

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky
Elektrotechnická fakulta
ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Bakalářská práce

Jiří Matyska

2015

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jiří MATYSKA**
Osobní číslo: **E12B0073K**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Návrh induktorů pro předehřev před laserovým svařováním**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Proveďte podrobnou rešerši literatury zabývající se laserovým svařováním.
2. Navrhněte induktor pro předehřev před laserovým svařováním.
3. Vytvořte model navrženého induktoru a numerickým výpočtem ověřte funkčnost zařízení.
4. Zhodnoťte výsledky získané numerickými výpočty a navrhněte možnosti zlepšení konstrukce.
5. Vytvořte výrobní dokumentaci k navrženému induktoru.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Zinn, S., Semiatin, L. S.: Elements of Induction Heating - Design, Control and Application, ASM International, 1988.
2. Ready, F. J.: LIA Handbook of Laser Materials Processing, Laser Institute of America, Magnolie, Inv., Orlando, Florida, 2001.
3. Dowden, J., M.: The Mathematics of Thermal Modeling: An Introduction to the Theory of Laser Material Processing, CRC Press LCC, 2000.


Vedoucí bakalářské práce: Ing. David Pánek, Ph.D.
Katedra teoretické elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2014

Termín odevzdání bakalářské práce: 8. června 2015


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




Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na základní návrh induktoru před laserovým svařováním. Blíže specifikuje návrh induktoru s ukázkou numerického výpočtu a ověřením funkčnosti zařízení. Výstupem je pak výrobní dokumentace k navrženému induktoru.

Klíčová slova

Elektromagnetické pole, elektromagnetická indukce, indukční ohřev, vířivé proudy, Curieova teplota, ekvivalentní odpor, induktor, relativní permeabilita, laserové svařování.

Abstract

The submitted work is focused on the basic design of the inductor before the laser welding. Closer specified in the proposal inductor with a demonstration of numerical calculation and verification of device functionality. The output is then manufacturing documentation on the proposed inductor.

Key words

Electromagnetic fields, electromagnetic induction, induction heating, eddy currents, Curie temperature, equivalent resistor, inductor, relative permeability, laser welding.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce. Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Davidu Pánkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

1	Seznam symbolů a zkratek	2
2	Laserové svařování	4
2.1	Laserové svařování	4
2.1.1	Laser	4
2.1.2	Princip laserového svařování	5
2.1.3	Provozní vlastnosti	8
3	Indukční ohřev	10
3.1	Rozložení elektromagnetického pole	10
3.2	Povrchový jev	11
3.3	Rozložení teplotního pole	12
4	Návrh induktoru pro předeřev před laserovým svařováním	14
4.1	Induktor	14
4.2	Obecný návrh induktoru	14
5	Model navrhovaného induktoru s numerickým výpočtem a ověřením funkčnosti zařízení	16
5.1	Technické parametry pro navrhovaný induktor	16
5.2	Numerický výpočet induktoru	16
5.2.1	Matematický model	17
5.2.2	Magnetické pole	18
5.2.3	Teplotní pole	19
5.3	Model zařízení	19
6	Výrobní dokumentace k navrženému induktoru	31
7	Závěr	32
7.1	Zhodnocení získaných výsledků	32
7.2	Možnosti zlepšení konstrukce zařízení	33

1

Seznam symbolů a zkratek

Značka	Název	Jednotka
B	magnetická indukce	[T]
H	intenzita magnetického pole	[A · m ⁻¹]
D	elektrická indukce	[C · m ⁻²]
E	intenzita elektrického pole	[V · m ⁻¹]
A	vektorový magnet. potenciál	[Wb · m ⁻¹]
J	proudová hustota	[A · m ⁻²]
<i>f</i>	frekvence	[Hz]
<i>I</i>	proud	[A]
<i>U</i>	napětí	[V]
<i>R</i>	odpor	[Ω]
<i>P</i>	výkon, energie	[W]
<i>J_e</i>	spojovací účinnost	[mm ⁻² · kJ ⁻¹]
<i>N</i>	počet závitů cívky	[–]
<i>t</i>	čas	[s]
<i>t_s</i>	tloušťka sváru	[mm]
<i>d</i>	hloubka vniku	[m]
<i>r</i>	poloměr	[m]
<i>M</i>	plocha průřezu materiálu	[mm ²]
<i>v</i>	rychlost	[m · s ⁻¹]
<i>σ</i>	měrná elektrická vodivost	[S · m ⁻¹]
<i>ε</i>	permitivita ($\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$)	[F · m ⁻¹]
<i>ε_r</i>	relativní permitivita	[–]
<i>μ</i>	permeabilita ($\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$)	[H · m ⁻¹]
<i>μ_r</i>	relativní permeabilita	[–]
<i>ρ</i>	měrný elektrický odpor	[Ω · m ⁻¹]
<i>ρ_v</i>	objemová hustota náboje	[C · m ⁻³]
<i>Φ</i>	magnetický tok	[Wb]

KAPITOLA 1. SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Značka	Název	Jednotka
ω	úhlová frekvence	$[\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}]$
l	délka	$[\text{m}]$
w	šířka	$[\text{m}]$
a	průměr	$[\text{m}]$
T	teplota	$[\text{K}]$
α	teplotní součinitel elektr. odporu	$[\text{K}^{-1}]$
ρ_d	hustota	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
C_p	specifická teplotní kapacita při konst. tlaku	$[\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}]$
p_j	hustota výkonu	$[\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}]$
p_l	Jouleovy ztráty v důsledku vířivých proudů	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-3}]$
k_t	tepelná vodivost materiálu	$[\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}]$
Q_t	konst. jiného tepel. zdroje než viskózního vytápění	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-3}]$
Q	výkon dodaný / odebraný do tělesa	$[\text{W}]$
J_s	proudová hustota na povrchu	$[\text{A} \cdot \text{m}^{-2}]$
\mathbf{q}	vektor měrných ztrát	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-3}]$
\mathbf{v}	vektor rychlosti	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
\mathbf{n}	vektor vnější normály	$[-]$
∇	operátor nabra $\nabla = \mathbf{i} \cdot \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{j} \cdot \frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{k} \cdot \frac{\partial}{\partial z}$	$[-]$
HAZ	tepelně ovlivněná zóna	$[-]$
K_{R2}	faktor změny elektr.dráhy	$[-]$
K_{S2}	faktor rozptyl mag.pole	$[-]$
η	účinnost	$[-]$

značka	název	hodnota []
ε_0	Permitivita vakua	$8,854 \cdot 10^{-12} \quad [\text{F} \cdot \text{m}^{-1}]$
μ_0	Permeabilita vakua	$4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \quad [\text{H} \cdot \text{m}^{-1}]$
e	Eulerovo číslo	$2,71828... \quad [-]$

Rozlišení charakteru veličin:

Skalární veličiny	kurzíva - $\Omega \omega$
Vektorové veličiny	tučně - $\mathbf{V} \mathbf{v}$
Fázory vektorových veličin	tučně s pruhem pod - $\underline{\mathbf{F}}$

2

Laserové svařování

2.1 Laserové svařování

Laserové svařování patří k nejmodernějším metodám spojování různých typů materiálu. Používá se zejména pro svařování dílů, kde je velký důraz na vysoké svařovací rychlosti, kvalitu svaru a nízké tepelné ovlivnění okolního materiálu.

2.1.1 Laser

Název LASER je zkratkou z anglických slov popisujících princip funkce tohoto zařízení (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation - zesílení světla stimulovanou emisí záření). Celý proces zesílení začíná excitací iontů nebo molekul na vyšší energetickou hladinu. Při přechodu částic zpět na základní energetickou hladinu dochází k vyzáření fotonu. Přechod je stimulován fotonem o stejných vlastnostech, dochází tedy k řetězové reakci, která je dále zvyšována průchody záření optickým rezonátorem. Optický rezonátor je tvořen aktivním prostředím a dvěma zrcadly: zrcadlem se 100% odrazivostí a zrcadlem s přibližně 90% odrazivostí. Částečně propustné zrcadlo propustí po dosažení kritického množství fotonů část záření ve formě krátkého vysokoenergetického pulsu. Opakovací frekvence se pohybuje mezi 1 až 500 Hz. Celková energie laserového paprsku je 0,1 až 200J. Vlnové délky laserů se používají v rozsahu 700 až 1200 nm.

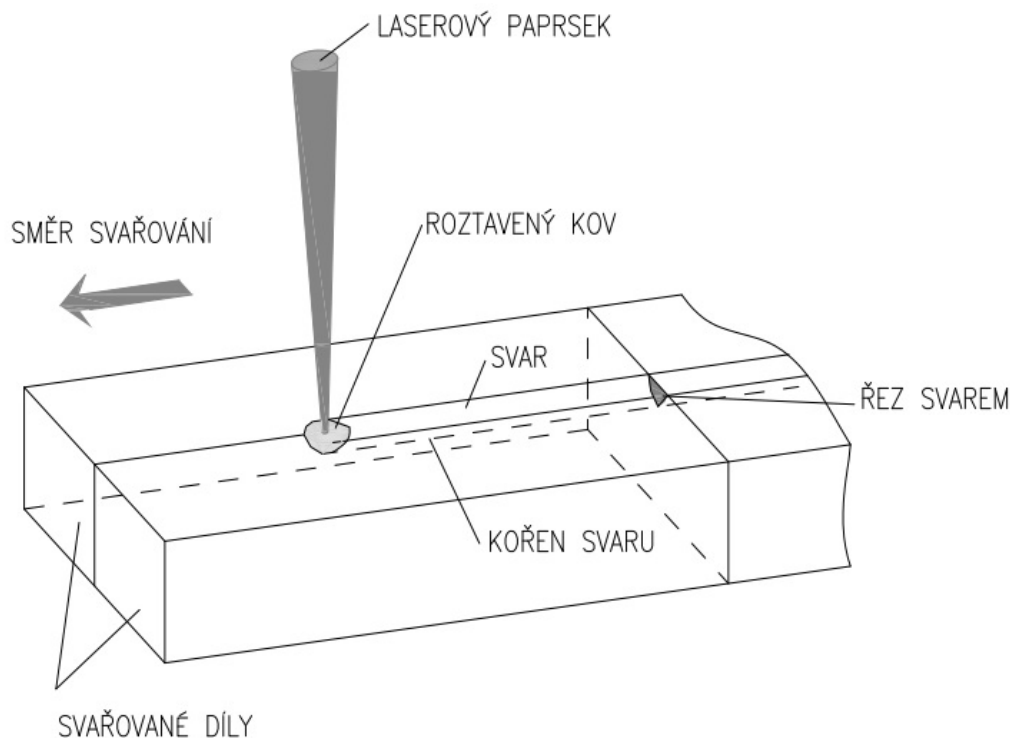
Zaostřený laserový paprsek je charakterizován vysokou hustotou výkonu, která může dosahovat až $10^{13} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$. Při využití laseru pro svařování se běžně používá hustota výkonu v rozsahu $10^4 - 10^8 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$. V tabulce 2.1 je ukázáno srovnání hustot výkonu pro různé svařovací procesy.

Tabulka 2.1: Relativní hustota výkonu různých svařovacích procesů [1]

Metoda svařování	Hustota energie [$\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$]	Hloubka provaření [mm]	Šířka/hloubka svaru [mm]	Svařovací rychlost [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]
Laser	$10^7 - 10^9$	25	0.1 – 0.5	až 10
Plazma	10^6	až 12	1	až 0.5 – 5
Plamen	10^3	až 3	3	až 0.01
El.oblouk	10^4	až 4	2	až 0.5 – 3
El.paprsek	10^8	až 200	0.03	až 0.5 – 5

2.1.2 Princip laserového svařování

Obecné uspořádání zařízení pro laserové svařování je znázorněno na obrázku 2.1. Paprsek laseru se zaostří pomocí vhodné optiky do bodu - ohniska, kde vlivem vysoké hustoty výkonu rychle roste teplota. Z procesního hlediska se rozlišují dva způsoby laserového svařování: svařování *povrchové* a svařování *klíčovou dírkou*.



Obrázek 2.1: Obecné zařízení pro svařování laserem [9]

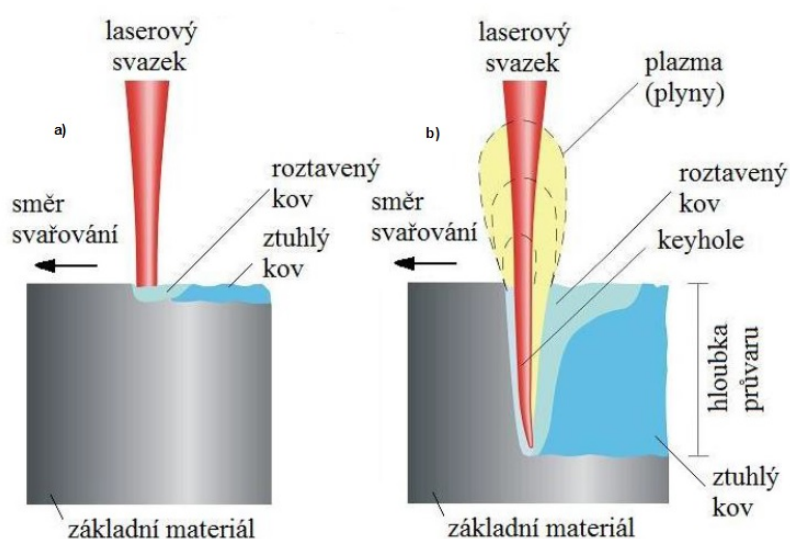
Princip těchto dvou způsobů svařování je znázorněn na obrázku 2.3. V případě, že je rychlost ohřevu mnohem vyšší než rychlost odvodu tepla, teplota v místě dopadu laserového svazku dosáhne hodnot, při kterých dochází k odpařování materiálu. V místě budoucího svarového spoje vzniká otvor, kterým prochází paprsek laseru tavící materiál dále do hloubky. Tímto procesem se vytvoří otvor v podobě klíčové dírky. Proto tento způsob laserového svařování dostal v odborné terminologii název "keyhole", tedy klíčová dírka. Pohybující se laserový paprsek začne taveninou dutinu uzavírat a vznikne úzký svár s vysokým podílem hloubka - šířka. Energie dodaná laserem se využívá zejména k tavení rozhraní materiálů, které jsou spojovány. Tepelně ovlivněná zóna je obvykle velmi úzká.

Pokud je hustota energie při dané rychlosti svařování nižší, nedochází k odpařování materiálu, ale pouze k jeho roztavení. V takovém případě se mluví o svařování *povrchovém*. Nižší hustoty energie se obvykle dosahuje rozostřením laserového paprsku. Hloubka sváru se u tohoto typu svařování obvykle pohybuje do 2 mm.

Při laserovém svařování je důležitá dobrá interakce povrchu paprsku s obráběným materiálem. Paprsek dopadající na povrch materiálu je částečně absorbován, částečně prochází a částečně je odražen od povrchu viz. obrázek 2.2. U neprůhledných materiálů jako jsou kovy, k průchodu paprsku nedochází. V důsledku interakce laserového svazku



Obrázek 2.2: Interakce paprsku s povrchem materiálu [9]



Obrázek 2.3: Typ svařování : a) povrchové (kondukcí), b) klíčová dírka [8]

s materiálem dochází k rychlému zahřívání povrchu materiálu. Vliv na interakci má jak laserový paprsek, tak obráběný materiál. U paprsku má velký vliv na jeho absorpci povrchem také jeho vlnová délka, čím je vlnová délka kratší, tím větší je součinitel absorpce. Se zvyšující se teplotou obráběného materiálu klesá odrazivost a zvyšuje se koeficient absorpce. Významný vliv na pohltivost paprsku má drsnost povrchu. U drsných površích dochází vlivem odrazení paprsku od nerovnosti k vyšší pohltivosti paprsku. U hladkých površích je nízká absorpce energie paprsku v důsledku odrazivosti paprsku do povrchu materiálu. U povrchu, kde je vysoká odrazivost, jsou aplikovány speciální povlaky pro snížení odrazivosti.

Pro posouzení účinnosti svařovacího procesu se definuje *spojovací účinnost* J_e vztahem

$$J_e = \left(\frac{v \cdot t_s}{P} \right), \quad (2.1)$$

kde v je rychlost posuvu [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$], t_s je tloušťka sváru [mm] a P je dopadající výkon [kW]. Tabulka 2.2 uvádí některé typické hodnoty spojovací účinnosti pro různé svařovací procesy.

Čím vyšší je hodnota spojovací účinnosti, tím méně energie se spotřebovává pro generování tepelné ovlivněné zóny (HAZ), nebo narušení povrchu. Porovnání svařovacích

Tabulka 2.2: Relativní účinnost spojování různých svařovacích procesů [1]

Proces	Relativní účinnost [mm ² · KJ ⁻¹]
Laser	10 – 25
Ruční obloukové svařování elektrodou	2 – 3
Obloukové svařování elektrodou v inertním plynu	0.8 – 2
Plamen	0.2 – 0.5
Elektronový paprsek	20 – 30
Automatické svařování pod tavidlem	4 – 10
Vysokofrekvenční odporové svařování	65 – 100

procesů a způsob, jakým se tyto charakteristiky porovnávají pro speciální alternativní postupy jsou uvedeny v tabulce 2.3.

Tabulka 2.3: Porovnání svařovacích procesů [1], √ - výhoda, ○ - nevýhoda

Kvalita svařování	Laser	Elektron. paprsek	Oblouk. svařování	Odpor. svařování	Ultra-zvuk
Rychlost	√	√	○	√	○
Nízký tepelný příkon	√	√	○	√	√
Úzká HAZ	√	√	○		√
Vzhled svaru	√	√	○		√
Jednoduché upnutí	√	○	○		
Schopnosti zařízení	√		√	√	
Hloubka vniku	○	√		○	
Svařování na vzduchu	√	○		√	
Magnet. materiály	√	○		√	
Svař.reflex. materiálů	○	√	√	√	√
Teplotně citlivé mat.	√	√	○	○	√
Životní prostředí	√	√	○	○	○
Hluk, kouř apod.	√	√	○	○	○
Pořizovací náklady	○	○	√		

Z porovnání v tabulce 2.3 jsou patrné výhody laserového svařování. Jedná se především o vysokou rychlost a kvalitu svařování. Laser má také výhody v oblastech, které vyžadují svařování tepelně citlivých komponent, jako jsou např. kardiostimulátory, píсты spojené s podložkami v místě tenkých membrán.

Výhody laserového svařování v porovnání s konvenčními technologiemi jsou:

- čistota svaru (nepoužívá se přídavný materiál),

- vysoká produktivita svařovacího procesu,
- malá setrvačnost laserového paprsku,
- úzké a hluboké svary,
- úzká tepelně ovlivněná oblast,
- malé zbytkové napětí ve svaru,
- bezkontaktní svařování,
- vhodnost technologie pro automatizaci procesu,
- snadná regulace svařovacích parametrů,
- vysoká jakost spoje.

Nevýhody laserového svařování jsou:

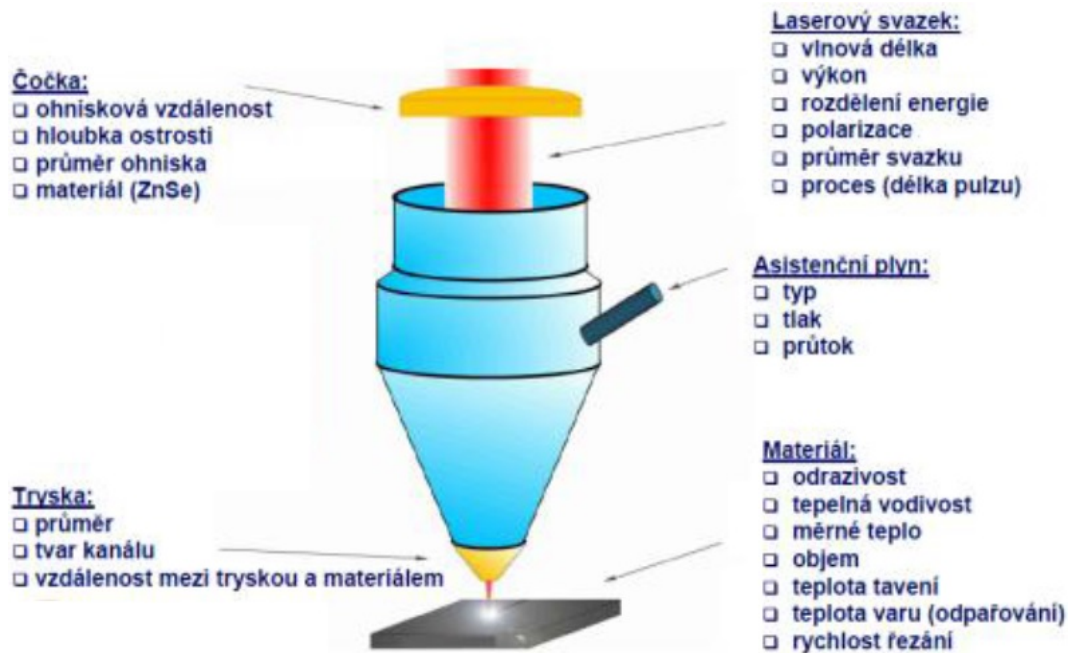
- vysoké pořizovací náklady na svařovací zařízení,
- nízká účinnost proti vstupnímu příkonu zařízení,
- vysoké nároky na bezpečnost procesu.

2.1.3 Provozní vlastnosti

Hlavní parametry procesu jsou znázorněny na obrázku obrázku 2.4. Při svařování laserem rozlišujeme dva režimy kontinuální nebo pulzní. Každý z těchto režimů má jiné výkonové parametry a jiné procesní použití. Při kontinuálním režimu jsou základními parametry: zaostření systému, rychlost svařování v [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$] a výkon laseru P [W]. Při pulzním režimu jsou základními parametry délka pulzu τ [s], rychlost svařování v [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$], frekvence pulsů f [Hz], energie pulsu E_p [J], vzdálenost ohniska od povrchu materiálu d_p [mm] a průměr zaostřeného laserového paprsku d_o [mm].

Kvalitní provedení svarového spoje je dále ovlivněno několika faktory. Mezi hlavní ovlivňující parametry patří především chemické složení materiálu, materiálová struktura, kvalita povrchu svařovaného materiálu, rychlost svařování, tloušťka svařovaného materiálu, ochranná atmosféra, výkon laserového paprsku, typ svaru a vlnová délka laserového paprsku. U všech operací, při kterých je laser využíván, je výkon laseru jeho základním parametrem. Při procesu svařování výkon laseru závisí na tloušťce svařovaného materiálu. Rychlost laserového svařování je ovlivněna geometrií svaru, materiálovou strukturou a také chemickým složením svařovaných materiálů. Zaostření laserového paprsku nám ovlivňují zejména divergence paprsku, poloha ohniska od povrchu materiálu, složení objektivu, průměr zaostřeného paprsku. Zásadní vliv na množství vneseného tepla do materiálu má energie pulzu. Je to energie, která působí na povrch materiálu v průběhu jednoho pulsu. Optimální délka pulzu je pro každý materiál jiná. Je ovlivněna chemickým složením a tloušťkou materiálu.

Další parametry svařování jsou pak, použití ochranné atmosféry (množství a druh plynu), vnesené teplo (energie použitá na jednotku délky), hustota výkonu (výkon paprsku na jednotku plochy). Při svařování laserem je rovněž velmi důležitá kvalita svařovaných povrchů a vzájemné uložení svařovaných dílů. Laserové svařování je založeno na absorpci laserového paprsku povrchem materiálu a jeho následném ohřátí. U tupého svaru je nutné, aby svarové plochy jednotlivých materiálů byly v těsném kontaktu a ve



Obrázek 2.4: Hlavní parametry procesu svařování laserem [11]

stejně výšce, aby došlo k rovnoměrnému ohřátí jednotlivých materiálů. Při standardní kvalitě svaru nejsou kladeny zvláštní požadavky na povrch svarových materiálů. Povrch by měl absorbovat větší část laserového paprsku. Zvýšení absorpce dosahujeme zdrsněním povrchu nebo použitím vhodného absorpčního povlaku. Při svařování speciálních materiálů a vysokých požadavcích na jakost svaru je nutné zbavit svarové povrchy oxidů a nečistot.

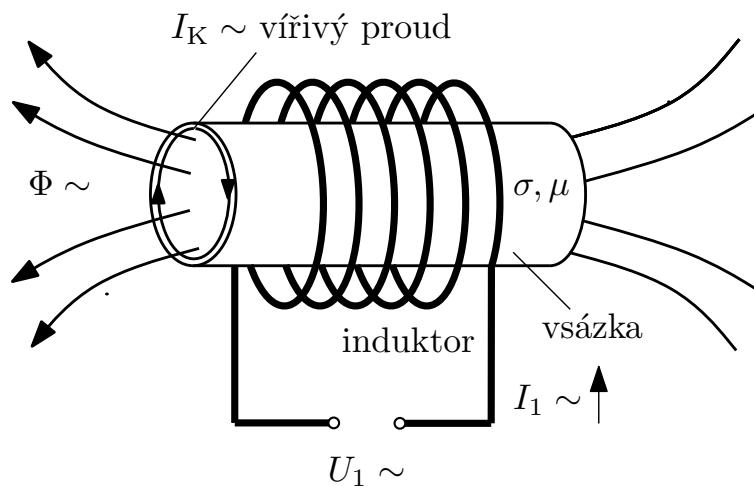
3

Indukční ohřev

Indukční ohřev je technologie založená na faktu, že ve vodivém tělese, vloženém do časově proměnného magnetického pole vznikají vířivé proudy a v jejich důsledku ztráty, které způsobují ohřívání tělesa. Tento jev je možné popsat pomocí několika fyzikálních zákonů. Z Maxwellových rovnic je možné určit rozložení indukovaných proudů a výkonové hustoty uvnitř ohřívaného tělesa. Teplotní pole je možné určit na základě rovnice šíření tepla.

3.1 Rozložení elektromagnetického pole

Základní jevy které jsou principem indukčního ohřevu lze nejlépe pochopit z interakce mezi cívkou a obrobkem znázorněným na obrázku 3.1. Princip indukčního ohřevu lze



Obrázek 3.1: Princip indukčního zařízení a vzniku vířivých proudů [6]

vysvětlit pomocí elektro-magnetických a teplotních procesů. Elektromagnetické procesy jsou popsány soustavou Maxwellových rovnic. Pro indukční ohřev se obvykle používá harmonických zdrojů o frekvencích, které umožňují zanedbat Maxwellův posuvný proud. První a druhou Maxwellovu rovnici je tedy možné psát ve tvaru

$$\oint_C \underline{H} \, dl = \sigma \underline{E}, \quad (3.1)$$

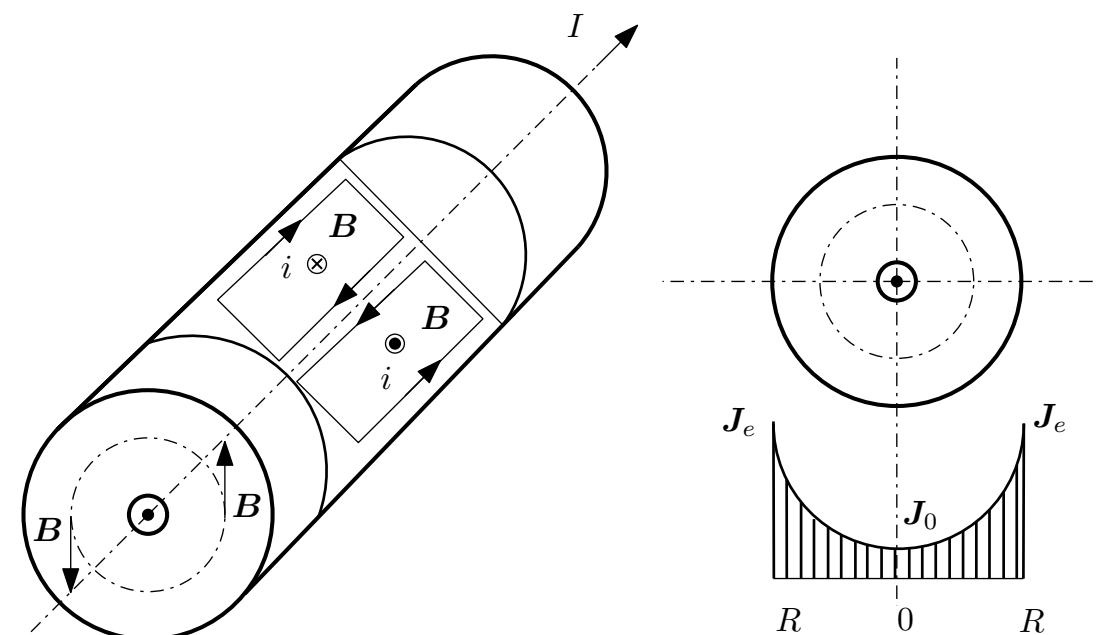
$$\oint_C \underline{E} \, dl = -j\omega\mu\sigma \underline{H}. \quad (3.2)$$

První Maxwellova rovnice ve fázorovém tvaru popisuje vznik magnetického pole v důsledku průchodu harmonického proudu vodičem o vodivosti σ . Druhá Maxwellova rovnice popisuje vznik vířivých proudů jako důsledku harmonicky proměnného magnetického pole. Indukční ohřev se opírá o dva mechanismy vzniku tepelné energie. Jedná se o energetické ztráty v důsledku Jouleova oteplení a energetické ztráty spojené s magnetickou hystezí. Hustotu výkonu (Jouleovy ztráty) vznikajícího v materiálu díky vířivým proudům lze vypočítat ze vztahu

$$p_j = \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} = \sigma \mathbf{E} \cdot \mathbf{E}^* \quad (3.3)$$

Jouleovy ztráty jsou jediným mechanismem generování tepla v nemagnetických materiálech (například, hliník, měď, austenitické nerezové oceli a uhlíkové oceli nad Curieovo teplotou, nebo magnetická transformace) a primární mechanismus pro feromagnetické kovy (například uhlíkové oceli pod Curieovou teplotou).

3.2 Povrchový jev



Obrázek 3.2: Povrchový jev ve válcovém vodiči, vlevo - směr indukovaných vířivých proudů, vpravo - rozložení proudové hustoty v řezu vodičem [13]

Povrchový jev je název pro nerovnoměrné rozložení proudové hustoty střídavého proudu v průřezu vodiče. Princip vzniku povrchového jevu je ukázán na obrázku (3.2). Průchodem harmonického proudu I vodičem dochází, v souladu s 1. Maxwellovou rovnicí, k cirkulaci magnetického pole, které lze popsat pomocí rozložení magnetické indukce \mathbf{B} . Magnetická indukce se bude v čase také měnit podle harmonické funkce. V důsledku harmonicky proměnného magnetického pole dochází k cirkulaci elektrického pole (viz 2. Maxwellova rovnice) a ve vodivém prostředí ke generování vířivých proudů. Vířivé proudy se ve středu vodiče odečítají od původního proudu a na povrchu vodiče se k původnímu proudu přičítají. Důsledkem je pokles proudové hustoty uvnitř vodiče a nárůst proudové hustoty směrem k povrchu vodiče.

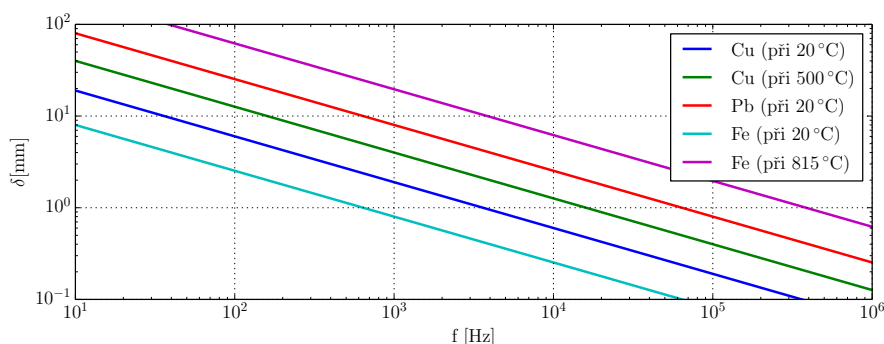
Platí, že proudová hustota se snižuje exponenciálně směrem do středu vodiče podle vztahu

$$J = J_s \cdot e^{-\frac{y}{d}}, \quad (3.4)$$

kde J je velikost proudové hustoty ve vzdálenosti y od povrchu vodiče, J_s je proudová hustota na povrchu vodiče a d je hloubka vniku. Hloubka vniku je taková vzdálenost od povrchu vodiče, na které poklesne proudová hustota na hodnotu $J = J_s \cdot 1/e$, tedy přibližně na 37 % hodnoty proudové hustoty na povrchu vodiče. Hloubka vniku se vypočte ze vztahu

$$d = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu \cdot \sigma}}, \quad (3.5)$$

kde σ je měrná elektrická vodivost, $[\Omega \cdot \text{cm}^{-1}]$, μ je magnetická permeabilita a $[-]$, ω je úhlová frekvence střídavého proudu protékajícího cívkou $[\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}]$. Obrázek 3.3 znázorňuje hloubku vniku v závislosti na frekvenci pro vybrané kovy.



Obrázek 3.3: Hloubka vniku pro běžné materiály jako funkce frekvence.[10]

Hloubka vniku pro pevnou frekvenci se mění s teplotou podobně jako elektrický odpor. Kromě toho u feromagnetických ocelí se mění s teplotou také permeabilita a nad Curieovou teplotou klesá na hodnotu jednotek.

3.3 Rozložení teplotního pole

Rozložení teplotního pole lze popsat pomocí třech základních zákonů fyziky. Tepelný tok v materiálu lze popsat pomocí Fourierovy rovnice

$$\mathbf{q} = -k_t \cdot \nabla \cdot T. \quad (3.6)$$

Energetickou bilanci systému lze popsat pomocí prvního zákona termodynamiky (při uvažování konstantního objemu)

$$P + Q = \frac{dU}{dt} = m \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (3.7)$$

kde, P je výkon vznikající v daném tělese (např. v důsledku Jouleových ztrát), Q je výkon dodaný (odebraný) do tělesa z vnějšku, m je hmotnost tělesa a C_p je měrná tepelná kapacita.

Poslední důležitý zákon je zákon zachování hmoty. Ten lze popsat pomocí rovnice kontinuity

$$\frac{\partial \rho_d}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_d \cdot \mathbf{v}) = 0, \quad (3.8)$$

kde ρ_d je hustota materiálu a \mathbf{v} je rychlost pohybu materiálu. Z výše uvedených fyzikálních zákonů lze odvodit rovnici šíření tepla ve tvaru

$$\rho_d \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_d \cdot C_p \cdot \mathbf{v} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k_t \cdot \nabla T) + p_l, \quad (3.9)$$

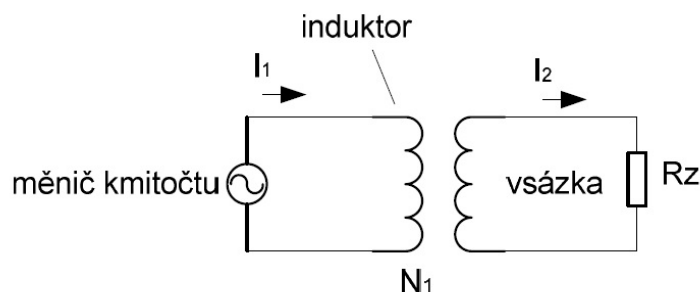
kde ρ_d je hustota [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$], C_p měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku [$\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$], \mathbf{v} je vektor rychlosti [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$], T je termodynamická teplota [K], t je čas [s], [$\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$], k_t je tepelná vodivost materiálu [$\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$] a p_l představuje Jouleovy ztráty vznikající v důsledku vířivých proudů [$\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$].

4

Návrh induktoru pro předeheřev před laserovým svařováním

4.1 Induktor

Induktor představuje koncovou část napájecího zdroje, kterou prochází střídavý proud zdroje, čímž se v okolí induktoru vytváří elektromagnetické pole. Induktor si lze představit jako primární část transformátoru a vsázka pak představuje sekundární část transformátoru spojenou nakrátko. Proto se při navrhování induktorů využívají některé vlastnosti známé z návrhů transformátorů. Konstrukčně je induktor nejčastěji tvořen tlustým dutým měděným vodičem, kterým protéká chladicí kapalina. Induktor je ve své podstatě masivní cívka, která zabezpečuje vytváření potřebného elektromagnetického pole. Induktor při procesu ohřevu není v přímém kontaktu s ohřívaným materiálem.



Obrázek 4.1: Elektrický obvod znázorňující analogii mezi induktorem a vsázkou znázorněného jako transformátor. N_1 -počet závitů induktoru; R_z -odpor vsázky; I_1 -budící proud induktorem; I_2 -indukovaný proud ve vsázce [5]

4.2 Obecný návrh induktoru

V jistém smyslu je návrh cívek pro indukční ohřev postaven na existenci velkého množství empirických údajů, jejichž vývoj pramenil z teoretické analýzy několika poměrně jednoduchých induktorů o různé geometrii. Z tohoto důvodu je konstrukce cívek obecně založena především na zkušenostech. Účinnost indukčního ohřevu značně závisí na vhodném impedančním přizpůsobení induktoru zatěžovací impedancí zdroje (měniče) a na zvoleném tvaru induktoru. Snahou je navrhnout induktor tak, aby byl v co nejtěsnější vazbě s ohřívaným materiálem. U válcových předmětů je situace jednoduchá. Tam se

jedná o klasické jedno či více závitové kruhové induktory různých průměrů a tloušťek, podle konkrétní aplikace. Složitější návrh je u induktorů pro ohřev plochých předmětů, např. předeřev plechů při svařování, nebo ohřev libovolných různorodých tvarů. Vliv průměru kruhového induktoru na účinnost ohřevu válcových těles lze odhadnout přibližně tímto vztahem [5]

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{a_1^2}{a_2^2} \cdot (1 + 6,25 \frac{d^2}{a_2^2}) \cdot \sqrt{\frac{\varrho_1}{\mu_r \varrho_2}}}, \quad (4.1)$$

kde: a_1 je průměr induktoru [m], a_2 je průměr vsázky válcového tvaru [m], d je hloubka vniku [m], ϱ_1 je měrný odpor induktoru [$\Omega \cdot \text{m}^{-1}$], ϱ_2 je měrný odpor vsázky [$\Omega \cdot \text{m}^{-1}$], μ_r je poměrná permeabilita [–].

Je tedy zřejmé, že pro maximální účinnost ohřevu je potřeba volit průměr induktoru tak, aby dostatečně blízko obklopoval ohříváný objekt. Čím je však vzdálenost induktoru od vsázky menší, tím větší je zpětný ohřev induktoru při vysokých teplotách vsázky. Volba průměru induktoru je tedy určitým kompromisem mezi účinností ohřevu a odvodem tepla z induktoru. Tudiž, ani vhodně zvolený tvar induktoru nezajistí vysokou účinnost zdroje samo osobě.

Důležité předpoklady při návrhu induktoru (cívky) jsou :

1. Cívka by měla být připojena k části tak přesně, jak je to možné pro maximální přenos energie. Je žádoucí, aby co největší počet siločar protínal obrobek v oblasti, která má být ohřívána. Je třeba počítat také s odvodem tepla z cívky, tedy s chlazením.
2. Největší počet siločar v elektromagnetické cívce jsou směrem ke středu cívky. Tyto siločáry jsou soustředěny uvnitř cívky a poskytují maximální rychlost ohřevu.
3. V místě, kde se kabely a cívka připojí, je slabší magnetické pole, proto magnetický střed cívky (podél osového směru) není nutně geometrický střed. V důsledku tohoto jevu se musí cívka dobře vycentrovat tak, aby bylo dosaženo maximálního výkonu.
4. Cívka musí být navržena tak, aby se zabránilo zrušení oblasti magnetické indukce na protilehlých stranách induktoru.

5

Model navrhovaného induktoru s numerickým výpočtem a ověřením funkčnosti zařízení

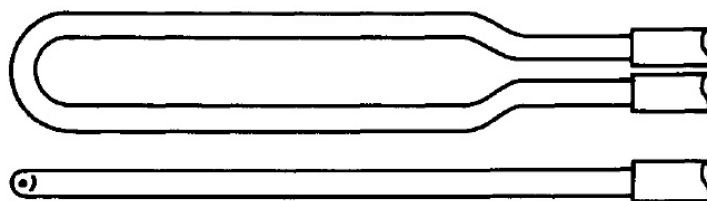
5.1 Technické parametry pro navrhovaný induktor

Proces předehřevu bude simulován v programu COMSOL ver. 4.4., na základě zadání základních technických parametrů. Proces bude modelován v prostředí 3D a podle výsledků simulace budou stanoveny technické výrobní parametry pro induktor předehřevu.

Technické parametry pro modelování procesu jsou :

- Předehříváný materiál : ocel AM-355 [solid, sheet SCT at 728K - long],
- Požadovaná teplota předehřevu : 450 [°C],
- Rychlost posuvu dopravníku : 10 [mm · s⁻¹],
- Aktivní délka induktoru : 200 [mm],
- Šířka stopy pro předehřev : 40 [mm],
- Mezera mezi induktorem a předehříváním materiálem : 0,5 – 2 [mm].

Na obrázku 5.1 je zobrazen zvolený tvar induktoru pro předehřev.

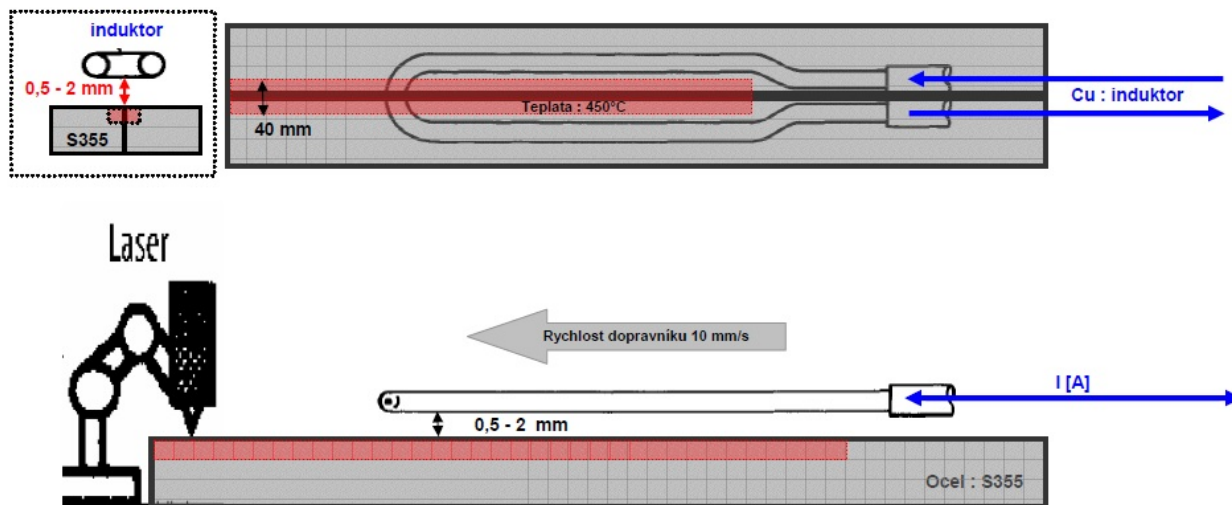


Obrázek 5.1: Zvolený tvar induktoru pro předehřev [2]

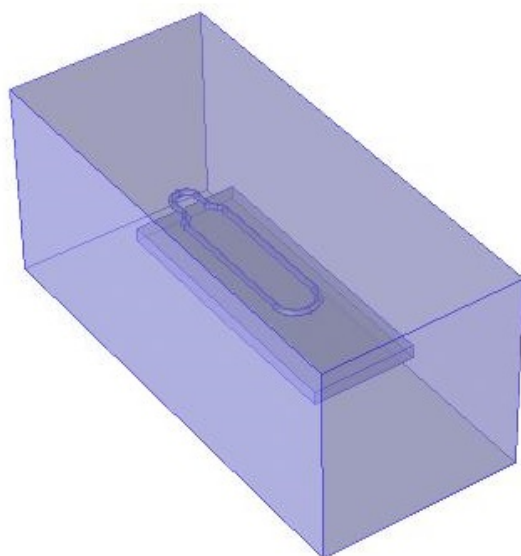
Na obrázku 5.2 je zobrazeno základní schéma uspořádání požadovaného procesu.

5.2 Numerický výpočet induktoru

Numerický výpočet byl proveden v programu COMSOL v.4.4, který umožňuje řešení multi-fyzikálních úloh metodou konečných prvků. Geometrie modelovaného induktoru je zobrazena na obrázku 5.3.



Obrázek 5.2: Technologické schéma parametrů procesu indukčního předehřevu před laserovým svařováním [2]

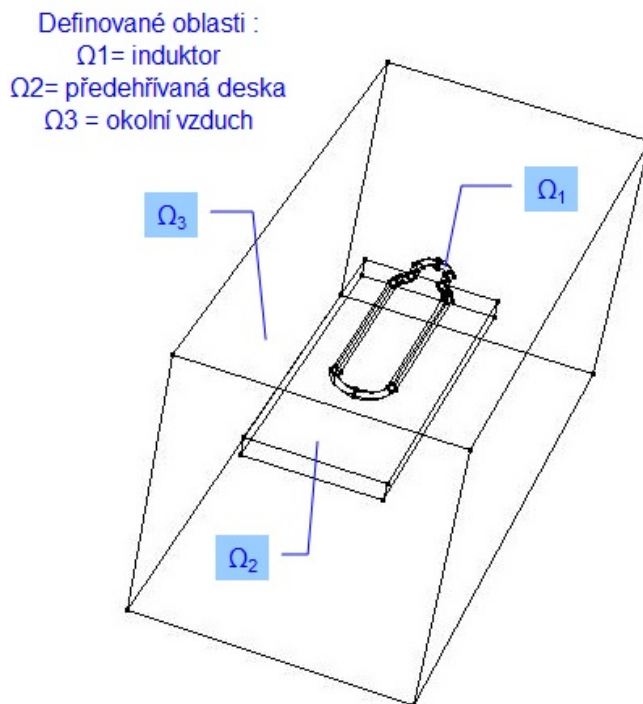


Obrázek 5.3: Model induktoru - geometrie 3D zadaná v programu COMSOL [4]

5.2.1 Matematický model

Sestavený model induktoru lze rozdělit do tří oblastí zobrazených na obrázku 5.4. Pro každou tuto oblast platí vlastní matematický model v závislosti na procesu, materiálu a prostředí. Matematický výpočet je součástí programu COMSOL v.4.4, který simuluje proces předehřevu podle navrženého modelu procesu.

Rovnice pro magnetické pole (5.1) je řešena v oblastech Ω_1, Ω_2 a Ω_3 . Rovnice pro teplotní pole (5.4) je řešena v oblasti Ω_2 . Parametry procesu pro definovanou oblast Ω_3 jsou dány také hodnotami μ a ε . Tyto veličiny představují vliv vlastností daného prostředí.



Obrázek 5.4: Definované oblasti modelu pro matematické výpočty v programu COMSOL [4]

5.2.2 Magnetické pole

Pro numerické výpočty magnetického pole je použit základní vztah(5.1)[4]. Tento vztah platí pro definovanou oblast Ω_1, Ω_2 a Ω_3

$$(j \cdot \omega \cdot \sigma - \omega^2 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r) \cdot \mathbf{A} + \nabla \cdot (\mu_0^{-1} \cdot \mu_r^{-1} \cdot \mathbf{B}) - \sigma \cdot \mathbf{v} \times \mathbf{B} = \mathbf{J}, \quad (5.1)$$

kde: σ je elektrická vodivost [$\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$], ω je úhlový kmitočet [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$], \mathbf{v} je rychlost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$], \mathbf{J} je proudová hustota [$\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$], $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$ představuje permeabilitu, která charakterizuje magnetické vlastnosti prostředí [$\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$],

$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$ představuje permitivitu, která charakterizuje elektrické vlastnosti prostředí [$\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$], \mathbf{H} je intenzita magnetického pole [$\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$], $\mathbf{H} = (\mu^{-1} \cdot \mathbf{B})$.

Platí vztah [4]

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}, \quad (5.2)$$

kde: \mathbf{B} je magnetická indukce [T], \mathbf{A} je vektorový magnetický potenciál [$\text{Wb} \cdot \text{m}^{-1}$], \times - představuje operaci pro vektorový součin.

Pro daný model a výpočet jeho magnetického pole jsou ještě stanoveny tyto okrajové podmínky. Pro vnější hranice oblasti Ω_3 , platí

$$\mathbf{n} \times \mathbf{A} = 0, \quad (5.3)$$

kde: \mathbf{n} je vektor vnější normály [-], \mathbf{A} je vektorový magnetický potenciál [$\text{Wb} \cdot \text{m}^{-1}$], \times - představuje operaci pro vektorový součin.

5.2.3 Teplotní pole

Pro numerické výpočty teplotního pole je použit základní vztah(5.4)[4] : Tento vztah platí pro definovanou oblast Ω_2

Rovnice řeší tepelné procesy v předehřívaném materiálu za stanovení základních podmínek pro řešení numerických výpočtů [4]

$$\rho_d \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_d \cdot C_p \cdot \mathbf{v} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k_t \cdot \nabla T) + p_l, \quad (5.4)$$

kde: ρ_d je hustota [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$], C_p specifická teplotní kapacita při konstantním tlaku [$\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$], \mathbf{v} je vektor rychlosti [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$], T je absolutní teplota [K], t je čas [s], p_l představuje Jouleovy ztráty [$\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$], k_t je tepelná vodivost materiálu [$\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$].

Pro daný model a výpočet jeho teplotního pole jsou ještě stanoveny tyto okrajové podmínky. Tato okrajová podmínka říká, že neexistuje teplotní tok (teplotní gradient), přes vnější hranice předehřívaného materiálu do okolí. Pro vnější hranice oblasti Ω_2 , platí

$$-\mathbf{n} \cdot (-k_t \cdot \nabla \cdot T) = h \cdot (T_{ext} - T), \quad (5.5)$$

kde: \mathbf{n} je vektor vnější normály $[-]$, $\nabla \cdot T$ je teplotní gradient [K], k_t je tepelná vodivost materiálu [$\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$], h je zadána konstanta přirozeného ochlazování předehřívaného materiálu, hodnota konstanty je 15 [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$], T_{ext} je teplota okolí [K], T je teplota materiálu [K].

5.3 Model zařízení

Model zařízení, byl zadán a sestaven v programu COMSOL ver. 4.4. V tomto programu byl zkonstruován model induktoru podle předpokládaných teoretických znalostí a se zadáním požadovaných technických výstupních parametrů procesu předehřevu uvedených v kapitole 5.1. Požadovaná teplota předehřevu je 450 [$^{\circ}\text{C}$] v závislosti na rychlosti posuvu a aktivní délce induktoru 200 [mm], musíme této teploty dosáhnout za čas 20 [s]. V tabulce 5.1 je zaznamenán průběh simulace a dosažená teplota v závislosti na změně vybraných parametrů procesu. Byla provedena simulace modelu při různých frekvencích, různých hodnotách proudu, rychlosti posuvu a vzdálenosti induktoru nad deskou. Dosažená teplota uvedená v tabulce 5.1 je snímána ve středu desky na jejím povrchu v bodě na konci induktoru obrázek 5.5.

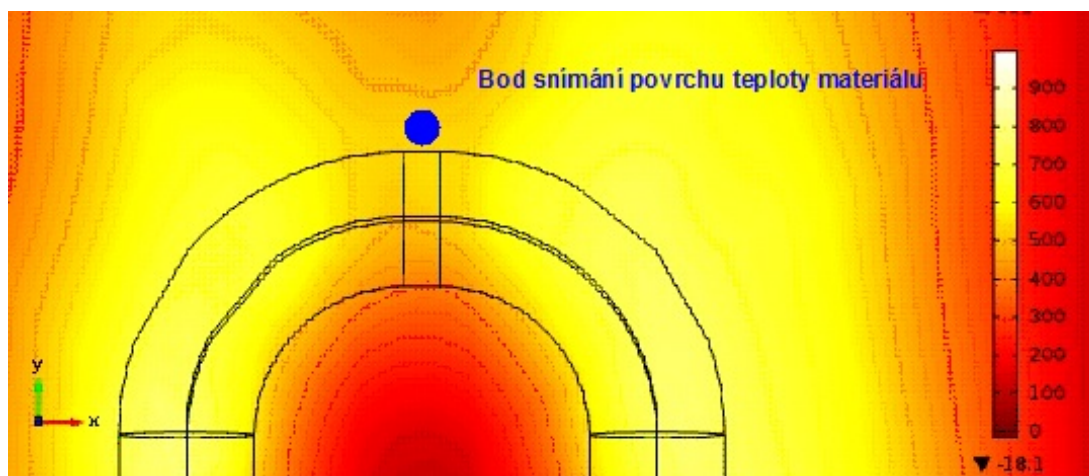
Simulací bylo zjištěno, že nejvýraznější vliv na dosažení požadované teploty má parametr vzdálenosti mezi induktorem a předehřívaným materiálem. Čím dosáhneme menší vzdálenosti, tím se stává dosažení teploty efektivnější. Velikost dosažené vzdálenosti je limitována kvalitou uchycení obrobku a zamezení vibrací při posuvu, rovněž kvalitou povrchu obrobku. Musí se rovněž vzít v úvahu způsob chlazení induktoru. Druhým výrazným parametrem je pak změna proudu do induktoru. Velikost proudu je zase limitována náklady na zdroj a efektivitu procesu. Rychlost posuvu dokáže také ovlivnit proces dosažení teploty, její vliv se projevuje významně, ale pouze za určité konfigurace parametrů, což je vidět z tabulky 5.1. Parametr frekvence se nám v našem procesu projevil nepatrně a dosaženou teplotu takřka neovlivnil.

Simulací se dospělo k závěru, že optimální parametry našeho procesu jsou :

KAPITOLA 5. MODEL NAVRHOVANÉHO INDUKTORU S NUMERICKÝM
VÝPOČTEM A OVĚŘENÍM FUNKČNOSTI ZAŘÍZENÍ

Tabulka 5.1: Dosažení teploty přehřevu při nastavení různých parametrů procesu v programu Comsol [4]

Simulace číslo	f frekvence [kHz]	I proud [kA]	Rychlost posuvu [mm · s ⁻¹]	Vzdálenost nad deskou [mm]	Doba vzorku [s]	Dosažená teplota [°C]
1.	25	3	10	1	20	85,06
2.	50	3	10	1	20	88,92
3.	10	3	10	1	20	85,41
4.	25	4	10	1	20	139,46
5.	25	5	10	1	20	203,91
6.	25	6	10	1	20	277,61
7.	25	7	10	1	20	360,93
8.	25	8	10	1	20	451,11
9.	25	8,1	10	1	20	464,19
10.	25	8,5	10	1	20	503,07
11.	25	3,5	7,5	1	30	185,73
12.	25	3,5	5	1	40	240,75
13.	25	3,5	10	0,75	20	184,87
14.	25	3,5	10	0,5	20	643,13
15.	25	4	7,5	1	30	239,87
16.	25	4	5	1	40	322,91
17.	25	4	7,5	0,75	30	323,87
18.	25	4	7,5	0,5	30	1017,43
19.	25	4	5	0,75	40	449,95
20.	25	4	5	0,5	40	1367,12
21.	25	3	10	0,5	20	520,17



Obrázek 5.5: Bod snímání povrchové teploty materiálu [4]

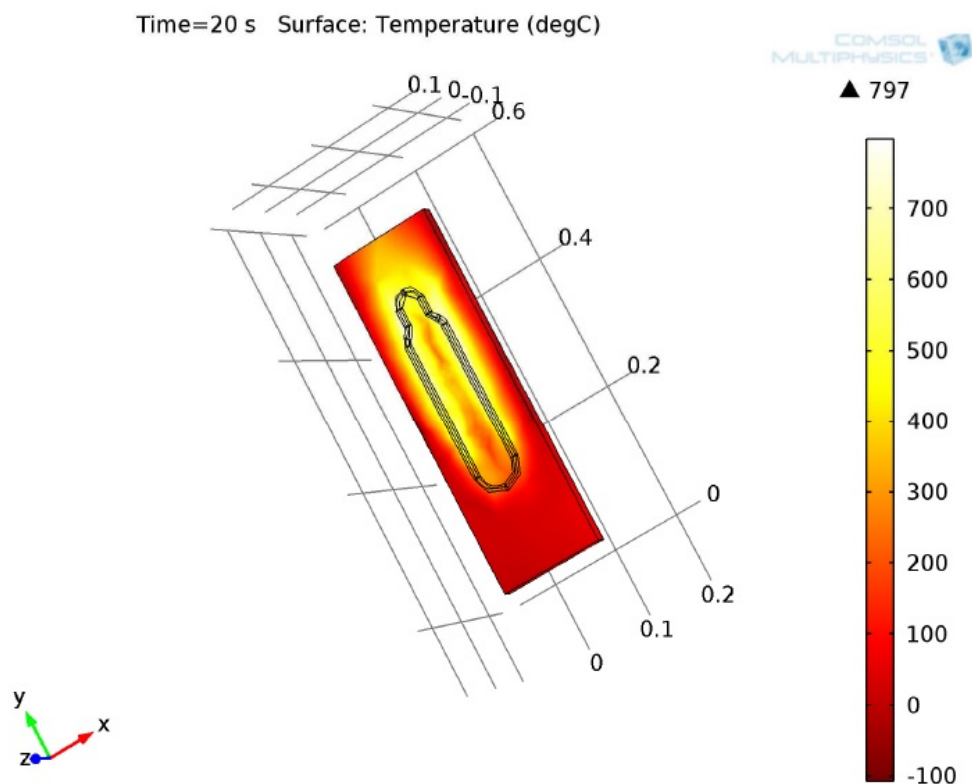
- frekvence 25 [kHz],
- proud 3 [kA],
- rychlosti posuvu 10 [mm · s⁻¹],
- vzdálenosti nad deskou 0,5 [mm].

V tabulce 5.1 je to řádek č.21. Při těchto hodnotách dojde k dosažení požadované teploty předehřevu materiálu v požadovaném čase. Dosažená teplota na konci procesu je 520 [°C], tedy cca. o 70 [°C] vyšší teplota povrchu, než je teplota požadovaná. Toto je dobré z důvodu přirozeného ochlazování předehřáté desky, která se musí ještě dopravit k místu provedení laserového svaru. Předehřátý model teplotního pole je zobrazen na obrázku 5.6. Z obrázku je vidět, jak dochází k postupnému prohřívání materiálu na požadovanou teplotu. Na konci inductoru je již materiál vhodně předehřát a to i v požadované šířce. Je nutné také realizovat provedení laserového svaru co nejbližně optimálně předehřátému místu materiálu za inductorem. Právě z důvodu přirozeného ochlazování materiálu okolním vzduchem. Z modelu lze zjistit, že toto ochlazování je poměrně značné a již cca. po posuvu obrobku o 30 [mm], což odpovídá 3 [s] za předehřevem směrem k laseru, se sníží jeho teplota o 50 [°C].

V tabulce 5.2 je zobrazena dosažená teplota, měřena v různé hloubce materiálu. Teplota je snímána v bodě na obrázku 5.5.

Další měření byly provedeny v různých podélných a příčných osách inductoru dle obrázků 5.7, 5.12, 5.15, 5.17, 5.19.

Z těchto měření byly vygenerovány grafy procesu pro dosaženou teplotu v různých časech, se zobrazením v definované pozici a hloubce materiálu. U obrázků 5.8, 5.9, 5.10, 5.11 stojí za povšimnutí zajímavý tvar křivek. Teplota začne prudce narůstat do času 2 sekund, od času 2 sekundy pozvolna klesá a od 17 sekundy zase strmě narůstá, až na požadovanou teplotu. Toto by se dalo vysvětlit tím, že studený materiál rychle přebírá teplo, pak ho začne rozvádět do stran a hloubky. Teprve až dojde k jeho prohřátí, tak rychle dosahuje požadované teploty na povrchu. Při snímání teploty v ose přímo pod inductorem dle obrázku 5.12, je tvar teplotní křivky odlišný. Teplota přímo pod inductorem narůstá k požadované teplotě plynule strmě s drobnými zvlněními. Dosažená

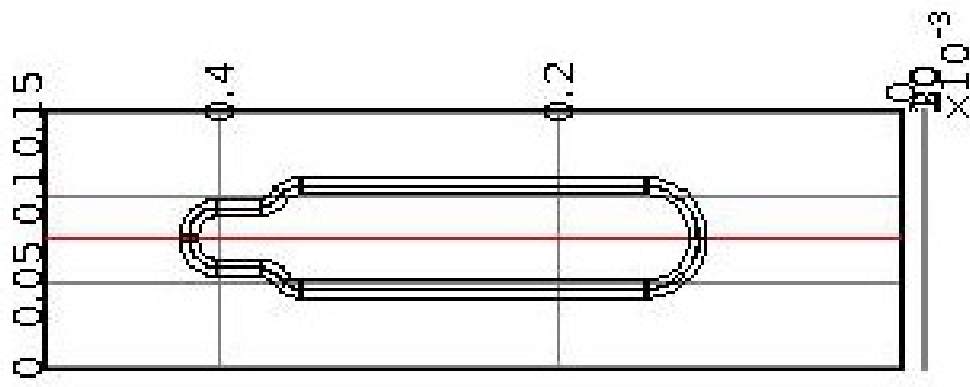


Obrázek 5.6: 3D model teplotního pole z programu COMSOL [4]

teplota je v místě pod spirálou induktoru nejvyšší a to cca. o 20% z požadované teploty. Z této křivky je i dobře patrný, rychlý pokles teploty po vyjetí z prostoru pod induktorem směrem k laseru. Obrázky 5.16, 5.18, 5.20 ukazují teplotní křivky v příčném řezu podle obrázků 5.15, 5.17, 5.19 . Na těchto křivkách je nejlépe vidět, že teplota je nejvyšší v místě pod induktorem. Křivky také ukazují jak je do teploty cca. 100°C rozvod tepla do desky rovnoměrný. Nad tuto teplotu již začíná být střed desky značně chladnější. Za povšimnutí stojí i poměrně značný rozdíl mezi dosaženou teplotou pod pravou a levou spirálou induktoru. Tento rozdíl činí přes 100°C .

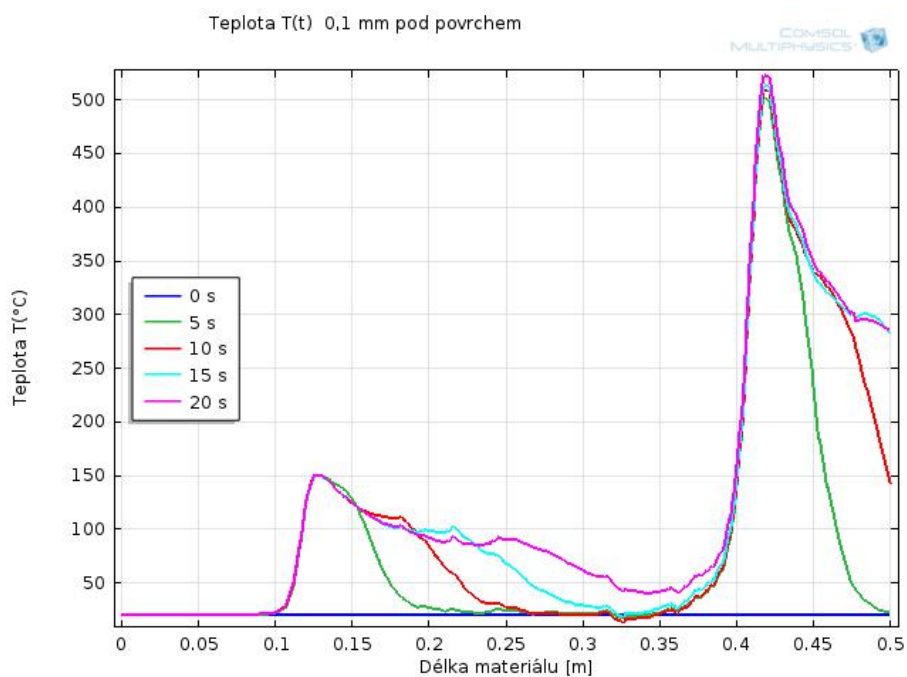
Tabulka 5.2: Dosažená teplota v různé hloubce materiálu při optimálních parametrech procesu [4]

Simulace číslo	Bod snímání T [mm]	T teplota [°C]
1.	0,1 [mm] pod povrchu	520,17
2.	5 [mm] pod povrchem	257,66
3.	10 [mm] pod povrchem	182,49
4.	15 [mm] pod povrchem	116,71

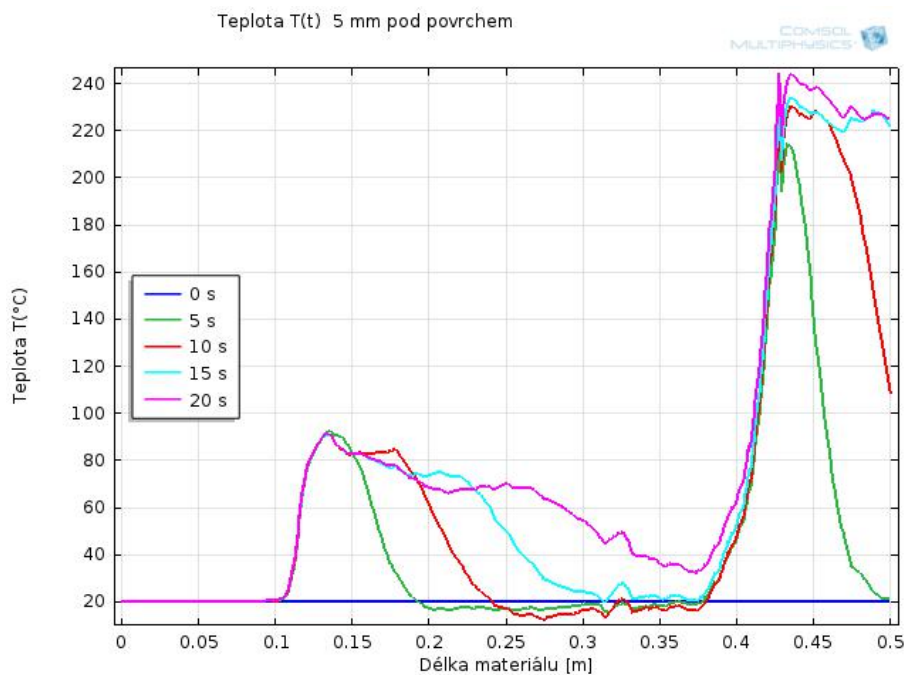


Obrázek 5.7: 3D model- definice podélné osy snímání teploty na desce - podél středu[4]

KAPITOLA 5. MODEL NAVRHOVANÉHO INDUKTORU S NUMERICKÝM VÝPOČTEM A OVĚŘENÍM FUNKČNOSTI ZAŘÍZENÍ

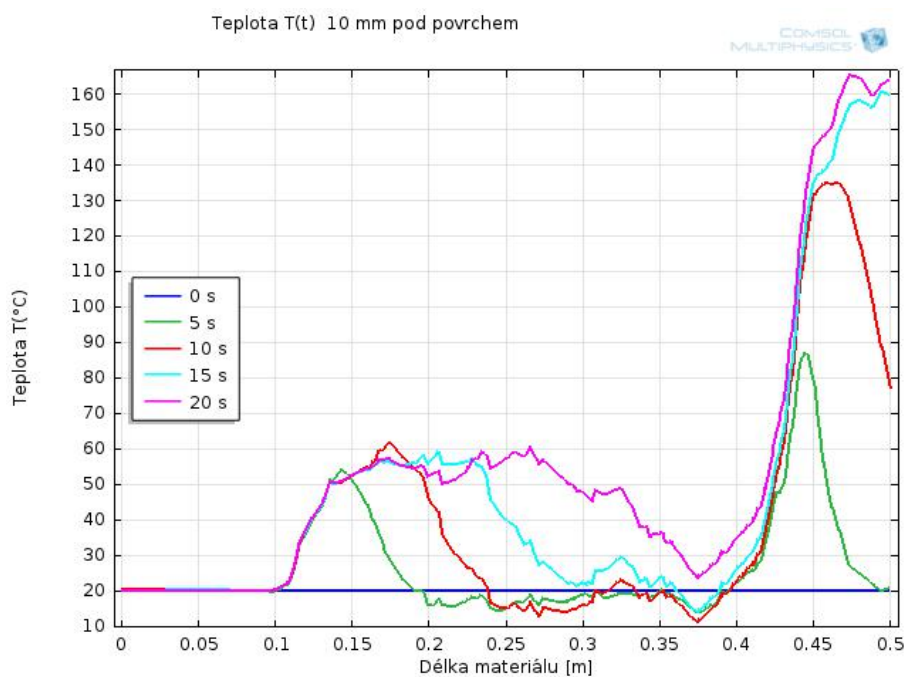


Obrázek 5.8: Graf hodnot $T(t)$ v podélné osa snímání na desce 0,1 mm pod povrchem[4]

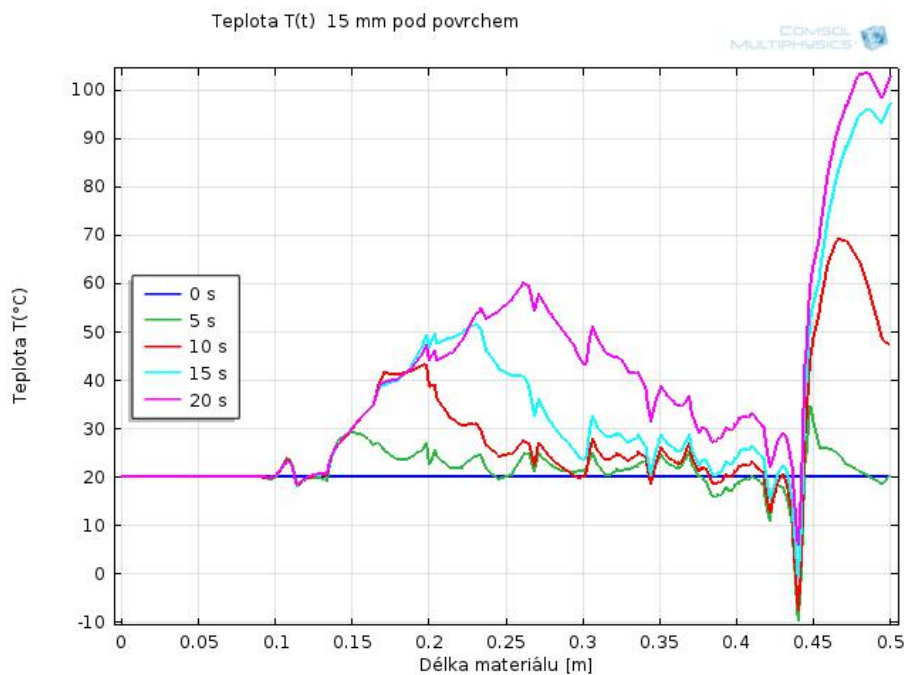


Obrázek 5.9: Graf hodnot $T(t)$ v podélné osa snímání na desce 5 mm pod povrchem[4]

KAPITOLA 5. MODEL NAVRHOVANÉHO INDUKTORU S NUMERICKÝM VÝPOČTEM A OVĚŘENÍM FUNKČNOSTI ZAŘÍZENÍ

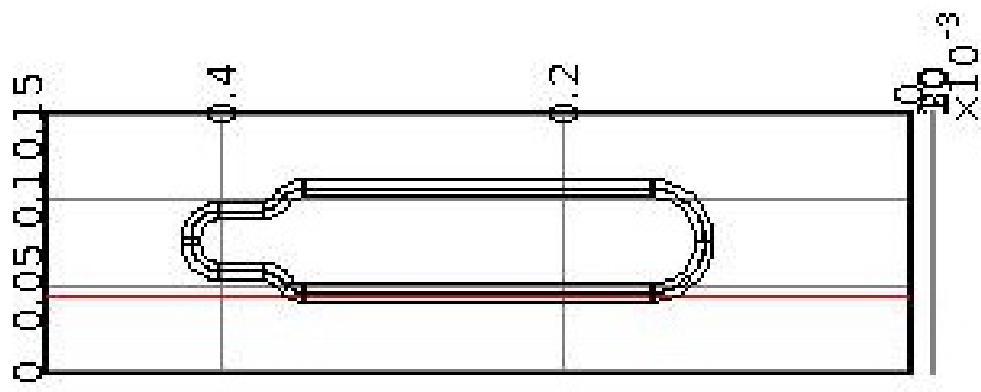


Obrázek 5.10: Graf hodnot $T(t)$ v podélné osa snímání na desce 10 mm pod povrchem[4]

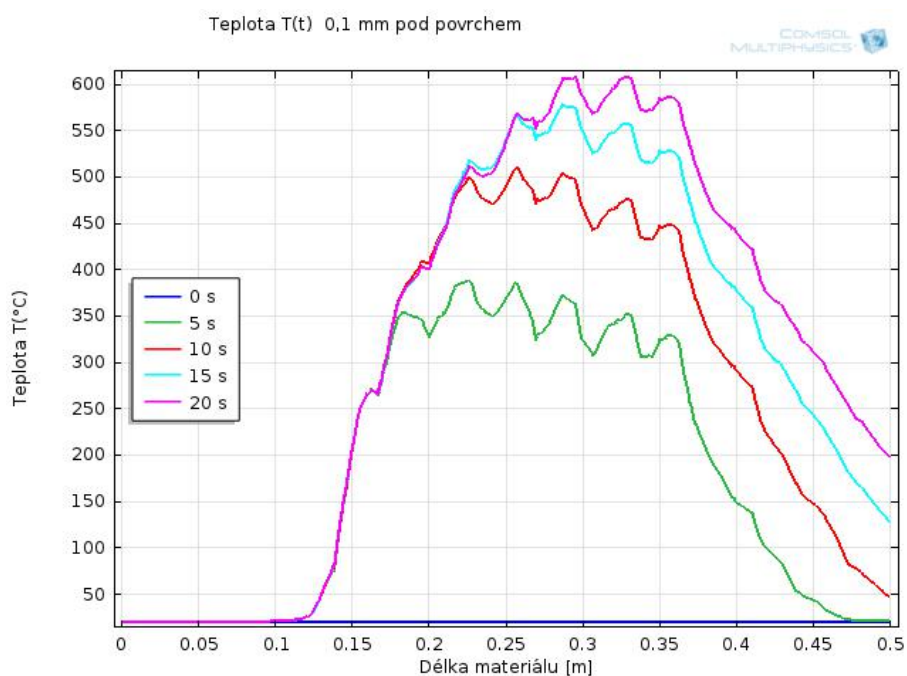


Obrázek 5.11: Graf hodnot $T(t)$ v podélné osa snímání na desce 15 mm pod povrchem[4]

KAPITOLA 5. MODEL NAVRHOVANÉHO INDUKTORU S NUMERICKÝM VÝPOČTEM A OVĚŘENÍM FUNKČNOSTI ZAŘÍZENÍ

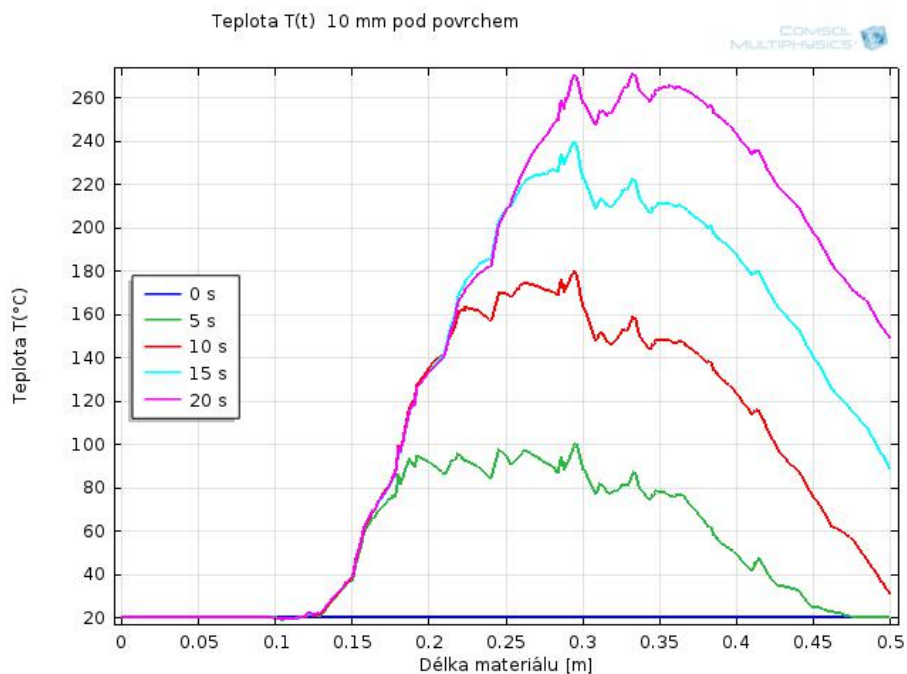


Obrázek 5.12: 3D model- definice podélné osy snímání teploty na desce - podél induktoru[4]

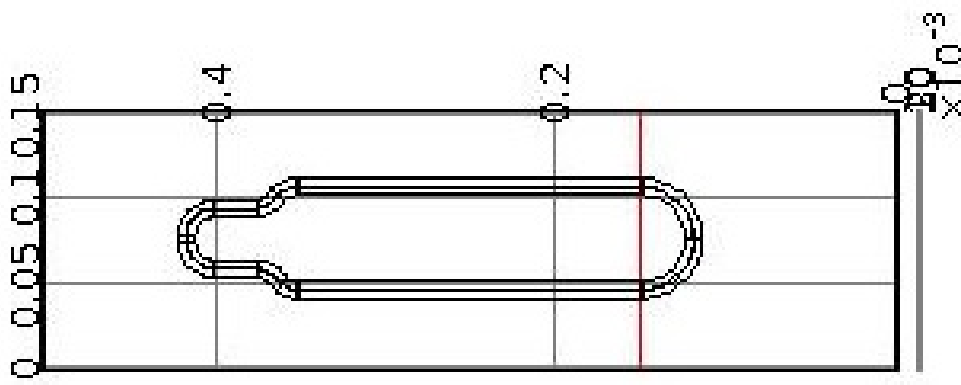


Obrázek 5.13: Graf hodnot $T(t)$ v podélné osy snímání podél induktoru na desce 0,1 mm pod povrchem[4]

KAPITOLA 5. MODEL NAVRHOVANÉHO INDUKTORU S NUMERICKÝM VÝPOČTEM A OVĚŘENÍM FUNKČNOSTI ZAŘÍZENÍ

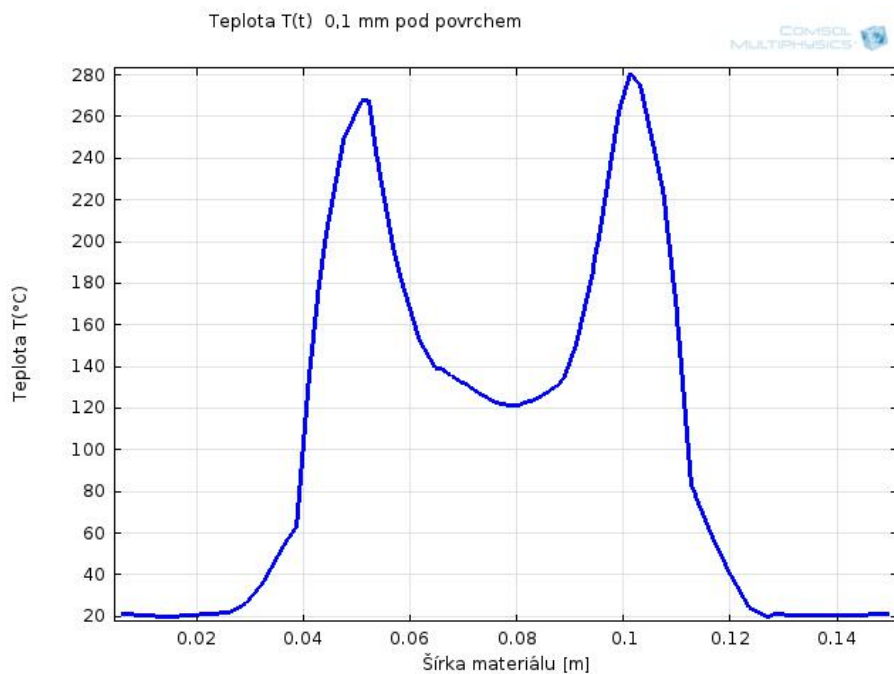


Obrázek 5.14: Graf hodnot $T(t)$ v podélné osa snímání podél induktoru na desce 10 mm pod povrchem[4]

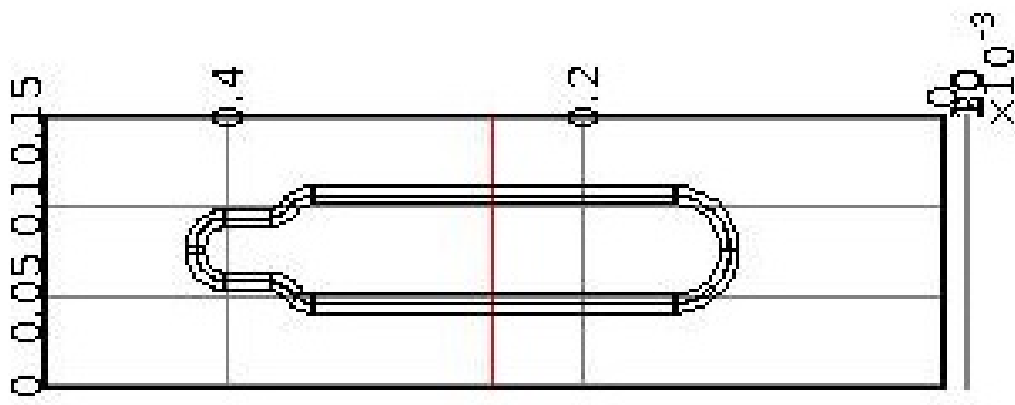


Obrázek 5.15: 3D model- příčná osa pozice 1 - snímání teploty na desce[4]

KAPITOLA 5. MODEL NAVRHOVANÉHO INDUKTORU S NUMERICKÝM VÝPOČTEM A OVĚŘENÍM FUNKČNOSTI ZAŘÍZENÍ

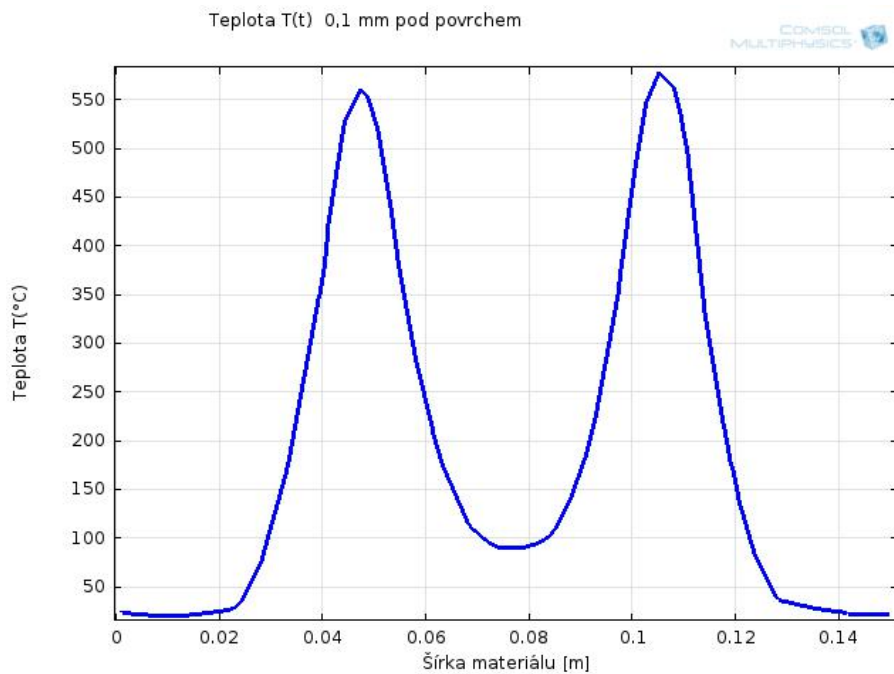


Obrázek 5.16: Graf hodnot $T(t)$ v příčné ose v pozici 1 na desce 0,1 mm pod povrchem[4]

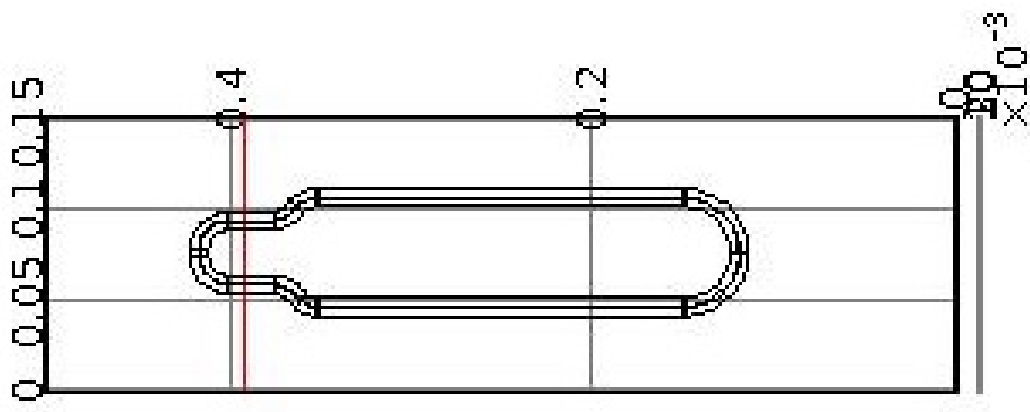


Obrázek 5.17: 3D model- příčná osa pozice 2 - snímání teploty na desce[4]

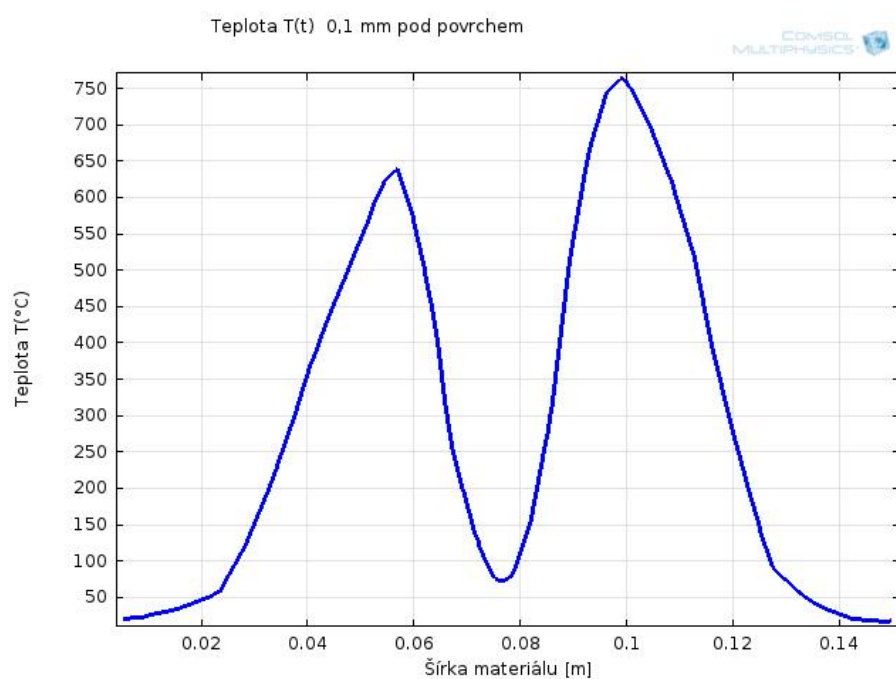
KAPITOLA 5. MODEL NAVRHOVANÉHO INDUKTORU S NUMERICKÝM VÝPOČTEM A OVĚŘENÍM FUNKČNOSTI ZAŘÍZENÍ



Obrázek 5.18: Graf hodnot $T(t)$ v příčné ose v pozici 2 na desce 0,1 mm pod povrchem[4]



Obrázek 5.19: 3D model- příčná osa pozice 3 - snímání teploty na desce[4]

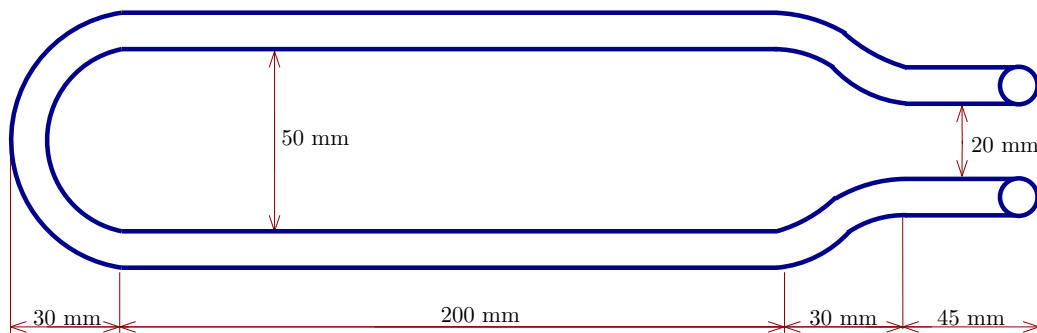


Obrázek 5.20: Graf hodnot $T(t)$ v příčné ose v pozici 3 na desce 0,1 mm pod povrchem[4]

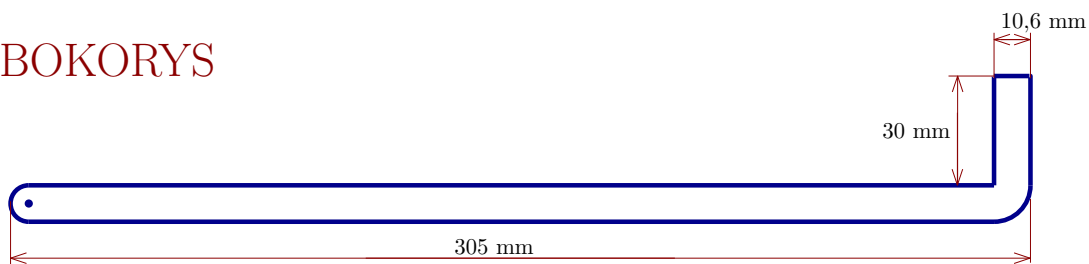
6

Výrobní dokumentace k navrženému induktoru

PUDORYS



BOKORYS



Obrázek 6.1: Výkres induktoru sestaven podle modelu z programu Comsol [4]

Induktor je z mědi, kulatého profilu se silou stěny 1,2 [mm]. Ve výkrese je provedeno v pohledu bokorysu zahnutí induktoru pro připojení induktoru na přívodní vodiče napájení.

7

Závěr

7.1 Zhodnocení získaných výsledků

Ze získaných výsledků simulace lze usoudit, že navržený induktor je schopen dosáhnout požadované povrchové teploty předehřevu před laserovým svařováním. Získané výsledky, ale jednoznačně navádějí na provedení dalších úprav procesu předehřevu a tím dosažení lepší efektivity.

Získané výsledky ukazují na změny v konstrukci induktoru za účelem optimálnějšího rozložení teploty v materiálu :

- změna délky a šířky induktoru,
- změna tvaru induktoru s použitím více smyček různých tvarů,
- změna profilu induktoru z kulatého na čtvercový, nebo obdélníkový profil,
- změna tvaru induktoru s možností předehřevu materiálu současně z obou stran.

Dále získané výsledky prokazují vliv velikosti proudu induktoru na dosažení požadované teploty. Zde je třeba zohlednit rizika zdroje, nejlépe již ve fázi návrhu induktoru. Může se stát, že získáme ideální parametry procesu a při realizaci narazíme na problém zdroje, který má zajistit naše požadované potřeby pro napájení. Tento problém zdroje může být jak technický, tak cenový. Proto je vhodné již před navrhováním induktoru mít představu o technických a cenových nárocích na dostupnost zdroje a při konstrukci induktoru je předem zohlednit.

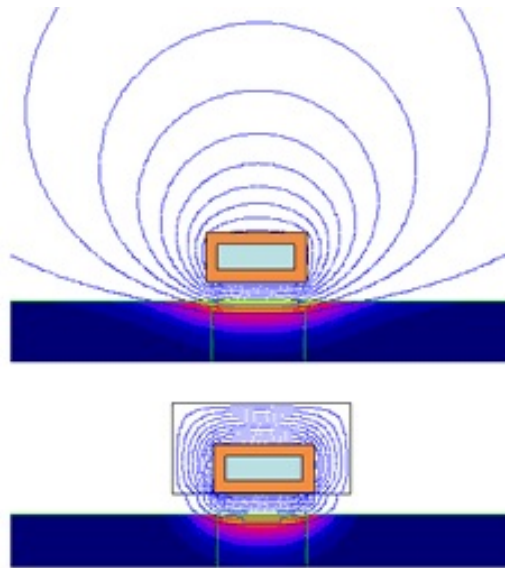
Z tabulky 5.1 provedených simulací je prokázáno, že nejvýraznější vliv na dosažení teploty má vzduchová mezera mezi induktorem a předehřívaným materiálem. Pro náš proces požadujeme vzdálenost induktoru nad deskou 0,5 [mm]. Zcela jistě zde narazíme na konstrukční problém posuvu desky pod induktorem v závislosti na dodržení požadované mezery. Posuv bude muset být velice stabilní, pevný, bez vibrací a chvění. Rovněž budeme moci předehřívát pouze materiál s vhodnou povrchovou úpravou. Tyto skutečnosti je také vhodné zohlednit již ve fázi návrhu procesu. Předjdeme tím tomu, že při samotné aplikaci pak můžeme zjistit nedosažitelnost našich procesních hodnot. Tím by se stal náš model celkově nefunkční.

Simulační program COMSOL je velice užitečný nástroj při návrhu procesu předehřevu. Získané výstupní informace jsou nesmírně cenné, protože umožňují ověřit a získat, vhodné parametry pro požadovaný proces, ještě před fází samotné výroby a aplikace procesu. Díky tomu se lze již ve fázi projektu vyvarovat problémům, které by se

pak v aplikační fázi složitě a draze musely řešit. Důležité je předpokládat rovněž parametry procesu, které program COMSOL nedokáže vyhodnotit. Je to právě například výše popsaný problém dodržení vzduchové mezery.

7.2 Možnosti zlepšení konstrukce zařízení

Zlepšení konstrukce zařízení lze dosáhnout použitím koncentrátoru. Tímto způsobem lze zvýšit účinnost až o 30%. Induktor je vložen do koncentrátoru, který vhodně koncentruje magnetický střídavý tok - dolní obrázek 7.1, čímž zvyšuje jeho účinnost. Horní obrázek 7.1 ukazuje situaci bez použití koncentrátoru. Koncentrátor je vyroben z materiálu s výbornou magnetickou permeabilitou, tepelnou vodivostí a obrobitelností.



Obrázek 7.1: Funkce koncentrátoru [12]

Při použití koncentrátoru dosáhneme požadované zvýšení účinnosti, ale je třeba počítat s generováním vyšší teploty v induktoru a koncentrátoru. Musíme tedy zajistit dostatečné chlazení induktoru a koncentrátoru. Při použití koncentrátoru by jsme změnili profil induktoru z kulatého na obdélníkový.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] William M. Steen: Jyotirmoy Mazumder. Laser Material Processing : Springer London Dordrecht Heidelberg New York, 2001, e-ISBN 978-1-84996-062-5
- [2] Stanley Zinn, Lee Semiatin: Elements of Induction Heating: ASM International, 1988, DOI: 10.1361/eoih1988p001
- [3] Langer, Emil, Teorie indukčního a dielektrického tepla. Praha: Academia, 1979. 320 s.
- [4] SW-COMSOL version 4.4, AC/DC Module, Model Library Manual : 2013, www.comsol.com/tm.
- [5] ČERNÝ, Václav. Indukční ohřev (2). Časopis Elektro. Praha: FCC PUBLIC, roč. 2002, č. 11, s. 55. ISSN 1210-0889.
Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/el110255.pdf>.
- [6] Hradílek Z., Lázníčková I., Král V., Elektrotepelná technika, ČVUT Praha 2011
- [7] Rada, Josef a Kolektiv. Elektrotepelná technika. Praha: SNTL, Alfa, 1985. 352 s.
- [8] Seriál na téma lasery. Lao [online]. 2015 [vid. 2015-04-14].
Dostupné z: <http://http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery--laserove-svarovani-i-laser-welding-134>
- [9] Technical information: Laser processing: CO2 laser [online]. 2007 [cit. 2013-04-30].
Dostupné z: http://iconmachinetool.com/education/Library_Laser_CO2_Laser.pdf
- [10] Kotlan, V., Modelování a využití vybraných termoelastických jevů vyvolaných tepelnými účinky elektromagnetického pole, Habilitační práce, 2014, Plzeň.
- [11] Dunovský, Jiří, Kolařík, Ladislav, : LASEROVÉ TECHNOLOGIE, 2015 [vid. 2015-04-14]. Dostupné z: <http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/TMSV/laser.pdf>
- [12] Martenzit : Centrum indukčních technologií, 2015 [vid. 2015-04-24]. Dostupné z: <http://www.martenzit.cz/Fluxtrol-konzentratore-pole.php>
- [13] Lupi S., Forzan M., Aliferov A.: Induction and Direct Resistance Heating, Springer, Switzerland 2015, ISBN 978-3-319-03478-2