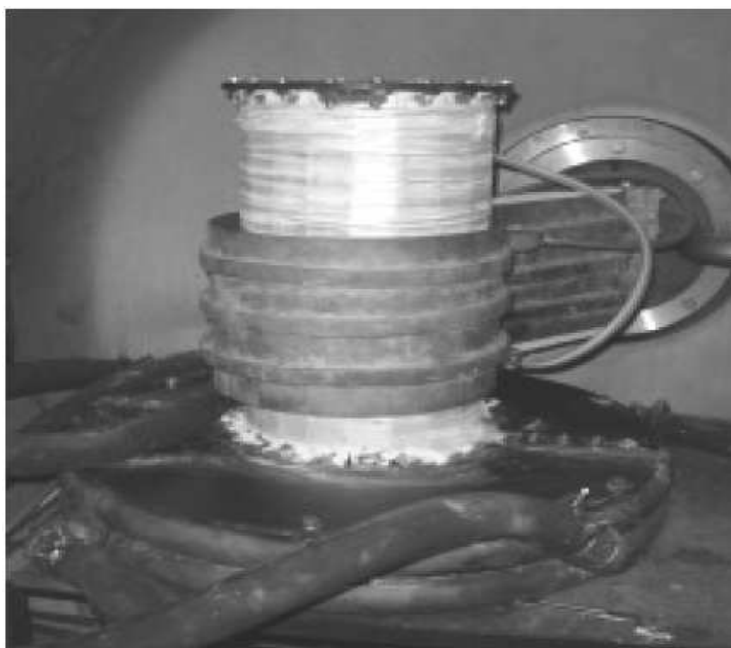


Obr. 2.3 Malý studený kelímek použitý na univerzitě v Hannoveru

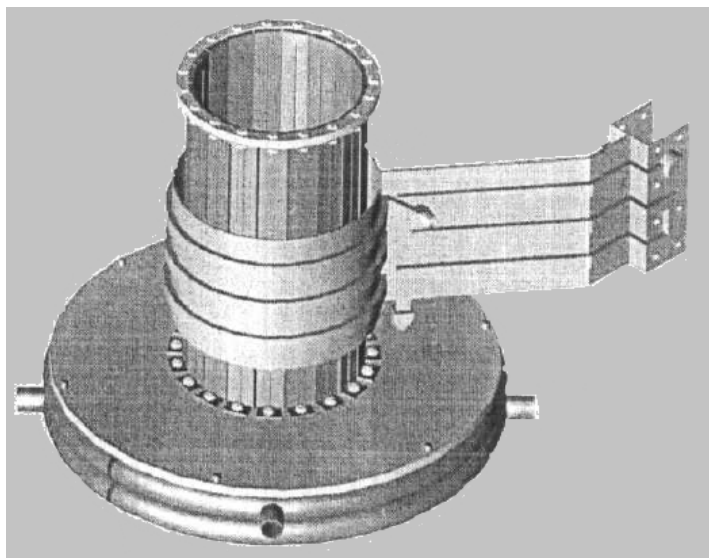


Obr. 2.4 Malý studený kelímek vymodelovaný pomocí systému CAD [1]

- **Velký studený kelímek** je zkonstruován podobně jako malý. Rozdíl je, že se stěna kelímku skládá z 38 lamel vyrobených z obdélníkových měděných trubek o velikosti 22x11x3 mm. Vždy 2 lamely jsou na horní straně spolu sletovány a dole spojené vodním kolektorem. Toto spojení je realizováno pomocí hadic. Hadice jsou chráněny před vystřikující taveninou z kelímku deskou z izolačního materiálu. Výška kelímku je 64 cm a může být naplněn maximálně do výšky 50cm. Vnitřní průměr kelímku je přibližně 27cm. Induktor pro velký studený kelímek je také jedno závitový o výšce 27cm a vnitřním průměrem 34cm. Na něm jsou naletovány 3 paralelní trubky, aby mohl být induktor intenzivně ochlazován. Měděné dno je opatřeno drážkou, v které je naletována měděná trubka pro průchod chladicí vody. Ve velkém studeném kelímku se vyrobí objem taveniny o 15 – 20 litrech.[1]



Obr. 2.5 Velký studený kelímek použitý na univerzitě v Hannoveru



Obr. 2.6 Velký studený kelímek vymodelovaný pomocí systému CAD [1]

▪ Induktorový kelímek

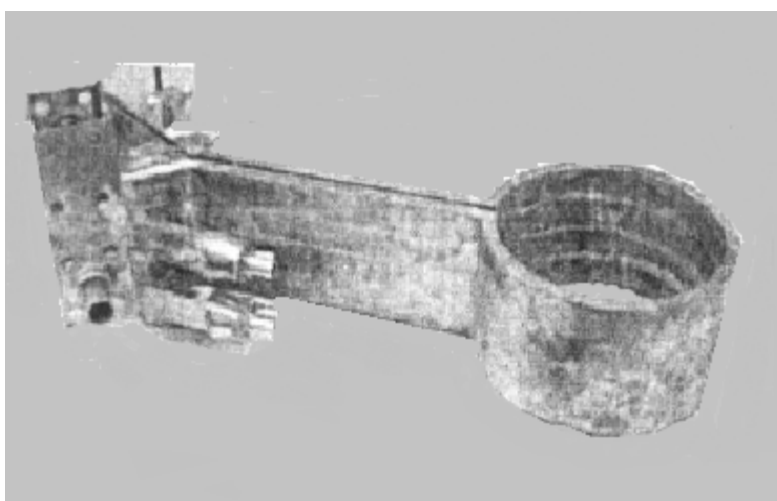
Induktorový kelímek je proveden jako jednosmyčkový prstencový induktor. V induktorovém prstenu se nachází mezera v místě, kde je připojen vysokofrekvenční měnič. Z dolní strany se uzavře buď dnem s vysoce tavného elektricky vodivého materiálu, nebo se použije vodou chlazené dno. Induktorový kelímek nefunguje pouze jako induktor, ale také současně tvoří tavící kelímek. Materiál, který bude taven, se dá přímo do kelímku a v něm je roztaven. Tímto způsobem lze tavit materiály s bodem tavení až 3000°C, také má vyšší elektrickou účinnost, jelikož nevznikají ztráty v dodatečném kelímku.

Ochranná pevná „skull“ vrstva má oproti tavenině vysoký elektrický odpor. Přebírá zde izolující funkci. Pokud by byla příliš tenká mohlo by dojít ke zkratům přes taveninu. K tenkým ochranným „skull“ vrstvám vedou vysoká lokální elektromagnetická pole, obzvláště u přívodové mezery vedou k teplotním převýšením.

Indukční kelímek popisovaného systému se skládá ze 4 společně sletovaných obdélníkových měděných trubek o průřezu 40 x 16 x 3mm. Každá trubka je zvlášť ochlazována vodou, aby bylo zajištěné stejnoměrné chlazení přes celou výšku kelímku. Výška kelímku je 16 cm a vnitřní průměr 25 mm. Šířka mezery uvnitř na induktorovém prstenu je 12 mm, zužuje se podél přívodu na 2mm. Mezi přívody se

nachází jako izolace teflonová fólie a přímo na induktorovém prstenci se mezera vyplní výchozím materiálem.[1]

Aby nedocházelo ke kontaktu mezi dnem kelímku a taveninou, používají se chlazená dna na místo nechlazených. Je to masivní měděné dno chlazené vodou. Mezi měděným chlazeným dnem a stěnou kelímku je umístěn vysoce tavný keramický kroužek. Na povrch vnitřní strany indukčního kelímku je termicky nanесena vrstva oxidu hlinitého, aby byly přerušeny zkratové proudy přes vodivou taveninu.



Obr. 2.7 Induktorový kelímek

2.2.4 Chladič systém

Jak už bylo zmíněno v kapitole 2 tak je ochlazována každá lamela kelímku zvlášť, také je ochlazován induktor a dno kelímku. Kromě výše zmiňovaných musí být ochlazovány i všechny komponenty, které jsou vodivé. Vznikající ztráty Joulovým teplem lze omezit tím, že toto teplo musí být z vodivých komponentů odvedeno, aby se předešlo přetížení a následně zničení. To platí hlavně pro zmíněné části kelímků. I u částí jako vakuová komora nebo dveře vakuové komory, kde může dojít k zahřátí vysokým tepelným zářením vycházejícím z taveniny, a proto je i těchto částí nutné chlazení.[1]

Každý komponent zařízení pro indukční tavení se ochlazuje vodou zvlášť. Za každým komponentem je instalován měřič průtoku chladicí vody a teplotní sensor.

3 ZÁKLADNÍ ROZDÍLY MEZI TAVENÍM ELEKTRICKY VODIVOU A ELEKTRICKY NEVODIVOU VSÁZKOU

Jak už bylo zmíněno indukčním procesem tavením (ISMT) ve studeném kelímku můžeme tavit i elektricky nevodivé materiály. Jedním z rozdílů při indukčním tavením elektricky nevodivé vsázky je, tyto materiály jsou izolanty při pokojových teplotách, ale při vysokých teplotách mají velmi rozmanité elektrické vodivosti. Proto musí být před samotnou tavbou přehřátý. A poté mohou být také indukované proudy v tavené látce. Vířivé proudy způsobí zvyšování teploty až k teplotě bodu tavy. Tímto způsobem můžeme tavit látky jako mnoho oxidů (Al_2O_3 , ZrO_2 , MgO a dalších) a také mnoho skel a keramik.

Postup indukčního tavení pro elektricky slabě vodivé materiály se sestává v podstatě ze tří částí:

- 1) Přehřátí elektricky vodivého materiálu vhodným startovacím procesem
- 2) Natavení základního materiálu až k požadovanému objemu pomocí vysokofrekvenčních elektromagnetických polí a vytvoření pevného druhově specifického materiálu kolem taveniny tzv. „Skull“ (viz. kapitola 2.1)
- 3) Spontánní tuhnutí nebo pomalá krystalizace taveniny

3.1 Startovací procesy

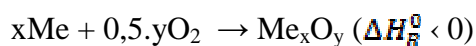
Elektricky slabě vodivé materiály musí být před samotným procesem tavení přehřátý. V této kapitole budou popsány některé startovací procesy. Od začátku musí být jasné, jestli teplota bude stoupat v objemech taveniny nebo jen povrchově. Povrchové zahřívání má jeden hlavní zápor a to je, že zde vzniká slabé spodní vaření. [1] K povrchovému ohřevu může sloužit například plynový hořák. Tavná hloubka je v těchto případech pouze několik milimetrů.

Základní popis několika startovacích procesů:

- Elektricky nevodivá vsázka může být přehřáta pomocí světelné energie. K tomu se používá např.: stojací lampa, plynová zařízení nebo laserové vybavení. Používá se k povrchovému ohřevu, zde dochází k velmi chemicky čistým procesům. Nevýhodou je, že se musí pomoci optických systémů světlo

zaostřit, což vede k velmi drahým konstrukcím.

- K dalšímu startovacímu procesu může být využit ohřev plameny buď z plynového, nebo z plazmového hořáku. Plameny působí přímo na povrch taveniny. U tohoto startovacího procesu je nevýhodou, že při kontaktu mezi plynem a spaliny nebo spaliny a vlastní vsázkou občas vznikají chemické reakce. Tzn. že zde už nedochází k chemicky úplně čistým procesům. Také se může stát, že když je základní materiál ve formě prachu může být plamenem část vyfouknuta z kelímku.
- Také může být využito elektrického oblouku, kde je využíváno grafitových nebo iridiových elektrod. Oblouku se využívá, jestliže stykem s elektrodami nevznikají reakční produkty (nečistoty). U tohoto startovacího procesu musí být průměr tavicího kelímku dostatečně veliký, s ohledem na průchodnost k tavenině. Při upotřebení grafitových elektrod vnikne popel a některé oxidy mohou být redukovány na karbidy a to vede k znečištění taveniny.
- Startovací proces může být realizován také přidáním vodivé látky do vsázky. Ve vsázce je potopen váleček z vysoce tavného materiálu jako Wolfram, Molybden nebo Iridium. V tomto případě samozřejmě dochází ke kontaktu mezi vsázkou a taveninou. Proto může být tato metoda využita pouze tam, kde nedochází ke kontaminaci taveniny nebo pokud nehraje čistota taveniny roli.
- Další metoda, která se využívá při syntéze skla pomocí indukčního tavení, je následující. Tady se skleněné části, které jsou snadno tavitelné kvůli své vysoké elektrické vodivosti a nízké tavné teplotě, taví v platinovém kelímku a po té vlijí do studeného kelímku. Tyto komponenty mohou být přidávány pouze pozvolně až do té doby než dojde k očekávanému propojení skla. Zároveň s tím musí teplota skleněné taveniny odpovídat likvidní teplotě jednotlivých skleněných komponentů.
- Nejjednodušší startovací metoda u indukčního tavení je metoda, kde dochází k uvolnění energie k ohřevu od oxidačních materiálů v důsledku silné exotermické reakce oxidace kovů. Toto je vhodné jako startovacího materiál k tavbě oxidů. Všeobecná reakční rovnice oxidů (O) a kovem (Me):



Při čemž je ΔH_R^0 molární reakce za normálních podmínek.

Malá množství materiálů (zhruba 0,1% hmotnosti výchozího materiálu) se ve formě prachu nebo malých kousků vkládají do vsázky a další její vrstvou jsou zakryty, aby se zamezilo tepelným ztrátám. Velikost kousků vkládaného materiálu závisí na zvolené frekvenci. Musí být zvolena malá velikost, aby vznikla velká plocha pro chemickou reakci.

Například může být použit jako startovacím materiál přímo hliník u taveniny oxidu hliníku nebo při tavbě zirkonu kovové zirkonium. [1] Při zapojení vysokofrekvenčních měničů se startovací materiál rozehřívá na základě působení elektromagnetických polí, díky kterým se indukují v materiálu vířivé proudy a tím dochází k ohřátí. Dochází i k ohřívání okolí výchozího materiálu, kde rozehřátý kov oxiduje a mísí se s taveninou jako oxid, aniž by došlo k jeho znečištění. Bod varu zvoleného startovacího materiálu nesmí být pod bodem tavení vsázky, protože by mohlo dojít k vypaření startovacího materiálu a poté by nedošlo k samotnému procesu tavení. Tzn., že například u tavení oxidu hořčíku (tavný bod 2800°C) nemůže být použit jako startovací materiál Magnesium (bod varu 1120°C). U oxidačních systémů se dvěma, třemi nebo i více komponenty musí být zvolen jako startovní materiál k oxidům nějaký kov, který nebude mít bod varu vyšší než tavení jakéhokoliv jiného oxidu z tohoto systému.

3.2 Tuhnoucí proces

Po odpojení vysokofrekvenčního zdroje energie vzniká velmi rychlá a spontánní krystalizace v tavenině, vznikají polykrystalické kusy tavenin nebo se vytváří skleněné masy. Správné krystalizaci dopomáhá dlouhá doba tuhnutí, které může být dosaženo různými cestami např. pomalé snižování hladiny v kelímku s indukční cívkou s ohledem na ústění induktoru. Ke snižování hladiny se použije pohyblivého dna kelímku.

Pokud k tavnému procesu nedochází ve vakuu, tak probíhá v plynném okolí. Protože dochází k reakci mezi molekulami plynu a taveninou, je důležité prostředí, ve kterém se tavící proces provádí. Jsou dva důležité stavy:

- Reakční komponenty nejsou volně v tavenině a reakční povrch je uzavřen

mezi atmosférou a taveninou. Tzn., že reakční rychlost je určena pronikáním plynných molekul v případě, že se nejedná o tavný pohyb. Rychlost je ovlivněna také viskozitou taveniny.

- V druhém případě musí být počítáno s tím, že jsou reaktivní plynné komponenty v tavenině volně. Což znamená, že nelze určit rychlost pomocí difúzních procesů.

Při rychlém chladnutí taveniny se sice vypaří část kyseliny, ale vznikají také póry a trhliny, kde se nachází mnoho nevyprchaných kyselin. Stává se to obzvláště u oxidačních systémů Al_2O_3 . Pokud dochází k tuhnutí taveniny v dusíkaté atmosféře, netvoří se žádné póry ani trhliny.

Při dlouhém chladnutí vzniká čistící efekt, kdy tavenina pomalu krystalizuje a vytlačuje na povrch nečistoty, které jsou ve výchozím materiálu.

3.3 Využití indukčního tavení nevodivých materiálů

Jako příklady využití tavení nevodivých materiálů může být odvedeno například zasklívání radioaktivních materiálů nebo pěstování krystalů.

Zasklívání radioaktivních materiálů

V současné době jsou používány v průmyslu k zasklívání radioaktivních odpadů keramicky obložené skleněné pece, které přímo ohřívají a také taví skleněný materiál, za pomoci vodou chlazených elektrod. Radioaktivní materiály se spojují do skleněných bloků, které mají výbornou odolnost proti korozi. Jako matrice jsou většinou používána borokřemičitá skla, ale jsou zkoumány další keramické a sklokeramické materiály. Tyto materiály mohou díky své neuspořádané struktuře na sebe vázat všechny prvky, které se vyskytují v palivových článcích. Zařízení k zasklívání existují v USA, ve Francii, Japonsku a Rusku.

Ve Francii bylo vyvinuto indukční tavící zařízení, které funguje v tzv. dvou krokovém procesu zasklívání v teplém kelímku. Nejdříve jsou kalcinovány odpady rozpuštěné plavením (tzn. vysušeny) a v dalším kroku jsou roztaveny společně se sklem. Výhodou teplého kelímku oproti tavícím pecím je menší objem taveniny, tím zkrácení doby čekání. Nevýhodou je omezení procesní teploty na 1150°C . [1]

Pro zasklívání vysoce radioaktivního materiálu bylo ve Francii vyvinuto

zařízení, kde dochází k zasklívání odpadu pomocí indukčního tavení ve studeném kelímku. Toto zařízení je ovšem používáno pouze pro zasklívání nukleárních odpadů. Existuje také dvou krokové zařízení, kde byl zaměněn teplý kelímek za studený.

Indukční tavení ve studeném kelímku je technologie, která je kompaktnější, cenově výhodnější a vytváří méně škodlivých látek. Tato technologie umožňuje tavení při vyšších procesních teplotách a tím se zvětšuje výběr možných skleněných a keramických matric k zasklívání nukleárních odpadů. [1]

Zařízení k zasklívání, které pracuje na základě studeného kelímku je od počátku roku 2000 v provozu v Rusku v závodu na přepracování radioaktivního materiálu. Toto zařízení funguje pro kapalné a slabě radioaktivní odpady.

Pěstování krystalů

Se znalostmi mineralogického složení krystalů začala první správná výroba (pěstování) krystalů. Již na počátku 19. století se podařilo vyrobit malé drahokamy. Ovšem krystaly, které byly kvalitativně na výši, byly vypěstovány až na přelomu století bez kelímkové metody tavby v plamenu. V moderních materiálech a technologii hrají jednotlivé krystaly z vysoce tavených oxidů důležitou roli. Například jsou používány jako aktivní média v laserových přístrojích, v nelineárních optických zařízeních a mikro elektrických komponentech.

Uměle vypěstované krystaly mají důležité vlastnosti jako pevnost, tvrdost, lom světla, barvu (syntetické drahokamy), elektrickou vodivost, transparentnost a jiné vlastnosti. Mají tavný bod až nad 2000°C.

Krystaly se tvoří většinou z jejich vlastních tavenin, při vysokofrekvenčním indukčním tavení ve studeném kelímku.

Průmyslové využití výroby krystalů je rozděleno do 4 skupin. Výroba z taveniny (studený kelímek), výroba z roztoku, výroba z plynné formy a výroba za použití keramiky.

4 URČENÍ GEOMETRICKÝCH PARAMETRŮ A KMITOČTU VHODNÉHO PRO TAVENÍ POŽADOVANÉHO MNOŽSTVÍ VSÁZKY

Pro popsání elektromagnetických dějů, které probíhají při indukčním tavením ve studeném kelímku, a posléze určení geometrických parametrů a kmitočtů vhodných pro tavení požadovaného množství vsázky je zapotřebí pochopit elektromagnetické zákony a souvislosti.

Pro popis elektromagnetického pole se používají Maxwellovy rovnice, které se používají jak v integrálním tak v diferenciálním tvaru. Integrální tvar popisuje elektromagnetické pole jisté oblasti a diferenciálním tvaru popisují bod v této oblasti. Pro náš popis budou použity Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru:

První Maxwellova rovnice – Amperův zákon

$$\mathbf{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (4.1)$$

Druhá Maxwellova rovnice – Zákon elektromagnetické indukce

$$\mathbf{rot} \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (4.2)$$

Třetí Maxwellova rovnice – Gaussův zákon elektrostatiky

$$\mathbf{div} \mathbf{D} = \rho \quad (4.3)$$

Čtvrtá Maxwellova rovnice – Zákon spojitosti indukčního toku

$$\mathbf{div} \mathbf{B} = 0 \quad (4.4)$$

Pro homogenní médium platí tyto vztahy:

$$D = \varepsilon \cdot E \quad (4.5)$$

$$B = \mu \cdot H \quad (4.6)$$

$$j = k \cdot E \quad (4.7)$$

4.1 Elektrické parametry pro nekonečně dlouhý systém vsázky a induktoru

Pokud jsou konstant ε , μ a k v porovnání s velikostí pole prakticky neměnné, dostávají Maxwellovy rovnice tento tvar:

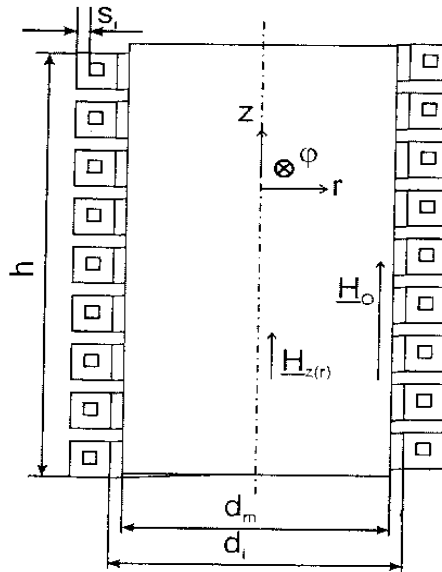
$$\text{rot}(\text{rot}H) + j\omega\mu kH = 0 \quad (4.8)$$

$$\text{rot}(\text{rot}E) + j\omega\mu kE = 0 \quad (4.9)$$

Na obr. 4.1 je válcový systém vsázky a induktoru. Pro zjednodušení výpočtů je zavedeno \underline{H} pouze jako Z-složka a \underline{E} jako φ -složka. Velikost pole je závislá na poloměru kelímku r a z toho vyplývá, že válcové souřadnice mohou být udány [1]

$$\frac{d^2 H_z}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dH_z}{dr} - j\omega\mu k H_z = 0 \quad (4.10)$$

$$\frac{d^2 E_\varphi}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dE_\varphi}{dr} - \frac{E_\varphi}{r^2} - j\omega\mu k E_\varphi = 0 \quad (4.11)$$



Obr. 4.1 Průřez nekonečně dlouhým systémem vsázky a induktoru [1]

Podle lit. [1] převede Schluchtzkoho konstanta rovnici 4.10 do nového tvaru

$$\frac{d^2 H_z}{d(\sqrt{-jm})^2} + \frac{1}{\sqrt{-jm}} \cdot \frac{dH_z}{d(\sqrt{-jm})} - H_z = 0 \quad (4.12),$$

kde

$$m = \frac{\sqrt{2}r}{\delta_m} \quad (4.13)$$

$$\delta_m = \frac{1}{\sqrt{\pi\mu_m k_m f}} \quad (4.14)$$

δ_m ... Elektromagnetická hloubka pronikání elektromagnetického vlnění do elektricky vodivé vsázky

m ... relativní průměr tavené válcové vsázky

Rovnice vyjadřující síly pole za pomoci Besselových funkcí podle lit. [1] jsou vyjádřeny takto

$$\underline{H}_z = C_1 J_0(\sqrt{-jm}) + C_2 Y_0(\sqrt{-jm}) \quad (4.15)$$

$$\underline{E}_\varphi = \frac{\sqrt{-jm}}{k_m \delta_m} \left[C_1 J_1(\sqrt{-jm}) + C_2 Y_1(\sqrt{-jm}) \right], \quad (4.16)$$

kde

J_0, Y_0, J_1 a $Y_1 \dots$ Besselovy funkce (jejichž znění nalezneme v lit. [8])

C_1 a $C_2 \dots$ integrační konstanty Besselových funkcí

Pro $r = 0$ platí, že $Y_0, Y_1 \rightarrow -\infty$, aby síly pole při $r = 0$ nebyly nekonečně velké musí být $C_2 = 0$.

Platí, že při $r = r_m$ (na povrchu vsázky) je H_z stejně velké jako vnější intenzita magnetického pole H . Tohle může být využito pro výpočet intenzity magnetického pole v rámci nekonečně dlouhé cívky

$$\underline{H}_0 = \frac{nI_l}{h} \quad (4.17)$$

$h \dots$ výška popisovaného úseku v nekonečně dlouhém systému

Z toho vyplývá konstanta

$$C_1 = \frac{H_0}{J_0(\sqrt{-j}m_m)}, \quad (4.18)$$

kde

$$m_m = \frac{\sqrt{2}r_m}{\delta_m} = \frac{d_m}{\sqrt{2}\delta_m} . \quad (4.19)$$

Tím se rovnice (4.15) a (4.16) dostávají do tvarů

$$\underline{H}_z = \underline{H}_0 \frac{J_0(\sqrt{-j}m)}{J_0(\sqrt{-j}m_m)} \quad (4.20)$$

$$\underline{E}_\varphi = \frac{\sqrt{-2j}H_0}{k_m \delta_m} \frac{J_1(\sqrt{-j}m)}{J_0(\sqrt{-j}m_m)} , \quad (4.21)$$

kde

$$J_0(\sqrt{-j}m) = \text{ber } m + \text{bei } m \quad \text{a} \quad \dot{J}_0(\sqrt{-j}m) = \text{ber}' m + \text{bei}' m = -J_1(\sqrt{-j}m),$$

po dosazení do rovnic (4.20) a (4.21)

$$\underline{H}_z = \underline{H}_0 \frac{\text{ber } m + j\text{bei } m}{\text{ber } m_m + j\text{bei } m_m} \quad (4.22)$$

$$\underline{E}_\varphi = - \frac{\sqrt{2}H_0}{k_m \delta_m} \frac{\text{ber}' m + j\text{bei}' m}{\text{ber } m_m + j\text{bei } m_m} \quad (4.23)$$

Rovnice pro výpočet hodnot intenzity magnetického a elektrického pole jsou

$$H_z = H_0 \sqrt{\frac{\text{ber}^2 m + \text{bei}^2 m}{\text{ber}^2 m_m + \text{bei}^2 m_m}} \quad (4.24)$$

$$E_\varphi = \frac{\sqrt{2}H_0}{k_m \delta_m} \sqrt{\frac{\text{ber}'^2 m + \text{bei}'^2 m}{\text{ber}^2 m_m + \text{bei}^2 m_m}} \quad (4.25)$$

Tabulky s hodnotami Besselových funkcí ber, bei, ber' a bei' jsou k dispozici v lit. [8].

Celkový magnetický tok se podle lit. [1] vypočte

$$\Phi_m = \pi \mu_m \delta_m^2 m_m H_0 \frac{\text{bei}' m_m - j\text{ber}' m_m}{\text{ber } m_m + j\text{bei } m_m} \quad (4.26)$$

s použitím pomocných funkcí $a_{(m_m)}$ a $b_{(m_m)}$, které jsou vyjádřeny

$$a_{(m_m)} = \left(\frac{2}{m_m} \right) \frac{\text{ber } m_m \text{ber}' m_m + \text{bei } m_m \text{bei}' m_m}{\text{ber}^2 m_m + \text{bei}^2 m_m} \quad (4.27)$$

$$b_{(m_m)} = \left(\frac{2}{m_m} \right) \frac{\text{ber } m_m \text{bei}' m_m + \text{ber}' m_m \text{bei } m_m}{\text{ber}^2 m_m + \text{bei}^2 m_m} \quad (4.28)$$

a při ploše průřezu vsázky $A_m = \pi r_m^2$ může být magnetický tok spočítán

$$\Phi_m = \mu_m H_0 A_m (b_{(m_m)} - j a_{(m_m)}) \quad (4.29)$$

Pro zjednodušení výpočtu mohou být použity zjednodušené tvary pomocných funkcí, jak je uvedeno v následující tabulce 4.1

| m_m | $a_{(m_m)}$ | $b_{(m_m)}$ |
|-----------|--|------------------------|
| $m_m < 1$ | $\frac{m_m^2}{8}$ | 1 |
| $m_m > 3$ | $\frac{2}{m_m} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{1}{2m_m} \right)$ | $\frac{\sqrt{2}}{m_m}$ |
| $m_m > 6$ | $\frac{\sqrt{2}}{m_m}$ | $\frac{\sqrt{2}}{m_m}$ |

Tab. 4.1 Zjednodušené tvary pomocných funkcí

Impedance vsázky se spočítá z napětí a proudu, kde

$$U_m = j\omega n \Phi_m = (R_m + jX_m) I_m = (R'_m + jX'_m) I_i = \frac{\omega n^2 \mu_m A_m}{h} (a_{(m_m)} + j b_{(m_m)}) \quad (4.30)$$

pak

$$R'_m = \frac{\omega n^2 \mu_m A_m}{h} a_{(m_m)} \quad (4.31)$$

$$X'_m = \frac{\omega n^2 \mu_m A_m}{h} b_{(m_m)} \quad (4.32)$$

Pokud je síla stěny induktoru $S_i > \frac{\pi}{2} \delta_i$, pak můžeme odhadnout impedanci induktoru přes odpor a reaktanci

$$R_i \approx X_i \approx \frac{n^2 \pi d_i}{g h \kappa_i \delta_i} \quad (4.33)$$

Kde

$g = \frac{n h_t}{h} \dots$ činitel plnění s h_t výškou vinutí. Pro jedno závitový induktor je $g = 1$,
pro více závitový induktor $g \ll 1$.

Hloubka vniku δ_i elektromagnetického vlnění do elektricky vodivého prostředí se vypočítá z rovnice

$$\delta_i = \frac{1}{\sqrt{\pi \mu_i k_i f}} \quad (4.34)$$

při indukčním tavení se používají frekvence vyšší než 100 kHz, proto je hloubka vniku δ_i v induktoru, který je vyroben z mědi, cca 2mm. Frekvencí může být ovlivňována hloubka vniku δ_i , potřebná frekvence pro určitou hloubku vniku by mohla být spočtena analogicky ze vzorce

$$f = \frac{\delta_i^2}{\pi \mu_i k_i} \quad (4.35)$$

K výpočtu elektrické účinnosti využijeme odporu R'_m (4.31) a R_i (4.33)

$$\eta_t = \frac{R'_m}{R_i + R'_m} = \frac{1}{1 + \frac{R_i}{R'_m}} = \frac{1}{1 + \frac{d_i h_m k_m \delta_m \sqrt{2}}{d_m h_i k_i \delta_i g m_m a(m_m)}} \quad (4.36)$$

když $m_m > 6$, tak platí $\frac{\sqrt{2}}{m_m \cdot a(m_m)} \approx 1$, pak můžeme elektrickou účinnost vyjádřit

$$\eta_t = \frac{1}{1 + \frac{d_i \sqrt{k_m}}{d_m \sqrt{k_i}}} \quad (4.37)$$

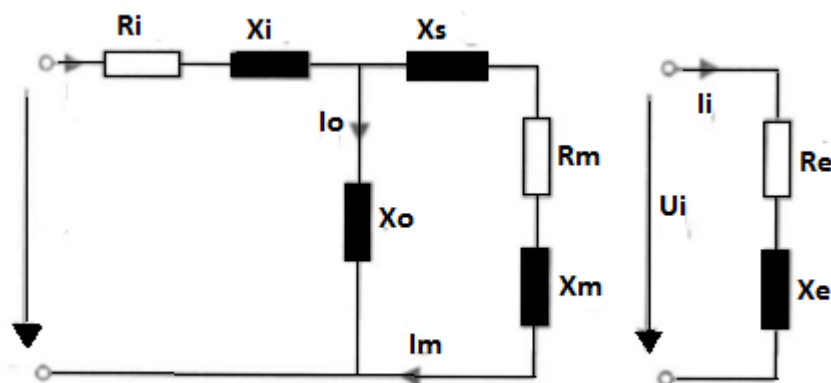
a pokud zanedbáme úzkou slinutou druhově specifickou vrstvu „Skull“ platí

$d_i \cong d_m$, pak může být účinnost vypočtena

$$\eta_t = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{k_m}{k_i}}} \quad (4.38)$$

4.2 Elektrické parametry pro krátké systémy vsázky a induktoru

Nejdříve byly popsány elektromagnetické parametry pro nekonečně dlouhá válcový systém vsázky a induktoru. Popis krátkého systému se již více přibližuje realitě. Při odhadu parametrů krátkého systému se vycházelo podle [1] z jednozávitového induktoru ($n = 1$), při použití elektronkového generátoru při frekvencích nad 1 MHz. K tomuto odhadu bylo použito náhradního schématu na obr. 4.2. Předpokládalo se, že impedance induktoru a vsázky mohou být spočítány stejně jako v předchozí kapitole (4.31, 4.32, 4.33) pro nekonečně dlouhý systém.



Obr. 4.2 Náhradní obvod pro krátký systém vsázky a induktoru

Pro délky induktoru platí vztah $h_i \gg h_m$, ovšem pokud je vsázka ve formě taveniny přehřátá, tak se je hodnota h_m vyšší než hodnota h_i , proto byly do náhradního obvodu doplněny další prvky. Dále platí, že magnetické pole mimo induktor nemůže být nulové. Siločáry magnetického obvodu se uzavírají vně induktoru.

Když jsou určeny všechny prvky náhradního elektrického obvodu, může být určena náhradní impedance a s tímto parametrem mohou být dopočítány všechny elektrické parametry.

Náhradní impedance

$$\underline{Z}_e = R_e + jX_e \quad (4.39)$$

její absolutní hodnota je

$$Z_e = \sqrt{R_e^2 + X_e^2} . \quad (4.40)$$

hodnoty R_e a X_e jsou vyjádřeny

$$R_e = R_i + R'_m = R_i + u_k^2 R_m \quad (4.41)$$

$$X_e = X_i + X'_m = X_i + u_k^2 \left[X_s + X_m + \frac{R_m^2 + (X_m + X_s)^2}{X_0} \right]. \quad (4.42)$$

u_k ... převodový poměr, také je nazýváme transformační poměr – pro zjednodušení z dlouhého systému na krátký

Hodnoty X'_m a R'_m jsou vypočítány z rovnic 4.31 a 4.32.

Dalším parametrem, který může být určen je rozptylová reaktance vsázky X_s , kde A_s je plocha průřezu vzduchu v oblasti vsázky a s_{cr} je tloušťka stěny kelímku

$$X_s = \omega \mu_0 \frac{A_s}{h_m} = 7,9 \cdot 10^{-7} f \frac{A_s}{h_m} \quad (4.43)$$

kde

$$A_s = \frac{\pi}{4} [d_i^2 - (d_m + 2s_{cr})^2] \quad (4.44)$$

Pokud se jedná o jiný induktor než jedno závitový musí se veličiny R_m , X_m , X_s , I , U_i vypočteny ze vztahů $n^2 R_m$, $n^2 X_m$, $n^2 X_s$, I/n a nU_i .

Pomocí impedance vsázky mohou být spočteny další elektrické parametry pro náhradní obvod jako je proud I_i , napětí U_i , účinnost η_i , činný výkon P_i , jalový výkon S_i a účinník $\cos\varphi_i$:

$$I_i = \sqrt{\frac{P_m}{u_k^2 R_m}} \quad (4.45)$$

$$U_i = Z_e I_i \quad (4.46)$$

$$\eta_i = \frac{u_k^2 R_m}{R_e} \quad (4.47)$$

$$P_i = \frac{P_m}{\eta_i} \quad (4.48)$$

$$S_i = U_i I_i \quad (4.49)$$

$$\cos\varphi_i = \frac{P_i}{S_i} = \frac{R_e}{Z_e} \quad (4.50)$$

P_m ... výkon tavení

$$P_m = \frac{U_i^2}{Z_e} \eta_i \cos\varphi_i = S_i \eta_i \cos\varphi_i \quad (4.51)$$

Zdánlivý výkon může být také odhadnut přes jalový výkon (4.52), protože induktor představuje induktivní zátěž

$$S_i \approx \text{konst.} \approx Q_i = \omega C U_{gen}^2 \quad (4.52)$$

Konstantní výkon S_i platí v případě, že u přiměřeně vysokých frekvencí je reaktance X_e podstatně větší než odpor R_e . Díky tomu může být impedance Z_e stejně velká jako reaktance X_e . Frekvence se v průběhu tavení mění jen nepatrně, platí

$|Z_e| \approx X_e \approx \text{konst.}$ Z toho plyne, že při konstantním induktorovém napětí U_i se nemění induktorový proud I_i . Z toho vyplývá již výše zmiňovaná hodnota pro celkový výkon generátoru (4.49).

Účinnost induktoru η_i je závislá na jeho elektrické vodivosti a materiálu, který má být roztaven. Díky velmi nízké elektrické vodivosti taveniny je účinnost velmi vysoká (vyšší než 0,95). Z tohoto důvodu je také vliv účinnosti na elektrické parametry velmi nízký a může se uvažovat jako konstantní.

Výkon tavení P_m je udán účinníkem $\cos\varphi_i$ (4.51). Účinník $\cos\varphi_i$ je charakteristická veličina, která byla nadefinována pro popsání a optimalizaci indukčního tavícího procesu ve studeném kelímku při použití elektronkového generátoru.

Tepelné ztráty

Celkový výkon generátoru pokrývá jak výkon potřebný k roztavení materiálu P_m tak výkon potřebný k pokrytí ztrát v induktoru $P_{v,i}$ a dalších ztrát v oscilačním obvodu P_c , v proudovém vedení P_s . Tyto ztráty činí i 25-30% z celkového výkonu

$$P = P_m + P_{v,i} + P_c + P_s \quad (4.51)$$

Induktorový výkon se skládá z výkonu potřebného k roztavení materiálu P_m a elektrických ztrát v induktoru $P_{v,i}$

$$P_i = P_m + P_{v,i} \quad (4.52)$$

Výkon P_m je potřebný nejen k roztavení materiálu, ale také k pokrytí veškerých ztrát tepla, které jsou odváděny stěnou a dnem kelímku a také vyzařováním tepla nad taveninou. Tyto ztráty P_v jsou udány takto

$$P_v = P_w + P_b + P_{rad} \quad (4.53)$$

kde

P_w ... ztráty tepla ve stěnách kelímku

$$P_w = A_w q_w = \pi d_m h_m q_w \quad (4.54)$$

q_w ... střední hustota tepelného toku

P_b ... ztráty tepla ve dně kelímku

$$P_b = A_b q_b = \frac{\pi}{4} d_m^2 \frac{\lambda_{sk}}{s_{sk,b}} (\vartheta_m - \vartheta_{cool}) \quad (4.55)$$

q_b ... střední hustota tepelného toku

λ_{sk} ... střední vodivost tepla „skull“ vrstvy

ϑ_{cool} ... teplota povrchu chlazené stěny kelímku

P_{rad} ... ztráty tepla zářením na povrchu taveniny

Za předpokladu, že by se jednalo o jednotvárný zářič, může být odhadnuto

$$P_{\text{rad}} = A_0 q_{\text{rad}} = \frac{\pi}{4} d_m^2 \varepsilon_0 \sigma (T_0^4 - T_{\text{ú}}^4) \quad (4.56)$$

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ Stefan-Bolzmannova konstanta

T_0 ... teplota na povrchu taveniny

Nárůst ztrátového výkonu P_v může být příčinou narušení stabilního tavicího procesu, což může vést ke změně objemu a teploty taveniny v extrémním případě až k jejímu ztuhnutí.

Podle lit. [1] by měl stabilní stav tavení splňovat výkonnostní bilanci

$$P_m = P_v \quad (4.57)$$

a musí být splněny podmínky stability

$$\frac{dP_v}{dT_m} > \frac{dP_m}{dT_m} \quad (4.58)$$

v případě konstantního průměru taveniny d_m

$$\frac{dP_v}{dh_m} > \frac{dP_m}{dh_m} \quad (4.58)$$

Tyto termické a elektrické parametry hrají důležitou roli při dimenzování zařízení pro indukční tavení ve studeném kelímku. Pomocí nich se dají určit konstrukční a finanční náklady. Použitý generátor není charakterizován pouze výkonem P_g , ale také napětím U_g , proudem I_g a frekvenčním rozsahem, tím jsou dány dodatečné okrajové podmínky.

Pro výpočty termických a elektrických parametrů musí být zohledněny i následující okrajové podmínky pro tavicí zařízení [1]:

- Maximální výkon zdroje dosahuje jmenovitého výkonu cca 320 kW, při

odečtení všech ztrát (činí cca 25%) zůstává ještě 240 kW činného výkonu k roztavení materiálu a k pokrytí ztrát v induktoru.

- Frekvenční rozsah je 100 – 300kHz
- Kelímek musí být dimenzován, tak aby byl snadno vsunutelný a vysunutelný z tavicí komory, což znamená, že rozhoduje celková hmotnost kelímku i s taveninou, aby se s ním dalo manipulovat. Maximální přípustné rozměry kelímku jsou 40 cm průměr a 70cm výška. Přičemž by neměla při maximálním průměru výška taveniny překročit 30 cm. Jinak by při možné měrné hustotě bloku 4 kg/dm^{-3} hmotnost překročila 150kg.
- Kelímek i induktor jsou vyrobené z mědi. Pro konstrukci studeného kelímku je tloušťka stěny $s_{cr}=12 \text{ mm}$ a pro induktor se používá plech o síle $s_i = 3\text{mm}$. Vodivost mědi je $5,6 \cdot 10^7 \text{ S/m}$.
- Při tavicích procesech ve studeném kelímku zůstává zanedbaná hustota tepelného toku q_b , protože je buď neznámá, nebo zanedbatelná.

Vypočítané termické a elektrické parametry při dodržení všech okrajových podmínek jsou shrnuty v literatuře [1]. V tab. 4.2 jsou uvedeny frekvence použité pro tavení některých oxidů.

| | | YBCO | ZrO ₂ - Y ₂ O ₃ | Al ₂ O ₃ | MgO | ZrSiO ₄ |
|-----------------|--------------|--------|--|--------------------------------|---------|--------------------|
| Frekvence | f (kHz) | 99,100 | 99,100 | 299,300 | 296,850 | 300,400 |
| Hloubka průniku | δ (m) | 0,053 | 0,016 | 0,130 | 0,077 | 0,195 |

Tab. 4.2: Frekvence použité pro tavení různých oxidů a hloubka průniku pole do vsázky

Pro určení frekvencí pro další materiály se využije vzorce pro hloubku průniku elektromagnetického pole do elektricky vodivé vsázky (4.34), ve kterém jsou známy veličiny hloubku průniku δ_i , permitivitu materiálu μ_i a elektrickou vodivost k_i , pak můžeme frekvenci spočítat dle rovnice (4.35)

$$\delta_i = \frac{1}{\sqrt{\pi \mu_i k_i f}} \quad (4.34) \quad \Rightarrow \quad f = \frac{\delta_i^2}{\pi \mu_i k_i} \quad (4.35)$$

5. ZÁVĚR

Vhodná volba kmitočtů pro tavení různých materiálů ve studeném kelímku je závislá na fyzikálních a elektrických parametrech. Je závislá na vodivosti vsázky K_i [S/m], kdy např. u oxidů je vodivost K_i při teplotě 20°C téměř rovna nule $K_i \rightarrow 0$, proto je využíváno startovacích procesů, při kterých dochází k zahřívání vsázky cizí látkou a tím ke změně její vodivosti K_i . Změnou (zvýšením) vodivosti K_i dojde k nárůstu hloubky průniku elektromagnetických indukcí do taveniny δ_i . Z hloubky průniku elektromagnetických indukcí se zvolí vhodný kmitočet.

Čím je zvolen vyšší kmitočet, tím se zmenší hloubka průniku elektromagnetické indukce do vsázky. Nevhodnou volbu kmitočtu může dojít k nežádoucím jevům např. k elektromagnetické průzařnosti. Pokud by hloubka vniku elektromagnetického pole příliš malá mohlo dojít k roztavení materiálu pouze na vnější části a nemusela by proniknout do celé vsázky.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] BEHRENS, Torge: Prozessorientierte Analyse der induktiven Skull-Melting-technologie bei Verwendung eines Transistorumrichters, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, 2006. 226 s.
- [2] DOLEŽAL, Ivo; MUSIL, Ladislav; ULRYCH, Bohuš: Moderní technologie založené na proces v tekutých kovech řízených elektromagnetickým polem *Elektro*. 2003, roč. 13, č. 11, s. 4-8. ISSN 1210-0889 11s.
- [3] LANGER, Emil; KOŽENÝ, Jiří: Elektrotechnická zařízení indukční, Plzeň: Západočeská univerzita, 1982, 152 s
- [4] ROT, D., KOŽENÝ, J. Modelování startu tavby oxidů kovů elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku. *ElectroScope*, 2010, roč. 2010, č. 4, s. 1-6. ISSN: 1802-4564
- [5] NACKE, B.; KUDRYASH, M.; BERENS, T.; NIEMANN, B.; LOPUKH, D.; MARTYNOV, A.; CHEPLUK, S. Induction Skull Melting of Oxides and Glasses in Cold Crucible, International Scientific Colloquium, Modelling for Material Processing, Riga, June 8-9, 2006, [online] z 30. 3. 2012, dostupné z: <http://www.modlab.lv/publications/mmp2006/pdfs/209-214.pdf>
- [6] Indukční tavení Skull-Melting-Technik [online]. Poslední změna 10. 8. 2005 [Cit. 10.8.2005]. Dostupné z: [http://technik.ihned.cz/index.php?p=800000_d&&article\[id\]=16611830](http://technik.ihned.cz/index.php?p=800000_d&&article[id]=16611830)
- [7] ASHTON, M.C.: Induction Skull Melting (ISM) of Titanium Alloys [online]. Poslední změna 28. 3. 2007 [Cit. 28. 3. 2007]. Dostupné z: <http://www.castingstechnology.com/ismtialloys.asp>
- [8] TOLKE, F.: Zylinderfunktionen. Verlag von Konrad Wittwer 1936