

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektroenergetiky a ekologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Analýza výsledků z tavení oxidů ve studeném kelímku

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin KOPA**

Osobní číslo: **E16N0101P**

Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Elektroenergetika**

Název tématu: **Analýza výsledků z tavení oxidů 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 princip tavení materiálů elektricky nevodivých a elektricky vodivých ve studeném kelímku elektromagnetickou indukci.
2. Objasněte problematiku "startovací fáze" při tavení elektricky nevodivých materiálů.
3. Sestavte matematický model vybraných časových úseků startovací fáze.
4. Provedte analýzu naměřených hodnot z realizovaných taveb oxidů hliníku a zirkonia.
5. Stanovte závěry pro optimální průběh tavení a proveďte úvahu o hodnocení taveb kritériem 3E.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **40 - 60 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce:

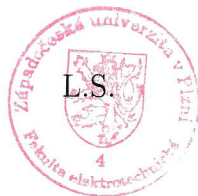
Prof. Ing. Jiří Kožený, CSc.

Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **10. října 2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2018**

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



Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 10. října 2017

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na tavení oxidů ve studeném kelímku. V úvodu je popsán rozdíl principu tavení elektricky vodivých a nevodivých materiálů ve studeném kelímku. Následně je kladen důraz na startovací fázi při tavení elektricky nevodivých materiálů. Dále je proveden zjednodušený výpočet studeného kelímku, a také byla provedena simulace účinků elektromagnetické indukce na různé uložení vloženého startovacího materiálu. Na závěr je v práci provedena analýza čtyřech taveb oxidů kovů a vyhodnocení technologie tavení ve studeném kelímku kritériem 3E.

Klíčová slova

Analýza, elektromagnetická indukce, fáze, oxidy kovů, simulace, startovací materiál, studený kelímek, tavba, vsázka, výpočet, zhodnocení

Abstract

This magister thesis is focused on the melting of oxides in a cold crucible. The introduction describes the difference in the principle of melting electrically conductive and non-conductive materials in the cold crucible. Subsequently, emphasis is placed on the start-up phase of melting of non-conductive materials. Furthermore, a simplified calculation of the cold crucible is carried out, and simulations of the effects of electromagnetic induction on various storage of embedded starter material have been performed. In conclusion, the analysis of four melting of metal oxides and the evaluation of the melting technology in the cold crucible is performed by the criterion 3E.


Key words

Analysis, calculation, cold crucible, electromagnetic induction, evaluation, load, melting, metal oxides, phase, simulation, starting material

Prohlášení

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

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


.....

podpis

V Plzni dne 22. 5. 2018

Bc. Martin Kopa

Poděkování

Nejprve bych chtěl poděkovat Prof. Ing. Jiřímu Koženému, CSc., Doc. Ing. Igorovi Poznyakovi, CSc. a Ing. Davidovi Rotovi, Ph.D., za jejich velmi přínosné a srozumitelné konzultace, které mi napomohly ke zdárnému dokončení mé diplomové práce.

Velký dík patří mé rodině, která mi opět ukázala, že když budu kdykoliv potřebovat, mám se na koho obrátit. V období tohoto studia byla chvíle, kdy to pro mě nebylo lehké, ale díky nim to pro mě bylo nakonec všechno jednodušší. Vím, že to se mnou není někdy jednoduché, ale snad Vám tu vaši námahu budu moci někdy splatit. Teď alespoň minimálně tím, že Vám ukáži, že vaše snaha nevyšla nadarmo.

Pak je tady jeden speciální dík dvěma lidem, kteří pokud toto poděkování budou číst, pochopí, o kom mluvím. Naše společná cesta začala již na střední škole, kde jsme se poprvé potkali a rozhodně by nás v tu dobu nenapadlo, že spolu dojedeme až k inženýrskému milníku a zároveň doufám, že se nám ho také společně podaří zdolat. Cesta až sem byla trnitá a někdy lemována velmi ostrými hroty, ale společně se nám všechny tyto nelehké překážky podařilo zdolat a teď jsme tam, kde jsme si přáli být. Toto poděkování zakončím trochu netradičně, ale nemám jinou možnost než tak učinit: Ať žije Legendární-KKD!!! Tímto bych Vám chtěl za všechno moc poděkovat chlapi.

Obsah

OBSAH	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	11
1 PRINCIP TAVENÍ ELEKTRICKY VODIVÝCH A ELEKTRICKY NEVODIVÝCH MATERIÁLŮ VE STUDENÉM KELÍMKU ELEKTROMAGNETICKOU INDUKCÍ	12
1.1 PRINCIP TAVENÍ ELEKTRICKY VODIVÝCH MATERIÁLŮ VE STUDENÉM KELÍMKU	12
1.2 PRINCIP TAVENÍ ELEKTRICKY NEVODIVÝCH MATERIÁLŮ VE STUDENÉM KELÍMKU	15
2 PROBLEMATIKA STARTOVACÍ FÁZE PŘI TAVENÍ ELEKTRICKY NEVODIVÝCH MATERIÁLŮ VE STUDENÉM KELÍMKU	20
2.1 STARTOVACÍ FÁZE NA BÁZI EXOTERMICKÉ OXIDACE KOVŮ	20
2.2 STARTOVACÍ FÁZE NA BÁZI VLOŽENÍ A NÁSLEDNÉHO VYJMUTÍ ELEKTRICKY VODIVÉHO MATERIÁLU	22
2.3 DALŠÍ MOŽNÉ METODY STARTOVACÍ FÁZE	24
3 MATEMATICKÝ MODEL PRO VÝPOČET STUDENÉHO KELÍMKU PRO TAVENÍ ZrO_2	25
3.1 VÝPOČET STARTOVACÍ FÁZE	27
3.2 FÁZE FORMOVACÍ	31
3.3 ELEKTRICKÝ VÝPOČET PRO TAVENÍ VE STUDENÉM KELÍMKU	32
3.4 TEPELNÉ ZTRÁTY VE STUDENÉM KELÍMKU	37
3.4.1 Ztráty vedením tepla stěnou kelímku (skull vrstvou)	37
3.4.2 Ztráty prouděním tepla chladicí kapalinou a vzduchem	38
3.4.3 Ztráty sáláním tepla z povrchu tavené vsázky, který je v přímém styku s okolím	38
4 ZKOUMÁNÍ VLIVU ELEKTROMAGNETICKÉ INDUKCE NA ROZDÍLNÉ ULOŽENÍ STARTOVACÍHO MATERIÁLU PŘI STARTOVACÍ FÁZI	40
4.1 PŘÍPRAVA STARTOVACÍHO MATERIÁLU	41
4.2 MODEL ULOŽENÍ STARTOVACÍHO MATERIÁLU VE STUDENÉM KELÍMKU	42
4.2.1 Model prázdného kelímku spolu s induktorem	43
4.2.2 Model kelímku s uloženým startovacím materiálem ve formě rovinné plochy	43
4.2.3 Model kelímku s uloženým startovacím materiálem ve formě spodní polokoule	44
4.2.4 Model kelímku s uloženým startovacím materiálem ve formě horní polokoule	45
4.2.5 Model kelímku s uloženým startovacím materiálem ve formě koule	45
4.3 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ ZÍSKANÝCH Z MODELU	46
5 ANALÝZA NAMĚŘENÝCH HODNOT Z REALIZOVANÝCH TAVEB Al_2O_3 A SMĚSI Al_2O_3 A ZrO_2	48
5.1 TAVBA Al_2O_3 PROVEDENÁ DNE 12. 1. 2017	49
5.1.1 Analýza všech uskutečněných taveb	50
5.1.2 Analýza páté realizované tavby	51
5.2 TAVBA Al_2O_3 PROVEDENÁ DNE 12. 1. 2018	56
5.2.1 Analýza všech uskutečněných taveb	56
5.2.2 Analýza třetí realizované tavby	57
5.3 TAVBA Al_2O_3 PROVEDENÁ DNE 25. 1. 2018	59
5.4 TAVBA SMĚSI Al_2O_3 A ZrO_2 DNE 7. 4. 2017	60
6 HODNOCENÍ TAVENÍ VE STUDENÉM KELÍMKU KRITÉRIEM 3E	61
6.1 HODNOCENÍ Z ENERGETICKÉHO HLEDISKA	61

6.2	HODNOCENÍ Z EKOLOGICKÉHO HLEDISKA.....	62
6.3	HODNOCENÍ Z EKONOMICKÉHO HLEDISKA.....	63
7	ZÁVĚR	65
8	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	68

Seznam symbolů a zkratek

a (m).....	Výška
A (-).....	Pomocná funkce
B (-).....	Pomocná funkce
d (m).....	Průměr
f (Hz).....	Frekvence generátoru
g (-)	Parametr dle počtu závitů cívky
H (J·mol ⁻¹).....	Entalpie
I (A).....	Proud
k ₁ (-).....	Korekční koeficient
k _C (-).....	Koeficient redukce
k _v (-).....	Koeficient tloušťky stěny induktoru
m (kg)	Hmotnost
M (W·m ⁻²).....	Intenzita vyzařování
P (W).....	Činný výkon
P (W).....	Ztráty
Q (J)	Energie
r (m)	Poloměr
T (°C).....	Teplota
R (Ω).....	Odpor
S (m ²).....	Plocha
U (V)	Napětí
UHV.....	Ultra-Hight Vacuum (Ultra-Vysoké Vákuum)
V (m ³)	Objem
x (-)	Parametr
X (Ω).....	Reaktance
Z (Ω)	Impedance
cosφ.....	Účinník
ρ (kg·m ⁻³)	Měrná hustota
ρ (Ω·m).....	Měrný elektrický odpor
°C	Stupně celsia
Δ (m)	Hloubka vniku

μ ($\text{H}\cdot\text{m}^{-1}$)	Permitivita
ω ($1\cdot\text{s}^{-1}$)	Úhlový kmitočet
η (-)	Účinnost
λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$).....	Tepelná vodivost
ϑ ($^{\circ}\text{C}$).....	Teplota
α ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)	Součinitel sdílení tepla prouděním
ε (-).....	Emisivita
σ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$)	Stefan-Boltzmannova konstanta

Úvod

Diplomová práce je zaměřena na tavení oxidů ve studeném kelímku pomocí elektromagnetické indukce. Tento proces se rozděluje do třech hlavních fází, a to startovací, formovací a stabilní. Všechny tyto tři fáze se odlišují svou problematikou při reálném provedení samotné tavby. Nejproblematictější fází je fáze startovací, ta je v této diplomové práci řešena. V této fázi je důležité vytvořit uvnitř kelímku takové podmínky, aby se elektricky nevodivé materiály, zde speciálně oxidy, staly elektricky vodivými. K tomuto procesu je zapotřebí vhodně zvolit elektricky vodivý startovací materiál, který je schopen při počáteční fázi tavby vytvořit takové podmínky, pomocí kterých se parametry taveného materiálu změni na takové hodnoty, že se již tavený materiál může pomocí elektromagnetické indukce tavit samovolně.

Startovací fázi u elektricky nevodivých materiálů je možno provést několika způsoby. Tyto způsoby se liší zejména dle druhu taveného nevodivého materiálu. Při tavbě oxidů kovů se využívá jako startovací materiál přímo elektricky vodivý kov stejného materiálu, jako je sám oxid. V této práci je při startovací fázi využito vzniku exotermické reakce, která vznikne zahřátím startovacího materiálu za pomoci elektromagnetické indukce. Při tomto procesu dochází ke sloučení použitého kovu a kyslíku, přičemž je zároveň uvolněna energie ve formě tepla, která zahřeje okolní elektricky nevodivý materiál na požadovanou teplotu, ten se stává elektricky vodivým a dále se může tavit elektromagnetickou indukcí samovolně. Celý tento startovací proces je nutno předem vypočítat a je možno ho nasimulovat pomocí simulačních programů. Obě tyto varianty jsou v diplomové práci zahrnuty.

Pomocí studeného kelímku je možno tavit různé druhy vodivých i nevodivých materiálů. Na Elektrotechnické fakultě v Plzni se tavba ve studeném kelímku specializuje na tavení elektricky nevodivých materiálů. Nyní zejména na tavení oxidů kovů, a to oxidu hlinitého (Al_2O_3) a směsi oxidu hlinitého a oxidu zirkoničitého (ZrO_2). V diplomové práci půjde o analýzu naměřených hodnot těchto taveb a vyhodnocení studeného kelímku kritériem 3E.

1 Princip tavení elektricky vodivých a elektricky nevodivých materiálů ve studeném kelímku elektromagnetickou indukcí

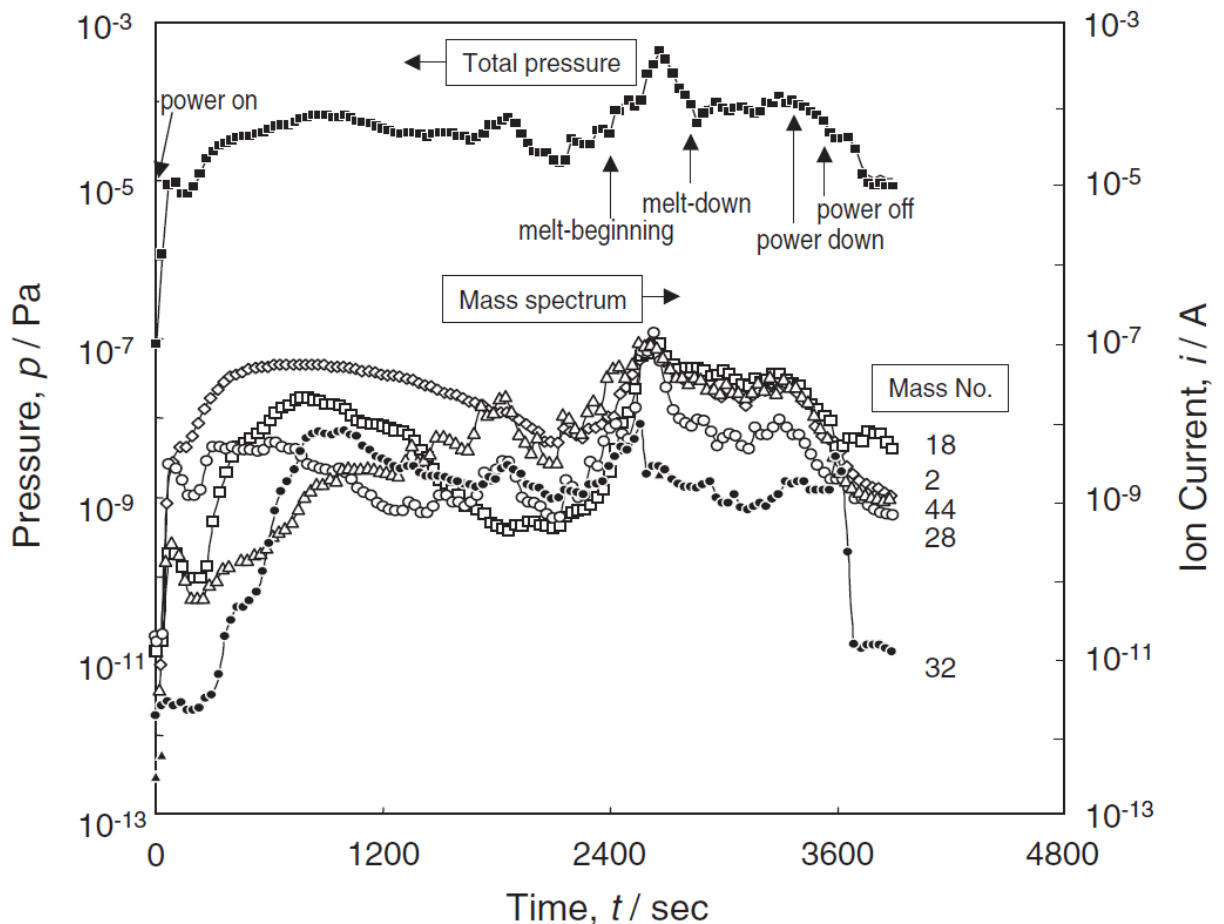
Pomocí elektromagnetické indukce, která je využívána při tavení ve studeném kelímku je možno tavit různé druhy materiálů, a to jak elektricky vodivé, tak i elektricky nevodivé. Způsob tavby se pro každý z těchto materiálů liší, zejména v jeho počáteční fázi. Pro elektricky vodivé materiály nemusíme řešit složitou startovací fázi na počátku tavby, protože elektromagnetická indukce začne okamžitě samovolně zahřívat tavený materiál, ovšem je zde řešena otázka nižší účinnosti celého procesu. U elektricky nevodivých materiálů, je účinnost tavení vysoká, ale vzniká zde problém při startování tavby elektricky nevodivého materiálu, kdy je zapotřebí použít materiálově vhodný elektricky vodivý materiál. Tento materiál začne na počátku tavby reagovat s elektromagnetickou indukcí a svou reakcí je schopen dodat potřebné podmínky pro tavbu elektricky nevodivého materiálu a ten se s jeho pomocí stává elektricky vodivým, tedy se již ve studeném kelímku taví samostatně [1] [2].

1.1 Princip tavení elektricky vodivých materiálů ve studeném kelímku

Studený kelímek pro tavení elektricky vodivých materiálů byl vynalezen za účelem odstranění problémů při tavení elektricky vodivých materiálů v běžných indukčních pecích. Tyto problémy zahrnují zejména omezení tavicí teploty materiálu na limitní pracovní teploty dané materiálem vyzdívky používaných indukčních pecí. Problém s vyzdívkou běžných indukčních pecí se rozšiřuje dále na její erozi, která je způsobena vířením taveniny při samotném tavení materiálu. Neméně významným problémem je chemická reakce, která vzniká mezi taveným materiálem a vyzdívkou pece. Tyto faktory způsobují, že finální odlitek není schopen dosáhnout takové kvality, aby splnil dnešní požadovaná kritéria. V dnešní moderní době, kdy se nároky zejména na čistotu požadovaného materiálu, která následně limituje jeho použití, neustále zvyšují, bylo zapotřebí tyto nedostatky eliminovat. Tento fakt umožňuje splnit tavení pomocí elektromagnetické indukce ve studeném kelímku, kde tavba probíhá ve chráněné atmosféře a téměř bez kontaktu s jiným materiálem [3].

Jmenovitá čistota kovů s vysokou čistotou je popsána například jako 4N nebo 5N, kde například 4N je zkratka pro čistotu 99,99 %, tedy číslo před N označuje počet devítek v procentní hodnotě čistoty kovů. Vylučuje celkovou koncentraci plynných nečistot, která je v mnoha případech stejná nebo vyšší než u kovových nečistot. Plynné nečistoty silně ovlivňují

vlastnosti nejen jako atomy rozpuštěné látky, ale také jako shluky (karbidy, oxidy a sulfidy). Odstranění plynných nečistot je tedy velmi žádané. Pro dosažení čistoty kovů 4N je využíváno tavení elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku, při kterém se v tavící komoře vytvoří vakuum o tlaku 1×10^{-6} Pa. V dnešní době je možné dosáhnout čistoty kovového ingotu až k limitní hodnotě měřitelnosti 6N. Aby bylo možno dosáhnout takovéto čistoty, musí se v tavící komoře udržovat tlak nižší než 1×10^{-7} Pa, využívá se tedy metody UHV (Ultra-High Vacuum). Pro tuto metodu musí být tavící komora sestavena takovým způsobem a z takového materiálu, aby byla schopna bezpečně odolat takto nízkému tlaku. Při tavení musí dojít k třem následujícím hlavním úkonům. Jako první se dosáhne požadovaného tlaku (vakua) v tavící komoře, po tomto kroku dochází k roztavení vložené vsázky, při kterém dochází k vzniku nežádoucích plynných výparů, které jsou z komory odsávány. Metoda UHV se využívá zejména pro čištění titanu, kobaltu a niklu. Na obr. 1 je znázorněn graf, na kterém jsou vykresleny změny tlaku a hmotnostních spekter měřených plynů [4].



Obr. 1: Změny celkového tlaku a hmotnostních spekter hmotných plynů $2(\text{H}_2)$, $18(\text{H}_2\text{O})$, $28(\text{CO})$, $32(\text{O}_2)$, a $44(\text{CO}_2)$ během indukčního ohřevu a tavy vysoce čistého niklu (5N) [4].

Metoda levitace vsázky ve studeném kelímku umožňuje tavení elektricky vodivých materiálů při vyšších teplotách, kterých nelze dosáhnout při běžných způsobech tavení. Tento fakt dále umožňuje vytvoření nových slitin, které do vynalezení této metody nebylo možno vytvářet z důvodu velké odlišnosti jejich tavicí teploty a měrné hustoty. Jedním z příkladů takovýchto materiálů jsou Titan (Ti), Tantal (Ta) a Niob (Nb), hodnoty jejich teploty tání a hustoty jsou uvedeny v tab. 1. Vytvořená slitina z uvedených tří prvků Ti-Ta-Nb je používána ve zdravotnictví, kde nahradila slitinu Ti-6Al-4V, u které byly prokázány toxické prvky a tudíž je nevhodná pro používání v tomto odvětví. Nová slitina Ti-Ta-Nb žádné toxické prvky nevykazuje, je tedy jako náhrada za předchozí slitinu ve zdravotnictví velmi žádaná. Tento příklad ukazuje, že tavení elektricky vodivých materiálů ve studeném kelímku otevírá nové možnosti, a to nejen v již uvedeném odvětví [5].

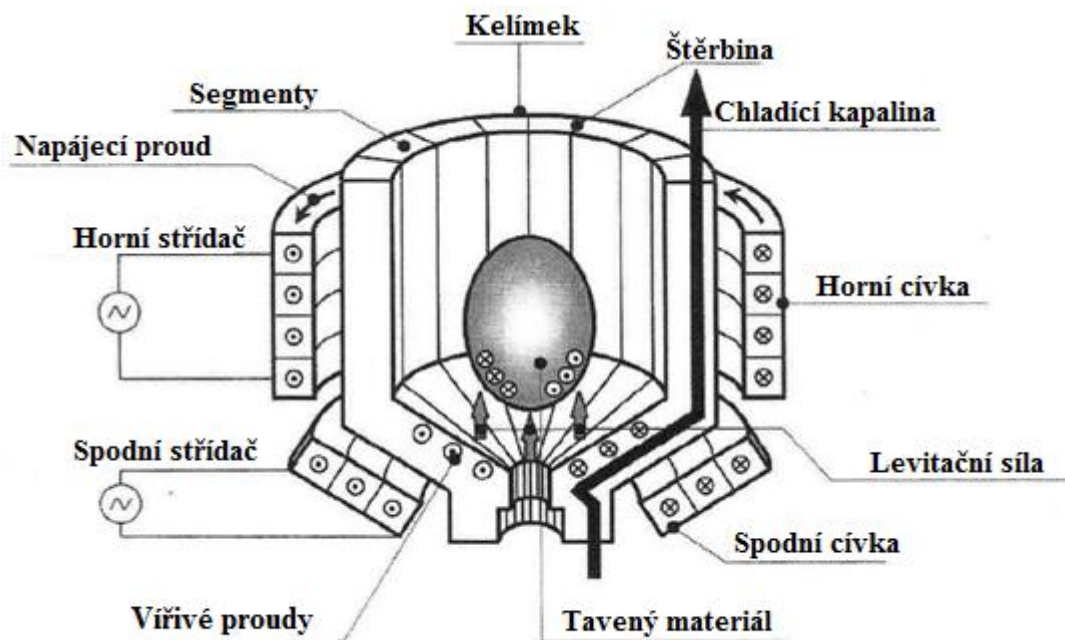
Prvek	Titan (Ti)	Tantal (Ta)	Niob (Nb)
Tavicí teplota (°C)	1 668	2 996	2 477
Měrná hustota (g/cm ³ , pro 20 °C)	4,50	16,60	8,57

Tab. 1: Tavicí teplota a měrná hustota prvků Ti, Ta, Nb [5].

Tavení elektricky vodivých materiálů ve studeném kelímku přináší mnoho výhod. Zejména z hlediska jejich čistoty a možnosti dosažení výrazně vyšší teploty při jejich tavení, existují ale také i nevýhody. Nejvýraznější nevýhodou je značně nízká účinnost tohoto procesu, která vzniká z důvodu elektrické a tepelné vodivosti nejen taveného materiálu, ale také vzniklé skull vrstvy. Skull vrstva vzniká na okraji tavené vsázky, v místě kde se vsázka dotýká dna nebo segmentů kelímku. Tato vrstva má mnohem menší teplotu než tavící se materiál, a tedy slouží jako ochrana proti roztavení samotného kelímku. Tuto nevýhodu je možno alespoň částečně eliminovat pomocí omezení kontaktu vsázky se stěnou studeného kelímku. Kontakt tavené vsázky se stěnou je možno omezit pomocí semi-levitačního tavení, kde je kontakt se stěnou kelímku minimální nebo lze dosáhnout levitačního tavení, kde se vsázka stěny kelímku nedotýká. Účinnost se i po provedení úprav snížení dotyku vsázky se stěnou kelímku pohybuje přibližně okolo 10 % [5], [6].

Na obr. 2 je znázorněn princip levitace vsázky ve studeném kelímku. Studený kelímek je sestaven ze segmentů, které jsou chlazeny vodou a jsou vyrobeny z vysoce kvalitní mědi, která v sobě neobsahuje žádné stopy kyslíku, dále z indukční cívky a napájecího zdroje. Indukční cívka je složena ze dvou částí - z horní cívky a spodní cívky. Spodní cívka je určena

k vytvoření silné levitační síly tak, aby udržela vsázku v bezkontaktní vzdálenosti od stěn studeného kelímku, aby cívka plnila tuto funkci je napájena nízkofrekvenčním proudem. Horní cívka má za úkol zahřívání, tedy tavení dané vsázky a navíc udržuje stabilitu levitační síly, aby mohla takto pracovat, je napájena proudem s vyšším kmitočtem než cívka spodní [5].



Obr. 2: Schématické znázornění tavení elektromagnetickou indukací ve studeném kelímku za pomoci levitační metody [5].

1.2 Princip tavení elektricky nevodivých materiálů ve studeném kelímku

Výhody studeného kelímku se využívají nejen při tavení elektricky vodivých materiálů, ale otevřely nové možnosti i v oboru tavení materiálů elektricky nevodivých nebo jen minimálně vodivých. Dosažitelnost vyšších teplot a minimalizace chemických reakcí s kelímkem umožňuje tavbu speciálních materiálů, které mají relativně vysoký bod tání a je u nich vyžadována nízká kontaminace jinými látkami. Těmito materiály jsou například speciální oxidy, keramiky, izolační materiály a také speciální druhy skel [2].

Tavení elektricky nevodivých materiálů má jednu značnou výhodu oproti tavení elektricky vodivých materiálů a tou je účinnost celého procesu, ta na rozdíl od předchozího tavení může dosahovat až 90 %, což je značně lepší než předchozích maximálních 20 %. Tento fakt je způsoben již zmiňovanou skull vrstvou, která zde vzniká za stejných okolností jako při tavení elektricky vodivých materiálů. Ovšem při tavení elektricky nevodivých materiálů je vzniklá skull vrstva elektricky nevodivá, zatímco již tavená vsázka je ve svém tekutém stavu elektricky vodivá. Tyto dvě rozdílné fáze materiálu při tavení způsobují, že při tavně nedochází k výrazným tepelným ztrátám konvekcí na rozhraní tavené vsázky a kelímku, tedy ztráty jsou v tomto procesu výrazně sníženy a účinnost značně vzroste směrem k 90 % [7].

Počáteční fáze při tavení elektricky nevodivých materiálů ve studeném kelímku je jedním z nejvýraznějších problémů tohoto procesu, aby mohla být takováto tavba uskutečněna, musí být na jejím počátku nějakým způsobem podnícena. Samotný nevodivý materiál by jinak na elektromagnetickou indukci ve studeném kelímku žádným způsobem nereagoval, protože jeho elektrická a tepelná vodivost se pohybuje ve velmi nízkých hodnotách. Pro zahájení tavby se využívají různé metody, které jsou schopny přivést elektricky nevodivý materiál do takové fáze, kdy se stává elektricky vodivým a následně již probíhá jeho tavba v kelímku samovolně. Tento počáteční proces se označuje anglickými spojeními „start-up phase“, v jiné literatuře může být také označován jako „set-up phase“. Tyto startovací fáze jsou otázkou velmi pečlivé přípravy a nesnadného provedení. Podrobněji se této problematice budu věnovat v dalších kapitolách [1], [7].

Tavení elektricky nevodivých materiálů probíhá po překonání počáteční startovací fáze stejným způsobem jako při tavně materiálů elektricky vodivých. Další otázkou je zde koncová část celého procesu, ve které probíhá chladnutí roztavené vsázky. Při chladnutí přetavené vsázky oxidů a skel dochází ve studeném kelímku k jejich krystalizaci. Celý tento proces ovlivňuje kvalitu a zejména také vlastnosti vzniklého výsledného ingotu. Dosažení požadované kvality finálního ingotu je možno docílit několika způsoby, a to například:

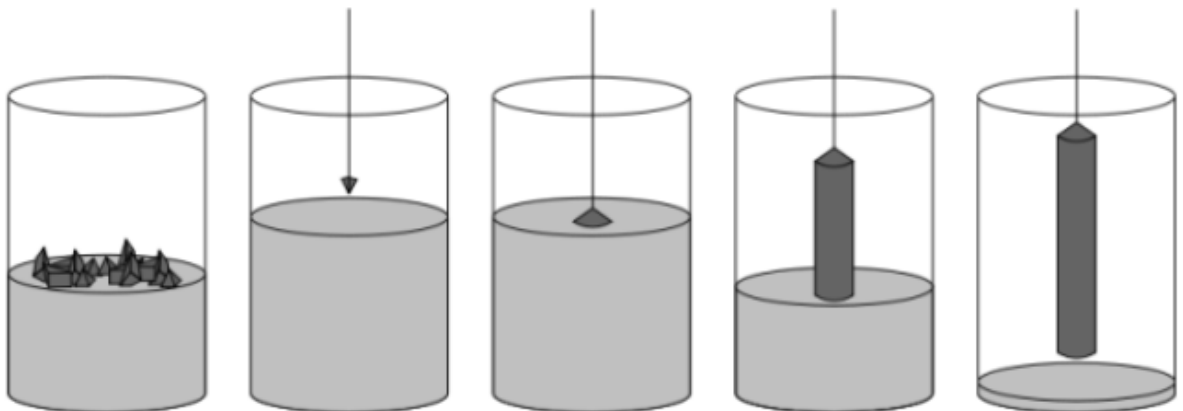
- vypnutím napájecího generátoru (nárazová krystalizace celého ingotu),
- chladnutí vsázky pomocí proudění vzduchu,
- odléváním roztavené vsázky do vody,
- pomocí ovládnutí teplotního rozložení (krystalizace řízená),
- krystalizace pomocí Czochralského metody [8].

Při využití metody vypnutí napájecího generátoru a tím nárazového vypnutí napájení pro induktor dojde u celého objemu přetavené vsázky k rychlé krystalizaci. Tohoto procesu je docíleno také při využití metody odlévání roztavené vsázky do vody. Metoda chlazení vsázky pomocí proudění vzduchu je využívána nejvíce na ochlazování ingotu vytahovaného z kelímku při průběžném tavení. Množství a teplota ochlazovacího vzduchu ovlivní výslednou krystalizaci. Metoda řízené krystalizace závisí nejen na postupném snižování výkonu, kterým je napájen induktor, ale také na vzájemné poloze induktoru a studeného kelímku. Pomocí úpravy této pozice a postupným snižováním výkonu je možné dosáhnout správného rozložení teplotního pole ve vsázce a tím koordinovat krystalizaci. Pokud jsou využity metody, kde probíhá krystalizace vsázky přímo ve studeném kelímku, je pro finální vyjmutí hotového ingotu nutno snížit teplotu na takovou úroveň, aby se s komponenty a ingotem dalo manipulovat, kdy následně může být studený kelímek nejprve zbaven chladicí kapaliny a následně rozebrán tak, aby bylo možno z něho výsledný ingot vyjmout. Na obr. 3 vlevo je hotový korundový ingot vyjmutý ze studeného kelímku, uprostřed je studený kelímek s hotovým ingotem již zbaven chladících segmentů a v pravé části obrázku je korundový ingot rozdělený napůl, kde je jasně viditelná již zmíněná krystalizace, která vzniká při chladnutí vsázky [1], [8].



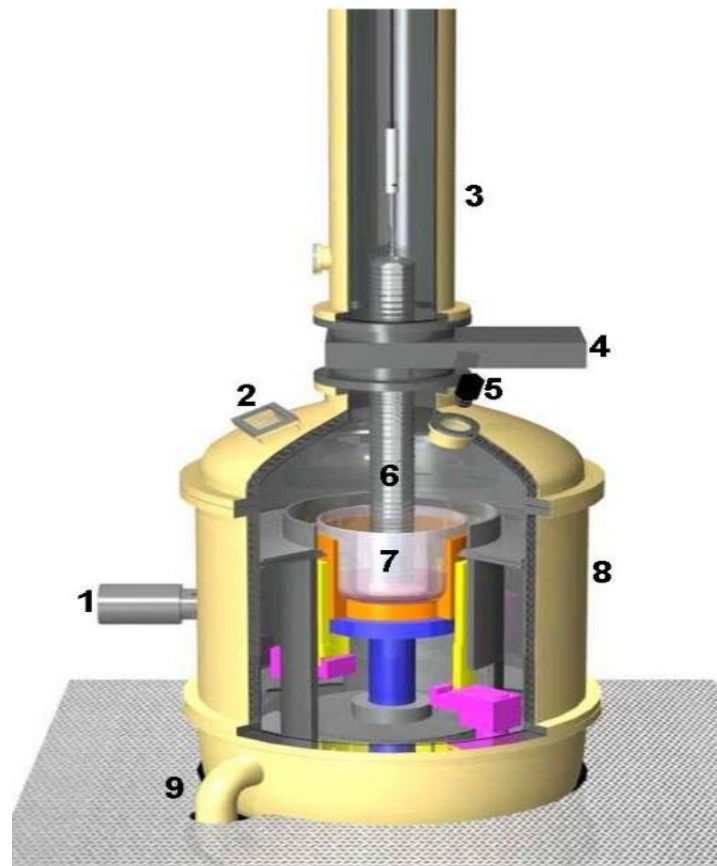
Obr. 3: Vlevo hotový korundový ingot, uprostřed studený kelímek s hotovým ingotem již bez chladících segmentů, vpravo korundový ingot rozdělený napůl [1].

Czochralského metoda spočívá ve vytváření syntetických monokrystalů z roztavené vsázky uvnitř studeného kelímku. Monokrystaly se v této metodě doslova vytahují z hladiny roztavené vsázky z vnitřku studeného kelímku. K hladině roztavené vsázky se přiblíží tyč, která má na svém konci vytvořený zárodek. Tento zárodek je klíčem pro vytažení požadovaného monokrystalu. Ta část zárodku, která je ponořena do vsázky, se roztaví. Pro odstranění případného poškození dochází při tomto kontaktu zárodku s roztavenou vsázkou k teplotnímu šoku, díky čemuž dojde ke spojení daných dvou prvků. Po tomto spojení dochází k tažení tyče ze studeného kelímku za jejího současného otáčení, čímž se vytváří krystal. Je důležité, aby při tažení krystalu byly udrženy požadované podmínky pro tento proces, jinak by mohlo dojít k poškození taženého krystalu. Ve finální části je tažení ukončeno postupným zúžením krystalu do „špice“, kdy je v ideálním případě v tomto místě krystal oddělen od vsázky. Velikost průměru krystalu je ovlivněna výší teploty dané vsázky, rotací tyče při vytahování, a také rychlostí, kterou je vytahována. Na obr. 4 jsou znázorněny všechny kroky růstu krystalu pomocí Czochralského metody [9], [10].



Obr. 4: Veškeré kroky Czochralského metody [9].

Na obr. 5 je ukázán řez zařízením, které je využíváno pro výrobu monokrystalů křemíku. Toto zařízení nese název „tažička“. Zařízení tvoří dvě komory dolní a horní. Dolní komora obsahuje grafitovou topnou zónu a kelímek, který slouží k vlastní tavbě a růstu krystalu, horní komora je prostor, kam se táhne vytvořený krystal. Tyto dvě komory jsou od sebe odděleny vakuově těsnou klapkou. Díky tomuto řešení je možné zavzdušnit horní komoru, i když je vsázka v dolní komoře roztavena a provádět potřebné operace pro vytažení krystalu. Komory jsou vyrobeny z nerezové oceli a jsou dvojité, aby mohly být chlazeny vodou. Ochranná atmosféra v komorách je tvořena z vysoce čistého argonu 6N s tlakem 10tky mbar. Zárodek je zavěšen na držáku, který je buďto na lanku nebo na hřídeli. Lanko má hlavní nevýhody ve své torzi a může dojít i k rozhoupání krystalu, ovšem toto řešení je levnější a využívá se hlavně pro větší krystaly. Hřídel vyniká možností precizního nastavení otáček, ale je zde riziko lámání v místě zárodku, a to zvláště u větších krystalů při nerovnoměrném pohybu hřídele [10].



Obr. 5: Příčný řez zařízením pro růst monokrystalů křemíku Czochralskiho metodou. (1) Spodní pyrometr teploty, (2) průzor do tažičky, (3) horní komora, (4) oddělovací klapky, (5) horní pyrometr, (6) tažený krystal, (7) křemenný kelímek, (8) usazení do podpůrného gravitovaného kelímku, dolní procesní komora, (9) odtah argonu a plyných zplodin [10].

2 Problematika startovací fáze při tavení elektricky nevodivých materiálů ve studeném kelímku

Tavení elektricky nevodivých materiálů ve studeném kelímku bylo již obecně popsáno v druhé části první kapitoly, zde bude ovšem pohled na tuto problematiku zaměřen na počáteční fázi celého procesu, kde je nutno řešit problém s nastartováním samotné tavby. Jak již bylo zmíněno v předchozí části, ve studeném kelímku je možno tavit i materiály, které jsou za normálních podmínek elektricky nevodivé, což znamená, že za takovýchto podmínek nebudou žádným způsobem reagovat s elektromagnetickou indukcí a tavba neproběhne [2].

Možnost realizace takovéto tavby spočívá ve vytvoření podmínek, které umožní, aby se materiál, který je za normálních podmínek elektricky nevodivý, dostal do stavu, kdy dojde k cílené změně a materiál začne být elektricky vodivý. Této požadované změny je u nevodivých materiálů dosaženo tehdy, pokud dojde ke zvýšení jejich teploty nad určitou mez. Tato mez se nazývá teplota tání. Pokud je při startovací fázi dosaženo této teploty u nevodivého materiálu, začíná se daný materiál tavit elektromagnetickou indukcí samostatně bez další pomoci. Způsobů, jak provést startovací fázi tak, aby se mohl tavit nevodivý materiál samostatně, existuje několik [11].

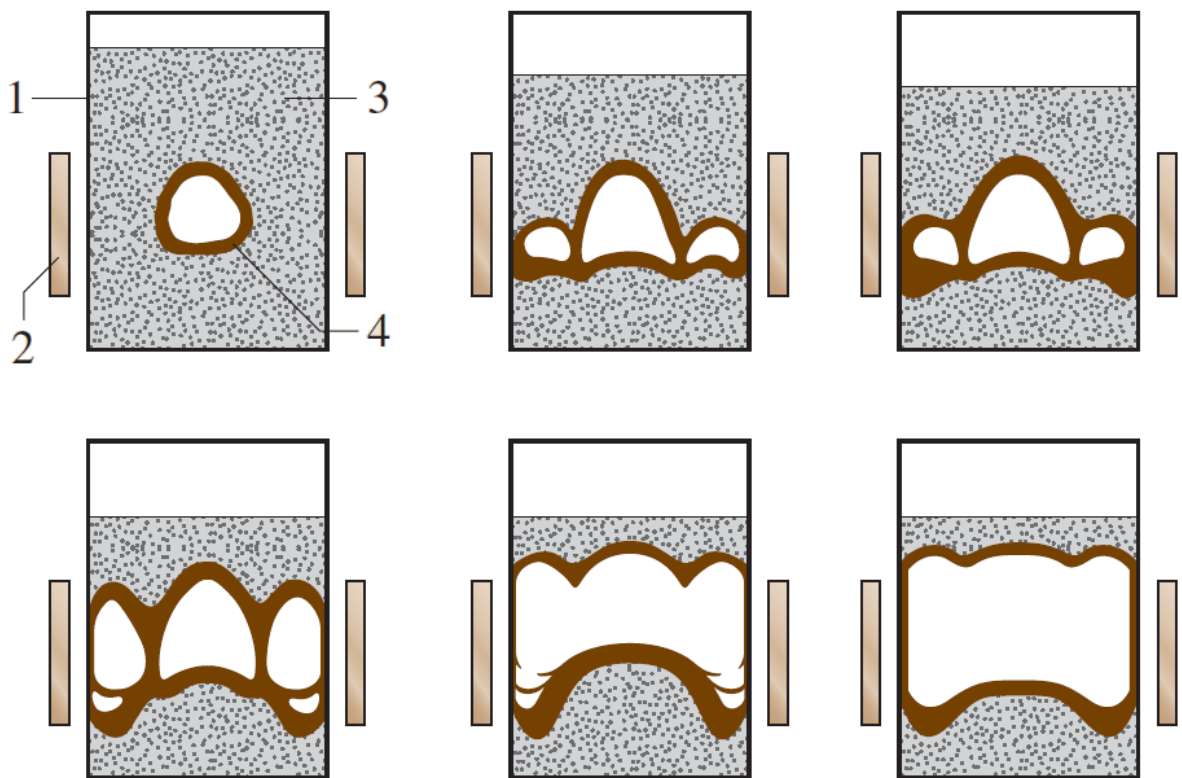
2.1 Startovací fáze na bázi exotermické oxidace kovů

Princip této metody se využívá při tavení oxidů kovů například oxidu hlinitého (Al_2O_3), oxidu zirkoničitého (ZrO_2) a dalších, tavit se dají i jejich kombinace o různém poměru. Tyto oxidy jsou samy o sobě za normálních podmínek elektricky nevodivé a tedy je zapotřebí jejich tavbu nastartovat. K tomu jsou v této metodě využity kovové částice, které jsou ve formě malých nařezaných kousků nebo ve formě drti. Pro oxid hlinitý bude využit jako startovací materiál čistý hliník (Al), pro oxid zirkoničitý bude startovacím materiálem zirkonium (Zr), pro start tavení oxidů musí být vždy vybrán specifický startovací materiál. Oxidy se do studeného kelímku vkládají ve formě prášku, tento prášek se co nejvíce utemuje, aby byly vzdálenosti mezi částicemi oxidového prášku co nejmenší. Startovací materiál se vkládá do kelímku tak, aby byl překryt práškem taveného oxidu, tento způsob uložení je nejvhodnější z důvodu nízkých teplotních ztrát a dobrého tepelného přenosu energie do vsázky. Pro ukázkou je na obr. 6 znázorněn oxid hlinitý v prášku na levé straně a na pravé straně jsou připravené kousky hliníku pro nastartování tavicího procesu [1], [8], [12].



Obr. 6: Oxid hlinitý (Al_2O_3) v prášku (vlevo), kousky hliníku (Al) pro startovací fázi (vpravo) [1], [12].

Startovací materiál zde funguje jako spouštěč celého tavného procesu. Po přivedení výkonu na induktor začne vzniklá elektromagnetická indukce zahřívát vložený kovový materiál ve vsázce, ten svojí teplotu předává okolnímu nevodivému materiálu, který se pomocí této tepelné výměny zahřívá spolu s ním. Po dosažení určité teploty startovacího materiálu dochází k jeho oxidaci za přítomnosti kyslíku a stává se z něj oxid daného kovu, tato reakce je také popisována jako zahoření startovacího materiálu. V tuto chvíli je elektricky nevodivému materiálu předána potřebná energie, pomocí které je dosaženo požadované teploty a tím se předtím nevodivý materiál stává vodivým a tato změna následně umožňuje jeho samostatnou tavbu. Pokud je při procesu oxidace startovacího materiálu přítomno dostatečné množství kyslíku, dochází k nulové kontaminaci vložené vsázky, a tedy výsledný ingot obsahuje pouze ten materiál, který byl určen k tavbě. Tento fakt je velkou výhodou celého tohoto procesu tavby. Na obr. 7 je znázorněn postup natavování oxidu kovu ve studeném kelímku, tedy již po uskutečnění startovací fáze a po správném průběhu oxidace startovacího materiálu. Z obr. 7 je také jasně viditelný pokles hladiny vsázky při jejím roztavení, tento stav se musí v praxi řešit pomocí přisypávání práškového oxidu v průběhu tavby do studeného kelímku tak, aby hladina odpovídala předem stanovené výšce, a to s ohledem na správné působení induktoru [1].



Obr. 7: Postup natavování vsázky uvnitř studeného kelímku: (1) studený kelímek, (2) induktor, (3) oxid kovu prozatím v práškovém stavu, (4) část oxidu kovu, která je již natavena [8].

2.2 Startovací fáze na bázi vložení a následného vyjmutí elektricky vodivého materiálu

Základní princip této metody je obdobný jako u předchozí metody, také zde se vkládá vodivý startovací materiál přímo do nevodivého materiálu. Ovšem základním rozdílem je, že startovací materiál není stejného druhu jako tavený nevodivý materiál, díky čemuž startovací proces probíhá odlišným způsobem. Startovací materiál bývá nejčastěji ve tvaru prstence a je vyroben z materiálů grafitu, molybdenu, iridia, karbidu křemíku. Na obr. 8 je znázorněn prstenec z vodivého grafitu, který je používán pro nastartování tavby. Startovací materiál se opět vloží nejlépe pod povrch tavené vsázky tak, aby vznikaly co nejmenší ztráty a přenos tepla byl co největší. Důležitým faktorem je zde to, že vodivý materiál musí mít vyšší teplotu tavení než materiál nevodivý. Tedy po přivedení výkonu na induktor se započne zvyšovat teplota vodivého materiálu, který následně ohřívá vsázku kolem sebe. V tomto případě nedochází k exotermické oxidaci startovacího materiálu, ale ten je zahříván do takové míry, aby okolní nevodivý materiál dosáhl požadované teploty a začal se tavit bez potřeby další pomoci. Po dosažení této teploty je startovací materiál vyjmut ze studeného kelímku, aby dále

neovlivňoval tavbu taveného materiálu. Tento proces je účinný, ale musí zde být počítáno s kontaminací výsledného ingotu materiálem, který byl použit pro nastartování tavby. Tato metoda tedy nedosahuje tak vysoké čistoty výsledného ingotu jako předchozí, ale její pomocí je možno tavit všechny materiály, které mají nižší teplotu tavení než startovací materiál. U předchozí metody musíme mít vždy dva materiály o stejném základu [7].



Obr. 8: Prsteneček z vodivého grafitu, který je využit pro nastartování tavby [13].

Dvě předchozí metody jsou postaveny na stejném základu, a tedy se u nich vyskytují stejné druhy problémů. Prvním z nich je řešení uložení startovacího materiálu tak, aby jeho efekt byl co největší. Jak již bylo zmíněno dříve, nejčastějším a prozatím nejlepším způsobem se ukázalo uložení startovacího materiálu pod povrch dané vsázky. Tím se sníží vznikající ztráty a dosáhne se velmi dobrého převodu tepla do nevodivé vsázky. Ovšem v tomto případě nesmí dojít k tomu, aby se startovací materiál vložil příliš hluboko pod povrch nevodivé vsázky, což by mohlo způsobit to, že by při startovacím procesu došlo k propadnutí startovacího materiálu až na samotné dno kelímku a tím by se výrazně ovlivnil startovací proces. Druhým z řešených problémů je použitý objem a tvar startovacího materiálu, který také výrazně ovlivňuje startovací proces. Pokud by byl vůči objemu nevodivé vsázky použit nepřiměřený objem nebo také tvar startovacího materiálu, mohl by startovací proces trvat značně dlouhou dobu nebo by v nejhorším případě k nastartování tavby nemuselo dojít vůbec [14].

2.3 Další možné metody startovací fáze

Třetí používanou metodou startovací fáze je zahřívání povrchu nevodivé vsázky. Princip této metody spočívá v použití plynových hořáků, které jsou přiloženy k povrchu nevodivé vsázky a svými plameny zahřejí povrch na takovou teplotu, kdy se začne vsázka tavit samostatně. V ten moment se hořáky vypínají a probíhá samotná tavba. Tato metoda s sebou přináší dva hlavní problémy. Prvním z nich je problém kontaminace nevodivé vsázky, kterou způsobí spaliny vytvořené při spalování plynu v hořácích. U výsledného ingotu poté nelze počítat s dokonalou čistotou. Druhým problémem je zde odfukování nevodivé vsázky ze zahřívání povrchu, což souvisí s principem hoření plynových hořáků a nedá se mu zabránit, proto je tento princip vhodnější používat na nevodivou vsázku, která je tvořena z hrubé drti nebo několika málo kusů taveného materiálu. Tato metoda se nejčastěji používá při tavbě skla. Jedna z fází tohoto tavení je znázorněna na obr. 9. Existují ještě další metody pro zahájení tavby elektricky nevodivých materiálů, ale nejsou tak hojně využívány. Tyto metody spočívají v natavování pomocí elektrického oblouku, odporového ohřevu nebo laseru [7], [15], [16].



Obr. 9: Vsázka skla po startovací fázi, při které bylo použito plynových hořáků [15].

3 Matematický model pro výpočet studeného kelímku pro tavení ZrO₂

Postup výpočtu byl konzultován a realizován ve skupině s členy Bc. Martinem Kopou, Bc. Janem Dudou a Janem Loudou. Vedoucím a odborným konzultantem této problematiky byl Doc. Ing. Igor Poznyak, CSc., který zároveň poskytl vstupní data potřebná k výpočtu. V tomto modelu se jedná o výpočet pro tavení oxidu zirkoničitého (ZrO₂). Tab. 2 obsahuje zadané parametry cívky a vsázky studeného kelímku.

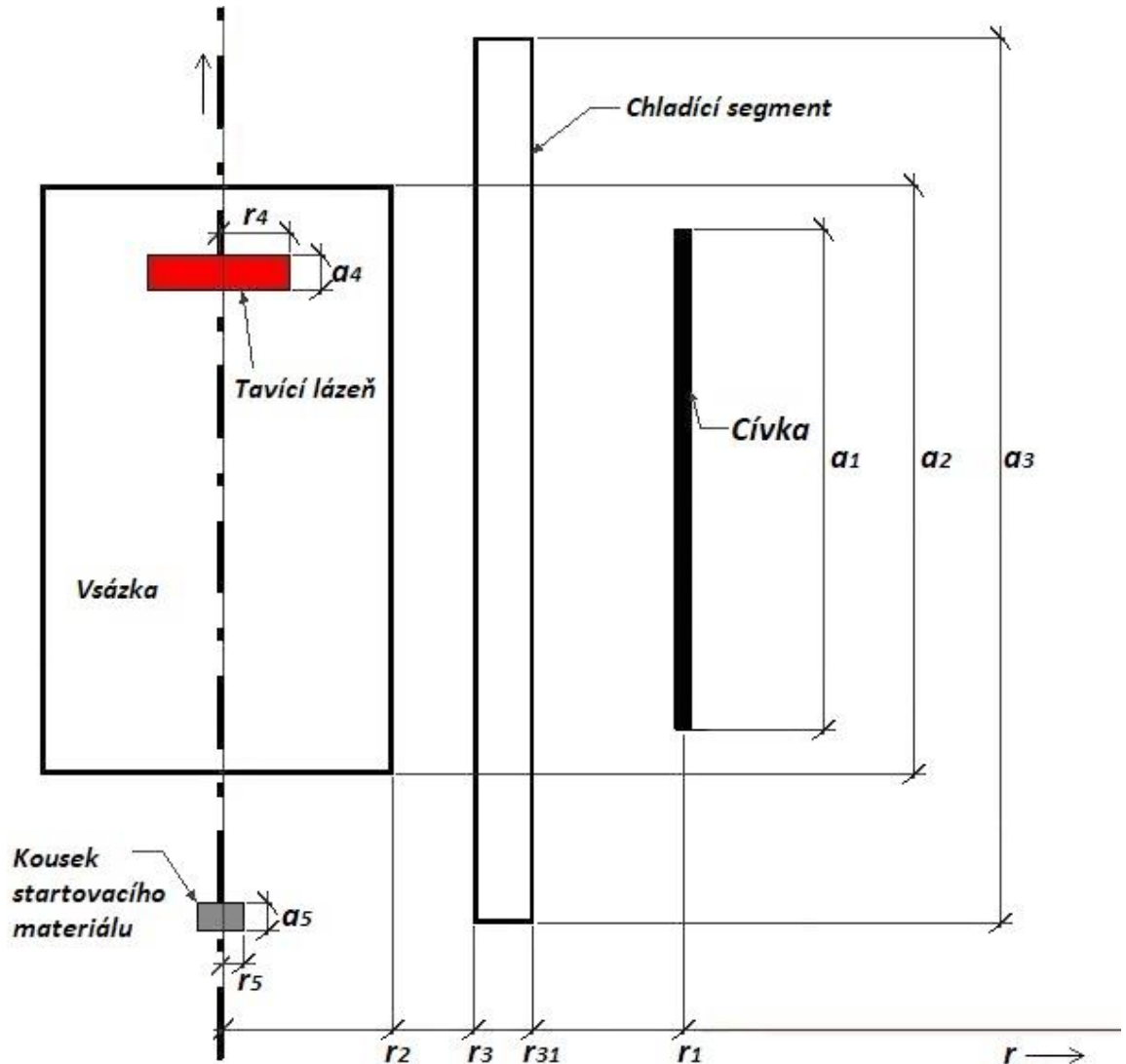
Cívka			Vsázka		
Název	Parametr	Hodnota	Název	Parametr	Hodnota
Průměr	d_1	13,0 cm	Průměr	d_2	7,2 cm
Poloměr	r_1	6,5 cm	Poloměr	r_2	3,6 cm
Výška	a_1	8,0 cm	Výška	a_2	8,0 cm
Husota mat. Zr	ρ_{Zr}	5800 kg/m ³	Husota mat. ZrO ₂	ρ_{ZrO_2}	5560 kg/m ³
Závity cívky	-	3	Chl. segment $r_{31}-r_3$	d_3	1,0 cm
Tloušťka stěny ind.	k_v	2,0 cm			

Tab. 2: Vstupní parametry pro výpočet studeného kelímku [17], [18], [19], [20].

Dalšími zadanými hodnotami jsou [17]:

- napětí generátoru: $U_{gen} = 10$ kV,
- činný výkon generátoru: $P_{gen} = 160$ kW,
- frekvence generátoru: $f = 1,5 - 2$ MHz.

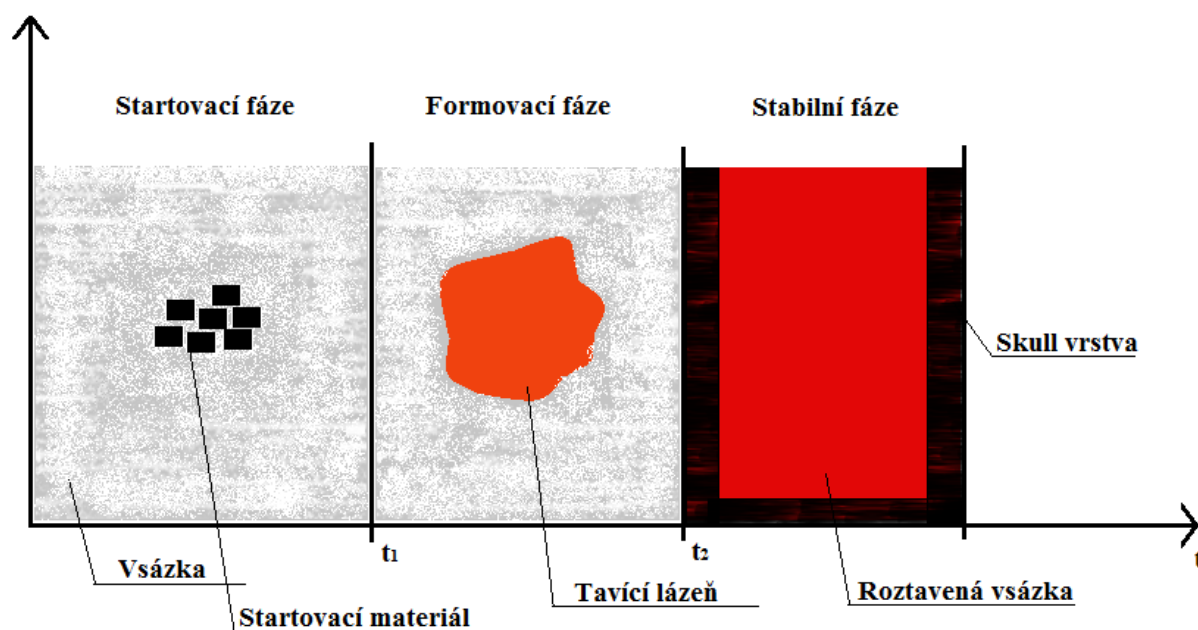
Na obr. 10 je znázorněno zjednodušené schéma stavby studeného kelímku. Jsou zde viditelné rozměry a vzdálenosti jednotlivých komponentů a to cívky, chladících segmentů a vsázky. Pro doplnění je na obrázku zakreslený startovací materiál, který se nachází pod vsázkou a přímo ve vsázce je zakreslena tavicí lázeň reprezentující již natavený oxid.



Obr. 10: Zjednodušené schéma studeného kelímku.

- | | |
|---|--|
| r_1 – poloměr cívky | r_2 – poloměr vsázky |
| r_3 – vnitřní poloměr chlad. segmentu | r_{31} – vnější poloměr chlad. segm. |
| r_4 – poloměr poč. tavicí lázně | r_5 – poloměr jedn. kousku st. mat. |
| a_1 – výška cívky | a_2 – výška vsázky |
| a_3 – výška chladících segmentů | a_4 – výška tavicí lázně |
| a_5 – výška kousku start. materiálu | |

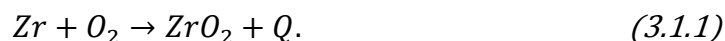
Na obr. 11 jsou znázorněny tři základní fáze tavení nevodivého materiálu ve studeném kelímku, kdy startovací fáze je založena na exotermické reakci použitého startovacího materiálu [17].



Obr. 11: Diagram fází tavení nevodivých materiálů ve studeném kelímku.

3.1 Výpočet startovací fáze

Jak již bylo důkladněji popsáno v předchozí kapitole, startovací fáze je důležitá pro tavení elektricky nevodivých materiálů. Tento výpočet se specializuje na tavení oxidu zirkoničitého (ZrO_2), který spadá do této kategorie. Pro nastartování jeho tavby je tedy zapotřebí použití vhodného množství elektricky vodivého materiálu. V tomto případě je použito samotné zirkonium (Zr), čímž je docíleno velmi dobré čistoty finálního ingotu. Energie, kterou předá zirkonium do okolí pomocí exotermické reakce, lze vyjádřit rovnicí [17]:



Rovnice popisuje reakci, při níž spojením jedné molekuly zirkonia (Zr) a jedné molekuly kyslíku (O_2) vznikne jedna molekula oxidu zirkoničitého (ZrO_2) spolu s teplem, které je vyjádřeno v tomto případě jako $Q = 1080$ kJ. Z exotermické rovnice tedy vyplývá, že jeden mol Zr vytvoří 1080 kJ energie tepla. Pomocí získané hodnoty Q a molární hmotnosti $Zr_{1mol} = 91,224$ g je možné zjistit, kolik tepla bude při exotermické reakci uvolněno z jednoho gramu Zr [17], [18], [21]:

$$Q_{1g} = \frac{Q}{Zr_{1mol}} = \frac{1080}{91,224} = 11,84 \frac{kJ}{g} \quad (3.1.2)$$

Následující krok je zaměřen na výpočet rozmezí optimálního množství startovacího materiálu m_{st} , pro zadaný vnitřní průměr studeného kelímku d_2 , se tedy jedná o průměr vsázky. Pro tento výpočet je nejprve nutné vypočítat ideální objem startovacího materiálu V_{st} a následně díky vypočtenému objemu a hustotě startovacího materiálu ρ_{Zr} se dostaneme k požadovanému rozmezí hodnoty m_{st} při hustotě startovacího materiálu $\rho_{Zr} = 5,8 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ [17]:

Ideální objem startovacího materiálu [17]:

$$\begin{aligned} V_{st} &= (0,04 \div 0,08) \cdot d_2^3 = (0,04 \div 0,08) \cdot 7,2^3 = \\ &= 14,93 \div 29,86 \text{ cm}^3, \end{aligned} \quad (3.1.3)$$

rozmezí optimálního množství startovacího materiálu [17]:

$$m_{st} = \rho_{Zr} \cdot V_{st} = 5,8 \cdot (14,93 \div 29,86) = 86,59 \div 173,19 \text{ g}. \quad (3.1.4)$$

Hodnoty rozmezí optimálního množství startovacího materiálu m_{st} , jsou vypočteny obecným výpočtem a plně neodpovídají realitě. Umožňují výpočet množství roztaveného ZrO_2 m_{ZrO_2} , které za jejich pomoci vznikne pomocí působení exotermické reakce. Nejprve je pro tento výpočet nutné určit, kolik energie H_{1g} je nutné k zahřátí jednoho gramu ZrO_2 , k tomuto výpočtu je zapotřebí znát entalpii $H_{ZrO_2} = 219,89 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ a molární hmotnost $ZrO_{2-1mol} = 107,223 \text{ g}$ [17], [18], [19]:

Energie nutná k zahřátí jednoho gramu ZrO_2 [17]:

$$H_{1g} = \frac{H_{ZrO_2}}{ZrO_{2-1mol}} = \frac{219,89}{107,223} = 2,05 \frac{kJ}{g}, \quad (3.1.5)$$

množství roztaveného ZrO_2 , které vytvoří startovací materiál [17]:

$$m_{ZrO_2} = \frac{m_{st} \cdot Q_{1g}}{H_{1g}} = \frac{(86,59 \div 173,19) \cdot 11,84}{2,05} = \quad (3.1.6)$$

$$= 500,11 \div 1000,28 \text{ g.}$$

Pomocí předchozích výpočtů bylo zjištěno, kolik gramů roztaveného materiálu ZrO_2 vznikne pomocí exotermické reakce vloženého množství startovacího materiálu. V dalším výpočtu bude zkoumána závislost vhodného poloměru vloženého startovacího materiálu do vsázky vůči velikosti použité frekvence tak, aby bylo dosaženo co největší účinnosti daného exotermického procesu. K výpočtu poloměru startovacího materiálu r_5 je nejdříve nutné vypočítat hloubku vniku Δ_5 , kde je zapotřebí znát měrný odpor zirkonia $\rho_{Zr} = 4,21 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot m$ [17]:

Hloubka vniku [17]:

$$\Delta_5 = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot \mu_0}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{Zr}}{f}} = 503 \cdot \sqrt{\frac{\rho_{Zr}}{f}} = \quad (3.1.7)$$

$$= 503 \cdot \sqrt{\frac{4,21 \cdot 10^{-7}}{1,5 \cdot 10^6}} =$$

$$= 0,267 \cdot 10^{-3} \text{ m,}$$

poloměr startovacího materiálu, pro jeho výpočet je ještě nutné si zvolit parametr $x_5 = 5,5$ [17]:

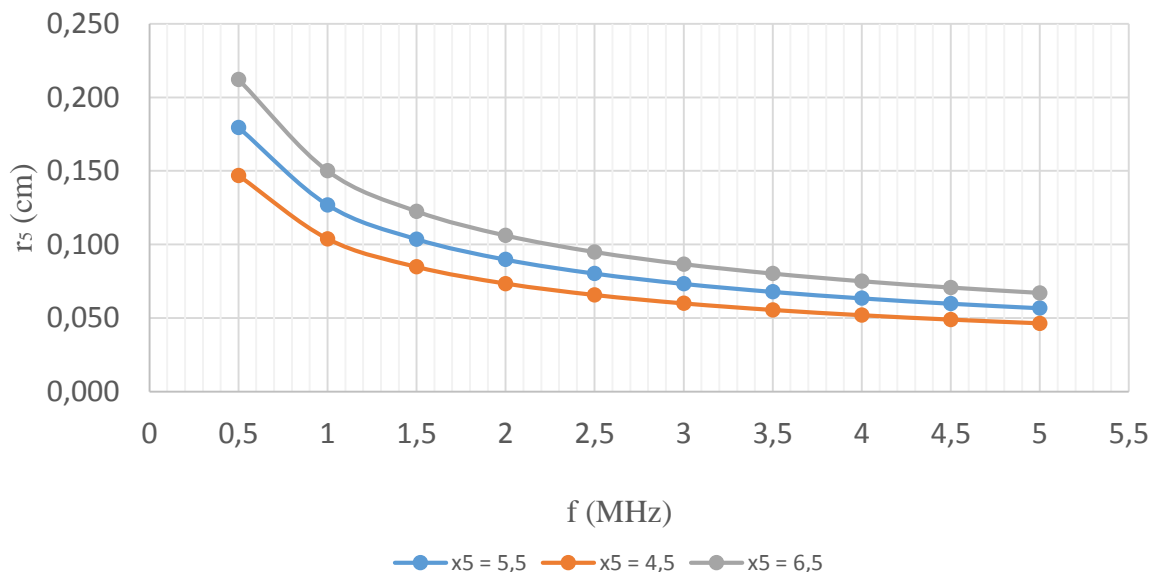
$$r_5 = \frac{x_5 \cdot \Delta_5}{\sqrt{2}} = \frac{5,5 \cdot 0,267 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{2}} = 0,00104 \text{ m} = 0,104 \text{ cm.} \quad (3.1.8)$$

Příklad ukázal, že pro zvolenou frekvenci $f = 1,5$ MHz by bylo nejvhodnější použít startovací materiál o poloměru $r_5 = 0,1$ cm. V následující tab. 3 a grafu 1 bude znázorněna předem zadaná závislost poloměru startovacího materiálu na použité frekvenci, která se bude pohybovat v rozmezí $f = 0,5 - 5$ MHz.

	Prametr (-)	$x_5 = 5,5$	$x_5 = 4,5$	$x_5 = 6,5$
Frekvence (MHz)	Hloubka vniku (m)	Poloměr (cm)	Poloměr (cm)	Poloměr (cm)
0,5	0,000462	0,180	0,147	0,212
1	0,000326	0,127	0,104	0,150
1,5	0,000266	0,104	0,085	0,122
2	0,000231	0,090	0,073	0,106
2,5	0,000206	0,080	0,066	0,095
3	0,000188	0,073	0,060	0,087
3,5	0,000174	0,068	0,056	0,080
4	0,000163	0,063	0,052	0,075
4,5	0,000154	0,060	0,049	0,071
5	0,000146	0,057	0,046	0,067

Tab. 3: Závislost poloměru r_5 na frekvenci f pro různé parametry x_5 .

Závislost nejvhodnějšího poloměru r_5 na frekvenci f pro různé parametry x_5



Graf 1: Závislost nejvhodnějšího poloměru r_5 na frekvenci f pro různé parametry x_5 .

Z grafu vytvořeného pro řešenou závislost je jasně viditelné, že se stoupající frekvencí f se požadovaný nejvhodnější poloměr r_5 snižuje. Při změně parametru x_5 je z grafu viditelné, že při jeho snižování se poloměr r_5 zmenšuje, takže reakce poloměru r_5 je v tomto případě stejná jako při zvyšování frekvence f . Na závislost odporu r_5 na frekvenci f nemá změna parametru x_5 žádný vliv.

3.2 Fáze formovací

V této fázi již startovací materiál Zr předal potřebnou energii vsázce ZrO_2 , která se nyní začíná tavit samovolně v důsledku poklesu její rezistivity na takovou úroveň, kdy materiál reaguje s elektromagnetickou indukcí. Nyní se tedy teplo do ještě neroztavené vsázky šíří pomocí tavicí lázně, která je znázorněna na obr. 10. Ze známé frekvence, která je poskytována generátorem a z rezistivity roztavené vsázky $\rho_{ZrO_2} = 0,001 \Omega \cdot m$, je možné spočítat hloubku vniku do tavené vsázky [17]:

$$\Delta_4 = 503 \cdot \sqrt{\frac{\rho_{ZrO_2}}{f}} = 503 \cdot \sqrt{\frac{0,001}{1,5 \cdot 10^6}} = 0,0129874 = 1,29874 \text{ cm.} \quad (3.2.1)$$

Pomocí hloubky vniku a zvoleného parametru $x_4 = 4$ lze dále vypočítat poloměr vsázky, který je vhodný pro tavení oxidu zirkoničitého při použití zvolených parametrů [17]:

$$r_4 = \frac{x_4 \cdot \Delta_4}{\sqrt{2}} = \frac{4 \cdot 1,29874}{\sqrt{2}} = 3,67 \text{ cm,} \quad (3.2.2)$$

$$d_4 = r_4 \cdot 2 = 3,67 \cdot 2 = 7,34 \text{ cm.} \quad (3.2.3)$$

Vhodný poloměr pro tavení vyšel 3,67 cm, tedy vhodný průměr pro tavení při zvolených parametrech je 7,34 cm. Průměr vsázky, který je možno vložit do námi používaného kelímku je 7,20 cm, takže díky zvoleným parametrům by bylo potřeba, aby vnitřní průměr kelímku byl o 0,14 cm širší. Rozdíl v tomto případě není moc výrazný, ale i přesto je lepší pokusit se parametry upravit tak, aby dokonale odpovídaly danému kelímku. Ovšem parametry kelímku se nedají nijak změnit, na rozdíl od námi zvolených parametrů. Nejsnadnější způsob v tomto případě je vypočítat si z již známých hodnot skutečnou velikost parametru x_4 , což lze následujícím vzorcem:

$$x_4 = \sqrt{2} \cdot \frac{r_2}{\Delta_4} = \sqrt{2} \cdot \frac{3,6}{1,29874} = 3,92. \quad (3.2.4)$$

Dle předpokladu se skutečný parametr x_4 od zvoleného liší jen o velmi malou hodnotu. Skutečná hodnota parametru x_4 umožní dále vypočítat skutečnou hloubku vniku do tavené vsázky:

$$\Delta_4 = \sqrt{2} \cdot \frac{r_2}{x_4} = \sqrt{2} \cdot \frac{3,6}{3,92} = 1,29877 \text{ cm.} \quad (3.2.5)$$

Hloubka vniku vypočtená pomocí skutečných parametrů se od hloubky vniku vypočtené pomocí zvolených parametrů liší pouze o 0,00003 cm, tento malý rozdíl je v tomto ohledu zanedbatelný. Vypočtená skutečná hloubka vniku tedy potvrdila, že zvolené parametry jsou vhodné pro uskutečnění samotné tavby ZrO_2 ve studeném kelímku s danými parametry.

3.3 Elektrický výpočet pro tavení ve studeném kelímku

Jako první je nutné vypočítat hloubku vniku do tavené vsázky, pro tento výpočet je zapotřebí frekvence $f = 1,5 \text{ MHz}$ a rezistivita tavené vsázky $\rho_{\text{ZrO}_2} = 0,001 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$ [17]:

$$\Delta_2 = 503 \cdot \sqrt{\frac{\rho_2}{f}} = 503 \cdot \sqrt{\frac{0,001}{1500000}} = 0,013 \text{ m.} \quad (3.3.1)$$

Pomocí hloubky vniku a zadaného průměru vsázky je možno vypočítat parametr x_2 :

$$x_2 = \frac{d_2}{\Delta_2 \cdot \sqrt{2}} = \frac{0,072}{0,013 \cdot \sqrt{2}} = 3,92. \quad (3.3.2)$$

Pro výpočet odporu R_2 a reaktance X_2 vsázky je nejdříve nutné vypočítat pomocné funkce A a B [18], [22]:

$$A = \frac{2}{x_2} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{1}{2 \cdot x_2} \right) = \frac{2}{3,92} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{1}{2 \cdot 3,92} \right) = 0,3, \quad (3.3.3)$$

$$B = \frac{\sqrt{2}}{x_2} = \frac{\sqrt{2}}{3,92} = 0,36. \quad (3.3.4)$$

Výpočet odporu R_2 a reaktance X_2 vsázky [22]:

$$R_2 = \frac{\pi \cdot \rho_2 \cdot x_2^2}{a_2} \cdot A = \frac{\pi \cdot 0,001 \cdot 3,92^2}{0,08} \cdot 0,3 = 0,18 \, \Omega, \quad (3.3.5)$$

$$X_2'' = \frac{\pi \cdot \rho_2 \cdot x_2^2}{a_2} \cdot B = \frac{\pi \cdot 0,001 \cdot 3,92^2}{0,08} \cdot 0,36 = 0,22 \, \Omega. \quad (3.3.6)$$

Pro výpočet odporu R_1 a reaktance X_1 cívky musí být nejdříve vypočtena hloubka vniku do použité měděné cívky, k tomuto výpočtu je využita frekvence $f = 1,5$ MHz a rezistivita mědi $\rho_{Cu} = 1,92 \cdot 10^{-3} \, \Omega \cdot m$ [17], [22]:

$$\Delta_1 = 503 \cdot \sqrt{\frac{\rho_1}{f}} = 503 \cdot \sqrt{\frac{1,92 \cdot 10^{-8}}{1500000}} = 0,057 \cdot 10^{-3} \, m. \quad (3.3.7)$$

Výpočet odporu R_1 a reaktance X_1 cívky. Pro tento výpočet je nutné nejdříve zvolit parametr g , který se pro více závitové cívky pohybuje v rozmezí 0,7 – 0,8, pro výpočet byl zvolen parametr $g = 0,75$ [22]:

$$\begin{aligned} R_1 = X_1 &= \frac{\pi \cdot d_1 \cdot \rho_1}{a_1 \cdot \Delta_1 \cdot g} = \frac{\pi \cdot 0,13 \cdot 1,92 \cdot 10^{-8}}{0,08 \cdot 0,057 \cdot 10^{-3} \cdot 0,75} = \\ &= 0,0023 \, \Omega. \end{aligned} \quad (3.3.8)$$

Následně bude vypočtena plocha S_S mezery mezi kelímkem a cívkou [22]:

$$\begin{aligned} S_S &= 0,785[d_1^2 - (d_2 + 2 \cdot d_{32})^2] = \\ &= 0,785[0,13^2 - (0,072 + 2 \cdot 0,01)^2] = \\ &= 0,0066 \, m^2. \end{aligned} \quad (3.3.9)$$

Pomocí vypočtené plochy S_S je možno dále vypočítat vnitřní reaktanci X_S , která vzniká v důsledku svodového toku mezery [22]:

$$\begin{aligned} X_S &= \omega \cdot \mu_0 \cdot \frac{S_S}{a_2} = 2 \cdot \pi \cdot \mu_0 \cdot \frac{f \cdot S_S}{a_2} = 7,9 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{f \cdot S_S}{a_2} = 7,9 \cdot \\ &\cdot 10^{-6} \cdot \frac{1500000 \cdot 0,0066}{0,08} = 0,98 \Omega. \end{aligned} \quad (3.3.10)$$

Jako další bude vypočtena reaktance X_{10} prázdného induktoru bez ohledu na okrajový efekt [22]:

$$\begin{aligned} X_{10} &= \omega \cdot \mu_0 \cdot \frac{\pi \cdot d_1^2}{4 \cdot a_1} = \frac{1}{2} \cdot \pi^2 \cdot \mu_0 \cdot \frac{f \cdot d_1^2}{a_1} = \\ &= 6,2 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{f \cdot d_1^2}{a_1} = \\ &= 6,2 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1500000 \cdot 0,13^2}{0,08} = 1,97 \Omega. \end{aligned} \quad (3.3.11)$$

Pro následný výpočet je nejprve nutné vypočítat korekční koeficient k_1 pro masivní induktor [22]:

$$\begin{aligned} k_1 &= \frac{1}{1 + \frac{d_1}{a_1} \cdot [0,515 + 0,218 \cdot (\frac{k_v}{d_1})^{0,406}]} = \\ &= \frac{1}{1 + \frac{0,13}{0,08} \cdot [0,515 + 0,218 \cdot (\frac{0,02}{0,13})^{0,406}]} = \\ &= 0,5. \end{aligned} \quad (3.3.12)$$

Pomocí vypočteného korekčního koeficientu k_1 se vypočte reaktance X_0 , která je tvořena zpětným magnetickým tokem uzavírajícím se mimo induktor [22]:

$$X_0 = \frac{X_{10}}{\frac{1}{k_1} - \frac{a_2}{a_1}} = \frac{1,97}{\frac{1}{0,5} - \frac{0,08}{0,08}} = 1,97 \Omega. \quad (3.3.13)$$

Pro následující výpočty je nutné vypočítat koeficient k_C redukce parametrů taveniny na indukční parametry [22]:

$$k_C = \frac{X_0^2}{R_2^2 + (X_2'' + X_S + X_0)^2} = \frac{1,97^2}{0,18^2 + (0,22 + 0,98 + 1,97)^2} \quad (3.3.14)$$

$$= 0,39.$$

Následně pomocí koeficientu k_C lze vypočítat reaktanci X_{1e} induktoru s taveninou [22]:

$$X_{1e} = X_1 + k_C \cdot \left[X_2'' + X_S + \frac{R_2^2 + (X_2'' + X_S)^2}{X_0} \right] =$$

$$= 0,0023 + 0,39 \cdot$$

$$\cdot \left[0,22 + 0,98 + \frac{0,18^2 + (0,22 + 0,98)^2}{1,97} \right] = 0,76 \Omega. \quad (3.3.15)$$

Dále pomocí koeficientu k_C lze vypočítat odpor R_{1e} induktoru s taveninou [22]:

$$R_{1e} = R_1 + R_2 \cdot k_C = 0,0023 + 0,18 \cdot 0,39 = 0,08 \Omega. \quad (3.3.16)$$

Z výpočtu reaktance X_{1e} a odporu R_{1e} lze následně vypočítat impedance Z_{1e} induktoru s taveninou [22]:

$$|\overline{Z}_{1e}| = \sqrt{X_{1e}^2 + R_{1e}^2} = \sqrt{0,76^2 + 0,08^2} = 0,76 \Omega. \quad (3.3.17)$$

Pro výpočet napětí induktoru U_1 je nejdříve nutné vypočítat proud induktoru I_1 [22]:

$$|\overline{I}_1| = \sqrt{\frac{P_{gen} \cdot 10^3}{R_2 \cdot k_C}} = \sqrt{\frac{160 \cdot 10^3}{0,18 \cdot 0,39}} = 1510 \text{ A}. \quad (3.3.18)$$

Nyní lze vypočítat napětí induktoru U_1 [22]:

$$|\overline{U}_1| = I_1 \cdot Z_{1e} = 1421 \cdot 0,76 = 1080 \text{ V.} \quad (3.3.19)$$

Výpočet zdánlivého výkonu S_1 induktoru závisí na proudu I_1 a napětí U_1 [22]:

$$S_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot 10^{-3} = 1080 \cdot 1510 \cdot 10^{-3} = 1631 \text{ kVA.} \quad (3.3.20)$$

Ze zadané hodnoty P_{gen} a vypočtené hodnoty S_1 lze vypočítat účinník induktoru [22]:

$$\cos\varphi_1 = \frac{P_1}{S_1} = \frac{160}{1631} = 0,1. \quad (3.3.21)$$

Následně je vypočtena účinnost η_1 induktoru s taveninou [22]:

$$\eta_1 = \frac{R_2 \cdot k_C}{R_{1e}} = \frac{0,18 \cdot 0,39}{0,08} = 0,88. \quad (3.3.22)$$

Pomocí účinnosti η_1 je možno dále vypočítat výkon P_2 ve vsázce [22]:

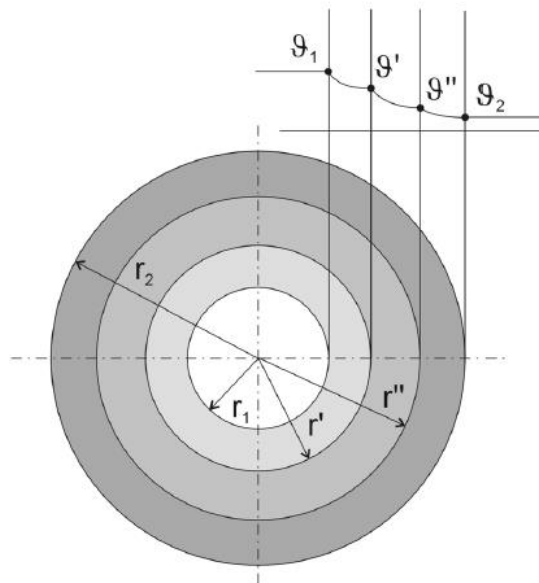
$$P_2 = P_1 \cdot \eta_1 = 160 \cdot 10^3 \cdot 0,88 = 140,8 \text{ kW.} \quad (3.3.23)$$

3.4 Tepelné ztráty ve studeném kelímku

Základní vlastností tepla je jeho šíření z teplotně vyšších do teplotně nižších míst. Při tomto procesu přestupu vznikají tepelné ztráty a ty jsou při tavení ve studeném kelímku nežádoucí. Z nejteplejšího místa, kterým je ve studeném kelímku roztavená vsázka, dochází k největším ztrátám díky přestupu tepla ze stěny kelímku do chladicí vody, která proudí segmenty kelímku. K tepelným ztrátám studeného kelímku také přispívají ztráty sáláním tepla z povrchu tavené vsázky, který je v přímém styku s okolím. Díky použití chlazeného masivního dna kelímku můžeme tepelné ztráty dnem zanedbat [23].

3.4.1 Ztráty vedením tepla stěnou kelímku (skull vrstvou)

V důsledku vedení tepla přes složenou válcovou stěnu z vnitřního povrchu k vnějšímu povrchu se při zvětšujícím se průměru stěn nebo při zvyšování počtu stěn zvyšuje plocha, kterou musí teplo projít. Tvary průběhů křivek teplot v závislosti na poloměru mají logaritmický průběh. Tento proces je znázorněn na obr. 12 [23].



Obr. 12: Vedení tepla složenou válcovou stěnou, kde r (cm) je poloměr a ϑ ($^{\circ}\text{C}$) teplota [23].

Výpočetní vzorec pro tepelné ztráty P_{ved} způsobené vedením tepla přes skull vrstvu. Při tomto výpočtu je využívána tepelná vodivost λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) i výška vsázky a (cm) [23]:

$$P_{\text{ved}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot a \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2)}{\frac{1}{\lambda_1} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\lambda_2} \cdot \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{1}{\lambda_3} \cdot \ln \frac{r_4}{r_3}} \quad (3.4.1.1)$$

3.4.2 Ztráty prouděním tepla chladicí kapalinou a vzduchem

Proudění tepla je přenos tepla, který je úzce spjat s přenosem hmoty o určité vnitřní energii z počátečního místa na koncové. Pomocí bližšího zkoumání tohoto procesu se spíše jedná o přenos hmoty, na kterou je teplo vázané, nežli o přenos samotného tepla. Pro výpočet ztrát prouděním tepla chladicí kapalinou a vzduchem využijeme tento vzorec, kde využíváme součinitel přestupu tepla α ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$). Při těchto výpočtech byl použit obecný výpočet, a tedy výsledky plně neodpovídají realitě [17], [23].

Výpočet ztrát P_{prkap} prouděním tepla chladicí kapalinou, pomocí součinitele přestupu tepla $\alpha_{\text{kap}} = 8400 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, obsahem plochy pláště vsázky S_{pv} (m^2) a teplot ϑ ($^{\circ}\text{C}$) [17], [23]:

$$S_{\text{pv}} = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot a = 2 \cdot \pi \cdot 0,036 \cdot 0,08 = 0,018 \text{ m}^2, \quad (3.4.2.1)$$

$$\begin{aligned} P_{\text{prkap}} &= \alpha_{\text{kap}} \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_3) \cdot S_{\text{pv}} = 8400 \cdot (150 - 50) \cdot 0,018 = \\ &= 15120 \text{ W} = 15,12 \text{ kW}. \end{aligned} \quad (3.4.2.2)$$

Výpočet ztrát P_{prvzd} prouděním tepla chladicí kapalinou, pomocí součinitele přestupu tepla $\alpha_{\text{vzd}} = 12,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, obsahem plochy pláště kelímku S_{k} (m^2) a teplot ϑ ($^{\circ}\text{C}$) [17], [23]:

$$S_{\text{k}} = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot a = 2 \cdot \pi \cdot 0,046 \cdot 0,08 = 0,023 \text{ m}^2, \quad (3.4.2.3)$$

$$\begin{aligned} P_{\text{prvzd}} &= \alpha_{\text{vzd}} \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_3) \cdot S_{\text{k}} = 12,5 \cdot (50 - 25) \cdot 0,023 = \\ &= 7,19 \text{ W}. \end{aligned} \quad (3.4.2.4)$$

3.4.3 Ztráty sáláním tepla z povrchu tavené vsázky, který je v přímém styku s okolím

Přenos tepla sáláním je svým mechanismem přenosu tepla odlišný od předchozích dvou. Zde se přenos tepla děje tepelným zářením, tj. radiací, a to v celém rozsahu vlnových délek. Toto vlnění vytváří každé neprůzračné těleso o teplotě vyšší než 0 K a také zároveň okolní záření pohlcuje. Záření jde rozložit na jednotlivé složky odpovídající jednotlivým vlnovým délkám, pomocí kterých lze získat vyzařované spektrum. Velikost vyzařované energie je úměrná ploše povrchu tělesa a čtvrté mocnině jeho termodynamické teploty, ovšem je také závislá na charakteru povrchu tělesa [17], [23].

Pro tento výpočet je využit Stefan-Boltzmannův zákon, který popisuje celkovou intenzitu záření absolutně černého tělesa. V tomto případě nebylo použito absolutně černé těleso, tedy celý vzorec musí být navíc vynásoben emisivitou $\varepsilon = 0,45$. Tímto postupem je dosaženo hodnoty intenzity vyzařování M ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$), která roste se čtvrtou mocninou termodynamické teploty zářícího tělesa. Pro dosažení hodnoty ztrát sáláním musí být ještě celý výraz vynásoben plochou povrchu vsázky, která je v přímém kontaktu s okolím. Výpočet ztrát $P_{sá}$ sáláním, ve kterém je využita Stefan-Boltzmannova konstanta $\sigma = 5,67\cdot 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$, emisivita $\varepsilon = 0,45$, termodynamická teplota $T = 2900 \text{ }^\circ\text{C}$ a plocha horního povrchu vsázky S_{vs} [17], [23]:

$$S_{vs} = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot 0,036^2 = 0,0041 \text{ m}^2, \quad (3.4.3.1)$$

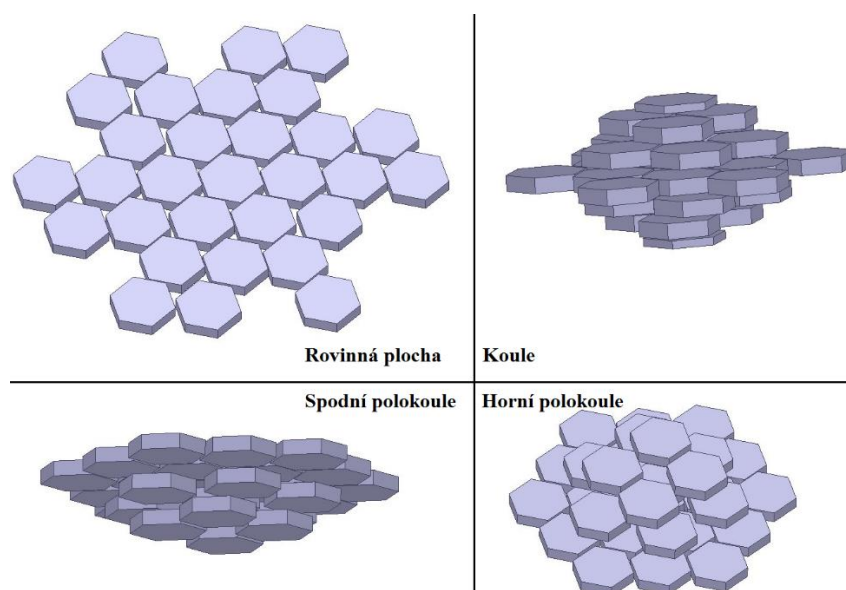
$$\begin{aligned} P_{sá} &= \sigma \cdot \varepsilon \cdot T^4 \cdot S_{vs} = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,45 \cdot 2900^4 \cdot 0,0041 = & (3.4.3.2) \\ &= 7399 \text{ W} = 7,4 \text{ kW}. \end{aligned}$$

4 Zkoumání vlivu elektromagnetické indukce na rozdílné uložení startovacího materiálu při startovací fázi

Vliv elektromagnetické indukce na rozdílné uložení startovacího materiálu jsem zkoumal pomocí programu ANSYS® Electromagnetics Suite 19.0. Přístup k oficiální verzi tohoto programu mi byl poskytnut Ing. Davidem Rotem, Ph.D.. V programu jsem pracoval na počítači, který vlastní Katedra Elektroenergetiky a ekologie a je sestaven na Západočeské univerzitě. Přístup mi byl poskytnut přes vzdálenou plochu.

Úkolem zkoumání bylo zjistit rozdíl ztrát ve startovacím materiálu, při jeho různém uložení ve vsázce. Uložení a velikost startovacího materiálu je navrženo tak, aby se co nejvíce přibližovalo realitě. Množství, rozměry, druh a uložení startovacího materiálu jsou převzaty z již realizovaných pokusů tavení oxidů ve studeném kelímku, který vlastní Katedra Elektroenergetiky a ekologie a pokusy byly realizovány jejími pracovníky.

Induktor společně s kelímkem jsou vytvořeny tak, aby odpovídaly reálnému zařízení, které vlastní katedra a byly mi poskytnuty Ing. Davidem Rotem, Ph.D.. Materiál tavený ve studeném kelímku byl oxid hlinitý (Al_2O_3) a směs oxidu hlinitého (Al_2O_3) spolu s oxidem zirkoničitým (ZrO_2). V obou těchto případech se jako startovací materiál používá čistý hliník. Z tohoto důvodu je zvolený materiál pro model také čistý hliník. Pro uložení startovacího materiálu byly zvoleny čtyři způsoby. Uložení v rovinné ploše, uložení v podobě koule, následně spodní polokoule a horní polokoule. Tyto způsoby uložení jsou znázorněny na obr. 13.



Obr. 13: Způsoby uložení startovacího materiálu.

4.1 Příprava startovacího materiálu

Velikost a rozměry startovacího materiálu jsou navrženy tak, aby odpovídaly co nejvíce realitě. Tvar materiálu jsem zvolil šestiúhelníkový, počet kusů materiálu 30 a celkovou hmotnost materiálu 7,8 g. Následuje výpočet rozměrů jednoho kusu.

Výpočet hmotnosti jednoho kusu materiálu:

$$1 \text{ kus} = \frac{\text{celková hmotnost}}{\text{počet kusů}} = \frac{7,8}{30} = 0,26 \text{ g.} \quad (4.1.1)$$

Pro výpočet objemu startovacího materiálu je nutno znát jeho měrnou hustotu $\rho_{Al} = 2,7 \text{ g/cm}^3$:

$$V = \frac{1 \text{ kus}}{\rho_{Al}} = \frac{0,26}{2,7} = 0,093 \text{ cm}^3 = 93 \text{ mm}^3. \quad (4.1.2)$$

Pro výpočet obsahu startovacího materiálu jsem zvolil jeho výšku $a = 2 \text{ mm}$:

$$S = \frac{V}{a} = \frac{93}{2} = 46,5 \text{ mm}^2. \quad (4.1.3)$$

Výpočet strany šestiúhelníku:

$$b = \sqrt{\frac{S \cdot 2}{3 \cdot \sqrt{3}}} = \sqrt{\frac{46,5 \cdot 2}{3 \cdot \sqrt{3}}} = 4,23 \text{ mm.} \quad (4.1.4)$$

Výpočet poloměru šestiúhelníku:

$$r = \frac{b \cdot \sqrt{3}}{2} = \frac{4,23 \cdot \sqrt{3}}{2} = 3,66 \text{ mm.} \quad (4.1.5)$$

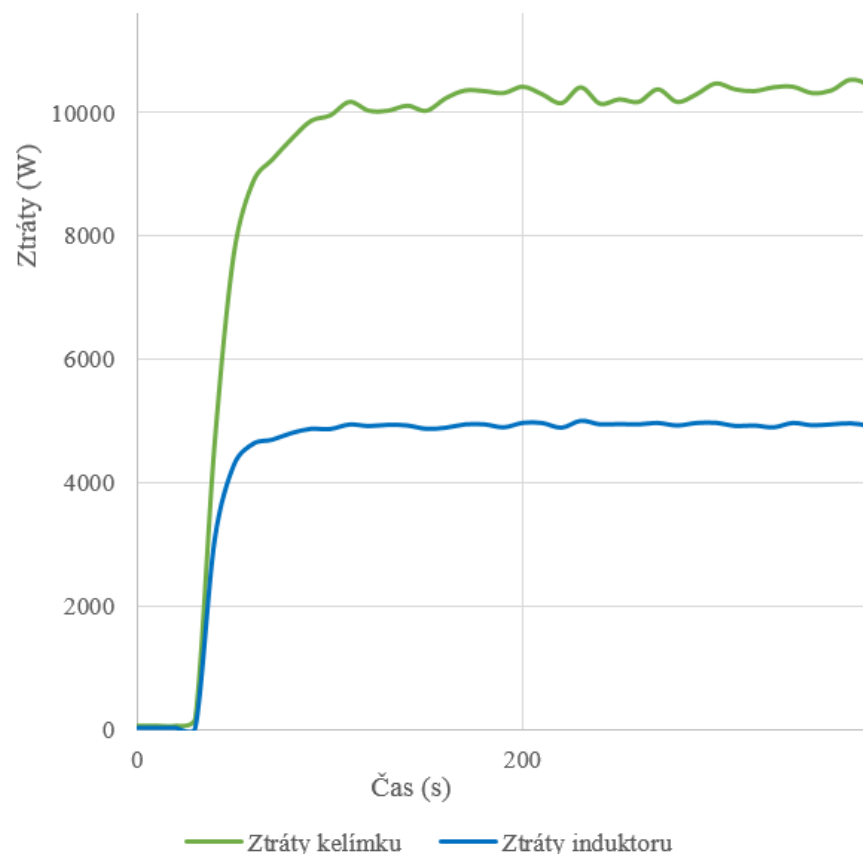
Výsledkem tedy je, že rozměry jednoho kusu startovacího materiálu jsou $r = 3,66 \text{ mm}$ a $a = 2 \text{ mm}$, pro 7,8 g startovacího materiálu při rozdělení na 30 kusů.

S těmito rozměry bylo možno sestavit model při uspořádání do rovinné plochy, spodní a dolní polokoule. Pro uspořádání do tvaru koule bylo nutno jeden kus rozdělit na polovinu, tedy vytvořit dva kusy o poloviční hmotnosti. Výsledné rozměry těchto kusů jsem vypočítal stejným způsobem jako předchozí rozměry tím, že jsem hmotnost jednoho kusu rozděлил napůl a následně jsem tuto hodnotu dosadil do předchozích výpočtů. Výšku jsem při výpočtu zvolil $a = 1 \text{ mm}$ a poloměr následně vyšel $r = 3,72 \text{ mm}$.

Pomocí vypočítaných rozměrů jsem vytvořil 30 šestiúhelníkových kusů startovacího materiálu, ze kterých jsem následně sestavil všechny čtyři stanovené způsoby uložení. Výsledek byl již znázorněn na předchozím obr. 13.

4.2 Model uložení startovacího materiálu ve studeném kelímku

Prvním krokem bylo nastavení vstupních parametrů modelu tak, aby co nejlépe odpovídal reálné situaci a výsledky bylo možné aplikovat v praxi. Hlavním opěrným bodem byly odečtené ztráty z kelímku a induktoru dohromady při průběhu startovací fáze. Odečtení těchto hodnot proběhlo z grafu tavy, která byla provedena dne 12. 1. 2017. Výsledkem je hodnota, která se pohybuje v rozmezí 15 kW. Potřebnou část grafu je možné vidět na obr. 14.

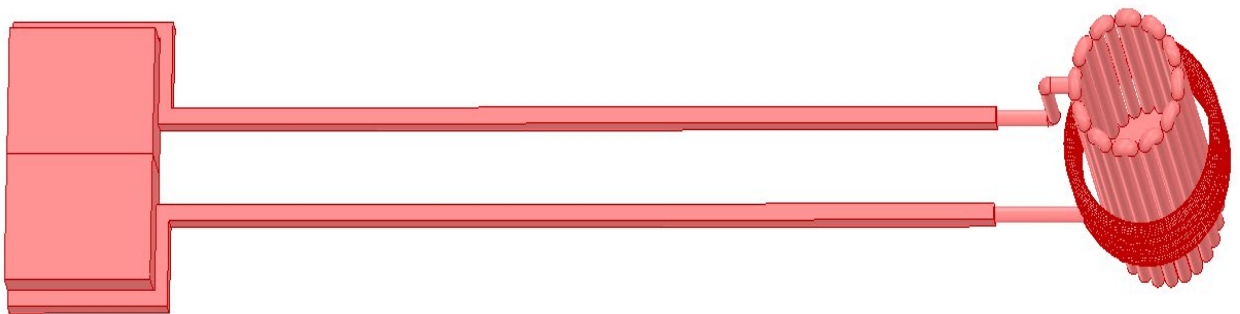


Obr. 14: Ztráty v kelímku a induktoru.

4.2.1 Model prázdného kelímku spolu s induktorem

Pro dosažení potřebných ztrát induktoru a kelímku jsem nastavil vstupní parametry modelu na frekvenci 1,6 MHz, při níž probíhala i reálná tavba a vstupní proud na hodnotu 1500 A. Namodelovaný induktor společně s kelímkem je možno vidět na obr. 15. Výsledné hodnoty ztrát:

- společné ztráty: 14 905,700 W,
- ztráty induktoru: 4 480,27 W,
- ztráty kelímku: 10 425,43 W.



Obr. 15: Induktor společně s kelímkem.

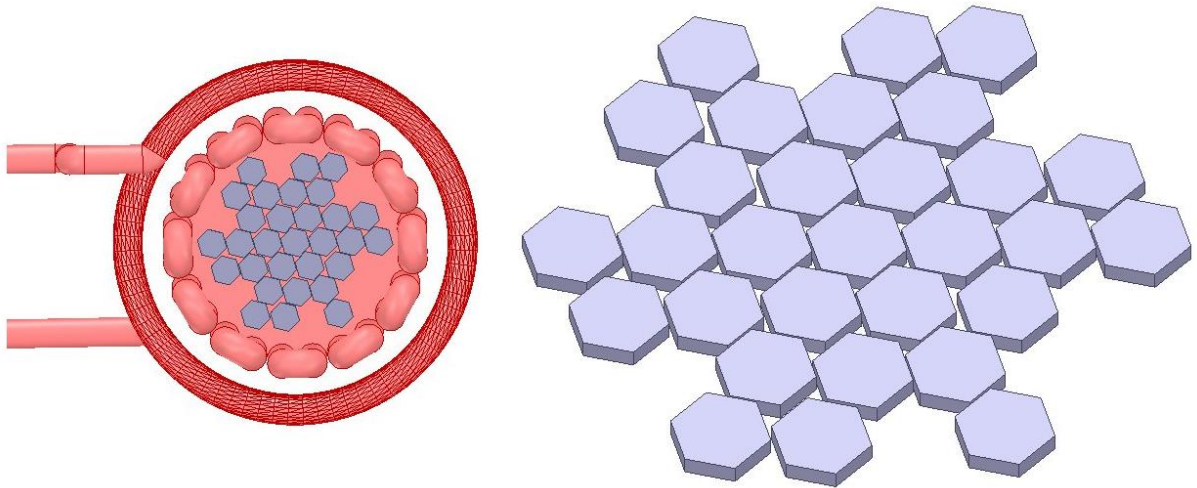
V následujících modelech byl do kelímku vložen startovací materiál postupně ve všech 4 seskupeních.

4.2.2 Model kelímku s uloženým startovacím materiálem ve formě rovinné plochy

Na obr. 16 je znázorněno uložení startovacího materiálu ve studeném kelímku ve formě rovinné plochy. Dále jsou vypsány výsledné hodnoty ztrát s vloženým startovacím materiálem. Poněvadž byl startovací materiál rozvržen do jednotlivých kusů, které mezi sebou nejsou žádným způsobem spojeny, musí být celkové ztráty startovacího materiálu vždy vypočteny ze ztrát induktoru, kelímku a společných:

- společné ztráty: 15 274,50 W,
- ztráty induktoru: 4 446,65 W,
- ztráty kelímku: 9 849,22 W.

Výsledné ztráty startovacího materiálu: $15\,274,50 - 4\,446,65 - 9\,849,22 = 978,63$ W.



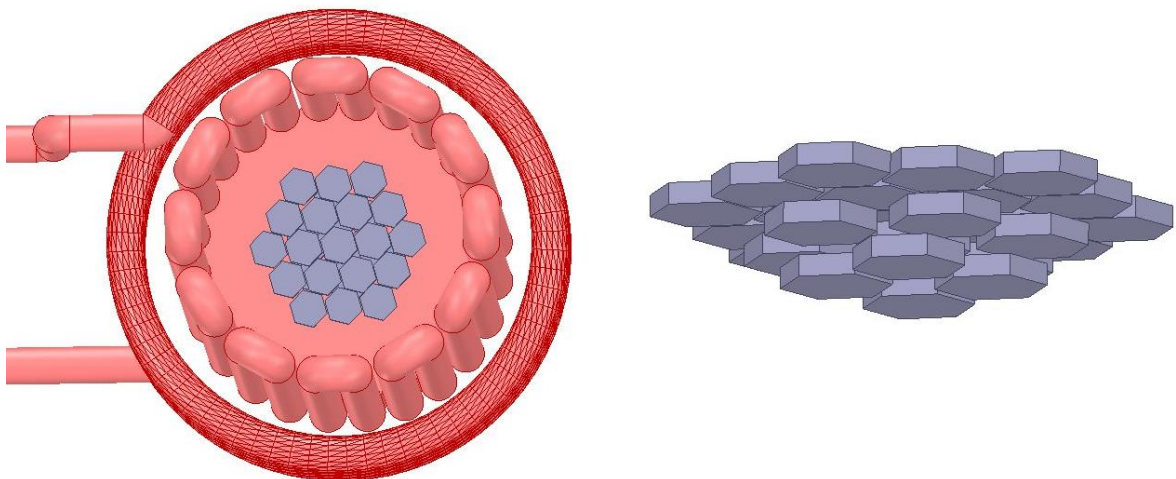
Obr. 16: Startovací materiál uložený ve studeném kelímku ve formě rovinné plochy.

4.2.3 Model kelímku s uloženým startovacím materiálem ve formě spodní polokoule

Na obr. 17 je znázorněno uložení startovacího materiálu ve studeném kelímku ve formě spodní polokoule. Výsledné hodnoty ztrát s vloženým startovacím materiálem:

- společné ztráty: 15 022,83 W,
- ztráty induktoru: 4 456,17 W,
- ztráty kelímku: 9 948,86 W.

Výsledné ztráty startovacího materiálu: $15\,022,83 - 4\,456,17 - 9\,948,86 = 617,8$ W.



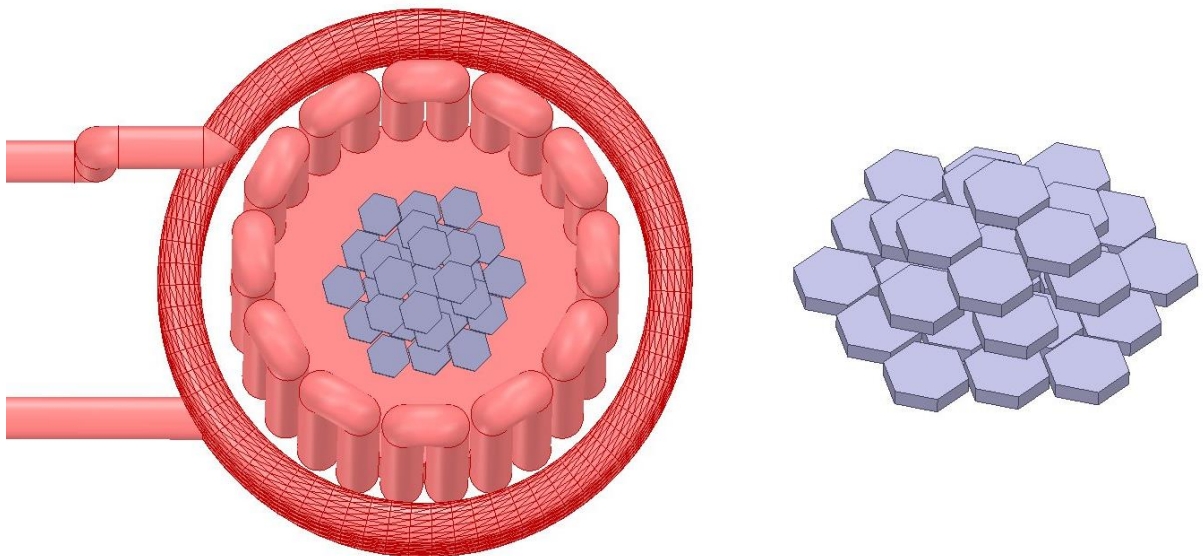
Obr. 17: Startovací materiál uložený ve studeném kelímku ve formě spodní polokoule.

4.2.4 Model kelímku s uloženým startovacím materiálem ve formě horní polokoule

Na obr. 18 je znázorněno uložení startovacího materiálu ve studeném kelímku ve formě horní polokoule. Výsledné hodnoty ztrát s vloženým startovacím materiálem:

- společné ztráty: 14 948,09 W,
- ztráty induktoru: 4 448,99 W,
- ztráty kelímku: 9 928,29 W.

Výsledné ztráty startovacího materiálu: $14\,948,09 - 4\,448,99 - 9\,928,29 = 570,81$ W.



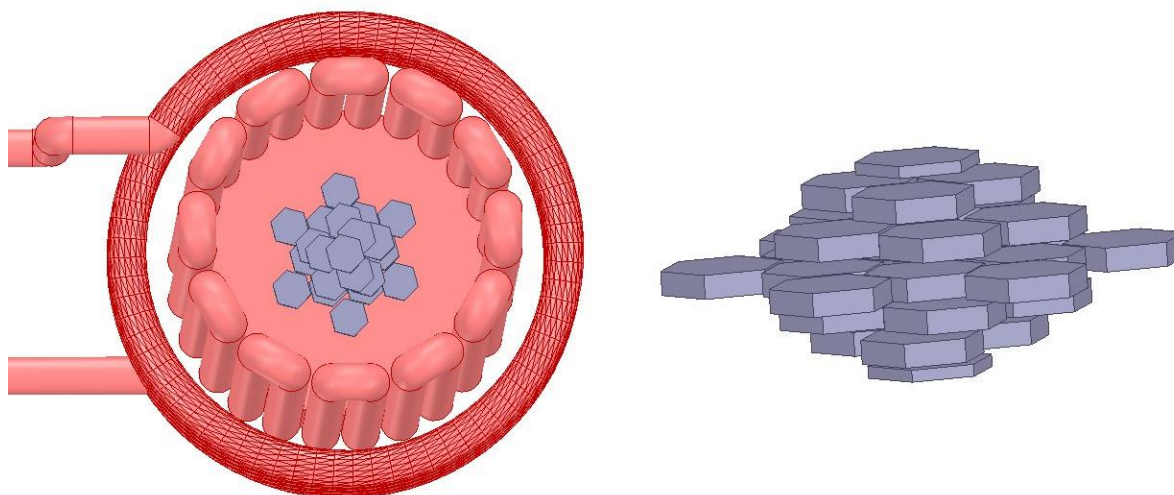
Obr. 18: Startovací materiál uložený ve studeném kelímku ve formě horní polokoule.

4.2.5 Model kelímku s uloženým startovacím materiálem ve formě koule

Na obr. 19 je znázorněno uložení startovacího materiálu ve studeném kelímku ve formě koule. Výsledné hodnoty ztrát s vloženým startovacím materiálem:

- společné ztráty: 14 878,09 W,
- ztráty induktoru: 4 462,39 W,
- ztráty kelímku: 10 135,88 W.

Výsledné ztráty startovacího materiálu: $14\,878,09 - 4\,462,39 - 10\,135,88 = 279,82$ W.



Obr. 19: Startovací materiál uložený ve studeném kelímku ve formě koule.

4.3 Vyhodnocení výsledků získaných z modelu

	Společné ztráty (W)	Ztráty induktorem (W)	Ztráty kelímku (W)	Ztráty st. materiálu (W)
Induktor s prázdným kelímkem	14 905,70	4 480,27	10 425,43	-
St. materiál ve formě rovinné plochy	15 274,50	4 446,65	9 849,22	978,63
St. materiál ve formě spodní polokoule	15 022,83	4 456,17	9 948,86	617,80
St. materiál ve formě horní polokoule	14 948,09	4 448,99	9 928,29	570,81
St. materiál ve formě koule	14 878,09	4 462,39	10 135,88	279,82

Tab. 4: Výsledné ztráty vypočtené pomocí modelu.

Výsledky vypočtených ztrát, které jsou uvedeny v tab. 4 ukazují, že největší ztráty startovacího materiálu vznikají při uložení materiálu do vsázky ve formě rovinné plochy, kdy je startovací materiál uložen nejbližší k induktoru. Mezi hodnotami ztrát startovacího materiálu, uloženého ve vsázce ve formě spodní a horní polokoule, není výrazný rozdíl. Tato podobnost není nijak neočekávaná, protože tyto dvě formy jsou ve své podstatě shodné, pouze se liší svým postavením vůči induktoru, což patrně způsobuje daný rozdíl jejich výsledných hodnot. Hodnoty ztrát jsou nižší než u předešlého uložení, to nejvíce nasvědčuje faktu, že startovací materiál je více vzdálen od induktoru. Uložení startovacího materiálu ve formě koule dosahuje nejmenších hodnot ztrát ve startovacím materiálu, tento fakt již vyplývá z vyhodnocení předchozích hodnot. Tedy je to způsobeno tím, že startovací materiál je umístěn nejdále od induktoru.

Z výsledných hodnot je také patrné, že společné ztráty jsou u prvních třech způsobů uložení startovacího materiálu vyšší než u prázdného kelímku s induktorem. Při uložení startovacího materiálu ve formě koule, jsou jeho ztráty velmi nízké. Zároveň jsou ovlivněny ztráty induktoru a kelímku, které se u všech případů vložení startovacího materiálu snížily. V tomto případě uložení jsou tedy ztráty startovacího materiálu velmi nízké a hodnoty ztrát induktoru a kelímku sníženy na takovou úroveň, kdy celkové ztráty jsou nižší, než když je kelímek prázdný.

	Proud (A)	Frekvence (MHz)	Indukčnost (μH)	Odpor ($\text{m}\Omega$)	Impedance (Ω)
Induktor s prázdným kelímekem	1500	1,60	1,74	13,25	17,43
St. materiál ve formě rovinné plochy	1500	1,60	1,73	13,58	17,35
St. materiál ve formě spodní polokoule	1500	1,60	1,73	13,35	17,36
St. materiál ve formě horní polokoule	1500	1,60	1,73	13,29	17,36
St. materiál ve formě koule	1500	1,60	1,73	13,22	17,38

Tab. 5: Výsledné parametry po vypočtení modelu

Tab. 5 ukazuje závislost celkové indukčnosti, odporu a impedance na formě uložení startovacího materiálu ve vsázce. Jak je z tabulky vidět, všechny výpočty modelu probíhaly při stejné frekvenci a při stejném proudu. Tyto hodnoty byly zvoleny z dříve popsanych důvodů. Všechny tři vypsane parametry jsou změnou uložení startovacího materiálu téměř nezměněny. Velká změna není ani při porovnání s prázdným kelímekem. Indukčnost je za všech okolností téměř konstantní, impedance má trochu výraznější změnu mezi prázdným kelímekem a kelímekem s již vloženým startovacím materiálem, jinak změna není téměř znatelná. Největších rozdílů je dosaženo u odporu, kde jsou změny hodnot u nejvíce rozdílných uložení znatelnější.

Vytvořené modely a tabulky jsou uloženy na DVD, které je přiloženo na zadní straně desek diplomové práce.

5 Analýza naměřených hodnot z realizovaných taveb Al_2O_3 a směsi Al_2O_3 a ZrO_2

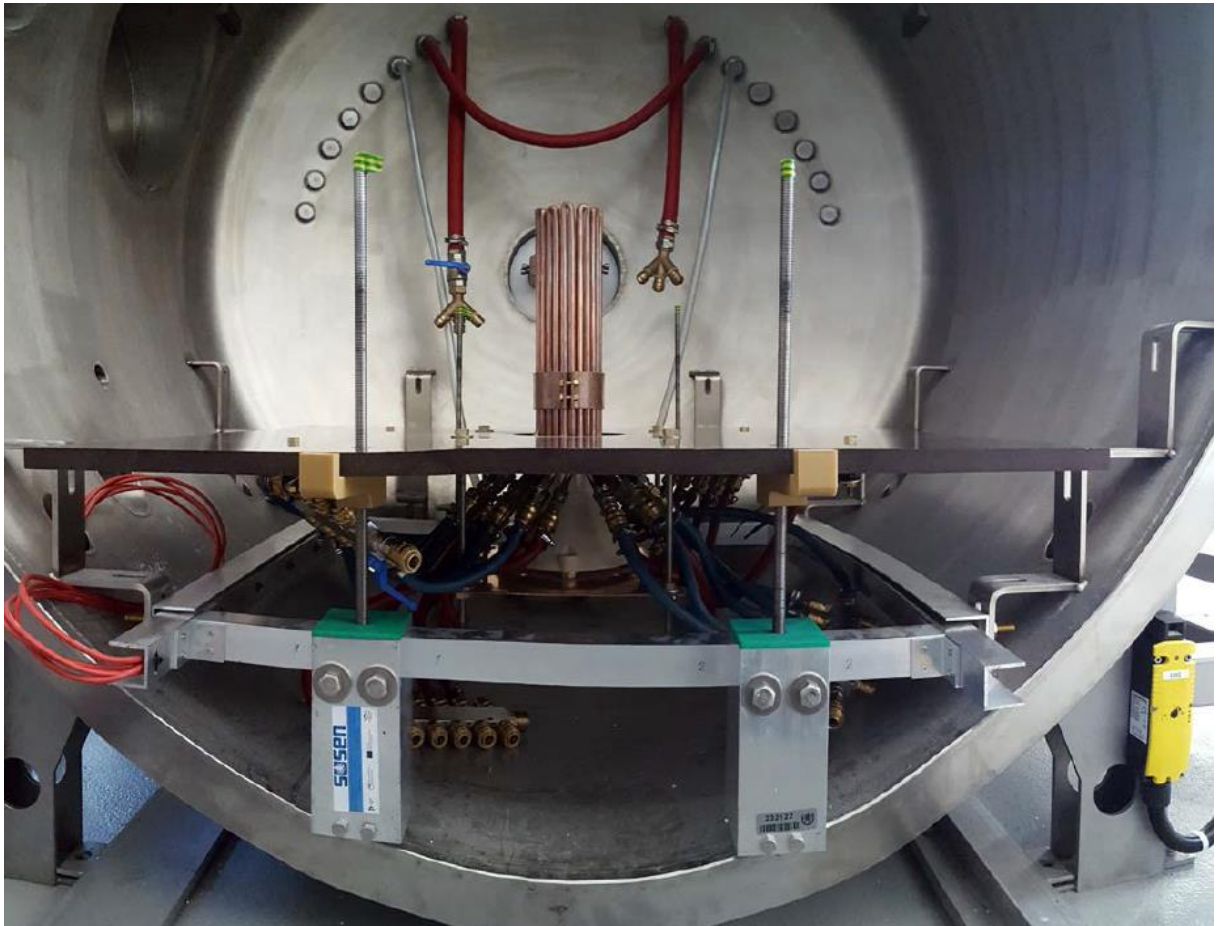
Všechny čtyři tavy, které budou v této práci analyzovány, proběhly v laboratoři Elektrotechnické fakulty v Plzni pod dohledem pracovníků Katedry Elektroenergetiky a ekologie. V tomto komplexu se nachází samotné zařízení pro tavbu ve studeném kelímku, které je vidět na obr. 20. V pravé části obrázku se nachází skříň napájecího zdroje, ve které je umístěna většina elektronických komponentů zařízení. Základním komponentem je elektronkový generátor, který se používá k napájení induktoru. Dalšími komponenty jsou zařízení určená pro měření a ovládání celé tavy. V levé části obrázku je umístěna tavící komora, v níž probíhá samotná tavy. Komora obsahuje studený kelímek spolu s induktorem [1].



Obr. 20: Zařízení pro tavení ve studeném kelímku [1].

Na obr. 21 je možné vidět vnitřek tavící komory, která slouží k odizolování tavy od vnějšího prostředí a také pro vytvoření vhodných podmínek pro tavbu daného materiálu. Hlavní součástí komory je induktor a studený kelímek. Studený kelímek je tvořen segmenty trubkovitého tvaru, které jsou po dobu celé tavy intenzivně chlazené vodou. Na obrázku je zřetelně viditelný princip napojení chladících trubic na segmenty kelímku. Princip chlazení uzavřeným chladicím okruhem je založen na odvodu tepla z daných komponentů zařízení.

Jako medium je použita voda, která se uchovává ve třech vodních nádržích. Další součástí kelímku je měděné dno, které na obrázku není bohužel viditelné, protože se nachází za segmenty. Tyto segmenty jsou viditelně propojeny pomocí měděného pásu. Studený kelímek je uchyten na pohyblivé desce, aby bylo možno upravovat jeho polohu tak, aby vsázka byla vždy ve správné poloze vůči induktoru a tím bylo dosaženo co nejvyšší účinnosti tavby [1].



Obr. 21: Obsah tavicí komory [1].

Všechny dále vyhodnocované hodnoty parametrů, použité fotografie a videa při analýze taveb jsou uloženy na DVD, které je přiloženo na zadní straně desek diplomové práce.

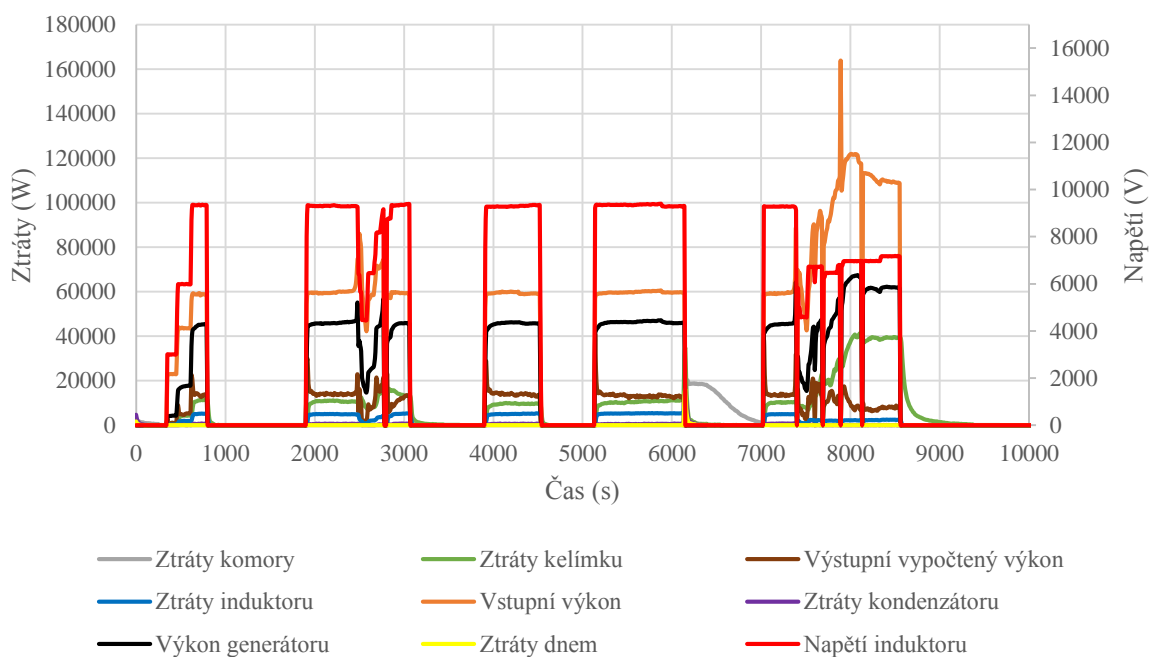
5.1 Tavba Al_2O_3 provedená dne 12. 1. 2017

Dne 12. 1. 2017 proběhla pomocí zařízení studeného kelímku tavba oxidu hlinitého (Al_2O_3), jako startovací materiál byl použit čistý hliník, k nastartování tavby došlo tedy za pomoci exotermické reakce. Díky použití tohoto principu nastartování tavby dosáhl výsledný ingot velmi vysoké čistoty.

5.1.1 Analýza všech uskutečněných taveb

Graf 2 znázorňuje průběh celého dne, ve kterém byly tavby realizovány. Z jeho průběhu je velmi dobře znatelná obtížnost celého procesu tavení ve studeném kelímku. V grafu je viditelné, že první, třetí a čtvrtou tavbu se nepodařilo řádně nastartovat a tedy musely být ukončeny. K nastartování tavby je zapotřebí udržovat maximální napětí pro daný induktor a vsázku, čímž je dosaženo požadované exotermické reakce startovacího materiálu, pomocí které se nevodivé vsázce předá požadovaná energie ve formě tepla. Ta se stává elektricky vodivou a začíná se tavit elektromagnetickou indukcí samostatně. V těchto třech případech bohužel nebylo exotermické reakce dosaženo a tavba nemohla být uskutečněna. Pokud dojde k této situaci, v kelímku se vytvoří tzv. „spečenec“, který je nutno následně z kelímku odstranit.

Tavba Al_2O_3 dne 12. 1. 2017

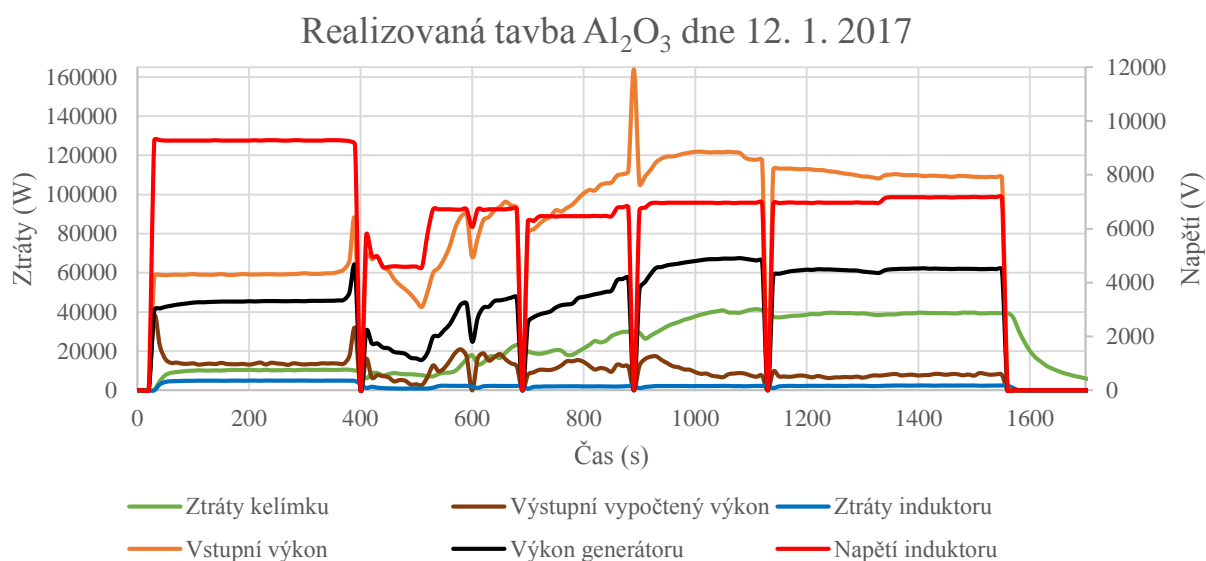


Graf 2: Tavba Al_2O_3 dne 12. 1. 2017.

U druhého pokusu se tavbu podařilo nastartovat, ale bohužel při formovací fázi došlo k chybě, díky které byly ztraceny podmínky nutné k řádnému dokončení tavby. Tavba díky tomu byla ukončena. Tato chyba mohla vzniknout ze dvou důvodů. Prvním bylo dosypání velkého množství vsázky, díky čemuž je tavenina ochlazená na takovou teplotu, že již není možno udržet podmínky pro tavení. Druhým důvodem bylo snížení regulovaného napětí pod úroveň, kdy jsou ztraceny nutné parametry k udržení tavby. Poslední pátá tavba proběhla úspěšně a bude dále v textu podrobněji analyzována.

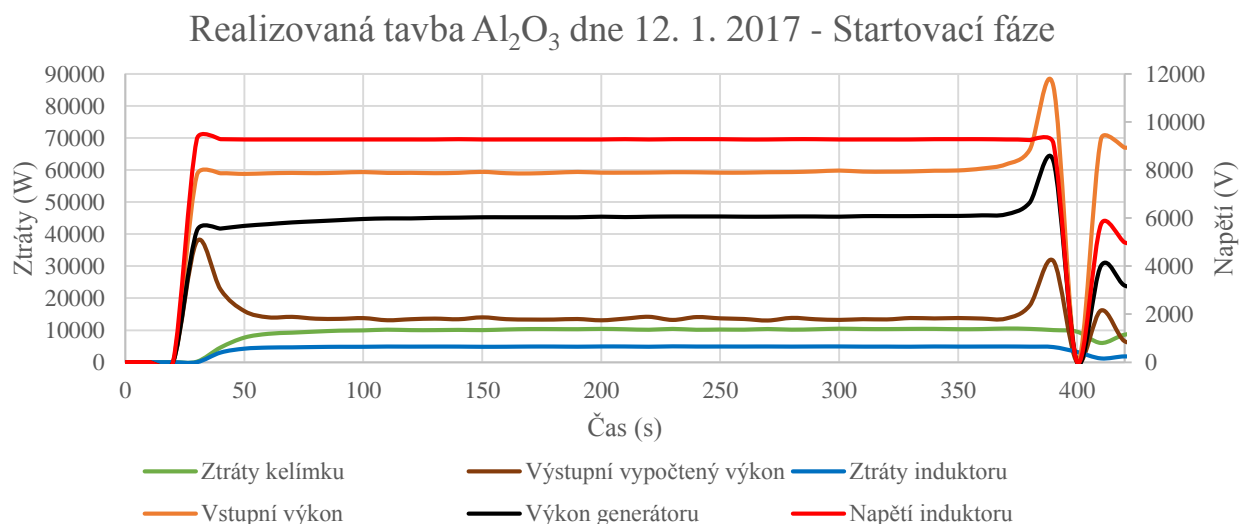
5.1.2 Analýza páte realizované tavby

Graf 3 reprezentuje průběhy hodnot povedené tavby Al_2O_3 . V tomto případě proběhla exotermická reakce dle plánu a tavba materiálu byla zahájena. Při formovací fázi byly všechny parametry udržovány na správných hodnotách a vsázka byla dosypávána tak, aby nenarušila průběh tavby. Po přisypání požadovaného množství vsázky, které se úspěšně spojilo s taveninou, byla po určitou dobu udržována stabilní fáze tavby, kdy se hodnoty parametrů ustálily.



Graf 3: Průběh tavby Al_2O_3 .

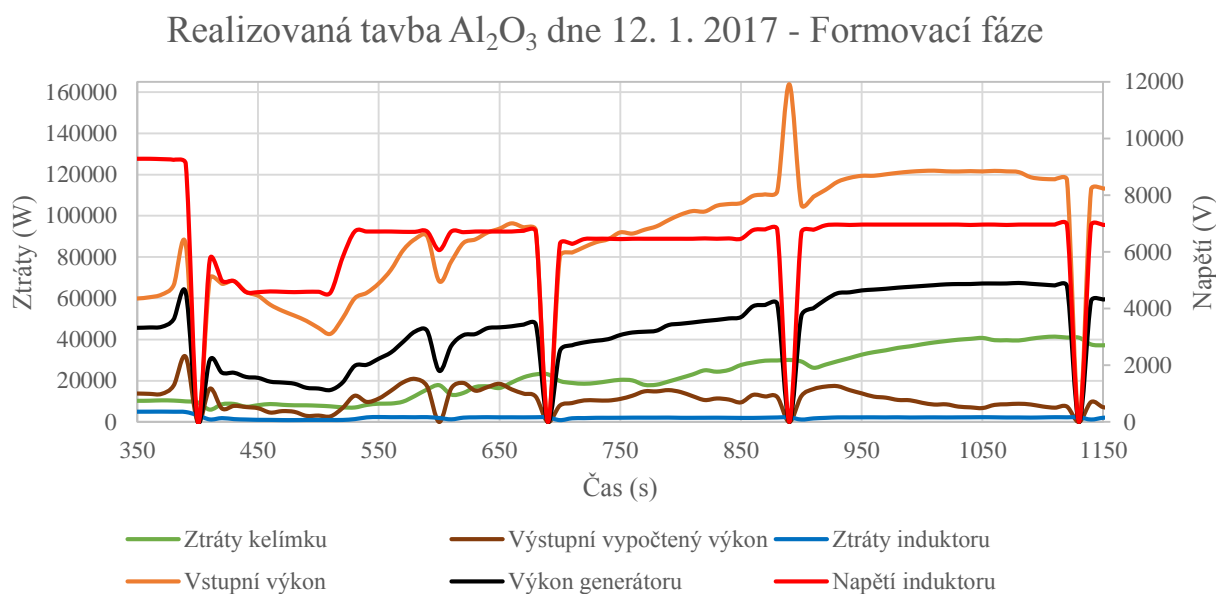
Graf 4 detailně znázorňuje průběh hodnot startovací fáze. Jak již bylo zmíněno výše, při této fázi jsou hodnoty napětí a výkonu nastaveny na maximální hodnotu vůči tavené vsázce. Ztráty jsou v tuto dobu tvořeny pouze induktorem a kelímkem, protože vsázka je prozatím nevodivá a jako startovací materiál jsou použity malé kousky hliníku, které jsou nemagnetické. Díky těmto faktorům se kelímek jeví jako by byl prázdný a neobsahoval žádnou vsázku. V této fázi se tedy jedná pouze o ohmické ztráty, vzniklé přímým průchodem naindukovaných vířivých proudů trubicemi studeného kelímku.



Graf 4: Detail startovací fáze.

V konečné části grafu dochází k roztavení vsázky za pomoci exotermické reakce. Ve chvíli, kdy se v kelímku objeví větší množství taveniny Al_2O_3 , která je již vodivá, dojde ke značnému nárůstu výkonu dodávaného zdrojem. Nárůst výkonu zdroje je způsoben pouze změnou charakteru vsázky, která se mění z elektricky nevodivého materiálu na elektricky vodivý. V tento moment je nutno na tuto změnu zareagovat a snížit napětí, čímž se automaticky sníží i dodávaný výkon zařízením. Pokud by nedošlo ke snížení napětí, výkon zdroje by se zvýšil na takovou úroveň, až by byly nuceny zareagovat ochrany a zdroj by byl automaticky odpojen. V důsledku nadměrného zvýšení výkonu zdroje, by dále mohlo dojít k přehřátí tavené vsázky a ta by mohla dosáhnout až bodu varu. Takto vysoké teploty by nebylo ovšem možné uchládit a mohlo by dojít k roztavení samotného kelímku.

Formovací fáze je složitější část ze všech tří fází, které probíhají během tavby. V této fázi dochází k roztavení celé vložené vsázky, proces je velice obtížný na udržení potřebných parametrů tak, aby nebyly ztraceny podmínky pro tavbu. Z grafu 5 je viditelné, jak v kelímku narůstalo množství roztavené vsázky, tedy se postupně zvyšovalo množství vodivého materiálu v kelímku. Čím více vodivého materiálu se vytvoří v kelímku, tím vyšší výkon nám dodává generátor. Aby nedošlo k nárazovému nárůstu výkonu, díky čemuž by nastaly následky, které byly popsány u startovací fáze, musí dojít k regulaci napětí jeho snížením, což zároveň sníží i výkon dodávaný generátorem a tavba může nadále pokračovat. Propady napětí a výkonů v grafu na nulovou hodnotu jsou právě důsledkem této regulace, kdy obsluha zareagovala na nárůst výkonu a snížila regulační napětí, aby daný nárůst výkonu vykompenzovala.

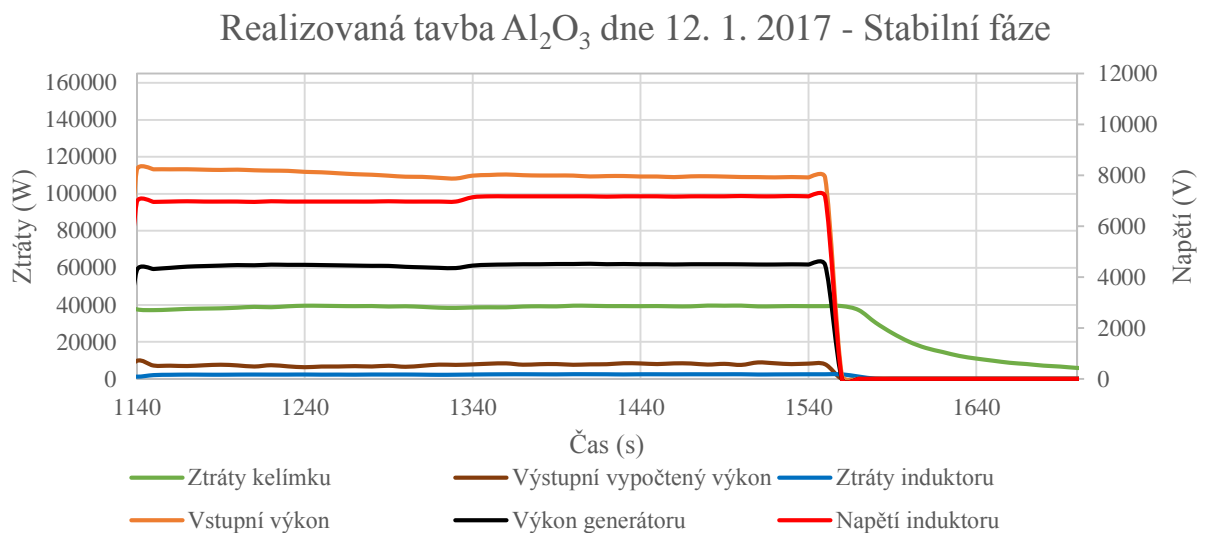


Graf 5: Detail formovací fáze.

Přeměnou vsázky z pevného skupenství na kapalné klesá její hladina v kelímku. Daný pokles hladiny je nutno kompenzovat pomocí přisypávání pevného skupenství materiálu do roztavené vsázky. Technologie procesu přisypávání je založena na principu trubky, která je zavedena do komory a nastavena tak, aby končila co nejbližší u povrchu taveniny. Tím je docíleno minimálních ztrát materiálu, který je ve formě prášku přisypáván do taveniny. Množství přisypávaného materiálu musí být kontrolováno, větší množství materiálu způsobí ztrátu tavicích podmínek a může dojít k přerušení tavby. Jedno z těchto přisypávání mělo dle naměřených hodnot za následek nárazový nárůst vstupního výkonu, ovšem díky rychlé reakci obsluhy a okamžitému snížení napětí, byl nárůst včas zastaven a hodnoty vstupního výkonu se vrátily do požadovaných hodnot.

Křivka ztrát kelímku ukazuje, jak s přibývajícím roztavenou vsázkou, tedy s přibývajícím vodivým materiálem v kelímku, vzrůstají jeho celkové ztráty. Ztráty jsou na počátku tvořeny pouze segmenty kelímku z důvodů, které byly již zmíněny v popisu startovací fáze. V průběhu tavby se začínají více projevovat ztráty roztavené vodivé vsázky.

Graf 6 znázorňuje detail stabilní fáze, která je finální částí celé tavby. Z průběhu křivek grafu je zřejmé, že veškeré parametry se ustálily na konstantních hodnotách. Většina pevné vsázky je tedy přeměněna na kapalnou. Nedochází k dalšímu přisypávání, hladina byla již dorovnána na původní hodnotu a pevnou vsázkou v kelímku tvoří pouze skull vrstva. Stabilní fáze je udržována po určitou dobu, aby došlo k důkladnému promíchání taveniny.



Graf 6: Detail stabilní fáze

Po uplynutí dané doby je napětí sníženo na nulu a generátor je odpojen od napájení. V tento moment veškeré hodnoty klesnou na nulu kromě ztrát kelímku. Kelínek musí být dále chlazen, protože dochází k postupnému chladnutí roztavené vsázky uvnitř kelímku. Chladnutím tavené vsázky je tvořen finální ingot, který je z kelímku následně vyjmut.

Poslední tavba dne 12. 1. 2017 proběhla na pátý pokus úspěšně, tedy na konci tavby byl z kelímku vyjmut hotový korundový ingot. Ingot byl následně rozpůlen, díky čemuž je možno prohlédnout si jeho vnitřní krystalickou stavbu. Z obr. 22 je patrné, že krystaly, tvořící vnitřní strukturu ingotu, jsou orientovány směrem k nejteplejší oblasti chladnoucí vsázky. Dále je na obrázku také velmi dobře viditelná skull vrstva, která je dle předpokladu nejširší u dna kelímku a slábne směrem k vrchnímu povrchu vsázky.



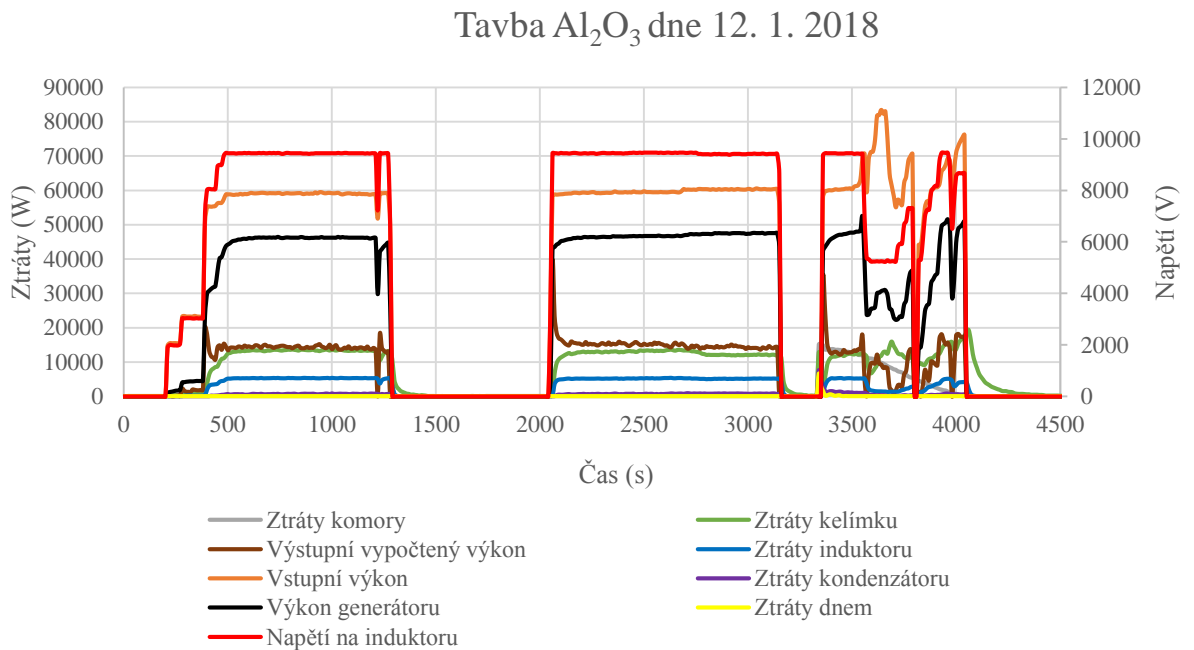
Obr. 22: Finální korundový ingot rozdělený na dvě poloviny.

5.2 Tavba Al_2O_3 provedená dne 12. 1. 2018

Tavba byla založena na stejném principu jako předchozí. Opět byl taven oxid hlinitý (Al_2O_3) a jako startovací materiál byl použit čistý hliník, nastartování tedy proběhlo pomocí exotermické reakce.

5.2.1 Analýza všech uskutečněných taveb

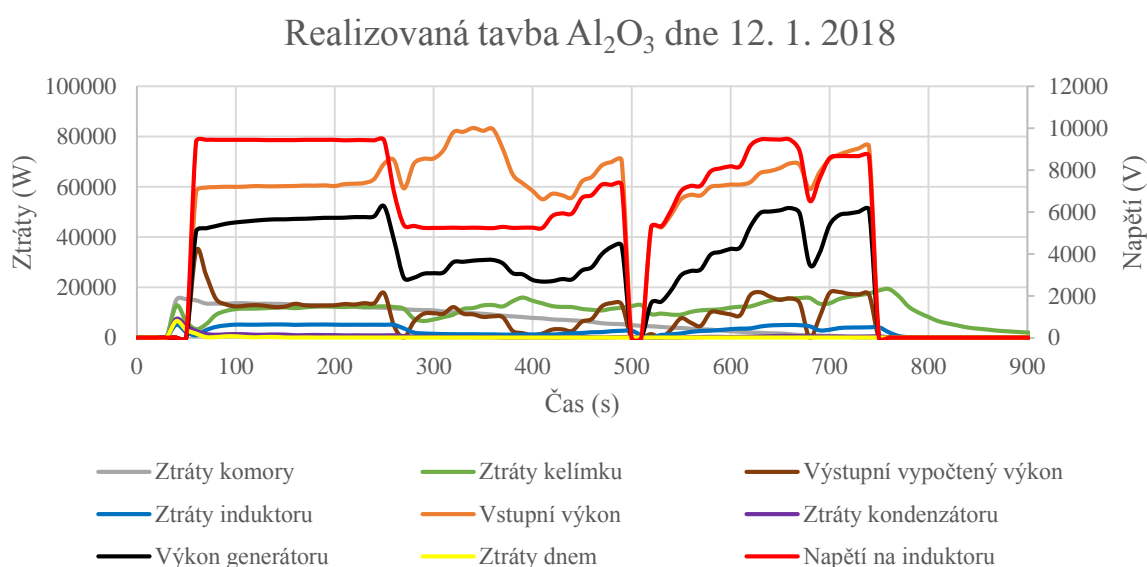
Dne 12. 1. 2018 byly provedeny tři pokusy o tavbu Al_2O_3 . První pokus překonal startovací fázi, kdy správným způsobem proběhla exotermická reakce. Bohužel hned v počáteční formovací fázi se nepodařilo udržet hodnoty v takovém rozmezí, aby tavba mohla nadále pokračovat. Při startovací fázi u druhého pokusu řádně neproběhla exotermická reakce, pomocí které se tavba nastartuje. Díky čemuž byla tavba ukončena. Jejich průběhy jsou znázorněny v grafu 7. Z těchto průběhů je zřejmé, že se tavba nevydařila ze stejných důvodů, jako u nevydařených taveb při předchozím tavení. Třetí tavba, u které proběhla exotermická reakce dle předpokladů, bude podrobněji analyzována níže.



Graf 7: Tavba Al_2O_3 dne 12. 1. 2018.

5.2.2 Analýza třetí realizované tavby

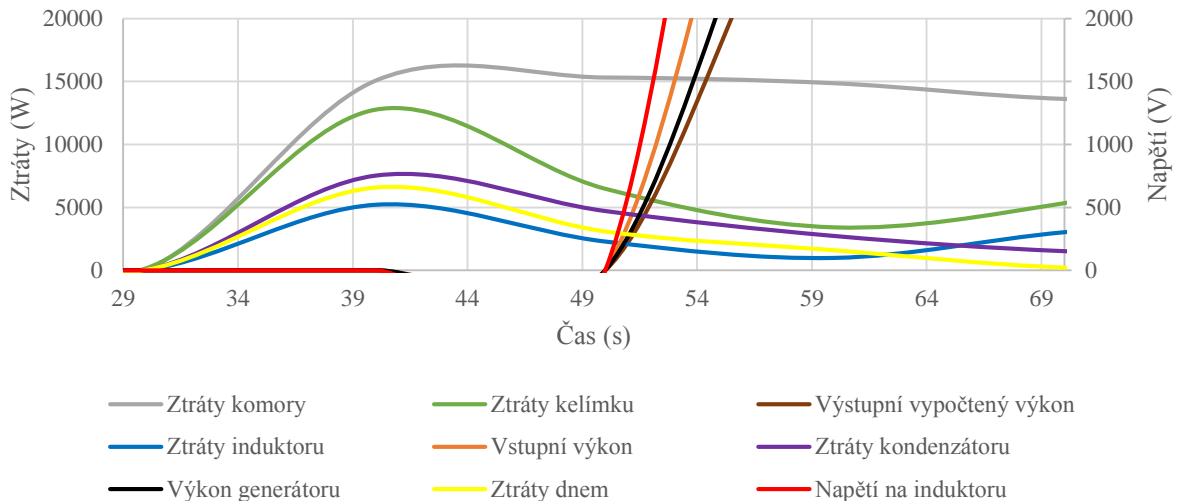
Graf 8 znázorňuje průběh třetí realizované tavby. Z průběhů hodnot je patrné, že tavbu se podařilo nastartovat a dostala se do formovací fáze, tedy průběh tavby byl obdobný jako u předchozího tavení. Při formovací fázi zde došlo k pěti přísypáním vsázky a následně k úpravě pozice induktor kelímek, kdy byl kelímek pomocí mechanismu vyzvednut výše vůči induktoru. Následně došlo opět k přísypání vsázky. V tento moment se na povrchu utvořila krusta pevné vsázky. Ta byla úspěšně odstraněna, ale při následném přísypání vsázky došlo ke značnému víření taveniny, která následně vytryskla ven z kelímku a tavba musela být předčasně ukončena.



Graf 8: Třetí realizovaná tavba dne 12. 1. 2018.

Těsně před třetí tavbou je v grafu 8 viditelný nárůst ztrát parametrů, které za normálních okolností jsou velmi malé a téměř zanedbatelné. Tento nárůst je pro přehlednost přiblížen v grafu 9. Kde je jasně viditelné, že tyto ztráty nijak neovlivnila změna napětí. Tedy vznikly samostatně ještě před začátkem samotné tavby. Pro tuto anomálii existuje jasné vysvětlení. Nárůst těchto ztrát je způsoben přepínáním chladicích tanků. V laboratoři se nacházejí tři tanky naplněné chladicí vodou, která slouží k odvodu tepla z určených komponentů daného zařízení. Chladicí kapalina nesmí přesáhnout určitou teplotu, aby správně plnila svojí funkci. Tedy pokud se chlazením zvýší teplota a přiblíží se k limitní hodnotě, dojde k přepnutí na další tank. Při tomto procesu dojde k nárazovému zvýšení ztrát, které se následně opět ustálí na svých obvyklých hodnotách.

Realizovaná tavba Al_2O_3 dne 12. 1. 2018 - Anomálie před tavbou

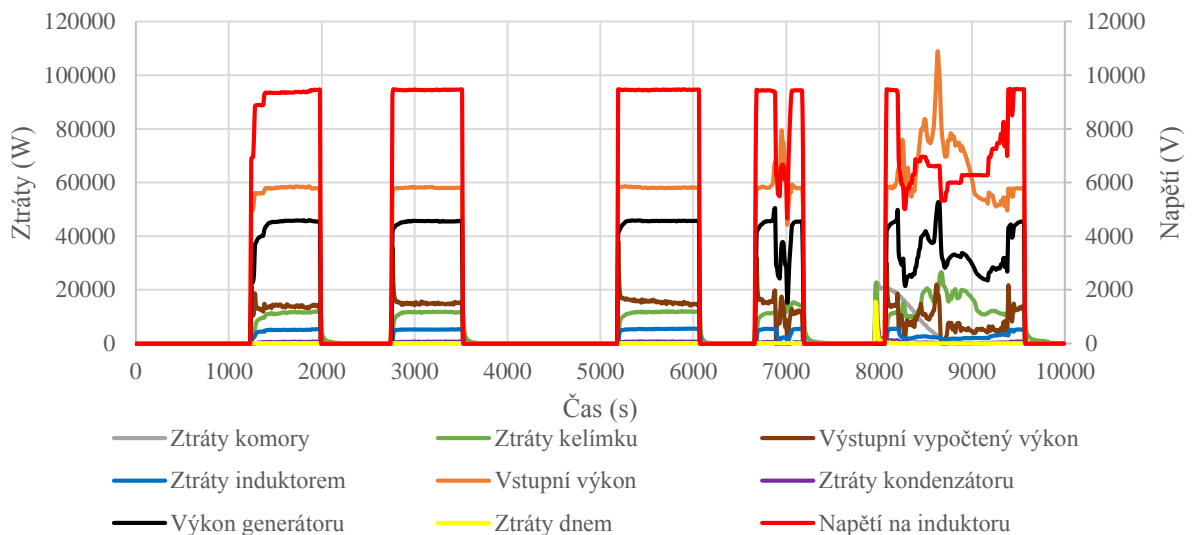


Graf 9: Anomálie před tavbou.

5.3 Tavba Al_2O_3 provedená dne 25. 1. 2018

Graf 10 znázorňuje průběh všech pěti taveb, které byly uskutečněny. Bohužel v tento den, jak je z grafu viditelné, se nepodařilo úspěšně dokončit ani jednu z nich. První tři tavby mají shodný průběh s předchozími, kdy se tavbu nepodařilo řádně nastartovat, protože nebylo dosaženo správného průběhu exotermické reakce. Byly tedy ukončeny ze stejných důvodů jako u předchozích taveb. Následující dvě tavby se dostaly přes prvotní fázi, exotermická reakce proběhla úspěšně a tavba byla nastartována. U první z těchto taveb došlo v počátcích formovací fáze k přisypání velkého množství vsázky, čímž tavenina ztratila svou teplotu a podmínky pro tavbu byly ztraceny.

Tavba Al_2O_3 dne 25. 1. 2018

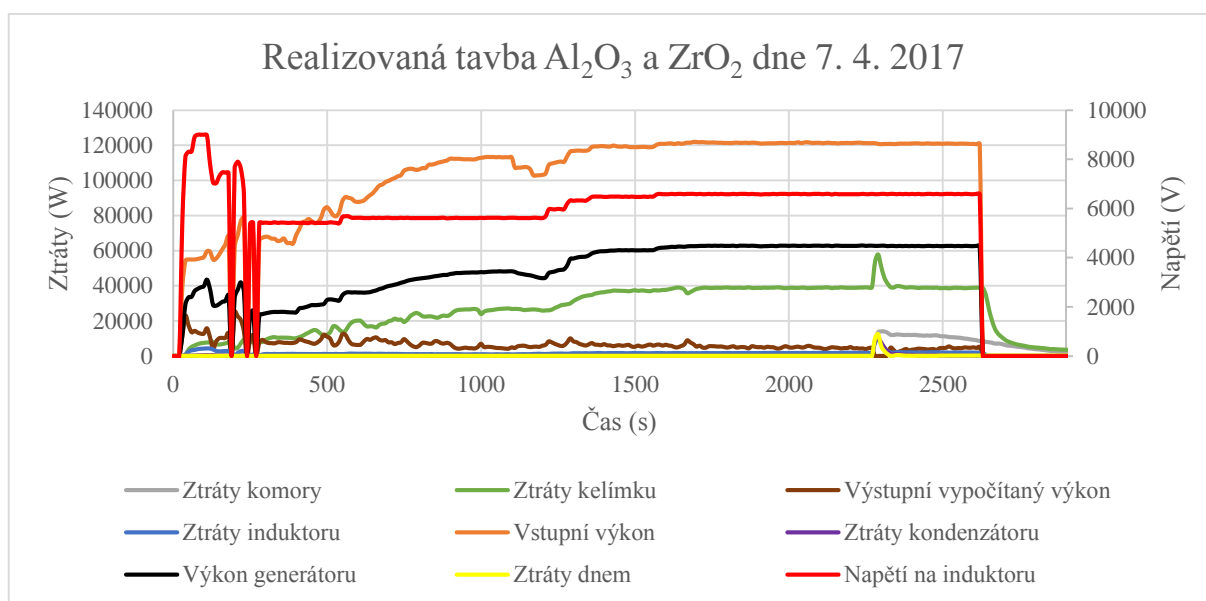


Graf 10: Tavba Al_2O_3 dne 25. 1. 2018.

Před poslední tavbou muselo opět dojít k přepnutí tanků ze stejného důvodu jako u předchozí tavby a je zde opět vidět anomálie určitých parametrů, které se následně ustálily. Formovací fáze poslední tavby probíhala slibněji než při předešlém pokusu. Bohužel při jednom z posledních přisypávání vsázky do kelímku, bylo opět přisypáno příliš velké množství vsázky a tavenina opět ztratila svou teplotu. Tavbu se ani navýšením napětí nepodařilo udržet a musela být ukončena.

5.4 Tavba směsi Al_2O_3 a ZrO_2 dne 7. 4. 2017

Tavba směsi Al_2O_3 a ZrO_2 proběhla úspěšně na první pokus, což je viditelné na grafu 11. Tavbu se podařilo řádně nastartovat, jako startovací materiál byl zde použit čistý hliník, opět tedy nastartování tavby proběhlo pomocí exotermické reakce. Při formovací fázi docházelo k přisypávání vsázky do taveniny stejným způsobem jako u všech předchozích taveb, vždy bylo přisypáno správné množství, takže tavba probíhala podle plánu. Při této tavbě docházelo k posunu kelímku vůči induktoru při průběhu tavby, tento proces dopomohl k jejímu správnému průběhu. Při formovací fázi došlo k roztavení celé vložené vsázky. V momentě, který je z grafu viditelný, kdy se všechny hodnoty ustálily na konstantních hodnotách, přešla tavba do stabilní fáze. Stabilní fáze byla udržována takovou dobu, aby došlo k dokonalému promíchání taveniny. Nakonec byl regulovaný výkon stažen na nulu a generátor byl vypnut. Poté následovalo chladnutí taveniny uvnitř kelímku, který byl stále chlazen. Po vychladnutí vsázky v kelímku mohl být vyjmut hotový ingot.



Graf 11: Realizovaná tavba Al_2O_3 a ZrO_2 dne 7. 4. 2017.

Před koncem stabilní fáze je v grafu opět vidět již zmíněná anomálie, která odpovídá přechozím tavnám. Jedná se tedy o ohřátí chladicí kapaliny na takovou teplotu, kdy muselo dojít z bezpečnostních důvodů k přepnutí tanků s chladicí kapalinou. V tomto případě k tomu došlo v průběhu tavby, ale jak je z grafu zřejmé, samotnou tavbu tento proces žádným způsobem neovlivnil. Z toho tedy vyplývá, že tanky s chladicí kapalinou je možné mezi sebou přepínat i v průběhu tavby a tento proces by neměl ovlivnit průběh probíhající tavby.

6 Hodnocení tavení ve studeném kelímku kritériem 3E

Hodnocení kritériem 3E spočívá v řešení celého technologického procesu tavby, počínaje návrhem zařízení pro tavbu ve studeném kelímku až po finální výsledek tavby. Jde tedy o energetické, ekonomické a ekologické zhodnocení všech aspektů, které se týkají tavby vodivých i nevodivých materiálů ve studeném kelímku pomocí elektromagnetické indukce.

6.1 Hodnocení z energetického hlediska

Účinnost kelímku dosahuje při tavení vodivých a nevodivých materiálů výrazně rozdílných hodnot. V případě tavení nevodivých materiálů ve studeném kelímku pomocí elektromagnetické indukce se hodnoty účinnosti blíží až k hranici 90 % na induktoru. Naopak při tavení vodivých materiálů ve studeném kelímku pomocí elektromagnetické indukce hodnoty účinnosti nepřesáhnou hranici 20 %, a to je již nadsazená hodnota, protože v realitě se tato účinnost pohybuje okolo 10 %. Základem tohoto výrazného rozdílu účinností tavení vodivého a nevodivého materiálu jsou parametry skul vrstvy, která se vytváří na okraji tavené vsázky ve studeném kelímku [17], [24].

Při tavení vodivého materiálu je vzniklá skul vrstva elektricky vodivá, díky čemuž je z hlediska elektromagnetického vlnění brána jako stínění a tím zabraňuje dobrému ohřevu tavené vsázky a účinnost klesá k velmi nízkým hodnotám. Dalším faktorem je její dobrá tepelná vodivost, která způsobuje značné tepelné ztráty z tavené vsázky do stěn kelímku. Při tavení materiálů, které jsou za normálních okolností elektricky téměř nevodivé, přebírá vzniklá skul vrstva tyto jejich vlastnosti a tím se sama stává elektricky nevodivou. Tyto vlastnosti způsobují, že elektromagnetické vlnění jí projde téměř beze ztrát a zároveň působí jako teplený izolant. Za těchto okolností dosahuje tavení ve studeném kelímku téměř 90 % účinnosti na induktoru. Ovšem u tavení elektricky nevodivých materiálů se musí na začátku řešit startovací fáze, kde se musí za pomoci různých postupů předat přirozeně nevodivému materiálu dostatečná energie ve formě tepla, aby se jeho teplota zvýšila na takovou úroveň, kdy se stává sám elektricky vodivým. Přes tuto složitou startovací fázi se studený kelímek používá zejména pro tavbu elektricky nevodivých materiálů. Pro tavbu elektricky vodivých materiálů se využívá jen u případů, kdy je zapotřebí dosáhnout vysoce kvalitních parametrů výsledného materiálu obvykle s vysokou teplotou tavení [17], [24].

Dalším faktorem jsou použité generátory střídavého proudu. Dnes se přechází na generátory tranzistorové, které dosahují účinnosti přes 90 %. Ovšem přinášejí s sebou i omezené možnosti při volbě frekvence a maximálního přenášeného výkonu, kde jsou jejich hodnoty limitovány. Dříve používané elektronkové generátory nedosahují takové účinnosti jako novější tranzistorové generátory, ale naopak mají daleko větší rozsah hodnot nastavované frekvence a přenášeného výkonu. Díky těmto vlastnostem jsou ještě dnes využívány u určitých druhů studených kelímků. Součástky tranzistorového generátoru jsou polovodičového typu, čímž svojí funkcí způsobují vyšší harmonické, které mají negativní vliv na samotnou napájecí síť. Proto je důležité, aby tyto generátory byly kompenzovány a vlivy na síť se co nejvíce omezily. Elektronkové generátory jsou sestaveny z takových komponentů, které mají oproti tranzistorovým generátorům minimální vliv na napájecí síť [17], [24].

6.2 Hodnocení z ekologického hlediska

Základní ekologickou výhodou studeného kelímku je, že při procesu tavení nevznikají spaliny, neboť celý systém je napájen pouze elektrickou energií. Tedy v tomto směru jsou zde stejné podmínky jako při tavení v klasických indukčních pecích. Studený kelímek ovšem vyniká možností tavení velkého spektra druhů materiálů. V tomto směru je prozatím nedostižný, protože umožňuje tavbu i velmi obtížně tavitelných materiálů, a to díky jeho principu, který umožňuje dosahovat velmi vysokých teplot tavené vsázky, kdy se i elektricky nevodivé materiály stávají vodivými. Tato vlastnost umožňuje dosahovat velmi vysoké čistoty výsledného vodivého i nevodivého materiálu. Jednou z dalších výhod je malá hlučnost celého probíhajícího procesu, tedy obsluha se při tavbě pohybuje v klidném prostředí a není ovlivňována výraznými rušivými vlivy. Tato skutečnost přispívá k snadnější obsluze samotné tavby. I s těmito dobrými vlastnostmi je obsluha zařízení nelehká. Při tavbě je nutno kontrolovat a udržovat mnoho parametrů tak, aby tavba proběhla bezpečně podle plánovaného harmonogramu. Pokud dané parametry vybočí z požadovaných hodnot, může dojít ke ztrátě tavicích podmínek a tavba se přeruší nebo v horším případě může dojít k prudké reakci taveniny, která může poškodit celé zařízení [17], [24].

Díky principu průběhu tavby materiálů ve studeném kelímku jsou všechny jeho komponenty chráněny proti opotřebení. Na rozdíl od ostatních tavicích pecí, kde dochází ke značnému opotřebením určitých komponentů, které musejí být posléze nahrazeny novými. Po uskutečněné tavbě elektricky vodivého materiálu ve studeném kelímku zůstává na stěně

kelímku zbytková vrstva taveného materiálu. Pokud je kelímek určen pro opětovnou tavbu stejného materiálu, nemusí se tato vrstva ze stěn kelímku odstraňovat, protože se při dalším tavení opětovně smísí s novou vloženou vsázkou. V případě, že se v kelímku taví více druhů materiálu, musí být stěny kelímku důkladně očištěny tak, aby při další tavně nedošlo ke znečištění daného materiálu tím předchozím. Zbytkové kusy materiálu, které jsou odstraněny ze stěn kelímku, mohou být dále použity jako vsázka. Na konci tavby elektricky nevodivého materiálu se ze studeného kelímku vyjme finální ingot, po kterém na stěnách kelímku zůstane pouze minimální množství materiálu, to není nutno před další tavnou odstraňovat. Závěrem, lze konstatovat, že množství odpadu vzniklého po tavně ve studeném kelímku je zanedbatelné [17], [24].

Z ekologického hlediska dle posuzovaných vlastností celého zařízení pro tavení materiálů ve studeném kelímku, se tento způsob tavby elektricky vodivých a nevodivých materiálů jeví jako jedna z nejlepších cest pro minimalizaci negativního dopadu taveb materiálů na životní prostředí.

6.3 Hodnocení z ekonomického hlediska

Studený kelímek je velmi specifické zařízení obsahující komponenty, které musí být velmi důkladně a přesně navrženy a následně stejným způsobem vyrobeny, díky čemuž jsou náklady na jeho konstrukci vysoké. Tranzistorový generátor je dražší nežli elektronkový, ale u elektronkového jsou vyšší náklady na jeho údržbu a má nižší účinnost. Segmentový kelímek má nejčastěji své segmenty trubkového tvaru, protože výroba jiných tvarů je velmi náročná. Pokud jsou ve studeném kelímku taveny vysoce reaktivní materiály, musí být v tavicí komoře docílena inertní atmosféry, tedy musí být zajištěna dokonalá izolace komory a nainstalovány tlakové kompresory. U tavení nevodivých materiálů k dalším nákladům přispívá startovací fáze, která musí být uskutečněna na počátku tavby, aby se nevodivé materiály dostaly do takové fáze, kdy se již mohou ve studeném kelímku tavit elektromagnetickou indukci samovolně [17], [24].

Náročnost jak technická, tak finanční je na výrobu studeného kelímku vysoká, ale po jeho dokončení dochází u jeho komponentů k minimálnímu opotřebení v důsledku samotné tavby. V tomto případě kelímek předčí ostatní tavicí pece, jelikož návratnost financí vložených do jeho výroby je rychlejší než u ostatních. Ke snížení nákladů na startovací fázi

se využívají vhodné softwarové programy, pomocí kterých je předběžně nasimulováno působení elektromagnetické indukce na startovací materiál. Tyto simulace, pokud jsou správně provedeny, umožní vložení správného množství startovacího materiálu do vsázky, přičemž startovací fáze proběhne na první pokus tak, jak bylo plánováno. Dodržování správného technologického postupu ovlivňuje také životnost zařízení [17], [24].

7 Závěr

Cílem diplomové práce byla analýza tavení oxidů ve studeném kelímku. Analyzoval jsem tavby, které byly uskutečněny přímo na zařízení, které vlastní Elektrotechnická fakulta v Plzni a také jsem řešil problematiku startovací fáze, která je nejsložitější fází celého procesu tavby.

První dvě kapitoly jsou zaměřeny na teoretický popis principu tavení ve studeném kelímku. V první kapitole je popsán princip tavení elektricky vodivých a elektricky nevodivých materiálů ve studeném kelímku. Základním rozdílem při tavení těchto dvou odlišných druhů materiálů je účinnost, která je při jejich tavně dosažena. U elektricky vodivých materiálů se tato hodnota účinnosti tavení reálně pohybuje okolo 10 %, naopak u elektricky nevodivých materiálů přesahují hodnoty účinnosti tavení hranici 90 % na induktoru. Tento výrazní rozdíl je založen na rozdílné struktuře vzniklé skvrny vrstvy, která vzniká na okraji tavené vsázky a tvoří bariéru mezi roztavenou vsázkou a stěnami studeného kelímku.

Nejtěžší fází při tavně elektricky nevodivých materiálů je startovací fáze, která je teoreticky popsána ve druhé kapitole práce. Elektricky nevodivý materiál sám o sobě žádným způsobem nereaguje na elektromagnetickou indukci, která je hlavním strůjcem tavení ve studeném kelímku. Tedy, aby tento materiál bylo možné samostatně tavit, musí u něj být dosaženo požadovaných parametrických změn. Těchto změn je dosaženo za předpokladu, že se jeho teplota zvýší na takovou úroveň, kdy dojde ke změně jeho struktury a parametry se změní na takové hodnoty, že se materiál stává elektricky vodivým a dále se může elektromagnetickou indukcí tavit samostatně.

Třetí kapitola je založena na spolupráci s Doc. Ing. Igorem Poznyakem, Csc. z Petrohradu. Doc. Poznyak nám poskytl mnoho velmi přínosných konzultací. Na jejichž základě jsem vytvořil zjednodušený model pro výpočet tavení ve studeném kelímku pro tavení oxidu zirkoničitého (ZrO_2). Doc. Poznyakem nám byly dodány parametry reálného kelímku a vsázky, ze kterých vycházel výsledný výpočet. Tento model spočívá ve výpočtu optimálního množství startovacího materiálu potřebného pro předání energie ve formě tepla elektricky nevodivé vsázce tak, aby nastartování tavby proběhlo úspěšně. Jako startovací materiál jsem použil čisté zirkonium (Zr), tedy nastartování tavby proběhne pomocí exotermické reakce, která je ve výpočtu zahrnuta. Následující výpočet se zabývá formovací fází, kdy dochází k postupnému roztavení celé vsázky. Výpočet kontroluje, jestli zvolené parametry vyhovují pro úspěšné

roztavení celé vložené vsázky. Posledním výpočtem v modelu je elektrický výpočet studeného kelímku, při tomto výpočtu bylo počítáno s induktorem a vsázkou, vliv kelímku byl zanedbán. Výsledná účinnost tavby ve studeném kelímku vyšla 88 %, což odpovídá reálným předpokladům.

Ve čtvrté kapitole jsem se zabýval zkoumáním vlivu elektromagnetické indukce na rozdílné uložení startovacího materiálu při startovací fázi. Hlavním úkolem zde bylo porovnat ztráty vzniklé ve startovacím materiálu při jeho různém uložení ve vsázce, k těmto simulacím jsem použil program ANSYS® Electromagnetics Suite 19.0. Porovnával jsem čtyři možné způsoby uložení materiálu, a to uložení v rovinné ploše, uložení v podobě koule a následně uložení v podobě spodní a horní polokoule. Všechna tato uložení byla vytvořena ze 7,8 g startovacího materiálu. Startovacím materiálem byl hliník (Al), který byl rozdělen na 30 kusů, které byly vytvořeny ve formě šestiúhelníků. Výsledky prokázaly, že největší ohmické ztráty ve startovacím materiálu vznikají při jeho uložení v rovinné ploše, tedy toto uložení by mělo být pro praxi nejvýhodnější. Ovšem z poskytnutých informací od Ing. Davida Rota, Ph.D. z reálných taveb, bylo vyzorováno, že startovací fáze proběhla úspěšně při uložení startovacího materiálu ve formě spodní polokoule. Tento fakt může být způsoben interakcí kusů startovacího materiálu mezi sebou při průběhu jejich roztavování. Kdy tato interakce je větší u kulovitých uskupení, než u rovinného uspořádání. Z těchto výsledků vyplývá, že je zde rozdíl mezi teoretickým zpracováním a reálnou aplikací. Tato problematika bude tedy podrobena dalšímu výzkumu.

V páté kapitole jsem se zabýval analýzou všech uskutečněných taveb oxidů kovů, které byly provedeny pracovníky Katedry Elektroenergetiky a ekologie. Při analýze taveb byla velmi výrazně znatelná problematika startovací a formovací fáze celého průběhu tavby. Většina pokusů o tavbu ztroskotala hned u startovací fáze, kdy neproběhla správným způsobem exotermická reakce a nedošlo k ohřátí elektricky nevodivé vsázky na takovou teplotu, aby se stala elektricky vodivou. Další problém nastal při formovací fázi, kdy je nutno udržovat parametry na požadovaných hodnotách a zároveň provádět správné přisypávání vsázky do kelímku, aby byla udržena požadovaná výška hladiny taveniny. Ze všech analyzovaných pokusů se zdárně povedlo dokončit dvě tavby, u kterých proběhla správným způsobem exotermická reakce, při formovací fázi byly hodnoty udrženy v požadovaných mezích a přisypání materiálu se obešlo bez problémů. Zároveň byla při těchto tavbách upravována poloha kelímku vůči induktoru tak, aby došlo ke správnému prohřátí celé vsázky. Z analýzy

vyplývá, že upravování polohy kelímku vůči induktoru, může být správnou cestou k úspěšnému provedení tavby. Sám jsem se mohl osobně účastnit jedné z taveb, kdy jsem poznal obtížnost celého procesu. Měl jsem možnost vidět přípravu komory pro tavbu, kdy se vkládá do studeného kelímku vsázka spolu se startovacím materiálem a následný průběh tavby. Obsluha musí být schopna, dle měřených hodnot, ale i vizuální kontroly tavení v kelímku, reagovat na dané změny tak, aby udržela proces tavby vchodu a ta proběhla úspěšně až dokonce. Z analýz a mé osobní zkušenosti vyplývá, že tavba oxidů kovů ve studeném kelímku je velmi obtížný proces. Aby bylo dosaženo co nejlepšího průběhu tavby, kdy tavba proběhne bez významných problémů, musí být všechny její aspekty ještě důkladně prozkoumány a pochopeny.

Poslední kapitolou bylo zhodnocení procesu tavby pomocí elektromagnetické indukce ve studeném kelímku kritériem 3E. Toto kritérium spočívá ve vyhodnocení studeného kelímku z energetického, ekologického a ekonomického hlediska. Po prozkoumání veškerých možností studeného kelímku a jejich porovnání s ostatními tavicími pecemi jsem došel k závěru, že studený kelímek je velmi významnou částí celého spektra tavicích zařízení a otevírá nové možnosti v tavbě jinak netavitelných materiálů a zároveň je šetrný k životnímu prostředí.

8 Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] **Rot, David, a další.** *Induction Melting of Aluminium Oxide in the Cold Crucible*. Pilsen : Department of Electrical Power Engineering and Environmental Engineering, 2017. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7967281/>.
- [2] **Roach, J. A., a další.** *Advanced Modeling of Cold Crucible Induction Melting for Process Control and Optimization*. Phoenix : Idaho National Laboratory, 2008. Dostupné z: <https://inldigitallibrary.inl.gov/sites/sti/sti/3901036.pdf>.
- [3] **Takaki, Seiichi a Abiko, Kenji.** *Ultra-Purification of Electrolytic Iron by Cold-Crucible Induction Melting*. Tohoku University : Institute for Materials Research, 2000. Dostupné z: <https://www.jim.or.jp/journal/e/pdf3/41/01/2.pdf>.
- [4] **Takaki, Seiichi a Abiko, Kenji.** *Purification of Cobalt, Nickel, and Titanium by Cold-Crucible*. Tohoku University : Institute for Materials Research, 2006. Dostupné z: <https://www.jim.or.jp/journal/e/pdf3/47/01/156.pdf>.
- [5] **FUKUI, Hisao, a další.** *Cold Crucible Levitation Melting of Biomedical Ti-30wt% Ta Alloy*. Chikusa-ku : Science Frontier Research Center, 2001. Dostupné z: https://www.jstage.jst.go.jp/article/dmj1982/20/2/20_2_156/_pdf.
- [6] **Tadano, Hideaki, Fujita, Michiru a Take, Tatsuo.** *Levitational Melting of Several Kilograms of Metal with a Cold Crucible*. Ichihara : Fuji Electric Corporate Research and Development Ltd., 1994. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=334207>.
- [7] **Nacke, B., a další.** *Induction Skull Melting of Oxides and Glasses in Co*. Riga : International Scientific Colloquium, 2006. Dostupné z: <http://www.modlab.lv/publications/mmp2006/pdfs/209-214.pdf>.
- [8] **Osiko, Vyacheslav V., Borik, Mikhail A. a Lomonova, Elena E.** *Synthesis of Refractory Materials by Skull Melting Technique*. místo neznámé : Russian Academy of Science, 2010. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/E_Lomonova/publication/226166782_Synthesis_of_Refractory_Materials_by_Skull_Melting_Technique/links/0f317530b0197230cb000000.pdf.
- [9] **The Quartz Corp.** *Why the Czochralski Process needs Spruce Pine*. místo neznámé : The Quartz Corp, 2013. Dostupné z: <http://www.thequartzcorp.com/en/blog/2013/08/16/why-the-czochralski-process-needs-spruce-pine/1>.
- [10] **Lorenc, M., Šik, J. a Válek, L.** *TECHNOLOGIE RUSTU MONOKRYTALU KŘEMÍKU CZOCHRALSKIHO METODOU*. Rožnov pod Radhoštěm : ON SEMICONDUCTOR CZECH REPUBLIC, 2004. Dostupné z: http://silicon.euweb.cz/LORENC_CZSi.pdf.
- [11] **Hrbek, Jan.** *Introduction to Melting in Induction Furnace with Cold Crucible*. Pilsen : Department of Electrical Power Engineering and Ecology, 2016. Dostupné z: http://radio.feld.cvut.cz/conf/poster/poster2016/proceedings/Section_PE/PE_032_Hrbek.pdf.
- [12] **CHALCO.** [Online] Dostupné z: <http://cz.chalcochem.com/activated-alumina/activated-alumina-powder.html>.
- [13] **Torge, B.** *Prozessorientierte Analyse der induktiven Skull-Melting-Technologie bei Verwendung eines Transistorumrichters*. Göttingen : Cuvillier Verlag, 2007.
- [14] **Rot, D., a další.** *The influence of the position of the starting material during melting by the electromagnetic induction in a cold crucible*. Pilsen : Department of Electric power engineering and Ecology, 2014. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6839489>.

- [15] **Nacke, B., a další.** *SKULL MELTING TECHNOLOGY FOR OXIDES AND GLASSES*. Hannover : Institute for Electrothermal Processes. Dostupné z: <http://ipul.lv/pamir/cd/vol.II/riga-pamir-vol.II-241.pdf>.
- [16] **Chen, Ruirun, a další.** *Glass melting inside electromagnetic cold crucible using induction skull melting technology*. Harbin : School of Materials Science and Engineering, 2017. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431116326990>.
- [17] **Doc. Ing. Igor Poznyak, CSc.** *Konzultace výpočtu tavení ZrO₂ ve studeném kelímku*. Plzeň : ZČU, 2017/2018.
- [18] **Behrense, Ing. Torge.** *Prozessorientiert Analyse der induktiven Skull-Melting-Technologie bei Verwendung eines Transistorumrichters*. Göttingen : Cuvillier Verlag, 2007. 978-3-86727-405-0.
- [19] **NITS.** *NIST WebBook Chemie*. místo neznámé : U.S. Department of Commerce, 2017. Dostupné z: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?Name=zirconium+oxide&Units=SI>.
- [20] **Periodická tabulka.** [Zirkonium] 2012. Dostupné z: <http://www.prvky.com/40.html>.
- [21] **NITS.** *NIST WebBook Chemie*. místo neznámé : U.S. Department of Commerce, 2017. Dostupné z: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?Name=zirconium&Units=SI>.
- [22] **Petrov, Yu.B.** *The Induction melting of oxides*. Leningrad : L. Energoatomizdat, 1983. 104c. (in Russian).
- [23] **Hradílek, Zdeněk, Lázničková, Ilona a Král, Vladimír.** *Elektrotepelná technika*. Praha : České vysoké učení technické v Praze, 2011. 978-80-01-04938-9.
- [24] **Prof. Ing. Jiří Kožený, CSc.** *Konzultace diplomové práce*. Plzeň : ZČU, 2017/2018.