ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Skull-Melting jako metoda tavení materiálů

vedoucí práce: **Ing. Oldřich Kroupa** **2012**
autor: **Michal Singer**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: **2011/2012**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	**Michal SINGER**
Osobní číslo:	**E09B0238P**
Studijní program:	**B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor:	**Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu:	**Skull-Melting jako metoda tavení materiálů**
Zadávající katedra:	**Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Zásady pro vypracování:

1. Objasněte pojem Skull-melting.
2. K jakým účelům se tato metoda používá?
3. Objasněte princip tavení a jeho výhody.
4. Uveďte předpoklady pro realizaci takového tavení.
5. Proveďte hodnocení metodou 3E a uveďte závěry pro praxi.

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

Seznam odborné literatury:

1. **LANGER E., KOŽENÝ J.: Elektrotepelná zařízení indukční. Plzeň, VŠSE 1982.**
2. **RADA J., a kolektiv: Elektrotepelná technika. Praha, SNTL, ALFA 1985**

Vedoucí bakalářské práce:	**Ing. Oldřich Kroupa** Katedra elektroenergetiky a ekologie
Datum zadání bakalářské práce:	**17. října 2011**
Termín odevzdání bakalářské práce:	**3. června 2012**

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

Západočeská univerzita v Plzni * Fakulta elektrotechnická *

Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Anotace

Předkládaná bakalářská práce umožňuje seznámení s tavením materiálů ve studeném kelímku. Jejím cílem je pochopení základní problematiky spojené s tímto druhem indukční technologie tavení. Bakalářská práce obsahuje odvození vlnových rovnic elektromagnetického vlnění při procesu tavení. Závěr této práce je zhodnocen metodou 3E a v poslední kapitole je uvedeno současné použití studeného kelímku s jeho předpoklady do budoucna.

Klíčová slova

Elektromagnetické vlnění, induktor, krystalizace, skull-melting, studený kelímek, tuhnutí, vitrifikace, vsázka, ztuhlá vrstva.

Abstract

The bachelor thesis is focused on material construction by skull melting. Its aim is to understand the basic issues associated with this type of induction melting technology. Bachelor thesis contains the derivation of wave equations of the electromagnetic waves in the ongoing process of melting. The conclusion of this work is reviewed by 3E method. Finally there is described the current use of a skull melting with its assumptions for the future use.

Key words

Electromagnetic waves, inductor, crystallization, skull-melting, cold crucible, solidification, vitrification, charge, skull layer.

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 pod odborným dohledem vedoucího bakalářské práce pana Ing. Oldřicha Kroupy z pramenů uvedených v seznamu, které jsou součástí této bakalářské práce.

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

V Plzni dne 18. 5. 2012 Michal Singer

……

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Oldřichu Kroupovi za užitečné rady a poskytnuté konzultace ohledně tvorby bakalářské práce. Poté bych také rád poděkoval za možnost zapůjčení odborné literatury, která mi rovněž pomohla se zpracováním této práce panu prof. Ing. Jiřímu Koženému, Csc.

Obsah

OBSAH **8**

ÚVOD **9**

SEZNAM SYMBOLŮ **10**

1. SKULL-MELTING **12**

1.1 VZNIK TEPLA 13
1.2 KONSTRUKCE 13
1.3 POUŽITÍ 17
1.3.1 Vitrifikace *18*
1.4 VÝHODY 20

2. TECHNOLOGICKÝ PROCES **21**

2.1 STARTOVACÍ PROCES 21
2.2 TAVENÍ 22
2.2.1 Tavení skel a oxidů *24*
2.2.2 Tepelná bilance *26*
2.2.3 Vzdutí roztavené vsázky *26*
2.3 TUHNUTÍ A KRYSTALIZACE 27

3. ELEKTROMAGNETICKÉ VLNĚNÍ **29**

3.1 HARMONICKÉ ELEKTROMAGNETICKÉ VLNĚNÍ 31
3.2 VÁLCOVÉ ELEKTROMAGNETICKÉ VLNĚNÍ 32
3.3 POYNTINGŮV (ZÁŘIVÝ) VEKTOR 34

4. HODNOCENÍ METODOU 3E **35**

4.1 EFECTIVENESS 35
4.2 ECONOMY 36
4.3 EFFICIENCY 36

ZÁVĚR **38**

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY **39**

PŘÍLOHY **41**

Úvod

S postupem času spolu s vyvíjející se technologií stoupá poptávka po materiálech, které by nějakým způsobem předčily svými parametry stávající materiály. Tudíž tyto materiály musí vykazovat lepší fyzické či chemické vlastnosti, které mohou například mít za následek zvýšení výkonu zařízení, integraci zařízení, žáruvzdornost, teplotní stálost a řadu dalších jiných vlastností, které by mohly nějakým způsobem zařízení ovlivnit. S těmito nároky může nastat problém, jak konkrétní materiál připravit a zkonstruovat.

V mnoha průmyslových odvětvích při zpracování kovů se osvědčila metoda indukčního ohřevu. Indukční ohřev je ovšem možný jen u materiálů elektricky vodivých. Za normálních podmínek běžným indukčním ohřevem u elektricky nevodivých materiálů k roztavení nedojde.

Seznam symbolů

$\boldsymbol{B}$ [T]	magnetická indukce
$\boldsymbol{D}$ [C/m^2]	elektrická indukce
$\boldsymbol{E}$ [V/m]	intenzita elektrického pole
$\boldsymbol{H}$ [A/m]	intenzita magnetického pole
$\boldsymbol{S}$ [W/m^2]	Poyntingův (zářivý) vektor
α	fázová konstanta
β	konstanta měrného útlumu
γ [S/m]	konduktivita
ε [F/m]	permitivita
∇^2	Laplaceův operátor
λ [W/mK]	tepelná vodivost
μ [H/m]	permeabilita
ρ [Ωm]	měrný elektrický odpor
ρ_h [kg/m^3]	hustota vsázky
ρ_o [C/m^3]	objemová hustota volných nábojů
σ [S]	elektrická vodivost vsázky
ω [rad/s]	úhlová rychlost
a [m]	hloubka vniku
c [m/s]	rychlost světla ve vakuu
C_1, C_2	integrační konstanty
d [m]	průměr vsázky
f [Hz]	frekvence
h [m]	vzdutí
J_0, N_0	cylindrické Besselovy funkce
J_1, N_1	cylindrické Neumannovy funkce
k	konstanta šíření
K	konstanta vzdutí
P_1 [W]	příkon
r [m]	poloměr (válcové souřadnice)
T [°C]	teplota
v [m/s]	rychlost šíření

Rozlišení veličin v textu:

B	skalár
$\boldsymbol{B}$	vektor
$\overline{\boldsymbol{B}}$	fázor vektoru

1. Skull – Melting

Jedná se o jedinečný proces založený na bezkontaktním přenosu energie do vsázky s vysokou frekvencí elektromagnetického pole vysoké intenzity. Vsázku představuje materiál, který je určen k tavení a tvoří nejteplejší část celého systému.[7] Oproti běžným technologiím spojených s indukčním tavením je metoda Skull-melting, která se jinak nazývá rovněž studený kelímek či levitační tavení, také zaměřen zejména na tavení materiálů, které nejsou v pevném stavu elektricky vodivé jako sklo, oxidy a jiné, které při pokojových teplotách jsou dobrými izolanty, což v této fázi znemožňuje absorpci elektromagnetické energie a materiály se při dopadu tepelného záření jeví jako propustné.[12] K absorpci této energie a následnému spuštění procesu tavení je nutné využít tepelného zdroje, který by způsobil navýšení teploty vsázky na teplotu při které již vsázka bude schopna přijímat energii z elektromagnetického pole samostatně. Dále je tato technika vhodná pro proces tavení a přípravu reaktivních kovových slitin před odléváním v prostředí inertní atmosféry. Proces se často používá k roztavení titanu, zirkonia, molybdenu, niklu a mnoha jiných slitin s vysokou teplotou tání na zhotovení litých součástí formou přesného odlévání.[10]

Tavení těchto nekovových materiálů vede k získání řady chemicky čistých materiálů a slitin. Skull-melting jako stále rozvíjející se metoda je široce užívaná v hutnictví a v procesech se speciálními materiály. Teploty vzniklé při použití zmiňované technologie přesahují hranici 3000 °C.[7] Tato technologie byla pojmenovaná podle průběhu tavení, kdy se na povrchu vsázky dotýkajících se stěn chlazeného kelímku vytvoří jakási ztuhlá vrstva taveniny zvaná „skull“. Tato vrstva se vyznačuje nižší teplotou oproti samotné tavenině uvnitř a zabraňuje zapouzdřením reaktivním materiálům kontaminaci s kelímkem, což se ve výsledku projeví vysokou čistotou taveniny a delší životností kelímku. Volbou frekvence proudu, jenž napájí induktor se ovlivní rozdělení tepla vyvíjeného ve vsázce. Toto je dáno hloubkou vniku naindukovaných proudů do vsázky.[1]

$$a = \sqrt{\frac{2}{\omega\gamma\mu}}\ [m]$$

V samotném kelímku vlivem působení elektromagnetického pole vznikají kromě vířivých proudů i elektromagnetické síly, které mohou zabránit styku vsázky se stěnami studeného kelímku. Kontakt taveniny se studeným kelímkem je nežádoucí, protože by tímto vytvářel cestu tepelných ztrát z vsázky do vodou chlazených stěn kelímku. Tato vlastnost výrazně

ovlivňuje účinnost procesu. Tvar a poloha vsázky závisí na okamžité rovnováze působících sil. Z tohoto důvodu je elektromagnetické pole a související silového pole silně vázáno na dynamiku volné hladiny taveniny, turbulentní proudění vsázky a přenos tepla.[12]

1.1 Vznik tepla

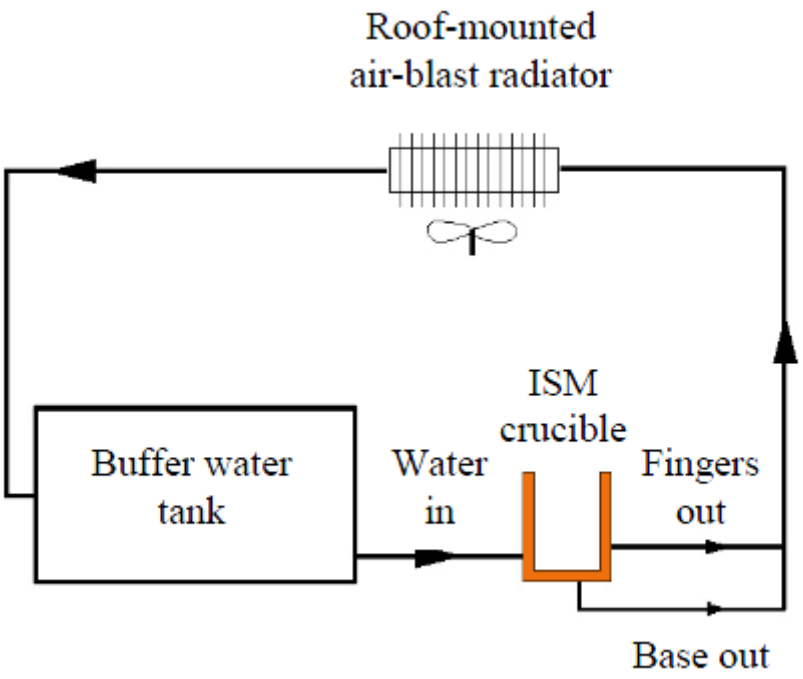
Teplo vzniká na základě principu elektromagnetické indukce tehdy, když induktorem protéká elektrický proud střídavého charakteru. To má za následek vznik časově proměnného elektromagnetického pole obklopujícího vodič (induktor). Vložením předmětu (vsázky) z elektricky vodivého materiálu do tohoto prostředí vznikají proudy, které se indukují do samotného předmětu. To je doprovázeno uvedením volných elektronů nacházejících se v tavenině do pohybu. Tyto proudy se nazývají vířivé proudy a způsobují Jouleovo teplo.[14] Pohybující se elektrony ve směru intenzity elektrického pole nabývají značných rychlostí, které způsobilo elektromagnetické pole. Urychlené elektrony s vyšší hodnotou kinetické energie narážejí do sousedních částic, čímž dochází ke zvýšení teploty. Výsledně tedy můžeme konstatovat, že průchodem elektrického proudu materiálem s elektrickým odporem vzniká žádané Jouleovo teplo uvnitř tohoto materiálu. Teplo vzniká pouze v samotné vsázce a elektrická energie se přenáší elektromagnetickým polem.[6, 18]

Tato teorie je odvozena z Maxwellových rovnic, které udávají charakter šíření elektromagnetického vlnění. Elektromagnetické vlnění vyzařuje každé těleso s pohybujícím se elektrickým nábojem. Tyto vlny se pohybují konečnou rychlostí. Tvarem induktoru, který je rovněž zdrojem elektromagnetického záření, je ovlivněna účinnost a způsob přenosu tepla do vsázky.[6]

1.2 Konstrukce

Nejdůležitější část systému tvoří kelímek a induktor, který je tvořen jedním či více měděnými závity obdélníkového nebo kruhového profilu s dutinou, jíž proudí chladící médium. Vlivem vysokých frekvencí, na kterých se zařízení provozuje, dochází k vytlačování

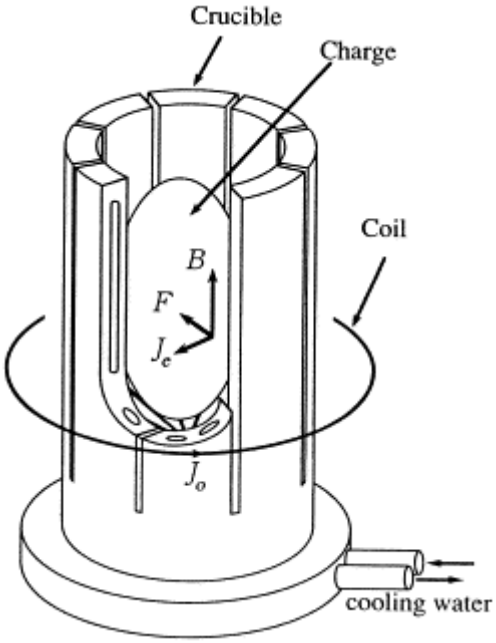
proudové hustoty k vnějšímu povrchu vodiče. To má za následek zmenšení efektivního průřezu vodiče, kterým může téci elektrický proud. Vytvoření dutiny uvnitř vodiče v oblasti, která není efektivně využitá pro přenos elektrického proudu se užívá jako trasa umožňující průtok chladícího média. Kvůli zvýšené hodnotě efektivního odporu vodiče a tudíž i teploty je třeba intenzivní chlazení induktoru. Jev působící na vodič je tzv. „skin-efekt".[1] Izolační vrstva závitů cívky je provedena nejčastěji ve formě tenkých vrstev teflonu, která zabraňuje napěťovému přeskoku. Návrh indukční cívky není jednoduchý. Pro maximalizaci efektivity při přenosu energie z generátoru do taveniny musí být správně nakonfigurován počet, průměr, tvar a rozteč závitů cívky omezující fyzický rozměr kelímku, s ohledem na elektrické vodivé vlastnosti vsázky a její objem, požadovaný teplotní profil taveniny a výstupní elektrické vlastnosti generátoru samotného. Jako chladící médium může být použit plyn, pára nebo voda. Ovšem nejčastěji použité médium bývá destilovaná voda, která zabraňuje tepelnému působení velkých proudů a možnému poškození induktoru. Chladící voda se nesmí oteplit na teplotu přesahující 60°C při níž by mohlo dojít k varu vody a následně vzniklá pára by mohla ohrozit její průtok. A proto proudí rychlostí v jednotkách metrů za sekundu a musí odvést tepelné ztráty v mědi vznikající v cívce, což má za následek spotřebu 20-25% z příkonu elektrické energie.[9] Na obr. 1.1 je znázorněn chladící okruh systému. Voda, která může obsahovat i nemrznoucí příměsi se čerpá z vyrovnávací nádrže do potrubí přiváděného na dno kelímku. Zde se systém rozdělí na část určenou k chlazení dna kelímku a k chlazení segmentových lamel. Vystupující voda vyšší teploty je vyváděna z kelímku ve dvou potrubních vedeních, která se později spojí v jedno. Před konečným odčerpáním vody do nádrže, vzduchový ventilátor ofukující potrubí zajistí snížení teploty proudící vody. Kapacita vodní nádrže bývá v tisících litrech destilované vody. Voda cirkuluje systémem i několik hodin před každým spuštěním tavícího procesu k zajištění vhodné počáteční teploty kapaliny.[2]



Obr 1.1 Chladící okruh systému [převzato z 2]

Samotný studený kelímek obvykle s průměrem několik desítek centimetrů je umístěn uvnitř oblasti obepínaného induktorem, od kterého je dielektricky oddělen. Dielektrikum může tvořit vzduch, vakuum či jiná plynná atmosféra. Materiál tvořící kelímek by teoreticky měl v nejlepším případě vykazovat vysokou tepelnou vodivost λ a nízkou elektrickou vodivost γ. Tyto materiálové vlastnosti by zaručily, že by se kelímek stal pro elektromagnetické pole transparentní (průzařný) a s předpoklady určenými pro snadnou tvorbu ztuhlé povrchové vrstvy vsázky zapříčiněnou vysokou tepelnou vodivostí intenzivně chlazeného kelímku. Ve skutečnosti se konstrukce celého kelímku provádí složením z několika samostatně dutých měděných segmentů. Jednotlivé segmenty jsou rozmístěné tak, aby tvořili palisádu.[9] Důvodem je zmenšení plochy, ve které by se mohli uzavírat indukované proudy z magnetického pole cívky. Elektromagnetická energie bude procházet především v místech mezi jednotlivými segmenty tj. vzduchovými mezerami s šířkou menší než jeden milimetr.[16] Rozdílný elektrický potenciál mezi segmenty je přímo úměrný jejich počtu. Minimální požadavek na hodnotu povrchového napětí je 0,3 N/m. Nižší hodnoty znamenají únik vsázky ze studeného kelímku. Doplňkově se zabraňuje úniku ještě Al_2O_3, kterým je vymazán povrch tyčí studeného kelímku.[15] Tato vrstva způsobila zmenšení tepelných ztrát. Pojem studený kelímek, s kterým je toto zařízení často spojováno napovídá, že celý kelímek bude velmi intenzivně chlazen. Jednotlivé měděné lamely jsou od sebe vzájemně odizolované tloušťkou vzduchové mezery. Vnitřní stěna kelímku je pokryta

vrstvou, která jednak zabraňuje úniku vsázky a také zvyšuje tepelnou účinnost. Tuto vrstvu o přibližné tloušťce kolem 1 mm tvoří směsi na bázi korundu, který vyniká svou žáruvzdorností. Vyplňující dno kelímku je rovněž chlazené a také z mědi.[9]



Obr. 1.2 Konstrukce studeného kelímku.[převzato z 19]

Druhou konstrukční variantou kelímku je možnost, kdy sám induktor tvoří stěny kelímku. Tato varianta je energeticky výhodnější. Těsný kontakt induktoru s taveninou má za následek absorpci vyšší intenzity magnetického pole a dále odpadají zde ztráty způsobené naindukováním vířivých proudů do oddělených segmentů tvořících kelímek. U tohoto kelímku ovšem může nastat stav, kdy tavenina může způsobit zkrat mezi přívody induktoru. A proto tento typ studeného kelímku je méně často užívaný, protože je tu navíc možnost nebezpečí tepelného poškození zkratem. Nárokem u tohoto konstrukčního provedení je dostatečná tloušťka skull vrstvy, což může někdy představovat velmi obtížný úkol. Pro zajištění větší bezpečnosti před zkratovými proudy, uzavírajícími se přes vodivou taveninu může být vnitřek stěn studeného kelímku pokryt vrstvou oxidu hlinitého Al_2O_3, který je významný vysokou tepelnou vodivostí.[9] Dále musí být zajištěn stav, aby stěny kelímku byly dielektricky oddělené od měděného dna kelímku. Zabránění zkratu je zajištěno elektricky nevodivým mezikružím vloženým mezi dotýkající se konstrukčních částí (tj. mezi stěny kelímku a měděné dno).[17]

Zdrojem vysoké frekvence střídavého proudu, jenž napájí induktor je tzv. indukční generátor. Důležitými parametry jsou maximální výkon a frekvence. Běžně užívané hodnoty frekvence spojené se studeným kelímkem jsou 2-10 MHz s výkonem do několika MW. Pro řízení těchto hodnot se ve vysokofrekvenčním generátoru uplatňují měniče, které pracují na

základě polovodičových prvků, jako jsou tranzistory a tyristory. Zejména se uplatňují polovodiče na bázi oxidů kovu v tranzistorech typu MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) a tranzistory s označením IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor). Tyto tranzistory umožňují velmi rychlé spínání s nízkou energetickou ztrátou. Vakuové vysílací elektronky jsou dalším typem použitých v tzv. trubicových generátorech, kterými lze pracovat ještě při vyšších frekvencích, než tomu bylo u konvertorů tvořených z již zmiňovaných tranzistorů. Vyznačují se vysokým napětím na výstupních svorkách, které mohou být pro člověka nebezpečné. Účinnost těchto elektronových trubic je 50-60%, a postupně s dobou životnosti nadále klesá. Životnost se uvádí přibližně 4000 hodin. Významnou nevýhodou jsou pořizovací a provozní náklady.[9, 24]

Další společnou součástí je napájecí zdroj nebo systém, který převádí a současně zajistí splnění vstupních požadavků frekvence vysokofrekvenčního zdroje tj. 50 nebo 60 Hz. K poslednímu mnohdy významnému zařízení doplňující systém studeného kelímku patří kondenzátorová baterie či dynamická kompenzace, protože se zařízení chová jako indukční zátěž.

Teoreticky lze studený kelímek považovat za transformátor, kde primární strana je tvořena cívkou vinutí induktoru a vsázka by představovala stranu sekundární. Zařízení lze ve výsledku přirovnat k transformátoru zapojenému do krátka.[15]

1.3. Použití

Kromě zpracovávání oxidů a skel se metodou zvanou Skull-melting provádí výroba keramik. Struktura těchto polykrystalických keramik se shoduje se strukturou monokrystalů tím, že částice uvnitř zrn (krystalů) jsou uspořádány pravidelně. Liší se, ale polohou zrn. Zatímco rozložení zrn v monokrystalové struktuře se periodicky opakuje a tím způsobuje jejich pravidelný geometrický tvar, tak rozložení zrn polykrystalů je zcela náhodné. Mezi polykrystaly patří všechny kovy.[21] Takto vodivé oxidové keramiky mají elektronovou či iontovou vodivost. Jejich uplatnění se nalézá v odporových pecích a poskytují teploty více než 2000°C. Tyto materiály musí mít vysokou tepelnou a chemickou stabilitu s ohledem na materiály, které s nimi přijdou do kontaktu.

Je známo, že materiály pro letecký průmysl musí splňovat nejpřísnější konstrukční

požadavky. Titan, jako velice odolný chemický prvek vůči korozi a agresivnímu prostředí je používán v řadě aplikací, do kterých spadá i letecký průmysl. Tavení titanu probíhá ve vakuu. Po roztavení titanu je studený kelímek nakloněn pomocí většinou hydraulických zvedáků a tím dochází k jeho odlévání do připravené formy. Roztavený titan se ihned podrobuje odstředivé síle způsobenou rotací formy. Tím se zkracuje doba plnění formy. Působící zvýšený tlak roztaveného titanu působí ke stěnám formy. Vysoká rychlost rotace má za následek dokonalé vyplnění forem tekutého kovu a dochází ke zlepšení rozměrových tolerancí. Odstředivá síla působí do doby, než titan ztuhne. Zmiňovaný proces je označován jako přesné odlévání. V odvětví jiném než leteckém, titan a jeho slitiny nalezneme také ve zdravotnickém průmyslu (zdravotnické protézy), automobilovém průmyslu, klenotnickém odvětví či v pomůckách určených pro volný čas (např. golfové hole).[8]

Obr. 1.3 Tryska balistické rakety zhotovena přesným odléváním. (převzato z [8])

1.3.1 Vitrifikace

Vitrifikace je proces ukládání nebezpečného či radioaktivního odpadu do skleněných či keramických matric. Zatavením těchto nebezpečných odpadů do sklářského kmene vzniká homogenní sklovina, která je převedena do ocelových kontejnerů určených pro uskladnění do hlubinných úložišť.[9] Tímto způsobem se docílí minimalizace pravděpodobnost úniku

radioaktivních izotopů. Izotopy těchto odpadů jsou nestálé a podléhají radioaktivitě. Radioaktivní rozpad je samovolná přeměna jader nestabilních nuklidů na jiná jádra, přičemž vzniká ionizující záření. Nuklidy podléhající radioaktivnímu rozpadu jsou radionuklidy.[22] Matrice používané jsou na bázi borosilikátových skel, které mají vyšší tepelnou a chemickou odolnost.

Touto technologií se velice často zpracovávají tepelně-izolační materiály a stavební suti z jaderných a radiochemických zařízení. Rostoucí množství objemu stavebního odpadu je spojeno s údržbou jaderných elektráren či s jejich vyřazováním z provozu. Velké množství tohoto radioaktivního odpadu se pomocí studeného kelímku sníží na minimum. Teplota tavení při které se tento druh odpadu taví překračuje 1300°C. Hlinitovápenaté silikáty obsažené ve stavebních materiálech jsou v tomto případě vhodné jako matrice k účelu znehybnění radionuklidů. Po roztavení a odlití vzniká odpad až čtyřicetinásobně menší u tepelných materiálů a dvaapůlkrát menší u stavebních materiálů než byl původní objem materiálu.[9]

Obr. 1.4 Vitrifikace: a) skelné vaty, b) cihel a betonu
1 – původní stav, 2 – stav po vitrifikaci
(převzato z [9])

Vitrifikace lze provádět i u tekutých nebezpečných či radioaktivních odpadů.

1.4. Výhody

- Dosažení výrazně vyšších teplot než je 3000°C.
- Na základě vytvořené pevné vrstvy nedochází ke kontaktu mezi taveninou a studeným kelímkem.
- V mnoha případech je výsledná chemická čistota větší než u výchozího materiálu.
- Provoz v různých typech prostředí: vzduch, vakuum, plynné prostředí.
- Výborná homogenizace materiálu vlivem elektromagnetických sil utvářející víření vsázky.
- Vzhledem k tomu, že při tavení je povrch taveniny volně dostupný, lze ovlivnit jeho složení, zejména při přípravě slitin.
- Dosažení teplot 300 – 500°C nad bodem tání.
- Možnost řízení intenzity ohřevu, rozložení teploty a dalších parametrů.
- Povrchové vrstvy taveniny nejsou v ochranných atmosférách ohroženy chemickými změnami.
- Vyšší životnost kelímku.

2. Technologický proces

2.1 Startovací proces

Některé materiály se v pevném stavu vyznačují vlastnostmi odpovídajícími vlastnostem izolátorů. Jejich nízká elektrická vodivost zamezí možnosti naindukování vířivých proudů, která by způsobila následný ohřev. Jediný možný způsob, který vede ke zvýšení elektrické vodivosti materiálů je vysoká teplota. Při vysokých teplotách se elektrická vodivost zvyšuje až o několik řádů.[2] Způsobů ohřevu před spuštěním samotného tavícího procesu elektromagnetickou indukcí je několik a jsou charakterizovány z hlediska výhod a nevýhod. V zásadě je třeba rozlišovat, zda je teplo dodáváno povrchovým vytápěním nebo se teplo šíří v samotné oblasti objemu materiálu. Objemové vytápění nepotřebuje oproti povrchovému žádný dodatečný zdroj tepla a dosahuje vyšší účinnosti. Následující seznam popisuje výhody a nevýhody možných předehřívacích procesů:

A) Pomocí soustředěné zářivé energie z laserových systémů, obloukových nebo výbojkových lamp. Tento způsob je charakterizován vysokou čistotou procesu, ale také může vést k velmi složitým strukturám pomocí optických systémů světla.

B) Vytápění plamenem nebo plazmatem. Výhodou tohoto postupu je, že počáteční tepelná hustota výkonu působí přímo na povrch roztaveného materiálu. Nevýhodou je vliv možných chemických reakcí mezi plyny nebo odvádění spalin.

C) Předehřev použitím grafitového kroužku, který se po nastartování tavby odstraní. S odstraněním grafitového kroužku může docházet ke komplikacím, jelikož tavba se odehrává většinou ve vakuu či v jiné ochranné atmosféře a potřeba vyjmout startovací materiál komplikuje technologický proces.

D) Ponořením vodivé látky do vsázky. Materiály vhodné pro toto užití jsou např. wolfram, iridium, molybden. Jedná se tudíž o látky žáruvzdorné. Zde ovšem dochází ke kontaktu taveniny se startovacím materiálem a používá se pro účely, kde čistota není nejdůležitějším aspektem. Nejčastějším tvarem bývá válec, který se stejně jako grafitový kroužek musí poté odstranit. Při tomto zásahu je třeba vhodně regulovat zdroj dodávané energie k zamezení možnému vzniku dutiny způsobené rychlým ochlazením.

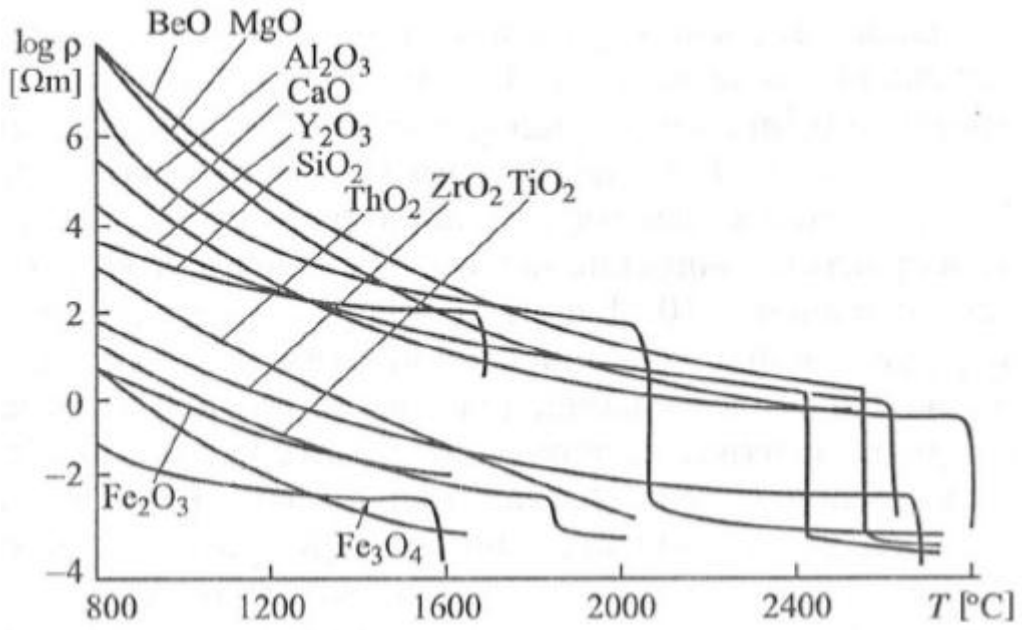
E) Uvolněnou energií v důsledku exotermické reakce kovů, které se používají jako výchozí materiál např. tavení oxidu zirkoničitého pomocí metalického zirkonu.[9]

K nastartování tavby je třeba jen několik málo gramů startovacího materiálu, obvykle postačí 0,1 % na hmotnost výchozího materiálu. Postupné tavení elektromagnetickým polem nastává při dostatečném množství startovacího materiálu. Toto množství se nazývá kritický objem. Startovací materiál je ve formě prášku nebo v kusech, od kterých se šíří ohřev naindukovanými proudy a následné tání do celého objemu vsázky. Během tavení začíná reagovat s kyslíkem a se zvyšující teplotou dochází k jeho vzplanutí. Velikost zrn startovacího materiálu a zvolená napájecí frekvence spolu velmi souvisí. Důležitým faktorem je zejména doba oxidace. Teplota bodu tání zvoleného startovacího materiálu nesmí být nižší než bod tání tvořící vsázku. V opačném případě by došlo k odpaření startovacího materiálu dříve než by se spustil proces tavení doprovázený elektromagnetickým polem.[9]

Nejpoužívanější způsoby nastartování tavby vsázky jsou pomocí grafitového kroužku a uvolněné energie v důsledku exotermické oxidace kovů u oxidových materiálů (ZrO_2, Al_2O_3,MgO). Proces zahájení startu se volí z hlediska výstupní čistoty, úsilí, nákladů a dostupnosti startovacího materiálu.[9]

2.2 Tavení

Po úspěšném zahájení startu tavení ve studeném kelímku vzrostla hustota dostatečně velkého výkonu, kdy je materiál taven jen pomocí elektromagnetické indukce. S rostoucí teplotou se zvyšuje elektrická vodivost dotyčného materiálu. Důsledkem této vlastnosti dochází ke zvyšování odběru elektrického proudu ze zdroje, což vede ke zvýšení dodaného výkonu.[1]



Graf č. 2.1 Závislost měrného odporu daných materiálů na teplotě.[1]

Množství roztaveného objemu vsázky postupně roste až k vrstvě typické pro tavení metodou skull-melting. Pevná vrstva je pro elektromagnetické pole transparentní a její elektrická vodivost je srovnatelná se stavem, kdy vsázka tvořila pevné skupenství, tedy její hodnota je velmi nízká. S ohledem na používané vysoké kmitočty má obecně proudová hustota tendenci se soustřeďovat jen na vnější oblast taveniny. Tento jev je zapříčiněn vlivem skinefektu, zatímco u studeného kelímku se díky skull vrstvě, která odděluje roztavenou vsázku od vnějšího okolí tato nevýhoda eliminuje. Ztuhlá vrstva tvoří výrazný teplotní spád mezi taveninou a studeným kelímkem. Uvnitř roztavené vsázky je teplota i elektrická vodivost vyšší a šíření tepla zde probíhá všemi způsoby.[9] Teplo přiváděné sáláním je zapříčiněno emitací elektromagnetického záření vycházejícího z induktoru. Mimo jiné je záření (radiace) energie jediný způsob přenosu energie ve vakuu. Teplo způsobené vedením obstarávají vířivé proudy, kdy pohybující částice s vyšší kinetickou energií předávají část své energie prostřednictvím vzájemných srážek částicím s nižší kinetickou energií. Poslední způsob přenosu tepla je přestup tepla prouděním v roztavené vsázce. Proudění tepla je možné jen u kapalin a plynů, kdy se teplo přenáší vzájemným pohybem jednotlivých částí, které mají odlišnou teplotu a tedy různou hustotu vnitřní energie.[11] Tepelná bilance ve studeném kelímku hraje klíčovou roli ve stabilitě procesu. Ztráty tepla směřující směrem do chlazených stěn a dna kelímku mohou způsobit zejména u malých objemů určených k tavení nežádoucí nárůst tloušťky ztuhlé vrstvy. Proto se musí tyto ztráty vyrovnávat z vysokofrekvenčního generátoru. Dovršením rovnovážného stavu tj. stav, kdy objem vsázky je zcela roztaven může proces přejít do fáze krystalizace. Doba udržení v rovnovážném stavu může ovlivnit

chemickou čistotu taveniny a její homogenizaci. Z toho vyplývá, že povrch ztuhlé vrstvy musí být pórovité struktury, aby se předcházelo nebezpečí před vznikem exploze a znehodnocení zařízení vlivem rozpuštěných unikajících plynů. Vypařující plyny jako např. složky chlóru, síry, dusíku, alkalických kovů, ale i mnoho těžkých kovů představují nečistoty. Při vysokých teplotách tání ve vzduchu se tyto plyny poměrně rychle vypařují. Pro dosáhnutí nejvyšší čistoty se materiály taví při teplotách vyšších než je samotný bod teploty tání. Tento proces je označován jako přehřívání.[9]

2.2.1. Tavení skel a oxidů

Vysokofrekvenční „skull-melting“ tavení je bezkonkurenční metoda vhodná k tavení materiálů jako jsou skla, oxidy a keramiky, které jsou charakteristické vysokým bodem tání a nízkou elektrickou i tepelnou vodivostí při nízkých teplotách.[9] Na rozdíl od tavení elektricky vodivých materiálů se zde uplatňují napájecí frekvence podstatně vyšší v jednotkách MHz. S ohledem na velikost vzdutí taveniny s rostoucí frekvencí efekt klesá.[1]

Při tavení se vlivem intenzivního chlazení kelímku se vytváří ztuhlá vrstva. Vrstva označována jako „skull“ zabraňuje kontaktu taveniny se stěnami a dnem kelímku. To má za následek několik výhod. Asi nejpodstatnější výhodou je dosažení vysoké čistoty taveniny, které bylo dosáhnuto zabráněním možné kontaminace taveniny s kelímkem.[9] Další výhodou je ochrana kelímku před poškozením vznikem koroze především u chemicky reaktivních materiálů a vysoká teplota. „Skull“ vrstva se jeví jako tepelný a zároveň elektrický izolant nepřesahující teplotu řádově kolem 200 °C a zabraňuje odvodu tepelných ztrát taveniny do kelímku. V poslední řadě chrání kelímek vytvořený z jednotlivých segmentů před možnými zkraty uzavírajícími se právě mezi měděnými segmenty.

Oxid zirkoničitý ZrO_2 je sloučeninou zirkonia, který se dnes často vyskytuje ve šperkařském průmyslu. Důvodem je významná podobnost vlastností s diamantem, především jeho vysoký index lomu světla, jen o málo nižší než u diamantu. Na Mohsovo stupnici tvrdosti má hodnotu 8.[5] V tab. 2.1 jsou uvedeny příklady změny barev prostřednictvím přidání oxidů a jejich vizuální podoba je uvedena na obr. 2.1.

Obr. 2.1 Zleva doprava: zirkon (kubická zirkonie), Rubín, růžový zirkon, Safír, Spinel, Černý zirkon, Ametyst, Swarogreen, Padparač. (převzato z [20])

Ve slévárenství a sklářském průmyslu nalézá ZrO_2 uplatnění v tavících nádobách a vystýlkách tavících pecí jako zirkonoxidové keramiky. Zirkonooxidové keramiky patří k nejkvalitnějším keramikám. Nevýhoda těchto keramik na bázi ZrO_2 je, že tvoří výrazně vyšší cenu oproti materiálům na bázi korundu Al_2O_3.[5]

Tab. 2.1: Barevné kombinace ZrO_2-Y_2O_3 monokrystalů vytvářené přidáním oxidů.[9]

Oxid	Hmotnost [%]	Barva krystalů
Co_2O_3	0,01-0,5	Tmavě fialová
Cr_2O_3	0,1-1,0	Olivově zelená
CuO	0,1-2,0	Žlutá
Fe_2O_3	0,01-0,8	Nažloutlá
MnO_2	0,1-1	Fialovo-hnědá
NiO	0,1-2,0	Světle-hnědá
TiO	0,1-2,0	Žluto-hnědá
V_2O_3	0,1-1,0	Zelená

Tavení skla lze provádět kromě studeného kelímku i v kelímku, ve kterém nebylo nutné, aby sklo před indukčním tavením mělo zvýšenou elektrickou vodivost díky zvýšené teplotě. Teplo v takovýchto pecích vstupovalo ze zahřátého kovového kelímku dovnitř skla tvořícího vsázku. Nicméně s tímto procesem mohlo nastat několik problémů. Bylo zde velice obtížné dosahovat vyšších teplot a výsledné skleněné ingoty mnohdy obsahovaly příměsi v důsledku kontaminace s kelímkem. Indukční tavení skel ve studeném kelímku je vůči těmto problémům metodou výhodnější. Avšak místo klasického měděného studeného kelímku je

zde preferován hliník, jako konstrukční materiál studeného kelímku. To je spojené s chemickým složením skel. Přítomná skull vrstva musí obsahovat stejné chemické složení jako tavenina. Oxid hlinitý je součástí příměsí mnoho skel a tudíž nehrozí riziko znečištění, proto se používá hliníkový kelímek. Skla jako taková nemají specifický bod tání a jejich přechodná fáze z pevného skupenství do kapalného taktéž není přesně definována. Jejich významnou charakteristickou vlastností je vysoká viskozita. Vysoká viskozita zamezuje důležitému faktoru, tj. pohybu lázně, který by vytvářel dokonalé promísení taveniny a docílil by homogenní struktury. Ovšem na zhotovené skleněné komponenty užívané např. v optické technice je v tomto ohledu kladen velký důraz. Řešení se nalézá ve formě vodou chlazeného míchadla, které obstarává nucené mísení taveniny.[9]

2.2.2. Tepelná bilance

Během procesu tavení vznikají ztráty teplem, které je nutné dodat energií z vysokofrekvenčního generátoru. Tepelné ztráty jsou způsobené kondukcí a radiací. Kondukce probíhá přenosem tepla ve vsázce a rovněž mezi vsázkou a konstrukcí studeného kelímku. Hodnota těchto ztrát činní až 80% z celkových tepelných ztrát. Zbylou část tvoří ztráty vzniklé radiací z povrchu taveniny do okolí. Neudržení tepelné rovnováhy může vyvolat nežádoucí jev v procesu tavení a materiál začne částečně nebo úplně tuhnout. U malých objemů vsázky určených k tavení je tepelná bilance důležitým faktorem, zejména při kolísání teploty chladícího média a zároveň i tepelných ztrát. Navyšování výkonu generátoru předchází nežádoucí krystalizaci, ale v případě kdyby se objem vsázky snížil pod kritickou hodnotu, není již možno tuhnutí nijak odvrátit, protože se vsázka stane průzařnou.[9]

2.2.3. Vzdutí roztavené vsázky

Z uvedených poznatků je známo, že induktor je zdrojem elektromagnetického záření, které dopadá na povrch vsázky a vsázka se tímto zahřívá. Po jejím roztavení působí ve vsázce

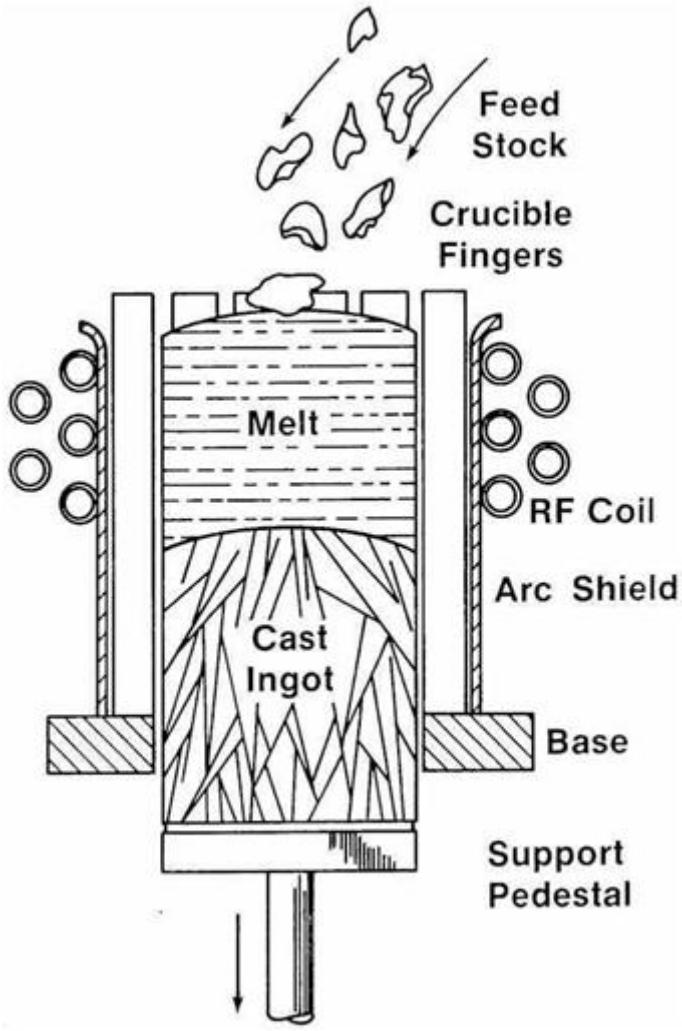
intenzivní víření vsázky, které je důležité pro dokonalé promísení taveniny z hlediska homogenity i teploty.[4] Vyvolané víření taveniny způsobí magnetohydrodynamické jevy, které mají za následek v okolí osy vsázky vznik vyvýšené hladiny. Tímto je zaručeno trvalé rozlévání taveniny pro cirkulaci. Velmi podobná situace vztlaku se děje i u dna studeného kelímku. Elektrodynamické pole vytváří magnetohydrodynamické síly, které působí v radiálním a axiálním směru. Rozložení těchto sil ve vsázce není rovnoměrně uspořádané. Tímto je zaručeno trvalé rozlévání taveniny pro cirkulaci. Velmi podobná situace vztlaku se děje i u dna studeného kelímku. Můžeme tedy říct, že v ose vsázky působí přetlak a u stěn kelímku podtlak. Rychlost víření závisí na geometrii studeného kelímku a na jeho elektrických parametrech.[14] Vzdutí h je dáno:

$$h = K\frac{P_1}{\rho_h}\sqrt{\frac{\gamma\mu_r}{f}} \quad [\mathrm{m}]\,,$$

kde K značí konstantu, P_1 je příkon vztažený na jednotku plochy vsázky, ρ_h vyjadřuje hustotu vsázky, μ_r relativní permeabilita vsázky, γ konduktivita, f je frekvence.[7]

2.3. Tuhnutí a krystalizace

Vlivem ochlazování vsázka postupně tuhne a začíná krystalizovat. Krystalizace je druh fázové přeměny a její výsledek nejčastěji tvoří forma ingotu. Obecně lze krystalizace taveniny docílit tzv. rychlou či spontánní krystalizací. Rychlá krystalizace představuje vypnutí zdroje napájení. Spontánní krystalizaci lze dosáhnout několika způsoby.[2] Nejsnadnější způsob je formou regulace snížení intenzity magnetického pole. Dále se uplatňuje metoda tzv. směrového tuhnutí. Jedná se o postupnou krystalizaci. Tento způsob se od klasického tavení liší výsuvným dnem kelímku. Výsuvné dno vzdalující se od induktoru má za následek taktéž snížení intenzity magnetického pole, což způsobí snížení teploty vsázky.[9]



Obr. 2.2 Konfigurace systému směrového tuhnutí (převzato z [12])

Změnou výkonu generátoru lze ovlivnit regulování teploty pohybující se vsázky jen nepatrně, v čemž spočívá nevýhoda této metody. Velice podobnou metodou pro růst krystalické struktury je tzv. metoda Czochralského, kde se získává ingot pozvolným vytahováním ze samotné taveniny. Czochralského metoda se používá u více než 80% výroby polovodičových krystalů. Vytahování je doprovázeno vzájemně opačnou rotací kelímku a vytahovaného krystalu. Krystalizace se využívá především v polovodičové technice (tranzistory, integrované obvody, atd.) a optice (optická vlákna, polarizační filtry, atp.). Velmi důležitým prvkem je také hrubost či velikost zrna. Jedná se o významný elektrický a technologický parametr.[9]

Proces může být konstruován se systémem pro odlévání taveniny z kelímku horní či dolní částí odlévacího systému.

3. Elektromagnetické vlnění [6]

Jak již bylo dříve řečeno, teorie elektromagnetických vln je odvozena z Maxwellových rovnic v diferenciálním tvaru. Pro toto odvození se uvažuje neohraničené homogenní izotropní prostředí s konstantami ε, μ, γ, kde se elektromagnetické vlnění bude šířit. Níže uvedený zápis je platný v jednotkách soustavy SI. První dvě rovnice mají tvar:

$$\mathrm{rot}\,\boldsymbol{H} = \gamma\boldsymbol{E} + \varepsilon\frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial \mathrm{t}} \quad [\mathrm{A/m}, \mathrm{V/m}]\,, \tag{3.1}$$

$$\mathrm{rot}\,\boldsymbol{E} = -\mu\frac{\partial \boldsymbol{H}}{\partial \mathrm{t}} \quad [\mathrm{V/m}, \mathrm{A/m}]\,. \tag{3.2}$$

Vhodným vyjádřením intenzity magnetického pole $\boldsymbol{H}$ magnetickou indukcí $\boldsymbol{B} = \mu\boldsymbol{H}$ lze zajistit, že první rovnice bude obsahovat všechny konstanty prostředí.

$$\mathrm{rot}\,\mu\boldsymbol{H} = \mathrm{rot}\,\boldsymbol{B} = \mu\gamma\boldsymbol{E} + \mu\varepsilon\frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial \mathrm{t}} \tag{3.3}$$

$$\mathrm{rot}\,\boldsymbol{E} = -\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial \mathrm{t}} \quad [\mathrm{V/m}, \mathrm{A/m}] \tag{3.4}$$

Třetí Maxwellova rovnice popisuje vztah mezi objemovou hustotou volných nábojů ρ_o [C/m^3]. V tomto prostředí se neobjevují žádné vnitřní zdroje elektrické energie a tudíž i objemová hustota volných nábojů bude nulová. Poslední čtvrtá Maxwellova rovnice říká, že divergence magnetické indukce $\boldsymbol{B}$ je rovna nule. Po těchto úvahách mají rovnice tvar:

$$\mathrm{div}\,\boldsymbol{D} = \mathrm{div}\,\varepsilon\boldsymbol{E} = 0, \quad \mathrm{div}\,\boldsymbol{E} = 0, \tag{3.5}$$

$$\mathrm{div}\,\boldsymbol{B} = \mathrm{div}\,\mu\boldsymbol{H} = 0, \quad \mathrm{div}\,\boldsymbol{H} = 0. \tag{3.6}$$

Aplikováním matematické operace rotace na (3.4) dostáváme:

$$\mathrm{rot}\,(\mathrm{rot}\,\boldsymbol{E}) = -\mathrm{rot}\,\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial \mathrm{t}} = -\frac{\partial}{\partial \mathrm{t}}\mathrm{rot}\,\boldsymbol{B}. \tag{3.7}$$

Následným dosazením za rot $\boldsymbol{B}$ z (3.3) dostáváme rovnici již bez magnetické indukce v následujícím tvaru:

$$\mathrm{rot}\,(\mathrm{rot}\,\boldsymbol{E}) = -\frac{\partial}{\partial \mathrm{t}}\left(\mu\gamma\boldsymbol{E} + \mu\varepsilon\frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial \mathrm{t}}\right) = -\mu\gamma\frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial \mathrm{t}} - \mu\varepsilon\frac{\partial^2 \boldsymbol{E}}{\partial \mathrm{t}^2} \tag{3.8}$$

Odvozením, které je uvedeno v [6] získáme tvar:

$$\mathrm{rot}\,(\mathrm{rot}\,\boldsymbol{E}) = \mathrm{grad}\,\mathrm{div}\,\boldsymbol{E} - \nabla^2\boldsymbol{E} = -\nabla^2\boldsymbol{E} \tag{3.9}$$

Po dosazení do (3.8) je získána zobecněná rovnice elektromagnetického vlnění pro vektor $\boldsymbol{E}$.

$$\nabla^2\boldsymbol{E} - \mu\varepsilon\frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial \mathrm{t}^2} - \mu\gamma\frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial \mathrm{t}} = 0. \tag{3.10}$$

Obdobným způsobem pro získání zobecněné rovnice elektromagnetického šíření pro vektor magnetické indukce $\boldsymbol{B}$ se provede na (3.3) rotace

$$\mathrm{rot}\,(\mathrm{rot}\,\boldsymbol{B}) = \mu\gamma\,\mathrm{rot}\,\boldsymbol{E} + \mu\varepsilon\,\mathrm{rot}\,\frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial \mathrm{t}}.$$

Dosazením za rot $\boldsymbol{E}$ z (3.4) se vyloučí z výrazu vektor intenzity elektrického pole

$$\mathrm{rot}\,(\mathrm{rot}\,\boldsymbol{B}) = \mu\gamma\left(-\frac{\partial^2 \boldsymbol{B}}{\partial \mathrm{t}}\right) + \mu\varepsilon\left(\frac{\partial^2 \boldsymbol{B}}{\partial \mathrm{t}^2}\right) = -\nabla^2\,\boldsymbol{B},$$

a výsledný tvar bude:

$$\nabla^2\,\boldsymbol{B} - \mu\varepsilon\frac{\partial^2 \boldsymbol{B}}{\partial \mathrm{t}^2} - \mu\gamma\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial \mathrm{t}} = 0. \tag{3.11}$$

Rovnice elektromagnetického vlnění (3.10) a (3.11) se mohou vyjádřit pro prostředí vodivé a nevodivé. Pro tento účel je výhodnější uvažovat vektor intenzity magnetického pole $\boldsymbol{H}$ místo vektoru magnetické indukce $\boldsymbol{B}$, jenž se od sebe liší jen materiálovou konstantou.

$$\nabla^2\,\boldsymbol{H} - \mu\varepsilon\frac{\partial^2 \boldsymbol{H}}{\partial \mathrm{t}^2} - \mu\gamma\frac{\partial \boldsymbol{H}}{\partial \mathrm{t}} = 0. \tag{3.12}$$

V nevodivém prostředí je měrná elektrická vodivost rovna nule, $\gamma = 0$. Ve výsledku se toto projeví opadnutím třetího členu rovnice (3.10) a (3.12)

$$\nabla^2\,\boldsymbol{H} = \varepsilon\mu\frac{\partial^2 \boldsymbol{H}}{\partial \mathrm{t}^2},$$

$$\frac{\partial^2 \boldsymbol{H}}{\partial \mathrm{t}^2} = \frac{1}{\mu\varepsilon}\nabla^2\boldsymbol{H} = \frac{1}{\mu_0\mu_\mathrm{r}\varepsilon_0\varepsilon_\mathrm{r}}\nabla^2\boldsymbol{H} = \frac{\mathrm{c}^2}{\mu_\mathrm{r}\varepsilon_\mathrm{r}}\nabla^2\boldsymbol{H} = \mathrm{v}^2\nabla^2\boldsymbol{H}; \tag{3.13}$$

obdobně

$$\nabla^2\,\boldsymbol{E} = \mu\varepsilon\frac{\partial^2 \boldsymbol{E}}{\partial \mathrm{t}^2},$$

$$\frac{\partial^2 \boldsymbol{E}}{\partial \mathrm{t}^2} = \mathrm{v}^2\nabla^2\boldsymbol{H}. \tag{3.14}$$

Rychlost šíření elektromagnetického vlnění je:

$$\mathrm{v} = \frac{\mathrm{c}}{\sqrt{\mu_\mathrm{r}\varepsilon_\mathrm{r}}}\ [\mathrm{m/s}]. \tag{3.15}$$

Pro prostředí vodivé je vhodné upravit rovnici (3.10) do tvaru:

$$\nabla^2\,\boldsymbol{E} - \mu\frac{\partial}{\partial \mathrm{t}}\left(\varepsilon\frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial \mathrm{t}} + \gamma\boldsymbol{E}\right) = 0.$$

Z tohoto tvaru je patrné, že první a druhý člen v závorce představují druhy elektrického proudu. Konkrétněji proud posuvný a vodivý. Proud posuvný je v dobrém vodiči nepatrný, a lze ho zanedbat.

$$\nabla^2 \boldsymbol{E} - \mu\gamma\left(\frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial \mathrm{t}}\right) = 0,$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial \mathrm{t}} = \frac{1}{\mu\gamma}\nabla^2 \boldsymbol{E}, \tag{3.16}$$

obdobně

$$\frac{\partial \boldsymbol{H}}{\partial \mathrm{t}} = \frac{1}{\mu\gamma}\nabla^2 \boldsymbol{H}. \tag{3.17}$$

3.1. Harmonické elektromagnetické vlnění [6]

Pokud mají veličiny pole harmonický průběh, lze časové derivace vyjádřit pomocí úhlové frekvence ω=2πf. Tyto veličiny budou ve tvaru fázoru. Jako příklad je uveden fázor intenzity elektrického pole $\overline{\boldsymbol{E}}$ a jeho derivace

$$\boldsymbol{E} = \mathrm{E}\, \mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega \mathrm{t}}\ , \frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial \mathrm{t}} = \mathrm{j}\omega \mathrm{E}\, \mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega \mathrm{t}} = \mathrm{j}\omega \overline{\boldsymbol{E}}\ , \frac{\partial^2 \boldsymbol{E}}{\partial \mathrm{t}^2} = -\omega^2\, \overline{\boldsymbol{E}}. \tag{3.18}$$

Zobecněné rovnice elektromagnetického vlnění převedené do fázorového tvaru

$$\nabla^2 \boldsymbol{E} - \mu\varepsilon\frac{\partial^2 \boldsymbol{E}}{\partial \mathrm{t}^2} - \mu\gamma\,\frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial \mathrm{t}} = 0,$$

$$\nabla^2\, \overline{\boldsymbol{E}} + \omega^2\mu\varepsilon\overline{\boldsymbol{E}} - \mathrm{j}\omega\mu\gamma\overline{\boldsymbol{E}} = \nabla^2\, \overline{\boldsymbol{E}} + (\omega^2\mu\varepsilon - \mathrm{j}\omega\mu\gamma)\overline{\boldsymbol{E}} = 0. \tag{3.19}$$

Výraz v závorce lze označit jako konstantu k^2

$$\mathrm{k}^2 = (\omega^2\mu\varepsilon - \mathrm{j}\omega\mu\gamma) = -\mathrm{j}\omega\mu(\gamma + \mathrm{j}\omega\varepsilon). \tag{3.20}$$

Konstanta *k* je komplexní číslo a nazývá se konstantou šíření. Charakterizuje elektromagnetické vlnění v uvažovaném prostředí. Komplexní číslo tvoří reálnou a imaginární složku.

$$\mathrm{k} = \alpha - \mathrm{j}\beta\ , \quad \mathrm{k}^2 = \alpha^2 - 2\mathrm{j}\alpha\beta - \beta^2. \tag{3.23}$$

Členy α a β jsou závislé na konstantách prostředí ε, μ, γ. Jsou označovány jako fázová konstanta a měrný útlum a jejich hodnoty se získají řešením a porovnáním rovnic (3.20) a (3.23). Zde platí rovnost reálných a imaginárních částí

$$\omega^2\varepsilon\mu = \alpha^2 - \beta^2\ , \quad \mathrm{j}\omega\mu\gamma = \mathrm{j}2\alpha\beta. \tag{3.24}$$

Z rovnosti imaginárních členů se vyjádří člen α, který se poté dosadí do rovnosti částí reálných. Výsledkem je kvadratická rovnice tvaru:

$$4\beta^4 + 4\omega^2\mu\varepsilon\beta^2 - \omega^2\mu^2\gamma^2 = 0.$$

Kořeny vzniklé vyřešením kvadratické rovnice

$$\beta_{12}^2 = \frac{1}{2}\omega^2\varepsilon\mu\left\{-1 \pm \sqrt{\left[1+\left(\frac{\gamma}{\omega\varepsilon}\right)^2\right]}\right\}. \tag{3.25}$$

Konstanta β představující měrný útlum

$$\beta = \omega\sqrt{\left\|\frac{\mu\varepsilon}{2}\left\{-1+\sqrt{\left[1+\left(\frac{\gamma}{\omega\varepsilon}\right)^2\right]}\right\}\right\|}. \tag{3.26}$$

Fázová konstanta α. Její hodnotu dostaneme z (3.24), když za β^2 dosadíme z (3.26)

$$\alpha = \omega\sqrt{\left\|\frac{\mu\varepsilon}{2}\left\{1+\sqrt{\left[1+\left(\frac{\gamma}{\omega\varepsilon}\right)^2\right]}\right\}\right\|}. \tag{3.27}$$

Poté obecné rovnice pro harmonické elektromagnetické vlnění vypadají:

$$\nabla^2\,\overline{\boldsymbol{E}} + \mathrm{k}^2\overline{\boldsymbol{E}} = 0\ , \quad \nabla^2\,\overline{\boldsymbol{H}} + \mathrm{k}^2\overline{\boldsymbol{H}} = 0. \qquad (3.21),\ (3.22)$$

Rovnice (3.21) a (3.22) platí pro prostředí vodivé i nevodivé, pro elektromagnetické vlnění rovinné či válcové.

3.2. Válcové harmonické elektromagnetické vlnění [6]

Vzhledem k nejrozšířenějšímu užití studenému kelímku ve tvaru válce resp. jeho induktoru, je vhodné vyjádřit rovnice elektromagnetického harmonického vlnění ve válcových souřadnicích. Zjednodušeně lze tvrdit, že vyzařující válcová plocha bude představovat induktor, který bude navinut jako cívka obdélníkového průřezu, přičemž budeme uvažovat izolaci mezi jednotlivými zavity o nulové tloušťce. Vyjdeme z odvozených obecných rovnic pro harmonické elektromagnetické vlnění (3.21) a (3.22)

$$\nabla^2\,\overline{\boldsymbol{E}} + \mathrm{k}^2\overline{\boldsymbol{E}} = 0\ , \quad \nabla^2\,\overline{\boldsymbol{H}} + \mathrm{k}^2\overline{\boldsymbol{H}} = 0\ .$$

Jelikož uvažujeme válcovou soustavu souřadnic, je třeba Laplaceův operátor ∇^2 také převést do této soustavy. Pro převod z pravoúhlé soustavy souřadnic do válcové soustavy souřadnic musí být splněna podmínka, že uvažovaný vektor má směr osy Z válcové soustavy souřadnic. Tato podmínka platí jen pro intenzitu magnetického pole $\overline{\boldsymbol{H}}$. Potom obecný výraz

pro $\nabla^2\bar{\boldsymbol{H}}$ ve válcovém systému souřadnic bude:

$$\nabla^2\bar{\boldsymbol{H}} = \frac{1}{\mathrm{r}}\frac{\partial}{\partial \mathrm{r}}\left(\mathrm{r}\frac{\partial\bar{\boldsymbol{H}}}{\partial \mathrm{r}}\right) + \frac{1}{\mathrm{r}^2}\frac{\partial^2\bar{\boldsymbol{H}}}{\partial\varphi^2} + \frac{\partial^2\bar{\boldsymbol{H}}}{\partial \mathrm{z}^2}\ . \tag{3.28}$$

U válcového vlnění závisí intenzita magnetického pole $\bar{\boldsymbol{H}}$ jen na poloměru r, potom jsou derivace

$$\frac{\partial\bar{\boldsymbol{H}}}{\partial \mathrm{r}} = 0\,, \frac{\partial\bar{\boldsymbol{H}}}{\partial \mathrm{z}} = 0\,.$$

Po dosazení derivací do obecného výrazu a úpravě

$$\nabla^2\bar{\boldsymbol{H}} = \frac{1}{\mathrm{r}}\frac{\partial}{\partial \mathrm{r}}\left(\mathrm{r}\frac{\partial\bar{\boldsymbol{H}}}{\partial \mathrm{r}}\right) = \frac{1}{\mathrm{r}}\frac{\partial \mathrm{r}}{\partial \mathrm{r}}\frac{\partial\bar{\boldsymbol{H}}}{\partial \mathrm{r}} + \frac{1}{\mathrm{r}}\mathrm{r}\frac{\partial^2\bar{\boldsymbol{H}}}{\partial \mathrm{r}^2} = \frac{\partial^2\bar{\boldsymbol{H}}}{\partial \mathrm{r}^2} + \frac{1}{\mathrm{r}}\frac{\partial\bar{\boldsymbol{H}}}{\partial \mathrm{r}}\ . \tag{3.29}$$

Dosazením za $\nabla^2\bar{\boldsymbol{H}}$ do obecných rovnic harmonického elektromagnetického vlnění (3.21), (3.22) dostaneme:

$$\frac{\mathrm{d}^2\bar{\boldsymbol{H}}}{\mathrm{dr}^2} + \frac{1}{\mathrm{r}}\frac{\mathrm{d}\bar{\boldsymbol{H}}}{\mathrm{dr}} + \mathrm{k}^2\bar{\boldsymbol{H}} = 0\ . \tag{3.30}$$

Vydělením tohoto výrazu konstantou šíření k^2, dostaneme Besselovu diferenciální rovnici nultého řádu pro argument (kr)

$$\frac{\mathrm{d}^2\bar{\boldsymbol{H}}}{\mathrm{d(kr)}^2} + \frac{1}{\mathrm{kr}}\frac{\mathrm{d}\bar{\boldsymbol{H}}}{\mathrm{d(kr)}} + \bar{\boldsymbol{H}} = 0\ . \tag{3.31}$$

Řešením této Besselovy diferenciální rovnice je lineární kombinace cylindrických funkcí

$$\bar{\boldsymbol{H}} = \mathrm{C_1 J_0(kr)} + \mathrm{C_2 N_0(kr)}\ [\mathrm{A/m}]\,, \tag{3.32}$$

kde C_1 **a** C_2 jsou integrační konstanty, jejichž hodnoty se určí z mezních podmínek

$J_0(kr)$, $N_0(kr)$ jsou cylindrické funkce prvního (Besselova funkce) a druhého druhu (Neumannova funkce), nultého řádu pro argument (kr).

K vyjádření intenzity elektrického pole $\bar{\boldsymbol{E}}$ je třeba odvodit vzájemný vztah s intenzitou magnetického pole $\bar{\boldsymbol{H}}$ o poloměru r. Ten je dán první Maxwellovou rovnicí

$$\mathrm{rot}\,\bar{\boldsymbol{H}} = \gamma\bar{\boldsymbol{E}} + \mathrm{j}\omega\varepsilon\bar{\boldsymbol{E}} = (\gamma + \mathrm{j}\omega\varepsilon)\bar{\boldsymbol{E}}\,. \tag{3.33}$$

Velikost rotace $\bar{\boldsymbol{H}}$ na poloměru (r+dr) je vysvětlena v [6] a má tvar:

$$-\mathrm{rot}\bar{\boldsymbol{H}} = \frac{\left(\bar{\boldsymbol{H}} + \frac{\partial\bar{\boldsymbol{H}}}{\partial \mathrm{r}}\mathrm{dr}\right) - \bar{\boldsymbol{H}}}{\mathrm{dr}} = \frac{\partial\bar{\boldsymbol{H}}}{\partial \mathrm{r}}. \tag{3.34}$$

Spojením (3.33) a (3.34) dostaneme:

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

Derivací výrazu (3.32) tj. obou cylindrických funkcí získáváme tvar intenzity elektrického pole $\overline{\boldsymbol{E}}$, který je vysvětlen v [6]

$$\overline{\boldsymbol{E}} = \frac{\mathrm{k}}{\gamma + \mathrm{j}\omega\varepsilon}[\mathrm{C}_{\mathbf{1}}\mathrm{J}_1(\mathrm{kr}) + \mathrm{C}_2\mathrm{N}_1(\mathrm{kr})] \quad [\mathrm{V}\cdot\mathrm{m}^{-1}]. \tag{3.35}$$

3.3. Poyntingův (zářivý) vektor

Poyntingův vektor $\boldsymbol{S}$ udává směr a hustotu toku elektromagnetické energie, která proteče za jednotku času jednotkovou plochou. Představuje výkon vycházející z objemu vztažný na jednotku plochy. Poyntingův vektor je vektor kolmý na rovinu, kde leží vektory intenzity elektrického pole E a intenzity magnetického pole H. Jeho reálná složka vyjadřuje činný výkon a imaginární složka výkon jalový nebo-li magnetizační výkon opět na jednotku plochy. Velice často je užíván při výpočtech indukčních ohřevů.[7]

$$\boldsymbol{S} = \boldsymbol{E} \times \boldsymbol{H}\ [W/m^2]$$

4. Hodnocení metodou 3E

Technologie spjatá se studeným kelímkem není zcela novou technologií. První technické poznatky této metody mohli vědci ve světě zkoumat již na přelomu šedesátých a sedmdesátých let dvacátého století. I přesto se s tímto způsobem tavení či zpracováním nebezpečných odpadů v české literatuře nijak zásadně nesetkáte. V dnešní době tento zvláštní druh indukční pece vlastnilo doposud několik států, ke kterým se připojila i Česká republika. Vybudovaný studený kelímek je umístěn v Ústavu jaderného Výzkumu v Řeži a další by se měl instalovat na Západočeské univerzitě v Plzni.

4.1 Efectiveness

Technologií skull-melting se inovují vlastnosti materiálů, slitin a procesy zpracování a minimalizace objemu nebezpečných odpadů. Takto zhotovené slitiny či materiály nejvíce ocení výzkumníci zabývající se výzkumem v podobě „high-tech“ technologií.

V Ústavu jaderného výzkumu experimentují například se skladováním vyhořelého radioaktivního paliva a ukládání ve speciálních matricích do kontejnerů. Zabývají se kolik izolačního materiálu se má vložit mezi tyto kontejnery, aby nedocházelo ke štěpné reakci. Další experimenty jsou spojené se simulací havárie jaderných elektráren, především se specializují na materiály, které by byly schopny zachytit a udržet roztavené palivo. A také se zaměřují na palivové články, ze kterých by bylo možno využít větší množství energie, než je tomu dosud. Většina uskladněných vyhořelých paliv obsahuje cca 90% množství nevyužitelné energie. Do budoucna bude tak tvořit zajímavou technologii pro různé účely.[3]

Tab. 4.1: Energetické a technologické parametry pro tavení materiálů elektricky vodivých a nevodivých.[23]

Parametr	**Jednotky**	**Kovy**	**Nevodivé materiály**
teplota tání	°C	až 3400	až 3880
el. vodivost v roztaveném stavu	S/m	$(1\text{-}5)\cdot10^6$	$(0{,}4\text{-}5)\cdot10^3$
Frekvence	kHz	0,05-10	440-5280
měrná spotřeba energie	kWh/kg	0,6-10	1,5-10
tepelný tok do stěn kelímku	kW/m^2	900-5000	100-1000
tloušťka povrchové vrstvy	mm	velmi malá	2-20
el. účinnost induktoru	%	5-7	85-90
Atmosféra		ochranný plyn	vzduch či ochranný plyn
startovací materiál		není požadováno	požadováno
víření vsázky		silné	Slabé

Data z tab. 4.1 ukazují rozdílné parametry pro různé materiály z hlediska elektrické vodivosti.

4.2. Economy

Investiční náklady na pořízení indukčního tavení ve studeném kelímku jsou v řádech miliónů korun českých. Oproti konvenčním pecím se ale tato konstrukce především typem kelímku liší dobou životnosti. Ztuhlý povlak vytvořený na povrchu taveniny, vytvářející se díky intenzivnímu chlazení, zamezuje vzniku koroze a také zajišťuje ochranu před vysokými teplotami. Doba výrobních a operačních fází je kratší oproti běžným indukčním pecím. Kvalita hutního materiálu konečného produktu vzrostla.

4.3. Efficiency

Pro největší efektivnost tavení se provádí analytické výpočty matematických modelů studeného kelímku. Pro tepelný výpočet je stanoveno několik empirických vzorců, které se zavedly z důvodu značně vysokých teplot. Při teplotách dosažených ve studeném kelímku nelze přesně určit, jak se daný materiál bude chovat. Minimalizací elektrických a tepelných

ztrát lze zvýšit efektivnost, kterou doprovází správný konstrukční návrh systému a vhodně použité materiály. Doba ohřevu i třeba rozložení teplot ve vsázce také ovlivňují efektivnost. Pro přiblížení k minimální hodnotě ztrát je pro jednotlivý druh a objem taveného materiálu nutné přizpůsobit samotnou konstrukci kelímku i řadu ostatních parametrů. Konfigurace z hlediska konstrukčního ovlivňuje tvar segmentů, jejich počet a šířku štěrbin, průměr či tloušťka stěn. Zvýšený počet segmentů odpovídá lepším výsledkům transparentnosti magnetického pole, dále pro vyšší efektivitu se doporučuje zvýšit poměr výška/průměr kelímku. Při volbě frekvence se musí uvážit vliv propustnosti magnetického pole přes stěnu kelímku a zakřivení vsázky se stěnou kelímku. Pracovní frekvence by měli dosahovat minimálně kritických hodnot pro různé materiály. Nižší hodnoty frekvence vedou k neúspěšnému procesu tavení.

Tab. 4.2: Kritické hodnoty frekvencí pro dané materiály a jejich měnící se měrný odpor vůči druhu skupenství.[1]

Materiál	**Stav vsázky**	**Teplota tání T [°C]**	**Měrný odpor [Ω·cm]**	**Kritická frekvence f_{min} [kHz]**
LiF	tavenina	900	$1{,}2\cdot10^{-1}$	360
NaF	tavenina	1200	$1{,}9\cdot10^{-1}$	570
KF	tavenina	900	$2{,}6\cdot10^{-1}$	780
NaCl	tavenina	800	$3{,}3\cdot10^{-1}$	990
MgO	pevný	2700	$5\cdot10^{2}$	$1{,}5\cdot10^{6}$
SiO_2	pevný	1700	$9\cdot10^{3}$	$2{,}7\cdot10^{7}$
ZrO_2	pevný	2000	1	$3\cdot10^{3}$
Y_2O_3	tavenina	2430	$5\cdot10^{-2}$	150
Y_2O_3	pevný	1500	$3\cdot10^{1}$	$90\cdot10^{3}$
Al_2O_3	pevný	1875	$2{,}2\cdot10^{4}$	$6{,}6\cdot10^{7}$
Al_2O_3	tavenina	2200	$1\cdot10^{-1}$	300

Pozn. Hodnoty v tab. 4.2 platí pro průměr vsázky d=0,1 m.

Elektrická účinnost technologie se výrazně liší podle typu vsázky. Pro tavení elektricky nevodivých materiálů dosahuje více než 90%. Hodnota elektrické účinnosti při tavení vodivých materiálů dosahuje maximálně 50%. Výsledná účinnost bude mít ještě nižší hodnotu zapříčiněnou tepelnou ztrátou, která je přímo úměrná výšce taveniny a průměru kelímku. Indukční tavení ve studeném kelímku je tedy vhodné používat pro aplikace, kde se požaduje stupeň nejvyšší čistoty materiálů a slitin. Velice žádané jsou slitiny na bázi hliníku s přechodnými kovy (titan, železo, nikl), označované aluminidy. Aluminidy jsou perspektivní

materiály pro vysokoteplotní aplikace. Jejich výhodou je nízká hustota v kombinaci s velmi dobrou oxidační schopností a tepelnou bilancí.

Závěr

I přesto, že energetické náklady tvoří podstatně vyšší hodnotu oproti konvenčním pecím, patří tato technologie studeného kelímku mezi stále více se rozrůstající a užívanější formu přípravy oxidů a zpracování nebezpečného odpadu. Země zabývající se integrací skleněného radioaktivního odpadu do skleněných matric jsou především Francie, Rusko, USA a Čína. Tyto země používají pro výrobu elektrické energie jaderné elektrárny, které produkují radioaktivní odpad a hledají nejefektivnější řešení zpracování odpadů. Poptávka po oxidech jako materiálů výrazně stoupá a dá se tedy předpokládat další vývoj pro oblast spojenou s jejich přípravou, tedy i se studeným kelímkem, kde by zvýšení výsledné účinnosti představovalo odstranění významného nedostatku.

Studeným kelímkem se tudíž zpracovávají vodivé i nevodivé materiály, kde je požadována vysoká čistota výsledného produktu. Obě skupiny materiálů mají své specifické vlastnosti. Vzájemně se od sebe liší v elektrické účinnosti tavení a systémem provedení startovací fáze. Provoz studeného kelímku je velmi náročný a musí být pečlivě řízen a kontrolován.

Seznam použité literatury

[1] КУЗЬМИНОВ, Ю. С., Е. Е. ЛОМОНОВА a В. В. ОСИКО. Тугоплавкие материалы из холодного тигля. 1. vyd. Moskva: Наука, 2004. ISBN 5-02-002820-7.

[2] BOJAREVICS, V., R. A. HARDING, K PERICLEOUS a M. WICKINS. METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS B. *The Development and Experimental Validation of a Numerical Model of an Induction Skull Melting Furnace*. 2004, č. 803.

[3] O výzkumu v Řeži - Neutrony útočí na rakovinu. *O výzkumu v Řeži - Neutrony útočí na rakovinu* [online]. 1999 [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: http://www.energyweb.cz/web/zpravodaj/zpr_05_03_01b.htm

[4] LANGER, Emil a Jiří KOŽENÝ. Elektrotepelná zařízení indukční. 1. vyd. Plzeň: VŠSE, 1982, s. 53-60. ISBN 55-095-82.

[5] Oxid zirkoničitý. In: *Wikipedia*: *the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Oxid_zirkoničitý

[6] LANGER, Emil. *Teorie indukčního a dielektrického tepla*. 2., přepracované a doplněné vydání. Praha: Academia, 1979. ISBN 509-21-857.

[7] RADA, Josef. *Elektrotepelná technika*. 1. vyd. Praha: SNTL/Alfa, 1985. ISBN 04-525-85.

[8] BROIHANNE a BANNISTER. Using Cold-Crucible Melting for Titanium Precision Castings. *Using Cold-Crucible Melting for Titanium Precision Castings*. 2000.

[9] BEHRENS, Torge. *Prozessorientierte Analyse der induktiven Skull-Melting-Technologie bei Verwendung eines Transistorumrichters. 1. vyd. Gottingen: CUVILLIER VERLAG, 2007. ISBN 978-3-86727-405-0.*

[10] MÜHLBAUER, Alfred. *Innovative Induction Melting Technologies: A Historical Review*. Riga: International Scientific Colloquium, 2006.

[11] Přenos tepla. In: *Wikipedia*: *the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: http://wikipedia.infostar.cz/h/he/heat_transfer.html

[12] KANG, YUEMING, ZHONGMING, SHOUJUN, JIHE a GUOCHANG. *Electromagnetic model of levitation melting with cold crucible*. Shanghai: Shanghai enhanced laboratory of ferrometallurgy, 1996.

[13] Siliconsultant. *Electromagnetic Cold Crucible Casting* [online]. [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: http://www.siliconsultant.com/EMC.htm

[14] DOLEŽEL, Ivo, Ladislav MUSIL a Bohuš ULRYCH. Elektro. *Moderní průmyslové technologie založené na procesech v tekutých kovech řízených elektromagnetickým polem* [online]. 2003, č. 11 [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25605

[16] ПЕТРОВ, ЮБ; РАТНИКОВ, ДГ. *Холодные тигли*. Mockva : Металлургия, 1972. 112 s.

[15] PREJZA, Radek. *Teorie a aplikace tavení materiálů metodou „studeného kelímku“*. Plzeň, 2011. Diplomová práce. ZČU.

[17] ROT, D. a J. KOŽENÝ. Electroscope. *Modelování startu tavby oxidů kovů elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku* [online]. 2010, č. 4 [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: http://147.228.94.30/images/PDF/Rocnik2010/Cislo4_2010/r4c4c1.pdf

[18] ZOBAČ, Ladislav. UPT AVCR. In: *Fyzikální podstata ohřevu elektronovým svazkem* [online]. 2011 [cit. 2012-05-17]. Dostupné z: http://ebt.isibrno.cz/knihy/prirucka/fyzikalni-podstata-ohrevu-elektronovym-svazkem

[19] Science and Technology of Advanced Materials. In: ASAI, S. *Recent development and prospect of electromagnetic processing of materials* [online]. Japan, 2000 [cit. 2012-05-17]. DOI: 10.1016/S1468-6996(00)00016-4. Dostupné z: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1468699600000164

[20] Veneo. *Lubomír Krčmář* [online]. [cit. 2012-05-17]. Dostupné z: http://www.veneo.cz/otazky-a-odpovedi.html

[21] Krystal. In: *Wikipedia*: *the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-05-17]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Krystal

[22] Izotop. In: *Wikipedia*: *the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-05-17]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Izotop

[23] MÜHLBAUER, Alfred. *History of induction heating and melting*. Germany: Vulkan-Verlag, 2008. ISBN 978-3-8027-2946-1.

[24] NACKE, Bernard. Induction Skull Melting of Oxides and Glasses. In: [online]. Germany [cit. 2012-05-26]. Dostupné z: http://www.uie.org/webfm_send/501

[25] SUGILAL, G., P. B. S. SENGAR a S. D. MISRA. *COLD CRUCIBLE INDUCTION MELTER: TECHNOLOGY DEVELOPMENT FOR HLW VITRIFICATION* [online]. 2007[cit. 2012-05-26]. 276. Dostupné z: http://www.barc.ernet.in/publications/nl/2007/200701-3.pdf

[26] CONSARC. *Induction skull melting furnaces*. USA. Dostupné z: http://www.consarc.com/brochures/ism.pdf

Přílohy

Příloha A- Tavící zařízení studeného kelímku

Tavící pec studeného kelímku firmy Consarc v USA.(převzato z [26])

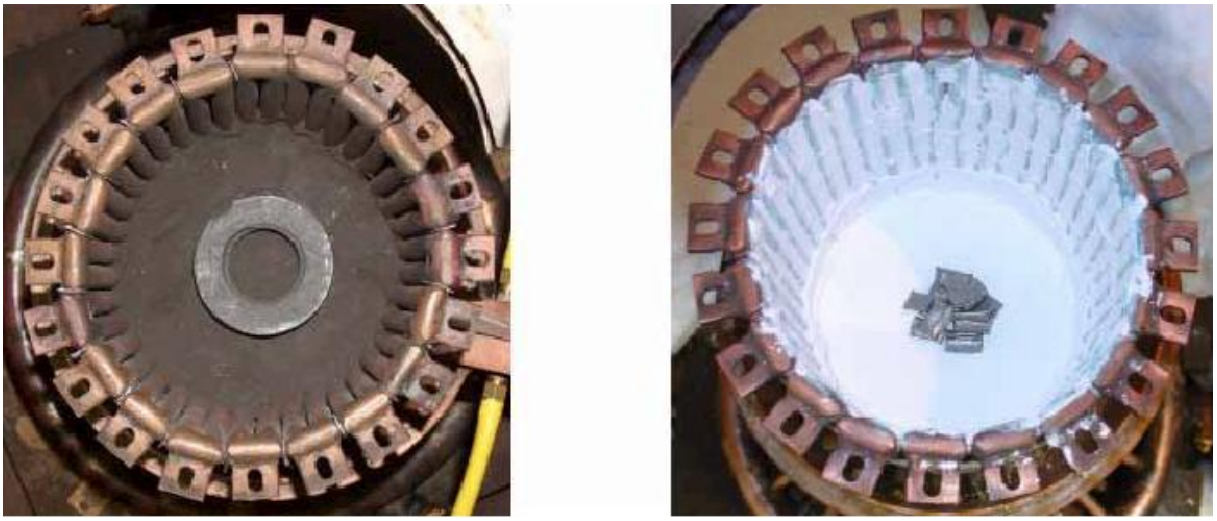
Studený kelímek ústavu systémového inženýrství univerzity Leibniz v Hannoveru. (převzato z [24])

Detailnější pohled na provedení klasického studeného kelímku.(převzato z [24])

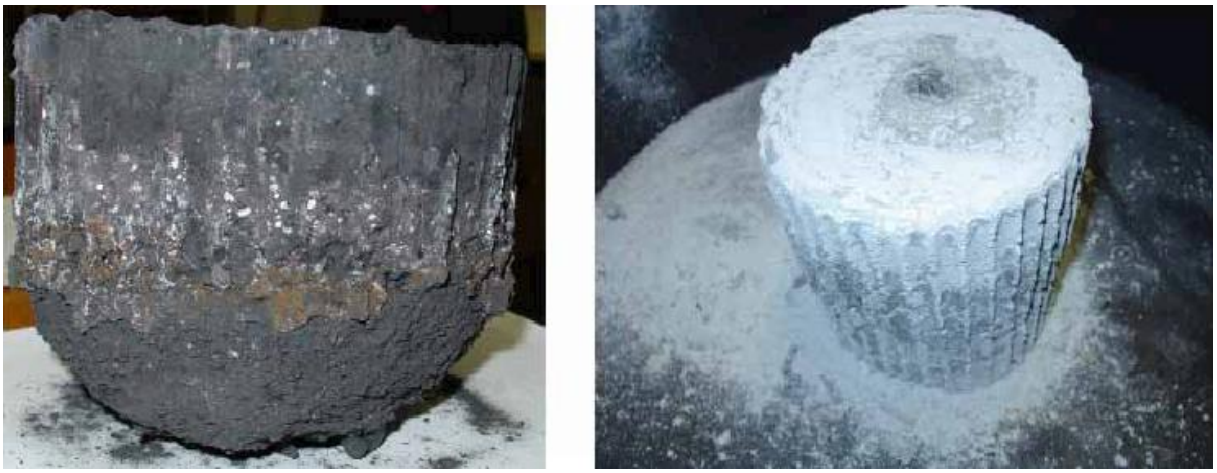
Konstrukční varianta induktoru tvořící stěny studeného kelímku naplněného směsí kusy skel a skleněného prášku.(převzato z [24])

Odlévání roztavené vsázky do připravené formy.(převzato z [25])

Příloha B- Ukázka startovacích materiálů, ingotů a jejich struktur



Startovací materiál v podobě grafitového kroužku a metalického zirkonu.(převzato z [24])



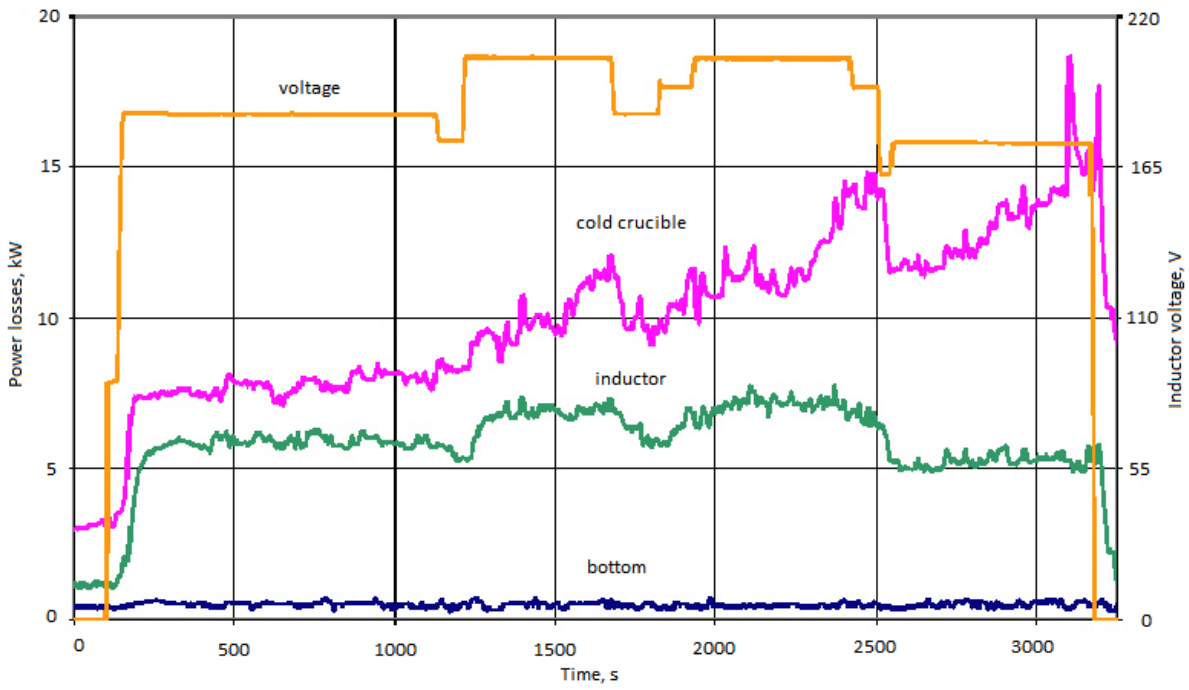
Ingot: YbCo (vlevo), ZrO_2 (vpravo).(převzato z [24])

Struktura ingotu: YbCo vzniklá okamžitým vypnutím generátoru (vlevo), ZrO_2 vytvořená pomalým snižováním výkonu generátoru po určitý čas (vpravo).(převzato z[24])

Struktura ingotu vytvořená řízeným výkonem generátoru při chladnutí vsázky.

(převzato z [24])

Příloha C – Ukázka výkonových ztrát



Průběh výkonových ztrát při tavení YbCo. (převzato z [24])