

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

## **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Srovnání principů povrchového kalení feromagnetických  
kovů**

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

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

Jméno a příjmení: **Lukáš ŠIMANDL**  
Osobní číslo: **E12B0060P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**  
Název tématu: **Srovnání principů povrchového kalení feromagnetických kovů**  
Zadávací 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 přehledný výčet principů povrchového kalení.
2. Srovnajte dva běžně používané principy (indukční a laserové povrchové kalení) z různých hledisek (rychlost, kvalita, energetická náročnost, ...), uveďte výhody a nevýhody těchto principů.
3. Svoje srovnání podpořte numerickou simulací, zhodnoťte její výsledky.

## **Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřená na principy povrchového kalení feromagnetických materiálů používaných ve strojírenství. Hlavním cílem této práce je srovnání indukčního a laserového kalení. V úvodu se seznámíme se základy tepelného zpracování. V další kapitole jsou uvedeny vlastnosti materiálů, pnutí, deformace a tepelné zdroje. Ve třetí části jsou popsány různé druhy tepelného zpracování ocelí. V závěru práce je porovnání metod indukčního a laserového kalení podpořené numerickou simulací.

## **Klíčová slova**

Tepelné zpracování, ohřev, ochlazování, pnutí, deformace, austenitizace, žíhání, kalení, stínění, laser, induktor, tepelné zdroje, vedení, proudění, záření.

**Abstract**

The presented thesis is focused on the understanding of surface hardening of ferromagnetic materials used in mechanical engineering. The main aim of this work is the comparison of induction and the laser hardening. In the introduction are explained the basics of heat treatment. In the next chapter are discussed the properties of materials, stress, deformation and heat sources. In the third part are described the various types of heat treatment of steel. In the conclusion of work are compared methods of the induction and the laser hardening supported by numerical simulation.

**Keywords**

Thermal processing, heating, cooling, stress, deformation, annealing, hardening, shielding, laser, inductor, thermal sources, radiation, convection, conduction.

## **Prohlášení**

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

.....  
podpis

V Plzni dne: 8. 6. 2015

Lukáš Šimandl

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Václavu Kotlanovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce, dále pak děkuji mým rodinným příslušníkům a přátelům za podporu při tvorbě této bakalářské práce.

## OBSAH

<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>8</b>
<b>1 ÚVOD DO TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ.....</b>	<b>9</b>
1.1 PODMÍNKY TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ .....	10
1.2 VÝROBA KOVOVÝCH PRÁŠKŮ .....	11
<b>2 OHŘÍVÁNÍ A OCHLAZOVÁNÍ MATERIÁLU.....</b>	<b>12</b>
<b>3 PŘENOS TEPLA.....</b>	<b>14</b>
3.1 ZPŮSOBY PŘENOSU TEPLA .....	14
3.2 VEDENÍM (KONDUKČÍ).....	14
3.3 PROUDĚNÍM (KONVEKČÍ).....	15
3.4 ZÁŘENÍM (SÁLÁNÍM) .....	16
<b>4 PNUTÍ A DEFORMACE .....</b>	<b>17</b>
<b>5 TEPELNÉ ZDROJE.....</b>	<b>19</b>
5.1 ODPOROVÝ OHŘEV .....	20
5.1.1 <i>Přímý odporový ohřev</i> .....	20
5.1.2 <i>Nepřímý odporový ohřev</i> .....	22
5.2 INDUKČNÍ OHŘEV.....	22
5.3 ELEKTRICKÉ TEPLLO OBLOUKOVÉ .....	23
5.4 PLAZMOVÝ OHŘEV .....	24
5.5 ELEKTRONOVÝ OHŘEV .....	24
5.6 LASEROVÝ OHŘEV .....	24
<b>6 DRUHY TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ.....</b>	<b>26</b>
6.1 ŽÍHÁNÍ.....	26
6.2 KALENÍ.....	27
6.2.1 <i>Kalící teplota</i> .....	27
6.2.2 <i>Režimy ochlazování</i> .....	27
<b>7 SROVNÁNÍ PRINCIPŮ POVRCHOVÉHO KALENÍ.....</b>	<b>29</b>
7.1 INDUKČNÍ KALENÍ:.....	31
7.2 LASEROVÉ KALENÍ: .....	32
<b>8 SIMULACE V PROGRAMU AGROS2D .....</b>	<b>34</b>
8.1 SEZNÁMENÍ S PROGRAMEM AGROS2D .....	34
8.2 SIMULACE INDUKČNÍHO OHŘEVU .....	34
8.3 SCHÉMA INDUKČNÍHO KALENÍ.....	35
8.3.1 <i>Znázornění teplotní pole</i> .....	36
8.3.2 <i>Znázornění proudové hustoty</i> .....	37
8.3.3 <i>Simulace se stíněním</i> .....	40
8.3.4 <i>Simulace bez stínění</i> .....	44
8.3.5 <i>Indukční kalení s posuvem</i> .....	45
8.4 LASEROVÉ KALENÍ.....	47
8.4.1 <i>Laserové kalení s posuvem</i> .....	49
<b>9 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ.....</b>	<b>56</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b>	<b>58</b>

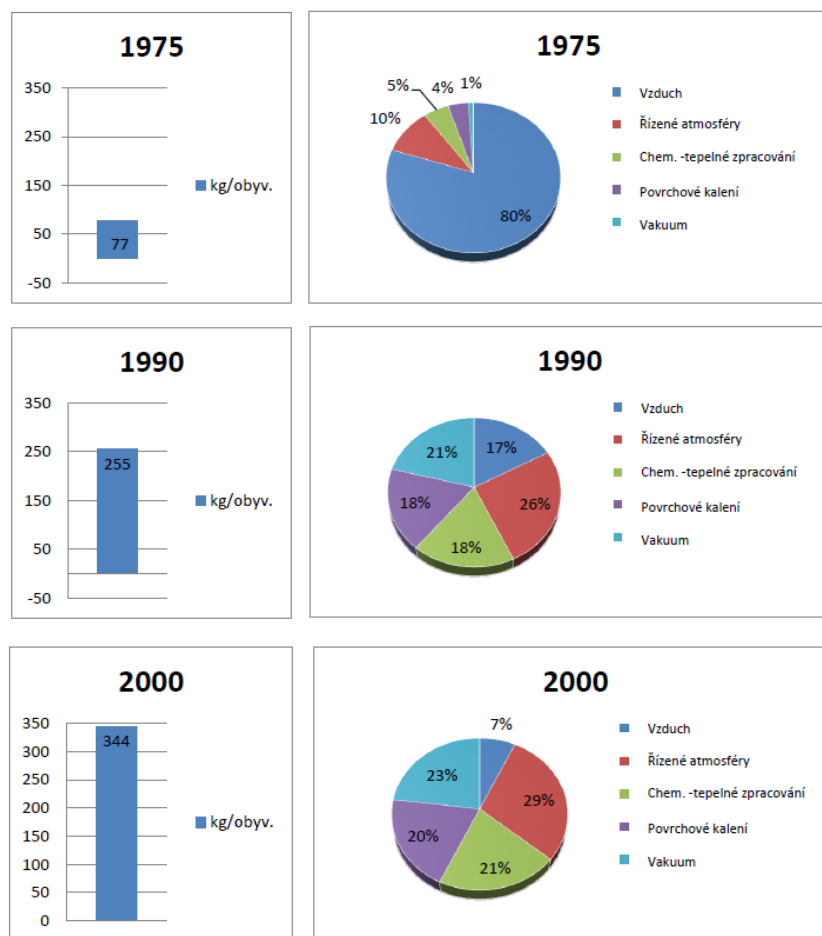
## Seznam symbolů a zkratek

$j_V$ .....	Tepelný tok
$t$ .....	Čas
$\lambda$ .....	Tepelná vodivost
$T$ .....	Teplota
$c$ .....	Měrná tepelná kapacita
$\rho$ .....	Hustota (měrná hmotnost)
$r$ .....	Radiální souřadnice
$Q'_V$ .....	Rychlost vzniku (spotřeby) vnitřního tepla ve výrobku
$\alpha_p$ .....	Součinitel přenosu tepla prouděním
$d_h$ .....	Hydraulický průměr prostoru
$v$ .....	Rychlost proudění
$\nu$ .....	Součinitel kinematické mechaniky
$\varepsilon$ .....	Relativní prodloužení
$E$ .....	Youngův modul pružnosti
$\sigma$ .....	Vnitřní pnutí
$R$ .....	Odpor vodiče
$i$ .....	Okamžitá hodnota proudu
$T$ .....	Doba průchodu proudu vodivým kanálem
$\rho$ .....	Rezistivita materiálu
$l$ .....	Délka vodiče
$S$ .....	Průřez vodiče
$Q_U$ .....	Teplo potřebné k ohřevu vsázky
$Q_Z$ .....	Tepelné ztráty okolí vsázky
$\omega$ .....	Úhlový kmitočet
$\mu_0$ .....	Permeabilita vakua ( $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$ )
$\mu_r$ .....	Relativní permeabilita



## 1 Úvod do tepelného zpracování

Hlavní částí tepelného zpracování kovů je především řízená změna teploty. Účelem je zejména dosažení požadovaných mechanických a technologických vlastností kovových materiálů. U tepelného zpracování dochází k vyžadovaným změnám vlastností použitého materiálu výrobků [7]. Díky správnému zvolení a provedení tepelného zpracování je možné vyrábět strojní zařízení lehčí a trvanlivější. Právě proto se tepelné zpracování stává významným faktorem ve strojírenské výrobě. Při tepelném zpracování nesmíme zapomenout na finanční náklady (podle statistik je podíl pracnosti 2 % a spotřeba energie cca 20 %). Proto je důležité nejprve pečlivě posoudit vhodnost a způsob tepelného zpracování. Je potřeba počítat s několika faktory, protože i když se zvýší výrobní náklady a energetická náročnost, dojde k mnohonásobné kompenzaci, neboť tyto náklady jsou vynahrazeny poklesem hmotnosti výrobku, možností změny konstrukčního řešení, zjednodušením technologického postupu, zvýšením užitkových vlastností, životností a spolehlivostí. Technické a ekonomické podmínky tepelného zpracování musí vycházet z vědeckých poznatků materiálových vlastností, z technického vývoje výrobních zařízení a také z provozních zkušeností. Na obr. 1.1 je vidět názorná ukázka využití různých typů tepelného zpracování a naznačení tendencí v průmyslově vyspělých zemích. Z grafu je zřetelně vidět výrazný pokles klasického tepelného zpracování za přístupu atmosféry a jeho nahrazení moderními metodami tepelného zpracování. U vývojových a provozních cílů je nutné dodržet požadované vlastnosti výrobku a také co největší snížení výrobních nákladů [1].



Obr. 1.1: Vývoj tepelného zpracování

## 1.1 Podmínky tepelného zpracování

### Dělení:

- *Vnější podmínky*

Při výrobě je důležité zajistit dosažení požadovaných vlastností materiálu i při opakovatelné výrobě a zároveň je důležité co nejvíce minimalizovat škodlivé jevy (např. změna rozměru výrobků, snížení kvality).

- *Vnitřní podmínky*

Je podstatné co nejvíce minimalizovat pracnost a náklady na výrobu, dobu cyklu, hodnotu zmetkovitosti, ekologickou zátěž na životní prostředí, naopak je snaha maximalizovat mechanizaci výroby a automatizace (co nejvíce vyloučit lidský faktor a tím dojde ke snížení chybovosti).

Jedna z technologií, díky které můžeme získat materiály vysokých technických parametrů a specifických fyzikálních vlastností je prášková metalurgie. Jedná se o technologii, při které jsou zhotovovány polotovary nebo hotové výrobky spojováním kovů nebo kovů s nekovy ve formě prášků pomocí působení tlaku a tepla (při teplotách nižších, než je teplota tavení alespoň jedné ze spojovaných složek). Využívá se v případech, kde není možné dané materiály zpracovat jinou technologií (spojování komponentů, které se spolu neslévají), kde je tato technologie hospodárnější než ostatní (při zpracování materiálů s vysokým bodem tavení), nebo kde je potřeba dosáhnout vysoké čistoty a zvláštní struktury materiálu. Mezi nevýhody práškové metalurgie patří vysoké náklady na nástroje a menší hutnost vyrobených materiálů (tím dochází i k menší pevnosti a houževnatosti). Její kořeny pocházejí již z afrických kmenů při zhotovování materiálů a zbraní. Rozvoj technologie se velice uplatnil také při druhé světové válce [1].

## 1.2 Výroba kovových prášků

V průmyslové výrobě má největší spotřebu strojírenský a automobilový průmysl (60 až 70 %). Pomocí práškové metalurgie se u většiny konstrukčních součástí snižuje spotřeba energie a zpracovatelské náklady až o 50 % v porovnání s třískovým obráběním.

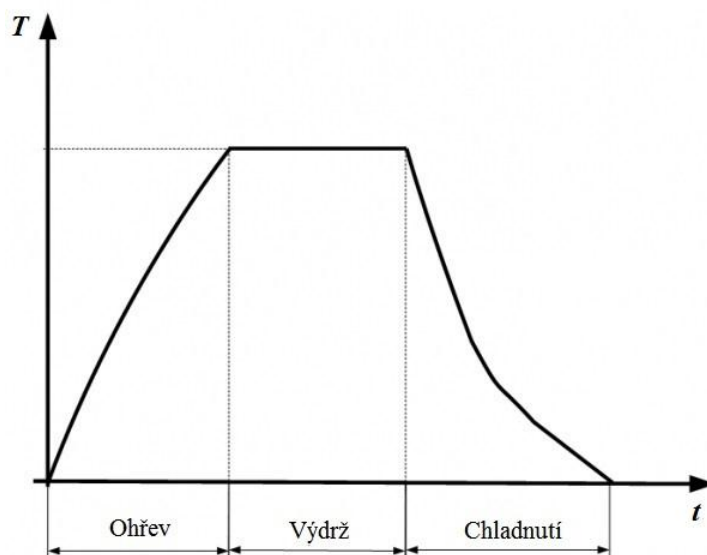
Výhody a využitelnost práškové metalurgie demonstruje také následující příklad z literatury [1]:

*„Vyrobení 1t strojních součástí z práškových ocelí ušetří 1,5t válcového materiálu, 2800 Kč na mzdách, 9t měrného paliva a 45000 Kč výrobních nákladů při úsporách na investicích. Kromě těchto ekonomických výhod nabízí prášková metalurgie výjimečné vlastnosti, jako je např. žáru-pevnost a otěruvzdornost, tedy výrobky s vysokou porézitou a výrobky tvořící přechod ke kompozitům, které pomocí jiných technologií není možné vyrobit. Do práškové metalurgie nepatří pouze výroba prášků, ale i jejich zhušťování (např. lisování) do konstrukčních materiálů, nebo součástí“.*

## 2 Ohřívání a ochlazování materiálu

Zpracovaný materiál podrobujeme tepelnému cyklu z důvodu dosažení potřebných vlastností.

Tyto cykly jsou znázorněny v následujícím obrázku.



Obr. 2.1: Diagram tepelného zpracování

Průběh tepelného zpracování se skládá z ohřevu na vhodnou teplotu, setrvání na této teplotě a následném ochlazení určitou rychlostí, tzn. požadované změny struktury a vlastností se dosáhnou řízenými změnami teploty. Tento postup je možné i vícekrát opakovat.

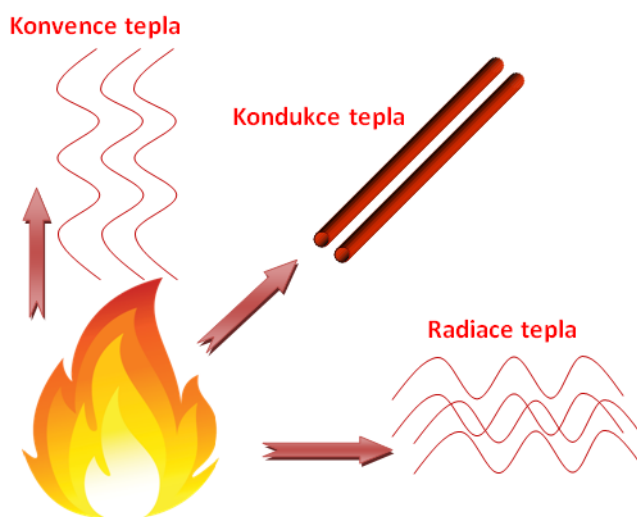
Rychlost ohřevu a průběh ohřevu závisí na daném účelu tepelného zpracování. V některých případech je potřeba dodržet pozvolný ohřev, aby v důsledku velkých rozdílů teplot nedocházelo v materiálu ke vzniku pnutí a k porušení jeho pevnosti. U případů, jako je například kalení ocelí, je potřeba dosáhnout velmi prudkého ohřevu kovu. K docílení tohoto prudkého ohřevu materiálu se využívá plamen. Časový interval prohřívání materiálu také závisí na účelu zpracování a na rozměrech daného materiálu.

Další důležitou část procesu tvoří rychlost ochlazování. Pokud se má zachovat rovnovážný stav materiálu, ochlazování probíhá pomalu. V ostatních případech je naopak potřeba dosáhnout prudkého ochlazení a tím dojde k vytvoření nových strukturálních složek se specifickými vlastnostmi. Také je možné, aby ohřívání i ochlazování materiálu probíhalo stupňovitě. Pomocí tepelnému zpracování tak dochází k hospodárnějšímu využití kovů [7].

## 3 Přenos tepla

### 3.1 Způsoby přenosu tepla

Způsoby přenosu tepla se rozlišují dle fyzikálních podstat dějů, pomocí kterých jsou realizovány. Rozlišujeme 3 druhy přenosu tepla, a to vedením, prouděním a zářením.



Obr. 3.1: Schéma přenosu tepla

### 3.2 Vedením (kondukcí)

Přenos tepla vedením probíhá ve spojitém látkovém prostředí. Stavební částice látky si navzájem předávají kinetickou energii neuspořádaných tepelných pohybů. Energie se přenáší z míst o vyšší teplotě na místa o nižší teplotě látky. Přenos tepla vedením probíhá v látkách pevných, kapalných i plynných [4].

Při přenosu tepla rozlišujeme dvě podmínky a to stacionární a nestacionární. U stacionárních podmínek je tepelný tok výrobku popsán Fourierovým zákonem.

$$j_V = \frac{1}{s} \cdot \frac{dQ}{dt} = -\lambda \cdot \text{grad}T \quad (3.1)$$

V nestacionárních podmínkách platí tato rovnice:

$$j_V = \frac{1}{c \cdot \rho} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \cdot \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{Q_V'}{c \cdot \rho}. \quad (3.2)$$

### 3.3 Prouděním (konvekcí)

U přenosu tepla pomocí proudění je opět předpokladem spojitě látkové prostředí. Probíhá pouze v kapalných a plynných látkách. K přenosu tepla dochází pomocí samovolného, nebo nuceného proudění ohřáté kapaliny či plynu. Dojde-li v místě ohřevu a místě ochlazení v tekutině k teplotnímu rozdílu, ohřívána a tedy lehčí část tekutiny stoupá při vytlačování ochlazené těžší části. V kapalinách a převážně v plynech převažuje přenos tepla pomocí proudění nad přenosem tepla pomocí vedení [4].

Proudění rozlišujeme na přirozené a nucené. Příčinou přirozeného proudění je pouze rozdíl teplot mezi povrchem tělesa a okolím. Při proudění nuceném na přenos tepla působí další vlivy (charakteristické je turbulentní proudění).

Při přenosu tepla pomocí proudění je tepelný tok z prostředí na výrobek určen Newtonovým zákonem.

$$j_{PV} = \alpha_P \cdot (T_P - T_{VP}) \quad (3.3)$$

Součinitel přenosu tepla prouděním závisí především na rychlosti pohybu látky a na druhu skupenství. K určení činitele přenosu tepla slouží kritéria, např. Nusseltovo

$$N_U = \frac{\alpha \cdot d_h}{\lambda} \quad (3.4)$$

a kritérium Reynoldsonovo (hydrodynamické)

$$N_U = \frac{v \cdot d_h}{\nu} \quad (3.5)$$

Pomocí těchto kritérií určíme přestup tepla prouděním z jednoduchého vztahu (viz. vztahy 3.6, 3.7, 3.8) [1].

Pro elektrické pece

$$Nu = 0,238 \cdot Re^{0,60} \quad Re \geq 1000 \quad (3.6)$$

$$Nu = 0,625 \cdot Re^{0,46} \quad Re \leq 1000 \quad (3.7)$$

Pro palivové pece

$$Nu = 0,032 \cdot Re^{0,80} \quad (3.8)$$

U přirozeného proudění má součinitel přenosu malé hodnoty, které jsou minimálně závislé na tvaru výrobku. Při nuceném proudění je přenos tepla závislý jak na rychlosti proudění, tak na gradientu teplot v nosiči energie a na počtu částic působících jako nosiče tepla.

Při přenosu tepla v kapalinách se jedná o výrazně složitější přenos než u plynů. Množství tepla je ovlivněno vytvořením ztuhlé vrstvy taveniny na povrchu studeného výrobku. V blízkosti teploty tavení používaných solí se součinitel pohybuje v rozmezí  $200 - 240 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$  a se zvyšujícím se přehřátím lázně lineárně stoupá [1].

### 3.4 Zářením (sáláním)

Přenos tepla zářením nevyžaduje spojitě látkové prostředí. Teplo se přenáší elektromagnetickým zářením, tedy stejným způsobem jakým se dostává teplo ze Slunce na povrch Země.

Všechna tělesa, která dosahují teplot vyšších než je 0 K, vysílají do okolí záření v podobě elektromagnetického vlnění. U tepelných záření elektromagnetické vlnění dosahuje vlnové délky v rozmezí  $0,2 - 20 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ . Pro teploty do  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  se toto záření stává pro lidské oko neviditelné [1].



## 4 Pnutí a deformace

Ve strojírenském průmyslu se můžeme setkat s pojmem vnitřní pnutí. Jedná se o pnutí, které vzniká ve výrobku při náhlých změnách teplot materiálu vlivem tepelné roztažnosti. Působením tohoto pnutí může dojít v materiálu ke vzniku mikrotrhlin a následně k porušení celého výrobku. K vnitřnímu pnutí dochází při intenzivním tváření za studena, obrábění, svařování, pájení, odlévání atd. Odolnost vůči náhlým změnám je ovlivněna právě koeficientem tepelné roztažnosti materiálu. Čím je hodnota tepelné roztažnosti nižší, tím dochází k nižšímu pnutí v materiálu a tím více je materiál schopen odolávat tepelným změnám.

Dle časového působení rozlišujeme dva druhy pnutí:

- *Dočasná*
- *Zbytková.*

K dočasnému vnitřnímu pnutí dochází, pokud trvá příčina, která jej způsobila. Příčinou většinou bývá nerovnoměrné teplotní pole mezi povrchovými a vnitřními částmi výrobku.

Ke zbytkovému pnutí dochází, pokud i po odstranění příčiny stále ve výrobku přetrvává část vnitřního pnutí. Zbytkové pnutí můžeme definovat jako napětí, které působí ve výrobku velmi dlouhou dobu i přes to, že všechny části již mají stejnou teplotu a na výrobek nepůsobí žádné vnější síly.

Podstata vnitřního pnutí plyne z Hookeova zákona

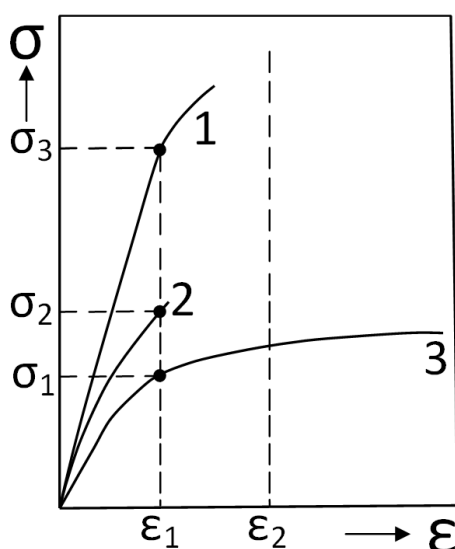
$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (4.1)$$

kde  $\sigma$  představuje vnitřní pnutí,  $E$  je Youngův modul pružnosti a  $\varepsilon$  znázorňuje relativní prodloužení.

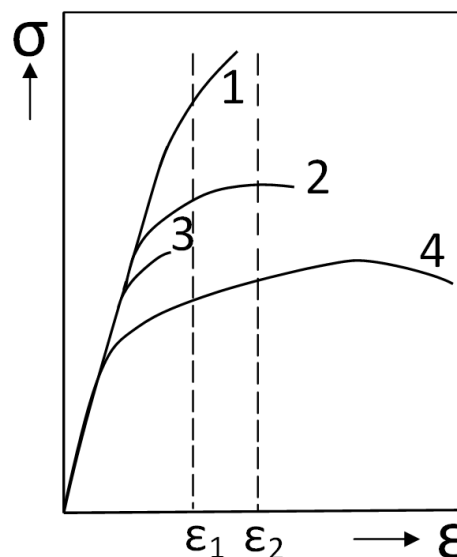
Pokud porovnáme 3 rozdílné materiály (viz obr. 4.1) je vidět, že velikost vnitřního pnutí je určena hodnotami modulu pružnosti  $E_1$ ,  $E_2$  a  $E_3$ . Pokud tyto 3 materiály porovnáme v hodnotě relativního prodloužení  $\varepsilon_1$ , dostaneme se k závěru, že vnitřní

pnutí v šedé litině je přibližně poloviční a u plastického hliníku je tato hodnota asi třetinová oproti oceli. Jestliže relativní prodloužení dosáhne hodnoty  $\varepsilon_2$ , poté u materiálů s vyšší pevností dochází ke vzniku trhlin (lomu). U materiálu s nižší pevností, což je v našem případě hliník, k tomuto poškození nedochází.

Z tohoto pohledu si také porovnáme některé druhy tepelných zpracování ocelí. Z obr. 4.2 je vidět, že při dosažení relativního prodloužení  $\varepsilon_1$  dojde k poškození pouze v případě kalené oceli z vysoké teploty. Pokud dojde k nárůstu prodloužení na hodnotu  $\varepsilon_2$ , vzniknou trhliny i u oceli, která byla zakalená správným způsobem. U popouštění a žihání tedy vzniká větší plastická schopnost a dochází ke snížení náchylnosti materiálu na vznik trhlin [1].



Obr. 4.1: 1-ocel, 2-šedá litina, 3-hliník



Obr. 4.2: 1-kalená ocel, 2-popouštěná, 3-kalená z vysoké teploty, 4-žihaná

Stejně jako pnutí, tak i deformace výrobků patří mezi nežádoucí změny. Tyto změny se snažíme co nejvíce minimalizovat.

Dělíme je na změny:

- Objemové
- Tvarové.

## 5 Tepelné zdroje

Abychom mohli vyráběnou součást zahřát na požadovanou hodnotu je zapotřebí získat tepelnou energii. V současné době se používají především moderní metody k získání této energie z důvodu dosažení teploty v co nejkratším časovém intervalu. Mezi moderní zdroje patří např. laser či elektronový paprsek. V praxi samozřejmě stále naleznou uplatnění také klasické konvekční metody ohřevu jako je např. ohřev plamenem.

Tab. 5.1: Srovnání různých druhů ohřívání materiálu [5]

Zdroj tepelné energie	Maximální výkon [W/cm <sup>2</sup> ]
Sluneční světlo	5
Indukční ohřev	10 <sup>2</sup>
Elektrický oblouk	10 <sup>3</sup>
Laserové záření	10 <sup>8</sup>
Elektronové záření	5·10 <sup>8</sup>

Ohřívání pecí pomocí pevných paliv jako je např. hnědé a černé uhlí se v dnešní době již nevyužívají z důvodu nízké výhřevnosti a složité regulace. Naopak je tomu u kapalných a plyných paliv, kde je možné dosáhnout výrazně přesnější regulace teploty, jednoduché obsluhy, čistšího provozu či snadnějšího skladování potřebných paliv. Mezi neekonomičtější plyné palivo patří zemní plyn z důvodu vysoké výhřevnosti a nižší ceny než má např. svítiplyn. Dalším a nejpoužívanějším způsobem je ohřívání součásti pomocí elektrické energie.

Mezi výhody elektrického ohřevu patří především [6]:

- vysoká účinnost
- menší investiční náročnost (ve srovnání s plynem či naftou)
- malé náklady na údržbu
- malé rozměry
- výhodnost z ekologického hlediska (nedochází ke špině, prachu)
- lépe se reguluje
- bezpečnější provoz (nedochází ke vzniku ohně).

Naopak mezi nevýhody patří:

- vyšší cena elektrické energie.

V následující části si popíšeme druhy elektrotepelných zařízení, pomocí kterých dochází k přeměně elektrické energie v teplo.

## 5.1 Odporový ohřev

U odporového ohřevu dochází ke vzniku tepla pomocí proudu procházejícího vodivým prostředím. Velikost energie lze určit dle Jouleova zákona:

$$Q = R \cdot \int_0^T i^2 dt. \quad (5.1)$$

Rozeznáváme dva druhy odporového ohřevu.

### 5.1.1 Přímý odporový ohřev

U přímého odporového vodiče se teplo vytváří vlivem přímého průchodu proudu ohřívaným materiálem (vsázkou), nebo elektricky vodivou kapalinou (elektrolytem).

Dle Jouleova zákona je množství tepla  $Q$  přímo úměrné velikosti odporu vodiče  $R$  a druhé mocnině proudu  $I$  za čas  $t$ :

$$Q = P \cdot t = R \cdot I^2 \cdot t. \quad (5.2)$$

Velikost odporu vodiče se spočte ze vztahu:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}. \quad (5.3)$$

Odpor  $R$  je tedy závislý na rezistivitě materiálu  $\rho$ , délce vodiče  $l$  a průřezu vodiče  $S$ . Čím větší bude rezistivita materiálu  $\rho$ , tím menší bude vodivost dané látky.

Odpor je také závislý na teplotě a určí se pomocí vztahu:

$$R_\rho = R \cdot (1 + \alpha \Delta T). \quad (5.4)$$

Energetickou bilanci nám pomůže určit vztah pro ohřev:

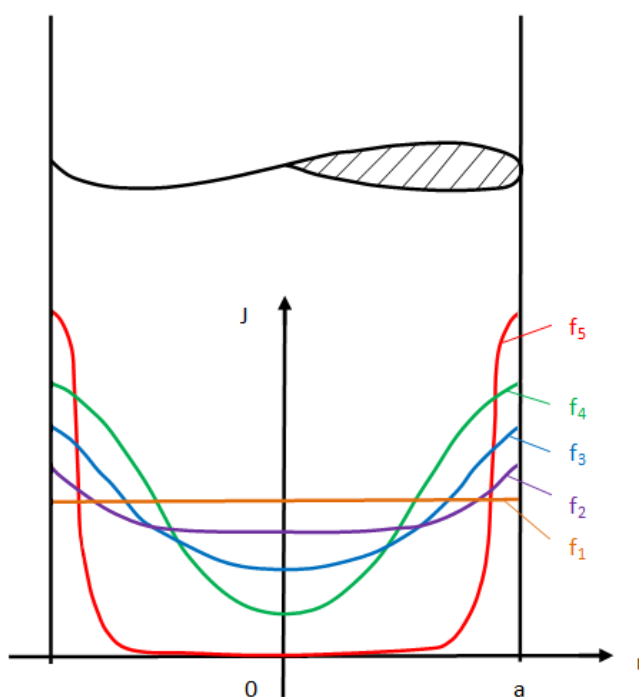
$$Q = Q_U + Q_Z. \quad (5.5)$$

Pro určení výkonu slouží rovnice:

$$P = \frac{dQ}{dt}. \quad (5.6)$$

Při průchodu střídavého proudu dochází ke skin efektu. Jedná se o povrchový jev, při kterém se proudová hustota ve směru od středu k povrchu vodiče exponenciálně zvyšuje. Nejvyšší hodnota proudové hustoty nastává tedy na povrchu vodiče. Se skin efektem blízce souvisí také hloubka vniku. Hloubka vniku určuje vzdálenost od povrchu materiálu, kde proudová hustota klesne na 37%. Určí se ze vztahu:

$$\delta = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho}{\omega \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}}. \quad (5.7)$$



Obr. 5.1: Rozložení proudové hustoty ve vodiči

Na obrázku 5.1 je znázorněno rozložení amplitudy proudové hustoty pro stejnosměrný proud, kde povrchový jev nenastane a pro harmonicky proměnný proud různých hodnot frekvencí. Pro vysoké hodnoty frekvencí je povrchový jev výrazný.

Procházející proud se koncentruje především do tenké vrstvy pod povrchem vodiče, zatímco středem vodiče tento proud téměř neprochází.

V praxi nalezneme uplatnění přímého odporového ohřevu např. při ohřevu dlouhých kovových tyčí, u termické elektrolýzy (elektrodový ohřev vody), u zpracování plastů, tepelných obrábění ocelí atd.

### 5.1.2 Nepřímý odporový ohřev

U zařízení s nepřímým odporovým ohřevem hrají významnou roli především topné články, které se nacházejí přímo v prostoru pece. Vlivem těchto článků vzniká teplo, které se přenáší pomocí sálání, proudění či případně vedení do vsázky.

## 5.2 Indukční ohřev

Indukční ohřev je možné využívat jen pro elektricky vodivé materiály, neboť jen u elektricky vodivých materiálů se po vložení do magnetického pole indukují vířivé proudy. Vzniklé vířivé proudy zapříčiní následné zahřívání materiálu. Indukční ohřev bývá dle principu přirovnáván k transformátoru zapojeného nakrátko. Primární obvod představuje vinutá cívka induktoru s určitým počtem závitů a sekundární obvod představuje ohřívané těleso. Zahřívané těleso se může nacházet buď v dutině induktoru, nebo v jeho blízkosti. Hloubku zakalené části určuje vztah rovnice hloubky vniku (5.7) uvedený v předchozí kapitole.

Nyní si popíšeme různé druhy využití indukčního ohřevu.

U indukčního ohřevu, který se využívá pro povrchové kalení, je podstatné, aby se prohřála jen tenká povrchová vrstva. To se docílí zvolením vhodného tvaru induktoru, kmitočtu a dobou ohřevu.

Pro indukční ohřev, který se využívá na tváření, je potřeba dosažení rovnoměrného ohřevu v celém materiálu. Rovnoměrného ohřevu se dá dosáhnout stejným způsobem jako v předchozím případě a to tedy správným zvolením tvaru induktoru, kmitočtu a dobou ohřevu.

Další možností je indukční pájení. Indukční pájení se provádí tak, že mezi dvě části pájeného materiálu se vloží pájka. Poté se části přitlačí k sobě a následně vloží do induktoru, kde dojde k roztavení pájky. Tento druh pájení se využívá pro pájení vývodů na vinutí generátorů [3].

U indukční plazmy dochází pomocí vnějšího zdroje k tzv. ionizaci plynu. K ionizaci se používá určitý druh plynu, nejčastěji argon. Plyn se stane vodivým a ve vodivém stavu se udržuje pomocí indukčního ohřevu. Tato metoda se využívá v práškové metalurgii.

Další možností jsou kelímkové a kanálkové indukční pece. Tyto pece se používají k roztavení různých druhů kovů. Mezi výhody této metody patří především možnost vytvořit čistší materiál.

Výhodou indukčního kalení se stává samostatnost výrobku, který není spojen s žádnou jinou částí soustavy.

### **5.3 Elektrické teplo obloukové**

K elektrickému oblouku dochází mezi dvěma elektrodami, které jsou napájeny stejnosměrným či střídavým elektrickým proudem. Při dotyku elektrod začne mezi elektrodami protékat elektrický proud. Po zvýšení vzdálenosti mezi oběma elektrodami dojde ke vzniku elektrického oblouku. Tento oblouk hoří v parách materiálu elektrod a v částicích vzduchu. Tyto plyny jsou za normálních podmínek elektricky nevodivé a až po ionizaci se stávají vodivými. Elektrody patří mezi důležité části zařízení, neboť ovlivňují provozní náklady. Teplota oblouku může dosahovat hodnot až 5000 K.

Tato technologie se využívá především v průmyslu při obloukovém svařování a v obloukových pecích.

## 5.4 Plazmový ohřev

U plazmových zařízení dochází k přeměně elektrické energie na teplo v hořícím oblouku v ionizovaném prostředí. Při plazmovém ohřevu dojde k termoelektrické ionizaci, kde se sráží částice atomů, iontů a elektronů. Vlivem těchto srážek se uvolňuje energie, která se přemění v teplo. U plazmového ohřevu se využívání nízkoteplotního plazmatu o teplotě 2000 K až 30000 K. Plazmové hořáky se používají pro svařování a řezání kovů. Výhodou plazmového ohřevu jsou nižší provozní náklady a vyšší kvalita taveného materiálu [1].

## 5.5 Elektronový ohřev

U elektronového zařízení dochází k přeměně elektrické energie na teplo vlivem dopadu urychlených elektronů na výrobek, kde tyto urychlené elektrony odevzdávají svoji kinetickou energii. Celý proces probíhá ve vakuu, aby nedocházelo k případnému brzdění elektronů. Velikost urychlovaného napětí dosahuje k hodnotám až 100 kV. Velikost hloubky, kterou elektrony proniknou pod povrch kovu činí pouze několik mikrometrů. Teplo se tedy dále šíří pomocí vedení.

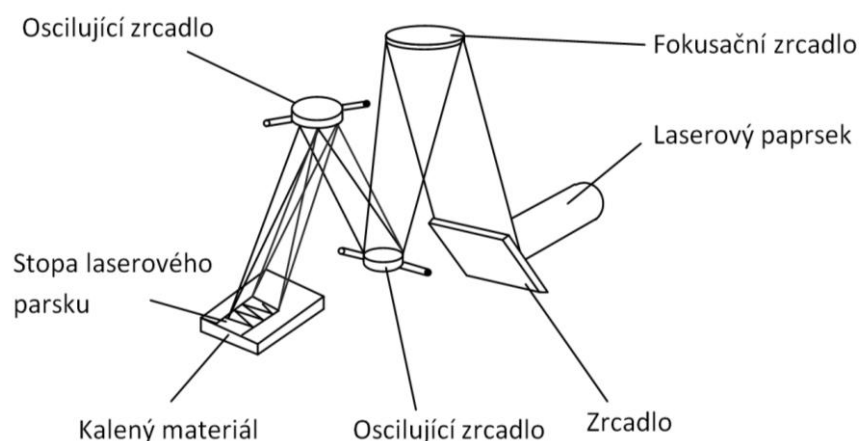
Elektronový ohřev se využívá pro svařování, slinování a tepelné zpracování. Mezi přednosti elektronového ohřevu patří možnost tavení těžkovitelných materiálů a dosažení vysoké čistoty tavení [1].

## 5.6 Laserový ohřev

Laser je kvantový generátor elektromagnetického vlnění o vlnové délce ve spektru viditelného světla. K ohřívání materiálu dochází pomocí pohlcování laserových paprsků, jejichž energie se mění absorpcí v teplo. Vlastní absorpce záření je nepřímo úměrná elektrické vodivosti. Při laserovém ohřevu se tedy lépe zahřívá ocel oproti mědi, neboť měď je elektricky vodivějším materiálem. Hloubka vniku plynového laseru činí pouze 0,01 až 0,1  $\mu\text{m}$ . Následně dojde k vytvoření vysokého teplotního gradientu a teplo se poté šíří materiálem pomocí vedení. Pokud bude paprsek během zahřívání stát na stejné pozici, dojde k ohřevu pouze malé plošky, proto je zapotřebí využít oscilace paprsku či pohyb výrobku. Při použití jedné z těchto metod dosáhneme zahřátí celé plochy výrobku.



Laserový ohřev se využívá k mechanicko-tepelným a chemicko-tepelným zpracování jako je například pokrývání povrchového výrobku vrstvami dalších druhů materiálu. Mezi výhody laserového ohřevu patří několik následujících vlastností. Pro ohřev postačuje poměrně malé množství přiváděného tepla při porovnání s klasickými způsoby zpracování. Laserový ohřev se dá poměrně dobře regulovat a využívat pro lokální ohřev. K ohřátí povrchové vrstvy do několika desetin milimetru pod povrch ohřívaného materiálu dochází velice rychlým způsobem. Tato malá vrstva může být rychlým způsobem zchlazená díky vedení tepla uvnitř materiálu. Naopak mezi nevýhody patří relativně vysoké pořizovací náklady a nízká energetická účinnost.



Obr. 5.2: Schéma vytvoření stopy laserového paprsku

Laserový ohřev se využívá v lékařství, ve vojenské technice či v průmyslu. V průmyslu se používá například pro povrchové kalení, řezání, vrtání, svařování, navařování tenkých vrstev [1].

## 6 Druhy tepelného zpracování

Při tepelném zpracování dochází k termickému, termochemickému či termomechanickému působení, kde jeho cílem je získat optimální vlastnosti výsledného produktu. Pro železo a jeho slitiny se nejvíce využívají následující druhy tepelného zpracování.

### 6.1 Žihání

Žiháním nazýváme postup, při kterém je součástka zahřívána na požadovanou teplotu, poté následuje výdrž na této teplotě a následně pomalé ochlazení součástky [3].

Rozlišujeme dva druhy žihání a to s překrystalizací a bez překrystalizace. Tyto dva druhy se liší ve velikosti žihací teploty. U žihání bez překrystalizace dosahuje teplota žihání nižší hodnoty než je tomu u žihání s překrystalizací. Do žihání bez překrystalizace patří zejména rekrystalizační žihání, žihání na měkko či žihání k odstranění vnitřního pnutí. Naopak do žihání s překrystalizací patří především normalizační žihání a homogenizační žihání.

Rekrystalizační žihání se využívá k obnovení tvárných vlastností kovu po tváření za studena. Postup se skládá ze zahřátí materiálu na teplotu 550 – 700 °C, následuje krátká výdrž na této teplotě a ochlazování. Využívá se zejména u nízkouhlíkových ocelí s dobrou tváritelností [2].

U žihání na měkko dochází ke snížení tvrdosti a tím k získání lepší obrobiteľnosti za studena. Také je cílem dosáhnout větší homogenizace struktury.

Při žihání s překrystalizací dochází k přeměně nazývané austenitizace. Jedná se o přeměnu feritu a perlitu na austenit.

Normalizační žihání se využívá především k dosažení jemnozrnné struktury, která se skládá ze směsi feritu a perlitu. Používá se tedy nejčastěji u odlitků, výkovků či výlisků za studena. Normalizační žihání slouží nejen jako příprava pro další tepelné zpracování, ale i jako konečná fáze tepelného namáhání pro méně namáhané součásti.

Účelem homogenizačního žíhání je co nejvíce vyrovnat nestejnosemnost chemického složení pomocí difúze. Nejvíce se využívá u velkých odlitků či výkovků z legovaných slitin.

## 6.2 Kalení

Účelem kalení je docílit zvýšení tvrdosti oceli pomocí vytvoření nerovnovážné struktury. Postup kalení spočívá v ohřátí součásti na austenizační teplotu, po výdrži na této teplotě následuje ochlazení vysokou rychlostí. Při ochlazování mohou nastat tři druhy přeměn austenitu. Tyto přeměny jsou závislé především na rychlosti ochlazování. Přeměna s nízkou rychlostí ochlazení se nazývá perlitická, se střední rychlostí bainitická a s vysokou rychlostí ochlazení martenzitická.

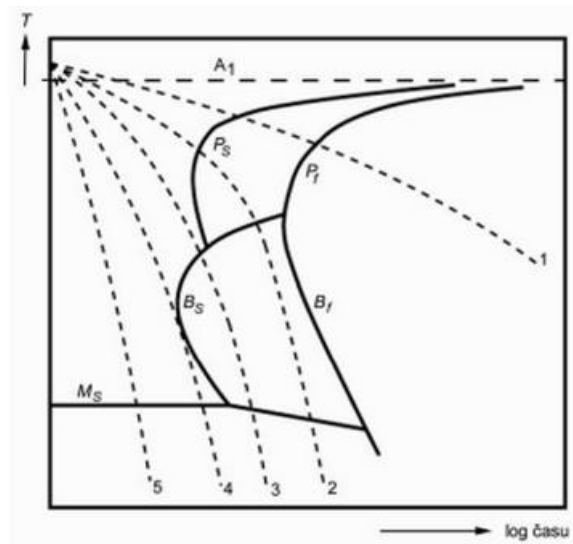
### 6.2.1 Kalicí teplota

Abychom dosáhli požadovaných vlastností oceli, je potřeba nejprve zvolit hodnotu kalicí teploty. Velikost této teploty je závislá především na obsahu uhlíku v oceli. Kalení probíhá nejčastěji z teplot 30 – 50 °C nad Austenizační teplotu. V tomto rozmezí je výchozí struktura tvořena směsí austenitu a cementitu, díky kterému docílíme požadované tvrdosti zakalené oceli. Při použití vyšších teplot by výchozí austenit obsahoval příliš velké množství uhlíku a nedošlo by k docílení požadované tvrdosti kaleného materiálu [2].

### 6.2.2 Režimy ochlazování

Základní martenzitické kalení je jedním z nejjednodušších režimů ochlazování. Při tomto kalení je předmět ponořen do intenzivně ochlazujícího kalicího média.

Dalším druhem je lomené kalení, při kterém je předmět při určité teplotě vyjmut z kalicího média, jako je např. voda a následně vložen do chladicího média s nižší rychlostí ochlazování jako je např. olej. Ve druhém médiu dojde k martenzitické přeměně. Tento druh kalení se využívá především u složitějších součástí a mezi jeho největší výhodu patří nižší hodnota vnitřního pnutí.



Obr. 6.1: Diagram rozpadu austenitu [2]

## 7 Srovnání principů povrchového kalení

Smyslem povrchového kalení je docílit požadované tvrdosti povrchové vrstvy při zachování houževnatého jádra kaleného materiálu, jak jsme si již uvedli v předchozích kapitolách. Také jsme si uvedli, že důležitou roli v procesu kalení hraje rychlost ohřevu a následného ochlazení. Hloubka zakalené vrstvy závisí na tepelném spádu. K tepelnému spádu dochází, pokud je rychlost ohřívání kaleného předmětu vyšší než rychlost, kterou se teplo odvádí směrem k jádru součásti. Kalicí teplota musí dosahovat výrazně vyšších hodnot než je tomu u ohřevu v peci. To je způsobeno právě vysokou rychlostí ohřevu a krátké výdrži na této teplotě. Oblast kalicích teplot se pohybuje v rozmezí 1000 – 1500 °C a oblast podkalení nastává od 800 °C do 1000 °C. Hloubka prokalení dosahuje obvykle hodnot 0,5 – 3 mm. Pouze v ojedinělých případech se hloubka prokalení požaduje mimo toto rozmezí. Jedním z důležitých faktorů je homogenita tloušťky kalené vrstvy, a aby nastal pozvolný přechod směrem k jádru předmětu.

V následující části se seznámíme s druhy povrchového kalení. Povrchové kalení se dělí dle způsobu, jakým je teplo ke kalené součásti přiváděno. Dělí se tedy na jednorázové kalení, přerušované kalení a na postupné kalení.

Jednorázové kalení patří mezi nejjednodušší metodu. Během celého procesu je zdroj i kalená část v klidové poloze. Ta část, u které má dojít ke kalení se nejprve celá najednou ohřeje a když dosáhne kalicí teploty, celá se zakalí. Ochlazování se provádí zejména sprchou či ponorem do lázně. Pomocí této metody je možné kalit vnitřní i vnější plochy různých tvarů.

U přerušovaného kalení zdroj tepla ohřívá pouze určitou část kaleného výrobku. Pro ohřátí celé plochy je zapotřebí pohyb zdroje či kaleného výrobku. Pokud výrobek dosáhne na celém povrchu kalicí teploty, dochází ke stejnému ochlazování jako u jednorázového kalení.

U postupného kalení dochází k postupnému zahřívání výrobku na kalicí teplotu a zahřátá vrstva se postupně ochlazuje. Dle zdroje a způsobu ohřevu se povrchové kalení dělí na kalení plamenem, indukční povrchové kalení, kalení v lázních a kalení energetickými zdroji.

Kalení plamenem patří mezi nejstarší metody. V dnešní době se příliš nevyužívá z důvodu menší přesnosti lokalizace kalení. Jako zdroj se nejčastěji využívá kombinace kyslíku a acetylenového plynu z důvodu vysoké rychlosti hoření. Koncovky hořáků se nejčastěji vyrábějí z mědi, neboť měď výborně odvádí teplo a tím nedochází k opálení hubic. Při použití hubic z jiného materiálu je potřeba zajistit chlazení. Při porovnání s indukčním kalením dosahuje rychlost ohřevu nižších hodnot a naopak hloubka zakalené vrstvy dosahuje vyšších hodnot. Nevýhodou této metody je nutnost pracovat s hořlavými plyny. Mezi výrazné výhody patří nižší pořizovací náklady a následné náklady na údržbu.

Povrchové kalení v lázních patří mezi méně využívané způsoby kalení. U kaleného materiálu dochází k prudkému ohřevu nejčastěji v solných lázních či v roztavených kovech. Teplota kalení se pohybuje v rozmezí 1100 až 1200 °C. Hloubka zakalené vrstvy je závislá na čase, který výrobek stráví v lázni. Nevýhoda této metody nastává ve větším prokalení výrobku, zejména na jeho hranách.

Povrchové kalení pomocí indukčního ohřevu nastává díky vířivým proudům o určité frekvenci. Velikost je dána plochou induktoru, tloušťka závisí na frekvenci. Pokud bychom chtěli docílit menší tloušťky zakalené vrstvy, museli bychom buď zvýšit frekvenci proudu, nebo zvýšit výkon induktoru. Zvýšení výkonu by tedy zapříčinilo zkrácení doby ohřevu. Indukční kalení se dělí na několik částí z hlediska tvaru induktoru. Mezi tyto části patří induktor obepínající kalenou součást z vnější strany, induktor vložený do dutiny kalené části či induktor přiložený ke kalené ploše. Induktor se může skládat z jednoho či více závitů. Mezi nevýhodu indukčního kalení patří zejména vysoké investiční náklady či nezbytné zhotovení induktorů pro různé výrobky. Tato nevýhoda samozřejmě částečně odpadá při velké sériové výrobě.

Kalení pomocí laserového paprsku patří mezi moderní a rychlé metody kalení. Výhodou laserového kalení je právě zejména možnost velmi rychlého dosažení požadované hodnoty kalící teploty v relativně malé povrchové vrstvě dané součásti. U laserového kalení není potřeba chladicí médium, neboť přivedené teplo se velice rychle odvádí směrem k jádru výrobku. Velikost hloubky kalené vrstvy je závislá na několika faktorech. Je jím zejména měrná energie dodávaná laserovým paprskem a rychlost pohybu paprsku. Povrchové kalení laserem se využívá pro výrobky s ostrými hranami a nejrůznějšími tvary. Mezi nevýhody patří vysoké náklady a nutnost zamezení, aby nedošlo k možnému styku záření laserového paprsku s lidskou osobou [1].

Mezi dnes nejčastěji používané principy povrchového kalení patří tedy především laserové a indukční kalení. Proto si právě tyto dva způsoby v následující kapitole mezi sebou srovnáme.

## 7.1 Indukční kalení:

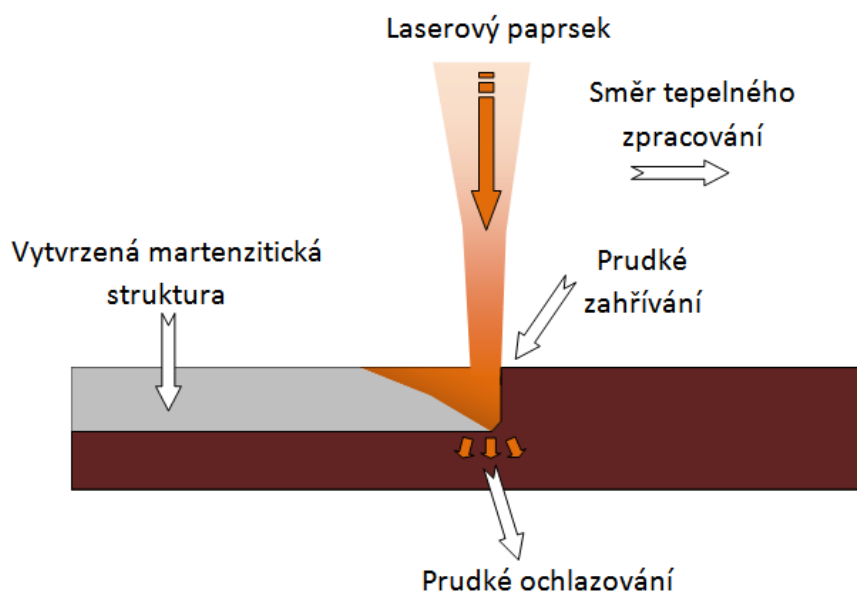
Induktor může být napájen proudem dosahujících až několik kA o středním či vysokém kmitočtu. Střední kmitočet se nachází v rozmezí 3 – 50 kHz a vysoký kmitočet 50 – 500 kHz. Tento kmitočet je generován ze středofrekvenčního či vysokofrekvenčního generátoru.

Výhody [10]:

- *Vysoká hustota výkonu a rychlost ohřevu*
- *Dobré řízení teploty kovu*
- *Relativně přesné určení ohříváných zón*
- *Jednoduchost činnosti*
- *Dobrá účinnost*
- *Minimální vliv na životní prostředí*
- *Není zapotřebí kontakt mezi ohříváním výrobkem a induktorem*

## 7.2 Laserové kalení:

Laserové kalení se využívá nejčastěji u feromagnetických materiálů (ocelí a litin s podílem C > 0,2 %). V dnešní době je možné díky výkonových laserů docílit rychlého a kvalitního tepelného zpracování. Laserové kalení spočívá v rychlém ohřevu povrchu materiálu, krátké výdrži na dané teplotě a následně strmém ochlazení vlivem tepelné vodivosti materiálu. Proto se pomocí laserového paprsku intenzivně zahřeje materiál těsně pod bod tání (cca 900 – 1400 °C). Když se dosáhne této požadované teploty, začne se laser posouvat ve směru posuvu a následně bude ohřívat další část materiálu. Vlivem dosažení vysoké teploty dochází k austenitizaci, kde atomy uhlíku v mřížce kovového materiálu změni svoji původní polohu a následně dojde k samovolnému ochlazení horké vrstvy pomocí okolního materiálu. Tímto prudkým ochlazením se mřížka nedokáže vrátit zpět do původní polohy a tak vzniká kovová struktura o vysoké tvrdosti zvaná martenzit. Takto docílíme vysoké tvrdosti povrchu materiálu, aniž bychom ztratili houževnaté vlastnosti jádra [9].



Obr. 7.1: Princip laserového kalení



## Výhody:

- *lokální kalení na požadované místo*
- *možnost řízení hloubky prokalení*
- *schopnost on-line regulace teploty pomocí pyrometru umístěném v optice*
- *vysoká kvalita, rychlost a stabilita*
- *okolní materiál je minimálně tepelně zatěžován*
- *dochází k minimální deformaci*
- *absence povrchových trhlin*
- *nízká hodnota oxidace povrchu*
- *možnost zpracování libovolné geometrie.*

## Nevýhody:

- *není možné kalení otvorů a vnitřních průměrů pouzder, neboť nelze do nich posvítit paprskem*
- *efekt samoochlazování u malých dílců, je potřeba materiál složitým způsobem dochlazovat.*

## V praxi se kalí nejčastěji tyto druhy součástí:

- *různé nástroje*
- *ozubená kola*
- *vodicí plochy*
- *části převodovek*
- *hřídele*
- *lopatky turbín*
- *kladky*
- *různé formy*
- *kontejnery pro vyhořelé články jaderného paliva.*

## 8 Simulace v programu Agros2D

### 8.1 Seznámení s programem Agros2D

Program Agros2D je univerzální aplikace, která je určena pro řešení fyzikálních polí. V dnešní době je obtížné si představit vývoj nového zařízení bez předem provedených simulací. Díky simulacím tohoto druhu je možné vývoj podstatně zlevnit a zkvalitnit. Příkladem je tepelná izolace budov, které jsou díky možnosti výpočtu teplotního pole ve zdivu efektivněji uloženy a podstatně šetří finanční náklady.

Agros2D umožňuje řešení v kartézském a osově symetrickém uspořádání. V programu je možné využít analýzy ustáleného stavu, harmonické analýzy či analýzy přechodného děje [8].

### 8.2 Simulace indukčního ohřevu

Provedli jsme simulaci indukčního kalení pro různé druhy materiálu, které mezi sebou porovnáme. V následující části práce pro indukční kalení jsou hodnoty proudu uvedené jen pro jeden závit. Simulace byla provedena se 3 závity, a tedy celkový proud induktoru činí trojnásobek uvedeného proudu.

Zvolené hodnoty:  $f = 15 \text{ kHz}$ ,  $I_L = 1 \text{ kA}$

Výpočet hloubky vniku pro měď:

$$\delta = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho}{\omega \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 16,9 \cdot 10^{-9}}{2 \cdot \pi \cdot 15000 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,99999}} = 0,534 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (8.1)$$

$$= 0,534 \text{ mm.}$$

Výpočet hloubky vniku pro hliník:

$$= \sqrt{\frac{2 \cdot \rho}{\omega \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 26,7 \cdot 10^{-9}}{2 \cdot \pi \cdot 15000 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1,000023}} = 0,671 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (8.2)$$

$$= 0,671 \text{ mm.}$$

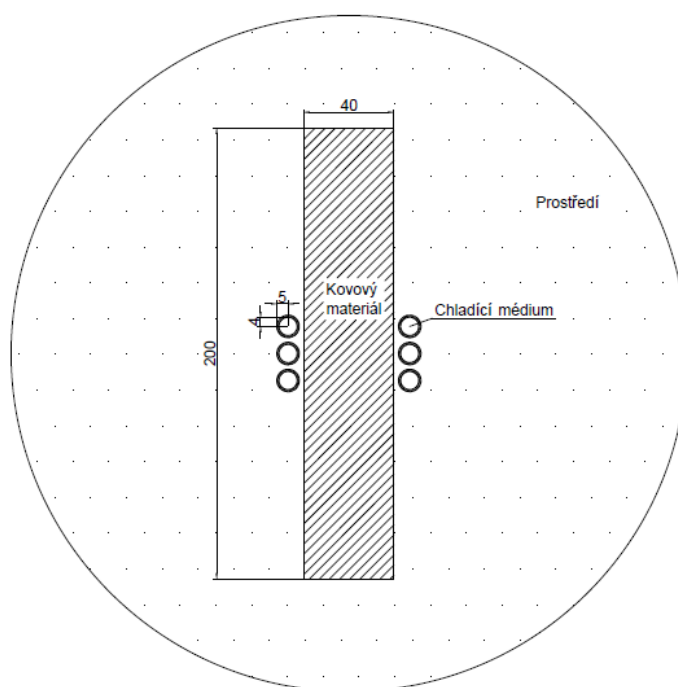
Výpočet hloubky vniku pro železo:

$$= \sqrt{\frac{2 \cdot \rho}{\omega \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 99,6 \cdot 10^{-9}}{2 \cdot \pi \cdot 15000 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1000}} = 0,41 \cdot 10^{-6} \text{ m} \quad (8.3)$$

$$= 41 \cdot 10^{-3} \text{ mm.}$$

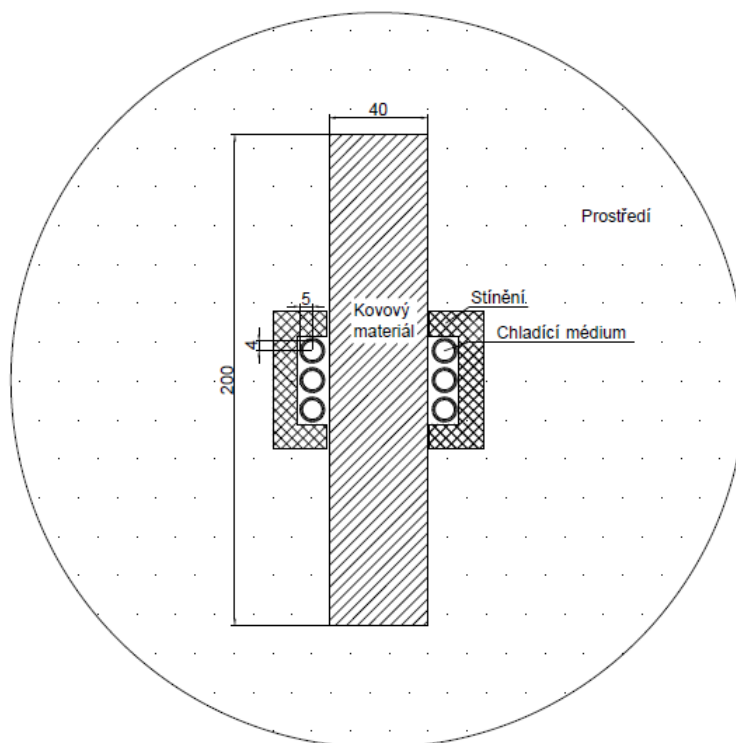
### 8.3 Schéma indukčního kalení

Účelem povrchového kalení je dosažení vysoké tvrdosti na povrchu při zachování houževnatého jádra. Ohřev povrchu na kalicí teplotu je nutné provádět vyšší rychlostí, než jakou se přivedené teplo odvádí do středu materiálu. Proto se používá indukční ohřev. Střídavý elektrický proud prochází induktorem, kterým je nejčastěji měděná trubka ve tvaru závitu vnitřně chlazená vodou. Přenos energie z induktoru do ohřívaného předmětu zprostředkuje elektromagnetické pole. Ohřátá vrstva je tím menší, čím vyšší je frekvence proudu. Okamžitým ochlazením nadkritickou rychlostí vznikne martenzit jen v austenitizované povrchové vrstvě a jádro výrobku se nezakalí. Obvykle se povrchově kalí uhlíkové oceli. Vysoká tvrdost na povrchu zajišťuje i zvýšenou ořezuvzdornost čehož se využívá při výrobě ozubených kol a čepů.



Obr. 8.1: Schéma indukčního kalení

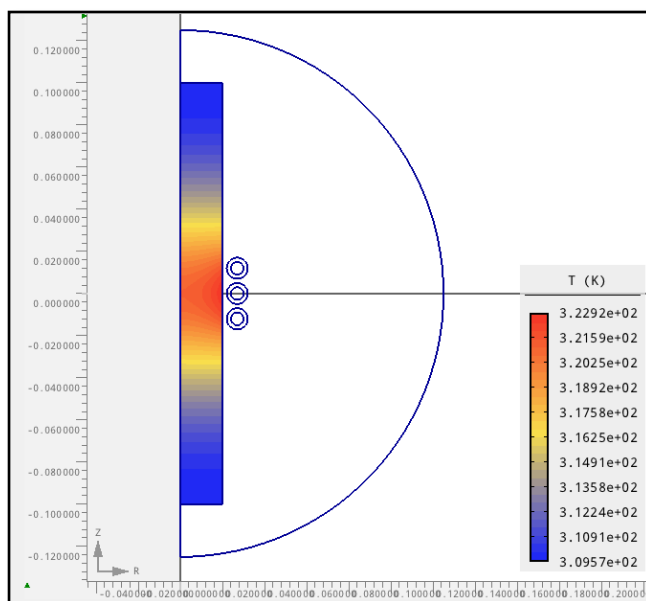
Následující obrázek je oproti předchozímu doplněn o stínění. Jedná se o část, díky které lze docílit efektivnějšího využití energie. Pomocí stínění omezíme rozptylový magnetický tok a cíleně tak zvýšíme intenzitu ohřevu.



Obr. 8.2: Schéma indukčního kalení se stíněním

### 8.3.1 Znázornění teplotní pole

Na následujícím obrázku je vidět, jakým způsobem se šíří teplo materiálem. Nejvyšší hodnota teploty vzniká na povrchu kaleného materiálu v ose prostředního závitu induktoru.



Obr. 8.3: Znárodnění teplotního pole v mědi

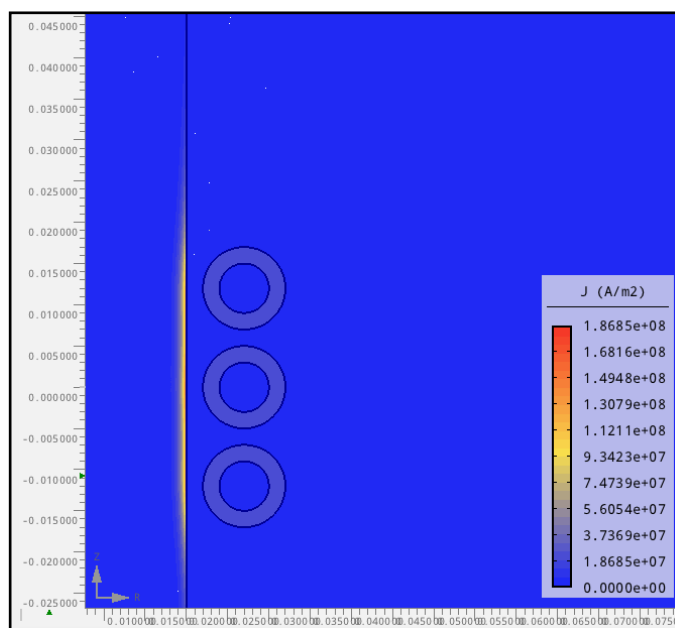
V tab. 8.1 je uvedeno, jak se liší teplotní pole pro různé druhy materiálu.

Tab. 8.1: Hodnoty teplot simulovaných materiálů

Materiál	Max. teplota [K]	Min. teplota [K]
Měď	322,92	309,57
Hliník	345,96	319,50
Železo	3443,7	585,36

### 8.3.2 Znárodnění proudové hustoty

Na následujícím obrázku můžeme vidět rozložení proudové hustoty v zahříváném materiálu. Jedná se o tenkou vrstvu pod povrchem, která blízce souvisí s hloubkou vniku. Hloubka vniku je nepřímo úměrná proudové hustotě. V tabulce 8.2 je znázorněno porovnání proudových hustot pro 3 různé materiály. Můžeme tedy vidět, že materiálem s největší proudovou hustotou je železo a právě železo má nejnižší hodnotu hloubky vniku. Hloubka vniku je znázorněna v tabulce 8.3.



Obr. 8.4: Znáznornění proudové hustoty vířivých proudů v mědi

Tab. 8.2: Hodnoty proudových hustot simulovaných materiálů

Materiál	Max. proudová hustota [ $A/m^2$ ]
Měď	$1,885 \cdot 10^8$
Hliník	$1,511 \cdot 10^8$
Železo	$1,422 \cdot 10^9$

Tab. 8.3: Hodnoty hloubky vniku pro simulované materiály

Materiál	Hloubka vniku [mm]
Měď	0,534
Hliník	0,671
Železo	0,041

V následující části práce si porovnáme 3 různé druhy materiálu, kterými jsou měď, hliník a železo. V praxi nalezne uplatnění především železo, měď a hliník slouží spíše pro ilustrativní účely. U těchto materiálů budeme pozorovat rozdílné vlastnosti z hlediska různých parametrů. Také v následující části nalezneme grafy v závislosti teploty  $T$  na čase  $t$  pro různé hodnoty vzdálenosti  $d$  pod povrchem ohřivaného materiálu. Kde pro možnost srovnání jsou uvedeny pro konstantní hodnotu frekvence  $f = 35$  kHz. Tato podmínka zapříčiní, že hodnoty teplot pro železný materiál jsou příliš vysoké a proto nemají reálné parametry pro kalení. Grafy jsou znázorněny ve dvou variantách a to se stíněním a bez stíněním.

Nejprve si porovnáme simulace se stíněním a bez stínění. Z následující tabulky je vidět, že u mědi se při zahřívání po dobu 30 s teplota pro simulaci se stíněním oproti simulaci bez stínění zvýší o 60 °C. Při zahřívání po dobu 60 s tento teplotní rozdíl činí již 95 °C. Pokud porovnáme hodnoty hliníku, tento teplotní rozdíl se při zahřívání po dobu 30 s oproti simulaci bez stínění zvýší o nezanedbatelných 110 °C a při zahřívání po dobu 60 s tento rozdíl činí již 170 °C. Pokud porovnáme hodnoty železa, tento teplotní rozdíl se při zahřívání po dobu 30 s oproti simulaci bez stínění zvýší více jak na dvojnásobnou hodnotu, tedy o 11770 °C a při zahřívání po dobu 60 s tento rozdíl činí již 19360 °C. Je tedy výhodnější využít stínění z důvodu koncentrace magnetického toku do ohřivaného materiálu a redukuje tak rozptylový tok. Tím dojde ke zvýšení koncentrace ztrát v materiálu a tedy ke zvýšení tepelného zdroje pro ohřev. Zahřívání výrobek se na požadovanou teplotu zahřeje za podstatně menší časový úsek.

Při porovnání z hlediska materiálů je vidět, že železo se při stejných podmínkách zahřívá podstatně rychleji než měď a hliník. Při porovnání těchto materiálů z hlediska vlastností má měď a hliník téměř shodnou hodnotu permeability materiálu, měď a železo mají výrazně vyšší hodnotu hustoty než hliník, měď má nejvyšší teplotní vodivost a naopak nejnižší hodnotu měrného tepla.

Tab. 8.4: Porovnání vlastností simulovaných materiálů

Vlastnosti		Materiál		
Název	Jednotky	Měď	Hliník	Železo
Měrné teplo	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	383	896	557
Relativní permeabilita	$[-]$	0,999990	1,003620	300-10000
Elektrická vodivost	$[S \cdot m^{-1}]$	$58,108 \cdot 10^6$	$37,7 \cdot 10^6$	$3,32 \cdot 10^6$
Hustota	$[kg \cdot m^3]$	8960	2700	7870
Teplotní vodivost	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	386	237	50

Tab. 8.5: Porovnání simulací různých materiálů pro stejné parametry

Materiál	Vel.	Se stíněním			Bez stínění			Teplotní rozdíl [°C]	
Měď	t [s]	0	30	60	0	30	60	30	60
	T [°C]	21	185	285	21	125	190	<b>60</b>	<b>95</b>
Hliník	t [s]	0	30	60	0	30	60	30	60
	T [°C]	21	325	500	21	215	330	<b>110</b>	<b>170</b>
Železo	t [s]	0	30	60	0	30	60	30	60
	T [°C]	21	20042	33480	21	8272	14120	<b>11770</b>	<b>19360</b>

### 8.3.3 Simulace se stíněním

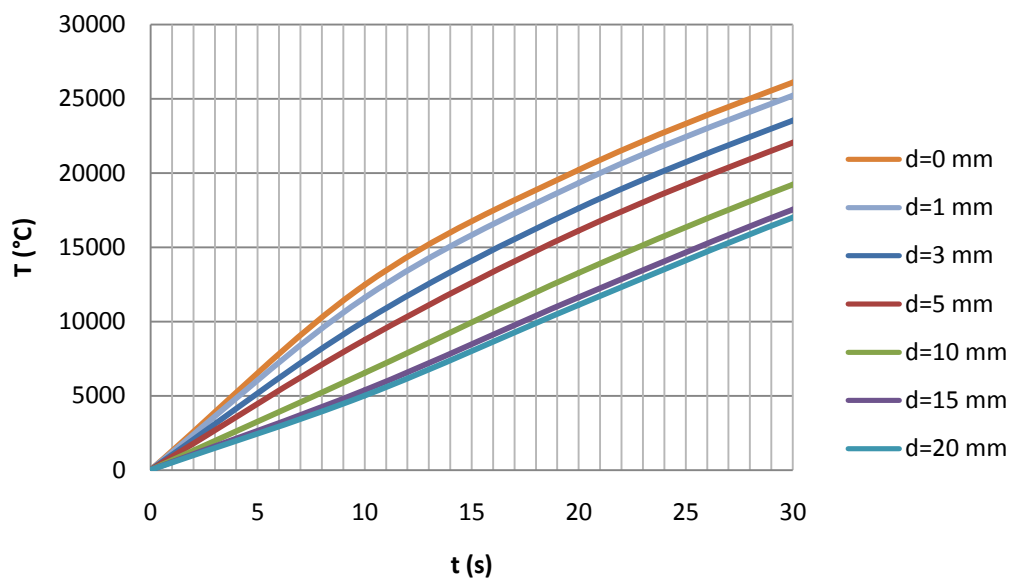
U simulace jsem se nejprve seznámil s charakteristickými vlastnostmi různých materiálů. Jedná se o materiály, kterými jsou měď, hliník a železo. Jak již jsme si uvedli v předchozí tabulce 8.4, každý materiál má své charakteristické vlastnosti. Pro teplotní pole je charakteristická teplotní vodivost, hustota a měrné teplo daného materiálu. Pro magnetické pole je to například relativní permeabilita či elektrická vodivost. Tyto vlastnosti jsou charakteristické pro každý ze simulovaných materiálů. Naopak mezi hodnoty, které můžeme při simulaci ovlivnit, patří především frekvence magnetického pole, poté velikost proudu v induktoru a v neposlední řadě i délka ohřevu. V následujících grafech je tedy znázorněno chování různých materiálů při stejných podmínkách. Do těchto patří velikost proudu induktoru, který činí 2 kA a následně frekvence 35 kHz. Následující grafy jsou provedeny pro lineární řešení, ačkoliv v reálu jsou materiály závislé na určitých veličinách (např. teplotě) a tedy nemají pouze jednu konstantní hodnotu, která by je charakterizovala. Nelineární řešení není v této práci uvedeno, neboť simulace tohoto řešení je velice časově náročná.

V následujících grafech můžeme vidět, jakým způsobem se ohřívá daný materiál směrem k jádru výrobku. Na povrchu materiálu teplota dosahuje nejvyšších hodnot a směrem k jádru se teplota snižuje. Parametr  $d$  představuje vzdálenost od povrchu zahřívajícího materiálu, kde díky tomuto parametru můžeme sledovat, jakým způsobem se mění teplota v závislosti na tomto parametru.

Na následujícím obrázku je znázorněno, jakým způsobem se zahřívá železný materiál při 2 kA a frekvenci 35 kHz. Jak můžeme vidět, tento graf je pouze orientační, neboť teplota dosahuje velmi vysokých hodnot. Teplota indukčního kalení se pohybuje v rozmezí zhruba 800 – 1200 °C. Tento graf slouží tedy jen k seznámení s různými druhy materiálů.



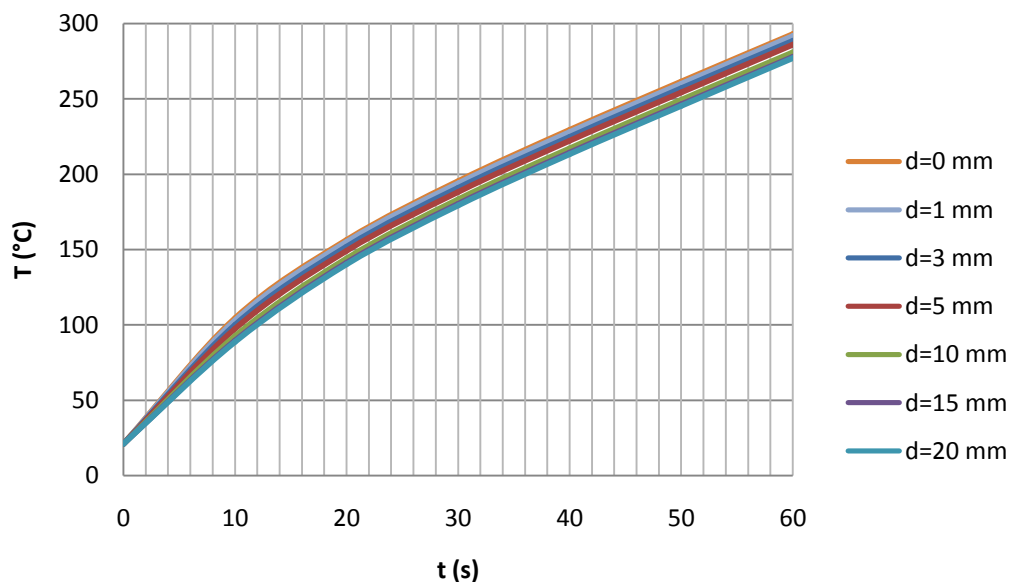
## Materiál: Železo



Obr. 8.5: Graf teploty materiálu v závislosti na čase pro  $f = 35$  kHz

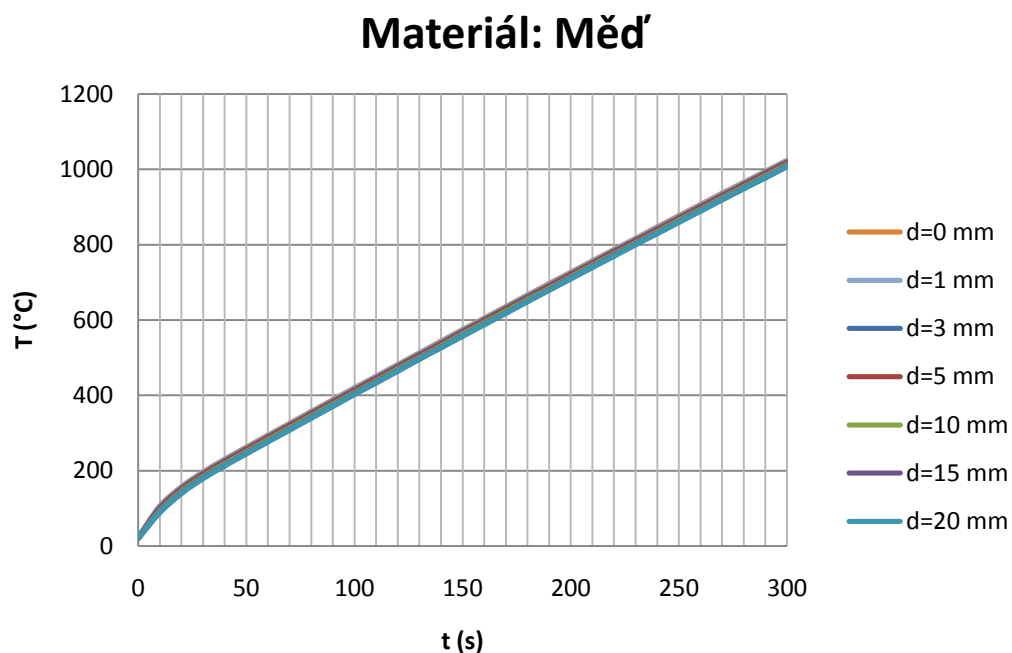
Nyní se dostáváme k dalšímu druhu materiálu, kterým je měď. Měď jsme zahřívali po dobu  $t = 60$  s při hodnotě proudu  $I = 2$  kA a frekvence  $f = 35$  kHz.

## Materiál: Měď



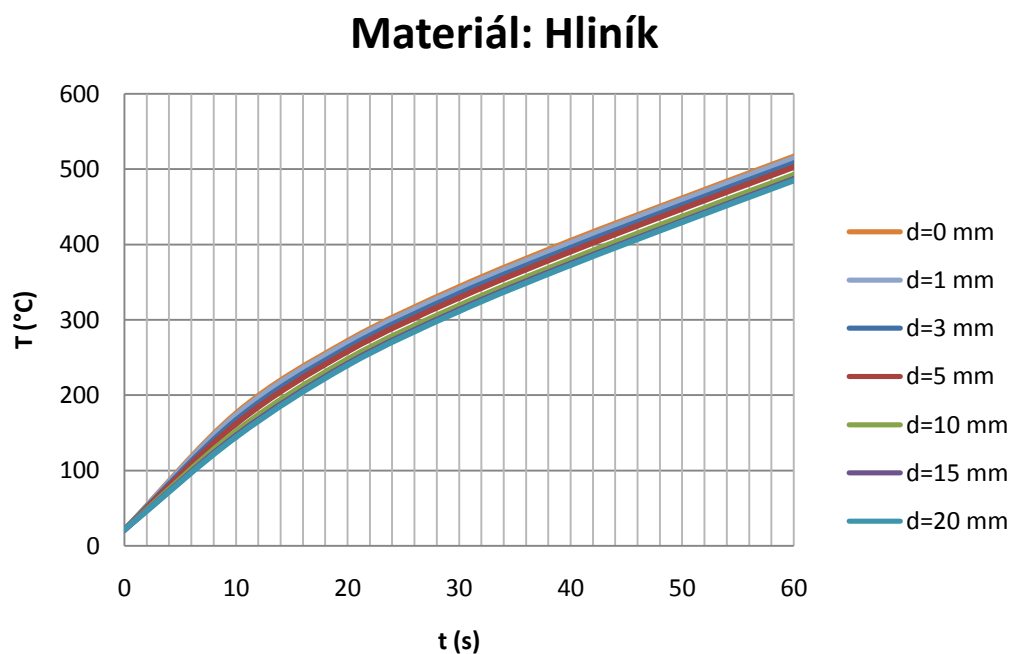
Obr. 8.6: Graf teploty materiálu v závislosti na čase pro  $f = 35$  kHz

Také jsme si vyzkoušeli, jakým způsobem se zahřívá měď po dobu 300 s.



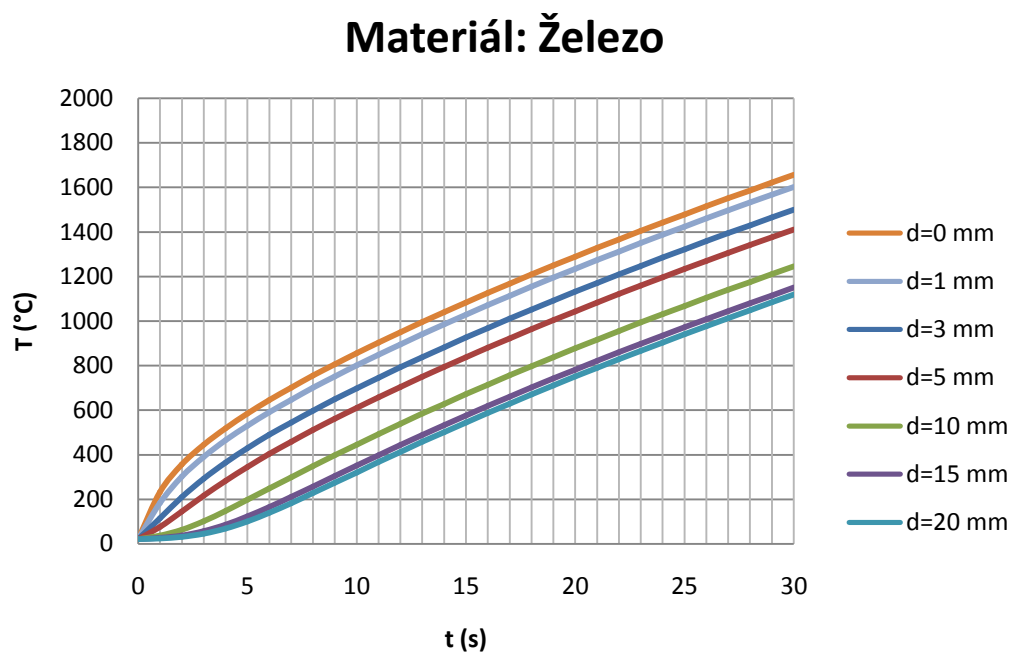
Obr. 8.7: Graf teploty materiálu v závislosti na čase pro  $f = 35$  kHz

Graf v závislosti teploty na čase pro další druh materiálu, kterým je hliník. Hliník jsme opět zahřívali po dobu 60 s.



Obr. 8.8: Graf teploty materiálu v závislosti na čase pro  $f = 35$  kHz

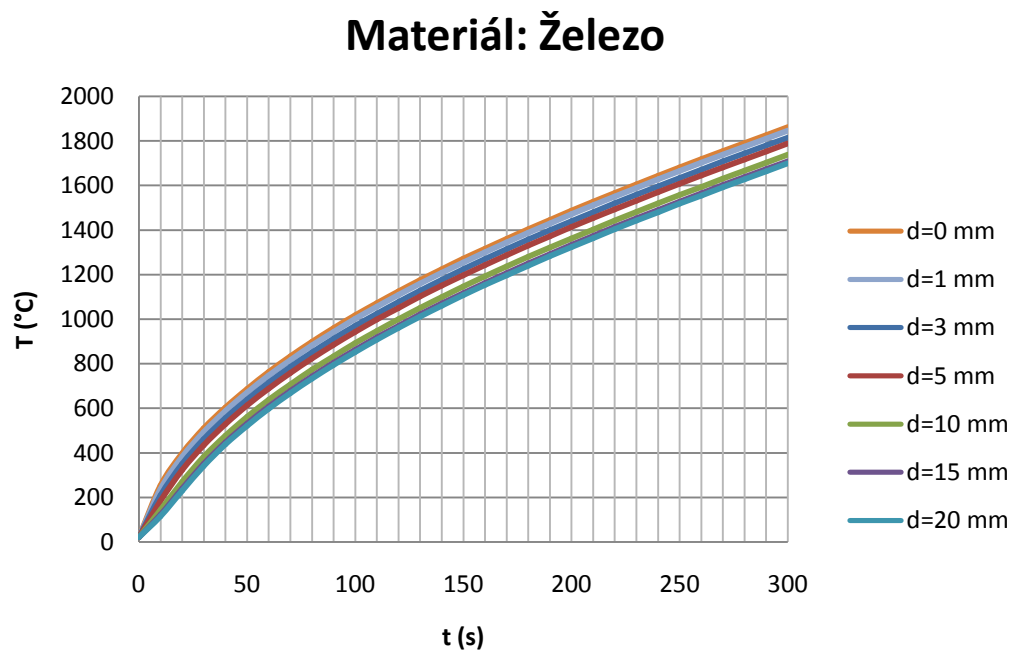
Následující graf je zhotoven pro reálnější hodnoty ohřevu. Snížení teploty vrstvy materiálu jsme docílili pomocí snížení hodnoty proudu na 1 kA a frekvence na 20 kHz.



Obr. 8.9: Graf teploty materiálu v závislosti na čase pro  $f = 20$  kHz

### 8.3.4 Simulace bez stínění

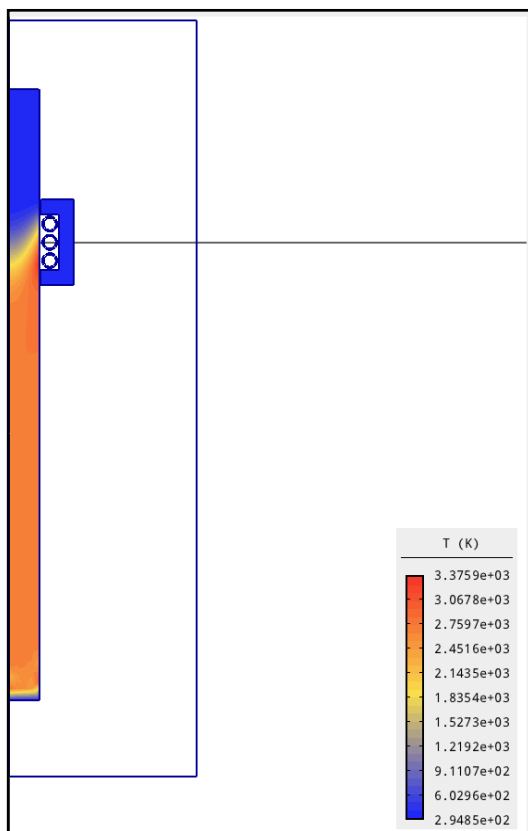
Na následujícím obrázku je znázorněno, jakým způsobem se zahřívá železný materiál bez stínění při proudu  $I = 1$  kA a frekvence  $f = 20$  kHz po dobu 30 s.



Obr. 8.10: Graf teploty materiálu v závislosti na čase pro  $f = 20$  kHz.

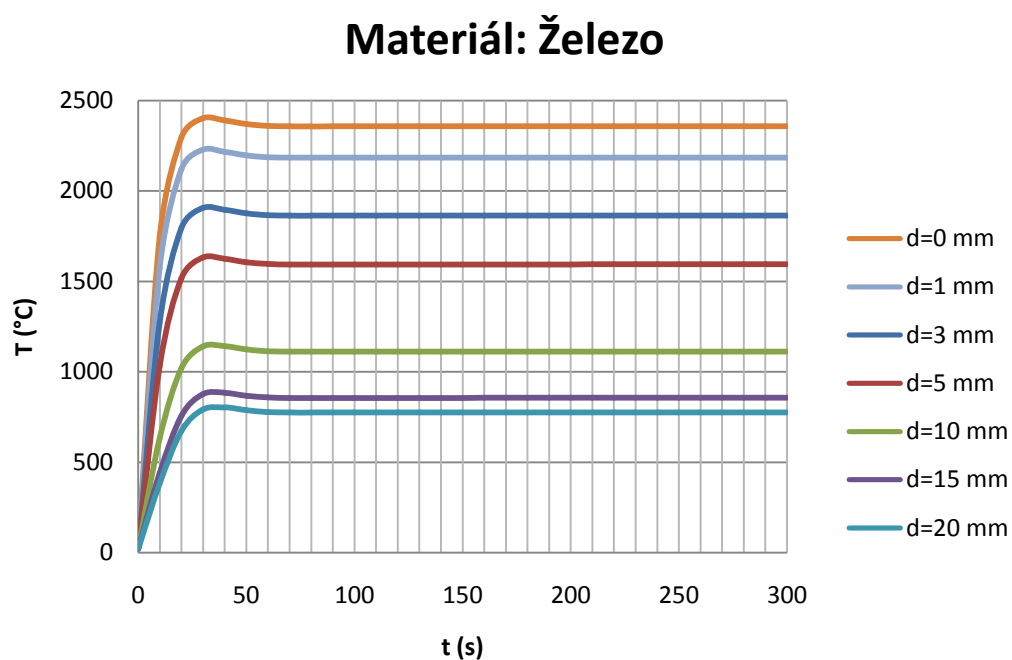
### 8.3.5 Indukční kalení s posuvem

Abychom docílili zahřátí materiálu po celém svém povrchu, je zapotřebí použít posuv. Rychlost posuvu se pohybuje v řádu jednotek  $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ . V našem případě je proveden posuv při rychlosti  $3 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ .



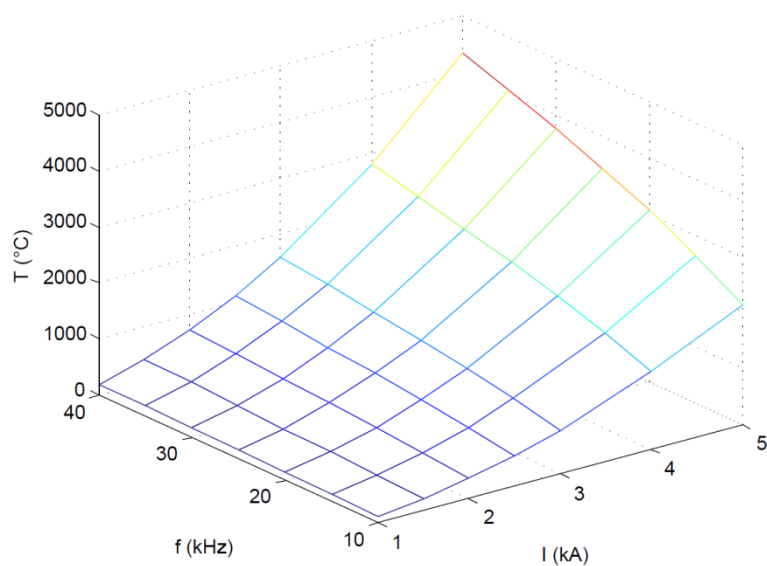
Obr. 8.11: Simulace indukčního kalení s posuvem

Znázornění indukčního kalení s posuvem pro proud  $I = 1 \text{ kA}$  a  $f = 25 \text{ kHz}$ .



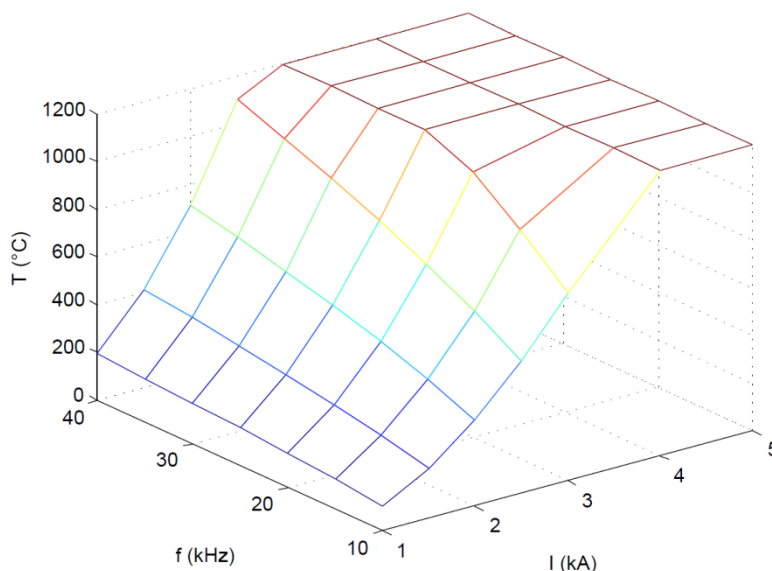
Obr. 8.12: Graf indukčního kalení s posuvem pro  $f = 25 \text{ kHz}$

Na následujícím obrázku je znázorněno, jakým způsobem nám parametry, jako je frekvence a proud, ovlivňují zahřívání materiálu. Je vidět, že s rostoucí frekvencí i proudem dochází ke zvýšení teploty zahřívajícího materiálu. Simulovaným materiálem je v tomto případě měď.



Obr. 8.13: Znázornění závislosti veličin

Na dalším obrázku je zobrazeno, pro jaké hodnoty proudu a frekvence je možné proces ohřevu provádět. Můžeme vidět, že při proudu 3 kA a výše se teplota zahřívávaného materiálu dostala již nad kalicí teplotu a proto by jsme v praxi takovéto vysoké hodnoty proudu nevyužívali.

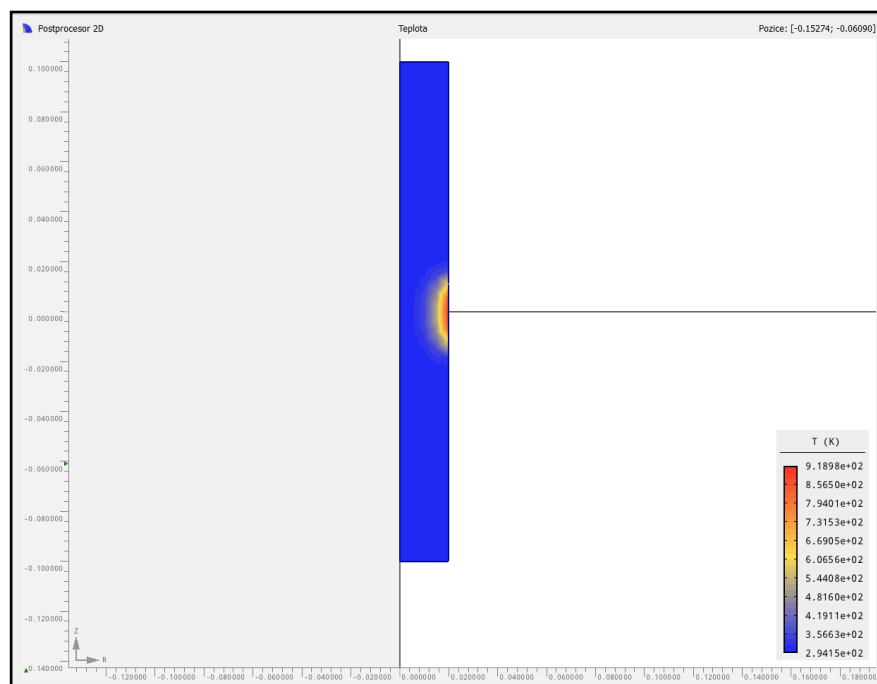


Obr. 8.14: Znárodnění závislosti veličin

## 8.4 Laserové kalení

U simulací laserového kalení jsme počítali s plochou dopadajícího paprsku o velikosti 5x23 mm. Výstupní výkon laseru činí 2 kW. Tento výkon ovšem není výkon dopadající na ohřívávaný předmět. Do vypočtení skutečného výkonu musíme počítat s mnoha faktory jako je například čistota povrchu materiálu. Tyto faktory jsou zahrnuty v účinnosti 35 %. Při přepočtení nám tedy vyšla hodnota výkonu dopadající na kalený předmět 600 W. Program Agros2D nepočítá s reálnou plochou laseru, ale s plochou laseru na 1 m délky. Museli jsme si tedy na tuto plochu přepočítat teplotní tok. Hodnota vypočteného teplotního toku činila  $5217,4 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ . V následujících simulacích tedy počítáme s touto hodnotou teplotního toku.

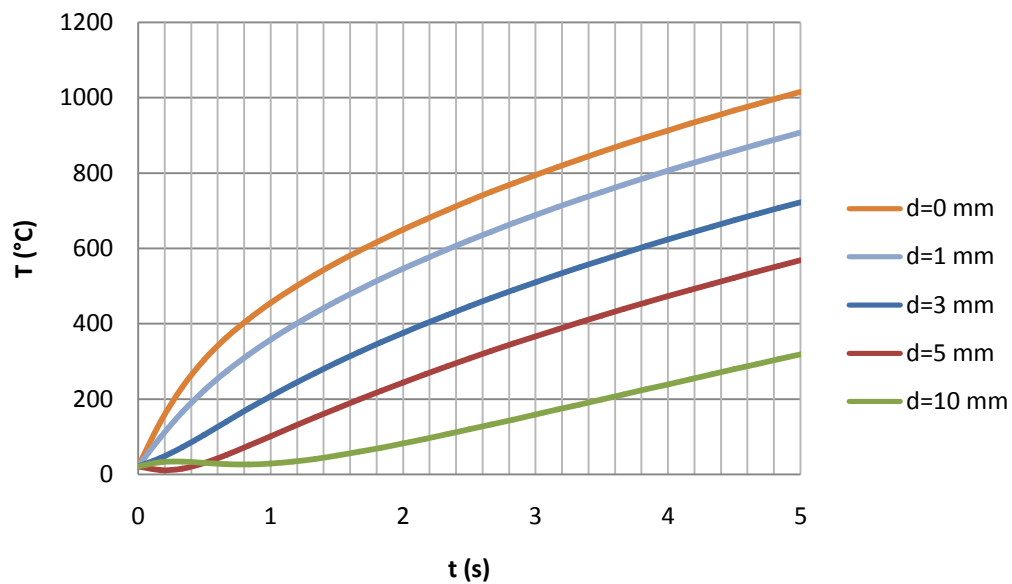
Simulace ohřevu železného materiálu pomocí laserového paprsku.



Obr. 8.15: Simulace laserového kalení

Ohřívání železného materiálu pomocí laseru po dobu 5s.

### Materiál: Železo

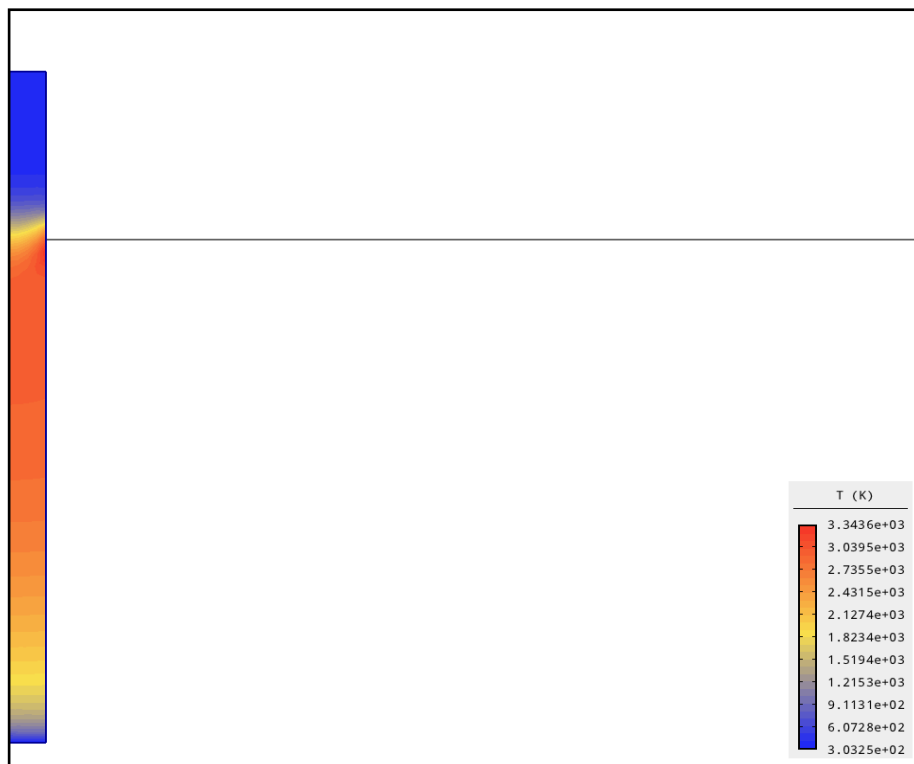


Obr. 8.16: Graf laserového kalení



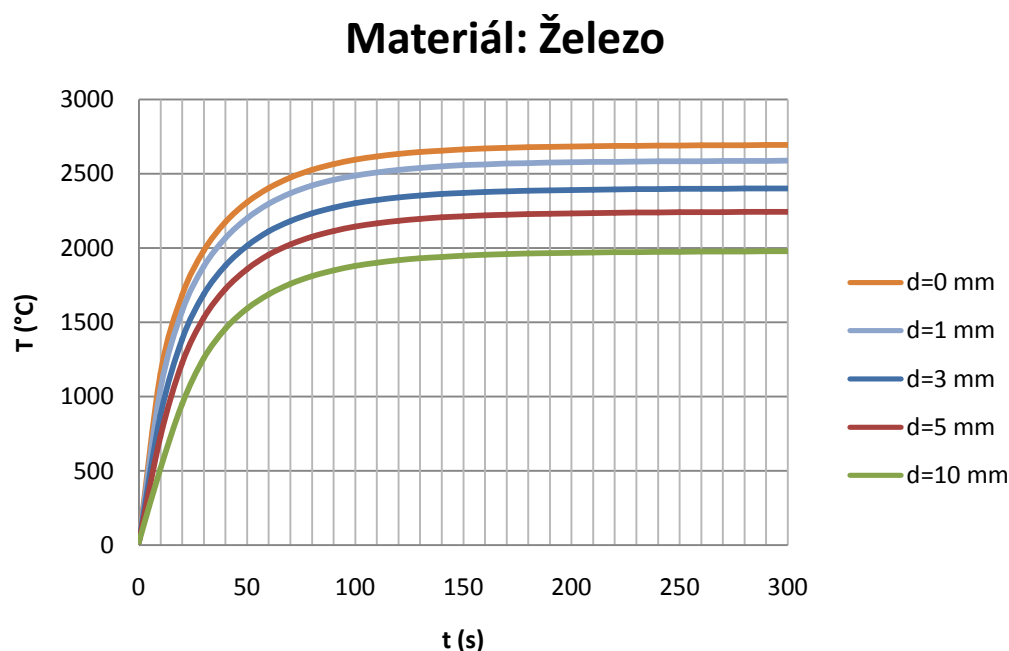
### 8.4.1 Laserové kalení s posuvem

Abychom docílili zahřátí celého povrchu materiálu je zapotřebí využít posuv. Na následujícím obrázku je znázorněn posuv při rychlosti  $1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ .



Obr. 8.17: Simulace laserového kalení s posuvem

Na následujícím grafu můžeme vidět, jakým způsobem se ohřívá železný materiál po dobu 300 s. Ve skutečnosti bychom nezahřívali danou součást po dobu 300 s, ale jen po dobu několika málo sekund. Docílili bychom tedy nižší teploty ohřevu.

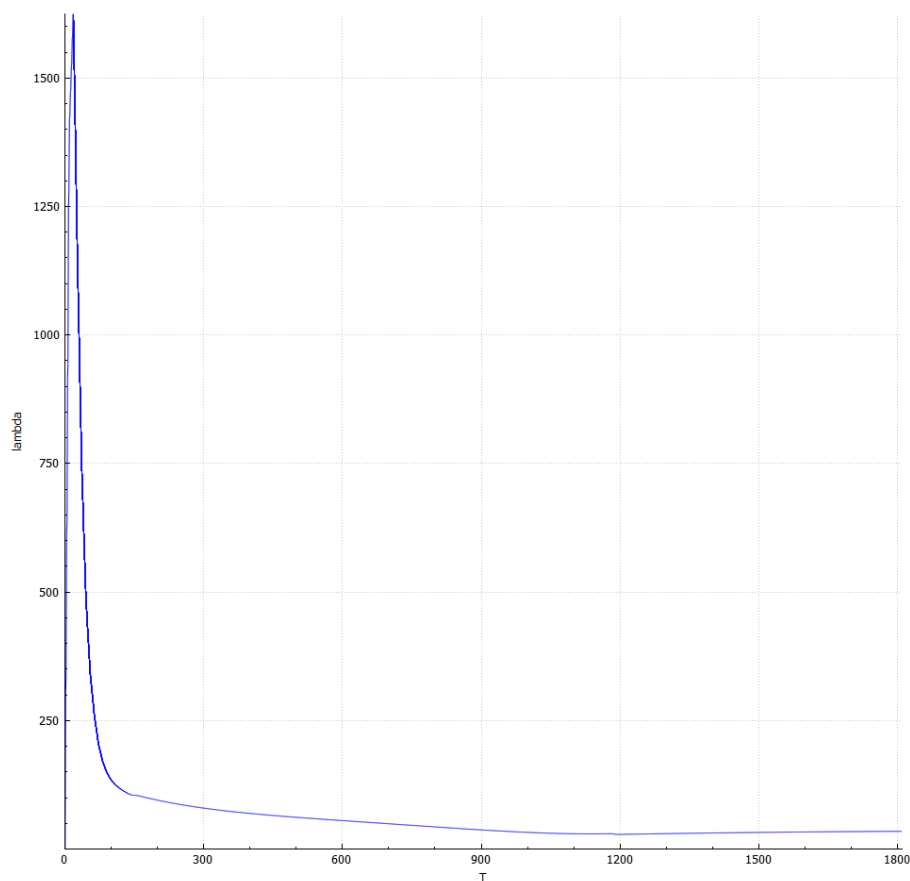


Obr. 8.18: Graf laserového kalení s posuvem

V následující části, můžeme vidět rozdíl mezi lineárním a nelineárním řešením. Porovnání lineárního a nelineárního řešení jsme provedli pouze u laserového ohřevu z důvodu absence magnetického pole a tedy z menších časových nároků simulace.

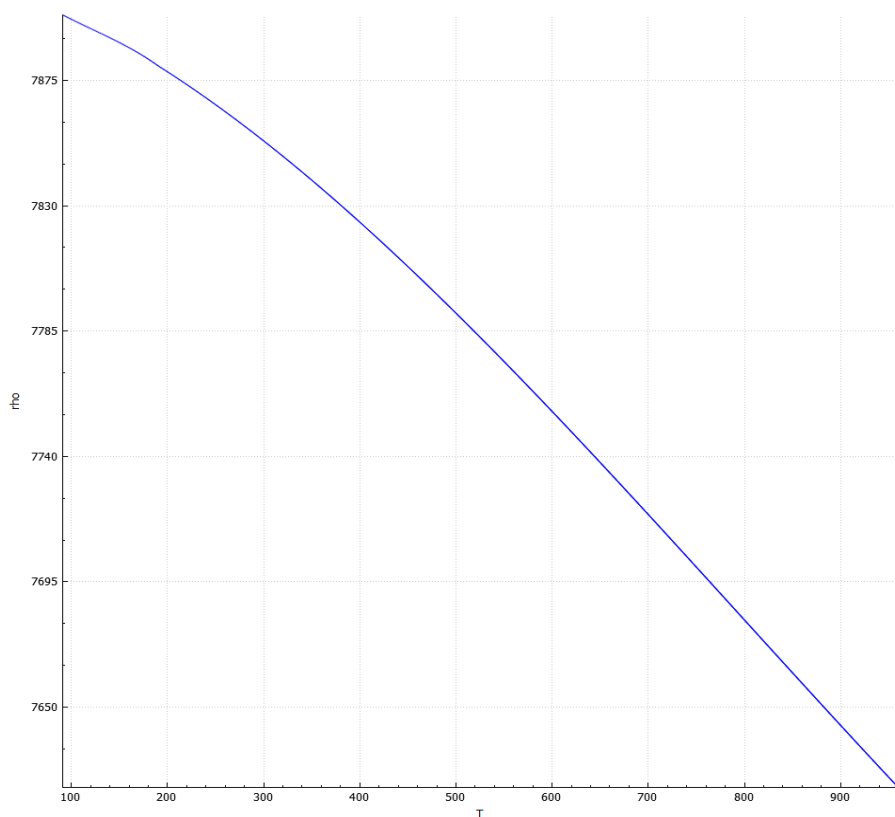
Nejprve se seznámíme s nelineárními charakteristikami železa. Charakteristiky jsou čerpány z knihovny Agrosu2D.

Na následujícím obrázku můžeme vidět závislost teplotní vodivosti na teplotě. Kde s rostoucí teplotou dochází k výraznému nárůstu lambdy až na hodnotu  $1626 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  a po dosažení této teploty k výraznému poklesu až na hodnotu  $169 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ . Následně dochází k mírnému poklesu až na hodnotu  $32 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .



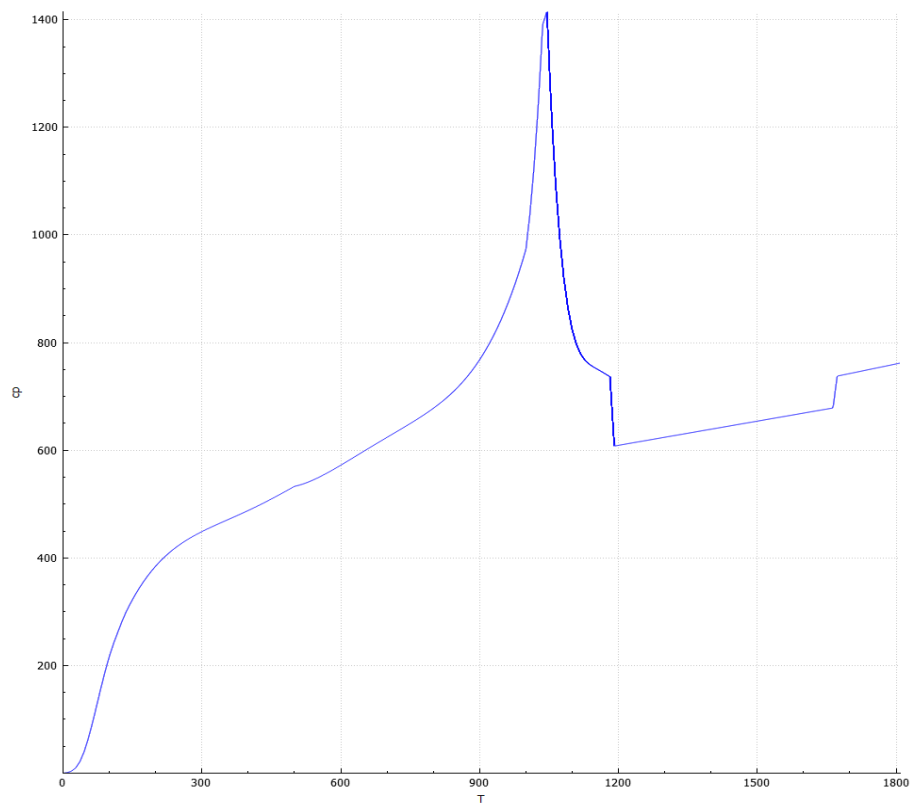
Obr. 8.19: Graf závislosti teplotní vodivosti na teplotě

Na dalším obrázku můžeme vidět graf závislosti hustoty na teplotě, kde se železo projevuje téměř lineárním průběhem charakteristiky.



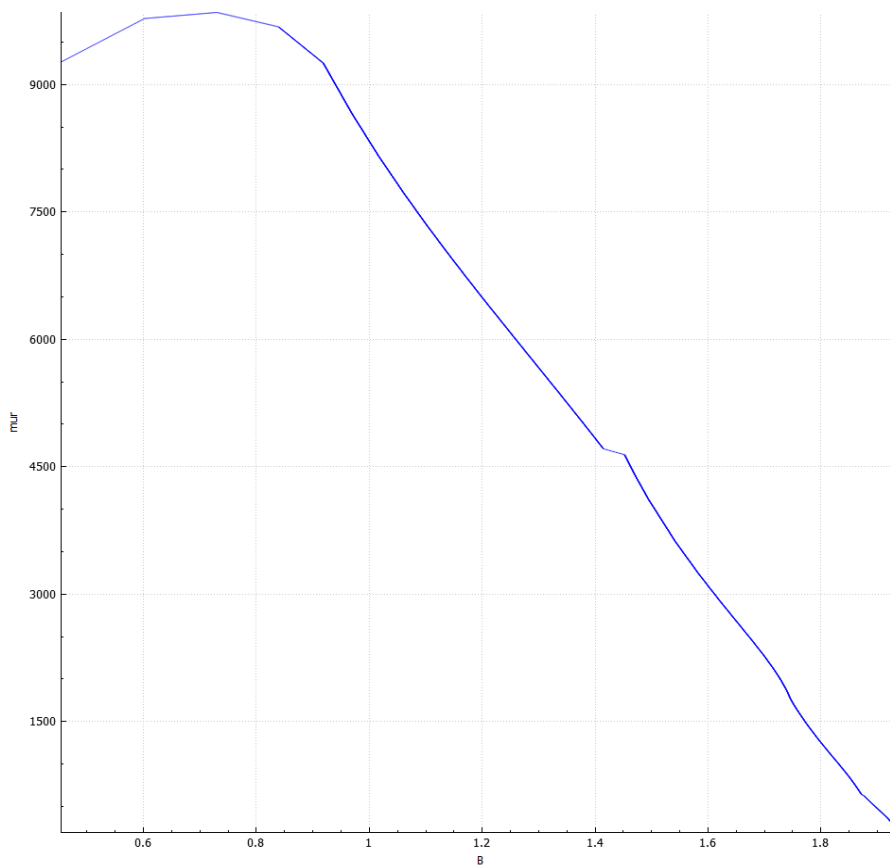
Obr. 8.20: Graf závislosti hustoty na teplotě

Následující graf znázorňuje závislost měrného tepla na teplotě.



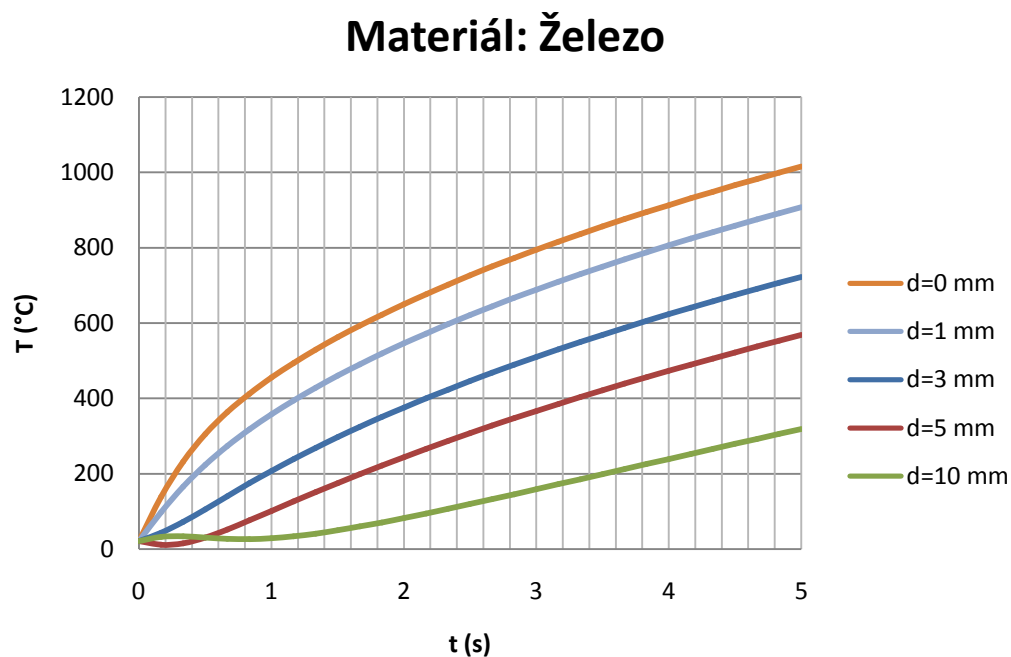
Obr. 8.21: Graf závislosti měrného tepla na teplotě

Na dalším grafu je vidět závislost poměrné permeability na indukci, kde s rostoucí hodnotou indukce nejprve permeabilita roste a při dosažení hodnoty 0,8 T dojde k výraznému poklesu poměrné permeability.



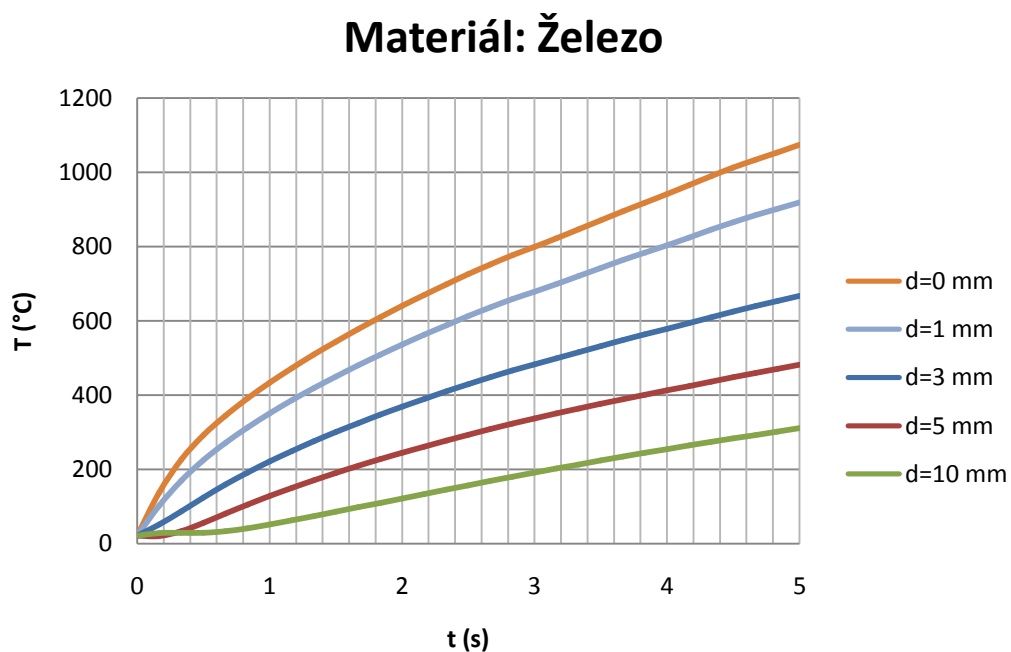
Obr. 8.22: Graf závislosti poměrné permeability na indukci

Lineární řešení laserového kalení s posuvem.



Obr. 8.23: Graf laserového kalení s posuvem

Nelineární řešení laserového kalení s posuvem.



Obr. 8.24: Graf laserového kalení s posuvem

Jak můžeme na předchozích grafech vidět, lineární řešení od nelineárního se v tomto případě liší jen nepatrně. U nelineárního řešení dochází k rychlejšímu přenosu tepla v ohřívaném předmětu.

## 9 Zhodnocení výsledků

V této práci jsme se nejprve seznámili s různými druhy materiálu. Zjistili jsme, že měď a hliník mají podobné vlastnosti (viz. tab. 8.4) ať už teplotního či magnetického pole a tedy se zahřívají zhruba stejným způsobem (viz. obr. 8.6, 8.8). Naopak železo má oproti zmíněným materiálům jiné vlastnosti a to zapříčiní, že právě železo dosáhne požadované kalicí teploty mnohem rychleji (viz. obr. 8.5). Dále hloubka vniku se u železa pohybuje přibližně o řád níže, než je tomu u mědi či železa (viz. tab. 8.3). V praxi nejčastěji dochází ke kalení u železných materiálů v podobě oceli.

Následně jsme porovnávali indukční a laserové kalení. U ohřevu pomocí laserového paprsku dochází k mnohem rychlejšímu ohřevu kalené plochy materiálu oproti indukčnímu kalení (viz. obr. 8.9, 8.16). Právě tato plocha je při kalení rozhodující, neboť při kalení pomocí laseru plocha dopadajícího paprsku činí zhruba  $115 \text{ mm}^2$ , kdežto plocha, kterou pokrývá induktor indukčního kalení je mnohem větší. Indukční ohřev tedy zahřeje kalenou součást za větší časový úsek, ale naopak prokalí daný materiál do větší hloubky a tudíž se ve výsledku prohřeje i více materiálu. Plocha induktoru se dá ovlivnit použitím různého počtu závitů. Jak již jsme si dříve v práci uvedli, k ohřátí požadované plochy materiálu je zapotřebí využít posuv. Proto při kalení větší plochy se nevýhoda indukčního kalení v podobě pomalejšího ohřevu vyruší s nevýhodou laserového kalení v podobě menší plochy ohřevu a ve výsledku se kalený materiál ohřeje za zhruba stejnou dobu. U indukčního ohřevu rovných či méně zakřivených částí je možné použít jeden druh induktoru. Pokud ovšem je zapotřebí zakalit předmět s větším zakřivením, je zapotřebí použít jiný tvar induktoru. U laserového kalení tento problém nenastane, neboť pomocí laserového paprsku lze kalit celou škálu výrobků. V porovnání chladnutí materiálu dosahuje laserové kalení mnohem větší rychlosti chladnutí než je tomu u indukčního kalení. Větší rychlostí chladnutí docílíme větší tvrdosti zakalené vrstvy, ale naopak součásti mají větší náchylnost k prasknutí. Kalení pomocí laseru je přesnější. Laserové kalení je vhodné především na kalení ozubených kol, hřídelí, kladek atd. Z pohledu nákladů se cena laserového zařízení pohybuje kolem 4 milionů korun, a tedy se stává asi 3x dražší než indukční kalení. Není možné tedy určit, která z těchto technologií kalení je výhodnější, neboť každá metoda má své výhody i nevýhody. Je tedy zapotřebí zvolit druh kalení dle druhu kaleného předmětu.



Jak již jsme si dříve uvedli, tato bakalářská práce se zaměřuje především na lineární řešení laserového a indukčního kalení. Cílem této práce byl tedy získat jakýsi přehled v oblasti kalení. V další práci bych chtěl tímto tématem pokračovat a následně získat další informace ohledně kalení materiálů.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Kraus V. (2013). Tepelné zpracování a slinování (Plzeň: Západočeská univerzita).
- [2] Vojtěch D. (2006). Kovové materiály (Vysoká škola chemicko-technologická v Praze).
- [3] Kratochvíl B., Švorčík V., Vojtěch D. (2005). Úvod do studia materiálů (Vysoká škola chemicko-technologická v Praze).
- [4] ZČU (FAV). Přenos tepla (Plzeň: Západočeská univerzita). *Kfy.zcu.cz*. (<http://www.kfy.zcu.cz/dokumenty/FYSV/PrenosTepla.pdf>, 2. 2. 2015).
- [5] Kříž A. Povrchové kalení v průmyslové aplikaci (Plzeň: Západočeská univerzita). *Ateam.zcu.cz*. (<http://ateam.zcu.cz/download/povrchove%20kaleni08.pdf>, 7. 2. 2015).
- [6] Vrána V. (2008). Elektrické teplo (Ostrava: Technická univerzita Ostrava). *Fei1.vsb.cz*. ([http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske\\_FMMI/Prednasky/TEPLO\\_bc\\_08.pdf](http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FMMI/Prednasky/TEPLO_bc_08.pdf)/ 15. 2. 2015).
- [7] Hamerník J. Základy tepelného zpracování kovů. *Jhamernik.sweb.cz*. ([http://jhamernik.sweb.cz/tepelne\\_zpracovani.htm](http://jhamernik.sweb.cz/tepelne_zpracovani.htm), 18. 2. 2015).
- [8] ZČU (FEL). Agros2D (Plzeň: Západočeská univerzita). *Abclinuxu.cz*. (<http://www.abclinuxu.cz/clanky/agros2d-aplikace-pro-reseni-fyzikalnich-poli>, 1. 3. 2015).
- [9] Společnost Trumpf.
- [10] Společnost Rajmont.