

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Experimentální zařízení pro tavení
nizkoteplotních kovů**

vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Karban, Ph.D.
konzultant práce: Ing. František Mach
autor: Kateřina Mizerová

2014

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Kateřina MIZEROVÁ**
Osobní číslo: **E11N0027P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Experimentální zařízení pro tavení nízkoteplotních kovů**
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

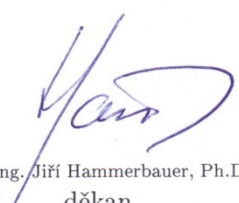
Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište současný stav zpracování tekutých kovů v elektrotechnice
2. Popište konstrukční prvky indukčních pecí
3. Navrhněte konkrétní konstrukční provedení pece
4. Provedte měření na experimentálním zařízení a srovnajte výsledky s numerickým modelem

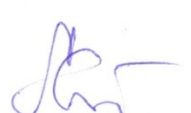
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

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

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Pavel Karban, Ph.D.**
Katedra teoretické elektrotechniky
Konzultant diplomové práce: **Ing. František Mach**
Regionální inovační centrum elektrotechniky
Datum zadání diplomové práce: **14. října 2013**
Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2014**


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




Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Abstrakt

Cílem předkládané diplomové práce je návrh experimentálního zařízení pro indukční tavení nízkoteplotních kovů a srovnání výsledků měření s numerickým modelem. Teoretická část práce shrnuje poznatky týkající se možného využití indukčního ohřevu pro zpracování tekutých kovů a uvádí nejběžněji využívané prvky pro stavbu indukčních pecí. Praktická část práce se zabývá návrhem a sestavením malé indukční pece, jejíž parametry byly uzpůsobeny pro tavení Fieldova kovu. Jedním z hlavních řešených problémů je také určení materiálových vlastností použité vsázky (měrné tepelné kapacity, hustoty, tepelné vodivosti, elektrické vodivosti a permeability), jelikož odborná literatura toto téma téměř neuvádí. V rámci práce byly proto tyto parametry určeny, a to experimentálně nebo výpočtem. Pro měrnou tepelnou kapacitu byla odhadnuta také její teplotní závislost. Dále se diplomová práce zabývá měřením indukce uvnitř i vně sestavené indukční pece a stanovením závislosti teploty vsázky na době ohřevu. V závěru je provedena verifikace výsledků s numerickým modelem.

Klíčová slova

Indukční ohřev, zpracování tekutých kovů, indukční pec, induktor, Fieldův kov, fázový přechod, elektromagnetické pole, měrná tepelná kapacita, kompenzace jalového výkonu, Agros2D

Abstract

The objective of the presented thesis is to design experimental equipment for induction melting of metals fusible at low temperatures and to compare the measured results with a numerical model. The theoretical part of the thesis summarizes information about potential use of induction heating for processing of liquid metals and it presents the most frequently used elements for construction of induction furnaces. The practical part of the thesis includes a design and construction of a small induction furnace with the parameters adapted for melting of Field's metal. One of the main issues which need to be addressed is determination of material properties of the employed charge (specific heat capacity, specific weight, thermal conductivity, electric conductivity and permeability) since specialized literature provides practically no information about this topic. Therefore the parameters were determined in the practical part of the thesis, both experimentally or by calculation. For the specific thermal capacity has been also estimated its dependence on temperature. Further, the thesis deals with measurement of induction inside and outside the assembled induction furnace and determination of dependence of the melting temperature on heating time. In conclusion the results have been verified with a numerical model.

Key words

Induction heating, liquid metal processing, induction furnace, inductor, Field's metal, phase transition, electromagnetic field, specific heat capacity, reactive power compensation, Agros2D

Prohlášení

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

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

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

.....
podpis

V Plzni dne 6.5.2014

Kateřina Mizerová

Poděkování

Na tomto místě bych velmi ráda poděkovala mému vedoucímu práce Doc. Ing. Pavlovi Karbanovi, Ph.D. za vynikající vedení, podnětné připomínky a profesionální rady. Dále bych chtěla poděkovat konzultantovi práce Ing. Františkovi Machovi za jeho velmi vstřícný přístup, ochotu a odbornou pomoc při vypracování práce.

Tento příspěvek vznikl s podporou Evropského fondu pro regionální rozvoj a Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR v rámci projektu Regionální inovační centrum elektrotechniky (RICE), číslo projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0094.

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	9
ÚVOD	10
1 ZPRACOVÁNÍ TEKUTÝCH KOVŮ V ELEKTROTECHNICE	11
1.1 PROCESY ŘÍZENÉ ELEKTRICKÝM POLEM	11
1.2 PROCESY ŘÍZENÉ MAGNETICKÝM POLEM.....	12
1.2.1 Elektromagnetické tavení.....	16
1.2.2 Elektromagnetické míchání	19
1.2.3 Elektromagnetické čerpání	20
2 KONSTRUKČNÍ PRVKY INDUKČNÍCH PECÍ.....	21
2.1 INDUKTOR.....	22
2.2 KELÍMEK	24
2.3 SPECIÁLNÍ PROSTŘEDÍ.....	25
3 NÁVRH KONSTRUKČNÍHO PROVEDENÍ INDUKČNÍ PECE.....	26
3.1 STANOVENÍ MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ FIELDOVA KOVU	26
3.2 NÁVRH KELÍMKU	28
3.3 STANOVENÍ POTŘEBNÉHO VÝKONU	29
3.4 NÁVRH CÍVKY	29
3.5 NÁVRH MĚNIČE.....	32
3.6 NÁVRH ELEKTRICKÉHO ZAPOJENÍ	33
3.7 NÁVRH CELKOVÉHO USPOŘÁDÁNÍ.....	36
4 MĚŘENÍ NA EXPERIMENTÁLNÍM ZAŘÍZENÍ	37
4.1 MĚŘENÍ MAGNETICKÉHO POLE CÍVKY	37
4.2 MĚŘENÍ TEPLoty PŘI TAVENÍ VSÁZKY	42
SEZNAM LITERATURY	52
SEZNAM OBRÁZKŮ	55
SEZNAM TABULEK	56
PŘÍLOHY	57
I. INGOT FIELDOVA KOVU	57
II. MĚŘENÍ TEPLoty VSÁZKY POMOCÍ TERMOVIZNÍ KAMERY	57

Seznam symbolů a zkratk

Q	J	Joulovo teplo	λ	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$	Tepelná vodivost
U	V	Elektrické napětí	m	kg	Hmotnost
I	A	Elektrický proud	V	m^3	Objem
t	s	Čas	w	-	Hmotnostní podíl
B	T	Magnetická indukce	T	K	Teplota
v	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Rychlost	N	-	Počet závitů
R	Ω	Elektrický odpor	τ	s	Časová konstanta
L	H	Vlastní indukčnost			
M	H	Vzájemná indukčnost			
C	F	Elektrická kapacita			
Φ	Wb	Magnetický indukční tok			
E	$\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$	Intenzita elektrického pole			
r	m	Poloměr			
c	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	Měrná tepelná kapacita			
A	$\text{Wb} \cdot \text{m}^{-1}$	Vektorový mag. potenciál			
J_V	$\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$	Vnucená proudová hustota			
δ	m	Hloubka vniku			
γ	$\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$	Konduktivita			
f	Hz	Frekvence			
μ_0	$\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$	Permeabilita vakua			
μ_r	-	Relativní permeabilita			
ω	s^{-1}	Úhlová frekvence			
P	W	Joulovy ztráty			
p_j	$\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$	Měrné Jouleovy ztráty			
l	m	Délka vodiče			
S	m^2	Průřez vodiče			
ρ	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Hustota			

Úvod

Indukční ohřev je známá a již léta využívaná technika zpracování kovů. Mezi nesporné výhody tohoto typu ohřevu patří zejména možnost přesné lokalizace, řízení jeho intenzity a rozložení teploty v ohřivaném tělese. Díky těmto vlastnostem lze indukční ohřev s výhodou použít nejen pro tavení, ale také pro tváření, žhání, kalení, pájení či letování. Další neopomenutelnou výhodou indukčního ohřevu je vznik tepla přímo v ohřivaném tělese, takže se ohřivaný předmět stává nejteplejším objektem celé soustavy.

Hlavním záměrem této diplomové práce je sestavit experimentální zařízení pro indukční tavení nízkoteplotních kovů. Mezi kovy s nízkou teplotou tavení patří také Fieldův kov, který byl pro tento experiment vybrán jako materiál vsázky. Fieldův kov je zajímavý svou velmi nízkou teplotou tavení, která je podle odborné literatury [31] pouhých 60 °C. Fieldův kov má nejnižší teplotu tavení mezi netoxickými slitinami, a lze ho tak velmi dobře použít právě pro experimentální účely. V praxi je ho možné využít pro technologii rapid prototyping nebo jako experimentální chladicí médium v jaderných reaktorech.

Předkládaná diplomová práce se ve své první části zabývá odbornou rešerší zpracování tekutých kovů, kde je kladen důraz zejména na různé možnosti využití indukčního ohřevu. Následující kapitola je věnována konstrukčním prvkům indukčních pecí, které byly později použity pro stavbu zařízení. Třetí kapitola je již zaměřena na návrh reálné indukční pece pro tavení Fieldova kovu. Jednotlivé podkapitoly systematicky popisují postup tvorby zařízení od návrhu až po jeho sestavení. Poslední kapitola obsahuje verifikaci měření na experimentálním zařízení s výsledky numerického modelu v programu Agros2D. V diplomové práci se často vyskytují odkazy na diplomovou práci Bc. Jany Kuthanové [1], jejíž práce se podrobně zabývá právě matematickou modelací indukčního ohřevu.

1 Zpracování tekutých kovů v elektrotechnice

Experimentální část této diplomové práce se zabývá indukčním ohřevem kovů. Proto je tato kapitola zaměřena zejména na problematiku ovlivňování procesů v tekutých kovech magnetickým polem. Různé typy ohřevu materiálu elektrickým polem jsou zmíněny jen velmi okrajově.

1.1 Procesy řízené elektrickým polem

Elektrický ohřev je proces, při kterém je přiváděná tepelná energie potřebná k ohřevu získávána z elektrické energie. Podle způsobu přeměny elektrické energie v teplo rozeznáváme následující druhy elektrických ohřevů:

ODPOROVÝ OHŘEV

V zařízeních pro odporový ohřev vzniká teplo průchodem proudu elektricky vodivým materiálem. Vzniklé teplo je popsáno Jouleovým-Lenzovým zákonem¹. Teplo může vznikat přímo průchodem proudu elektricky vodivou pevnou vsázkou nebo vodivou kapalinou obklopující vsázkou. Další možností je přenesení tepla sáláním z topných článků na ohříváný předmět (odporové tavící pece). [2] [4]

DIELEKTRICKÝ OHŘEV

Pomocí dielektrického ohřevu lze ohřívat elektricky špatně vodivé materiály. Materiál je vložen mezi elektrody kondenzátoru, které po připojení na napětí vytvoří vysokofrekvenční elektromagnetické pole. Toto pole způsobí polarizaci dielektrika a v důsledku natáčení dipólů uvnitř materiálu dojde ke vzniku elektrických ztrát a tím i tepla. [4]

OBLOUKOVÝ OHŘEV

V zařízeních pro obloukový ohřev je teplo generováno elektrickým obloukem, který se tvoří mezi elektrodou a ohříváním materiálem (např. svařovaným nebo taveným tělesem). Teplo je přenášeno buď přímo z oblouku na ohříváný materiál, nebo nepřímo sáláním. Aby mohl vzniknout elektrický oblouk, musí se z nevodivého plynu stát vodivý. Toho lze docílit působením vysoké teploty, elektrického pole nebo radioaktivního záření, kdy dojde k jeho ionizaci a přeměně nevodivého plynu na plazmu. [2] [4]

¹Teplo, které vzniká při průchodu proudu vodičem, je přímo úměrné součinu proudu, napětí a doby, po kterou proud prochází $Q = U \cdot I \cdot \Delta t$

PLAZMOVÝ OHŘEV

U plazmového ohřevu se elektrický oblouk vytváří z plynů, které jsou do prostoru vzniku plazmy uměle přiváděny – tzv. plazmotvorné plyny (např. argon). Plazma je vytvářena v prostoru, který se nazývá plazmový hořák. [4]

ELEKTRONOVÝ OHŘEV

Vznik tepla v zařízeních pro elektronový ohřev spočívá v přeměně elektrické energie na teplo dopadem elektronů na ohříváný materiál. Dopadající urychlené elektrony emitované elektronovým dělem vnikají do materiálu a předávají mu svou kinetickou energii. Elektrony se urychlují vysokým napětím mezi katodou a anodou elektronového děla. Elektrony jsou na své dráze bržděny vzájemnými srážkami s částicemi a přicházejí tak o část své kinetické energie. Aby byly tyto ztráty eliminovány, probíhá děj ve vysokém vakuu. [2] [4]

LASEROVÝ OHŘEV

Při laserovém ohřevu dochází k pohlcení laserového paprsku ohříváním materiálem a následně přeměně jeho energie na energii tepelnou. U kovů proniká paprsek laseru pouze do tenké povrchové vrstvy materiálu, vytvoří se vysoký teplotní gradient a až po chvíli se teplo začne šířit vedením do větší hloubky. Záření laseru proniká vzduchem i dalšími plyny téměř beze ztrát, ohřev lze tedy provádět v libovolné atmosféře a vzdálenosti od laseru. [2] [4]

1.2 Procesy řízené magnetickým polem

Řízení a ovlivňování procesů v tekutých kovech magnetickým polem se označuje jako magnetohydrodynamika. Magnetohydrodynamika zkoumá silové účinky magnetického pole působícího na tekutý kov protékaný elektrickým proudem. Magnetohydrodynamický jev je v tekutém kovu vyvolán vnějším proměnným elektromagnetickým polem, které v elektricky vodivé tavenině indukuje vířivé proudy. Tyto vířivé proudy následně vyvolají Jouleovy ztráty a ohřátí taveniny. Interakcí magnetického pole vyvolaného vířivými proudy a vnějšího magnetického pole jsou generovány silové účinky zapříčiňující proudění částic taveniny.

Magnetohydrodynamika je relativně mladou technologií zpracování tekutých kovů a proto jsou některé z technik stále ještě finančně velmi náročné a používají se jen ve speciálních případech (např. levitační tavení). Jiné metody se ale s úspěchem uplatňují v praxi již dnes při zpracování oceli i barevných kovů, jako například elektromagnetické tavení, míchání, odlévání či čerpání. [5]

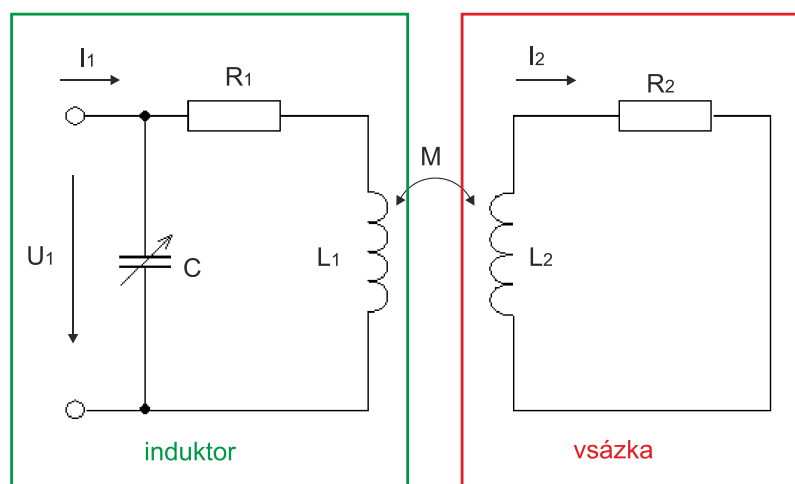
INDUKČNÍ OHŘEV

Základní podmínkou pro ohřev vodivého materiálu magnetickou indukcí je vznik časově proměnného magnetického pole uvnitř ohřivaného materiálu a následný vznik vířivých proudů. Existují dva způsoby, jak toho dosáhnout. Prvním je využití zdroje nestacionárního magnetického pole – např. induktoru protékaného harmonickým elektrickým proudem. Tento způsob se používá pro běžný indukční ohřev, kdy je ohřivaný materiál nehybně uložen uvnitř proměnného magnetického pole. Druhý způsob využívá stacionární magnetické pole, kdy je vznik elektromagnetické indukce podmíněn buďto rotačním či posuvným pohybem ohřivaného tělesa nebo přímo pohybem zdroje stacionárního magnetického pole. Zdrojem magnetického pole pro tento případ indukčního ohřevu mohou být například permanentní magnety, supravodivé elektromagnety nebo cívky protékané stejnosměrným proudem. Tato práce se nadále zabývá pouze prvním způsobem indukčního ohřevu, tedy použitím nestacionárního magnetického pole a nepohybujícího se ohřivaného tělesa.

Zařízení pro indukční ohřev v nestacionárním magnetickém poli vždy sestává z ohřivaného předmětu, cívky a zdroje střídavého proudu, další komponenty se liší dle prováděné aplikace. Vždy ale musí být přítomen elektricky vodivý materiál, ve kterém se budou následně indukovat vířivé proudy. Buď je elektricky vodivá přímo vsázka, tedy materiál, který chceme ohřívát, nebo je z elektricky vodivého materiálu vyroben kelímek. Do kelímku je poté uložen nevodivý materiál, který je ohříván nepřímo přes jeho stěny.

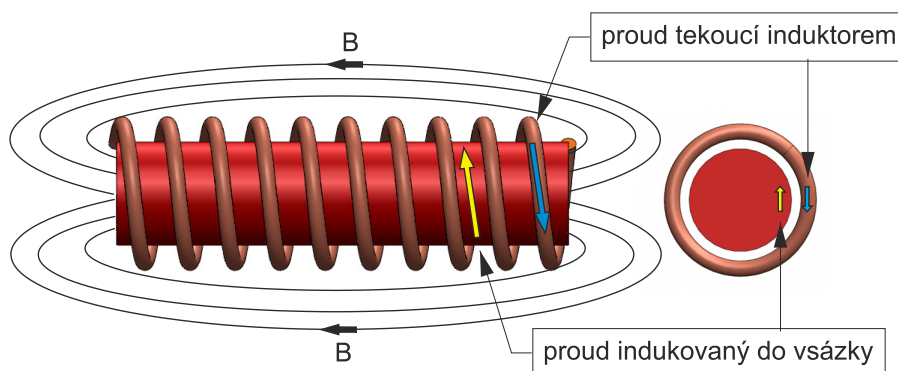
Princip indukčního ohřevu je ve své podstatě totožný s principem přenosu elektrické energie z primárního do sekundárního vinutí transformátoru. Primární vinutí představuje cívka, která je protékána střídavým elektrickým proudem a sekundární vinutí je tvořeno vsázkou. Sekundární vinutí má v tomto případě pouze jeden závit.

Schematicky si lze zařízení pro indukční ohřev představit jako dvě cívky navzájem spřažené vzájemnou indukčností M jako je naznačeno na Obr. 1.1. Induktor představuje primární cívku, je reprezentován její vlastní indukčností L_1 a je v sérii se svým ztrátovým činným odporem R_1 . Paralelně je k nim připojen ještě laditelný kompenzační kondenzátor. Ohřivaný materiál představuje sekundární cívka s indukčností L_2 , která je spojena nakrátko přes činný odpor R_2 . [7]



Obr. 1.1 Náhradní schéma indukčního ohřevu

Kolem každého vodiče protékaného střídavým proudem se vytváří střídavé magnetické pole. Prochází-li tedy cívkou proud, vzniká v jejím okolí střídavé elektromagnetické pole. Dle Faradayova zákona o elektromagnetické indukci² toto pole prostupuje do elektricky vodivého materiálu, kde indukuje napětí a způsobuje vznik vířivých proudů. Elektrický vodič umístěný uvnitř induktoru se poté vlivem těchto indukovaných vířivých proudů ohřívá. Tepelné účinky vířivých proudů popisuje již zmíněný Jouleův-Lenzův zákon. [8] [9] [10] Princip indukčního ohřevu je znázorněn na Obr. 1.2.



Obr. 1.2 Princip indukčního ohřevu

Hustota vzniklého proudu se v průřezu vsázky nerozdělí rovnoměrně, ale bude koncentrována zejména na povrchu vsázky. Nehomogenní rozdělení proudu je následkem jevu zvaného povrchový jev. Jedná se o fyzikální děj, při kterém je elektrický proud ve vodiči vytlačován k jeho povrchu.

² Změní-li se magnetický indukční tok ve smyčce za dobu Δt o $\Delta\phi$, vzniká v jejím vodiči indukované elektromotorické napětí, tento jev popisuje II. Maxwellova rovnice $\oint_c \mathbf{E} d\mathbf{l} = -\frac{d\phi}{dt}$, kde výraz $\oint_c \mathbf{E} d\mathbf{l}$ představuje indukované napětí ve smyčce c.

Hustota proudu klesá od povrchu ke středu vsázky přibližně exponenciálně. Vzdálenost od povrchu vsázky, ve které hustota proudu klesne na 37 % své hodnoty na povrchu, se nazývá hloubka vniku a je vyjádřena vztahem

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\gamma \cdot \omega \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}}; \text{ neboli } \delta = \sqrt{\frac{1}{\gamma \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}}, \quad (1.1)$$

kde γ je konduktivita materiálu (měrná elektrická vodivost), f je frekvence, μ_0 je permeabilita vakua a μ_r je relativní permeabilita materiálu. [11]

Elektrická účinnost indukčního ohřevu je závislá na několika faktorech. Z uvedeného vztahu je patrná nepřímá závislost hloubky vniku a frekvence. Čím je použitá frekvence vyšší, tím je hloubka vniku menší. Pokud tedy zvolíme neúměrně vysokou frekvenci, docílíme toho, že se ohřeje pouze tenká vrstva na povrchu materiálu a zbytek materiálu se musí ohřát přenosem tepla z ohřáté části. Zvolíme-li naopak frekvenci nízkou, dojde sice k prohřátí celého materiálu, ale účinnost ohřevu bude velmi nízká. [11]

Dalším parametrem ovlivňujícím účinnost ohřevu je geometrické uspořádání induktoru. Cívka by měla být ideálně navinuta co nejbližší k ohřivanému předmětu, aby tak byla zajištěna co nejtěsnější indukční vazba. [9] [12] Podrobněji je tento problém rozebrán v kapitole 2.1.

Materiál vsázky má na účinnost ohřevu taktéž vliv. Magnetické materiály lze ohřívát o něco snadněji než nemagnetické, jelikož k oteplení materiálu přispívají kromě Jouleových ztrát také ztráty hysterezní. Střídavý magnetický tok způsobuje cyklické změny polarizace magnetických dipólů uvnitř materiálu. Změnou polarizace dochází v materiálu k vnitřnímu tření mezi magnetickými dipóly a tím také ke vzniku tepla. Vzniklé teplo ale tvoří pouze minoritní část a na celkovém vytvořeném teple se podílí jen minimálně. [14]

Ze vztahu (1.1) vyplývá také nepřímá úměrnost mezi hloubkou vniku a součinem konduktivity a relativní permeability materiálu. Rychlejšího ohřevu je tak docíleno u materiálů s nízkou hodnotou tohoto součinu. Konduktivita i relativní permeabilita jsou teplotně závislé veličiny, pokud se bude jednat např. o feromagnetický materiál, dojde po dosažení tzv. Curriovy teploty ke ztrátě magnetických vlastností materiálu a hodnota relativní permeability klesne na hodnotu blízkou jedné. Hloubka vniku tak v některých případech rapidně vzroste. [14]

1.2.1 Elektromagnetické tavení

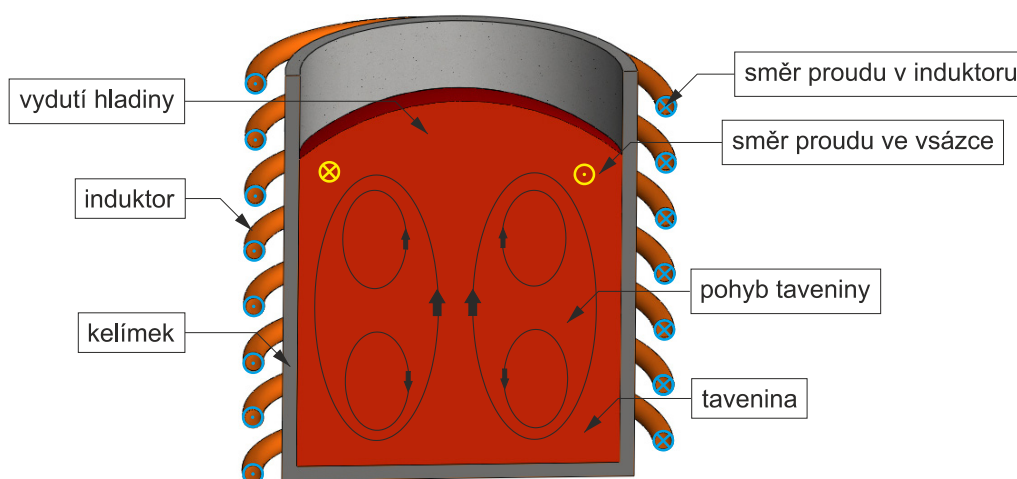
Jedním z možných využití indukčního ohřevu v praxi je elektromagnetické tavení, které je dnes hojně využíváno zejména k tavení hliníku nebo oceli. Existuje více možností, jak elektromagnetické tavení provádět. Mezi ty nejběžnější metody se řadí tavení v kelímkových a kanálkových pecích, levitační tavení je zatím kvůli finanční náročnosti používáno jen pro speciální případy.

a) TAVENÍ V KELÍMKOVÝCH A KANÁLKOVÝCH PECÍCH

Indukční pece jsou ideální pro tavení široké škály kovů s minimálními energetickými ztrátami. Existují dva základní typy indukčních pecí – kelímková a kanálková. Kelímková indukční pec se používá zejména pro tavení oceli a kanálková indukční pec pro tavení neželezných kovů nebo jako udržovací pec pro přehřívání litin. [11] [4]

Kelímková pec se skládá z keramického kelímku, vodou chlazeného induktoru, který kelímkem obepíná, a zdroje střídavého proudu. Interakcí proudu induktoru a vzniklých vířivých proudů v tavenině dochází uvnitř kelímku k intenzivnímu míchání tekutého kovu.

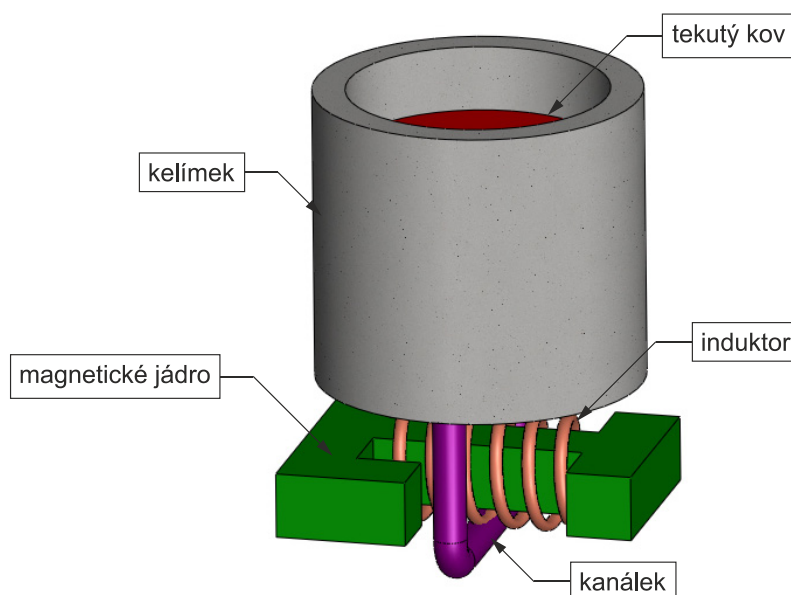
Pohyb taveniny zajišťuje rovnoměrné promísení základního materiálu a legovacích přísad, což vyrovnává chemickou a teplotní heterogenitu lázně. Vedlejším efektem tohoto míchání je nepříznivé konvexní vzednutí hladiny. Toto vyduť se dá potlačit rozdělením induktoru na jednotlivé sekce a odpojením sekce v horní části kelímku, případně zvýšením frekvence nebo snížením výkonu. [11] [20] Zjednodušené schematické uspořádání kelímkové indukční pece je znázorněno na Obr. 1.3.



Obr. 1.3 Kelímková indukční pec

Mezi kelímkové indukční pece patří i indukční pec se studeným kelímkem používaná pro tavení nemagnetických materiálů či indukční pec s grafitovým kelímkem pro tavení nevodivých či naopak velmi vodivých materiálů. Podrobněji jsou tyto metody popsány v kapitole 2.2.

Kanálková pec obsahuje jeden nebo více kanálků, které ústí do kelímku s taveninou. Kelímek je opatřen žáruvzdornou vyzdívkou, která tepelně izoluje kov a snižuje tak tepelné ztráty sáláním do okolí. Kov se taví již v kanálku a představuje sekundární závit nakrátko. Primární vinutí je navinuto na feromagnetickém jádře, kterým prochází střídavý magnetický tok. Působením elektromagnetických sil dochází k pohybu kovu z kanálku do kelímku a tím k intenzivnímu promíchání taveniny. [11] [21] Zjednodušené schematické uspořádání kanálkové indukční pece je uvedeno na Obr. 1.4.

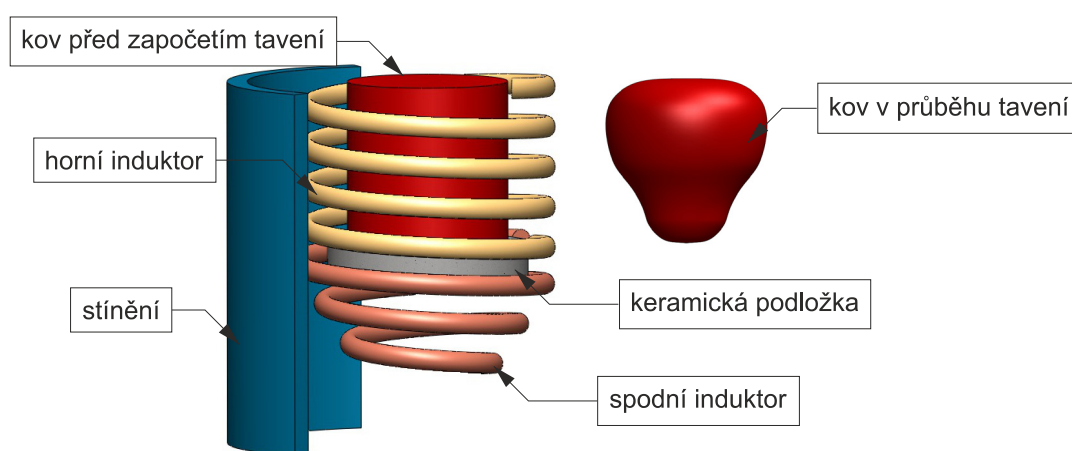


Obr. 1.4 Kanálková indukční pec

Pro ideální provoz pece je nutné, aby nedocházelo k vychladnutí kovu v kanálku a kov byl neustále udržován v tekutém stavu. Tato skutečnost je velkou nevýhodou tohoto typu pece. Pokud pec nepracuje kontinuálně a dochází k častým rozběhům, klesá energetická účinnost a životnost pece. [22]

b) LEVITAČNÍ TAVENÍ

Stejně jako tavení v kelímkové či kanálkové peci je levitační tavení technika založená na indukovaní vířivých proudů v tavenině střídavým elektromagnetickým polem. Pokud je ovšem magnetické pole vytvořeno vhodně tvarovanými cívkami a dobře zvoleným proudem a jeho kmitočtem, dojde k tomu, že působící Lorentzovy síly překonají gravitační sílu a vložený kov začne levitovat. [16] Je nutné, aby k levitaci došlo ještě před započítím tavení, aby bylo zajištěno, že se roztavený kov nebude dotýkat okolního zařízení. Tohoto bezkontaktního tavení kovů se využívá zejména k výrobě vysoce čistých materiálů nebo pro měření tepelných vlastností tekutých kovů. [5] Nejběžnější uspořádání zařízení pro levitační tavení je znázorněno na Obr. 1.5.



Obr. 1.5 Zařízení pro levitační tavení

Zařízení je složeno ze dvou sousých cívek, přičemž spodní kuželovitá cívka zajišťuje kýžený levitační efekt a horní válcová cívka slouží především k zajištění indukčního ohřevu. Symetrické uspořádání s sebou ale přináší značnou nevýhodu v podobě nehomogenního rozložení levitační síly v průřezu taveného materiálu. Největší levitační síla působí v povrchových vrstvách materiálu a u středu taveniny je síla téměř nulová. Toto uspořádání lze použít pouze u malého množství materiálu, kde je zajištěno, že povrchové napětí taveniny umožní levitaci i té části materiálu, u které už levitační síly nepůsobí. Jako řešení tohoto problému se nabízí použití složitějšího uspořádání většího množství cívek, které budou vytvářet výhodnější rozložení magnetického pole, i v tomto případě ale budou levitační síly v blízkosti osy taveniny značně zeslabeny. [5]

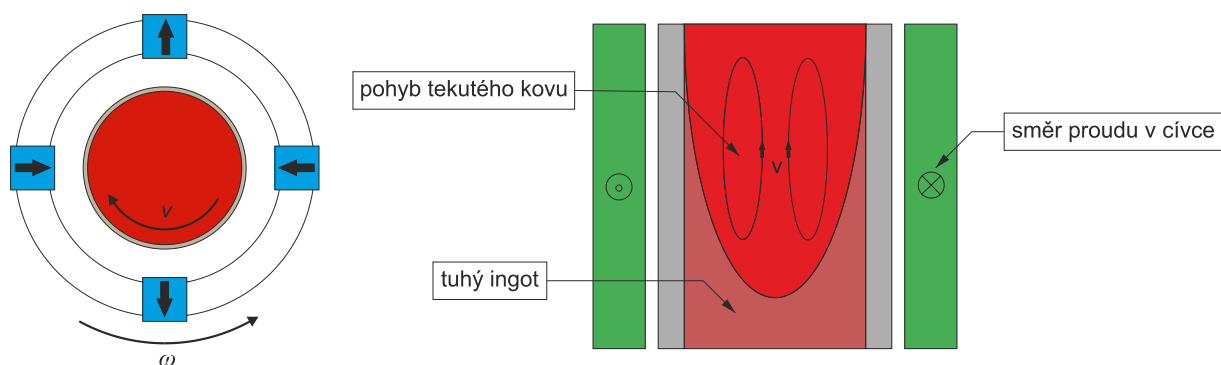
Vzhledem k tomu, že je tavený materiál menší než soustava induktorů použitá k jeho tavení, generují tyto levitační ohřivače rozptylové magnetické pole. Aby se zabránilo elektromagnetickému rušení, je možné k zařízení přidat ještě magnetické stínění. Nevhodný výběr stínicího štítu ale může mít neblahý vliv na stabilitu levitovaného materiálu. [16]

1.2.2 Elektromagnetické míchání

Elektromagnetické míchání se využívá především k homogenizaci kovových slitin nebo čistých kovů během odlévání. Neustálé míchání chladnoucí kapaliny totiž potlačuje některé nepříznivé děje, ke kterým v tavenině během tuhnutí dochází. Jedná se například o vytěsňování legovacích přísad z taveniny a tím narušení homogenní struktury odlitku. Dalším nežádoucím jevem je přítomnost bublinek oxidu uhelnatého nebo vodíku v tavenině a následná tvorba malých dutinek v odlitku. Pohyb taveniny navíc pozitivně ovlivňuje krystalizaci materiálu. [5] [13]

Jednou z možností, jak realizovat elektromagnetické míchání taveniny, je využít vnějšího horizontálního magnetického pole B rotujícího úhlovou rychlostí ω jako je naznačeno na Obr. 1.6. Tento postup využívá principu indukčního stroje, kde je tok energie mezi hlavními částmi motoru realizován pomocí elektromagnetické indukce. Vnější magnetické pole zajišťuje úlohu statoru a je vytvořeno například soustavou vzájemně geometricky natočených cívek napájených z trojfázové soustavy. Tavenina zde představuje rotor. Vlivem vnějšího magnetického pole se indukuje v tavenině napětí a vzniklý proud vyvolává sílu, která taveninu míchá. [13]

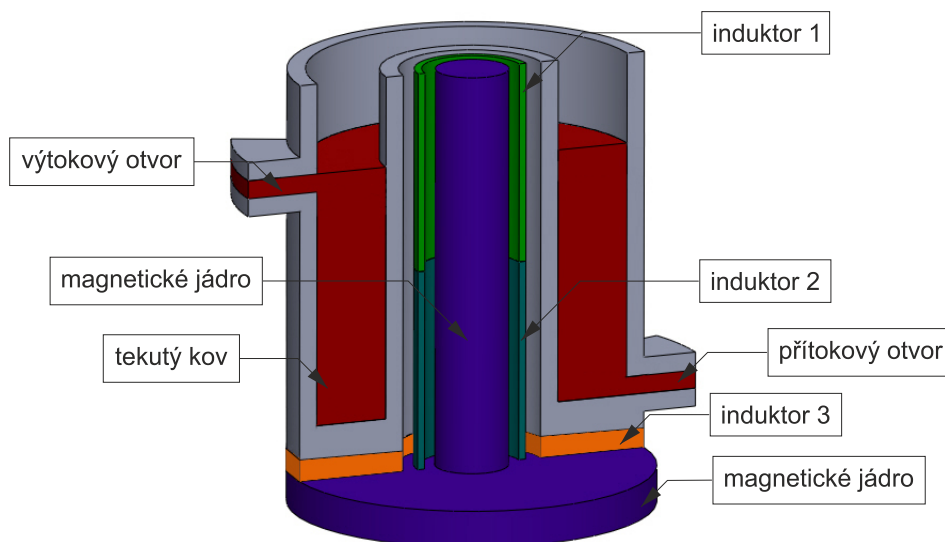
Další variantou je použití statického induktoru protékaného harmonickým proudem, který generuje střídavé magnetické pole. Tuto situaci znázorňuje Obr. 1.6. [13] V tomto případě působí síly vyvolané interakcí magnetického pole a vzniklých vířivých proudů zejména směrem k ose kelímku.



Obr. 1.6 Míchání taveniny rotujícím magnetickým polem a míchání taveniny induktorem protékaným střídavým proudem

1.2.3 Elektromagnetické čerpání

Magnetohydrodynamické dávkovače mají za úkol zajistit odlévání předepsaných dávek tekutého kovu z nádoby do formy. Základní uspořádání je znázorněno na Obr. 1.7. Zařízení se skládá z nádoby, magnetického obvodu a soustavy cívek. [15]



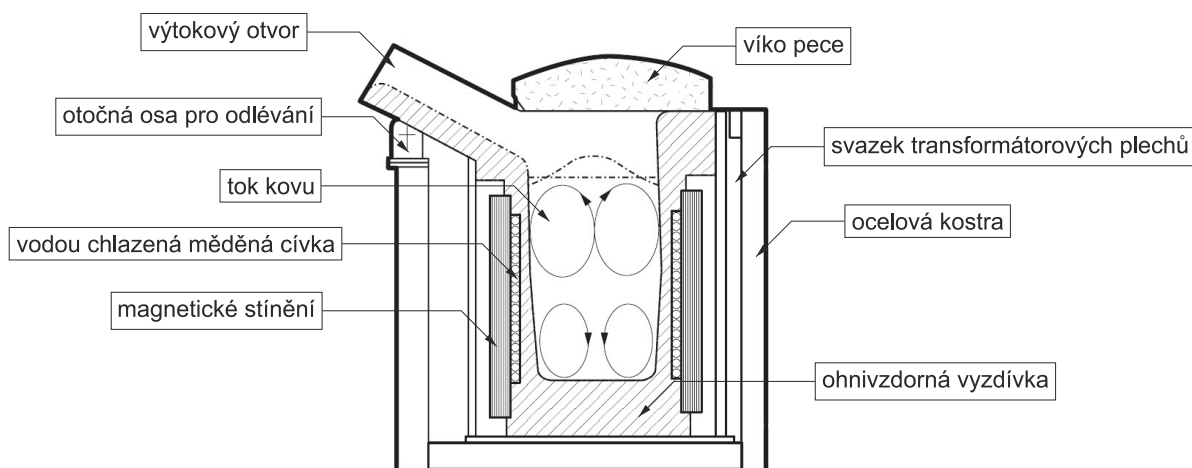
Obr. 1.7 Magnetohydrodynamický dávkovač tekutého kovu

Do nádoby je roztavený kov přiváděn přes přítokový otvor ze zásobníku a poté dávkován horním výtokovým otvorem. Magnetický obvod poskytuje požadované rozložení magnetického pole a soustava induktorů zajišťuje v interakci s magnetickým polem elektromagneticky řízené proudění roztaveného kovu. [15]

Dávkovač pracuje ve dvou režimech, v klidovém a čerpacím. Při klidovém režimu je úkolem dávkovače udržet roztavený materiál na přibližně konstantní teplotě, v tomto případě je materiál pouze indukčně ohříván. V činnosti jsou nyní induktory 1 a 2, které jsou protékány takovým harmonickým proudem, aby Jouleovy ztráty vyvolané vířivými proudy v tavenině vyprodukovaly teplo odpovídající tepelným ztrátám na zařízení. Při čerpacím režimu jsou aktivní induktory 2 a 3, které jsou spojeny do série a protékány harmonickým proudem. Vložíme-li do střídavého magnetického pole, které je induktory vybuzeño, elektricky vodivé těleso – v tomto případě roztavený kov, indukuje se v něm napětí. Toto napětí vyvolá v tavenině vířivé proudy s opačnou orientací. Ty jsou svým magnetickým polem v interakci s magnetickým polem budící cívky a vzniká tak levitační síla, která převyšuje sílu gravitační. Tavenina je v nádobě působením této elektromagnetické síly levitována a hladina stoupá k výpustnímu otvoru, kde dochází po předepsanou dobu k vypouštění taveniny do formy. Po vypouštění potřebné dávky je režim přepnut opět do klidového ohřívacího stavu. [5] [15]

2 Konstrukční prvky indukčních pecí

V této kapitole jsou podrobněji rozebrány některé konstrukční části indukční pece. V experimentální části práce bude používána jednoduchá kelímková indukční pec, složená pouze z induktoru zajišťujícího vznik střídavého magnetického pole, kelímku obsahujícího ohříváný Fieldův kov a zdroje střídavého proudu. Proto je text zaměřen pouze na tyto konstrukční prvky. Pro úplnost je uveden alespoň obrázek kelímkové indukční pece (Obr. 2.1) obsahující všechny konstrukční prvky, které jsou v praxi využívány.

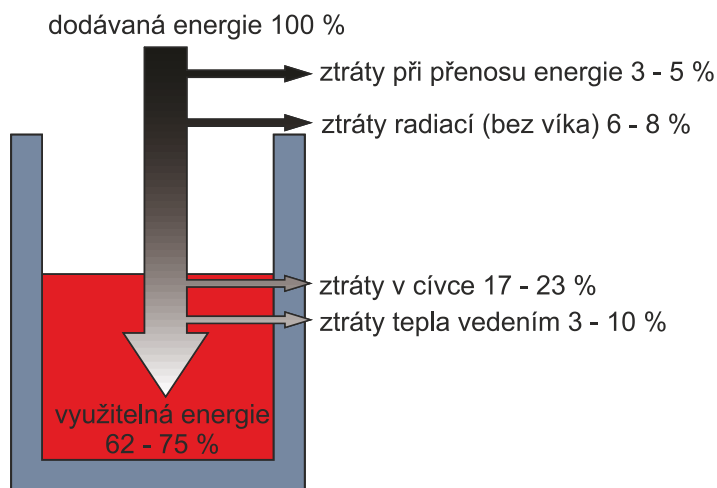


Obr. 2.1 Konstrukční uspořádání kelímkové indukční pece [29]

Vzhledem k tomu, že induktorem prochází magnetický tok, který se uzavírá i vně pece, je nutné zajistit, aby intenzita magnetického pole vně pece byla co nejmenší a v praxi tak nedocházelo k zahřívání nosných konstrukcí pece. Proto se ke kelímkovým indukčním pecím běžně přidává stínění – svazek transformátorových plechů nebo stínicí plášť z dobře vodivého materiálu. [4]

2.1 Induktor

Správně navržená a zkonstruovaná cívka je základní podmínkou pro ekonomicky efektivní indukční ohřev. Jak ukazuje diagram na Obr. 2.2, nejvíce energie dodávané do kelímkové pece je přeměněno na teplo v cívce. Diagram znázorňuje tavení oceli v typické kelímkové indukční peci při 50 Hz. Návrh a testování cívek je proto často tím časově nejnáročnějším krokem při návrhu zařízení pro indukční ohřev.



Obr. 2.2 Diagram ztrát v kelímkové indukční peci, překresleno z [29]

Kovové materiály nejen vedou elektrický proud, ale zároveň působí i proti jeho toku. Odpor, který je kladen průtoku elektrického proudu, způsobuje v protékaném materiálu ztráty. Jelikož platí zákon o zachování elektrické energie, energie se neztratí, ale pouze změní z jedné formy na druhou, v tomto případě na teplo. Ztráty, které v materiálu vzniknou, jsou reprezentovány již zmíněným Joule-Lenzovým zákonem, který je pro názornost tentokrát uveden v následujícím tvaru:

$$P = R \cdot i^2, \quad (2.1)$$

kde R je odpor materiálu a i protékající proud. Odpor materiálu je nepřímo úměrný konduktivitě materiálu. Velmi vysokou konduktivitu má například stříbro nebo měď, tyto materiály jsou proto na výrobu cívek pro indukční ohřev vhodné. I přes velmi dobrou vodivost stříbra, se ale tento materiál kvůli vysoké ceně nepoužívá. Naopak například ocel či Fieldův kov, který je stěžejní pro tuto diplomovou práci, mají konduktivitu mnohonásobně menší. Při průchodu proudu těmito materiály vznikají velké ztráty a lze je tak pomocí indukčního ohřevu velmi snadno ohřívat.

Hodnoty konduktivity γ zmiňovaných kovů při teplotě 20 °C jsou uvedeny v Tab. 2.1.

Tab. 2.1 Hodnoty konduktivity materiálů při 20 °C, data převzata z [14]

		Ag	Cu	ocel	Fieldův kov
konduktivita	γ (S·m ⁻¹)	64,52·10 ⁶	58,82·10 ⁶	5,75·10 ⁶	1,92·10 ⁶

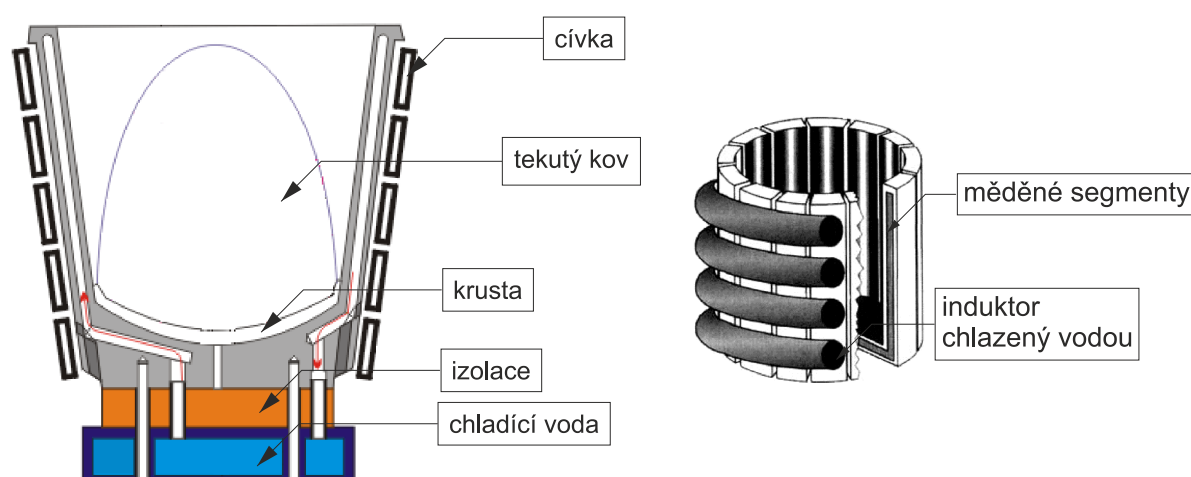
Většina cívek pro indukční tavení je chlazená vodou, kvůli snížení výkonových ztrát a zamezení případného přehřátí. Pakliže je cívka chlazená vodou, je nutné určit vhodnou rychlost průtoku chladicí vody cívkou a zvážit případné připojení pomocného čerpadla pro dosažení a udržení požadovaného průtoku. Příliš nízká rychlost by u cívek s vysokou hustotou energie měla za následek nedostatečný odvod tepla. Dále je nutné předejít možnému lokálnímu přehřátí, což by zapříčinilo vznik páry a snížilo průchod chladicí vody. Jeden z omezujících faktorů při navrhování cívky je její nejmenší možný průměr při respektování potřebného chlazení vodou. Při menším průřezu než 2,6 mm by byl průtok vody nedostatečný pro ochlazení. Maximální průřez cívky je limitován pouze schopností cívku při daném průměru navinout do požadovaného tvaru. [23] [24]

Cívka by měla být co nejbližší k vsázce, aby byl zajištěn maximální přenos energie. Je samozřejmě žádoucí, aby do ohřívaného materiálu prostupoval co největší magnetický tok. Ten se nejvíce koncentruje v blízkosti závitů a s rostoucí vzdáleností postupně klesá. [9]

2.2 Kelímek

Pro běžné tavení (např. oceli) se používá kelímek z nevodivého materiálu – nejčastěji z křemíku (přesněji z křemencové drtě). Pokud ale potřebujeme tavit materiál silně vodivý (např. měď, hliník a jejich slitiny), má indukční pec s nevodivým kelímkem nedostačující elektrickou účinnost. Účinnost lze zvýšit použitím kelímku z vodivého materiálu. Pokud se jedná o hliník, je dostačující použít kelímek zhotovený z ocelolitiny, pro vyšší teploty už je ale třeba použít kelímek vyrobený ze směsi grafitu a šamotu. Mezi kelímek a induktor se vkládá izolační keramická vrstva, která snižuje přenos tepla z rozžhaveného kelímku na induktor protékaný chladicí kapalinou. Elektromagnetické pole vyzářené induktorem v tomto případě indukuje proud zejména do stěny kelímku, což způsobuje jeho zahřátí. Kelímek následně vzniklé teplo předává materiálu, který je v něm vložen. Část elektromagnetického pole ale projde stěnou kelímku až ke vsázce a ohřívá přímo vodivý materiál uvnitř kelímku. Tímto způsobem lze tavit i materiály nevodivé (např. křemík), které při použití běžného keramického kelímku tavit nelze. Elektromagnetické pole v tomto případě indukuje proudy pouze do grafitového kelímku a vsázka je ohřívána jen přenosem tepla z kelímku. [4]

Další možností je tavení ve studeném kelímku. Studený kelímek je zařízení, které se používá zejména pro tavení speciálních superčistých slitin. Jak naznačuje Obr. 2.3, kelímek je složen z trubkovitých měděných segmentů chlazených vodou, kolem kterých jsou umístěny závity induktoru generující elektromagnetické pole. [19]



Obr. 2.3 Studený kelímek pro tavení titanových slitin [19]

Toto pole indukuje vířivé proudy, které ohřívají materiál umístěný uvnitř kelímku. Zdroj tepla je soustředěn přímo v ohřívaném materiálu a tavenina uvnitř kelímku tak dosahuje teploty až 3000 °C, přičemž studený kelímek má ve všech svých částech stálou pracovní

teplotu přibližně 50 °C [18]. Tento efekt je podmíněn tím, že se při procesu tavení žhoucí tavenina nedotýká povrchu nádoby. Při stěnách kelímku vzniká tenká vrstva ztuhlého kovu – tzv. krusta, která chrání kelímek a tím zároveň i taveninu proti nečistotám. Tímto je zajištěna vysoká čistota produktu tavení i u vysoce korozivních materiálů. Nedochozí totiž k poškození stěn tavného kelímku, jako u běžných tavicích pecí. Díky této odolnosti se dají ve studeném kelímku zpracovávat i těžko tavitelné keramické materiály používané například v optice a elektrotechnice. Touto technikou se zpracovává například oxid zirkoničitý, který taje při 2750 °C a neexistuje tak materiál, který by mohl zastat funkci kelímku a přitom vydržel tak vysokou teplotu, aniž by se roztavil. [18]

2.3 Speciální prostředí

Proces indukčního tavení lze provádět v kompletně uzavřené ocelové a vodou chlazené komoře, ve které je vytvořeno vakuum nebo ochranná atmosféra. Proces vakuového tavení se využívá zejména při použití studeného nebo grafitového kelímku. V současnosti se tento způsob používá při výrobě vysoce kvalitních materiálů pro mnoho průmyslových aplikací (např. vysoce legované slitiny, nerezové oceli, atd.). Použití vakua omezuje některé nepříznivé procesy, ke kterým při přípravě taveniny dochází. Jednou z výhod použití vakua je například odplynění vsázky, které odstraní případné nežádoucí těkavé látky a omezí tvoření dutinek v taveném materiálu. Snížení tlaku nad taveninou totiž vychýlí taveninu z její rovnováhy a ta se ztracenou rovnováhu snaží obnovit tím, že začne do prostoru uvolňovat plyny. [25] [26]

Pokud se nepřistoupí k tavení ve vakuu nebo ochranné atmosféře, je vhodné pec opatřit alespoň víkem, které snižuje ztráty sáláním z povrchu vsázky.

3 Návrh konstrukčního provedení indukční pece

Následující kapitoly popisují návrh jednotlivých částí indukční pece, která byla navržena pro tavení nízkoteplotních kovů. Jako materiál vsázky byl vybrán Fieldův kov, který je zajímavý svou velmi nízkou teplotou tavení – pouhých 60 °C, jak uvádí literatura [31]. Tato snadno tavitelná eutektická slitina je složena z india (51 %), bizmutu (32,5 %) a cínu (16,5 %). Fotografie ingotu Fieldova kovu před a po tavení je uvedena v příloze I.

3.1 Stanovení materiálových vlastností Fieldova kovu

V Tab. 3.1 jsou uvedeny materiálové vlastnosti Fieldova kovu při teplotě 20 °C.

Tab. 3.1 Materiálové vlastnosti Fieldova kovu pro 20 °C

Hustota	ρ (kg·m ⁻³)	7991,6
Tepelná vodivost	λ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	13,8
Měrná tepelná kapacita	c (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	200,72
Měrná elektrická vodivost	γ (S·m ⁻¹)	1,923·10 ⁶
Relativní permeabilita	μ_r (-)	1

Permeabilita Fieldova kovu byla odhadnuta ze znalosti permeability jednotlivých složek materiálu. Měrná elektrická vodivost byla stanovena jako převrácená hodnota rezistivity materiálu získané z [31]. Tepelná vodivost byla určena podle Wiedemann-Franzova-Lorenzova zákona uvedeného v [33], podle kterého platí přímá závislost mezi tepelnou a elektrickou vodivostí kovových materiálů, a to ve tvaru

$$\frac{\lambda}{\gamma} = L \cdot T, \quad (3.1)$$

kde λ je tepelná vodivost, γ je elektrická vodivost, L je Lorentzova konstanta $2,45 \cdot 10^{-8}$ a T je teplota v Kelvinech. Pro 20 °C je tepelná vodivost Fieldova kovu $13,8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Hustota materiálu byla určena experimentálně jako poměr hmotnosti a objemu materiálu. Pro stanovení objemu materiálu bylo využito metody vycházející z Archimédova zákona, kdy při hustotě vody $1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ se objem v cm^3 rovná hmotnosti vytlačené vody v gramech. Měření bylo prováděno pro 3 různé tablety při 20 °C a poté ještě pro další 3 tablety, tentokrát pro 45,3 °C (Tab. 3.2). Měření se mimo jiné podařilo potvrdit minimální teplotní závislost hustoty materiálu na změně teploty, toto zjištění je důležité pro správnou optimalizaci numerického modelu, viz kap. 4.2. Hustota materiálu pro 20 °C byla vyjádřena jako průměrná hodnota $7991,6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Tab. 3.2 Měření hustoty Fieldova kovu pro 3 různé tablety při 20 °C a 3 další tablety při 45,3 °C

		teplota 20 °C			teplota 45,3 °C		
		1. tableta	2. tableta	3. tableta	4. tableta	5. tableta	6. tableta
Hmotnost	m (g)	114,93	113,88	111,64	115,65	115,72	115,75
Objem	V (cm ³)	14,31	14,29	14	14,56	14,46	14,52
Hustota	ρ (kg·m ⁻³)	8031,447	7969,209	7974,286	7942,995	8002,766	7971,763

Měrná tepelná kapacita Fieldova kovu byla pro 20 °C spočítána podle Neumannova-Koppova empirického pravidla [34]

$$c = w_{\text{In}} \cdot c_{\text{In}} + w_{\text{Bi}} \cdot c_{\text{Bi}} + w_{\text{Sn}} \cdot c_{\text{Sn}}, \quad (3.2)$$

kde w značí hmotnostní podíl prvku ve sloučenině a c jeho měrnou tepelnou kapacitu. Měrné tepelné kapacity prvků a jejich hmotnostní podíly jsou uvedeny v Tab. 3.3. Pro tyto hodnoty je měrná tepelná kapacita Fieldova kovu 200,72 J·kg⁻¹·K⁻¹.

Tab. 3.3 Měrné tepelné kapacity a hmotnostní podíly složek Fieldova kovu pro 20 °C [31]

		In	Bi	Sn
Hmotnostní podíl	w (-)	0,51	0,325	0,165
Měrná tepelná kapacita	c (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	233	122	256

Vzhledem k tomu, že je měrná tepelná kapacita velmi teplotně závislá veličina, je vhodné zjistit její průběh i pro vyšší teploty. Při použití Neumann-Koppova empirického pravidla sice lze měrnou tepelnou kapacitu Fieldova kovu vypočítat i pro vyšší teploty, ale vzhledem k tomu, že se jedná o eutektickou slitinu, neprojeví se ještě při teplotě tavení skoková změna měrných tepelných kapacit jednotlivých složek. Podle zmiňovaného vztahu by při 100 °C vystoupila hodnota měrné tepelné kapacity pouze o 8,32 J·kg⁻¹·K⁻¹. Průběh měrné tepelné kapacity by tak neodpovídal reálné charakteristice.

Proto byla pomocí kalorimetru změřena alespoň hodnota měrné tepelné kapacity Fieldova kovu pro 50 °C. Nejprve bylo nutné zjistit tepelnou kapacitu použitého kalorimetru. Ta byla experimentálně stanovena na hodnotu $K = 169,695$. Dále se určila měrná tepelná kapacita Fieldova kovu. Do kalorimetru byla nalita voda o hmotnosti m_1 , která měla po ustálení teplotu T_1 . Poté bylo vloženo 10 tablet kovu o hmotnosti m_2 a teplotě T_2 , které byly ohřány ve vodní lázni. V kalorimetru došlo k přenosu tepla a po určité době se teplota ustálila na teplotu T . Je-li c_1 měrná tepelná kapacita vody (4180,6 J·kg⁻¹·K⁻¹), pak pro měrnou tepelnou kapacitu Fieldova kovu platí z kalorimetrické rovnice vztah

$$c_2 = \frac{(m_1 \cdot c_1 + K) \cdot (T - T_1)}{m_2 \cdot (T_2 - T)}. \quad (3.3)$$

Tab. 3.4 obsahuje údaje ze dvou měření měrné tepelné kapacity Fieldova kovu pro 50 °C.

Tab. 3.4 Údaje pro měření měrné tepelné kapacity Fieldova kovu pro 50 °C

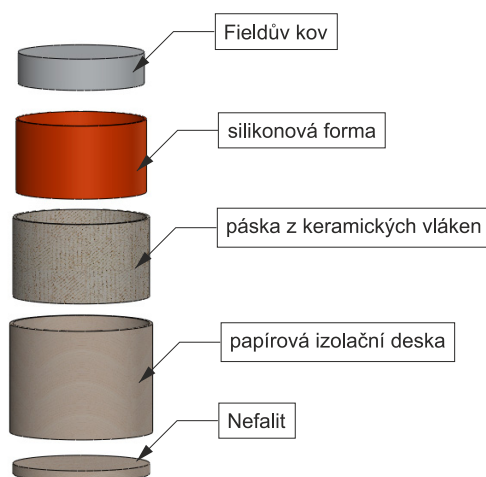
	Hmotnost vody	Teplota vody	Hmotnost kovu	Teplota kovu	Ustálená teplota	Měrná tepelná kapacita kovu
	m_1 (kg)	T_1 (°C)	m_2 (kg)	T_2 (°C)	T (°C)	c_2 (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)
měření I	0,249	49,992	1,141	22,485	41,192	500,885
měření II	0,251	49,584	1,114	22,890	41,263	495,801

Průměrná hodnota měrné tepelné kapacity Fieldova kovu pro 50 °C je 498,3 J·kg⁻¹·K⁻¹. Tato hodnota se od hodnoty pro 20 °C (200,72 J·kg⁻¹·K⁻¹) značně liší, což potvrzuje silnou závislost měrné tepelné kapacity na teplotě. Zmíněná závislost se projeví při modelaci teplotního pole v numerickém modelu v kapitole 4.2. Pro pokojovou teplotu nelze měrnou tepelnou kapacitu Fieldova kovu pomocí použitého kalorimetru kvůli minimálnímu rozdílu teplot změřit, aniž by vznikla velká chyba měření.

3.2 Návrh kelímku

Dalším krokem v návrhu konstrukčního provedení pece byl výběr kelímku pro uložení kovové vsázky. Vzhledem k tomu, že je vsázka tvořena kovem s nízkou teplotou tavení (60 °C), nebylo nutné k výrobě kelímku použít žádný speciální materiál. Vhodně v tomto případě posloužila silikonová forma na pečení s teplotní odolností do 230 °C. Formy se vyrábějí o vnitřním průměru 6 cm, takže navíc ideálně obepínají kovový ingot a nevzniká tak vzduchová mezera, která by zbytečně zhoršovala tavení. Silikonová forma ale není sama o sobě pevná, navíc nijak dobře neizoluje, proto bylo po prvním neúspěšném experimentu (viz kapitola 3.3) přistoupeno k výrobě nosného izolačního kelímku zobrazeného na Obr. 3.1, který těsně obepíná silikonovou formu. Stěny kelímku byly vyrobeny z ohebné papírové izolační desky a opatřeny vrstvou izolační pásky z keramických vláken. Dno kelímku bylo zhotoveno z izolačního materiálu Nefalit o tloušťce 5 mm.

Pro zachování co nejlepších podmínek tavení bylo vyrobeno víko z plexiskla, které dosedá na horní okraj kelímku a minimalizuje tak tepelné ztráty při tavení.



Obr. 3.1 Jednotlivé vrstvy kelímku pro tavení vsázky

3.3 Stanovení potřebného výkonu

Pro konstrukci indukční tavicí pece je důležité stanovit energii, která je nutná k roztavení vsázky. Teplo, potřebné k ohřevu vsázky, se určí ze vztahu

$$Q = m \cdot c \cdot (T_2 - T_1), \quad (3.4)$$

kde m je hmotnost vsázky, c je měrná tepelná kapacita materiálu, T_2 je teplota, při které dojde k roztavení materiálu a T_1 je počáteční teplota kovu. Pro Fieldův kov o hmotnosti 340 g a měrné tepelné kapacitě $200,72 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ je teplo potřebné k ohřátí vsázky z pokojové teploty $20 \text{ }^\circ\text{C}$ na teplotu tavení $60 \text{ }^\circ\text{C}$ rovno 2728,8 J. Nutný výkon pece byl poté stanoven ze vztahu

$$P = \frac{Q}{\Delta t}, \quad (3.5)$$

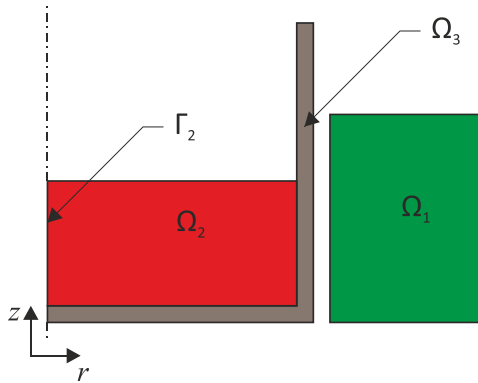
kde Δt je čas potřebný k dosažení teploty tavení. Tento čas byl pro výpočet odhadnut na 3 min, což představuje výkon o velikosti 15,16 W. Na základě této skutečnosti byl následně optimalizován numerický model.

3.4 Návrh cívky

Numerický model indukční tavicí pece byl zpracován v programu Agros2D, který pro řešení parciálních diferenciálních rovnic popisujících řešené fyzikální pole využívá knihovnu Hermes2D založenou na adaptivní metodě konečných prvků vyššího řádu přesnosti – hp-FEM. Indukční ohřev představuje slabě sdruženou úlohu integrující působení elektromagnetického a teplotního pole. Model indukční pece byl řešen jako 2D úloha za použití osové symetrie.

Definiční oblast elektromagnetického modelu je tvořena oblastí induktoru Ω_1 , vsázky

Ω_2 , kelímku Ω_3 a okolního vzduchu ohraničeného fiktivní hranicí Γ_1 (hranice Γ_1 není kvůli úspoře prostoru na Obr. 3.2 uvedena). Osovou symetrii modelu tvoří hranice Γ_2 .



$$\Omega_1: \quad \text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \text{rot} \mathbf{A} \right) = \mathbf{J}_v \quad (3.6)$$

$$\Omega_2: \quad \text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \text{rot} \mathbf{A} \right) + j\omega\gamma\mathbf{A} = 0 \quad (3.7)$$

$$\Omega_3, \text{ vzduch: } \text{rot} (\text{rot} \mathbf{A}) = 0 \quad (3.8)$$

$$\Gamma_1, \Gamma_2: \quad A = 0 \quad (3.9)$$

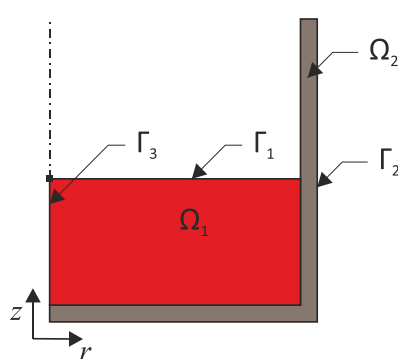
Obr. 3.2 Jednotlivé oblasti a hranice elektromagnetického modelu a k nim příslušné parciální diferenciální rovnice

Rozložení harmonicky proměnného elektromagnetického pole při indukčním ohřevu lze se znalostí symbolicko-komplexní metody popsat rovnicí

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \text{rot} \mathbf{A} \right) + j\omega\gamma\mathbf{A} = \mathbf{J}_v, \quad (3.10)$$

kde μ je magnetická permeabilita, \mathbf{A} je fázor vektorového elektromagnetického potenciálu, ω je úhlová frekvence, γ je elektrická vodivost a \mathbf{J}_v je fázor hustoty vnějších proudů. Rovnice popisující jednotlivé oblasti indukční pece jsou uvedeny na Obr. 3.2. Hranice Γ_1 ohraničuje definiční oblast problému. Uvažujeme-li její dostatečnou vzdálenost od indukční pece, můžeme na ní zavést Dirichletovu okrajovou podmínku (3.9), vyjadřující totožnost této hranice se siločárou magnetického pole. Identická okrajová podmínka platí také pro osu symetrie Γ_2 .

Definiční oblast teplotního modelu je tvořena oblastí vsázky Ω_1 a oblastí kelímku Ω_2 . Model je ohraničen hranicemi Γ_1 , Γ_2 a osou symetrie Γ_3 .



$$\Omega_1, \Omega_2: \quad \text{div} (\lambda \text{ grad } T) = \rho c_p \frac{dT}{dt} - p_j \quad (3.11)$$

$$\Gamma_1, \Gamma_2: \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T - T_0) + \varepsilon\sigma(T^4 - T_0^4) \quad (3.12)$$

$$\Gamma_3: \quad \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad (3.13)$$

Obr. 3.3 Jednotlivé oblasti a hranice teplotního modelu a k nim příslušné parciální diferenciální rovnice

Rozložení teplotního pole popisuje Fourier-Kirchhoffova parciální diferenciální rovnice pro vedení tepla (3.11), kde λ je tepelná vodivost materiálu, T je teplota, ρ je hustota, c_p je tepelná kapacita a p_j jsou měrné Jouleovy ztráty. V případě teplotního pole se jedná o úlohu přechodového děje. Hranice Γ_1 a Γ_2 respektují přestup tepla konvekcí a radiací, takže pro ně platí rovnice (3.12), kde α je koeficient přestupu tepla, ε je emisivita povrchu, σ je Stefan-Boltzmannova konstanta ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$), T a T_0 je teplota vsázky resp. kelímku a teplota okolního prostředí. Vzhledem k nízké teplotě vsázky i kelímku byl přestup tepla sáláním zanedbán. Přes osu symetrie Γ_3 je nulový tepelný tok, proto je jí přiřazena Neumannova okrajová podmínka (3.13).

Pro určení počtu závitů a velikosti induktoru bylo využito porovnání výkonu, který je nutný k roztavení vsázky, se ztrátami, které ve vsázce vzniknou při průchodu proudu induktorem. Při návrhu bylo dostačující použít pouze model magnetického pole a v danou chvíli neuvažovat pole teplotní. Velikost vsázky, silikonové formy i všechny materiálové vlastnosti byly již v tuto dobu známé a byly tak během optimalizace neměnné. K navinutí induktoru byl z dostupných velikostí vybrán průměr vodiče 1,5 mm, který je při dané frekvenci 1500 Hz plně využit, dokáže přenést potřebný proud a přitom je ho stále možné navinout do požadovaného tvaru³. Rozměry cívky byly stanoveny na 12 x 21 mm, což při známém průřezu vodiče odpovídá 112 závitům. Kvůli zajištění co nejrychlejšího ohřevu byla uvažována vzduchová mezera 1 mm. Během optimalizace se měnila pouze velikost proudové hustoty.⁴ Jako vhodné řešení byla vybrána proudová hustota $2,22 \cdot 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$, které odpovídaly ztráty 17,55 W a velikost proudu 5 A.

Podle tohoto modelu byla navinuta reálná cívka, pomocí níž se sice podařilo vsázku bez problémů roztavit, ale induktor téměř těsně obepínal silikonovou formu, takže došlo k porušení izolace vyzařovaným teplem. V tomto experimentu ještě nebyla silikonová forma vložena do izolačního kelímku, což se ukázalo jako nevhodné pro dlouhodobé používání a bylo přistoupeno k další optimalizaci, tentokrát pro větší vzduchovou mezeru a vylepšený kelímek, který byl nově opatřen izolací popsanou v kapitole 3.2. Pro zamezení přehřívání induktoru byl ještě pod kelímek přidán malý ventilátor.

Rozměry cívky pro druhý numerický model bylo nutné kvůli rozšířené vzduchové mezeře zvětšit, aby bylo stále možné dosáhnout dostatečných ztrát ve vsázce. Při vzduchové

³ Hloubka vniku měděného vodiče o parametrech $\gamma = 58,82 \cdot 10^6 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ a $\mu_r = 1$ je při frekvenci 1500 Hz rovna 1,7 mm, proudová zatížitelnost vodiče o průměru 1,5 mm je 6,5 A.

⁴ Podrobněji je návrh numerického modelu popsán v kapitole 3.3 v [1]

mezeře 2,5 mm je zapotřebí cívka o rozměrech 15 x 21 mm, což odpovídá 210 závitům, proudové hustotě $3,33 \cdot 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ a ztrátám 45,5 W. Na základě těchto údajů byla navinuta další cívka s reálnými rozměry a parametry uvedenými v Tab. 3.5. Mezi jednotlivými vrstvami byla cívka izolována izolační páskou a po navinutí ještě jednou celá ovinuta, aby tak byla zpevněna pro další manipulaci.

Tab. 3.5 Parametry navinuté cívky

Počet závitů	N (-)	210
Indukčnost	L (H)	$4,16 \cdot 10^{-3}$
Odpor	R (Ω)	0,733
Šířka	d (m)	$3,1 \cdot 10^{-2}$
Výška	v (m)	$2,5 \cdot 10^{-2}$
Průřez	$S_{\text{cívky}}$ (m^2)	$7,75 \cdot 10^{-4}$
Průřez	$S_{\text{vodiče}}$ (m^2)	$1,767 \cdot 10^{-6}$
Koeficient plnění	k (-)	0,479

3.5 Návrh měniče

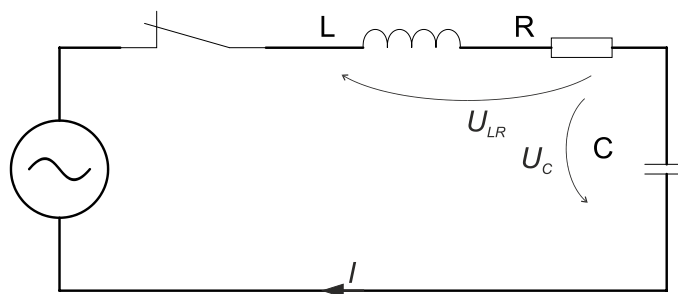
Dále bylo nutné vybrat pro indukční pec vhodný napájecí zdroj. Vzhledem k záměru použít experiment jako exponát na Dni otevřených dveří FEL, byl jako napájecí zdroj použit kompaktní frekvenční měnič Commander SK od firmy Control Techniques. Hlavním kritériem pro výběr byl možný frekvenční rozsah zdroje. Požadovaná frekvence byla určena podle hloubky vniku magnetického pole do materiálu. Jak lze vidět z Tab. 3.6, se zvyšující se frekvencí se snižuje hloubka vniku, je tedy žádoucí vybrat co nejvyšší možnou frekvenci, aby bylo na povrchu vsázky dosaženo dostatečné hodnoty Jouleových ztrát. Situaci navíc zhoršuje nemagnetický materiál vsázky. Z těchto důvodů byl vybrán měnič s frekvenčním rozsahem do 1500 Hz, což je nejvyšší možný rozsah běžně dostupných měničů. Tato frekvence bude využívána pro všechna další měření. Maximální proudová zatížitelnost měniče je 9,6 A. Vzhledem k tomu, že se jedná pouze o prototyp indukční pece, je frekvenční měnič značně předimenzovaný, aby se dal v případě potřeby použít i pro větší proudy.

Tab. 3.6 Hloubka vniku Fieldova kovu pro různé frekvence při teplotě 20 °C

Frekvence	f (Hz)	50	500	1000	1500	5000	10000
Hloubka vniku	δ (cm)	5,133	1,623	1,148	0,937	0,513	0,363

3.6 Návrh elektrického zapojení

Reálný induktor je charakterizován nejen svou indukčností, ale také odporem, který respektuje odpor vinutí. Pro zlepšení napěťových poměrů lze použít sériovou kompenzaci jako na Obr. 3.4, která sníží napájecí napětí, ale přitom nijak nezmění velikost procházejícího proudu. Fázorový diagram pro toto zapojení je kvůli malému protékajícímu proudu a minoritnímu vlivu rezistivity velmi nepřehledný a proto není uveden.



Obr. 3.4 Sériová kompenzace

Hodnota připojené kapacity musí být tak velká, aby se obvod dostal do sériové rezonance. Při rezonanční frekvenci představuje celý obvod pouze ohmickou zátěž. Aby byla imaginární složka impedance nulová, musejí se induktivní a kapacitní reaktance rovnat. Na této skutečnosti je založen tzv. Thompsonův vztah pro výpočet rezonanční frekvence

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{LC}} \quad (3.14)$$

Pro frekvenci 1500 Hz, která je v obvodu využívána, je velikost kapacity kompenzačního kondenzátoru $2,706 \cdot 10^{-6}$ F.

Jako kompenzační kondenzátor byl vybrán motorový rozběhový kondenzátor s kapacitou $3 \cdot 10^{-6}$ F, který se z dostupných možností nejvíce přibližoval vypočítané hodnotě. Při použití této kapacity kondenzátoru je obvod mírně nedokompenzovaný, protože je kapacitní reaktance menší než induktivní a celková impedance obvodu má tak induktivní charakter.

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = 35,368 \, \Omega \quad (3.15)$$

$$X_L = \omega L = 39,207 \, \Omega \quad (3.16)$$

Jelikož oběma prvky prochází stejný proud, napětí na indukčnosti tento proud předbíhá o 90° a napětí na kapacitě se za tímto proudem o 90° zpožďuje. Napětí U_L a U_C jsou proto v protifázi a jejich hodnoty se odečítají. Výsledný fázor amplitudy napájecího napětí je dán vztahem

$$U_0 = \sqrt{(U_C - U_L)^2 + U_R^2}, \quad (3.17)$$

kde

$$U_R = R \cdot I \quad (3.18)$$

$$U_L = \sqrt{U_{LR}^2 - U_R^2}. \quad (3.19)$$

Efektivní hodnoty napětí změřené na jednotlivých prvcích jsou uvedeny v Tab. 3.7.

Tab. 3.7 Změřené velikosti napětí v obvodu při proudu 5 A a frekvenci 1500 Hz

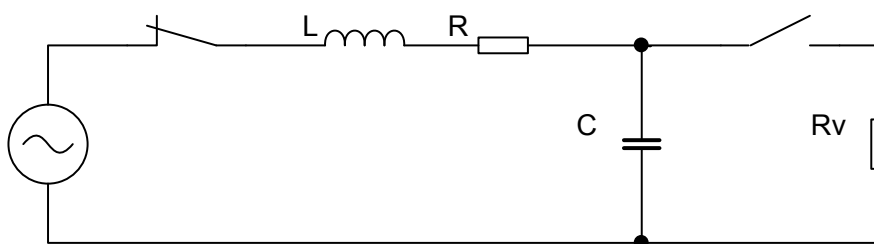
	bez vsázky	se vsázkou
U_{LR} (V)	206	196
U_C (V)	188	188,75
U_0 (V)	21,1	22,5

Vstupní napětí vypočítané podle vzorce (3.17) má velikost 18,34 V, což se od změřené hodnoty liší jen minimálně. Ze změřené hodnoty napětí na induktoru lze vyjádřit i indukčnost cívky jako

$$L = \frac{U_L}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot I}. \quad (3.20)$$

Indukčnost cívky je pro změřené napětí 4,37 mH. Tato hodnota je téměř totožná s hodnotou 4,16 mH změřenou digitálním multimetrem, která je uvedena v Tab. 3.5

Kompenzační kondenzátor se může při průchodu proudu zatíženým obvodem nabít maximálně na hodnotu napětí zdroje, tedy na $U_{0m} = 22,5 \cdot \sqrt{2} = 31,819$ V. Kvůli zajištění bezpečnosti práce při provádění experimentu byl přidán paralelního vybíjecí obvod, který slouží k bezpečnému vybití kondenzátoru, viz Obr. 3.5.



Obr. 3.5 Schéma kompenzovaného obvodu s paralelním vybíjecím odporem

Po sepnutí spínače v paralelní větvi dojde k uzavření obvodu obsahujícího pouze kondenzátor, nabitý na napětí zdroje, a vybíjecí rezistor. V prvním okamžiku je velikost proudu dána počátečním napětím na kondenzátoru a velikostí odporu rezistoru.

$$I_0 = \frac{U_C}{R} = \frac{U_0}{R}. \quad (3.21)$$

Poté začne obvodem procházet vybíjecí proud i_V a kondenzátor se začne postupně vybíjet podle rovnice

$$i_V(t) = -I_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (3.22)$$

kde, t je čas a τ představuje časovou konstantu, která je pro příslušné zapojení rovna

$$\tau = R \cdot C. \quad (3.23)$$

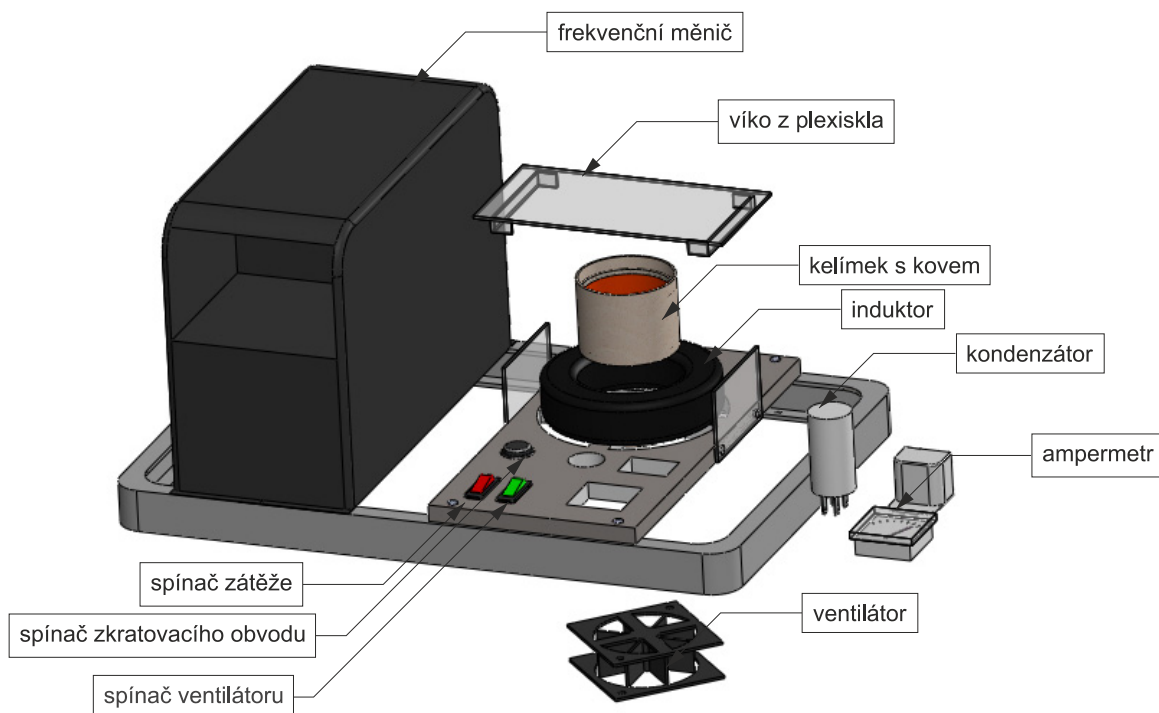
Při průchodu vybíjecího proudu vzniká na rezistoru úbytek napětí u_R a energie kondenzátoru se na něm přeměňuje na teplo. Výkon na rezistoru je roven

$$P = \frac{U_0^2}{R} \cdot e^{-\frac{2t}{\tau}}. \quad (3.24)$$

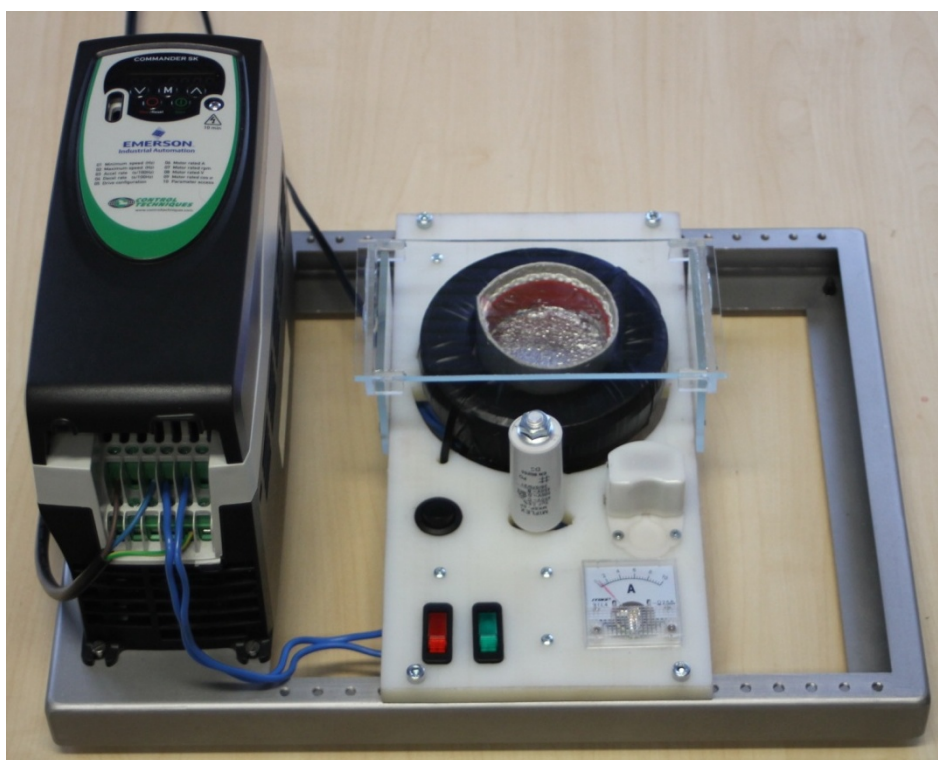
Při hledání velikosti odporu rezistoru byl požadovaný čas, za který je vhodné kondenzátor vybit, stanoven na 1 ms. Vypínací doba je tak dostatečně krátká pro zajištění bezpečného vybití, ale přitom zbytečně nezvyšuje výkon. Pro jednotlivé hodnoty rezistorů byla poté ověřována velikost výkonu, který na nich při vybíjení kondenzátoru vznikne, aby bylo zajištěno, že rezistor nebude výkonově přetížen. Z dostupných velikostí byl vybrán odpor o velikosti 550 Ω a výkonové zatížitelnosti 2 W, na kterém při vybíjení za požadovanou 1 ms vznikne výkon 0,548 W.

3.7 Návrh celkového uspořádání

Do obvodu byl dále zapojen analogový ampérmetr uzpůsobený pro měření střídavých průběhů, který slouží ke snadnému zjištění velikosti potřebného proudu. Celkové uspořádání experimentu je zobrazeno na Obr. 3.6. Reálné provedení je uvedeno na Obr. 3.7.



Obr. 3.6 Celkové uspořádání experimentu pro indukční tavení



Obr. 3.7 Experimentální zařízení pro tavení nízkoteplotních kovů

4 Měření na experimentálním zařízení

Ačkoli je v úvodu práce zmíněno, že byl jako zdroj pro indukční tavení použit kompaktní frekvenční měnič, pro všechna následující měření bude využíván generátor harmonického signálu a vysokofrekvenční zesilovač. Frekvenční měnič je výhodné použít v případě, že je experiment nutné přenášet, pro přesná měření je ale vhodnější použít vysokofrekvenční zesilovač. Nevýhodou frekvenčních měničů je totiž to, že jsou zdrojem značného rušení, které může nežádoucím způsobem zkreslit hodnoty měřených veličin. Během měření byla osciloskopem nastavena frekvence zdroje 1500 Hz a procházející proud byl regulací napětí vysokofrekvenčního zdroje udržován na hodnotě 5A. Napěťové a proudové poměry v obvodu byly během měření sledovány na analyzátoru kvality sítě Chauvin Arnoux s přesností měření $\pm 0,1\%$ vstupního signálu.

Po připojení cívky k vysokofrekvenčnímu zdroji lze zaznamenat hluk, který se stupňuje se zvyšováním frekvence protékajícího proudu. Jak totiž střídavý proud prochází cívkou, závitů cívky se k sobě střídavě přitahují a odpuzují a tím se nepatrně mechanicky rozkmitají. Jemná oscilace závitů pak způsobuje nepříjemný zvuk v podobě pískání.

4.1 Měření magnetického pole cívky

Pro měření indukce magnetického pole cívky byla sestavena měřicí aparatura sestávající z malé vzduchové měřicí cívky a rastru z plexiskla, jak ukazuje Obr. 4.1. Měřicí cívka byla navinuta na dřevěné jádro vysoustružené do požadovaného tvaru.



Obr. 4.1 Měření magnetického pole induktoru

V tabulce Tab. 4.1 jsou uvedeny parametry měřicí cívky. Pro výpočet průřezu cívky byl použit její střední poloměr.

Tab. 4.1 Parametry měřicí cívky

Vnitřní poloměr	$r_{\text{vnitřní}} \text{ (m)}$	$2 \cdot 10^{-3}$
Vnější poloměr	$r_{\text{vnější}} \text{ (m)}$	$6,5 \cdot 10^{-3}$
Průřez cívky	$S_m \text{ (m}^2\text{)}$	$5,675 \cdot 10^{-5}$
Počet závitů	$N_m \text{ (-)}$	500

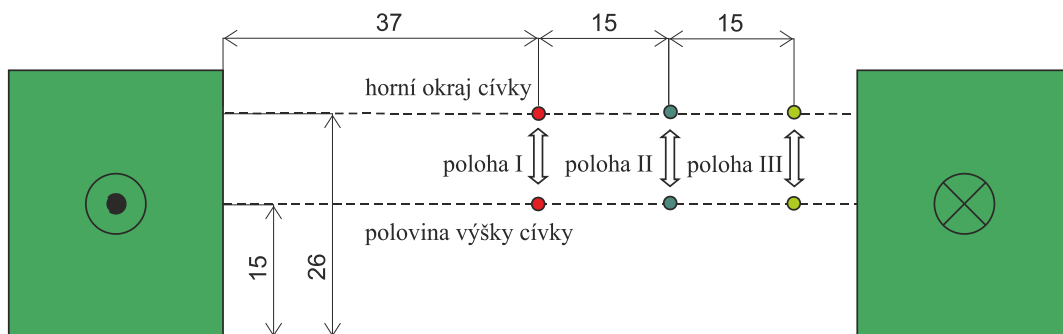
Vývody měřicí cívky byly připojeny k osciloskopu, který snímal hodnotu indukovaného napětí. Při porovnání napětí na induktoru s napětím indukovaným do měřicí cívky byl patrný fázový posuv 180° , který potvrdil malý vliv rezistivity. Napětí se v měřicí cívce indukuje v okamžiku, kdy induktorem prochází střídavý elektrický proud a vytváří se tak kolem něj proměnný magnetický tok. Tento děj je popisován Faradayovým zákonem o elektromagnetické indukci, podle něhož se indukované napětí rovná záporně vzaté změně magnetického indukčního toku

$$U_i = -N \frac{d\Phi}{dt}, \quad (4.1)$$

kde Φ je spřažený magnetický indukční tok plochou cívky a N je počet závitů. Po derivaci časového průběhu magnetického indukčního toku získáme pro maximální hodnotu magnetické indukce v homogenním poli vztah

$$B = \frac{U_i}{N \cdot \omega \cdot S}, \quad (4.2)$$

kde S značí plochu závitu. Indukované napětí bylo měřeno celkově v šesti polohách, jak ukazuje Obr. 4.2. Pro srovnání byly změřeny i hodnoty indukovaného napětí při vložení kovové vsázky do induktoru, v tomto případě byla měřena pouze poloha u horního okraje cívky a to pouze pro polohu I a II, kvůli nedostatku prostoru pro měřicí cívku.



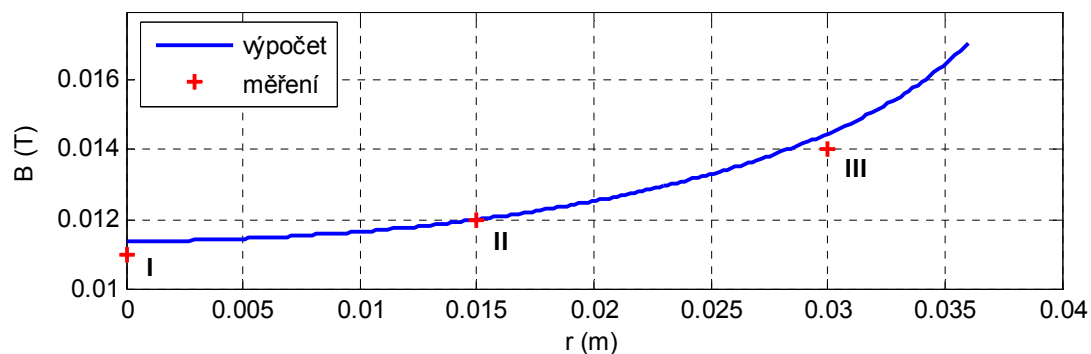
Obr. 4.2 Polohy měřicí cívky pro měření magnetické indukce (induktor v podélném řezu)

V následující tabulce jsou uvedeny změřené hodnoty indukovaného napětí pro frekvenci 1500 Hz a procházející proud 5 A. Pro změřené indukované napětí je vždy uvedena příslušná hodnota magnetické indukce vypočítaná ze vztahu (3.5), která byla následně použita pro kalibraci numerického modelu viz kapitola 4.1 v [1]. Hodnoty získané aplikací Agros2D jsou pro porovnání v Tab. 4.2 taktéž uvedeny.

Tab. 4.2 Změřené a vypočítané hodnoty indukce magnetického pole v cívce

	Poloha I			Poloha II			Poloha III		
	U_i (V)	B (mT)		U_i (V)	B (mT)		U_i (V)	B (mT)	
	měření	výpočet		měření	výpočet		měření	výpočet	
Horní hrana	3,1	12	11	3,3	12	12	3,9	15	14
Polovina výšky	3,2	12	13	3,5	13	13	4,4	16	17
Vložená vsázka	1,9	7	7	2,52	9	9	-	-	-

Následující grafy ukazují porovnání hodnot indukce získaných měření (změřené hodnoty jsou v grafech označeny červeně) a hodnot spočítaných v numerickém modelu. Horizontální osa představuje vzdálenost měřeného bodu od středu cívky. Na Obr. 4.3 lze vidět rozložení magnetické indukce v případě, že je měřicí cívka na horní hraně induktoru.

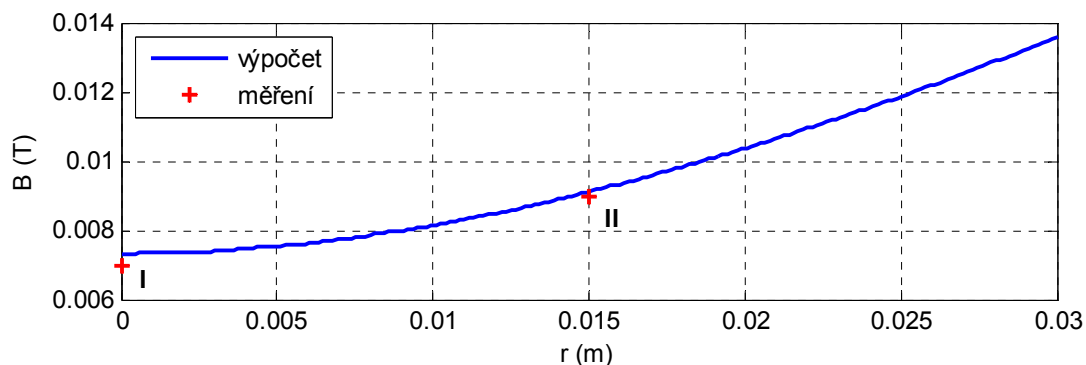


Obr. 4.3 Velikost magnetické indukce na horní hraně induktoru v závislosti na vzdálenosti od středu

Z grafu pro závislost magnetické indukce na vzdálenosti od středu induktoru je patrné, že čím blíže k povrchu induktoru se bod nachází, tím vyšší je v tomto bodě indukce magnetického pole. Průměr závitů navinutého induktoru je totiž mnohem větší než jeho délka a v jeho vnitřku tak vzniká nehomogenní magnetické pole, které má největší hodnotu na povrchu a směrem ke středu se jeho intenzita zmenšuje. Se zmenšující se intenzitou magnetického pole se poté zmenšuje i jeho indukce. V případě, že je do induktoru vložena vsázka z kovového materiálu, je hodnota změřené indukce podstatně nižší. To je způsobeno

vířivými proudy, které se do vsázky indukují a působí tak proti magnetickému poli induktoru.

Na Obr. 4.4 je zobrazeno, jak se mění velikost magnetické indukce v případě vložené kovové vsázky.



Obr. 4.4 Velikost magnetické indukce při vložení vsázky do induktoru v závislosti na vzdálenosti od středu

Magnetická indukce byla změřena i vně induktoru, aby bylo zjištěno, jaké množství magnetického pole prostupuje prostorem mimo indukční pec. Následující tabulka obsahuje údaje změřené v polovině výšky induktoru, kde je měřitelná pouze reálná složka magnetické indukce. Magnetická indukce byla změřena až do vzdálenosti 10 cm od induktoru, dále byla hodnota magnetické indukce běžným osciloskopem neměřitelná.

Tab. 4.3 Magnetická indukce v závislosti na vzdálenosti od induktoru

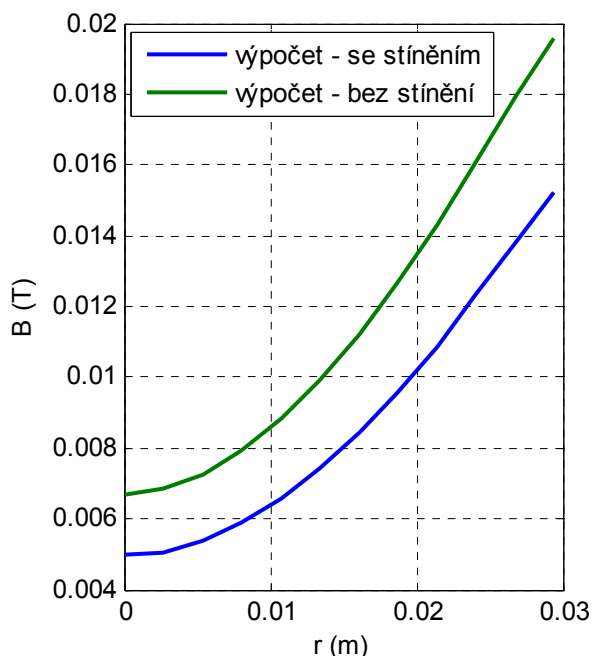
r (cm)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
B (mT)	3,964	2,046	1,324	0,86	0,628	0,449	0,329	0,247	0,187	0,15

Nařízení vlády o ochraně zdraví před neionizujícím zářením č.1/2008 sbírky [36] uvádí, že limitní hodnota magnetické indukce pro nepřetržitou expozici osoby v homogenním elektromagnetickém poli o frekvenci 1500 Hz je $6,25 \cdot 10^{-6}$ T. Takto nízkou hodnotu se již experimentálně nepodařilo změřit, proto byl použit výpočet pomocí numerického modelu. Z grafu na Obr. 4.6 je patrné, že magnetická indukce vně cívky klesne na limitní hodnotu $6,25 \cdot 10^{-6}$ T až ve vzdálenosti 48 cm. Elektromagnetické pole vytvořené indukční pece je ale silně nehomogenní. Pro experimentální měření nebylo stínění indukční pece uvažováno, do budoucna je ale z hlediska hygienických limitů vhodné stínění doplnit a zamezit tak prostupu rozptylového magnetického toku do okolí. Pro menší indukční pece se ve většině případů volí stínění vodivým pláštěm, které má nižší hmotnost a je cenově méně náročné než svazky transformátorových plechů. Elektromagnetické pole naindukované do stínícího pláště zde působí proti poli vyvolanému induktorem, po superpozici dílčích polí dojde ke snížení

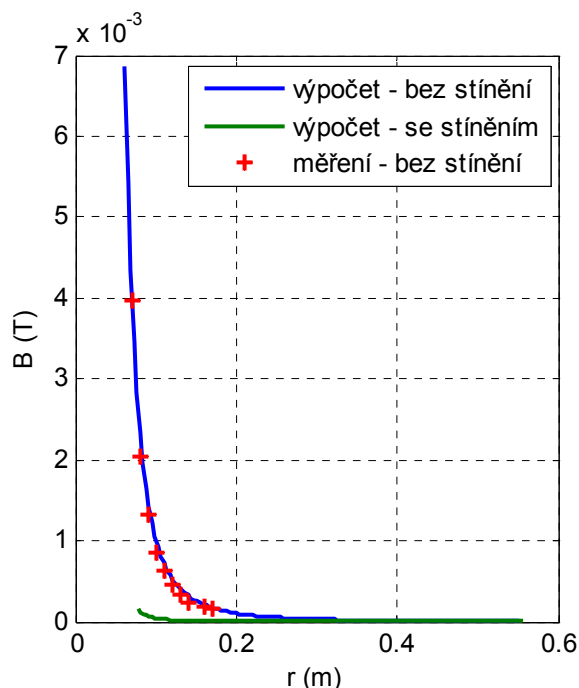
intenzity magnetického pole za stínícím pláštěm. Zároveň se ale sníží také magnetické pole uvnitř induktoru (viz. Obr. 4.5) a klesne tak elektrická účinnost indukční pece. Pro efektivní stínění indukční pece je ideální použít válcový stínící plášť z elektricky dobře vodivého materiálu, který bude mít vnitřní poloměr o velikosti dvojnásobku vnitřního poloměru induktoru. Navinutý induktor má vnitřní poloměr 7,3 cm, což odpovídá poloměru pláště 14,6 cm. Aby ve vodivém plášti vznikly co nejmenší ztráty, volí se jeho tloušťka

$$d = \frac{\pi}{2} \cdot \delta, \quad (4.3)$$

kde δ je hloubka vniku elektromagnetického pole do materiálu⁵. Pro hliníkový plášť⁶ je při frekvenci 1500 Hz hloubka vniku rovna 2,12 mm. Materiál byl vybrán s ohledem na jeho nízkou cenu a přitom dostačující vodivost pro danou aplikaci. Ideální tloušťka stínícího pláště je pro zmiňovaný materiál 3,3 mm. Pro výpočet numerického modelu byl použit plech o tloušťce 4 mm, který respektuje rozměry reálných plechů. Při uvažování hliníkového stínění výšky 10 cm (stínění vystředěné s příčnou osou induktoru) jsou dle numerického modelu ztráty ve vodivém plášti 7,14 W a ve vsázce 18,97 W. Při použití stínění klesne hodnota elektromagnetické indukce na limitní hodnotu $6,25 \cdot 10^{-6}$ T ve vzdálenosti 7,6 cm od induktoru, jak lze vidět z grafu na Obr. 4.6.



Obr. 4.5 Rozložení indukce magnetického pole ve vsázce



Obr. 4.6 Rozložení indukce magnetického pole vně induktoru

⁵ Kompletní odvození zmiňovaných vztahů je uvedeno v literatuře [2]

⁶ Konduktivita hliníku je $\gamma = 37,7 \cdot 10^6 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$

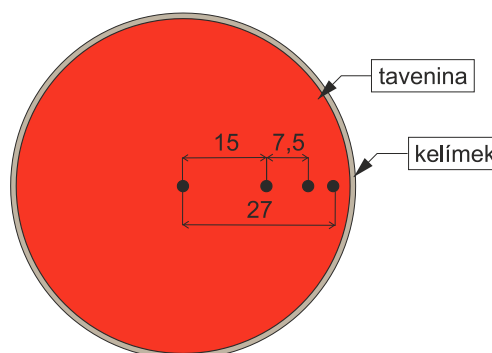
4.2 Měření teploty při tavení vsázky

Nejprve bylo pro měření teploty vsázky v průběhu tavení použito bezkontaktního digitálního pyrometru. Základním předpokladem pro správné vyhodnocení měřené povrchové teploty je nastavení přesné hodnoty emisivity materiálu, která vyjadřuje vztah mezi intenzitou záření absolutně černého tělesa při dané teplotě a intenzitou záření měřeného povrchu. Emisivita kovů je většinou poměrně nízká, což může mít nepříznivý vliv na kvalitu výsledků, navíc je teplotně závislá, a tak nelze kontinuálně odečítat teplotu při ohřevu, aniž by se nemusela zadat nová hodnota emisivity. Z těchto důvodů se přistoupilo ke kontaktnímu měření teploty za pomoci teplotního senzoru obsahujícího termočlánek.

Pro tavení byly použity tři tablety kovu o průměru 5,5 cm, které měly po převážení v součtu 340 g. Během tavení byl vždy spuštěn ventilátor umístěný pod cívkou a v průběhu celého ohřevu byl kelímek uzavřen víkem z plexiskla. Teplotní senzor byl připojen k měřicí kartě LabJack U3-HV, která sloužila k zajištění sběru změřených dat. Pomocí softwaru LJStreamUD byla nastavena vzorkovací frekvence 20 Hz, takže se změřená teplota zaznamenávala každých 0,05 s. Měření teploty vsázky v průběhu tavení bylo provedeno pro čtyři polohy senzoru. Teplotní senzor byl vždy umístěn na dně kelímku a měnila se pouze jeho vzdálenost od středu, viz Tab. 4.4 a Obr. 4.7.

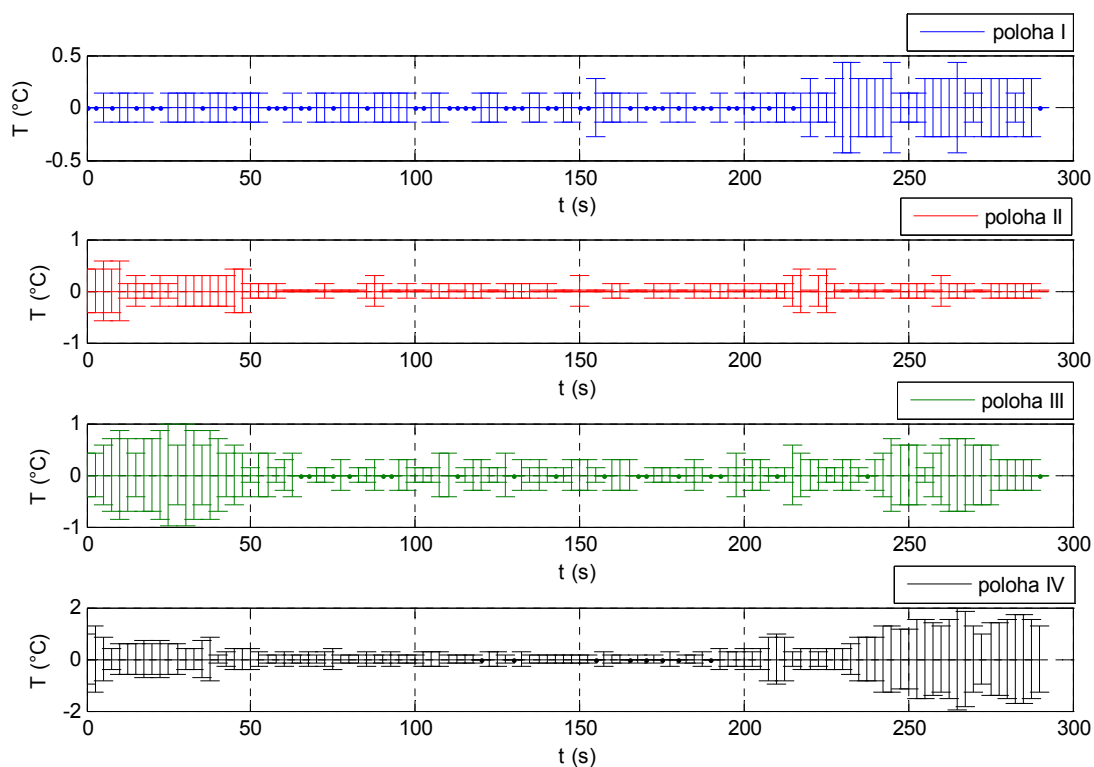
Tab. 4.4 Vzdálenost teplotního senzoru od středu kelímku

poloha I	r_1 (m)	0
poloha II	r_2 (m)	$15 \cdot 10^{-3}$
poloha III	r_3 (m)	$22,5 \cdot 10^{-3}$
poloha IV	r_4 (m)	$27 \cdot 10^{-3}$



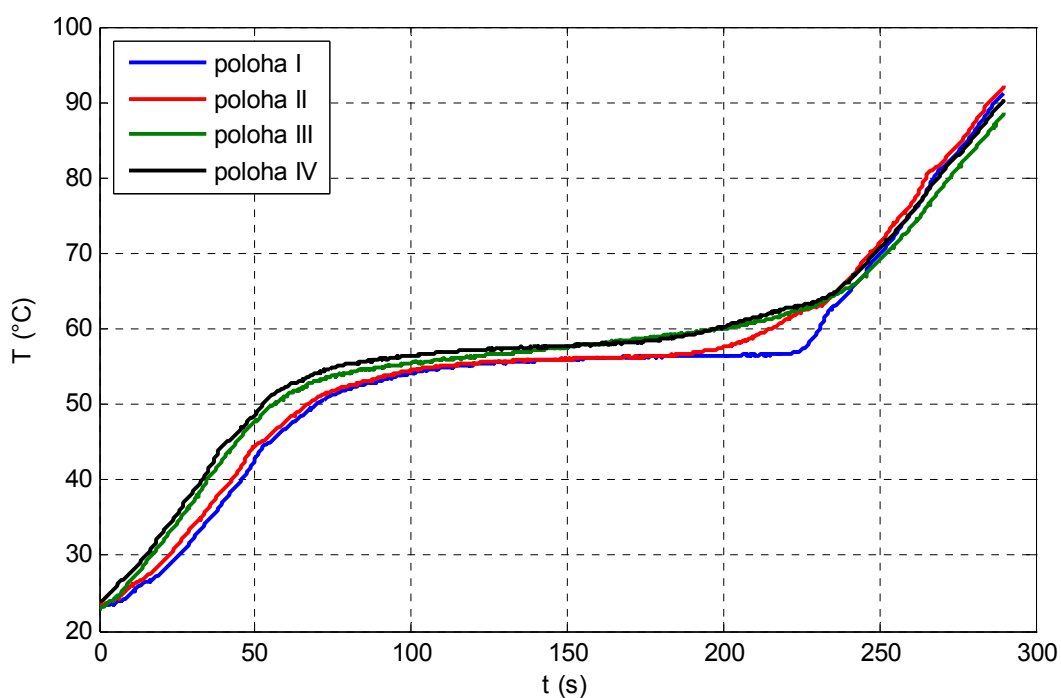
Obr. 4.7 Polohy senzoru pro měření teploty vsázky

Měření každé polohy bylo pro kontrolu provedeno dvakrát. Změřené teplotní průběhy se pro totožné uložení senzoru téměř neliší, jak lze vidět z grafu na Obr. 4.8, který obsahuje chybové úsečky zobrazující odchylku obou měření od jejich průměrné hodnoty. Největší rozdíly nastávají až v závěru měření, kdy již teplota velmi rychle stoupá a i tak nepřesahuje odchylka 2 °C. Udávaná přesnost měření pro použitý teplotní senzor EI-1034 je $\pm 0,22$ °C. Možností, jak ještě více eliminovat nepřesnosti měření, by bylo pořídit užší provedení senzoru. S ohledem na vedení tepla by měl být totiž termočlánek co nejtenčí.



Obr. 4.8 Chybové úsečky znázorňující odchylku dvou měření od jejich průměrné hodnoty pro různá uložení teplotního senzoru

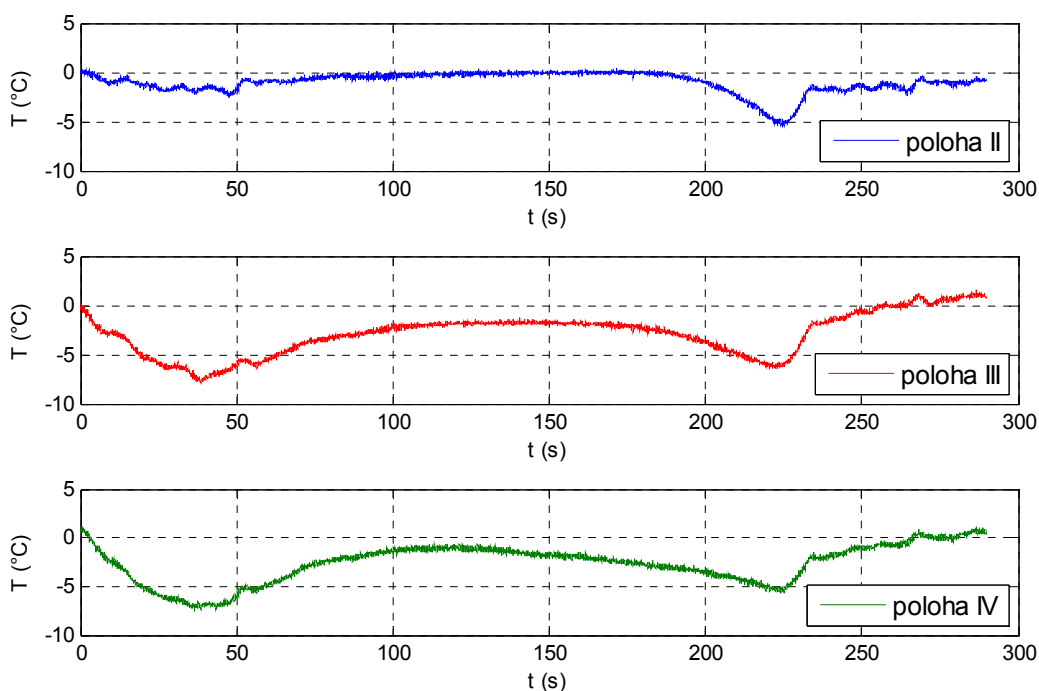
Graf na Obr. 4.9 obsahuje průběh teploty během indukčního ohřevu pro všechny čtyři polohy senzoru. Vzhledem k vysoké přesnosti měření (viz Obr. 4.8) je pro jednu polohu senzoru vykreslen pouze jeden průběh teploty získaný jako průměr ze dvou měření.



Obr. 4.9 Průběh teploty ve vsázce pro různé polohy teplotního senzoru

Na jednotlivých teplotních průbězích na Obr. 4.9. jsou zřejmé fázové přechody, kdy vsázka mění své skupenství z pevného na kapalné. V první části grafu je vidět postupný nárůst teploty kovu až do teploty tavení. Tato fáze trvá pro polohu I 100 s a teplota roste rychlostí $0,4 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$. V okamžiku, kdy vsázka dosáhne teploty tavení, nárůst teploty se na cca 115 s zastaví a kov začíná přecházet z pevné do kapalné fáze. Souhrnný čas potřebný pro roztavení 340 g Fieldova kovu je tedy pro uložení senzoru v poloze I 225 s. Po roztavení celého obsahu kelímku dojde opět k postupnému zvyšování teploty taveniny.

Při porovnání všech čtyř křivek si lze povšimnout, že než dosáhne vsázka teploty tavení, rychlost ohřevu se mění podle toho, kde byl uložen senzor. Obr. 4.10 zobrazuje rozdíly změřených hodnot pro polohy II, III a IV vzhledem k poloze I (senzor uložen ve středu vsázky).



Obr. 4.10 Rozdíly změřených hodnot pro polohy II, III a IV vzhledem k poloze I

Čím blíže okraji kelímku se senzor nachází, tím rychlejší nárůst teploty je zaznamenán. To je způsobeno tím, že teplo prostupuje vsázkou od krajů, a místa blíže k okraji kelímku se tak ohřejí rychleji. Rychlost ohřevu při ohřívání vsázky na teplotu tavení pro jednotlivá měření je uvedena v Tab. 4.5.

Tab. 4.5 Rychlost ohřevu při ohřívání vsázky na teplotu tavení a příslušná teplota tavení pro různé uložení teplotního senzoru

		Poloha I	Poloha II	Poloha III	Poloha IV
Rychlost ohřevu	($^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$)	0,371	0,376	0,406	0,416
Teplota tavení	T ($^{\circ}\text{C}$)	55,866	55,955	57,546	57,982

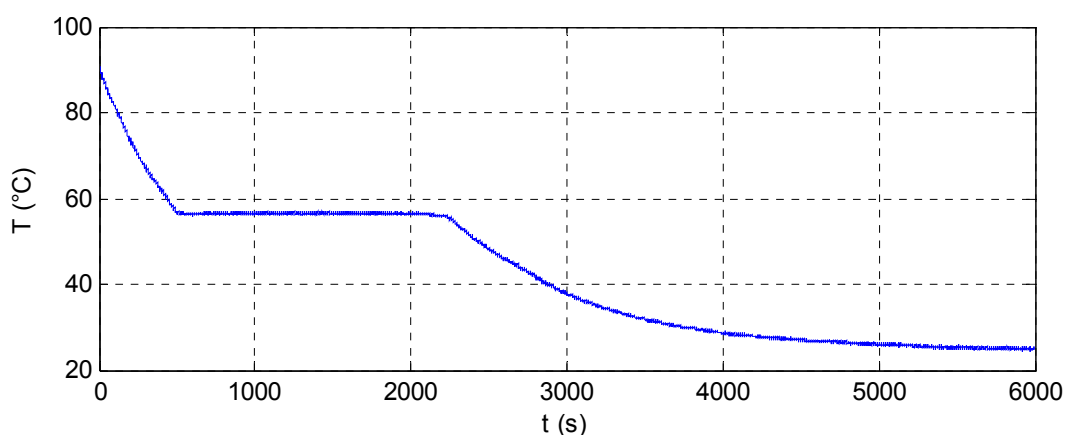
V další fázi, kdy dochází k postupnému roztavení celé vsázky, jsou průběhy teplot pro senzor uložený v poloze I i II téměř totožné, malá změna nastává u uložení senzoru do polohy III a IV, viz Obr. 4.10. Změna rychlosti tavení má totiž vliv na teplotu fázového přechodu, rychlejší nárůst teploty pak způsobuje zvýšení teploty tavení. Teplota tavení pro jednotlivá uložení senzoru je uvedena v Tab. 4.5. Hodnota byla určena jako průměrná teplota v té části křivky, kde okamžitá rychlost pro pětisekundové intervaly klesla pod hodnotu $0,09\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$.

Změřené hodnoty se značně liší od hodnot, které jsou uváděny v odborné literatuře. Například literatura [31] uvádí teplotu tavení Fieldova kovu $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, literatura [30] $62\text{ }^{\circ}\text{C}$ a literatura [32] dokonce $63,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Rozdíl může být zapříčiněn jemnými nuancemi ve složení materiálu.

Po celou dobu tavení byl napájecí proud regulací napětí z vysokofrekvenčního zesilovače udržován na konstantní hodnotě 5 A . Během ohřevu vsázky totiž docházelo k nárůstu proudu kvůli poklesu indukčnosti obvodu zapříčiněného vznikem vířivých proudů v tavenině.

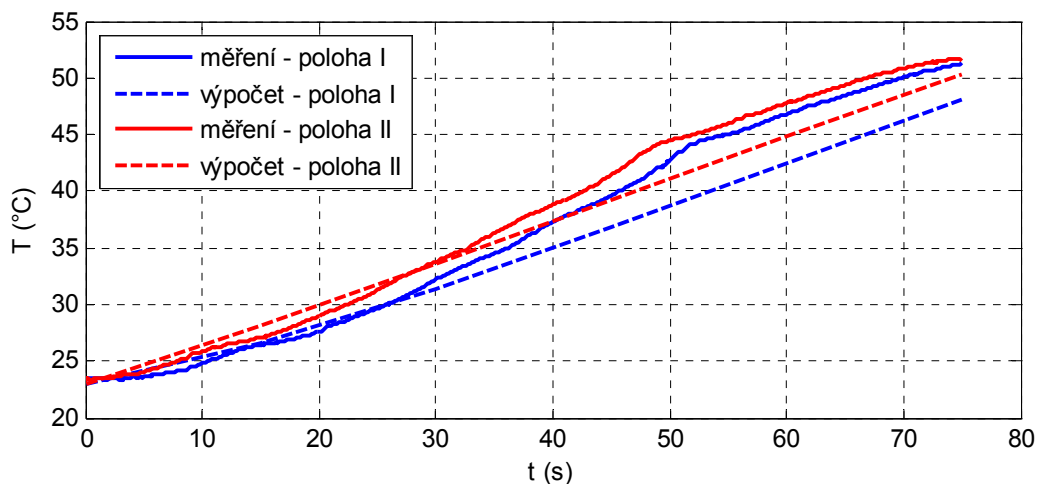
Během tavení lze pozorovat víření a vzdouvání hladiny taveniny. Magnetické síly působí zejména u stěn kelímku a směrem do středu vsázky se postupně zeslabují kvůli zeslabení elektromagnetického pole. Působící síly spolu s viskozitou materiálu určují rozložení pole rychlostí v tavenině. Nízká viskozita roztaveného kovu způsobuje turbulentní proudění taveniny, které se projevuje mírným chvěním hladiny. Vlivem elektrodynamických sil vzniká u stěn kelímku podtlak a v ose kelímku naopak přetlak, který zvedá hladinu ve středu kelímku. Vzduť hladiny je tím větší, čím menší je frekvence napájecího proudu. Při frekvenci 1500 Hz bylo za pomoci laserového dálkoměru změřeno vzduť hladiny 1 mm (změřená hodnota je průměrem ze 30 měření). Pro dálkoměr Leica Disto D5 je udávána přesnost měření $\pm 0,025\text{ mm}$.

Na Obr. 4.11 je zachycena ochlazovací křivka, která stejně jako křivka oteplovací zobrazuje znatelný fázový přechod, kdy se v tomto případě mění kapalná látka na pevnou postupnou krystalizací materiálu. Tepelný senzor byl pro toto měření uložen ve středu vsázky. Teplota fázového přechodu je $56,368\text{ }^{\circ}\text{C}$, což téměř odpovídá teplotě tavení změřené při ohřívání materiálu s totožným uložením senzoru. Rychlost ochlazování Fieldova kovu před dosažením fázového přechodu je $0,0673\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$. Čas potřebný k dosažení teploty tuhnutí je 504 s. Délka fázového přechodu je 1700 s a celé chlazení zpět na pokojovou teplotu trvá za daných podmínek 10 minut. Ochlazování bylo prováděno ve stejných podmínkách jako ohřev, tzn. se spuštěným ventilátorem umístěným pode dnem kelímku a s víkem z plexiskla.

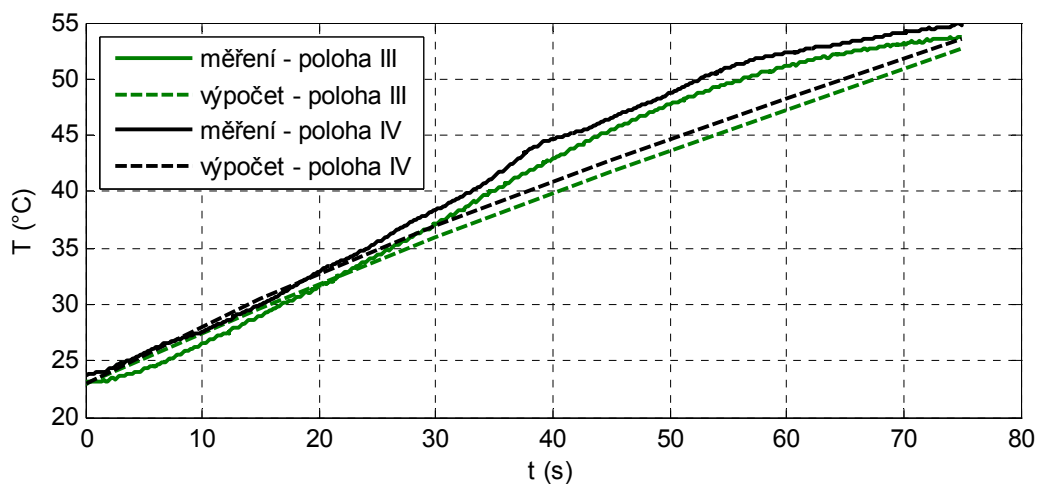


Obr. 4.11 Průběh teploty v závislosti na čase při ochlazování materiálu

Průběh teploty při ohřevu vsázky lze získat také z numerického modelu. V tomto případě se již jedná o sdruženou úlohu charakterizovanou interakcí magnetického a teplotního pole. Pomocí modelu ale není možné bez znalosti teplotních závislostí materiálových vlastností Fieldova kovu vykreslit oteplovací křivku včetně fázového přechodu. Kromě relativní permeability jsou všechny materiálové vlastnosti Fieldova kovu používané v modelu teplotně závislé a při dosažení teploty tavení u nich dochází dokonce ke skokové změně. Teplotní závislost těchto veličin zatím není známá, takže byly do modelu zadány pouze konstantní hodnoty. Vypočítané křivky pro různé uložení sondy tak mají vypovídací hodnotu pouze do teploty fázového přechodu. Jejich teplotní závislost se ale projeví již dříve, z tohoto důvodu je porovnání změřených a vypočítaných hodnot uvedeno pouze pro prvních 75 s ohřevu (Obr. 4.12 a Obr. 4.13).

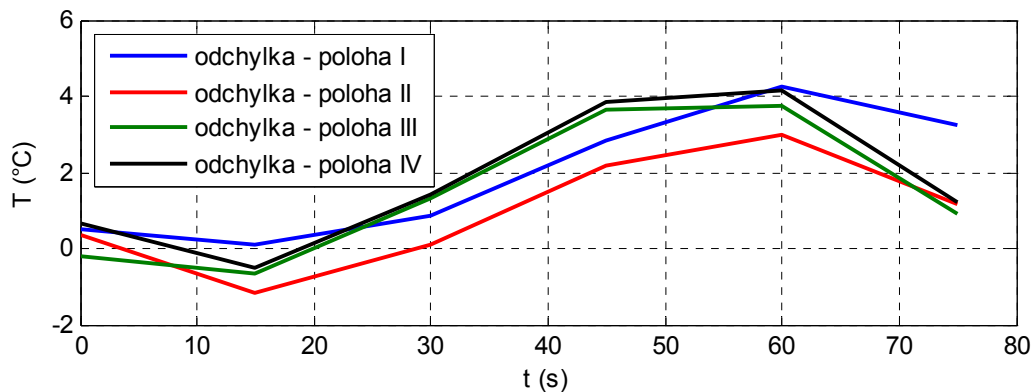


Obr. 4.12 Porovnání změřených a vypočítaných hodnot teploty v průběhu tavení pro uložení teplotního senzoru v poloze I a II



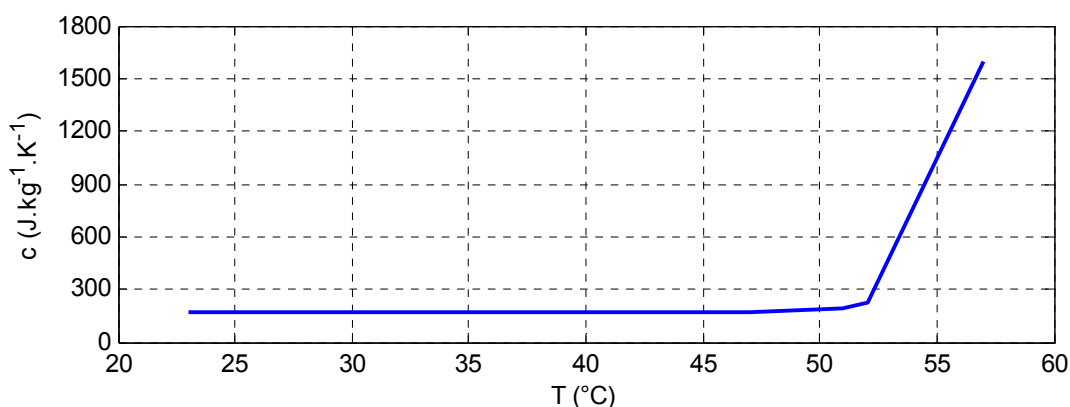
Obr. 4.13 Porovnání změřených a vypočítaných hodnot teploty v průběhu tavení pro uložení teplotního senzoru v poloze III a IV

Jak lze vidět z Obr. 4.14, křivky vypočítané pomocí modelu se se změřenými hodnotami téměř shodují pouze do 30 s, kdy je maximální rozdíl změřených a vypočítaných teplot 1,5 °C. Dále nastává odchylení až 4,1 °C způsobené teplotní závislostí parametrů.



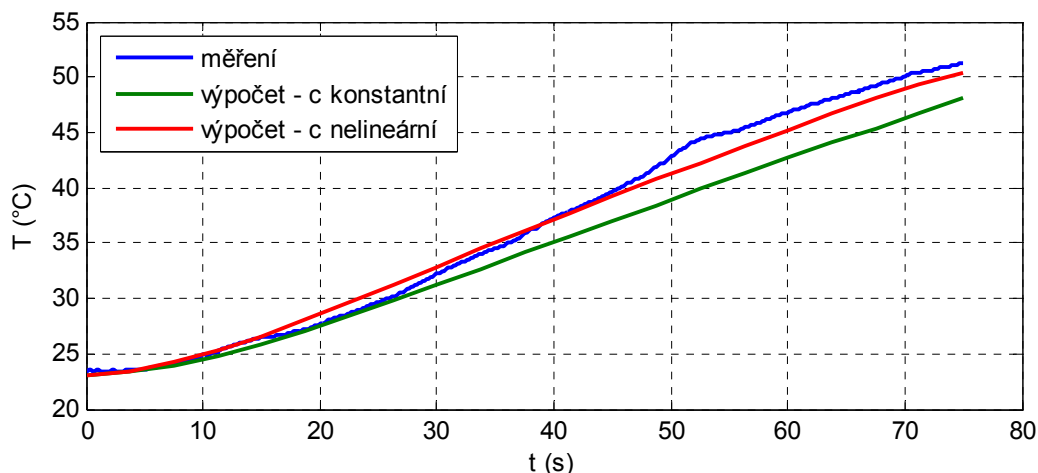
Obr. 4.14 Odchytky vypočítaných teplotních průběhů od změřených pro různé uložení teplotního senzoru

Pro eliminaci nesrovnalostí mezi numerickým modelem a měřením byly zkoumány vlivy jednotlivých materiálových vlastností Fieldova kovu na průběh oteplovací křivky. Největší vliv na ohřev materiálu má dle kapitoly 4.2 v [1] jeho měrná tepelná kapacita a hustota. Jak bylo uvedeno v kapitole 3.1, hustota Fieldova kovu se se změnou teploty mění jen minimálně, zásadní vliv na průběh teploty lze tedy u tohoto parametru vyloučit. Pro vyladění teplotních průběhů je nutné se zaměřit na teplotní závislost měrné tepelné kapacity a v numerickém modelu ji dále neuvažovat jako konstantní. Ze znalosti teplotní závislosti měrných tepelných kapacit jiných nízkoteplotních kovů byla parametrickou optimalizací v Agros2D odhadnuta teplotní závislost měrné tepelné kapacity Fieldova kovu. Vzhledem k tomu, že se jedná pouze o zjednodušený model, který nerespektuje změnu ostatních materiálových vlastností během fázového přechodu, lze jako vypovídající brát pouze průběh měrné tepelné kapacity do teploty tavení Fieldova kovu, který je znázorněn na Obr. 4.15. Podrobněji je proces optimalizace popsán v kap. 4.2 v [1].



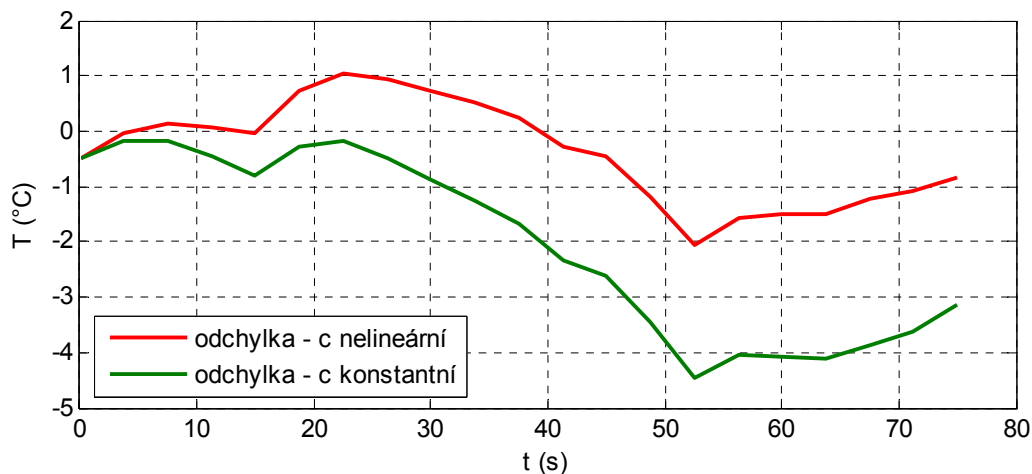
Obr. 4.15 Výsledek ruční parametrické optimalizace teplotní závislosti měrné tepelné kapacity Fieldova kovu

Při respektování nelineární závislosti měrné tepelné kapacity na teplotě, vystihuje teplotní průběh získaný z numerického modelu lépe reálný tvar teplotní křivky, jak je znázorněno na Obr. 4.16. pro uložení senzoru v poloze I (střed vsázky).



Obr. 4.16 Porovnání změřeného teplotního průběhu pro uložení senzoru v poloze I s průběhem vypočteným při uvažování konstantní a nelineární teplotní závislosti měrné tepelné kapacity Fieldova kovu

Srovnáme-li ale odchylky změřených a vypočítaných hodnot pro konstantní a nelineární průběh měrné tepelné kapacity (Obr. 4.17), je zřejmé, že rozptyl odchylek se liší jen v malé míře. Lze tedy konstatovat, že pro určení teplotních průběhů je při použití numerického modelu do fázového přechodu dostačující použít konstantní hodnotu měrné tepelné kapacity Fieldova kovu.



Obr. 4.17 Odchylky spočítaných teplotních průběhů pro konstantní a nelineární průběh měrné tepelné kapacity od změřeného průběhu

Pro odhad teplotní závislosti měrné tepelné kapacity Fieldova kovu i během fázového přechodu je nutné uvažovat při parametrické studii změnu dalších parametrů, jako je např. tepelná vodivost. Navržená křivka je pouze prvotním krokem, který je nezbytný pro další zkoumání. Další možností, jak do budoucna měření zpřesnit, je pořízení většího indukčního zařízení, které by bylo schopné roztavit podstatně větší množství vsázky.

Závěr

Hlavním cílem této diplomové práce bylo navržení experimentálního zařízení pro tavení nízkoteplotních kovů a verifikace výsledků měření s numerickým modelem vytvořeným v aplikaci Agros2D. Základním omezením pro návrh indukční pece byl záměr použít experiment jako exponát na dni otevřených dveří FEL. Pro tyto účely je ideální sestavit kompaktní a prostorově nenáročné zařízení. S respektováním tohoto požadavku byla navržena malá indukční pec pro tavení 410 g Fieldova kovu. Pec je napájena frekvenčním měničem, který dodává do obvodu proud 5 A o frekvenci 1500 Hz. Ve vsázce se vytvářejí Jouleovy ztráty o velikosti 32,97 W, které plně roztaví 340 g Fieldova kovu během 225 s.

Před samotným návrhem experimentálního zařízení bylo nutné zjistit materiálové vlastnosti vsázky. V této oblasti jsou informace dostupné z odborné literatury bohužel nedostačující. Ve většině publikací se pro Fieldův kov uvádí pouze měrný odpor a teplota tavení, která se navíc v různých zdrojích značně liší. Pro sestavení numerického modelu indukční pece byla přitom znalost materiálových vlastností vsázky nezbytná. Kromě relativní permeability se podařilo určit všechny potřebné materiálové vlastnosti Fieldova kovu, tzn. hustotu, tepelnou vodivost, elektrickou vodivost i měrnou tepelnou kapacitu, a to experimentálně i výpočtem. Relativní permeabilita byla odhadnuta ze znalosti permeability jednotlivých složek Fieldova kovu. Tento úsudek se později ukázal jako správný, jelikož výsledky měření magnetické indukce a rozložení teploty ve vsázce na reálném zařízení vykazovaly velmi dobrou shodu s numerickým modelem. Experimentálně změřené vlastnosti se v několika případech odlišují od údajů uvedených v odborné literatuře. Hustota Fieldova kovu uváděná v odborném článku [30] nebo [35] se s experimentálně změřenou hodnotou značně rozchází, oproti tomu literatura [31] uvádí téměř totožné výsledky. Problematické bylo zejména určení teplotní závislosti materiálových vlastností. Jak bylo uvedeno v kapitole 3.1, na výsledky získané z numerického modelu má největší vliv teplotní závislost měrné tepelné kapacity, proto byla hledána teplotní závislost pouze pro tento parametr. Použití Neumann-Koppova empirického pravidla i pro určení měrné tepelné kapacity při vyšších teplotách se ukázalo jako nevhodné z důvodu eutektického materiálu vsázky. Pomocí parametrické studie se poté při znalosti změřené závislosti teploty vsázky na čase podařilo alespoň přibližně odhadnout průběh měrné tepelné kapacity Fieldova kovu v závislosti na teplotě.

Z měření na experimentálním zařízení dále vyplynulo, že změnu teploty vsázky během indukčního ohřevu nelze měřit bezkontaktně, aniž bychom se nedopustili neúnosné chyby

měření. Důvodem je teplotní závislost emisivity vsázky, kterou nelze při měření za pomoci pyrometru či termovizní kamery respektovat. Všechna měření teplotních průběhů tak musela být měřena kontaktně pomocí teplotního senzoru s termočlánkem.

Indukční tavicí pec sestavená v rámci předkládané diplomové práce dokazuje svými malými rozměry a nízkou použitou frekvencí, že je pro tavení malého množství Fieldova kovu možné použít i velmi jednoduché a cenově nenáročné zařízení. V další fázi výzkumu bude mimo jiné řešena i elektromagnetická kompatibilita systému. Bylo by vhodné uvažovat o doplnění stínění, navrženého v kapitole 4.1, případně opatřit veškerou kabeláž umístěnou pod pecí kovovým krytem. Použitý frekvenční měnič je pro danou aplikaci značně naddimenzovaný, lze ho tedy využít i pro vyšší proudy, případně pro jiné frekvence a k nim potřebné kondenzátory. Jedním z možných témat budoucího výzkumu je mapování pohybu taveniny během tavení. Pro toto téma by bylo vhodnější sestavit rozměrnější pec, která by byla schopna roztavit větší množství Fieldova kovu.

Seznam literatury

- [1] KUTHANOVÁ, J., *Numerický model indukční pece pro tavení nízkoteplotních kovů*, Plzeň, 2014, Diplomová práce, Fakulta elektrotechnická, Západočeská univerzita.
- [2] VRÁNA, V., *Elektrické teplo*, VŠB-TU, Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2008. Výukový text.
- [3] LANGER, E., *Teorie indukčního a dielektrického tepla*, Praha: Academia, nakladatelství Československé akademie věd, 1979, 320 s.
- [4] HRADÍLEK, Z. – I. LÁZNIČKOVÁ – V. KRÁL. *Elektrotepelná technika*. Vyd. 1., České vysoké učení technické v Praze, Praha, 2011, 264 s. ISBN 978-80-01-04938-9.
- [5] DOLEŽEL, I. – MUSIL, L. – ULRYCH, B., *Moderní průmyslové technologie založené na procesech v tekutých kovech řízených elektromagnetickým polem*, ELEKTRO: Časopis pro elektrotechniku, 2003, č. 11.
- [6] KUBEŠ, P. *Magnetohydrodynamika*, Katedra fyziky FEL ČVUT, Praha, učební text
- [7] Autor neuveden, *Indukční ohřev*. In: Power User Mathematic Array, CVUT, Fakulta elektrotechnická, Praha, 2008, Dostupné z: <http://puma.feld.cvut.cz/cs/catalog/34> [cit. 2013-10-28]
- [8] BERMÚDEZ, A., D. GÓMEZ, M.C. MUNIZ a P. SALGADO, *Transient numerical simulation of a thermoelectrical problem in cylindrical induction heating furnaces*. In: Springer, Advances in Computational Mathematics, University of Santiago de Compostela, Spain, 2007
- [9] ZINN, S. – S.L. SEMIATIN. *Coil design and fabrication: Basic design and modifications*. In: Heat Treating, 1988.
- [10] Autor neuveden, *Induction Heating Principle*. In: DaWei Induction Heating Machine Co.,Ltd, Dostupné z: <http://www.induction-heating.com> [cit. 2013-10-28].
- [11] ČERNÝ, V. *Indukční ohřev*, Repetorium. ELEKTRO: Časopis pro elektrotechniku. 2002- č. 10, 11, 12, 2003- č. 1, 2.
- [12] Autor neuveden, *Innovative Induction Heating: The Induction Heating Guide*. In: GH Induction Atmospheres, Dostupné z: www.gh-ia.com [cit. 2013-10-31]
- [13] Autor neuveden, *Interakce elektromagnetického pole s elektricky vodivými kapalinami*, Výukový text pro předmět Elektrodynamika pro SE

- [14] MatWeb, *Material Property Data*, Dostupné z: www.matweb.com, [cit. 2013-11-09]
- [15] MUSIL, L. – DVOŘÁK, P. – PRAGLOWSKA-GORCZYNSKA, Z., *Dynamic Characteristic of Zinc Feeder*, In: International Workshop "Computational Problems of Electrical Engineering". Zakopane, 2004, s. 5-8.
- [16] SERGEANT, P. – D. HECTORS – L. DUPRÉ – K. VAN REUSEL. *Magnetic Shielding of Levitation Melting Devices*, In: IEEE transactions on magnetics, vol. 46, no. 2, 2010.
- [17] ŠTĚTINA, J. *Dynamický model teplotního pole plynule odlévané bramy*, Disertační práce, VŠB-TU, Ostrava, 2007.
- [18] *Laboratoř studených kelímků*. In: SUSEN, 2013, Dostupné z: <http://susen2020.cz/vyzkumne-programy/program-jpc/laborator-studenych-kelimku/>, [cit. 2013-10-26]
- [19] ASHTON, M.C., *Induction Skull Melting (ISM) of Titanium Alloys*. In: Castings Technology International, 2007.
- [20] MICHALEK, K. *Elektrometalurgie a výroba feroslitin*, VŠB-TU, Ostrava, 2008, Studijní text
- [21] MATIČKA, O. – L. MUSIL – L. PRSKAVEC – J. KYNCL – I. DOLEŽEL - B. ULRYCH, *Simulace indukčního ohřevu*, In: Digital Signal and Image Processing: MATLAB Conference, 2002.
- [22] KYNCL, J., *Návrh výkonové řady kanálkových pecí*, Habilitační přednáška, FEL ČVUT, Praha, 2003.
- [23] BERGGREN, K. - H. STIELE. *Induction Heating: A Guide to the Process and Its Benefits*, In GEAR Solutions, 2012, p. 41-46.
- [24] HAIMBAUGH, R. E. *Practical induction heat treating*, In: Materials Park, Ohio: ASM International, 2001, 332 p. ISBN 08-717-0743-8.
- [25] Kolektiv autorů z Center for metal production, *Vacuum Induction Melting Technology*, In: Cmp Techcommentary, 1987, č. 3.
- [26] NOVÁ, I. – J. MACHUTA, *Metalurgie slévárenských slitin - Nekonvenční metalurgické pochody tavení a odlévání*, TUL – FS, Katedra strojírenské technologie, podklady pro přednášku, Dostupné z: www.techno-mat.cz, [cit. 2013-11-10]

- [27] HAIMBAUGH, R. E., *Practical induction heat treating*, Materials Park, Ohio: ASM International, 2001, ISBN 0871707438.
- [28] Autor neznámý, *Induction Heating System Topology Review*, Fairchild Semiconductor, 2000
- [29] Autor neznámý, *Efficient melting in coreless induction furnaces*, Oxfordshire, Didcot, 2000, průvodce pro Energy efficiency best practice programme. Dostupné z: www.fonderie-durable.fr/iso_album/guide_coreless_induction_furnaces.pdf, [cit. 2013-11-10]
- [30] CHANG, L. – K.A. SHAIKH – L. SHIFENG, *Development of a Latchable Microvalve Employing a Low-Melting-Temperature Metal Alloy*, In: Journal of electromechanical systems [online]. 2008, vol. 17, no. 5, p. 1195 – 1203, [cit. 2014-02-22]. Dostupné z: <http://medx.mech.northwestern.edu/publications/papers/199.pdf>
- [31] *Field's Metal Low Melting Alloy*. MatWeb - material property data [online]. [cit. 2014-02-22]. Dostupné z: http://matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=539fb73c246f49b3975622eacc0ec956
- [32] HAN, Z.H. – B. YANG – J. CUMINGS. *Synthesis of low-melting-point metallic nanoparticles with an ultrasonic nanoemulsion method*. In: Ultrasonics [online]. 2010, vol 51, no. 4, p. 485 – 488 [cit. 2014-03-08]. 51. Dostupné z: <http://terpconnect.umd.edu/~cumings/PDF%20Publications/34.Ultrasonics51Han.pdf>
- [33] KRAUS, V. *Tepelné zpracování a slinování*. Plzeň: ZČU, 1999. ISBN 80-708-2582-0
- [34] PTÁČEK, L. *Nauka o materiálu I*. Brno: CERM, 1999. ISBN 80-7204-283-1
- [35] Fields Metal. In: DiracDelta.co.uk, Science and engineering encyclopedia [online]. [cit. 2014-03-23]. Dostupné z: <http://www.diracdelta.co.uk/science/source/f/i/fields%20metal/source.html#.Uy6-2FfeKkM>
- [36] *Nariadení vlády o ochraně zdraví před neionizujícím zářením*, In: Sbírka zákonů česká republika. 9. 1. 2008, ISSN 1211-1244.
- [37] *Low Melting Point 144 Alloy Field's Metal*, Amazon [online]. [cit. 2014-05-05]. Dostupné z: <http://www.amazon.com/Melting-Point-Alloy-Fields-Metal>

Seznam obrázků

OBR. 1.1 NÁHRADNÍ SCHÉMA INDUKČNÍHO OHŘEVU	14
OBR. 1.2 PRINCIP INDUKČNÍHO OHŘEVU	14
OBR. 1.3 KELÍMKOVÁ INDUKČNÍ PEC	16
OBR. 1.4 KANÁLKOVÁ INDUKČNÍ PEC	17
OBR. 1.5 ZAŘÍZENÍ PRO LEVITAČNÍ TAVENÍ.....	18
OBR. 1.6 MÍCHÁNÍ TAVENINY ROTUJÍCÍM MAGNETICKÝM POLEM A MÍCHÁNÍ TAVENINY INDUKTOREM PROTÉKANÝM STŘÍDAVÝM PROUDEM	19
OBR. 1.7 MAGNETOHYDRODYNAMICKÝ DÁVKOVAČ TEKUTÉHO KOVU	20
OBR. 2.1 KONSTRUKČNÍ USPOŘADÁNÍ KELÍMKOVÉ INDUKČNÍ PECE	21
OBR. 2.2 DIAGRAM ZTRÁT V KELÍMKOVÉ INDUKČNÍ PECI	22
OBR. 2.3 STUDENÝ KELÍMEK PRO TAVENÍ TITANOVÝCH SLITIN	24
OBR. 3.1 JEDNOTLIVÉ VRSTVY KELÍMKU PRO TAVENÍ VSÁZKY	29
OBR. 3.2 JEDNOTLIVÉ OBLASTI A HRANICE ELEKTROMAGNETICKÉHO MODELU A K NIM PŘÍSLUŠNÉ PARCIÁLNÍ DIFERENCIÁLNÍ ROVNICE.....	30
OBR. 3.3 JEDNOTLIVÉ OBLASTI A HRANICE TEPLOTNÍHO MODELU A K NIM PŘÍSLUŠNÉ PARCIÁLNÍ DIFERENCIÁLNÍ ROVNICE	30
OBR. 3.4 SÉRIOVÁ KOMPENZACE	33
OBR. 3.5 SCHÉMA KOMPENZOVANÉHO OBVODU S PARALELNÍM VYBÍJECÍM ODPOREM.....	34
OBR. 3.6 CELKOVÉ USPOŘADÁNÍ EXPERIMENTU PRO INDUKČNÍ TAVENÍ	36
OBR. 3.7 EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ PRO TAVENÍ NÍZKOTEPLNÍCH KOVŮ	36
OBR. 4.1 MĚŘENÍ MAGNETICKÉHO POLE INDUKTORU	37
OBR. 4.2 POLOHY MĚŘICÍ CÍVKY PRO MĚŘENÍ MAGNETICKÉ INDUKCE (INDUKTOR V PODÉLNÉM ŘEZU)	38
OBR. 4.3 VELIKOST MAGNETICKÉ INDUKCE NA HORNÍ HRANĚ CÍVKY V ZÁVISLOSTI NA VZDÁLENOSTI OD STŘEDU	39
OBR. 4.4 VELIKOST MAGNETICKÉ INDUKCE PŘI VLOŽENÍ VSÁZKY DO INDUKTORU V ZÁVISLOSTI NA VZDÁLENOSTI OD STŘEDU	40
OBR. 4.5 ROZLOŽENÍ INDUKCE MAGNETICKÉHO POLE VE VSÁZCE.....	41
OBR. 4.6 ROZLOŽENÍ INDUKCE MAGNETICKÉHO POLE VNĚ INDUKTORU.....	41
OBR. 4.7 POLOHY SENZORU PRO MĚŘENÍ TEPLoty VSÁZKY	42
OBR. 4.8 CHYBOVÉ ÚSEČKY ZNÁZORŇUJÍCÍ ODCHYLKU DVOU MĚŘENÍ OD JEJICH PRŮMĚRNÉ HODNOTY PRO RŮZNÁ ULOŽENÍ TEPLOTNÍHO SENZORU	43

OBR. 4.9 PRŮBĚH TEPLoty VE VSÁZCE PRO RŮZNÉ POLOHY TEPLotNÍHO SENZORU	43
OBR. 4.10 ROZDÍLY ZMĚŘENÝCH HODNOT PRO POLOHY II, III A IV VZHLEDEM K POLOZE I	44
OBR. 4.11 PRŮBĚH TEPLoty V ZÁVISLOSTI NA ČASE PŘI OCHLAZOVÁNÍ MATERIÁLU	46
OBR. 4.12 POROVNÁNÍ ZMĚŘENÝCH A VYPOČÍTANÝCH HODNOT TEPLoty V PRŮBĚHU TAVENÍ PRO ULOŽENÍ TEPLotNÍHO SENZORU V POLOZE I A II	47
OBR. 4.13 POROVNÁNÍ ZMĚŘENÝCH A VYPOČÍTANÝCH HODNOT TEPLoty V PRŮBĚHU TAVENÍ PRO ULOŽENÍ TEPLotNÍHO SENZORU V POLOZE III A IV	47
OBR. 4.14 ODCHYLKY VYPOČÍTANÝCH TEPLotNÍCH PRŮBĚHŮ OD ZMĚŘENÝCH PRO RŮZNÉ ULOŽENÍ TEPLotNÍHO SENZORU	47
OBR. 4.15 VÝSLEDEK RUČNÍ PARAMETRICKÉ OPTIMALIZACE TEPLotNÍ ZÁVISLOSTI MĚRNÉ TEPELNÉ KAPACITY FIELDOVA KOVU	48
OBR. 4.16 POROVNÁNÍ ZMĚŘENÉHO TEPLotNÍHO PRŮBĚHU PRO ULOŽENÍ SENZORU V POLOZE I S PRŮBĚHEM VYPOČTENÝM PŘI UVAŽOVÁNÍ KONSTANTNÍ A NELINEÁRNÍ TEPLotNÍ ZÁVISLOSTI MĚRNÉ TEPELNÉ KAPACITY FIELDOVA KOVU	49
OBR. 4.17 ODCHYLKY SPOČÍTANÝCH TEPLotNÍCH PRŮBĚHŮ PRO KONSTANTNÍ A NELINEÁRNÍ PRŮBĚH MĚRNÉ TEPELNÉ KAPACITY OD ZMĚŘENÉHO PRŮBĚHU	49

Seznam tabulek

TAB. 2.1 HODNOTY KONDUKTIVITY MATERIÁLŮ PŘI 20 °C	23
TAB. 3.1 MATERIÁLOVÉ VLASTNOSTI FIELDOVA KOVU PRO 20 °C	26
TAB. 3.2 MĚŘENÍ HUSTOTY FIELDOVA KOVU PRO 3 RŮZNÉ TABLETY PŘI 20 °C A 3 DALŠÍ TABLETY PŘI 45,3 °C	27
TAB. 3.3 MĚRNÉ TEPELNÉ KAPACITY A HMOTNOSTNÍ PODÍLY SLOŽEK FIELDOVA KOVU PRO 20 °C	27
TAB. 3.4 ÚDAJE PRO MĚŘENÍ MĚRNÉ TEPELNÉ KAPACITY FIELDOVA KOVU PRO 50 °C	28
TAB. 3.5 PARAMETRY NAVINUTÉ CÍVKY	32
TAB. 3.6 HĹOUBKA VNIKU FIELDOVA KOVU PRO RŮZNÉ FREKVENCE PŘI TEPLotĚ 20 °C	32
TAB. 3.7 ZMĚŘENÉ VELIKOSTI NAPĚTÍ V OBVODU PŘI PROUDU 5 A A FREKVENCI 1500 Hz	34
TAB. 4.1 PARAMETRY MĚŘÍCÍ CÍVKY	38
TAB. 4.2 ZMĚŘENÉ A VYPOČÍTANÉ HODNOTY INDUKCE MAGNETICKÉHO POLE V CÍVCE	39
TAB. 4.3 MAGNETICKÁ INDUKCE V ZÁVISLOSTI NA VZDÁLENOSTI OD INDUKTORU	40
TAB. 4.4 VZDÁLENOST TEPLotNÍHO SENZORU OD STŘEDU KELÍMKU	42
TAB. 4.5 RYCHLOST OHŘEVU PŘI OHŘÍVÁNÍ VSÁZKY NA TEPLotu TAVENÍ A PŘÍSLUŠNÁ TEPLota TAVENÍ PRO RŮZNÉ ULOŽENÍ TEPLotNÍHO SENZORU	45

Přílohy

I. Ingot fieldova kovu



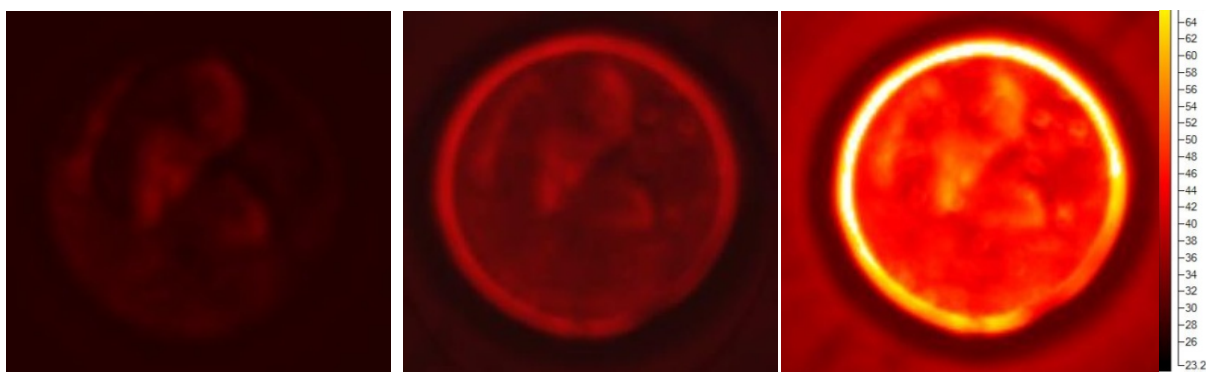
Obr. I.1 Ingot Fieldova kovu před tavením – 1 tableta [37]



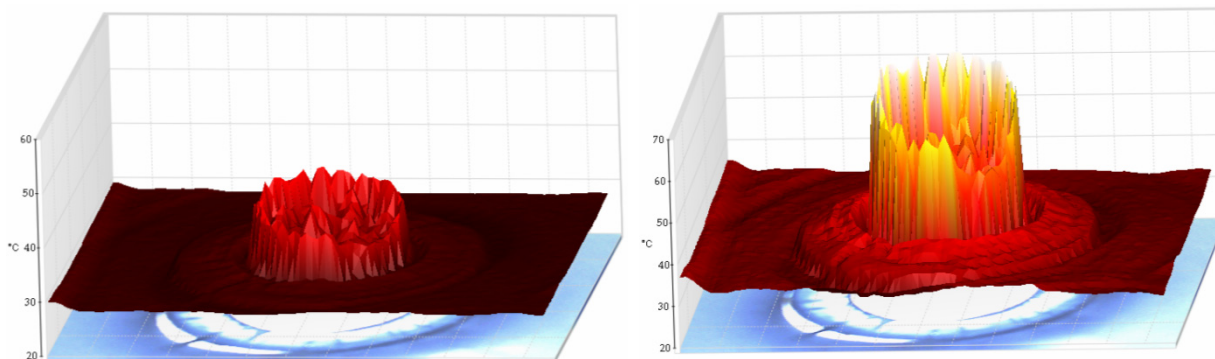
Obr. I.2 Ingot Fieldova kovu po tavení – 3 tablety

II. Měření teploty vsázky pomocí termovizní kamery

Jedním ze způsobů, jak určit rozložení teploty ve vsázce během tavení, je použití termovizní kamery, která analyzuje teplotu na povrchu měřeného materiálu. Vzhledem ke známému rozložení teploty ve vsázce (získané předchozím měřením pomocí senzoru, viz kapitola 4.2) bylo možné toto měření provést i bez znalosti teplotní závislosti emisivity materiálu. Emisivita se nastavila až následně pomocí softwaru SmartView. Na Obr. II.1 jsou pomocí termovizní kamery zachyceny postupně okamžiky před započítím ohřevu, po 30 s ohřevu a po 60 s ohřevu. Barevné přechody jasně ukazují, jak teplo postupuje od krajů až ke středu vsázky a dokazují tak přítomnost skinefektu, který vytlačuje vířivé proudy k povrchu. Na Obr. II.2 je na 3D grafu, vygenerovaného z termovizní kamery, zobrazeno rozložení teploty v průřezu vsázky po 30 s a 60 s ohřevu.

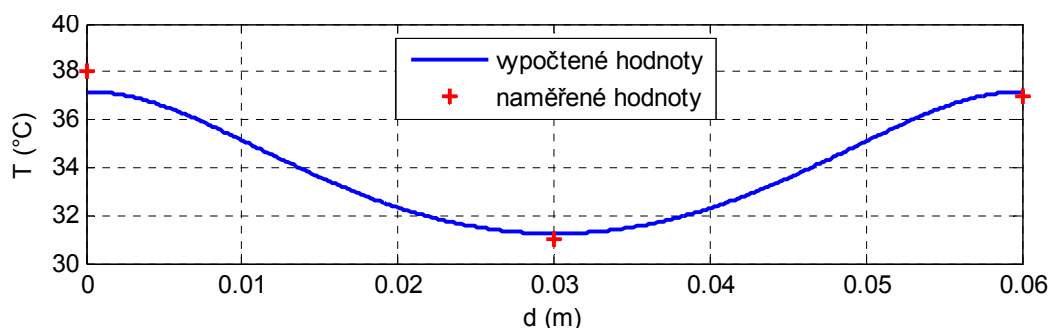


Obr. II.1 Termovizní kamera – okamžik před započítím ohřevu, po 30 s a po 60 s ohřevu



Obr. II.2 Termovizní kamera – 3D graf rozložení teploty v průřezu vsázky po 30 s ohřevu a po 60 s ohřevu

Porovnání změřených teplot na povrchu vsázky po 30 s ohřevu z termovizní kamery s numerickým model je uvedeno na Obr. II.3. V grafu závislosti teploty na vzdálenosti od středu kelímku jsou vyznačeny tři body – teplota ve středu a teploty na okrajích vsázky získané z termovizní kamery.



Obr. II.3 Porovnání změřených teplot na povrchu vsázky po 30 s ohřevu s hodnotami získanými z numerického modelu