

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY A STROJŮ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

VLIV POLOHY A DRUHU TERMOČLÁNKU NA
PŘESNOST MĚŘENÍ TEPLŮT V OBLASTI
INDUKČNÍCH OHŘEVŮ

Autor práce: **Vojtěch Vurm**

Vedoucí práce: **doc. Ing. David Rot, Ph.D.**

2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Vojtěch VURM**
Osobní číslo: **E19B0181P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Téma práce: **Vliv polohy a druhu termočládku na přesnost měření teplot v oblasti indukčních ohřevů**
Zadávací katedra: **Katedra výkonové elektroniky a strojů**

Zásady pro vypracování

1. Zhodnoťte současné možnosti při měření teplot v oblasti indukčních ohřevů. Podrobněji se zaměřte zejména na vhodné druhy termočládků.
2. Uveďte potřebnou teorii nutnou pro numerické modelování elektromagnetických polí při aplikaci indukčních ohřevů.
3. Uveďte potřebnou teorii nutnou pro numerické modelování teplotních polí při aplikaci indukčních ohřevů.
4. Vytvořte vhodné numerické modely indukčního ohřevu, dle vlastního uvážení, které budou vhodnou formou vyšetřovat a porovnávat vliv polohy a druhu termočládku na vlastní ohřev a zejména na přesnost měření teploty.
5. Pro zvolený numerický model proveďte experiment, jímž jej verifikujete.
6. Uveďte závěry pro praxi.


Rozsah bakalářské práce: **30 – 40**
Rozsah grafických prací: **dle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Rudnev, Valery, Totten George E. AMS Handbook, Volume 4C: Induction Heating and Heat Treatment Hardcover. ASM International, 2014. ISBN 978-1627080125.
2. Rudnev, Valery. Handbook of induction heating (Manufacturing Engineering and Materials Processing) 2nd. CRC Press, 2017. ISBN 978-1466553958.
3. Lupi, Sergio; Forzan, Michele; Aliferov, Aleksandr. Introduction and Direct Resistance Heating. New York : Springer. ISBN 978-3-319-03478-2.
4. Langer E., Teorie indukčního a dielektrického tepla , Praha : Academia 1979.
5. Linda J.; Mühlbacher J., Návodů ke cvičení z elektrického tepla II , Plzeň : ZČU 1993.
6. Rada J., Elektrotepelná technika , Praha : SNTL 1985.

Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. David Rot, Ph.D.**
Katedra elektroenergetiky

Datum zadání bakalářské práce: **8. října 2021**
Termín odevzdání bakalářské práce: **26. května 2022**


Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

ABSTRAKT

Předkládaná bakalářská práce se zabývá měřením teploty pomocí termoelektrických článků v oblasti indukčních ohřevů, zejména pak při povrchovém kontinuálním kalení. Zkoumá vhodnost daného typu termočlánku pro tuto aplikaci a vliv jeho přítomnosti na naměřené hodnoty a na kalící proces. Pomocí rešerše platných technických norem a dalších zdrojů jsou stanoveny termočlánky vhodné pro měření teploty při procesu kalení vzhledem k dosahovaným teplotám a přítomnosti chladícího média, které u některých termočlánků způsobuje jejich rychlou degradaci. Na základě numerického modelu a provedeného experimentu spočívajícího v indukčním ohřevu několika vzorků rozdílných druhů ocelí jsou popsány vlivy přítomnosti termočlánku na naměřenou teplotu. Termočlánky umístěné na povrchu vsázky jsou vzhledem k prudkým změnám teploty při kalení velmi namáhány a měření má omezenou spolehlivost. Umístění termočlánků dovnitř vsázky do vyvrtaných otvorů vede ke změně tepelné vodivosti v dané oblasti. Okolí termočlánku se tak ohřívá více než zbytek vsázky. Popsaný efekt je patrný zejména, je-li termočlánek umístěn bezprostředně pod povrchem vsázky.

KLÍČOVÁ SLOVA

indukční ohřev, indukční povrchové kalení, numerické modelování elektromagnetických polí, termočlánek

ABSTRAKT

Presented bachelor thesis deals with temperature measurement using thermocouples in the field of induction heating, especially in surface hardening. It investigates the suitability of a specific type of thermocouple for this application and the influence of its presence on the measured values and on the hardening process. By means of current technical standards and other sources are determined suitable thermocouples for temperature measurements during the hardening process with regard to the temperatures reached and the influence of a cooling medium. It causes rapid degradation of some types of thermocouples. The effects of the presence of a thermocouple are described on the basis of a numerical model and an experiment. Thermocouples located on the surface of the load are highly stressed due to the rapid temperature changes. Placing the thermocouples inside the load in drilled holes leads to a change in the thermal conductivity of the area. The area around the thermocouple is heated more than the rest of the steel bar. This effect is particularly noticeable when the thermocouple is placed immediately below the surface.

KEYWORDS

induction heating, induction surface hardening, numerical modeling of electromagnetic fields, thermocouple

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, s použitím uvedené odborné literatury a pramenů, a že veškerý software, použitý při jejím řešení a zpracování, byl využit s respektováním všech jeho licenčních podmínek.

V Plzni, 25. května 2022

Vojtěch Vurm

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

\vec{E}	$V \cdot m^{-1}$	intenzita elektrického pole
\vec{D}	$C \cdot m^{-2}$	elektrická indukce
\vec{H}	$A \cdot m^{-1}$	intenzita magnetického pole
\vec{B}	T	magnetická indukce
\vec{A}	$Wb \cdot m^{-1}$	magnetický vektorový potenciál
\vec{j}	$A \cdot m^{-2}$	vektor proudové hustoty
φ	V	elektrický skalární potenciál
γ	$S \cdot m \cdot m^{-2}$	konduktivita prostředí
$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot c^2} \cdot 10^{-12}$	$F \cdot m^{-1}$	permitivita vakua
ϵ_r	–	relativní permitivita prostředí
$c = 299\,796$	$m \cdot s^{-1}$	rychlost světla ve vakuu
$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$	$H \cdot m^{-1}$	permeabilita vakua
μ_r	–	relativní permeabilita prostředí
ρ	$kg \cdot m^{-3}$	látková hustota
V	m^3	objem
c_p	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	měrná tepelná kapacita
σ	$W \cdot m^{-3}$	měrný příkon
U	μV	elektrické napětí
ϑ	$^{\circ}C$	teplota
T	K	termodynamická teplota
α	$\mu V \cdot ^{\circ}C^{-1}$	součinitel termoelektrického napětí
λ	m	vlnová délka

f	Hz	frekvence
a	m	hloubka vniku elektromagnetického vlnění
\vec{q}	$W \cdot m^{-2}$	vektor hustoty tepelného toku
H	J	entalpie
h	$J \cdot kg^{-1}$	měrná entalpie
q^*	$W \cdot m^{-3}$	vnitřní měrné ztráty
w_j	$W \cdot m^{-3}$	měrné Joulovy ztráty
\vec{v}	$m \cdot s^{-1}$	vektor okamžité rychlosti
λ_q	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	součinitel přestupu tepla vedením
a_q	$m^2 \cdot s^{-1}$	součinitel teplotní vodivosti

OBSAH

I ÚVOD DO PROBLEMATIKY

1	ÚVOD	1
1.1	Cíl práce	1
1.2	Definice základních pojmů	1
1.2.1	Indukční ohřev	1
1.2.2	Indukční povrchové kalení	3
1.2.3	Termoelektrický článek	3
1.3	Shrnutí současných poznatků	3
1.4	Metodika a struktura práce	4

II TEORETICKÝ ROZBOR PROBLEMATIKY

2	MĚŘENÍ TEPLoty VSÁZKY V OBLASTI INDUKČNÍCH OHŘEVŮ	6
2.1	Bezkontaktní snímání teploty	6
2.1.1	Využití infračerveného záření	7
2.1.2	Určení teploty oceli podle barvy	8
2.2	Měření teploty pomocí termoelektrických článků	9
2.2.1	Termoelektrický jev	9
2.2.2	Přehled používaných termoelektrických článků	11
2.2.3	Použití termoelektrických článků v oblasti indukčního ohřevu	16
3	TEORIE NUMERICKÉHO MODELOVÁNÍ ELEKTROMAGNETICKÝCH POLÍ	19
3.1	Maxwellovy rovnice	19
3.2	Elektrodynamický potenciál	20
3.3	Hloubka vniku elektromagnetického vlnění do vodivé stěny	22
3.4	Vznik tepla ve vsázce	25
3.5	Okrajové podmínky	26
3.5.1	Dirichletova podmínka	26
3.5.2	Neumanova podmínka	27

4	TEORIE NUMERICKÉHO MODELOVÁNÍ TEPLOTNÍCH POLÍ	28
4.1	Fourier-Kirchhoffova rovnice	28
4.2	Okrajové podmínky	31
4.2.1	Dirichletova podmínka	31
4.2.2	Neumanova podmínka	31
III NUMERICKÝ MODEL		
5	NUMERICKÝ MODEL	33
5.1	Tvorba modelu a podmínky simulace	34
5.2	Výsledky numerické simulace	35
IV EXPERIMENT		
6	EXPERIMENT	38
6.1	Popis experimentálního kalícího zařízení	38
6.1.1	Použité termoelektrické články	41
6.2	Průběh experimentu	42
6.3	Vyhodnocení výsledků	46
V ZHODNOCENÍ A ZÁVĚR		
7	ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	53

Část I

ÚVOD DO PROBLEMATIKY

ÚVOD

1.1 CÍL PRÁCE

Předkládaná práce si klade za cíl přiblížit současný stav měření teploty pomocí termočlánků v oblasti indukčního ohřevu. Zjistit, zda a jaký má měření teploty pomocí termočlánku vliv na přesnost získávané informace o teplotě vsázky a doporučit případné úpravy používaných postupů či pojmenovat jejich meze. K dosažení tohoto cíle bude použita rešerše dostupných termočlánků, jejich vlastností a limitů, dále pak numerická simulace indukčního ohřevu s respektováním fyzického umístění termočlánku v pevné vsázce a následná verifikace modelu pomocí experimentu.

1.2 DEFINICE ZÁKLADNÍCH POJMŮ

1.2.1 *Indukční ohřev*

Princip indukčního ohřevu spočívá v indukování vířivých proudů do elektricky vodivé vsázky, kde následně vznikají Joulovy ztráty, které ji intenzivně zahřívají. Zdrojem elektromagnetického pole je induktor, v jehož středu je vsázka umístěna. Ohřev elektrickou indukcí představuje jeden z efektivních a rychlých způsobů ohřevu pro účely tavení, povrchového kalení, popuštění či sušení elektricky vodivých materiálů.

Základním principem indukčního ohřevu je elektromagnetická indukce, kterou poprvé popsal Michael Faraday v polovině 19. století. Na základě jeho objevu vznikají o několik desetiletí později transformátory, jejichž magnetická jádra jsou tvořena navzájem izolovanými

tenkými ocelovými plechy pro omezení ztrát vířivými proudy. Pravým opakem je využití indukce k ohřevu ocelového jádra induktoru, kde jádrem rozumějme záměrně ohřívanou vsázku. Toto využití elektromagnetické indukce se objevuje na konci 19. století. Později se objevují snahy nejen o tavení kovů, ale i o ohřev pouze povrchu vsázky za účelem jeho zakalení. Velkým skokem v této oblasti byl nástup polovodičů, které umožňují dodávat do induktoru proud o vysoké frekvenci. Právě od velikosti frekvence a materiálových vlastností vsázky se odvíjí hloubka vniku elektromagnetického vlnění a tedy i oblast aktivně ohřívaná vířivými proudy. Pro zakalení pouze tenké vrstvy oceli pod povrchem jsou požadované frekvence v řádu desítek až stovek kHz. [1] [2]

Uplatnění indukčního ohřevu v technické praxi je rozsáhlé. Kromě ohřevu za účelem tavení a kalení využíváme indukční ohřev ke spojování kovových dílů prostřednictvím pájení či sváření. Rovněž se využívá délková tepelná roztažnost ohřívaných materiálů. Příkladem může být upínání nástrojů kovoobráběcích zařízení, nasazování či lepení kol železničních vozidel na nápravu za tepla a nasazování obručí rotorů turbogenerátorů. Za určitých okolností je možné indukční ohřev použít i na materiály, které jsou ve svém původním pevném stavu nevodivé. Jde například o tavení oxidů kovů v tzv. *studeném kelímku*. V ohřívané směsi se nachází malé kousky kovu (často hliníku), které nemají vliv na konečnou čistotu vzniklého materiálu. Od roztaveného kovu se ohřívá zbytek směsi. Vzniklá tavenina je již vodivá a indukované proudy pak ohřívají přímo roztavené oxidy. Frekvence dosahované při použití studeného kelímku dosahují více než 5 MHz. [3] [4]

Ohřev vodivých materiálů pomocí indukčního ohřevu je rychlý, avšak zároveň energeticky náročný. Ve snaze jej optimalizovat můžeme ještě ve stádiu návrhu použít vhodný numerický model, kterým se snažíme stanovit výsledky ohřevu a celkovou energetickou bilanci. Toto umožnil vývoj výpočetní techniky v posledních několika desítkách let. I tak se však jedná o velmi náročné úlohy a výstupy simulací mají i dnes omezenou vypovídající hodnotu co do přesnosti dosahovaných hodnot sledovaných veličin. Jsou však cennými nástroji pro pochopení probíhajících jevů a ukazují nám směr, kterým se při návrhu systému pro indukční ohřev ubírat. [3] [4]

1.2.2 Indukční povrchové kalení

Indukční povrchové kalení představuje jednu z aplikací indukčního ohřevu, kdy naším cílem není rovnoměrné prohřátí celého objemu vsázky, ale naopak ohřátí a následné ochlazení materiálu pouze do omezené hloubky od povrchu. Aby se tohoto dosáhlo, je pro napájení induktoru používán frekvenční měnič, schopný dosahovat frekvencí řádově alespoň nižších desítek kHz, častěji pak stovek kHz. Frekvence elektromagnetického vlnění má vliv na hloubku vniku tohoto vlnění do vodivé stěny. Hloubka, do které vlnění proniká, ovlivňuje indukování vířivých proudů do vsázky, a tak i Joulovy ztráty v ní. [3]

1.2.3 Termoelektrický článek

Termoelektrický článek je součástka, které přeměňuje tepelnou energii na elektrickou. Termočlánek sestává ze dvou vodičů odlišných materiálů a z nich vyplývajících fyzikálních vlastností. Spojení těchto dvou vodičů tvoří tzv. *teplý a studený (referenční) konec* termočlátku. V závislosti na teplotním rozdílu těchto konců naměříme na termočlátku určité elektrické napětí, které se znalostí kalibrační tabulky daného termočlátku a teploty referenčního spoje převedeme na informaci o teplotě teplého konce. Výhodou termoelektrických článků oproti jiným kontaktním způsobům snímání teploty je především rychlost odezvy na změnu teploty, teplotní rozsah a jejich citlivost. Nevýhodou je podmínka kontaktu se vsázkou. Zajištění vodivého spojení se vsázkou může být problematické v aplikacích, při kterých se vsázka pohybuje. Tento problém odpadá při použití speciálních (např. otočných) kontaktů nebo použitím bezkontaktních způsobů snímání teploty. [1]

1.3 SHRNU TÍ SOUČASNÝCH POZNATKŮ

Indukční ohřev je více než sto let starou, avšak velmi používanou technologií. Vývoj výkonové elektroniky v posledních několika desítkách let však umožnil rozšířit spektrum možných aplikací. Moderní výkonové prvky umožňují dosahovat velkých výkonů a současně vysokých frekvencí. Cíle se tak upínají převážně k hlubšímu pochopení fyzikálních

dějů, materiálových pochodů ve vsázce; optimalizaci, automatizaci a zefektivnění procesů indukčního ohřevu, kalení atd; vyvíjení metod, hardwaru a softwaru pro modelování elektromagnetických a teplotních polí schopných řešit silně sdužené úlohy. [1]

Oblast měření teplot v indukčním ohřevu je jedním z prostředků, který umožňuje nahlédnout do procesu ohřevu, kontrolovat jeho průběh, validovat numerické výpočty a tím pomoci v návrhu indukčních systémů pro konkrétní aplikace. Teplotu vsázky lze určovat několika způsoby. Pro kontaktní metody jsou limitující vysoké dosahované teploty a jejich kombinace s chladícím médiem (v případě kalení) či s ochrannou atmosférou (například ne všechny termočlánky jsou schopné pracovat ve vakuu). Teplotu lze rovněž určit ze zbarvení oceli nebo s využitím bezkontaktní metody pohlcování infračerveného záření (pyrometry, termokamery). [1]

1.4 METODIKA A STRUKTURA PRÁCE

Předkládaná bakalářská práce sestává z pěti částí. V první, úvodní, části je shrnut současný stav poznání v oblasti měření teplot pomocí termoelektrických článků v oblasti indukčního ohřevu. Dále jsou zde definovány základní pojmy, kterým se tato práce obsahově věnuje. Druhá část práce představuje nejpoužívanější metody měření teplot v problematice indukčních ohřevů a fyzikální základy, na kterých tyto metody fungují. Uvedena je teorie nutná pro numerické modelování elektromagnetických a teplotních polí, se kterou pracují současné výpočetní softwary. Třetí část práce pak představuje samotný numerický model. Jeho výstupy jsou v závěru práce porovnány s výsledky experimentu, o kterém je pojednáno v kapitole čtvrté. Kromě porovnání výsledků numerické simulace a experimentu jsou v závěrečné páté kapitole vyvozeny závěry pro praxi.

Část II

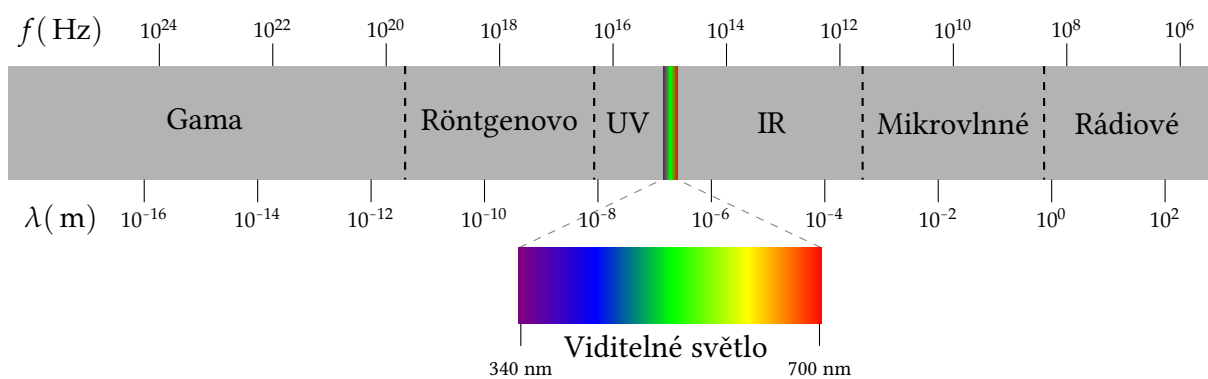
TEORETICKÝ ROZBOR PROBLEMATIKY

MĚŘENÍ TEPLoty VSÁZKY V OBLASTI INDUKČNÍCH OHŘEVŮ

Pro měření teplot vsázky u indukčního ohřevu používáme dnes nejčastěji termoelektrické články. Termočlánky je možné umístit prakticky na libovolné místo na povrchu či uvnitř vsázky, nejsme-li omezeni např. pohybem či způsobem jejího uchycení, neboť termočlánek je se sběrníci spojen nejčastěji pevnými vodiči. Dalším omezujícím faktorem může být požadavek na celistvost vsázky. Proto termočlánky umístěné pod povrchem vsázky použijeme zpravidla pro analýzu ohřevu, nikoliv ve výrobní aplikaci, neboť jejich zavedením do pevné vsázky tuto znehodnotíme. Teplotu oceli lze přibližně odhadnout i na základě jejího zbarvení. Další možnost, jak získat přehled o teplotě vsázky, nám dává termokamera resp. pyrometr. Nespornou výhodou této metody je měření teploty bez nutnosti fyzického kontaktu se vsázkou.

2.1 BEZKONTAKTNÍ SNÍMÁNÍ TEPLoty

Měření teploty bez fyzického propojení ohřivaného objektu a měřícího přístroje představuje značnou výhodu, neboť objekt, jehož teplotu chceme znát, může být například v pohybu, nebo ohříváný na vysokou teplotu, kterou nejsme schopni měřit kontaktně například termočlánky, jejichž maximální měřící teplota je omezena použitými materiály. Další výhodou představuje skutečnost, že tato metoda je na rozdíl od použití termočláneků nedestruktivní. Mezi bezkontaktní metody určování teploty povrchu vsázky můžeme zařadit použití pyrometrů či termokamer, tedy zařízení pracujících na principu detekce infračerveného záření a dále pak určování teploty oceli podle jejího zbarvení. [1] [5]



Obrázek 1: Spektrum elektromagnetického záření

2.1.1 Využití infračerveného záření

Z fyzikálního hlediska fungují všechny bezkontaktní snímače teploty na principu detekce infračerveného záření. Každé těleso s teplotou vyšší než $T = 0$ K vyzařuje elektromagnetické záření, přičemž část tohoto spektra představuje i infračervené záření. Jeho objev je připisován Williamu Herschelovi. Ten pomocí disperze slunečního světla na skleněném hranolu zkoumal, jak která složka viditelného spektra ohřívá rtuť v teploměru. Jak se blížil k červené barvě, zjistil, že teplota na teploměru roste. Ještě více pak vzrostla za hranicí viditelného spektra. Dnes infračerveným světlem označujeme elektromagnetické záření o vlnové délce přibližně 0,78 μm až 1 000 μm , přičemž pro aplikaci bezkontaktního měření teploty se používá interval 0,7 až 1,4 μm . Infračervené záření je patřičnou optikou zaostřeno do citlivé oblasti senzoru. Po detekci je vzniklý elektrický signál zesílen a převeden na digitální informaci o teplotě měřeného objektu. Zjišťována je rovněž teplota měřícího přístroje. Pro nezkreslení změřené hodnoty je před měřením nutné vyčkat ustálení teploty přístroje. [5]

Z hlediska způsobu zachycování záření rozlišujeme dva základní typy snímačů teploty. První skupina senzorů je tvořena snímači, které pohlcují elektromagnetické záření, v důsledku čehož se ohřívají. Jak se mění teplota těchto prvků, mění se i jejich elektrické parametry. Následná napěťová, resp. proudová, odezva je změřena, digitálně zpracována a převedena na informaci o teplotě. Druhou skupinu tvoří senzory, kde elektrická energie z přijatého záření vzniká na základě fotoefektu. Při vnitřním fotoelektrickém jevu fotony dopadajícího elektromagnetického záření předávají svou energii elektronům vázaných v obalu atomů

polovodiče. Tyto elektrony se absorbováním energie dostávají na vyšší energetickou hladinu a mohou se účastnit vedení elektrického proudu v polovodiči. [5]

První z výše zmíněných skupin detektorů lze pak dále rozdělit na pyroelektrické, termoelektrické a bolometrické. Pyroelektrický senzor pracuje s krystaly, na kterých v důsledku tepelného namáhání vzniká elektrický náboj. Jde tedy o jakousi obdobu piezoelektrického jevu, kdy je elektrická odezva způsobena mechanickým namáháním krystalu. Termoelektrického jevu využívají při bezkontaktním měření teploty tzv. radiační termočlánky. Jde o čip tvořený dvěma druhy vodičů vhodně uspořádanými kolem absorpčního prvku. Bolometrické detektory používají rezistory s co možná největším teplotním součinitelem elektrického odporu. Velikost součinitele ovlivňuje schopnost detekce a citlivost bolometrického senzoru. [5]

Zařízení, která pro bezkontaktní měření teploty používají fotoelektrický jev, nazýváme kvantovými nebo fotonovými detektory. Výhodou kvantových detektorů je rychlost, s jakou vzniká odezva na ozáření detektoru infračerveným zářením. Ta je řádově vyšší, než v případě teplotních detektorů. I přes větší měřicí rychlost však existuje mnoho aplikací, kde je vhodnější použití snímačů založených na pohlcování infračerveného záření a následného ohřevu citlivé součástky. [5]

Pro bezkontaktní měření teploty je zásadní emisivita měřeného objektu. Ta je do značné míry ovlivněna jeho materiálovým složením. Emisivita je rovněž závislá na vlnové délce vyzařovaného elektromagnetického vlnění. [5]

2.1.2 *Určení teploty oceli podle barvy*

Barva uhlíkaté oceli je závislá na její teplotě. Při nižších teplotách (přibližně do 450 °C) je převažujícím pochodem, který dává oceli barvu typickou pro danou teplotu, oxidace. Při teplotách nad 560 °C se do popředí dostává barva vyzařovaného elektromagnetického záření v rozsahu viditelného spektra. Problémem této metody je zejména přítomnost dalších příměsí, které ovlivňují oxidaci oceli. [1]

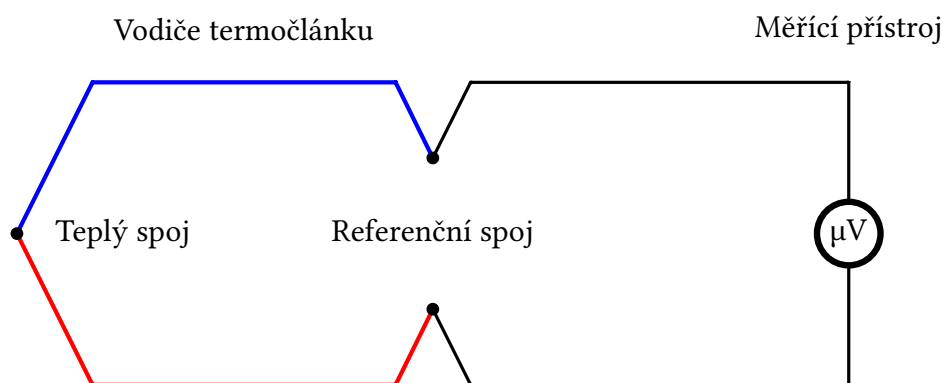
2.2 MĚŘENÍ TEPLoty POMOCÍ TERMOELEKTRICKÝCH ČLÁNKŮ

Pro měření teploty se v nejrůznějších aplikacích s úspěchem používají termoelektrické články, které přeměňují tepelnou energii na energii elektrickou. Fyzikální děj, který se přitom ve článku odehrává, se nazývá *termoelektrický jev*. Samotný termočlánek je pak tvořen dvěma rozdílnými vodiči, spojenými na jednom konci.

2.2.1 *Termoelektrický jev*

Termočlánky využívají vlastností různých kovů a jejich slitin, které můžeme rozdělit na vodiče *monopolární* (typu n) a *ambipolární* (typu p). Ve vodiči typu n převažují elektrony coby záporné nosiče elektrického náboje, zatímco ve vodiči typu p převažují díry, zdánlivé nosiče kladného náboje. Monopolární a ambipolární vodiče se dále liší způsobem, jakým se v nich nosiče přemísťují, existuje-li podél vodiče teplotní spád. Ve vodiči typu n, například v mědi, se při zahřívání jednoho konce vodiče volné elektrony přesunují k chladnějšímu konci vodiče. Tím vzniká rozdíl v koncentraci elektronů na teplejším a chladnějším konci vodiče, a tedy i rozdíl polarit napětí (chladný konec má polaritu zápornou, teplý kladnou). U vodiče typu p je situace obdobná, avšak v tomto případě se elektrony soustřeďují v teplejší části vodiče a vzniklá polarita náboje na chladném a teplém konci vodiče je oproti monopolárnímu vodiči opačná. [6]

Výše popsany pohyb nosičů náboje se však omezuje pouze na prostor uvnitř vodiče, neboť potenciální bariéra tvořená ionty kovu v krystalické mřížce neumožňuje elektronům opustit vodič. Provedeme-li však dokonale vodivé spojení dvou různých kovů, je elektronům z kovu s nižší potenciální hrází umožněno přestupovat do kovu s vyšší potenciální hrází. Vzniká tak elektrický proud protékající vodiči. Na jejich nespojených koncích pak lze naměřit napětí. Nazýváme jej *termoelektrickým napětím*. Aby bylo napětí vyšší a tedy i lépe měřitelné, je jeden vodič vždy ambipolární a druhý monopolární. [6]



Obrázek 2: Základní schéma měření teploty termoelektrickým článkem

Je-li teplota referenčního spoje 0°C , pak je velikost termoelektrického napětí vyjádřena vztahem

$$U = \sum_{i=0}^n \alpha_i \cdot (t_{90})^i + c_0 \cdot e^{(c_1(t_{90}-126,9686))^2} \quad (2.2.1)$$

kde U je termoelektrické napětí (μV), t_{90} je teplota podle ITS-90 ($^{\circ}\text{C}$), α_i je i -tý koeficient polynomu ($\mu\text{V} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$), tzv. *Seebeckův koeficient*, n udává počet členů polynomu, c_0 a c_1 jsou konstanty. Koeficienty polynomu, jejich počet a konstanty jsou různé pro jednotlivé typy termoelektrických článků a udává je norma. Kromě určení napětí tímto způsobem je možné použít i kalibrační tabulky. Ty jsou pro normované termočládky opět dohledatelné v příslušné normě ČSN EN 60584-1, pro další termočládky jsou pak dostupné u výrobce. [7]

Měření teploty pomocí termočládku je naznačeno na obrázku 2. Referenční konec termočládku je umístěn v prostředí s konstantní teplotou. Při kalibraci či v laboratorních podmínkách je to zpravidla $\vartheta = 0^{\circ}\text{C}$. Termočlánek je možné rovněž připojit přímo k měřicímu přístroji, pak je teplota studeného spoje dána teplotou okolí. Případně je možné termočlánek (není-li dostatečně dlouhý), připojit pomocí kompenzačního vedení, které je z pravidla tvořeno stejnými materiály jako termočlánek samotný. Vložení kompenzačního vedení mezi termočlánek a měřidlo se referenční konec posouvá k měřicímu přístroji. [6]

2.2.2 Přehled používaných termoelektrických článků

Termočlánky můžeme v základu rozdělit na nezapouzdřené (jsou tvořeny samotnými vodiči s patřičnou izolací) a zapouzdřené (vodiče termočlánku jsou uloženy v kovovém ochranném pouzdře).

Přehled dostupných nezapouzdřených termočlánků nám může poskytnout norma ČSN EN 60584-1 *Termoelektrické články*. Ta kromě označení jednotlivých typů termočlánků udává i jejich teplotní rozsahy, termoelektrické napětí jako funkci teploty a informace o podmínkách pracovního prostředí pro jednotlivé termočlánky. Vlastnosti, které u termočlánků posuzujeme a které vyžadujeme, má-li být zachována jejich dostatečná přesnost při měření teploty, jsou

- lineární závislost termoelektrického napětí na *teplotním rozdílu* spojů termočlánku
- největší možný Seebeckův koeficient α (snáze měřitelné napětí)
- odolnost vůči vnějším vlivům (např. vlhkost či agresivní atmosféra)
- odolnost vůči mechanickému namáhání
- minimální změna vlastností v průběhu stárnutí termočlánku [6]

Všechny výše zmíněné parametry jsou závislé na materiálech, které termočlánek tvoří. Teplotní rozsah je závislý nejen na použitém materiálu, ale také na průměru vodiče termočlánku. [7]

Pro jednodušší orientaci v dostupných termoelektrických člancích bylo každé možné kombinaci materiálů přiděleno jednopísmenné označení. Vodiče termočlánku jsou tvořeny rozdílnými kovy či jejich slitinami. U některých termočlánků mohou být oba vodiče tvořeny stejnými prvky, avšak v jiném procentuálním zastoupení.

Tabulka 1: Písmenné označení termoelektrických článků [7]

Písmenné označení	Materiál termoelektrického článku	
	Kladný vodič	Záporný vodič ¹
R	Pt-Rh (13 %)	Pt
S	Pt-Rh (10 %)	Pt
B	Pt-Rh (30 %)	Pt-Rh
J	Fe	Cu-Ni
T	Cu	Cu-Ni
E	Ni-Cr	Cu-Ni
K	Ni-Cr	Ni-Al
N	Ni-Cr-Si	Ni-Si
C	W-Re (5 %)	W-Re (20 %)
A	W-Re (5 %)	W-Re (20 %)

V tabulce 1 je uveden přehled typů termočlánků. Každému písmennému označení náleží jisté chemické složení. Informace o procentním zastoupení (je-li nutná pro správnou funkci), je uvedena v závorce u příslušných kovů. Poměr kovů není vždy nutně kritický, může však mít vliv na odolnost vůči oxidaci či na stabilitu termočlánku. [7]

Rozsahy pracovních teplot, pro které jsou dodrženy třídy přesnosti s patřičnými tolerancemi v prostředí vhodném pro daný typ, jsou závislé rovněž na průměru vodiče termočlánku. V tabulce 2 jsou uvedeny maximální teploty, do kterých je možné dané termočlánky provozovat tak, aby byly zachovány parametry dané normou. Nutno zde upozornit na skutečnost, že výčet termočlánků uvedený v tabulce 2 není kompletní. V tabulce jsou uvedeny nejmenší a největší průměry termočlánků, pro které příslušná norma ČSN EN 60584-1 stanovuje své požadavky na přesnost, způsob zkoušení, kalibraci atd. V katalozích výrobců je pak nabídka rozsáhlejší, viz například termočlánky použité v experimentu popsaném v kapitole 6.

¹ Kladný, resp. záporný, vodič je takový vodič, který má kladný, resp. záporný, potenciál, vzhledem k nulovému potenciálu země, je-li na vodiči gradient teploty. [7]

Tabulka 2: Maximální mezní teploty termoelektrických článků [7]

Typ	Průměr vodiče ² (mm)	ϑ_{\max} (°C)	ϑ_{\max} (°C) ³
B	0,50	1 500	1 700
R, S	0,50	1 400	1 600
N	0,65	850	900
	3,20	1 200	1 250
K	0,65	750	850
	3,20	1 100	1 200
E	0,65	440	480
	3,20	690	800
J	0,65	400	500
	3,20	600	700
T	0,32	200	250
	1,60	300	350

Materiály, ze kterých jsou vodiče termočlánků vyrobeny, do značné míry určují prostředí, v němž bude moci tento pracovat. Složení okolní atmosféry či přítomnost radioaktivního záření v kombinaci se zvýšenou teplotou může vést k nežádoucí degradaci či úplnému zničení termočlánku. V tabulce 3 jsou popsána doporučená pracovní prostředí pro dané typy termočlánků a limity, kterými jsou termočlánky v těchto prostředích omezeny.

2 Výčet průměrů uvedených v tabulce není pro většinu termoelektrických článků vyčerpávající. Kompletní tabulku je možné dohledat v příslušné normě ČSN EN 60584-1 či v katalogu výrobce.

3 Rozšíření rozsahu termočlánku je možné při zkrácení doby, kdy je při této teplotě vystaven okolní atmosféře. Tato doba je zkrácena z 2 000 hodin na 50 pro termočlánky B, R a S a z 10 000 hodin na 250 pro typy N, K, E, J a T. [7]

Tabulka 3: Doporučené pracovní podmínky termočlánků [7]

Typ	Kladný vodič (k) Záporný vodič (z)	Doporučená pracovní prostředí a omezující faktory
J	k	<ul style="list-style-type: none"> • oxidační, redukční, inertní atmosféra a vakuum • teploty vyšší než $\vartheta = 0\text{ °C}$ • od teploty $\vartheta = 540\text{ °C}$ rychle oxiduje, ve vlhku významně podléhá korozi • při teplotě $\vartheta = 760\text{ °C}$ ztrácí magnetické vlastnosti • při teplotě okolo $\vartheta = 910\text{ °C}$ je rozrušena krystalická struktura, zaniká Seebeckův koeficient
J, E, T	z	<ul style="list-style-type: none"> • oxidační, redukční, inertní atmosféra a vakuum • při teplotách nad $\vartheta = 540\text{ °C}$ nelze použít v atmosféře s obsahem síry
T	k	<ul style="list-style-type: none"> • oxidační, redukční, inertní atmosféra a vakuum • při teplotě nad $\vartheta = 370\text{ °C}$ rychle oxiduje • vhodný pro teploty pod bodem mrazu a pro vlhká prostředí
K, E	k	<ul style="list-style-type: none"> • oxidační a inertní atmosféra • nevhodný pro sirnatá prostředí s teplotou nad $\vartheta = 540\text{ °C}$ • při delším vystavení vyšším teplotám (nad $\vartheta = 815\text{ °C}$) dochází ve vakuu k odpařování chromu ze slitiny a tím k nenávratné změně Seebeckova koeficientu
K, N	z	<ul style="list-style-type: none"> • oxidační a inertní atmosféra
N	k	<ul style="list-style-type: none"> • oxidační a inertní atmosféra • další podmínky stejné jako v případě K (k), odolnější vůči sirnaté atmosféře

R, S, B	k, z	<ul style="list-style-type: none"> • oxidační a inertní atmosféra • nevhodné pro vakuum při vysokých teplotách, kromě krátkodobého použití • nevhodné pro přímé umístění do kovového ochranného pouzdra
C, A	k, z	<ul style="list-style-type: none"> • vakuum a inertní atmosféra • maximální doporučená teplota při zachování spolehlivé funkce je $\vartheta = 2\,200\text{ °C}$ • u slitin s menším obsahem rhenia než 26 % dochází při teplotách nad $\vartheta = 1\,200\text{ °C}$ k odpařování wolframu

Z výše uvedené tabulky 3 jsou patrná jistá omezení pro měřicí rozsah či prostředí. Problém s atmosférou, ve které může termočlánek měřit, řeší zapouzdržené termočlánky. Ty sestávají ze tří částí: termočlánekových vodičů, minerální izolace a kovového ochranného pláště. Jak izolace, tak i samotné kovové pouzdro však rovněž určitým způsobem omezují teplotní rozsah termočláneků. Například keramická izolace má maximální pracovní teplotu 1650 °C , což je ale více, než je možné měřit s některými typy termočláneků bez pouzdra. Požadavky kladené na zapouzdržené termoelektrické články upravuje norma ČSN EN 61515 *Termočlánky a kabely termočláneků s minerální izolací a kovovým pláštěm*.

Jak je patrné i z tabulky 3, ne všechny typy termočláneků jsou vhodné pro použití v ochranném pouzdře. Jako zapouzdržené se vyrábějí typy T, J, E, K a N. V pouzdře termočláneků se vyskytují jeden, dva nebo tři páry vodičů, ve zpravidla normou předepsané konfiguraci. [8]

Jako izolační materiál je používán minerální prášek (Mg O , $\text{Al}_2\text{ O}_3$) s předepsanou čistotou alespoň 96 % (nebo podle individuálních požadavků). Funkce minerální izolace je galvanicky oddělit vodiče termočláneků od pouzdra (je-li to požadováno). Zároveň je chrání i mechanicky. Naopak zmíněná výplň musí být dobrým vodičem tepla, jelikož zprostředkovává jeho přenos mezi ochranným pouzdrem a vodiči termočláneků. Z hlediska provedení termoelektrického článku v ochranném pouzdře je možné se setkat s termočlánekem, jejichž vodiče jsou elektricky spojeny s pouzdrem, izolovány od pouzdra, popřípadě může teplý konec termočláneků

vystupovat z pouzdra ven bez přímého kontaktu s ním. Materiál pouzdra tvoří zpravidla ušlechtilé nerezové oceli či slitiny s vysokým obsahem niklu nebo příměsí jiných kovů, například chromu, molybdenu či titanu. Na kvalitu provedení pouzdra jsou kladeny značné nároky, neboť do velké míry ovlivňují přesnost měření. Kromě odolnosti vůči prostředí jde rovněž o koeficient přestupu tepla. Ten je v tomto případě ovlivněn zejména drsností povrchu, která musí být menší než $3,2 \mu\text{m Ra}$. [8]

Vybavením termočlásku ochranným pláštěm lze rozšířit jeho měřicí rozsah. Mezní parametry pro tyto termočlásky nejsou stanoveny a stanovit je není snadné, vzhledem k množství a charakteru použitých částí. Norma mezní hodnoty pouze doporučuje. Výrobce pak udává rozsah, pro který je termočlásek kalibrován, a kde je tedy zachována deklarovaná třída přesnosti. [8]

2.2.3 *Použití termoelektrických článků v oblasti indukčního ohřevu*

Při rozhodování o vhodnosti použití termočlásku pro měření teploty u indukčního ohřevu, je třeba vzít v potaz několik vlivů. Předně použití termočlásku pro měření teploty vsázky je omezeno na vsázku v klidu (nemáme-li vyřešen přenos měřeného napětí jinak než pevným metalickým vedením). V praxi je často nutné se vsázkou pohybovat, abychom zajistili její rovnoměrné prohřívání a ochlazování. Využití termočlásku s pevnými přívodními vodiči tak omezujeme na statické aplikace, zpravidla pro analýzu a nastavení procesu ohřívání. Důležitými parametry jsou teplota, na kterou budeme vsázku ohřívát a skutečnost, bude-li ohřev probíhat např. v ochranné inertní atmosféře. Prostředí, v němž mohou termočlásky správně fungovat, se liší podle použitých materiálů viz tabulka 3. V případě indukčního povrchového kalení je nutné vzít v potaz i přítomnost tryskajícího chladícího média. Tím může být voda, voda s polymery či olej. Budeme-li chtít spolehlivě měřit teplotu i při ochlazování, tedy zachovat správnou funkčnost termočlásku, musí být schopný správně pracovat i v těchto kapalinách.

Rozdílné termočlásky budeme volit pro měření teploty na povrchu či uvnitř vsázky. V případě termočlásku s ochranným pouzdrům může být jeho připevnění k povrchu vsázky problematické. Výhodnější je v tomto případě použití termočlásku z prostých vodičů. K připevnění drátů se používá speciální bodová svářecí souprava, která zajistí galvanické spojení

vodičů termočlátku a zároveň vodiče pevně spojí se vsázkou. Při měření teploty uvnitř vsázky je vhodné použít termočlánek s pouzdrům. Otvor pro vsazení termočlátku by měl být tak velký, aby se pouzdro termočlátku dotýkalo vsázky celým svým povrchem.

Když budeme uvažovat proces povrchového indukčního kalení oceli, kde dosahujeme teplot 900 až 1 100 °C v závislosti na konkrétním složení oceli a její austenitizační teplotě, máme definovanou dolní mez maximální měřící teploty termočlátku.

Vezmeme-li v úvahu dostupné typy termočládků, jež jsou vhodné pro osazení do pouzdra (viz výše), dostáváme několik variant použitelných pro měření teploty za námi definovaných podmínek. V tabulce 4 je přehled vhodných zapouzdřených termočládků. Jako vhodné jsme vyhodnotili ty termoelektrické články, které jsou schopné měřit alespoň do teploty 900 °C, neboť například uprostřed vsázky nepředpokládáme kalící teplotu. Horní hranice teploty definovaná normou nemusí být kritickou, budeme-li ji však překračovat, dostáváme se mimo rozsah, pro který musí být termočlánek podle normy kalibrován, tedy můžeme měřit s chybou mimo toleranci požadovanou normou. Zároveň překračováním maximální povolené teploty snižujeme životnost termočlátku. Stejně jako v případě termočládků bez ochranného pouzdra ani v tabulce 4 není výčet termočládků konečný. V katalogích výrobců je nabídka rozsáhlejší co do průměru vodičů termočlátku i teplotního rozsahu, viz například termočládky použité v experimentu, popsaném v části 6.1.1.

Tabulka 4: Termočládky v pouzdře s minerální izolací vhodné pro měření teplot do 900 °C [8]

Materiál pouzdra	Průměr pouzdra v mm	ϑ_{\max} (°C) pro N	ϑ_{\max} (°C) pro K
S31000	8; 6; 4,5; 3	1 050	1 050
S31003	2; 1,5	920	920
S44600	8; 6; 4,5	1 100	1 100
	3	1070	1070
UNS6600	2; 1,5	920	920
	8; 6; 4,5	1 150	1 150
	3	1 070	1 070
	2; 1,5	920	920

Z teplot dosahovaných při indukčním povrchovém kalení vyjdeme i v případě určení vhodných termočlánků bez pouzdra. Zde je velikost maximální teploty kritičtější, neboť u těchto termočlánků zpravidla uvažujeme výhradně umístění na povrchu vsázky, kde je dosahována nejvyšší teplota. Přehled vhodných termočlánků bez pouzdra je uveden v tabulce 5.

Tabulka 5: Termočlánky bez pouzdra vhodné pro měření teplot při indukčním kalení oceli [7]

Typ	minimální průměr v mm	ϑ_{\max} (°C)	ϑ_{\max} (°C) ⁴
B	0,50	1 500	1 700
R, S	0,50	1 400	1 600
N	0,65	—	900
	0,81	900	950
K	0,81	—	900
	1,29	900	1 000

Dodejme opět, že výčet termočlánků uvedený v tabulce není konečný. Byly vybrány termočlánky, na které klade nároky příslušná norma a které jsou schopné spolehlivě fungovat i v chladících kapalinách používaných při kalení oceli. Dostupné jsou však i termočlánky jiných průměrů. Tyto lze dohledat v katalogu konkrétního výrobce.

Při výběru termočlánků vhodných pro uvažovanou aplikaci rozhoduje několik parametrů, které se mohou vzájemně ovlivňovat. Kromě materiálu, který významně ovlivňuje prostředí, kde může termočlánek pracovat, životnost a teplotní rozsah, je dalším parametrem průměr vodiče termočlánku. Čím větší průměr vodiče použijeme, tím vyšší teploty můžeme měřit. Má-li termočlánek ochranné pouzdro, pak i jeho rozměry ovlivňují měřicí rozsah. Vodiče a pouzdra větších průměrů však mají pomalejší odezvu na teplotu, než termočlánky menších průměrů. To je dáno větší masou materiálu, kterou je nutné prohřát. Budeme-li tedy předpokládat, že se měřená teplota bude rychle měnit, je třeba zvolit tak tenké termočlánky, aby byly schopné tuto změnu teploty sledovat a nedocházelo ke zpoždění.

⁴ Rozšíření rozsahu termočlánku je možné při zkrácení doby, kdy je při této teplotě vystaven okolní atmosféře. Tato doba je zkrácena z 2 000 hodin na 50 pro termočlánky B, R a S a z 10 000 hodin na 250 pro typy N, K. [7]

TEORIE NUMERICKÉHO MODELOVÁNÍ ELEKTROMAGNETICKÝCH POLÍ

3.1 MAXWELLOVY ROVNICE

Elektromagnetické pole je v každém okamžiku a bodě prostoru popsán Maxwellovými rovnicemi v diferenciálním tvaru. Pro popis pole ve vodivém i nevodivém prostředí pak můžeme využít upravené tvary těchto obecných rovnic

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (3.1.1)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{d \vec{B}}{dt} \quad (3.1.2)$$

$$\operatorname{div} \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} = \sigma \quad (3.1.3)$$

$$\operatorname{div} \mu_0 \mu_r \vec{H} = 0 \quad (3.1.4)$$

kde \vec{H} je vektor intenzity magnetického pole, \vec{E} je vektor intenzity elektrického pole. Konstanty ϵ_r a μ_r jsou relativní permitivita a relativní permeabilita. Tyto konstanty charakterizují jednotlivá prostředí po materiálové stránce.

Na rozdíl Maxwellových rovnic v integrálním tvaru, které popisují elektromagnetické pole ve spojitě oblasti, rovnice v diferenciálním tvaru popisují vektorová pole v regulárních bodech, tedy v bodech, kde předpokládáme, že jsou dané vektorové veličiny spojitě a spojitě diferencovatelné. Mimo tyto body (např. na okrajích modelu) pak musíme stanovit patřičné

podmínky. Okrajové podmínky a podmínky na rozhraní jsou odvozeny z Maxwellových rovnic. Další možností je zvolit takové veličiny, jejichž spojitost je zaručena i v *singulárních bodech*. Takovou veličinou může být například magnetický vektorový potenciál.

3.2 ELEKTRODYNAMICKÝ POTENCIÁL

Při popisu vektorových vícedimensionálních polí může nastat problém se spojitostí veličin popsanych Maxwellovými rovnicemi. Proto je vhodné pro popis vektorového pole použít takové veličiny, které jsou v určitých případech spojitě a spojitě diferencovatelné i mimo regulární body. Odvodíme nyní rovnici pro elektrodynamický potenciál podle jednoho z možných, všeobecně známých, postupů.

Pro popis elektrické složky pole použijeme elektrický skalární potenciál, který je definovaný rovnicí

$$\text{rot } \vec{E} = 0 \quad (3.2.1)$$

Z této rovnice pak můžeme vyjádřit intenzitu elektrického pole jako

$$\vec{E} = -\text{grad } \varphi \quad (3.2.2)$$

Pro jednoznačné určení elektrického skalárního potenciálu by pak bylo nutné tuto funkci normovat.

Pro popis magnetické složky pole použijeme magnetický vektorový potenciál, který je definovaný rovnicí

$$\text{rot } \vec{A} = \vec{B} \quad (3.2.3)$$

Vektorový magnetický potenciál lze normovat za použití Coulombovy podmínky

$$\text{div } \vec{A} = 0 \quad (3.2.4)$$

Následně můžeme dosadit rovnici 3.2.3 do druhé Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru 3.1.2

$$\text{rot } \vec{E} = -\text{rot } \frac{d\vec{A}}{dt} \quad (3.2.5)$$

$$\text{rot } \left(\vec{E} + \frac{d\vec{A}}{dt} \right) = 0 \quad (3.2.6)$$

Z rovnice v tomto tvaru je patrné, že uvažované vektorové pole je nevírové. Můžeme tedy zavést elektrický skalární potenciál

$$\left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}\right) = -\text{grad } \varphi \quad (3.2.7)$$

$$\vec{E} = -\frac{d\vec{A}}{dt} - \text{grad } \varphi \quad (3.2.8)$$

Dále si vyjádříme totální derivaci vektoru magnetické indukce vystupující ve druhé Maxwellově rovnici 3.1.2, která je funkcí času a souřadnic

$$\frac{d\vec{B}}{dt} = \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{B} \quad (3.2.9)$$

kde vektor \vec{v} představuje směr rychlosti pohybu. Vynásobme nyní rovnici 3.2.8 elektrickou vodivostí γ . Dostaneme rovnici

$$\gamma \vec{E} = \vec{J} = -\gamma \frac{d\vec{A}}{dt} - \gamma \text{grad } \varphi \quad (3.2.10)$$

Nyní využijme rovnici 3.2.9 a s její pomocí upravme vztah 3.2.10 do tvaru

$$\vec{J} = -\gamma \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{A} \right) - \gamma \text{grad } \varphi \quad (3.2.11)$$

Tento vztah dále upravíme a dostaneme rovnici

$$\vec{J} = -\gamma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \gamma \vec{v} \times \text{rot } \vec{A} - \gamma \text{grad } \varphi \quad (3.2.12)$$

Z pravé strany výše uvedeného vztahu 3.2.12 je patrné, že výsledná proudová hustota má tři části. Po řadě jsou to složky transformační (vzniká vlivem časových změn vektorového pole), složka pohybová, tzv. *posuvný (Maxwellův) proud* (vzniká pohybem prvků v poli) a konečně složka zdrojová, tedy proudová hustota dodávaná z vnějšího zdroje do popisované soustavy.

Vezměme nyní první Maxwellovu rovnici 3.1.1 společně s materiálovým vztahem 3.2.13 a rovnicí zavádějící magnetický vektorový potenciál 3.2.3. Po dosazení dostáváme proudovou hustotu vyjádřenou vztahem 3.2.14

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (3.2.13)$$

$$\vec{j} = \text{rot } \vec{H} = \text{rot} \left(\frac{\vec{B}}{\mu} \right) = \text{rot} \left(\frac{\text{rot } \vec{A}}{\mu} \right) \quad (3.2.14)$$

Konečně dosadíme takto vyjádřenou proudovou hustotu do rovnice 3.2.12

$$\text{rot} \left(\frac{\text{rot } \vec{A}}{\mu} \right) = -\gamma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \gamma \vec{v} \times \text{rot } \vec{A} - \gamma \text{grad } \varphi \quad (3.2.15)$$

Označme výraz $\gamma \text{grad } \varphi$ jako proudovou hustotu zdroje \vec{j}_z a rovnici upravíme do následujícího tvaru

$$\text{rot} \left(\frac{\text{rot } \vec{A}}{\mu} \right) + \gamma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \gamma \vec{v} \times \text{rot } \vec{A} = \vec{j}_z \quad (3.2.16)$$

Vzhledem k námi uvažované aplikaci je možné posuvný proud zanedbat, rovnici tak dostaneme ve tvaru

$$\text{rot} \left(\frac{\text{rot } \vec{A}}{\mu} \right) + \gamma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \vec{j}_z \quad (3.2.17)$$

Budeme-li uvažovat, že proudová hustota zdroje bude mít harmonický charakter, pak můžeme předpokládat, že takový charakter bude mít i elektromagnetické pole a dostáváme tak finální podobu rovnice elektrodynamického potenciálu

$$\frac{1}{\mu} \left(\text{grad div } \vec{A} - \Delta \vec{A} \right) + \gamma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} (\Delta A) + \gamma j \omega A = \vec{j}_z \quad (3.2.18)$$

3.3 HLOUBKA VNIKU ELEKTROMAGNETICKÉHO VLNĚNÍ DO VODIVÉ STĚNY

Velikost oblasti, ve které se indukují vířivé proudy a tedy i oblast, kde vzniká ve vsázce teplo, je závislá na *hloubce vniku*.

Pro odvození hloubky vniku je nejprve třeba odvodit vlnovou rovnici elektromagnetického vlnění. Vyjdeme při tom z první Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru 3.3.3, kterou dále upravíme pomocí materiálových vztahů 3.3.1 a 3.3.2

$$\vec{j} = \gamma \vec{E} \quad (3.3.1)$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (3.3.2)$$

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \gamma \vec{E} + \frac{\partial}{\partial t} (\epsilon \vec{E}) \quad (3.3.3)$$

Aplikujme nyní na rovnici 3.3.3 rotaci. Poté můžeme do rovnice dosadit pomocí druhé Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru 3.1.2

$$\text{rot rot } \vec{H} = \gamma \text{rot } \vec{E} + \epsilon \frac{\partial}{\partial t} \text{rot } \vec{E} = -\gamma \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} - \epsilon \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \quad (3.3.4)$$

Levou stranu rovnice můžeme dále upravit. Do takto upravené rovnice dosadíme ze čtvrté Maxwellovy rovnice 3.1.4

$$\text{grad div } \vec{H} - \Delta \vec{H} = 0 - \Delta \vec{H} = -\gamma \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} - \epsilon \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \quad (3.3.5)$$

A konečně použitím materiálového vztahu 3.2.13 získáme rovnici, kde vystupuje pouze jedna veličina popisující pole

$$-\Delta \vec{H} = -\gamma \mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} - \epsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \quad (3.3.6)$$

$$\Delta \vec{H} - \gamma \mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} - \epsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0 \quad (3.3.7)$$

Předpokládejme, že proud procházející induktorem bude v ustáleném stavu harmonický. Poté i elektromagnetické pole vyvolané v okolí induktoru tímto proudem bude mít harmonický charakter. Můžeme proto časovou derivaci nahradit a celou rovnici přepsat pomocí fázorů zavedením úhlové frekvence a komplexní jednotky

$$\Delta H - j\omega\gamma\mu H + \omega^2\epsilon\mu H = 0 \quad (3.3.8)$$

Takto přepsanou rovnici dále upravme

$$\Delta H + H (\omega^2\epsilon\mu - j\omega\gamma\mu) = \Delta H + k^2 H = 0 \quad (3.3.9)$$

Zaměřme se nyní na výraz obsažený v závorce v rovnici 3.3.9. Vsázka, pro kterou hloubku vniku odvozujeme, je vodivá. Vodivost γ je tedy nenulová a zároveň mnohem větší než součin $\omega\epsilon$. Část výrazu $\omega^2\epsilon\mu$ tak můžeme zanedbat a výraz v závorce, označili jsme jej k^2 , se tak zjednoduší

$$k^2 = -j\omega\gamma\mu \quad (3.3.10)$$

Dostáváme kvadratickou rovnici, jejíž řešení lze zapsat jako

$$k_{1,2} = \pm \frac{1+j}{\sqrt{2}} \sqrt{\omega\gamma\mu} \quad (3.3.11)$$

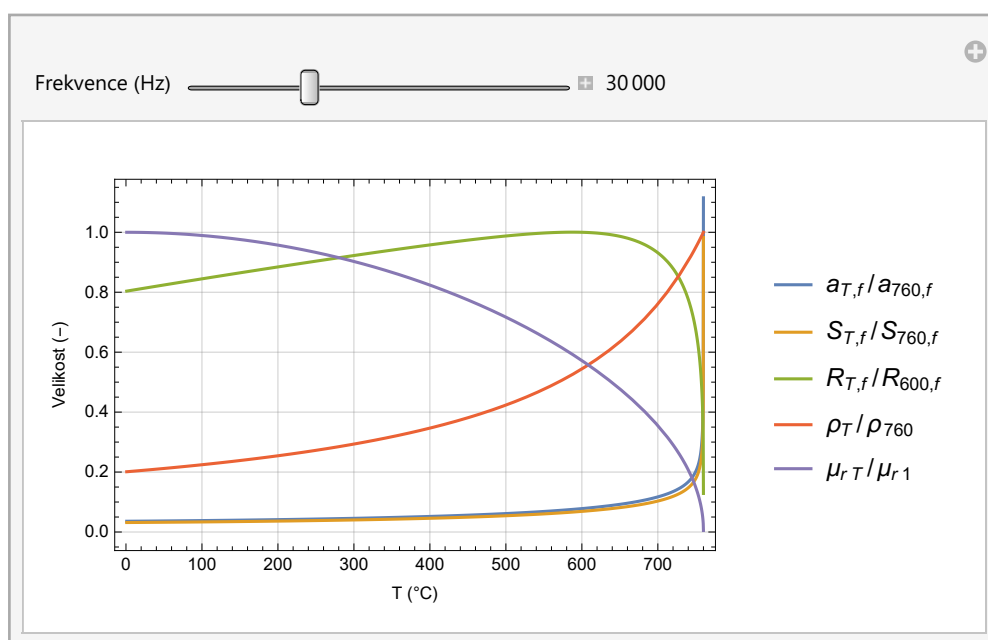
Reálná část toho výrazu pak představuje převrácenou hodnotu námi hledané hloubky vniku elektromagnetického vlnění

$$\text{RE} \{k\} = \sqrt{\frac{\omega\gamma\mu}{2}} = \frac{1}{a} \quad (3.3.12)$$

A konečně vyjádříme hloubku vniku a

$$a = \sqrt{\frac{2}{\omega\gamma\mu}} = \sqrt{\frac{1}{\pi f\gamma\mu}} \quad (3.3.13)$$

Jak je vidět z rovnice 3.3.13, kromě materiálových vlastností ovlivňuje hloubku vniku frekvence elektromagnetického vlnění. Její volbou jsme tak schopni měnit oblast, kterou aktivně prohříváme indukovanými vířivými proudy. Toho využijeme i v naší aplikaci povrchového indukčního kalení, kdy chceme ohřívat, a tedy i zakalit, pouze vnější část vsázky o dané mocnosti. Tím, že se vsázka nezakalí v celém objemu, je hlouběji v materiálu zachována její pružnost, což je v některých aplikacích vyžadováno.



Obrázek 3: Simulace závislosti charakteristických veličin na teplotě, vyneseno poměrově [9]

Je-li mocnost prohřívané vsázky menší než hloubka vniku a , potom se v ní prakticky neindukují vířivé proudy a nedochází tak k přenosu energie do vsázky. Takovýto materiál je

pro dané elektromagnetické vlnění *průzařný*. Tato situace může nastat i u vsázky, kterou jsme byli schopni až do určitého okamžiku ohřívat. Jak je patrné z obrázku 3, při jisté teplotě klesá permeabilita zahřívané vsázky (v tomto případě oceli) k hodnotě $\mu_r = 1$, mění se rovněž i permitivita. Tuto teplotu nazýváme Curieovým bodem. Materiály v tomto bodě ztrácejí magnetické vlastnosti. Se změnou permeability dojde i ke změně hloubky vniku a , která značně naroste. Budeme-li chtít vsázku dále prohřívat, je nutné změnit frekvenci tak, aby vsázka přestala být pro dané elektromagnetické vlnění průzařná, tedy aby se hloubka vniku opět snížila, jak vyplývá z rovnice 3.3.13. [10]

3.4 VZNIK TEPLA VE VSÁZCE

Teplu ve vsázce při indukčním ohřevu vzniká na základě indukovaných vířivých proudů. Jejich působením vznikají Joulovy ztráty. Ztráty samozřejmě vznikají i v induktoru, na který působí vnější proudová hustota. V naší aplikaci, kdy vyšetřujeme pouze teplo ve vsázce, ztráty v induktoru zanedbáme a ztráty ve vsázce pak vyjádříme vztahem

$$w_J = (\vec{E}_z + \vec{E}) (\vec{J}_z + \vec{J}) \quad (3.4.1)$$

kde vektor \vec{J}_z představuje proudovou hustotu dodávanou zdrojem do systému a \vec{E}_z vektor intenzity elektrického pole od zdroje tohoto pole. Vektory \vec{J} a \vec{E} reprezentují veličiny vznikající vlivem elektromagnetického pole působícího na vsázku. [9]

Rovnici 3.4.1 pak ještě upravíme do tvaru

$$w_J = \gamma \left| \vec{E}_z + \vec{E} \right|^2 = \gamma \left| \frac{\vec{J}_z}{\gamma} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right|^2 \quad (3.4.2)$$

Oblast, kde ve vsázce vznikají Joulovy ztráty, je omezená hloubkou vniku elektromagnetického vlnění. Obecně platí, že vnikající vlna je prakticky utlumena v hloubce $2\pi a$, kde a je hloubka vniku podle vzorce 3.3.13, přičemž ztráty vznikají do vzdálenosti πa od povrchu. V hloubce rovnající se hloubce vniku a je pak utlumeno přibližně 70 % ztrát. Výše uvedené skutečnosti platí pro vlnění vnikající do rovinné plochy. V případě válcového vlnění nemá rozložení jednotlivých veličin exponenciální průběh, ale je výsledkem řešení Besselových funkcí.

Aby bylo možné uvažovat průběhy veličin uvnitř vsázky ve válcovém elektromagnetickém poli za přibližně exponenciální, musí být naplněna podmínka velikosti argumentu $x_2 \geq 6$. Argument x_2 je dán vztahem

$$x_2 = \frac{r_2}{a} \sqrt{2} \quad (3.4.3)$$

kde r_2 je poloměr vsázky a a je hloubka vniku. [10] [3]

3.5 OKRAJOVÉ PODMÍNKY

Okrajové podmínky jsou důležitou součástí numerického modelu. Vhodně zvolené mohou zásadním způsobem ovlivnit rychlost simulace a snížit požadavky na hardware. Pro optimalizaci simulace je rovněž důležité vhodně využít případných symetrií. Při řešení úloh s elektromagnetickým polem jsou nejčastěji používanými podmínkami Dirichletova a Neumanova podmínka. [9]

3.5.1 Dirichletova podmínka

Dirichletovou podmínkou přiřazujeme místu v modelu (okraji modelu, hranici) konkrétní hodnotu sledované veličiny. V námi uvažovaném případě velikost magnetického vektorového potenciálu. Podmínka může mít pro naši aplikaci tvar

$$\vec{A}|_{\Gamma} = f_{1(\Gamma,t)} \quad (3.5.1)$$

Podmínka zároveň určuje i derivaci vektorového potenciálu a tedy i normálovou složku rotace magnetického vektorového potenciálu. Jeho normálová složka odpovídá normálové složce magnetické indukce podle vztahu 3.2.3. Stanovíme-li v nějakém bodě hodnotu \vec{A} konstantní, pak je normálová složka vektoru \vec{B} nulová. Toho můžeme využít při symetrických modelech, kde je hranice, pro kterou potenciál definujeme, rovnoběžná se siločarou. [9]

3.5.2 Neumanova podmínka

Neumanova podmínka ve tvaru

$$\frac{\partial \vec{A}}{\partial \vec{n}} \Big|_{\Gamma} = f_{2(\Gamma,t)} \quad (3.5.2)$$

určuje, na základě stejné úvahy jako u předešlé Dirichletovy podmínky, tečnou složku vektoru magnetické indukce. Přiřadíme-li výrazu na pravé straně rovnice 3.5.2 hodnotu 0, pak je vektor \vec{B} ve směru normály k ploše Γ . [9]

TEORIE NUMERICKÉHO MODELOVÁNÍ TEPLOTNÍCH POLÍ

Při indukčním ohřevu elektricky vodivé vsázky se v ní indukují vířivé proudy. Ty jsou příčinou vzniku tepla ve vsázce. Takto vzniklé teplo se šíří ve vsázce vedením (kondukcí). Zároveň dochází k přenosu tepla do okolí vsázky prouděním (konvekci) a sáláním (radiací), které převládá při vyšších teplotách. Soustředme se nyní na teplotní pole ve vsázce. Způsob, jakým se teplo v pevném prostředí vsázky šíří, vhodně popisuje Fourier-Kirchhoffova rovnice. Fourier-Kirchhoffova rovnice v diferenciální tvaru vyjadřuje rovnost časové změny tepelné kapacity a celkové změny tepla sdíleného vedením a vzniká-li, resp. zaniká-li, energie (v elementu objemu za element času) i přírůstek, resp. úbytek tepla. [9] [11]

4.1 FOURIER-KIRCHHOFFOVA ROVNICE

Při odvozování vztahu vhodně popisujícího vedení tepla v pevné vsázce vyjdeme z energetické rovnice

$$\frac{dH}{dt} = \int_S -\vec{n} \cdot \vec{q} dS + \int_V q^* dV \quad (4.1.1)$$

kde H je entalpie (J), \vec{n} je jednotkový vektor, \vec{q} je hustota tepelného toku ($W \cdot m^{-2}$), S je plocha přestupu (m^2), q^* jsou vnitřní měrné ztráty ($W \cdot m^{-3}$) a V je objem (m^3). Levá strana popisuje celkovou schopnost akumulace tepelné energie. První člen pravé strany pak představuje energetické toky (vstupující i vystupující) přes hranici uvažovaného tělesa. Druhý člen pravé strany pak představuje vnitřní zdroje tepla. [9]

Entalpii můžeme vyjádřit jako objemový integrál vyjadřující energii v celém systému

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_V h \rho dV = \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho c_p (T - T_{\text{ref}}) dV \quad (4.1.2)$$

kde h je měrná entalpie ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$), ρ je látková hustota ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), c_p je měrná tepelná kapacita ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) a T je termodynamická teplota (K).

Po dosazení do rovnice 4.1.1 dostáváme

$$\int_S -\vec{n} \cdot \vec{q} dS + \int_V q^* dV = \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho c_p (T - T_{\text{ref}}) dV \quad (4.1.3)$$

Předpokládáme-li konstantní objem vsázky, potom můžeme rovnici upravit na výraz 4.1.4

$$\int_S -\vec{n} \cdot \vec{q} dS + \int_V q^* dV = \int_V \frac{\partial}{\partial t} (\rho c_p (T - T_{\text{ref}})) dV \quad (4.1.4)$$

Použijme nyní Gaussovy-Ostrogradského věty na úpravu první části výrazu v levé straně rovnice 4.1.4. Dostaneme rovnici 4.1.5, kde jsou všechny členy rovnice vyjádřeny pomocí objemových integrálů, můžeme tedy korektně upravit rovnici do podoby 4.1.6

$$\int_V -\nabla \cdot \vec{q} dV + \int_V q^* dV = \int_V \frac{\partial}{\partial t} (\rho c_p (T - T_{\text{ref}})) dV \quad (4.1.5)$$

$$-\nabla \cdot \vec{q} + q^* = \frac{\partial T}{\partial t} \rho c_p \quad (4.1.6)$$

$$-\frac{1}{\rho c_p} \nabla \cdot \vec{q} + \frac{q^*}{\rho c_p} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.1.7)$$

Nyní je třeba získat rovnici pro totální derivaci termodynamické teploty podle času. Ta popisuje rychlost změny teploty v materiálu, kde dochází ke změně termodynamické teploty v prostoru a čase, jak je vyjádřeno v rovnici 4.1.8. [9]

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T = \frac{dT}{dt} \quad (4.1.8)$$

Podívejme se na význam \vec{q} v rovnici 4.1.7 a dosaďme do ní.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{1}{\rho c_p} \nabla (-\lambda \nabla T + \vec{v} \rho c_p (T - T_{\text{ref}})) + \frac{q^*}{\rho c_p} \quad (4.1.9)$$

kde λ je součinitel přestupu tepla ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\lambda}{\rho c_p} \nabla \nabla T - \nabla (\vec{v} (T - T_{\text{ref}})) + \frac{q^*}{\rho c_p} \quad (4.1.10)$$

Využijeme vlastností skalárního součinu vektorů (rovnice 4.1.11) k úpravě prostředního výrazu pravé strany rovnice 4.1.10

$$\vec{a} (\vec{b} + \vec{c}) = \vec{a} \vec{b} + \vec{a} \vec{c} \quad (4.1.11)$$

Po dosazení

$$\nabla (\vec{v} (T - T_{\text{ref}})) = \nabla (T - T_{\text{ref}}) \vec{v} + (T - T_{\text{ref}}) \nabla \vec{v} \quad (4.1.12)$$

Takto upravenou rovnici 4.1.12 dosadíme do vztahu 4.1.10

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\lambda}{\rho c_p} \nabla \nabla T - \nabla (T - T_{\text{ref}}) \vec{v} + (T - T_{\text{ref}}) \nabla \vec{v} + \frac{q^*}{\rho c_p} \quad (4.1.13)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c_p} \nabla^2 T - \nabla (T - T_{\text{ref}}) \vec{v} - (T - T_{\text{ref}}) \nabla \vec{v} + \frac{q^*}{\rho c_p} \quad (4.1.14)$$

Předpokládejme ustálený stav, pak je rychlost šíření tepla ve směrech x , y a z v kartézských souřadnicích konstantní a platí rovnice 4.1.15. Dále předpokládejme platnost výrazu 4.1.16.

$$\nabla \vec{v} = 0 \quad (4.1.15)$$

$$\nabla (T - T_{\text{ref}}) = \nabla T \quad (4.1.16)$$

Poté můžeme rovnici 4.1.14 napsat ve tvaru

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c_p} \nabla^2 T - \vec{v} \nabla T + \frac{q^*}{\rho c_p} = a_q \nabla^2 T - \vec{v} \nabla T + \frac{q^*}{\rho c_p} \quad (4.1.17)$$

kde a_q je součinitel teplotní vodivosti ($m^2 \cdot s^{-1}$). A konečně dosaďme do této rovnice vztah 4.1.8. Po dosazení a úpravě dostáváme finální tvar Fourier-Kirchhoffovy rovnice pro šíření tepla v diferenciálním tvaru.

$$\frac{dT}{dt} = a_q \nabla^2 T + \frac{q^*}{\rho c_p} = a_q \nabla^2 T + \frac{w_J}{\rho c_p} \quad (4.1.18)$$

Záměnu q^* za w_j jsme vzhledem k naší aplikaci v indukčním ohřevu korektně uskutečnili za předpokladu, že teplo v materiálu vzniká pouze na základě Joulových ztrát.

4.2 OKRAJOVÉ PODMÍNKY

Okrajové podmínky jsou důležitou součástí numerického modelu. Vhodně zvolené mohou zásadním způsobem ovlivnit rychlost simulace a snížit požadavky na hardware. Pro optimalizaci simulace je rovněž důležité vhodně využít případných symetrií. Při řešení problematiky teplotních polí určujeme, stejně jako v případě polí elektromagnetických, Dirichletovu a Neumanovu podmínku. [9]

4.2.1 Dirichletova podmínka

Dirichletovou podmínkou přiřazujeme místu v modelu (okraji modelu, hranici) konkrétní známou hodnotu. V našem případě velikost teploty na povrchu vsázky. Rovnice popisující Dirichletovu podmínku pak může mít tvar

$$T|_{\Gamma} = f_{3(\Gamma,t)} \quad (4.2.1)$$

4.2.2 Neumanova podmínka

Neumanovu podmínku zavedeme v případě, že známe velikost tepelného toku hranicí Γ . Rovnici zavádějící Neumanovu podmínku můžeme zapsat jako

$$\frac{\partial T}{\partial \vec{n}}|_{\Gamma} = f_{4(\Gamma,t)} \quad (4.2.2)$$

Tato podmínka je často zadávána v osách symetrie (v našem případě v ose válcové vsázky), kde je tepelný tok touto hranicí nulový. Což opět přispívá k rychlejší konvergenci numerického modelu. Za předpokladu nulového toku touto hranicí bude i parciální derivace teploty nulová. [9]

Část III

NUMERICKÝ MODEL

NUMERICKÝ MODEL

Proces indukčního ohřevu představuje z hlediska výpočtu tzv. *sdruženou úlohu*. Ta v sobě zahrnuje jednak řešení elektromagnetického pole a dále řešení pole teplotního. Vlivem rostoucí teploty dochází ve vsázce k nezanedbatelným změnám materiálových parametrů, čímž zpětně dochází i k ovlivňování elektromagnetického pole. Bude-li separátně řešeno pole elektromagnetické a následně pole teplotní, pak je řeč o slabě sdružené úloze. Druhým přístupem je nahlížet na problém jako na kvazi sdruženou resp. silně sdruženou úlohu. V takovém případě je nejprve spočteno elektromagnetické pole a na základě Joulových ztrát následně určeno rozložení teplotního pole. Dojde-li vlivem teploty ke změně materiálových parametrů, je nutné provést nový elektromagnetický výpočet se změněnými hodnotami. Rozdíl mezi kvazi sdruženou a silně sdruženou úlohou je četnost, s jakou je střídavě počítáno elektromagnetické a teplotní pole, v závislosti na velikosti změny materiálových vlastností vlivem změny teploty. [4]

Takto definované úlohy je nereálné počítat analyticky, je proto třeba zvolit vhodnou numerickou metodu. Díky rychlému rozvoji výpočetní techniky v posledních několika desítkách let existují nyní nástroje schopné s určitou vypovídající hodnotou řešit výše zmíněné problémy. Z hlediska přístupu k řešení numerické úlohy lze rozeznat dvě nejpoužívanější metody, metodu konečných diferencí a metodu konečných prvků (Finite Element Method, dále jen FEM). Mezi dnes nejčastěji používané software pro řešení elektromagnetických a teplotních polí patří ANSYS[®] Multiphysics, COMSOL[®] Multiphysics, CEDRAT Flux[®], JMag[®] či QuickField[®]. Kromě uvedených se lze setkat i s programy, jejichž použití není zpoplatněno, například Agros2D nebo Elmer. [4] [12]

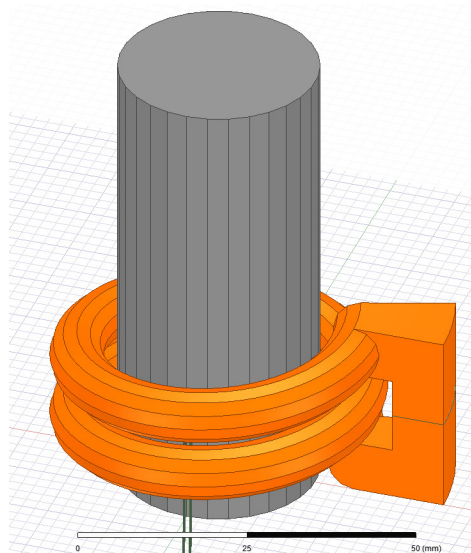
Pro simulaci jsem použil software ANSYS Electronics Desktop, který řeší elektromagnetické pole pomocí metody FEM, konkrétně pak s využitím elektrodynamického potenciálu, jehož spojitost je za určitých podmínek zaručena i v singulárních bodech. Elektrodynamický potenciál byl odvozen v kapitole *Teorie numerického modelování elektromagnetických polí*, v části 3.2.

5.1 TVORBA MODELU A PODMÍNKY SIMULACE

Geometrie modelu byla vytvořena tak, aby přibližně respektovala rozměry vsázek a induktoru. Induktor byl tvarově poněkud zjednodušen, zachován byl počet závitů, jejich stoupání a průměr, stejně tak i průměr vodiče. Kruhový průřez vodiče induktoru byl nahrazen mnohoúhelníkovým profilem, který přispěje k snazší tvorbě sítě bodů, ve kterých software počítá požadované hodnoty, aniž by model utrpěl na vypovídající hodnotě. Stejným způsobem byl upraven i povrch vsázky, jejíž rozměry jinak plně respektují rozměry při experimentu použitých ocelových válečků. Pod povrchem modelu byla, na doporučení autorů softwaru, vytvořena skořepina, jejíž rozměry se od vnějších rozměrů vsázky liší o polovinu hloubky vniku elektromagnetického vlnění. Hloubka vniku je závislá na materiálových vlastnostech a na frekvenci. Důvodem k vytvoření této skořepiny je zkvalitnění sítě. Umístěním skořepiny vznikne síť bodů mezi ní a povrchem vsázky. V hloubce $2\pi a$ jsou prakticky utlumeny všechny veličiny vstupujícího pole. Ztráty jsou v podstatě utlumeny již ve vzdálenosti πa od povrchu.

Přítomnost termočlánku uvnitř vsázky byla simulována odebráním sloupce materiálu stejného průměru, jako je vnější průměr pouzdra termočlánků použitých při měření. Termočlánky na povrchu byly namodelovány jako dva rovnoběžné vodiče spojené s povrchem. Materiálové vlastnosti byly nastaveny tak, aby odpovídaly materiálům používaných pro termočlánky typu K.

Po vytvoření geometrie byly pro ocelovou vsázku stanoveny elektrická a tepelná vodivost, hustota, měrná tepelná kapacita a permeabilita. Uvedené veličiny byly pro jednoduchost nastaveny pouze staticky, bez závislosti na teplotě. Zvoleny byly průměrné hodnoty dostupné pro typy ocelí použité při našem měření. Určeny byly rovněž vlastnosti měděného induktoru. Velikost a frekvence proudu induktorem byla stejná jako v případě experimentu,



Obrázek 4: 3D model pro simulaci ohřevu

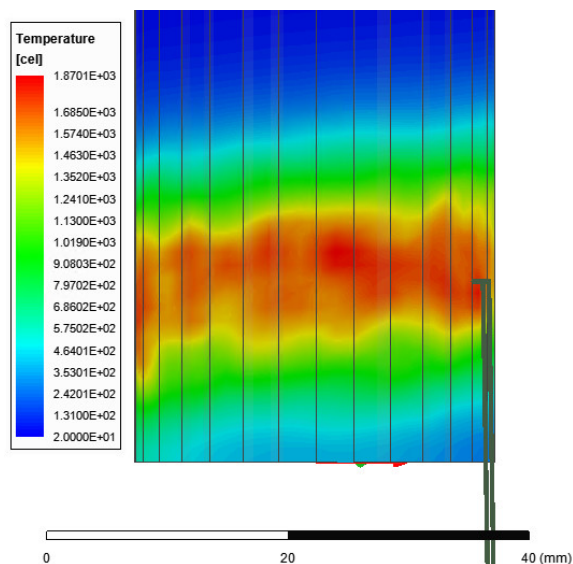
tedy přibližně 1450 A (v amplitudě, tj. $I_{ef} = 1025$ A) při 30 kHz. Model byl vytvořen bez pohybu induktoru a bez ochlazování vsázky vodní sprchou. Induktor byl umístěn 15 mm od dolního konce ocelového válečku.

Výpočet byl nastaven tak, aby se v každém dalším kroku zjemnila síť bodů o 30 %. Simulace byla zastavena v okamžiku, kdy po posledním průchodu klesla celková energetická chyba pod 2 %. Po výpočtu elektromagnetického pole v Maxwell3D byla následně provedena analýza teplotního pole v Icepak. Úloha byla tedy pojata jako slabě sdružená, bez vlivu materiálových změn na další průběh ohřevu. Tato a výše zmíněná zjednodušení jsem mohl uskutečnit na základě faktu, že předmětem této práce nebylo provést komplexní numerickou simulaci kalícího procesu, ale stanovit vliv umístění termočlátku, k čemuž je takto nadefinovaný model dostačující.

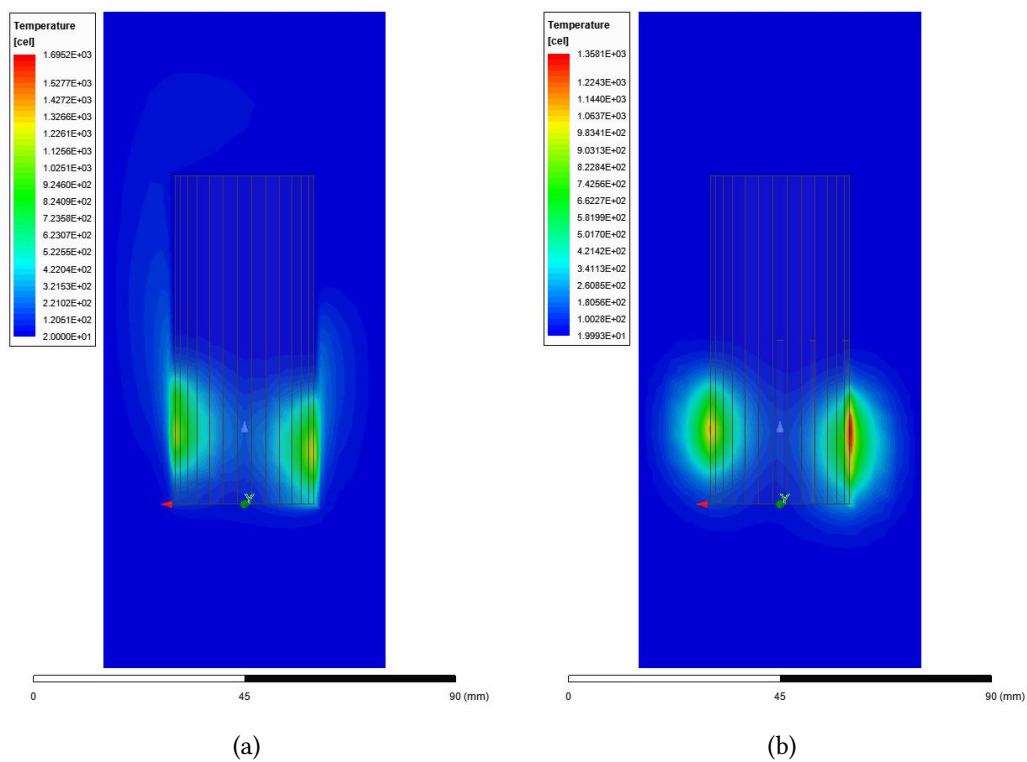
5.2 VÝSLEDKY NUMERICKÉ SIMULACE

Podívejme se na obrázek 5 zobrazující výsledky matematického modelu pro případ termočlátku na povrchu. Je zřejmé, že termočlánek umístěný na povrchu neovlivňuje teplotu vsázky během ohřevu. Teplota v okolí termočlátku nikterak zvlášť nevybočuje. Rozložení teploty kopíruje stoupání závitů induktoru. Při použité frekvenci 30 kHz se vodiče termočlátku jeví jako pružné a tedy neovlivňují elektromagnetické pole. Na obrázcích 6a a 6b

jsou znázorněny teploty vsázky a vzduchu v jejím okolí. Teploty jsou zobrazeny v řezu vedeném v rovině uložení vnitřních termočláneků. Obrázek 6a představuje vsázku bez otvorů. Na obrázku 6b je vidět nárůst teploty v okolí termočláneků uloženého těsně pod povrchem.



Obrázek 5: Teplota vsázky, termočlánek na povrchu



Obrázek 6: Rozložení teploty ve vsázce a okolí, řez v rovině umístění termočláneků

Část IV

EXPERIMENT

EXPERIMENT

Níže popsaný experiment byl realizován na ZČU v Plzni na Fakultě elektrotechnické s cílem zjistit, zda a jakým způsobem je ovlivněna přesnost měření teploty pomocí termočlánků při procesu kontinuálního kalení už jejich samotnou přítomností na povrchu či uvnitř ocelové vsázky.

6.1 POPIS EXPERIMENTÁLNÍHO KALÍČÍHO ZAŘÍZENÍ

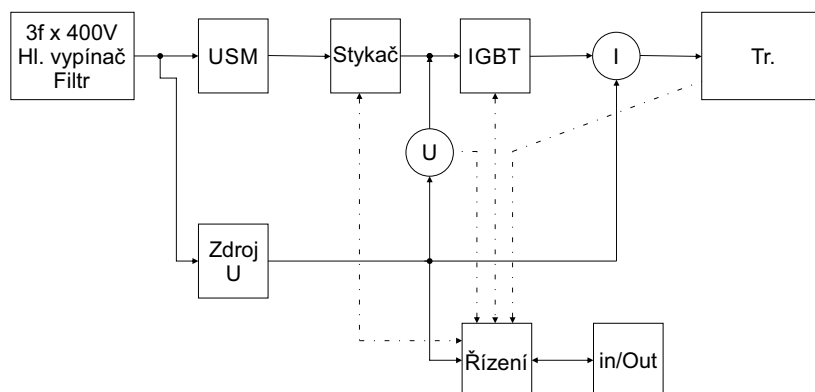
Při realizaci níže popsaného experimentu bylo použito zařízení zkonstruované týmem zabývajícím se elektrotepelnými procesy na Katedře elektroenergetiky na ZČU v Plzni. Zařízení (obrázek 8) sestává ze dvou základních částí. První je samotný systém pro indukční kalení, skládající se z frekvenčního měniče, baterie rezonančních kondenzátorů, vysokofrekvenčního transformátoru, induktoru, manipulátoru pro pohyb induktorem, vodního hospodářství a nosné konstrukce. Druhá část je pak zodpovědná za měření a ukládání dat.

Vodou chlazený frekvenční měnič FRQ 60 s výstupním napětím až 560 V a maximálním výstupním proudem 225 A je napájen z třífázové sítě 3×400 V. Maximální příkon měniče je 45 kVA. Měnič obsahuje plné můstkové zapojení s IGBT tranzistory. Výstupní frekvence tohoto měniče je 3 až 40 kHz. Pracovní frekvenci, kterou je napájen induktor, nastavujeme podle rezonanční frekvence obvodu tvořeného sériovým zapojením kondenzátorové baterie a vysokofrekvenčního transformátoru. K sekundárnímu vinutí transformátoru je připojen induktor se vsázkou. Rezonanční frekvence, které je v rámci kalících procesů na tomto zařízení dosaženo, se pohybuje v rozmezí 20 až 40 kHz. Při experimentu byl použit transformátor s převodem 16:1 a základními parametry $L_{p0} = 2,3$ mH, $R_{p0} = 0,59$ Ω (sekundár

naprázdno), $L_{pk} = 90 \mu\text{H}$, $R_{pk} = 0,96 \Omega$ (sekundár nakrátko), $L_{s0} = 13,1 \mu\text{H}$, $R_{s0} = 8,3 \text{ m}\Omega$ (primár naprázdno), $L_{pk} = 4,4 \mu\text{H}$, $R_{pk} = 4,4 \text{ m}\Omega$ (primár nakrátko). Uvedené hodnoty byly naměřeny pro frekvenci 30 kHz. Blokové schéma výkonového elektrického obvodu je znázorněno na obrázku 7. Měnič v průběhu kalení komunikuje s průmyslovým počítačem. [9]

Důležitou součástí zařízení je vodní hospodářství (jeho vybrané části jsou zobrazeny na obrázku 9). Slouží k chlazení jednotlivých komponent, které jsou vzhledem k přenášeným výkonům významně teplotně namáhány. Vodou je chlazen jednak měnič a kondenzátorová baterie, dále pak vysokofrekvenční transformátor a induktor. Voda zároveň slouží i ke kalení vsázky. Kalící voda má vlastní nádrž. Chlazení induktoru a měniče tvoří uzavřený okruh, kdy teplá voda je jímána do zásobníku. Množství použitého chladicího média je sledováno precizními průtokoměry. Měření je zároveň tlak a teplota chladicí kapaliny (vody popřípadě vody s polymery pro chlazení vsázky). Teplota vody ve stroji je měřena pomocí teplotních odporových čidel Pt 100. Účelem těchto měření je analýza procesu kalení po stránce celkové energetické bilance. [9]

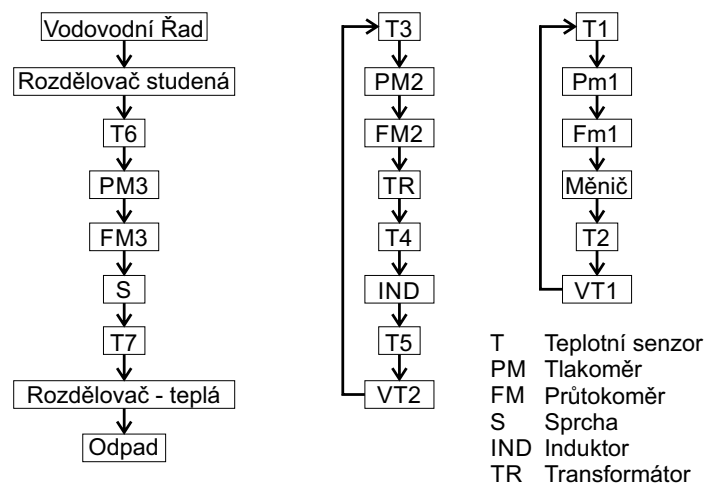
Vsázky ohříváné pomocí tohoto zařízení mají tvar válce. Váleček oceli se upevňuje pomocí dvou proti sobě působících přitlačných hrotů. Pro rovnoměrné prohřívání je dolní hrot opatřen pohonem, který umožňuje vsázkou rotovat. Aby ji bylo možné kontinuálně ohřívát a posléze ochlazovat v celé její výšce, spočívají vysokofrekvenční transformátor s induktorem a vodní sprchou na výtahu, který umožňuje vertikální pohyb těchto částí.



Obrázek 7: Blokové schéma zapojení a řízení měniče FRQ 60, kde *USM* je usměrňovač, *IGBT* je plně můstkové zapojení střídače s IGBT tranzistory a *Tr* je vysokofrekvenční transformátor [9]



Obrázek 8: Experimentální kalící zařízení



Obrázek 9: Schéma vybraných částí vodního hospodářství experimentálního zařízení [9]

Tabulka 6: Parametry termočlánků pro měření teploty uvnitř vsázky

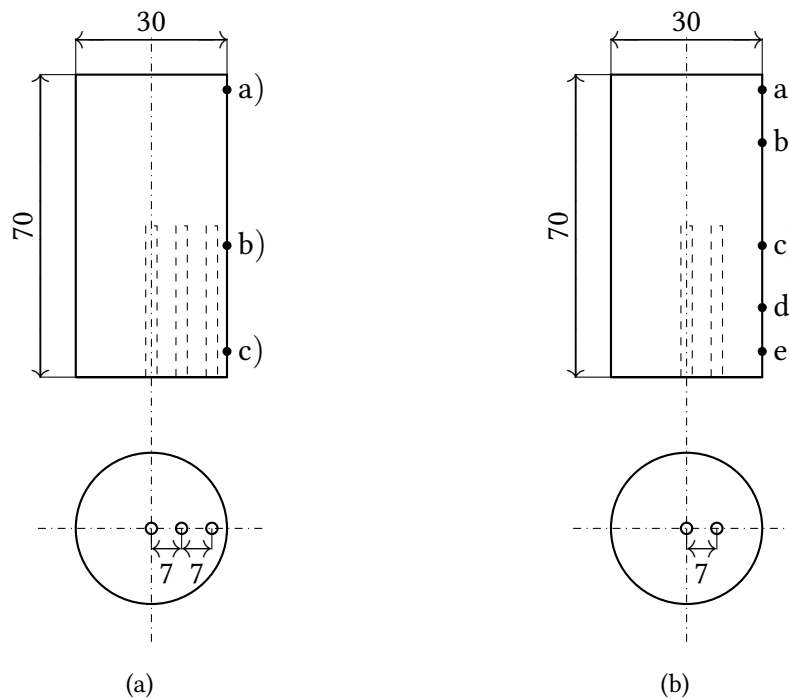
Typ termočlánku	K
Přesnost	IEC třída 1
Délka sondy	100 mm
Délka přívodního kabelu	5 m
Typ pláště	s otevřeným koncem
Označení	T1560 22 T6 S51 L100
Kalibrováno pro teploty	$\vartheta = -200 \div 1\,200\text{ °C}$

Tabulka 7: Parametry termočlánků pro měření teploty na povrchu vsázky

Typ termočlánku	K
Izolace drátu	skleněné vlákno
Průměr drátu	0,255 mm
Délka drátu	180 cm
Označení	5TC-GG-K-30-70
Kalibrováno pro teploty	$\vartheta = 100 \div 1\,100\text{ °C}$

6.1.1 Použité termoelektrické články

Pro měření teploty uvnitř vsázky byly použity zapouzdržené termoelektrické články typu K od společnosti National Instruments. Jejich parametry jsou uvedeny v tabulce 6. Pro měření teploty na povrchu vsázky jsem použil termočlánky firmy OMEGA Engineering, rovněž typu K. Termočlánky byly k povrchu připevněny pomocí k tomu určené bodové svářecí soupravy. Parametry termočlánků jsou uvedeny v tabulce 7. Výstupní signály termočlánků byly zaznamenávány pomocí systému CompactRIO od společnosti National Instruments prostřednictvím měřicích karet NI 9214.

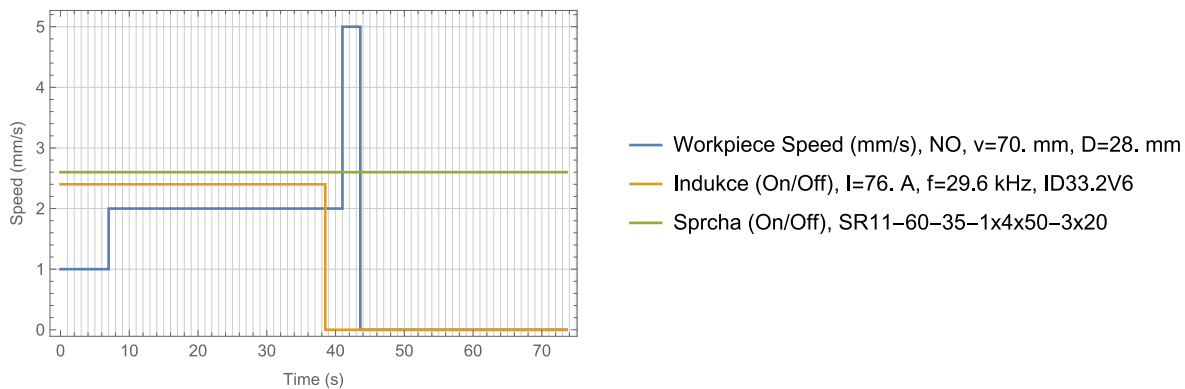


Obrázek 10: Umístění termočlánků na povrchu vsázky a poloha otvorů pro vložení termočlánků s pouzdem, konfigurace a) byla použita jen jednou

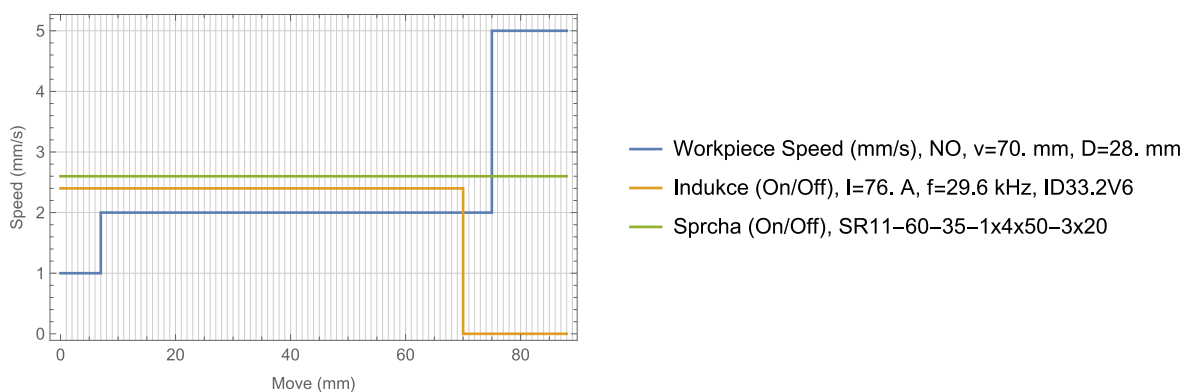
Pozice termočlánků jsou naznačeny na obrázku 10. Hloubka otvorů pro umístění termočlánků měřících teplotu uvnitř vsázky byla 35 mm, tedy polovina její výšky. Termoelektrické články umístěné na povrchu byly rozmístěny rovnoměrně kolem celého obvodu vsázky. Při prvním pokusu jsem se přesvědčil, že jejich umístění do jedné svislé osy mělo za následek nedostatečné ochlazování povrchu pod vodiči termočlánků, kdy tyto vodiče bránily chladicí kapalině dosažení povrchu. Vsázka se tak v tomto místě zakalila nedostatečně. Při rovnoměrném rozmístění termočlánků po obvodu se tento problém minimalizuje.

6.2 PRŮBĚH EXPERIMENTU

Samotný pokus spočíval v realizaci indukčního zakalení ocelové válcové vsázky pomocí zařízení popsaného výše se současným zaznamenáváním průběhů všech relevantních veličin. Kromě teploty na povrchu a vně vsázky byly zaznamenávány např. teploty chladících kapalin, výkon dodávaný zdrojem atd. Během experimentu byla provedena série ohřevů dvou různých druhů ocelí. Porovnáním výsledků více ohřevů je možné nalézt nesprávně změřené hodnoty

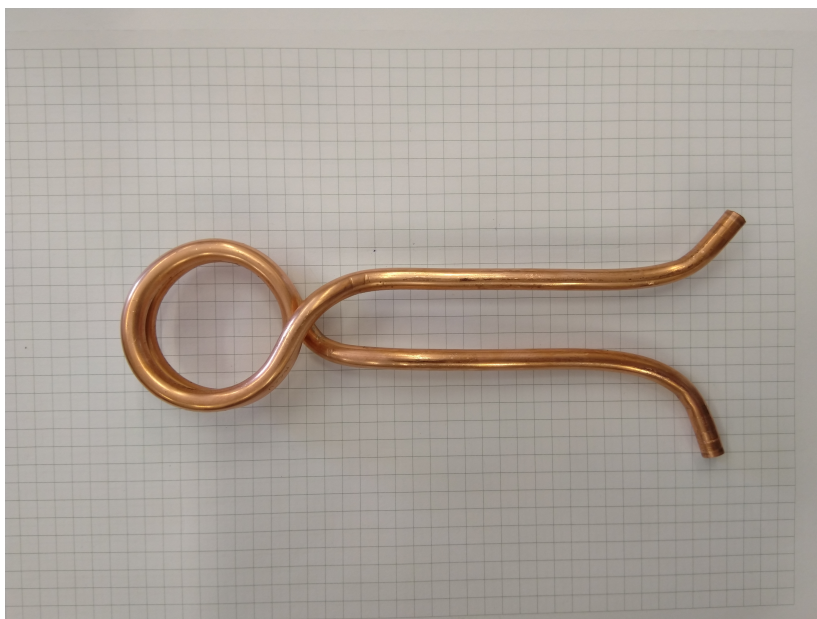


Obrázek 11: Časová závislost rychlosti pohybu induktoru, proudu induktorem a chlazení



Obrázek 12: Polohová závislost rychlosti pohybu induktoru, proudu induktorem a chlazení

vzniklé například v důsledku vadného nebo špatně přivařeného termočlánku. Podmínky, za kterých experiment probíhal, jsou znázorněny na obrázcích 11 a 12. Obrázky zachycují průběhy rychlosti pohybu induktoru a chladící sprchy a proud induktorem v závislosti na čase a na poloze induktoru vůči vsázce. Nastavení rychlosti pohybu induktoru bylo stejné pro ohřev oceli EN C35 i nástrojové oceli EN 40 Cr Mn Mo S8-6 (dále jen nástrojová ocel). V případě oceli EN C35 byl proud primárním vinutím vysokofrekvenčního transformátoru 75 A při frekvenci 30,4 kHz, pro nástrojovou ocel byl proud primárem transformátoru 76 A při 29,6 kHz na výstupu měniče. Nastavená výstupní frekvence měniče byla zvolena na základě změřené indukčnosti, s konkrétní ocelí uvnitř závitů induktoru, a velikosti připojené kapacity kondenzátorové baterie.



Obrázek 13: Induktor o průměru 33 mm

Induktor

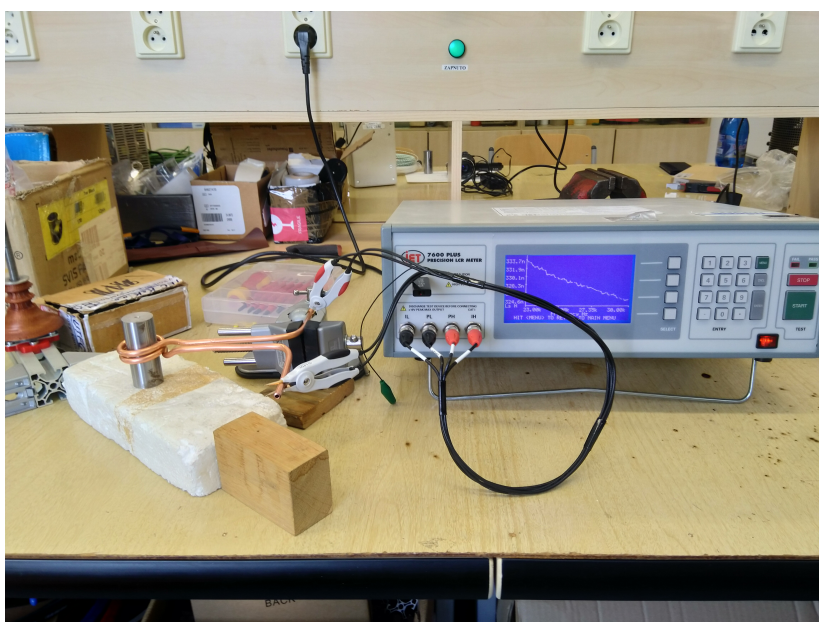
Při experimentu byl použit dvouzávitový induktor (obrázek 13) průměru přibližně 33 mm. Induktor byl navinut z měděné trubičky s poloměrem 3 mm s tloušťkou stěny 1 mm. K vysokofrekvenčnímu transformátoru je induktor připevněn prostřednictvím dvou přítlačných měděných desek viz obrázek 14. Průměr závitů induktoru je nutné volit co nejmenší, aby se minimalizoval prostor mezi vsázkou a induktorem. S rostoucím odstupem vsázky a induktoru se zvětšuje indukčnost a naopak klesá odpor. Roste také rozptyl elektromagnetického pole. V důsledku tak dochází ke snižování účinnosti ohřevu. Odstup induktoru od vsázky je omezen prostorem pro termočlánky připevněné k povrchu tak, aby se nedotýkaly induktoru a nehrozilo tak jejich odtržení, neboť induktor se vůči vsázce pohybuje.

Změřené pasivní parametry induktoru

Důležité parametry induktoru jsou jeho odpor a indukčnost. Pro měření jsem použil precizní RLC metr IET 7600 Plus (obr. 15). Indukčnost a odpor byly změřeny pro induktor s válcovou vsázkou v podobě nástrojové oceli a oceli EN C35 ve frekvenčním rozsahu 23 až 30 kHz. Průběhy indukčnosti v závislosti na frekvenci jsou uvedeny v příloze na obrázku 24.



Obrázek 14: Připevnění induktoru průměru 33 mm s kalící sprchou k vysokofrekvenčnímu transformátoru



Obrázek 15: Měření indukčnosti a odporu induktoru

Znalost indukčnosti a odporu použitých cívek pomůže při validaci numerického modelu a při nastavení výstupních hodnot měniče. Pro výpočet rezonanční frekvence je nutné připojit induktor k sekundáru vysokofrekvenčního transformátoru a vložit do něj vsázku. Indukčnost se pak měří na primárním vinutí transformátoru.

Vsázky

Objekty, podrobené kalení v rámci experimentu, byly válcové vsázky dvou rozdílných ocelí. První byla ušlechtilá uhlíkatá ocel EN C35. Průměr válce byl 28 mm, výška 70 mm. Druhou ohřívanou ocelí byla nástrojová ocel EN 40 Cr Mn Mo S8-6. Průměr válce byl 30 mm a výška 70 mm. Ve válcových vsázkách byly vyvrtány dva resp. tři⁵ otvory pro umístění termočlánků.

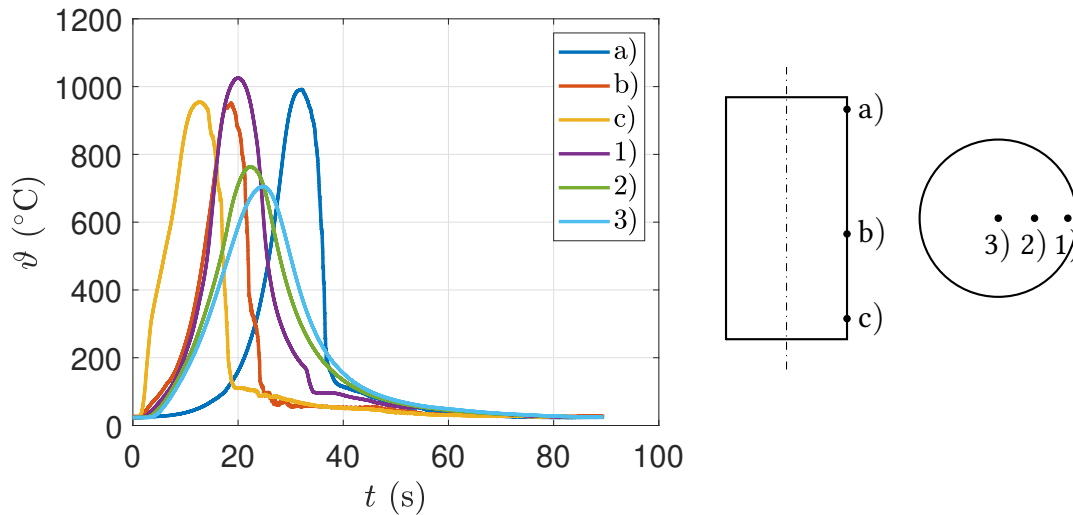
6.3 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Výstupem experimentu jsou průběhy teplot v závislosti na čase (resp. na poloze induktoru pohybujícího se vůči vsázce) naměřené na různých místech povrchu vsázky i uvnitř ní. Teploty byly zaznamenávány dvacetkrát za sekundu pomocí měřicího systému CompactRIO.

Během prvního ohřevu se ukázalo několik vlivů přítomnosti termočlánků na průběh procesu kalení i na naměřené teploty. Jedním z projevů přítomnosti termočlánků bylo nedostatečné ochlazování vsázky, kdy vodiče termočlánků znemožňovaly dostatečný kontakt chladicí kapaliny s povrchem. Tento problém byl odstraněn rozmístěním termočlánků rovnoměrněji po obvodu vsázky. Hodnoty získané při tomto měření jsme dále neuvažovali.

Dalším případem, kdy se projevila přítomnost termočlánku na obdržené hodnoty, byl ohřev oceli EN C35, kdy byla měřena teplota na třech místech povrchu a navíc byla zaznamenávána teplota těsně pod povrchem vsázky (obr. 10a). Jak je patrné z průběhu teplot na obr. 16, přítomnost otvoru pro uložení termočlánku těsně pod povrchem měla za následek významný nárůst teploty v této oblasti. Ta dokonce překročila i teplotu změřenou na povrchu vsázky, kde předpokládáme teplotu nejvyšší.

⁵ Otvor pro termočlánek těsně pod povrchem vsázky byl použit pouze při jednom měření, neboť nedostatečná tepelná vodivost termočlánku způsobovala přehřívání vsázky v místě uložení termočlánku.



Obrázek 16: Průběhy teplot na povrchu a uvnitř vsázky, ocel EN C35

Tuto skutečnost dokresluje snímek na obrázku 17, kde je díky barvě oceli jasně patrný značný teplotní rozdíl ve srovnání s ostatními místy vsázky. Místo uložení termočlánku je ohřáto ještě předtím, než dojde k prohřátí spodní části vsázky, která se v okamžiku pořízení snímku nacházela v rovině induktoru. Teplotní odezva termočlánku, jak je patrné z obr. 16, přichází však déle. To je způsobeno skutečností, že teplý konec termočlánku se nachází až uprostřed výšky vsázky. Při porovnání těchto výsledků s průběhy teplot z obrázku 25 na povrchu vsázky, ve stejné výšce v jaké měřil termočlánek pod povrchem, lze usoudit, že změřená velikost teploty je reálná, tedy že termočlánek měřil bez zásadní nepřesnosti. To lze tvrdit i přes skutečnost, že změřená teplota je větší než teplota na povrchu, což je v rozporu s teoretickým předpokladem. Zmíněný rozpor je způsoben přítomností termočlánku těsně pod povrchem. Odvrtáním oceli ze vzorku byl zmenšen objem materiálu, který se mohl podílet na odvodu tepla dovnitř vsázky. Jelikož energie nemohla být odvedena do masы materiálu, došlo k nárůstu teploty. Na obrázku 18 jsou zachyceny teploty uvnitř vsázky. Barevné průběhy představují teploty ve středu a na polovině poloměru vsázky. Černé průběhy zachycují teplotu ve stejných místech, avšak při třech vnitřních termočláncích. Zatímco barevné průběhy se prakticky překrývají, teploty naměřené při použití třech vnitřních termočláncích jsou vyšší, než v případě měření pouze dvěma termočlánci. Lze tedy vyvodit závěr, že termočlánek umístěný v těsné blízkosti pod povrchem způsobil významnější prohřátí vsázky.



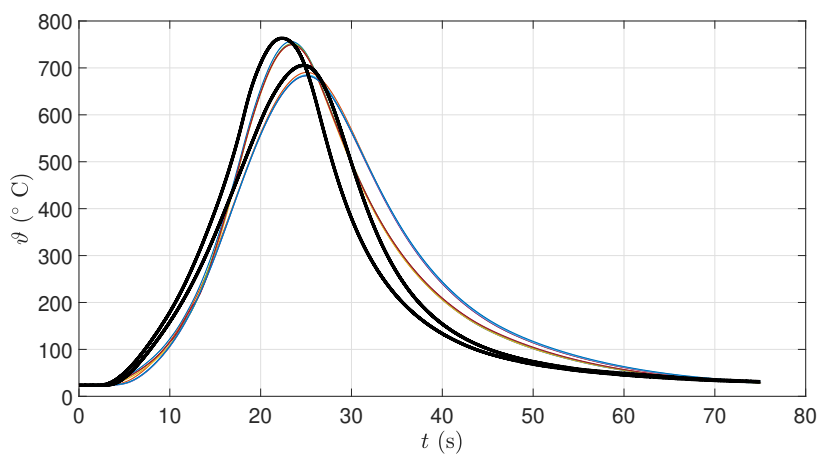
Obrázek 17: Vliv termočlánku umístěného těsně pod povrchem vsázky, ocel EN C35

V dalších měřeních bylo od umístění termočlánku těsně pod povrch upuštěno. Teplotu uvnitř vsázky jsem nadále měřil jen v její ose a na polovině poloměru. Vycházel jsme přitom z úvahy, že termočlánky umístěné na polovině poloměru a ve středu vsázky sice mohou rovněž ovlivnit hloubku, do jaké dojde k prohrátí a tedy i k zakalení vsázky, ovšem vzhledem k malému průměru termočláneků v kombinaci s okolní masou materiálu bude tento vliv minimální.

Na obrázcích 20 a 21 jsou znázorněny průběhy teplot z dalších měření. Z naměřených hodnot bylo nutné vybrat takové, které by reprezentovaly fyzikálně možné průběhy. Termočlánky připevněné na povrchu vsázky čelily během procesu kalení značnému teplotnímu a chemickému namáhání, v důsledku čehož docházelo k jejich odpadávání. Termočlánky tak neměřily teplotu na povrchu či měřily nesprávně.

Z vyobrazených průběhu je patrné, že nejvyšší teploty jsou dosahovány na termočlánek v poloze a). Převládajícím způsobem, jakým se teplo při ohřevu šíří, je vedení. V bodě a) je omezen objem materiálu, do kterého se mohlo teplo kondukcí odvést. Došlo tak k výraznějšímu nárůstu teploty. Průběh teploty během ochlazování, který je ve zbylých měřících bodech nejprve pozvolný, se navíc v tomto bodě liší velmi ostrým propadem po zahájení ochlazování. To je způsobeno chladicí vodou, která dopadá nejen na boční stěnu válce, ale

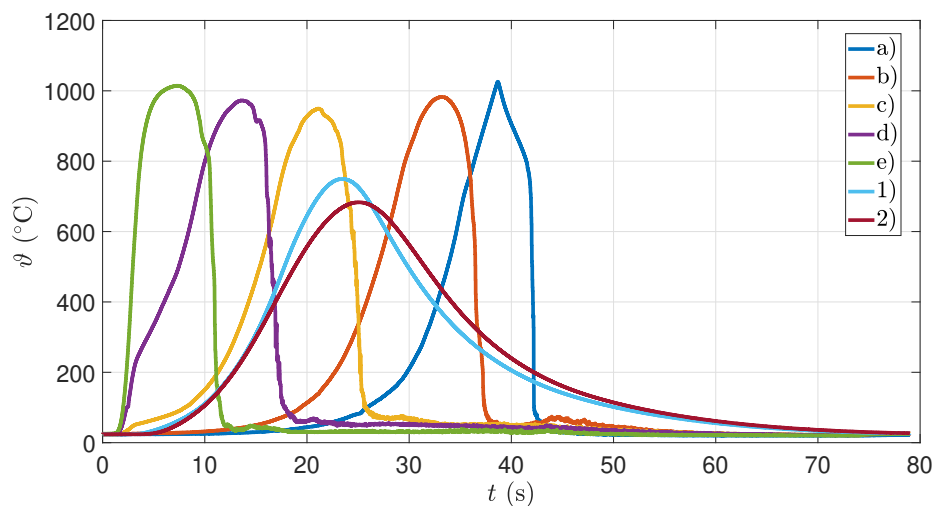
rovněž na jeho horní podstavu. Dojde tak k intenzivnímu ochlazování podstatně většího povrchu. Stejný trend je možné spatřit na všech naměřených průbězích. Ty jsou uvedeny v příloze na obrázcích 25 a 26.



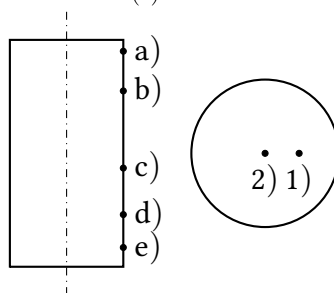
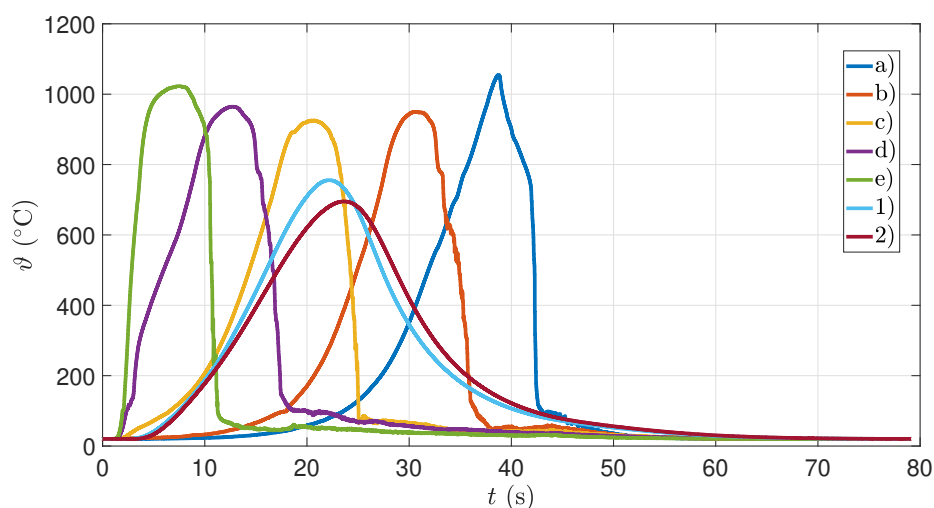
Obrázek 18: Teploty uvnitř vsázky, černé křivky představují hodnoty naměřené při prvním měření se třemi vnitřními termočlánky



Obrázek 19: Ocelová vsázka před a po zakalení

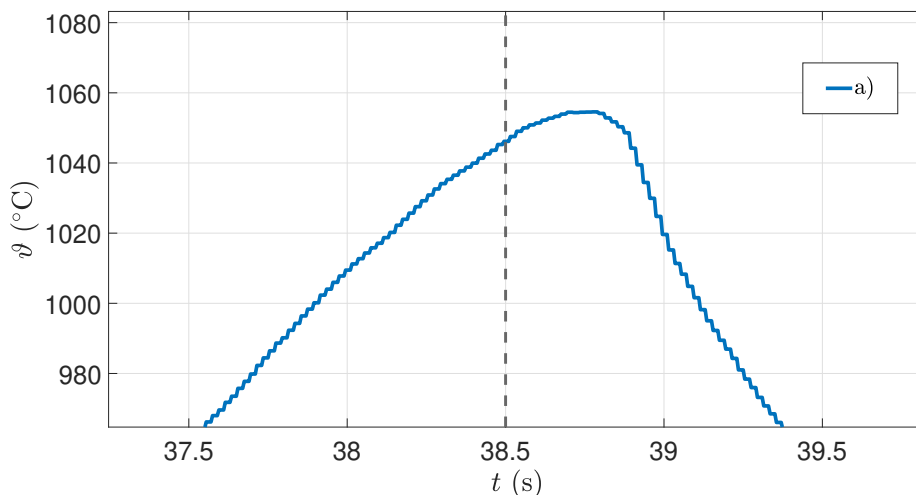


Obrázek 20: Naměřené průběhy teplot, ocel EN C35

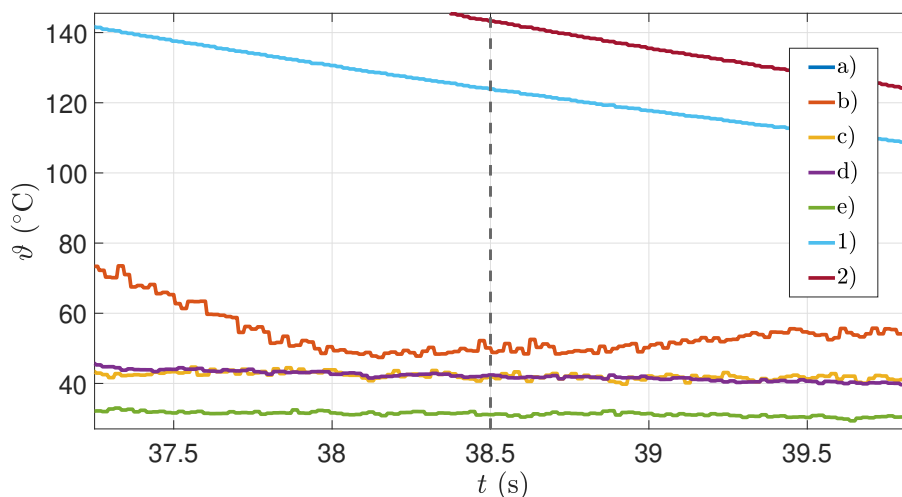


Obrázek 21: Naměřené průběhy teplot, nástrojová ocel

Výstupní signál termočlánku může být za jistých okolností ovlivněn elektromagnetickým polem, kdy do výsledného napětí na svorkách termočlánku promlouvá kromě termoelektrického napětí i napětí indukované. Bude-li indukované napětí ve srovnání s termoelektrickým dostatečně veliké, dojde ke zkreslení získaných hodnot. Obrázky 23 a 22 zachycují teploty



Obrázek 22: Vliv elektromagnetického pole na přesnost termočládku, kalící teplota (svislá čára představuje okamžik vypnutí proudu)



Obrázek 23: Vliv elektromagnetického pole na přesnost termočládku, nízké teploty (svislá čára představuje okamžik vypnutí proudu)

v okamžiku vypnutí proudu induktorem. Je patrné, že po vypnutí proudu nedochází k žádné viditelné změně průběhů. Lze tvrdit, že při frekvenci kolem 30 kHz, tedy frekvenci dosažené při kalení oceli v rámci experimentu, se do přívodních vodičů termočládku neindukuje napětí schopné ovlivnit přesnost měření. A to ani při teplotě kalící (obrázek 22), ani po následném ochlazení (obrázek 23). Se změnou teploty souvisí i změny materiálové a tím i změna hloubky, do které proniká elektromagnetické vlnění.

Část V

ZHODNOCENÍ A ZÁVĚR

ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Na základě platných technický norem a zejména pak vlastností slitin používaných pro výrobu termoelektrických článků jsem stanovil termočlánky vhodné pro oblasti indukčních ohřevů. Vzhledem k vysokým teplotám dosahovaných při indukčním povrchovém kalení jsem jako nejvhodnější vybral termočlánky typu K, které umožňují měřit teplotu i nad 1 100°C (teplota běžně dosahovaná při kalení oceli). Tyto jsem použil i při experimentu. Zmíněné termočlánky by rovněž měly být schopné spolehlivě měřit v inertní či oxidační atmosféře a odolávat vlhkosti. Nevhodné jsou pro sirnaté prostředí a pro vakuum při teplotách nad 815°C, kdy dochází k odpařování chromu a k nenávratné změně Seebeckova koeficientu. Kvůli rychlosti odezvy je vhodné volit co nejmenší průřezy vodičů termočlánků i za cenu snížení měřicího rozsahu. Rychlost je důležitá zejména při ochlazování, kdy teplota vsázky klesá řádově o stovky °C za sekundu. Vodiče větších průřezů mají větší teplotní kapacitu a jejich reakce na změnu teploty je pomalejší.

Z výsledků numerické simulace a v návaznosti na provedený experiment lze vyvodit několik závěrů ohledně vhodnosti měření teploty pomocí termočlánků při indukčním povrchovém kalení. Přesnost, s jakou termočlánky při těchto aplikacích měří, není nikterak ovlivněna elektromagnetickým polem induktoru, neboť při frekvenci přibližně 30 kHz (dosážené při experimentu) se tenké vodiče termočlánků jeví téměř jako pružné. Hloubka vniku pro tuto frekvenci je přibližně 1,687 mm pro vodič Ni Al a 2,483 mm pro vodič Ni Cr. Průměr vodičů termočlánku byl 0,255 mm. Pro použití termočlánků na povrchu vsázky je zásadnější prudká změna teploty během kalení. Ta je pro termočlánky značně nepříznivá. V důsledku těchto rychlých změn docházelo občas k jejich odpadávání. Termočlánky umístěné uvnitř ocelového válce nebyly tak významně namáhány a během měření jsem nezaznamenal jejich

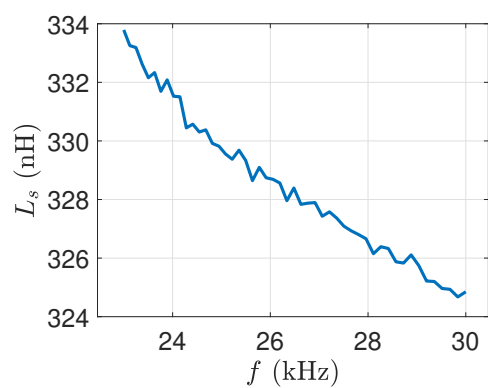
selhání. Přítomnost termočlánků ve vsázce však s sebou nesla jiný problém. Vlivem rozdílné teplotní vodivosti oceli a zapouzdřeného termočlánku docházelo k výraznějšímu ohřevu vsázky v místě uložení termočlánku, kvůli nedostatečnému odvodu tepla do vsázky. Zvlášť patrný je tento vliv u termočlánku umístěného bezprostředně pod povrchem. Nastala tak situace, kdy termočlánek měřil teplotu správně, avšak ta dosahovala rozdílné hodnoty, než kdyby se termočlánek v daném místě nenacházel. Zároveň byla ovlivněna i teplota ve zbytku ohřívaného materiálu. Termočlánky umístěné hlouběji zaznamenaly při tomto měření vyšší teploty, než při měření bez termočlánku těsně pod povrchem. Je nutné uvést, že termočlánky byly umístěny v řadě za sebou, jak je vidět na obrázku 10a. V případě jiného rozložení budou výsledky odlišné.

LITERATURA

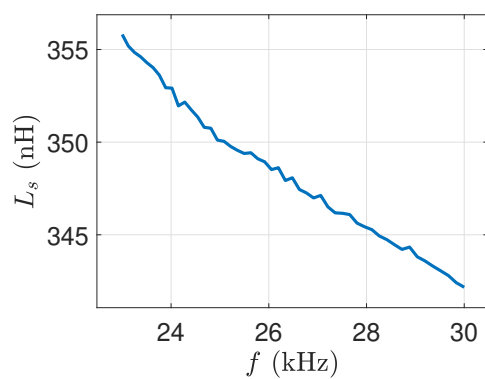
- [1] RUDNEV, Valery, LOVELESS, Don, COOK, Raymond, L. a BLACK, Micah. *Handbook of Induction Heating*. New York: CRC Press, 2003. ISBN:0-8247-0848-2.
- [2] LANGER, Emil. *Elektrotepelná technika IV – Indukční pece kanálkové*. Praha, SNTL, 1969.
- [3] ROT, David. *Aktuální výzkumné aktivity týmu elektrotepelných procesů na ZČU v Plzni*. In: *Classroom KEE/ZETP* [online]. 29. září 2021. [vid. 4. 2. 2022]. Záznam dostupný z: <https://drive.google.com/file/d/115Ckbr4dSnPAViTANQNEsgLomgVRIUQG/view>. Pozn.: dostupné pro studenty předmětu ZETP.
- [4] DOLEŽEL, Ivo. *Představení sdružených úloh*. KEP/TEMP, Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta Elektrotechnická, Katedra počítačového modelování. Plzeň, 23. 2. 2021.
- [5] MICRO-EPSILON. Basics of non contact temperature measurement. *micro-epsilon.com* [online]. [vid. 15. 3. 2022]. Dostupné z: <https://www.micro-epsilon.com/download/products/dat-infrared-basics-en.pdf>.
- [6] LINDA, Josef a MÜHLBACHER, Jan. *Návody ke cvičení z elektrického tepla I*. Plzeň, VŠSE v Plzni, 1989.
- [7] ČSN EN 60584-1. *Termoelektrické články*. Praha, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014, 68 s. Třídící znak 25 8331.
- [8] ČSN EN 61515. *Termočlánky a kabely termočlánků s minerální izolací a kovovým pláštěm*. Praha, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017, 26 s. Třídící znak 25 8337.

- [9] ROT, David. *Návrh a optimalizace procesů povrchového indukčního kalení pro implementaci do autonomních kalicích strojů s využitím aktuálních technologií a trendů*. Plzeň, 2020. Habilitační práce (Doc.), Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta Elektrotechnická, Katedra elektroenergetiky.
- [10] LANGER, Emil. *Teorie indukčního a dielektrického tepla*. Praha, Nakladatelství Československé akademie věd, 1964.
- [11] SAZIMA, Miroslav. *Sdílení tepla*. Praha, Vydavatelství ČVUT, 1971.
- [12] LUPI, Sergio, FORZAN, Michele a ALIFEROV, Aleksandr. *Induction and Direct Resistance Heating*. New Your, Springer, 2015. ISBN: 978-3-319-03478-2.

PŘÍLOHA

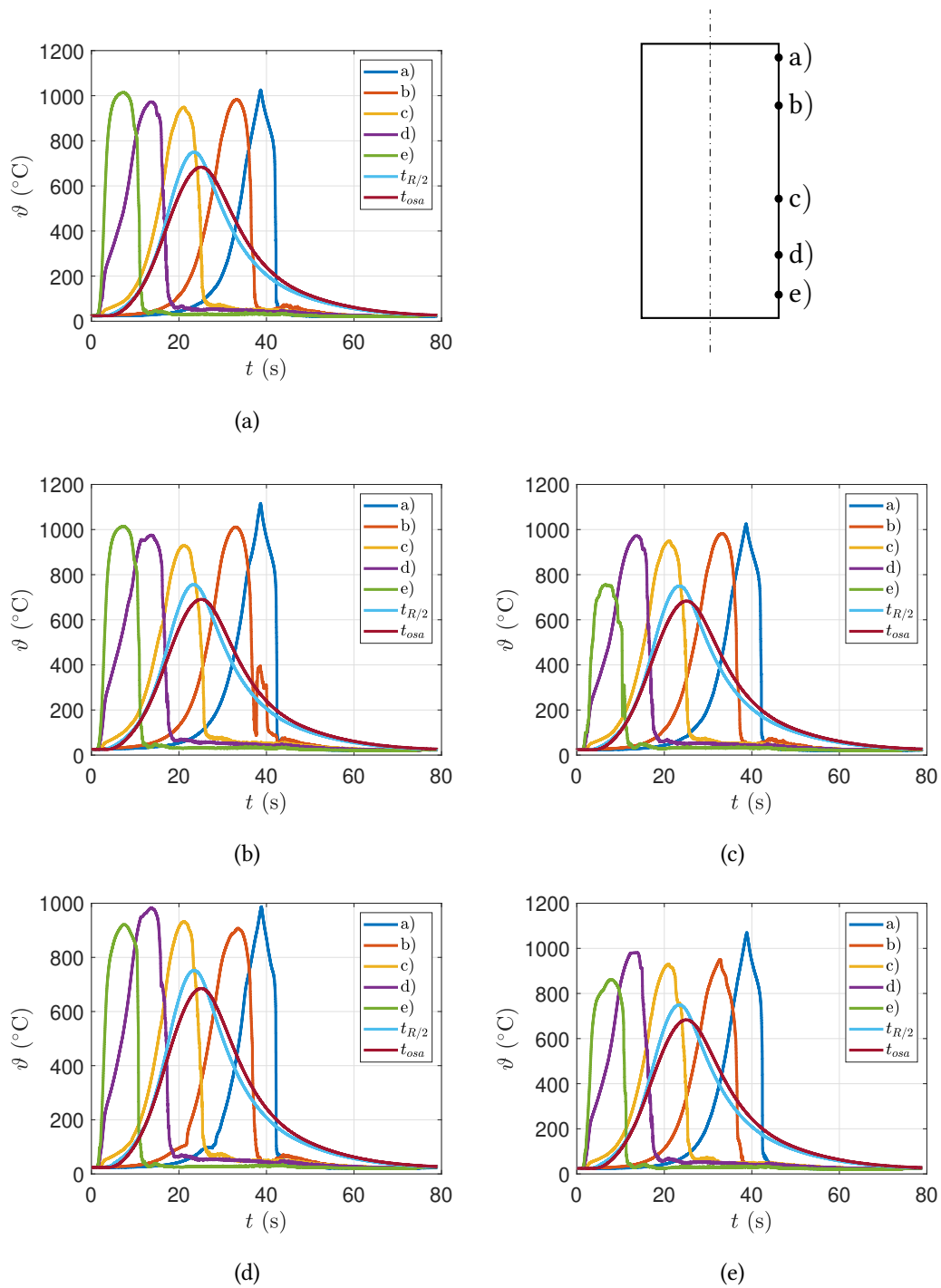


(a)

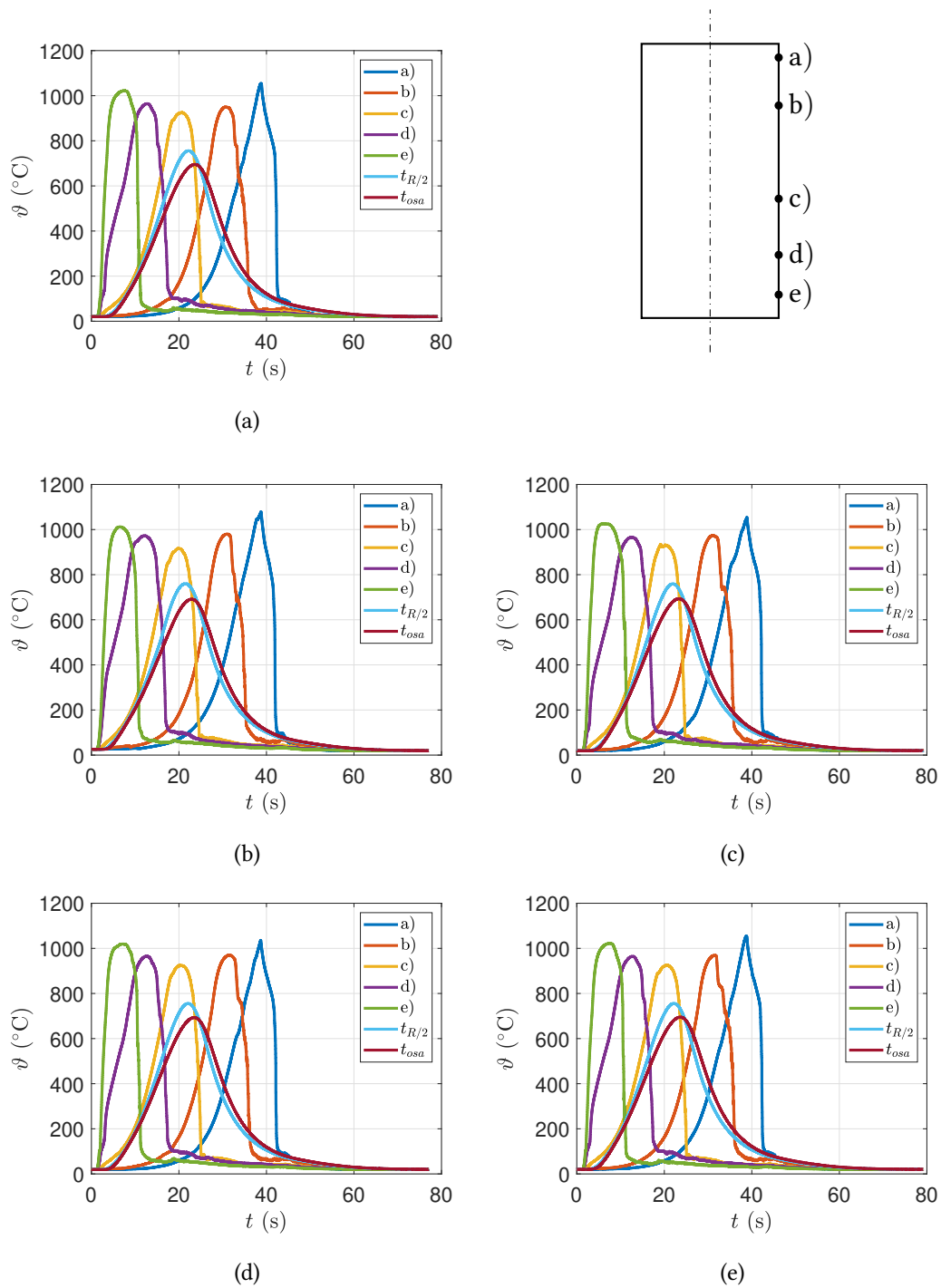


(b)

Obrázek 24: Závislost indukčnosti na frekvenci pro induktor 33 mm s EN C35 a s nástrojovou ocelí změřené RLC metrem IET 7600 Plus.



Obrázek 25: Průběhy teplot pro EN C35



Obrázek 26: Průběhy teplot pro nástrojovou ocel

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1	Spektrum elektromagnetického záření	7
Obrázek 2	Základní schéma měření teploty termoelektrickým článkem	10
Obrázek 3	Simulace závislosti charakteristických veličin na teplotě	24
Obrázek 4	3D model pro simulaci ohřevu	35
Obrázek 5	Teplota vsázky, termočlánek na povrchu	36
Obrázek 6	Rozložení teploty ve vsázce a okolí	36
Obrázek 7	Blokové schéma zapojení a řízení měniče FRQ 60 [9]	39
Obrázek 8	Experimentální kalící zařízení	40
Obrázek 9	Schéma vodního hospodářství experimentálního zařízení [9]	40
Obrázek 10	Umístění termočláneků	42
Obrázek 11	Rychlosti pohybu induktoru, proud induktorem a chlazení v čase	43
Obrázek 12	Pohyb induktoru a chladicí sprchy vůči poloze vsázky	43
Obrázek 13	Induktor o průměru 33 mm	44
Obrázek 14	Přípevnění induktoru k vysokofrekvenčnímu transformátoru	45
Obrázek 15	Měření indukčnosti a odporu induktoru	45
Obrázek 16	Průběhy teplot na povrchu a uvnitř vsázky	47
Obrázek 17	Vliv termočláneků umístěného těsně pod povrchem vsázky	48
Obrázek 18	Teploty uvnitř vsázky, EN C35	49
Obrázek 19	Ocelová vsázka před a po zakalení	49
Obrázek 20	Naměřené průběhy teplot, ocel EN C35	50
Obrázek 21	Naměřené průběhy teplot, nástrojová ocel	50
Obrázek 22	Vliv elektromagnetického pole na přesnost termočláneků	51
Obrázek 23	Vliv elektromagnetického pole na přesnost termočláneků	51
Obrázek 24	Závislost indukčnosti na frekvenci pro induktor 33 mm	i
Obrázek 25	Průběhy teplot pro EN C35	ii
Obrázek 26	Průběhy teplot pro nástrojovou ocel	iii

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1	Písmenné označení termoelektrických článků [7]	12
Tabulka 2	Maximální mezní teploty termoelektrických článků [7]	13
Tabulka 3	Doporučené pracovní podmínky termočlánků [7]	14
Tabulka 4	Termočlánky v pouzdře s minerální izolací	17
Tabulka 5	Termočlánky bez pouzdra	18
Tabulka 6	Parametry termočlánků pro měření teploty uvnitř vsázky	41
Tabulka 7	Parametry termočlánků pro měření teploty na povrchu vsázky	41