

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Optimalizace indukčního kalicího procesu

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Viktor VACHUDA**
Osobní číslo: **E17N0093P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Název tématu: **Optimalizace indukčního kalicího procesu**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Zásady pro vypracování:

1. Zhodnoťte současný stav kalicích procesů ocelových vsázek.
2. Uveďte potřebnou teorii indukčního ohřevu s důrazem na indukční kalení.
3. Proveďte experimentální kalení ocelové vsázky a uveďte faktory mající zásadní vliv na jeho průběh.
4. Vytvořte numerický model dle experimentu a na jeho základě navrhněte optimalizaci kalicího procesu.
5. Ověřte navržené změny experimentem a uveďte závěry pro praxi.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Nacke, B., Baake, E.: Induktives Erwärmen.
2. Lupi, S., Forzan, M., Aliferov, A., Induction and Direct Resistance Heating Theory and Numerical Modeling.
3. Muhlbauer, A.: History of Induction Heating and Melting by Alfred Muhlbauer.

Vedoucí diplomové práce: Ing. David Rot, Ph.D.

Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: 5. října 2018

Termín odevzdání diplomové práce: 30. května 2019



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



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

V Plzni dne 5. října 2018

Abstrakt

Diplomová práce je zaměřena na povrchové indukční kalení. Jsou zde zmíněny současné způsoby povrchového kalení, ale důraz je především na indukční kalení. Součástí práce bylo experimentální kalení s cílem zjistit jaký vliv má změna kalicího média na výslednou tvrdost a deformaci vsázky. Dle experimentu byl vytvořen numerický model pomocí programových nástrojů společnosti ANSYS. Na základě vzniklého modelu byla vytvořena optimalizace, která se ověřila praktickým měřením. Výsledek práce má vést k optimalizaci kalicího procesu a možnosti přenést nabitě znalosti do praxe.

Klíčová slova

Povrchové kalení, deformace, austenitizace, tepelné zpracování, induktor, tepelné zpracování, Poyntingův vektor, permeabilita, kalicí médium, ANSYS

Abstract

This diploma thesis is focused on surface hardening by induction. Other ways of surface hardening are mentioned but the main focus is on induction. This work consist of one experimental hardening process where different cooling medias were used. Results of this experiment shows how a different cooling medias have an impact on finale hardness and deformation of a material. A numerical model was created (using ANSYS programs) for possible optimization of the hardening process. The results were confirmed via practical hardening process. The conclusion provides a knowledge on how to optimize surface hardening process

Key words

Surface hardening, heat treatment, hardness, inductor, Poynting vector, permeability, cooling media, ANSYS

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 6.6.2019

Viktor Vachuda

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Davidu Rotovi, Ph.D. za vstřícný přístup při řešení problematiky indukčního kalení. Dále bych chtěl poděkovat prof. Ing. Jiřímu Koženému, CSc. za odbornou pomoc během konzultací.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
ÚVOD	12
1 SOUČASNÝ STAV KALICÍCH PROCESŮ OCELOVÝCH VSÁZEK	13
1.1 POVRCHOVÉ KALENÍ PLAMENEM	13
1.2 KALENÍ POMOCÍ LASEROVÉHO ZÁŘENÍ	14
1.3 INDUKČNÍ	15
2 TEORETICKÝ ROZBOR INDUKČNÍHO OHŘEVU	16
2.1 INDUKČNÍ OHŘEV	16
2.2 MAXWELLOVY ROVNICE PRO ŠÍŘENÍ ELEKTROMAGNETICKÉHO VLNĚNÍ	18
2.3 ROVNICE PRO TEPLOTNÍ POLE	20
2.4 POYNTINGŮV VEKTOR	20
2.5 HLOUBKA VNIKU A ELEKTROMAGNETICKÁ PRŮZAŘNOST	21
2.6 AUSTENIT	23
2.7 KALICÍ TEPLOTA A VÝSLEDNÁ TVRDOST	23
2.8 CURIEŮV BOD	24
2.9 FÁZOVÉ PŘEMĚNY OCELÍ	24
2.10 MARTENZITICKÁ TRANSFORMACE	25
2.11 MĚŘENÍ TVRDOSTI U KOVOVÝCH MATERIÁLŮ	28
2.12 DEFORMACE VZNIKÁ KALENÍM	29
2.13 BLOKOVÉ SCHÉMA KALICÍHO ZAŘÍZENÍ	30
2.13.1 Transformátor	30
2.13.2 Induktor	31
2.13.3 Rezonanční obvod	33
2.13.4 Chlazení	33
3 EXPERIMENTÁLNÍ KALENÍ OCELOVÉ VSÁZKY	36
3.1 PARAMETRY VSÁZKY	36
3.2 ELEKTRICKÉ PARAMETRY	38
3.3 KALICÍ PROSTŘEDÍ	38
3.4 PRŮBĚH EXPERIMENTU	38
3.5 MĚŘENÉ PARAMETRY	39
3.6 VLIV TEPLoty KALICÍHO MÉDIA NA KALICÍ PROCES	39
3.7 UŽITÍ POLYMERŮ V KALICÍM MÉDIU	40
3.8 DEFORMACE VZNIKÁ KALENÍM	40
3.9 METALOGRAFICKÉ HODNOCENÍ KALENÉ VRSTVY	40
3.10 KONTROLA TVRDOSTI	41
3.11 KONTROLA VNĚJŠÍHO PRŮMĚRU	43
3.12 ZÁVĚR MĚŘENÍ	43
4 NUMERICKÝ MODEL A OPTIMALIZACE KALICÍHO PROCESU	44
4.1 ANSYS MAXWELL 3D	44
4.1.1 Induktor	44
4.1.2 Vsázka	45
4.2 ANSYS WORKBENCH	47
4.3 TRANSIENT THERMAL	47
4.4 VÝSLEDKY SIMULACE MAXWELL 3D	48
4.4.1 Intenzita magnetického pole H	48
4.4.2 Magnetická indukce B	48

4.4.3	<i>Proudová hustota</i>	49
4.4.4	<i>Činné ztráty v objemu vsázky</i>	49
4.5	VÝSLEDKY SIMULACE TRANSIENT THERMAL	50
4.5.1	<i>Maximální teplota (model experimentu)</i>	50
4.5.2	<i>Maximální tepelný tok (model experimentu)</i>	50
4.6	OPTIMALIZACE INDUKČNÍHO KALICÍHO PROCESU	51
4.6.1	<i>Maximální teplota (optimalizovaný model)</i>	51
4.6.2	<i>Maximální tepelný tok (optimalizovaný model)</i>	51
4.6.3	<i>Výsledky</i>	52
	<i>Grafy</i>	52
5	OVĚŘENÍ NAMĚŘENÝCH ZMĚN A MOŽNOSTI DO PRAXE	55
5.1	MĚŘENÍ	56
5.2	VÝSLEDKY MĚŘENÍ	56
5.3	VÝPOČET	57
5.4	ZÁVĚR MĚŘENÍ	57
6	ZÁVĚR	59
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	61

Seznam symbolů a zkratek

a	Hloubka vniku magnetické indukce [m]
ω	Úhlová rychlost [s^{-1}]
μ_0	Permeabilita vakua [H/m]
μ_r	Permeabilita materiálu [-]
σ	Měrná vodivost materiálu [$S\cdot m^{-1}$]
f	Frekvence [Hz]
R	Elektrický odpor [Ω]
L	Indukčnost [H]
Z	Impedance [Ω]
S	Průřez [m^2]
l	Délka vodiče [m]
L	Indukčnost [H]
ϕ	Magnetický tok [Wb]
B	Magnetická indukce [T]
H	Intenzita magnetického pole [$A\cdot m^{-1}$]
U	Elektrické napětí [V]
E	Intenzita el. pole [$V\cdot m^{-1}$]
J	Proudová hustota [$A\cdot m^{-2}$]
J_V	Vnucená proudová hustota [$A\cdot m^{-2}$]
D	Elektrická indukce [$C\cdot m^{-2}$]
C_p	Tepelná kapacita [$J\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}$]
ρ	Měrná hustota [$kg\cdot m^{-3}$]
A	Vektorový magnetický potenciál [$Wb\cdot m^{-1}$]
Δ	Laplaceův operátor [m^{-2}]
η	Účinnost [-]
t	Čas [s]
E_v	Vnucená intenzita el. pole [$V\cdot m^{-1}$]
λ	Tepelná vodivost [$W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$]
T	Termodynamická teplota [K]

w_j	.....	Měrné Jouleovy ztráty [W.m ⁻³]
P	.....	Činný elektrický výkon [W]
ΔP_{FE}	.....	Ztráty v železe [W]
ΔP_{CU}	.....	Ztráty ve vinutí [W]
R_m	.....	Magnetický odpor [m ⁻² .kg ⁻¹ .s ² .A ²]
G_m	.....	Magnetická vodivost [H]

Úvod

Cílem práce je seznámit čtenáře se současným stavem kalicích procesů ocelových vsázek s hlavním důrazem na indukční kalení.

Součástí této práce je i provedení několika experimentálních kalicích procesů, s různými parametry kalicího prostředí, které mají vliv na výsledné vlastnosti kaleného materiálu.

Práce si dává za úkol vytvořit numerický model vycházející z experimentů a navrhnout jejich optimalizaci.

Závěrem této práce bude praktické ověření, zda navržená optimalizace koresponduje s numerickým modelem a možnosti užití v praxi.

1 Současný stav kalicích procesů ocelových vsázek

V průmyslu se můžeme setkat s několika způsoby kalení ocelových vsázek. Mezi nejrozšířenější patří povrchové kalení plamenem a indukcí, ale můžeme se setkat i s kalením pomocí výkonových laserů.

1.1 Povrchové kalení plamenem

Využívá kyslíko-acetylenový hořák. Hloubka prokalení závisí na intenzitě plamene a době ohřevu ($a = 0,5-10\text{mm}$). Vhodné jen pro dobře kalitelné oceli (obsah C min. 0,35%) [14]

S rostoucími důrazem na ochranu životního prostředí a důrazem na automatizaci, se od tohoto způsobu kalení ustupuje. [6]

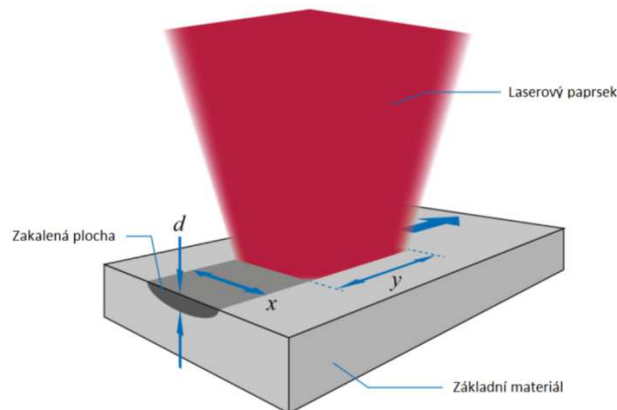
Mezi nevýhody kalení plamenem patří: malá účinnost přenosu tepla, vysoké počáteční náklady na pořízení tlakových nádob, vysoká hluchnost systému, nemožnost regulace teplot, vzhledem k relativně nízké rychlosti chlazení u kalení velkých vsázek dosahují hodnoty tvrdosti a síly v tahu nižších hodnot [6]



Obr. 1.1 Povrchové kalení plamenem [14]

1.2 Kalení pomocí laserového záření.

Využívá výkonový laser, který dokáže rychle ohřát povrch vsázky. Používá se výhradně u ocelí s min. obsahem uhlíku 0,2%. V dnešní době se jedná o jeden z nejmodernějších způsobů povrchového kalení. [22]



Obr. 1.2 Povrchové kalení laserem [15]

Výhodou jsou vysoké výkony kalicích laserů, jejich přesnost, rychlost, efektivita, kalení i složitých tvarů, vhodné pro automatizaci a možnost lokálního kalení.

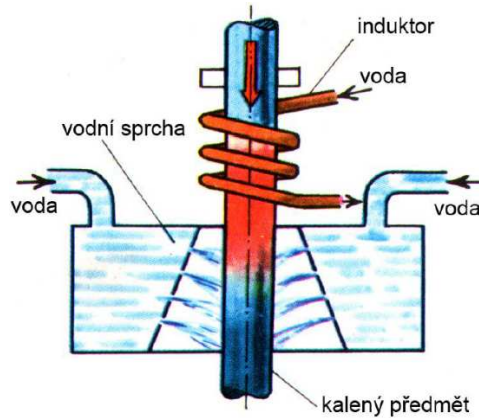
Vzhledem k vysokým rychlostem ohřevu dochází v materiálu ke vzniku strmého teplotního gradientu na povrchu vsázky, který umožní okamžitý odvod tepla do jádra vsázky. Díky tomu jsme schopni se u kalení laserem obejít bez kalicího média. To má za následek i omezení deformací vzniklé kalicím procesem. [22]

Mezi nevýhody můžeme zařadit to, že vzhledem k posuvu laseru není kalená vrstva zcela homogenní, hodnoty tvrdosti tak nejsou konzistentní. Pořizovací náklady výkonových laserů jsou vysoké a maximální hloubka prokalení se pohybuje kolem 2mm.

V praxi se můžeme v omezeném množství setkat i s takzvaným hybridním kalením. Jedná se o kombinaci laseru a indukčního kalení, pro zvětšení hloubky kalení. [23]

1.3 Indukční

Cívkou protéká vysokofrekvenční střídavý proud, který má za následek vznik střídavého magnetického pole. Uvnitř vsázky, která je v přímé blízkosti induktoru, se indukuje napětí, které vyvolá vznik vířivých proudů, které ohřívají vsázku.



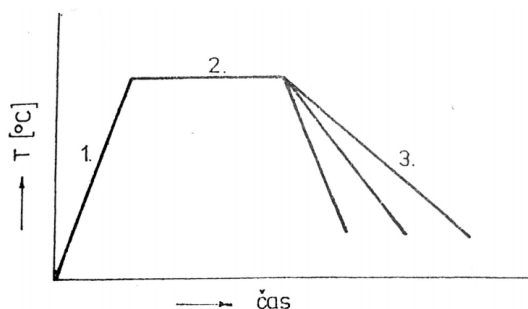
Obr. 1.3 Indukční kalení [14]

Výhodou je možnost automatizace, vysoká účinnost, šetrné pro životní prostředí. Vzhledem k možnosti regulace hloubky prokalení se jedná o velmi používanou metodu povrchového kalení.

Nevýhodou je, že cívka musí kopírovat tvar vsázky, pro účinný přenos energie a rovnoměrnost prokalení. Po dosažení Curieovi teploty ztrácí vsázka feromagnetické vlastnosti a prudce se zvyšuje hloubka prokalení.

2 Teoretický rozbor indukčního ohřevu

Kalení je všeobecně známý proces tvrzení kovových materiálů. Po přivedení materiálu na kalicí teplotu, se tvoří v kovu takzvaná austenitická struktura. Při rychlém ochlazení této struktury dochází k martenzitické transformaci, která se vyznačuje vysokou tvrdostí.

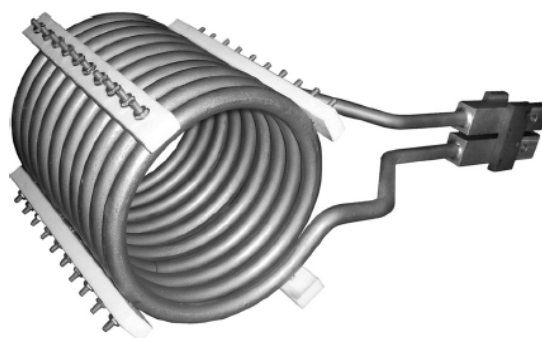


Obr. 2.1 Schématické znázornění cyklu tepelného zpracování [1]

Na obr. 2.1. je znázorněn cyklus tepelného zpracování. První úsek zobrazuje ohřev materiálu, kde dochází k tvorbě austenitu. Následně je vsázka ponechána na požadované teplotě, aby byl vzniklý austenit rovnoměrný. Konečnou fázi ochlazování může rozdělit podle intenzity chlazení na žíhání, nebo kalení. Při žíhání docílíme rovnovážné struktury, naopak při kalení docílíme nerovnovážné struktury. (viz kapitola 2.10 Martenzitická transformace) [1]

2.1 Indukční ohřev

Induktor, kterým prochází střídavý proud o určité frekvenci, kolem sebe vytváří proměnné elektromagnetické pole. Vsázka, která je tomuto poli vystavena, na sobě indukuje napětí, které vyvolává uvnitř vsázky vířivé proudy. Tyto proudy mají za následek vznik Jouleových, neboli tepelných ztrát.



Obr. 2.2 Induktor [3]

Na induktor jsou kladeny vysoké nároky z hlediska výkonu. K ohřátí vsázky musí dojít rychle. Při delším průběhu zahřívání vsázky, totiž může dojít k nežádoucímu úniku tepla (pomocí tepelné kondukce) i do dalších vrstev materiálu.



Obr. 2.3 Chladící sprcha [19]

Hned po induktoru je klíčové kalicí médium, které vsázku musí ochladit dostatečně rychle, aby se v materiálu nevytvořily nežádoucí struktury, které by měly vliv na výslednou tvrdost (viz kapitola 2.9 Fázové přeměny ocelí).

Jako kalicí médium se může použít standartní voda z řadu, nebo voda obohacena polymery, které zlepšují odvod tepla.

2.2 Maxwellovy rovnice pro šíření elektromagnetického vlnění

K pochopení magnetického pole nám poslouží Maxwellovy rovnice v diferenciálním stavu.

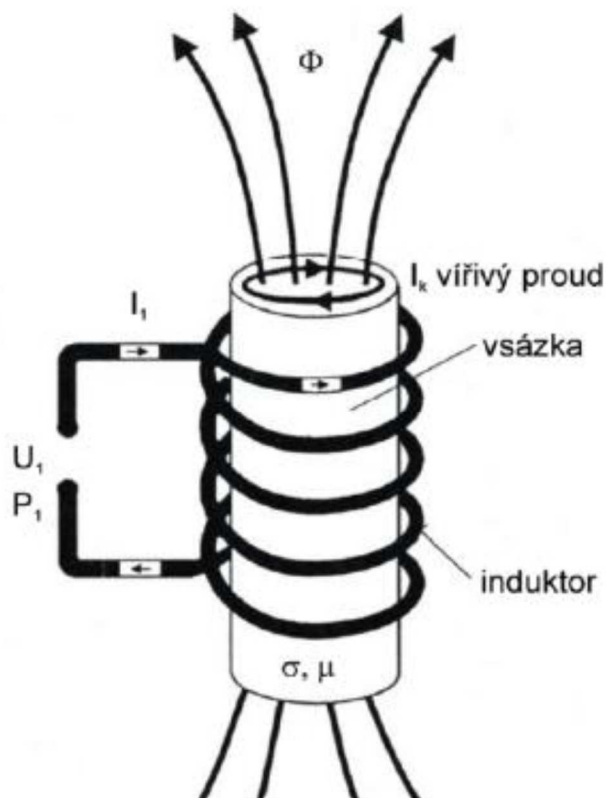
$$1. \operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

$$2. \operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$3. \operatorname{div} \mathbf{D} = \rho$$

$$4. \operatorname{div} \mathbf{B} = 0$$

Vodivá vsázka, která je v blízkosti induktoru je vystavena elektromagnetickému vlnění z cívky, které má za následek naindukování napětí uvnitř materiálu, díky kterému v materiálu vzniknou vířivé proudy.



Obr. 2.2.1 Princip indukčního záření [4]

Programy určené pro simulaci elektromagnetického pole se zakládají na řešení parciálních diferenciálních rovnic pro vektorový potenciál

$$\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A}$$

Z první a druhé Maxwellovy rovnice lze vyjádřit intenzitu elektrického pole ve tvaru

$$\mathbf{E} = -\text{grad}\varphi - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \mathbf{E}_v + \mathbf{E}_i$$

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_v - \gamma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = \mathbf{J}_v + \mathbf{J}_i$$

kde $\mathbf{J}_v = \gamma \mathbf{E}_v$ je proudová hustota vnučeného proudu, odpovídá proudu inktozem přepojeného k napájecímu zdroji, $\mathbf{J}_i = \gamma \mathbf{E}_i$ je proudová hustota vířivých proudů.

Vzhledem k vysokým frekvencím, můžeme vzniklé elektromagnetické pole považovat za kvazistacionární pole (typ nestacionárního pole ve, kterém uvažujeme časově proměnné proudy), pokud platí:

$$J_{ef} \gg \varepsilon \omega E \rightarrow \gamma \gg \varepsilon \omega$$

V tomto případě lze zanedbat Maxwellův posuvný proud a tím dostat z druhé Maxwellovy rovnice a základního vztahu $\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A}$

$$\text{rot } \frac{1}{\mu} \text{rot } \mathbf{A} = \gamma \mathbf{E}_v - \gamma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}$$

Za předpokladu lineárního prostředí ($\mu = \text{konst.}$), výsledná parciální diferenciální rovnice pro vektorový potenciál má tvar

$$\Delta \mathbf{A} = \mu \gamma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \mu \mathbf{J}_v$$

Pro výpočet je potřeba znát počáteční podmínky, podmínky na rozhraní a formulovat okrajové podmínky. Programy založené na metodě konečných prvků podmínky na rozhraní nevyžadují, protože vzhledem k použité metodě jsou tyto podmínky splněny automaticky.[24]

2.3 Rovnice pro teplotní pole

V případě, kdy je látka v pevném skupenství, při konstantním tlaku, měrné tepelné kapacitě, nulové viskozitě a nulové rychlosti ohříváných součástí, platí Fourier-Kirchhoffova rovnice

$$C_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = -\text{div}(-\lambda \text{grad } T) + w_j$$

C_p - tepelná kapacita, ρ - hustota, T - teplota, t - čas, λ - tepelná vodivost, w_j - představuje zdroj (v našem případě Jouleovy ztráty (W))

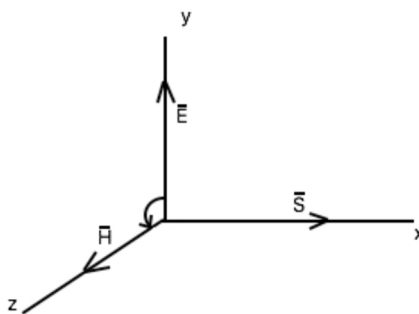
Pro výpočet je potřeba definovat počáteční podmínky. Podmínky na rozhraní pole, jsou obdobně jako rovnice pro elektromagnetické pole, vzhledem k použité metodě konečných prvků automaticky splněny. [24]

2.4 Poyntingův vektor

V problematice indukčního ohřevu se pro výpočty používá tzv. Poyntingův zářivý vektor. Vyjadřuje hustotu toku elektromagnetické energie, které projde plochou za jednotku času.

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \text{ (W/cm}^2\text{)}$$

Poyntingův vektor je kolmý na rovinu, v níž leží intenzita elektrického pole \mathbf{E} a vektor magnetického pole \mathbf{H} . V směr vektoru lze jednoduše určit podle pravidla levé ruky. Jsou-li prsty ve směru \mathbf{E} a vstupuje-li \mathbf{H} do dlaně, pak palec ukazuje směr Poyntingova vektoru. [21]



Obr. 2.4.1 Směr Poyntingova vektoru [25]

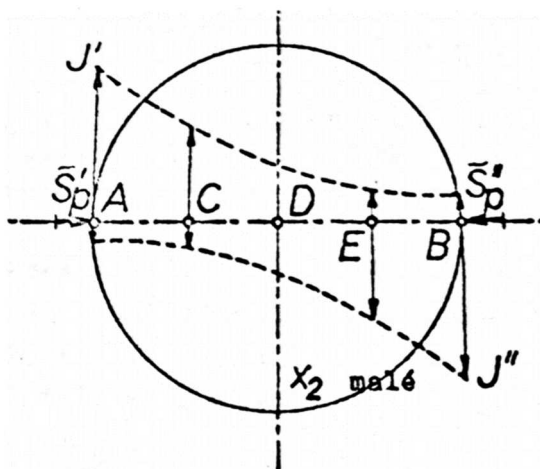
2.5 Hloubka vniku a elektromagnetická průzařnost

S narůstající frekvencí dochází ve vsázce ke skin efektu, který tlačí vzniklý vířivý proud k povrchu vsázky. To znamená, že čím vyšší frekvence, tím nižší hloubka vniku.

$$a = \sqrt{\frac{2}{\omega \gamma \mu_0 \mu_r}}$$

ω - úhlová rychlost [$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$], γ - konduktivita [$\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$], μ_r - relativní permeabilita, μ_0 - permeabilita vakua

Při volbě správné frekvence je ovšem nutné vyvarovat se elektromagnetické průzařnosti. Jedná se totiž o nežádoucí jev, který může nastat při nevhodně zvoleném kmitočtu. Tento jev lze nejlépe vysvětlit na obr. 2.5.1.



Obr. 2.5.1 Průzařnost vsázky[2]

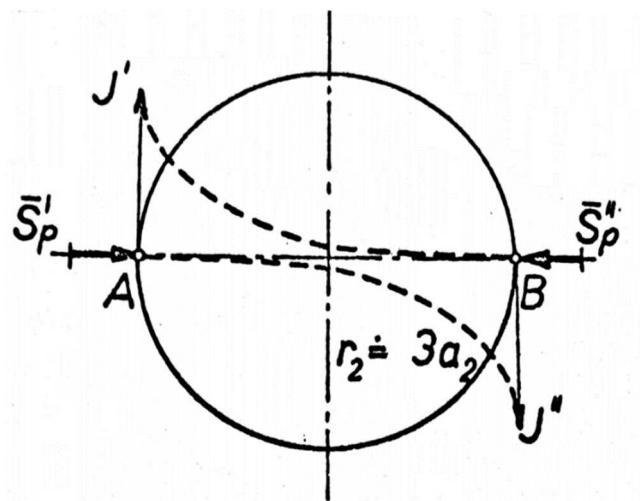
Na válcovou vsázku dopadá elektromagnetické záření znázorněné vektory $S_{p'}$ a $S_{p''}$ v protilehlých bodech A a B. Hustota toků vyvolaných elektromagnetickým tokem je znázorněna J' a J'' . Obě hustoty mají opačný smysl a výsledný tok je dán jejich rozdílem. Obě elektromagnetická vlnění tedy pracují proti sobě a navzájem se zeslabují, to má vliv na výsledný naindukovaný proud, který je kvůli tomu menší a to má za následek nižší účinnost přenosu energie z induktoru do vsázky. [2]

K zabránění tohoto jevu, se musí zvolit optimální hloubka vniku, který je definován jako:

$$r_2 = (2,5 \div 3,0)a_2$$

Kde r_2 je poloměr vsázky a a_2 hloubkou vniku.

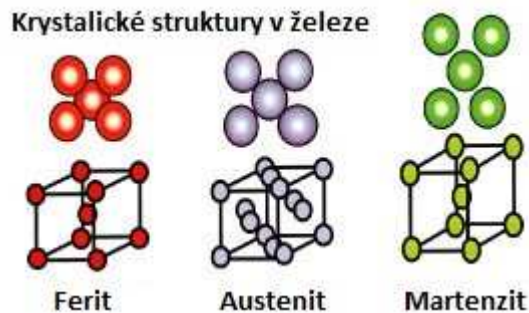
Na obr. 2.5.2 je znázorněn ideální průběh, ve kterém hustoty proudů směrem ke středu vsázky klesají natolik, že se jejich hodnota uprostřed vsázky téměř rovná nule. Proudové hustoty tak nepůsobí proti sobě, a proto je i výsledná účinnost vyšší. [2]



Obr. 2.5.2 Průzařnost vsázky[2]

2.6 Austenit

Austenitizace je termín, při kterém dochází, při určité teplotě, ke změně ferritu na austenit. Ferit se vyskytuje v rozmezí teplot od pokojové do 720 °C. Pokud hraniční teplotu překročíme, začne se tvořit austenit. U materiálu s nižším obsahem uhlíku se ferit kompletně promění na austenit při teplotě kolem 840 °C. [20]

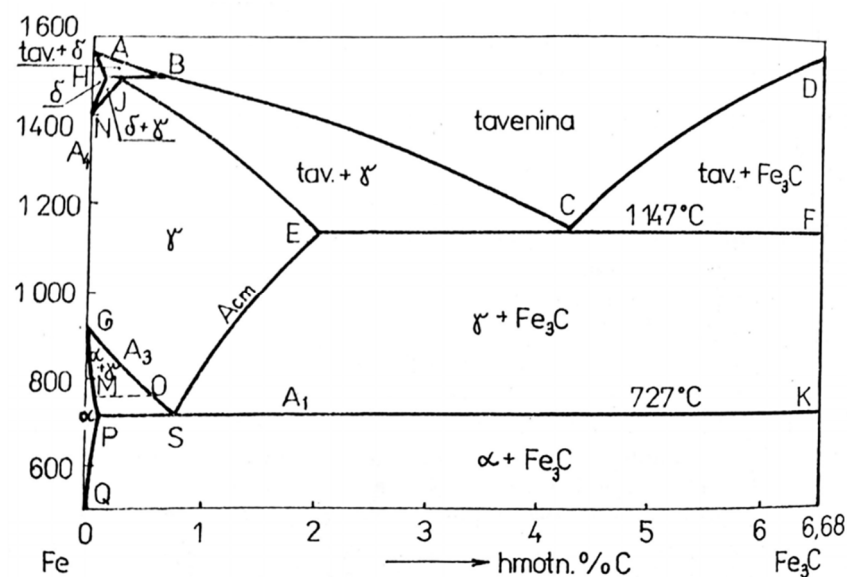


Obr. 2.6.1 Struktury krystalů ferritu, austenitu a martenzitu [20]

Austenit je tedy tuhý roztok uhlíku v železe γ . Při vysokém přechlazení austenitu, vzniká nerovnovážený přesycený tuhý roztok uhlíku v železe α - martenzit [1].

2.7 Kalicí teplota a výsledná tvrdost

Kalicí teplota leží 30-50°C nad kritickým bodem A_3 nebo A_1 (záleží, jestli jde o podeutektoidní nebo nadeutektoidní ocel).



Obr. 2.7.1 Diagram metastabilní soustavy Fe-Fe₃C s fázovým popisem [1]

Podutektoidní ocel má po zakalení malé množství zbytkového austenitu. Pokud by byla tato ocel kalena nižší teplotou než A_3 , nedošlo by k úplné austenitizaci a výsledkem by byla heterogenní martenziticko-feritická struktura. To by mělo za následek velké vnitřní pnutí a nižší tvrdost. [1]

Nadeutektoidní ocel má při správném zakalení teplotu A_1 ve své struktuře jak martenzit a zbytkový austenit tak i nerozpuštěný sekundární cementit, který nikterak nesnižuje tvrdost ani křehkost. Kalicí teploty nad A_{cm} by se negativně projevíly ve zhrubnutí austenitického zrna a tvrdost klesá úměrně se zvyšujícím se množstvím zbytkového austenitu. [1]

2.8 Curieův bod

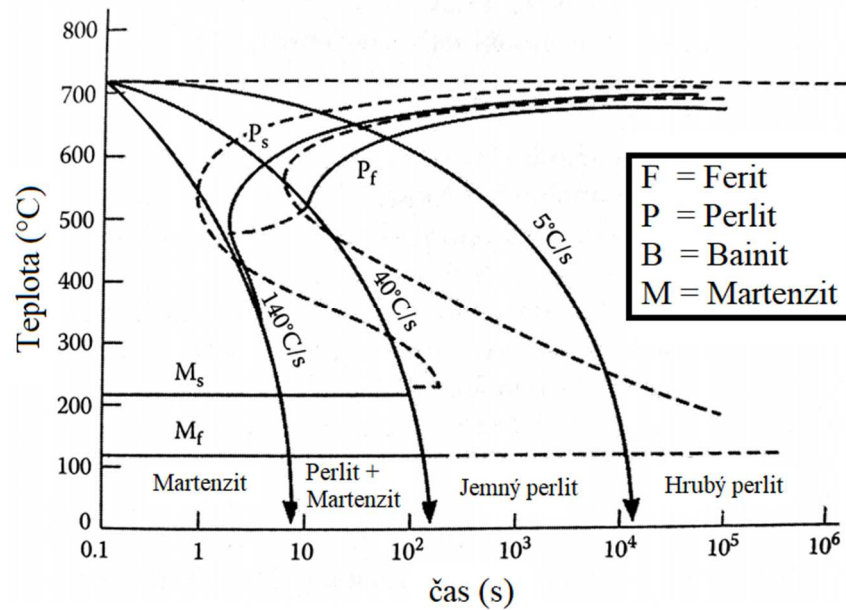
Curieův bod je teplota, při které materiál ztrácí magnetické vlastnosti (ocel 760°C). To má za následek zpomalení ohřevu v případě povrchového kalení prudké zvýšení hloubky průniku magnetického pole. Zpomalení ohřevu tak omezuje i přehřátí povrchu. [16]

2.9 Fázové přeměny ocelí

Průběhy fázových přeměn ocelí jsou ovlivněny chemickým složením materiálu, vlastnostmi kalicího média a intenzitou ochlazování. Se správným typem materiálu a správným tepelným cyklem, tedy můžeme dosáhnout požadovaných vlastností. [1]

Ochlazováním tuhého roztoku austenitu může dojít ke třem základním transformacím

- Perlitická transformace- probíhá při nejvyšších teplotách
- Bainitická transformace- ve střední oblasti transformačních teplot
- Martenzitická transformace- při vysokém přechlazení nevyžaduje žádnou difúzi a tak může probíhat velkou rychlostí i při nízkých teplotách. [1]



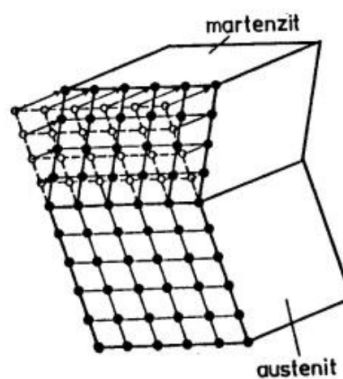
Obr. 2.9.1 Vliv intenzity chlazení austenitu na vzniklé struktury [6]

Během kalení chceme docílit jenom martenzitické transformace, a tak je způsob chlazení klíčovým prvkem kalicího procesu. Musíme teplotu vsázky snížit tak rychle, abychom se vyvarovali ostatním nežádoucím transformacím.

2.10 Martenzitická transformace

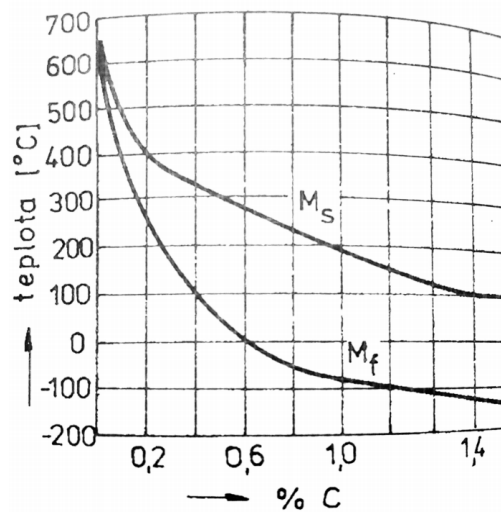
Dostatečně rychlým ochlazení austenitu (tak, aby austenitická struktura prošla rychle oblastí teplot perlitické a bainitické reakce beze změny) docílíme martenzitické transformace.

Chemické složení vznikajícího martenzitu je totožné se složením původního austenitu a přesuny atomů při transformaci jsou možné jen na vzdálenosti kratší než je meziatomová vzdálenost v mřížce. [1]



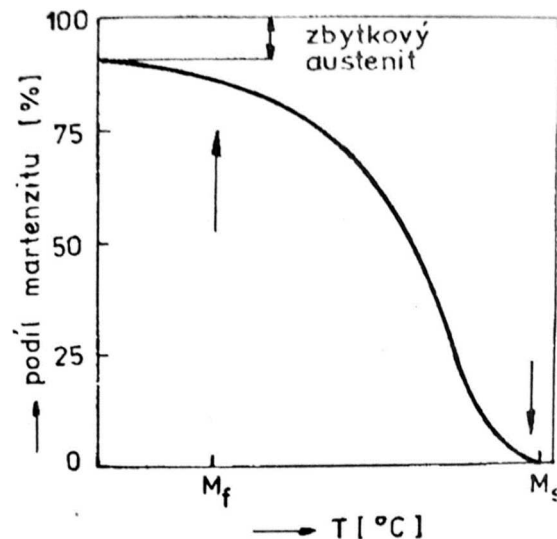
Obr. 2.10.1 Schéma martenzitické transformace [1]

Teploty, při které začíná martenzitická transformace M_s (Martenzit start) a kdy končí M_f (Martenzit finish), nezávisí na rychlosti ochlazování austenitu, ale na obsahu uhlíku ve vsázce.[1]



Obr. 2.10.2 Vliv obsahu uhlíku na teploty M_s a M_f [1]

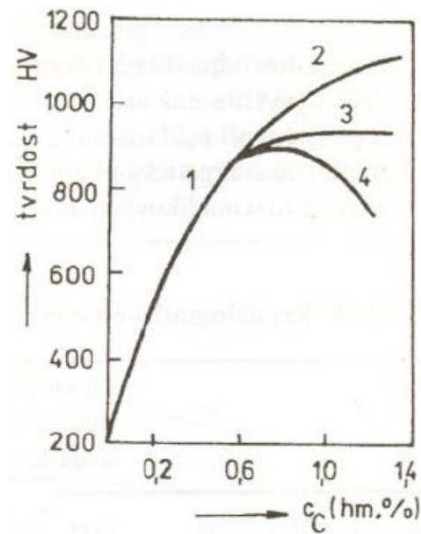
Po dosažení teploty M_s dochází ihned k martenzitické reakci. Ke každé nižší teplotě odpovídá pro danou ocel určitý podíl martenzitu. Reakce je téměř okamžitá a proto není nutné materiál v daných teplotách udržovat po delší dobu. Rychlost růstu částic je na úrovni rychlosti zvuku.[1]



Obr. 2.10.3 Martenzitická křivka [1]

Z obr. 2.10.3 je patrné, že při dosažení teploty M_f zůstává ve vsázce určitý podíl austenitu, ale transformace už probíhá tak pomalu, že je považována za ustálenou. [1]

Obsah uhlíku má významný vliv na výslednou tvrdost. Uhlík je totiž nedílnou součástí austenitu, který se posléze mění na martenzit.



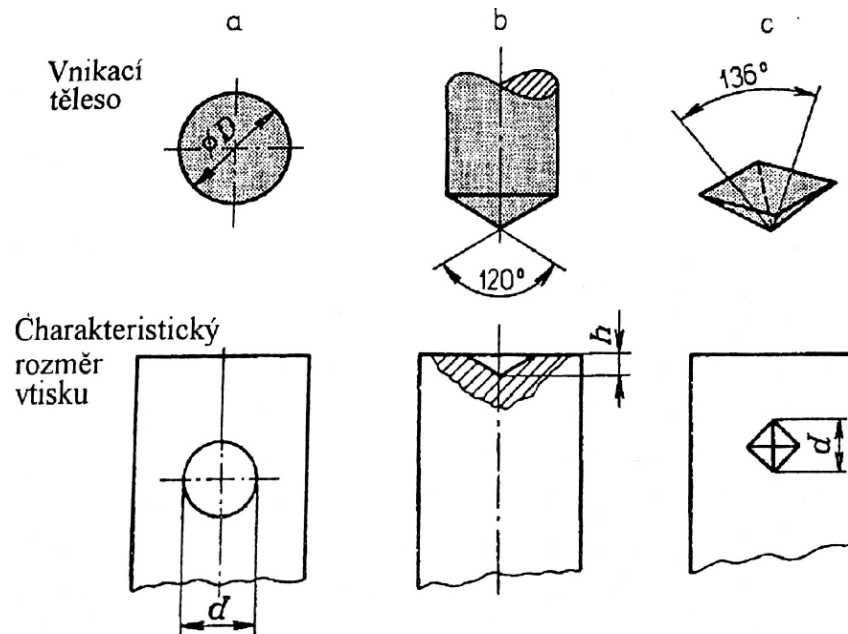
Obr. 2.10.4 Závislost tvrdosti na obsahu uhlíku [17]

Na obr. 13 jsou znázorněny 4 křivky:

- 1- martenzitu v podeutektoidní oceli kalené z teploty nad A_{c3}
- 2- pouze martenzitu v nadeutektoidní oceli kalené z teploty nad A_{cm}
- 3- struktury tvořené martenzitem a sekundárním cementitem v nadeutektoidní oceli kalené z teploty nad A_{c1}
- 4- struktury tvořené martenzitem a zbytkovým austenitem v nadeutektoidní oceli kalené z teploty nad A_{cm} [17]

2.11 Měření tvrdosti u kovových materiálů

Tvrdot se měří u kovů pomocí vnikací (indentační) metody. Základem této metody je vnikací těleso, které pod zátěžnou silou vytvoří plastickou deformaci v měřeném tělese. Vnikací metody se liší dle tvaru vnikacího tělesa. [11]



Obr. 2.11.1 Druhy vnikacích těles [11]
a) Brinella b) Rockwella c) Vickerse

Vickersova metoda

V Evropě je nejrozšířenější Vickersova metoda, u které je vnikacím tělesem jehlan o čtvercové základně a vrcholovém úhlu 136° . Vickersovo zátěžné číslo je definováno jako poměr zátěžné síly a plochy vtisku. [11]

$$HV = 1,854 F/d^2 \text{ [kp/mm}^2\text{]}$$

Kde F je zátěžná síla a d je střední velikost úhlopříčky vtisku. Vzhledem k dlouholeté praxi a tabulkám uvedených v normách (přepočet d na HV) se drží staré konvence a jednotka se tak uvádí bezrozměrná. Protože je metoda aplikovaná jen na malou část testovaného materiálu a proto je spíše vhodná pro měření homogenních materiálů. [11]

Rockwellova metoda

V našem případě bude v práci zmiňována i Rockwellova metoda, protože je nejvhodnější pro měření válcových vsázek. Vnikací těleso je zde malá kulička ($d=1/16''$, příp. $d=1/8''$), nebo diamantový kužel s vrcholovým úlem 120° . [11]

Na rozdíl od Vickerse, se výsledná tvrdost se odečítá na stupnici hloubkoměru, který je součástí tvrdoměru. [11]

Převod tvrdostí

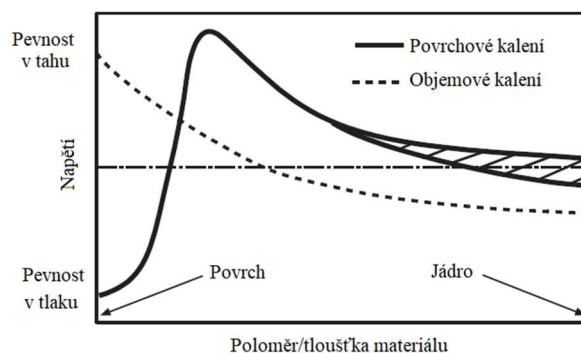
Výsledky jednotlivých metod můžeme pomocí tabulek převést na námi potřebovanou.

Tab.1 Převod tvrdostí mezi jednotlivými metodami

Převod tvrdosti					
Vickers	Rockwell	Vickers	Rockwell	Vickers	Rockwell
HV	HRC	HV	HRC	HV	HRC
680	-	550	52,3	440	45,3
660	-	540	51,7	420	44,5
640	57,3	530	51,1	400	43,6
620	56,3	520	50,5	380	42,7
600	55,2	510	49,8	360	41,8
590	54,7	500	49,1	340	40,8
580	54,1	490	48,4	320	39,8
570	53,6	480	47,7	300	38,8
560	53	460	46,1		

2.12 Deformace vzniklá kalením

Při kalení vznikají v materiálu mechanické napětí, které může mít za následek prasknutí vsázky, ale také celkovou deformaci vsázky.



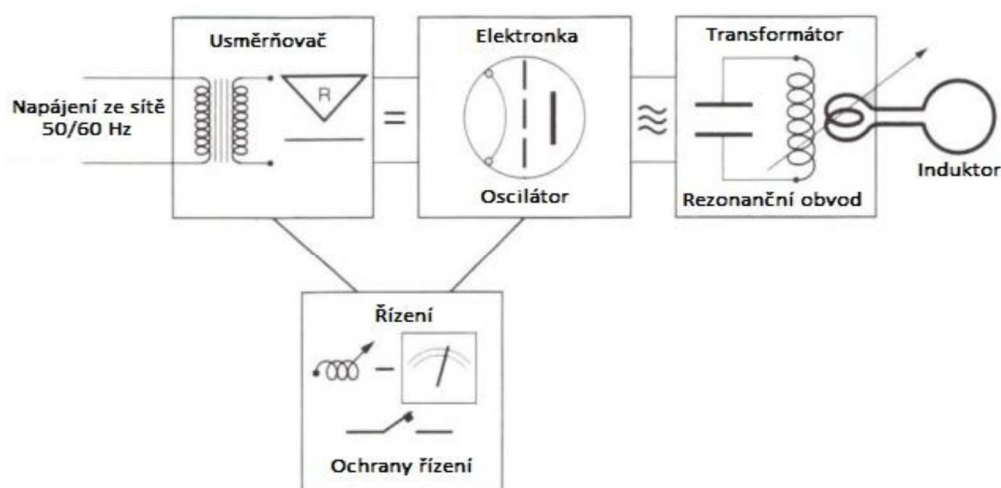
Obr. 2.12.1 Rozložení vnitřního napětí v průřezu vsázky [3]

Vzniklé pnutí mezi nově vzniklými vrstvami se nesmí zanedbat. Pokud napětí mezi vrstvami překročí určitou mez, může během kalení dojít k prasknutí vsázky.

Výpočet výsledné deformace je obtížný, záleží jak na kalicím médiu, geometrii vsázky, tak i na geometrii použitého induktoru. Deformace se vzhledem k obtížnosti výpočtu obvykle ověřuje provedením laboratorním experimentem. [5]

2.13 Blokové schéma kalicího zařízení

Kalicí zařízení je tvořeno usměrňovačem, oscilátorem, řídicími obvody, rezonančním obvodem a transformátorem, na jehož sekundární straně je připojen induktor.



Obr. 2.13.1 Blokové schéma silové částí indukčního kalicího zařízení[7]

2.13.1 Transformátor

Účinnost transformátoru úměrně klesá s velikostí zatížení.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P}{P_1} \cdot 100$$

kde:

$\Delta P = \Delta P_{FE} + \Delta P_{Cu}$ (W) – ztráty v transformátoru

$P_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi_1$ (W) – činný příkon transformátoru

$P_2 = U_2 \cdot I_2 \cdot \cos\varphi_2$ (W) – činný výkon transformátoru

Účinnost je tedy závislá na jmenovitém výkonu transformátoru, čím vyšší jmenovitý výkon vůči zatížení, tím vyšší účinnost. Může dosahovat hodnot od 85-99%. [9]

2.13.2 Induktor

U induktoru můžeme sledovat, jak geometrické parametry, materiálové a elektrické/indukční.

- Materiálové

K tvorbě induktorů se převážně používá vysoce čistá měď. Z hlediska elektrické vodivosti, tepelné vodivosti, tvárnosti, pevnosti a nízké ceny se jedná o více než vhodný materiál. [8]

Kalicí induktor je zatěžován velkým proudem a to má za následek oteplování induktoru. Vodiče jsou oteplovány i od samotné vsázky a přítomnými vířivými proudy, proto je induktor tvořen dutým vodičem, v jehož dutině protéká chladicí medium. Pokud by induktor nebyl aktivně chlazen, začal by jeho elektrický odpor rapidně narůstat, to by mělo za následek pokles proudu, který by se přenesl k poklesu magnetického záření a tak i poklesu vířivých proudů ve vsázce.

Vzhledem k tomu, že induktorem tečou proudy o vysoké frekvenci, je přítomen skin efekt a proto dutina v induktoru neovlivňuje jeho elektrickou vodivost. Vhodná tloušťka stěny induktoru by měla být alespoň dvakrát větší, než je hloubka vniku. [8]

Tab. 2 Doporučené hodnoty pro velikost tloušťky stěny induktoru pro různé frekvence [8]

Minimální tloušťka induktoru pro různé frekvence	
Frekvence, kHz	mm
1	4,25
3	2,45
10	1,34
30	0,78
135	0,37
200	0,30
350	0,23
450	0,20

Jako chladicí médium induktoru se používá voda. Intenzita chlazení se může regulovat průtokem a teplotou.

- Geometrické

Induktory jsou převážně vyráběny ve tvaru solenoidu. K docílení vysoké účinnosti si musíme uvědomit, jak funguje magnetický odpor, respektive magnetická vodivost.

Magnetický odpor lze vyjádřit tvarem:

$$R_m = \frac{l}{\mu \cdot S} (\text{H}^{-1}; \text{H} \cdot \text{m}^{-1}, \text{m}, \text{m}^2)$$

l - vzduchová mezera (m)

μ - absolutní permeabilita ($\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$), je daná součinem permeability vakua a relativní permeability daného prostředí

S - průřez prostoru (m^2)

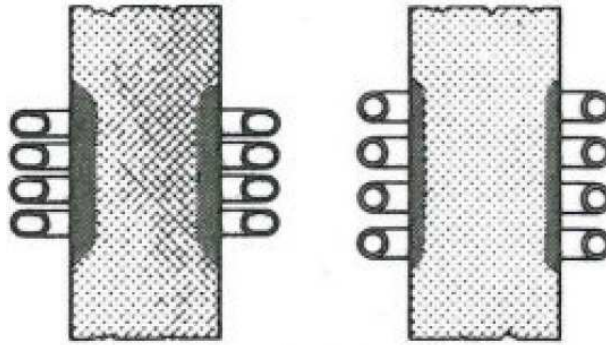
Obdobně, jako elektrická vodivost, je magnetická vodivost převrácená hodnota jeho odporu:

$$G_m = \frac{1}{R_m} (\text{H}; \text{H}^{-1})$$

Velká vzduchová mezera má za následek velký magnetický odpor a tím malou magnetickou vodivost. To má za následek snížení magnetického toku, jehož výsledkem je snížená velikost vířivých proudů.

Účinnost přenosu energie mezi induktorem a vsázkou klesá s kvadrátem vzdálenosti. To popisuje Biotův-Savartův zákon, který říká, že síla magnetického pole (dB) je nepřímo úměrná kvadrátu vzdálenosti. A proto by měl být induktor co nejbližší. [8]

Vzdálenost jednotlivých závitů musí být dostatečně velká, aby nedocházelo k nežádoucím mezizávitovým zkratům. Obvykle se pohybuje v rozmezí od 1,6 do 3,2mm. [8]



Obr. 2.13.2 Vliv vzdáleností jednotlivých závitů [8]

Na obrázku můžeme vidět, že induktry s malou mezizávitovou vzdáleností dokáží prohřát hlubší vrstvu než induktry s velkou mezizávitovou vzdáleností. [8]

- Elektrické

Pokud budeme uvažovat stejné nastavení zdroje, tak vyšší počet závitů zvětšuje hustotu elektromagnetického toku z daného induktoru. S nárůstem závitů roste indukčnost a napětí, protékající proud ale klesá. V případě velkých činných ztrát v induktoru (vzniklé odporem mědi), je možné přidat jeden závit a tím snížit protékající proud, který tyto ztráty sníží, a zároveň se nezmění výsledná teplota vsázky. [8]

2.13.3 Rezonanční obvod

Je tvořen kondenzátory, které jsou připojeny v sérii s induktorem. Jsou používány k naladění frekvence potřebné pro induktor a omezení jalových odběrů ze sítě. Dimenzovány jsou na dle výkonu použitého induktoru. [8]

2.13.4 Chlazení

Jak bylo zmíněné v předchozí kapitole, je chlazení jedna z nejdůležitějších součástí kalicího procesu. Až 90% problémů vzniklých během kalení lze připisovat špatnému chlazení. [8]

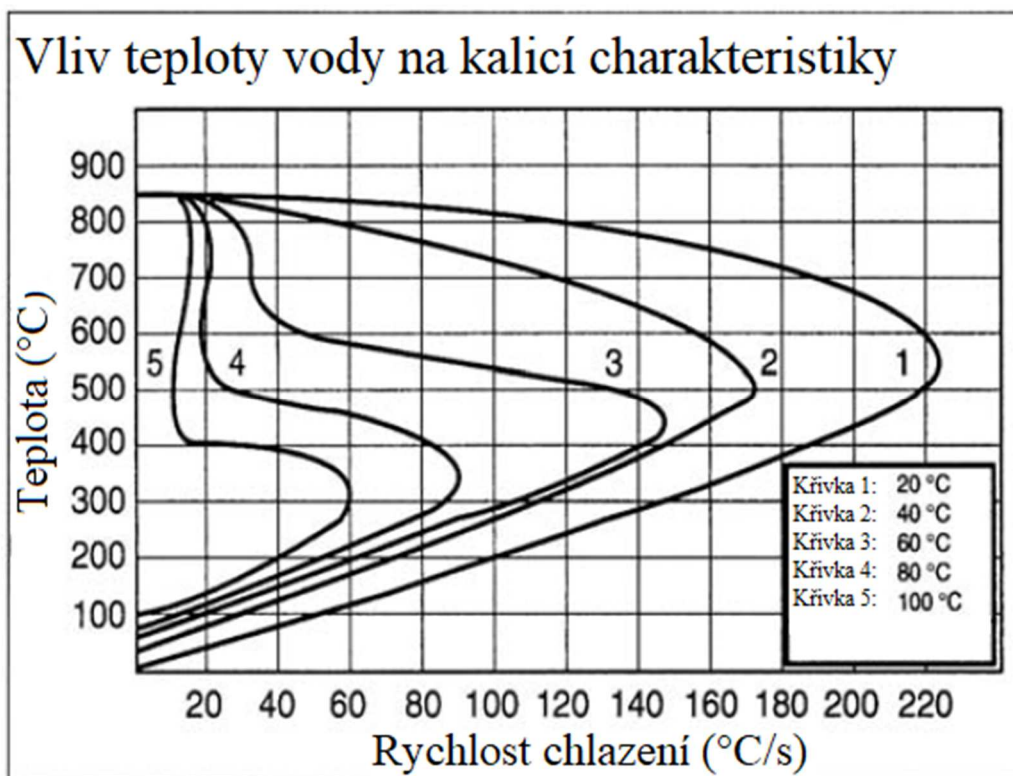
Chlazení můžeme vylepšit změnou tvaru a funkčností kalicí sprchy, nebo změnou kalicího media (teplotou, nebo složením).

Dle zvoleného média se mění ochlazovací charakteristiky. Intenzita ochlazování se značí H , znázorňuje rychlost, s jakou povrch výrobku dosahuje teplot prostředí. Jedná se o proměnnou veličinu, vztaženou k intenzitě ochlazování ve stojaté vodě, která má teplota 25°C.

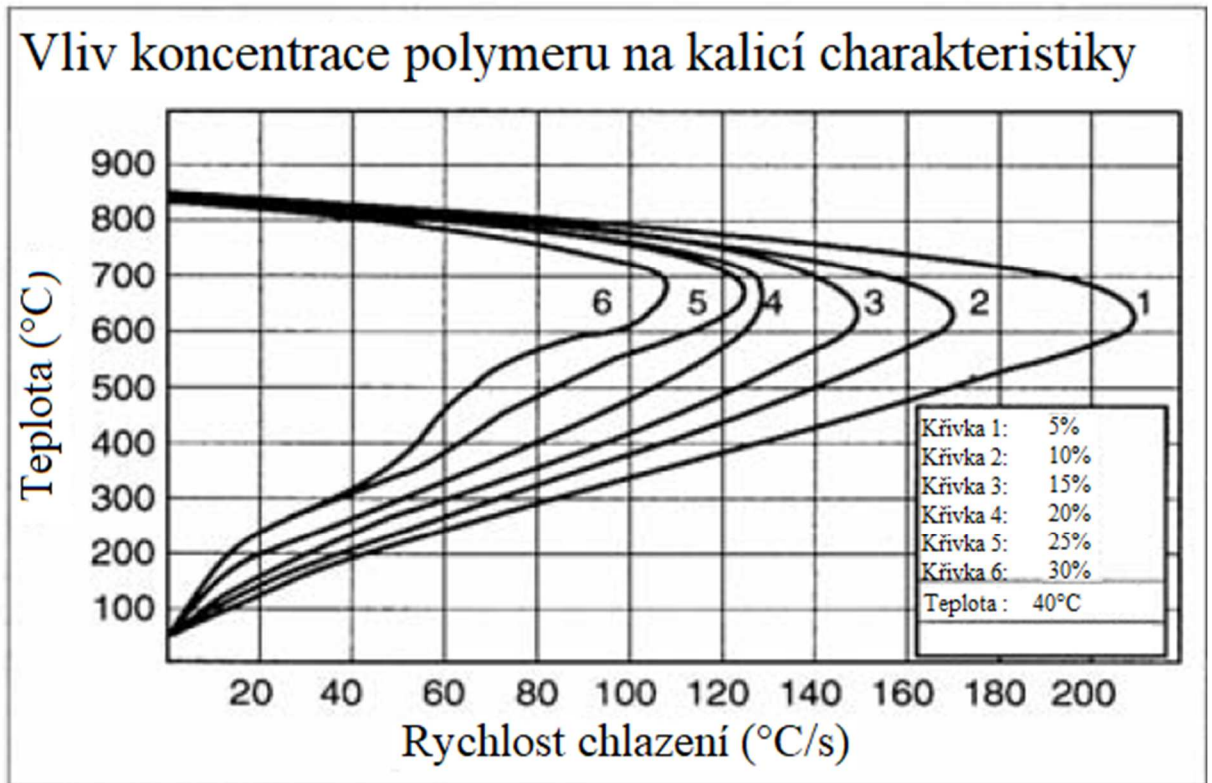
Tab. 3 Intenzita ochlazování H v různých prostředích [10]

Pohyb		Ochlazovací prostředí			
prostředí	Výrobku	vzduch	Olej	voda	vodní roztok
ne	Ne	0,02	0,3	1,0	2,2
ne	Pomalý	-	0,4 až 0,6	1,5 až 3,0	-
ne	Rychlý	-	0,6 až 0,8	3,0 až 6,0	7,5
rychlý	Ne	0,08	1,0 až 1,7	6,0 až 12,0	-

Na obr. 2.13.3 je patrné, jak rozdílné jsou průběhy ochlazování vzhledem k teplotě kalicího média. Jak bylo zmíněné v předchozí kapitole, je pro kalení důležitý dostatečně rychlý teplotní spád, aby došlo k martenzitické transformaci. Z toho důvodu je nejvhodnější chladná voda, případně voda obohacena polymery (obr. 2.13.4).



Obr. 2.13.3 Vliv teploty kalicí vody na ochlazovací křivku [18]



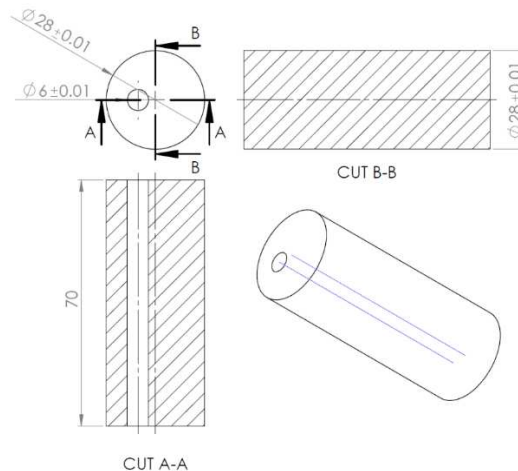
Obr. 2.13.4 Vliv koncentrace polymerů ve vodě na ochlazovací křivku [18]

Se zvyšující koncentrací polymerů se výrazně snižuje intenzita ochlazování. Hlavním přínosem polymerů je omezení parního polštáře, který vzniká při dopadu kalicího média na rozehrátou vsázku. Odpařené kalicí medium působí jako tepelný izolátor a zabraňuje efektivnímu chlazení. [3]

3 Experimentální kalení ocelové vsázky

V rámci této práce bylo provedeno několik experimentálních měření, které si kladly za cíl zjistit, jak může teplota a složení kalicího média ovlivnit kalicí proces a také, jaký má kalicí proces vliv na geometrickou deformaci vsázky.

3.1 Parametry vsázky



3.1.1 Rozměry vsázky [12]

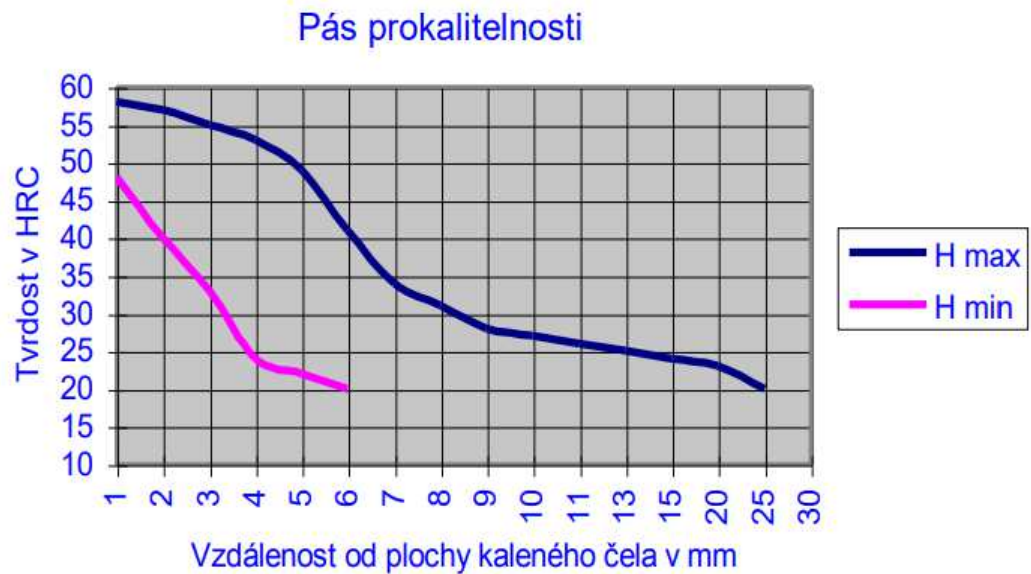
Materiálem pro kalení byla zvolena středně uhlíkatá ocel EN C35E. Jedná se o ušlechťenou ocel, která vyniká vysokou prokalitelností a díky zvýšenému obsahu síry disponuje i dobrými vlastnostmi pro obrábění.

Tab. 4 Vlastnosti materiálu

Prvek	C	Mn	Si	P	S
Obsah v %	0.36	0.6	0.22	0.011	0.015

Kalicí teplota leží mezi 840 až 880°C. V případě kalení na spodní hranici tohoto rozsahu se doporučuje jako kalicí prostředí voda a při horní hranice olej. Popřípadě lze použít i voda obohacena polymery. [13]

Výše zmíněné doporučení však neplatí pro zkoušky prokalitelnosti.

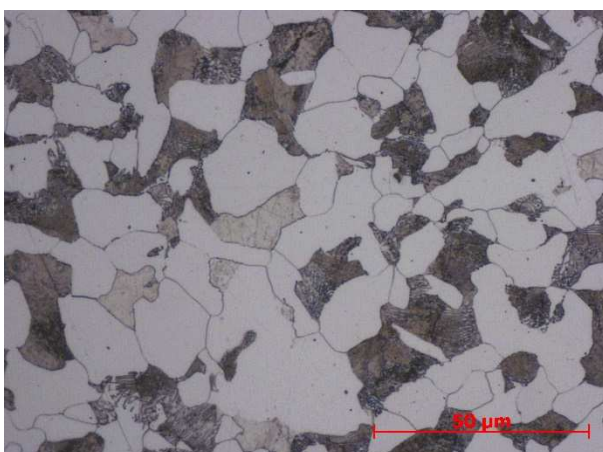


Obr. 3.1.2 Pás prokalitelnost oceli C35e [13]

Tab.5 Přehled použitých vsázek [12]

	Označení vzorků	1,2,3	4,5,6	7, 8, 9	10, 11, 12	13, 14, 15	16, 17, 18	19, 20, 21	22, 23, 24
Koncentrace použitých polymerů	[-]	4.2	8.2	12.5	-	-	-	-	-
Teplota vody	[°C]	24	24	24	20	35	55	20	20
Otáčky	[ot*s ⁻¹]	11.1	11.1	11.1	11.1	11.1	11.1	6	20

Dodaná vsázka byla normalizačně žhána. Výchozí struktura pro povrchové kalení je feriticko-perlitická (obr. 3.1.1). Velká část perlitu je lamelární a relativně jemná. Velikost původního austenického zrna je 5 dle ČSN EN ISO 643. [12]



Obr. 3.1.3 Mikrostruktura oceli ČSN EN C35 E [12]



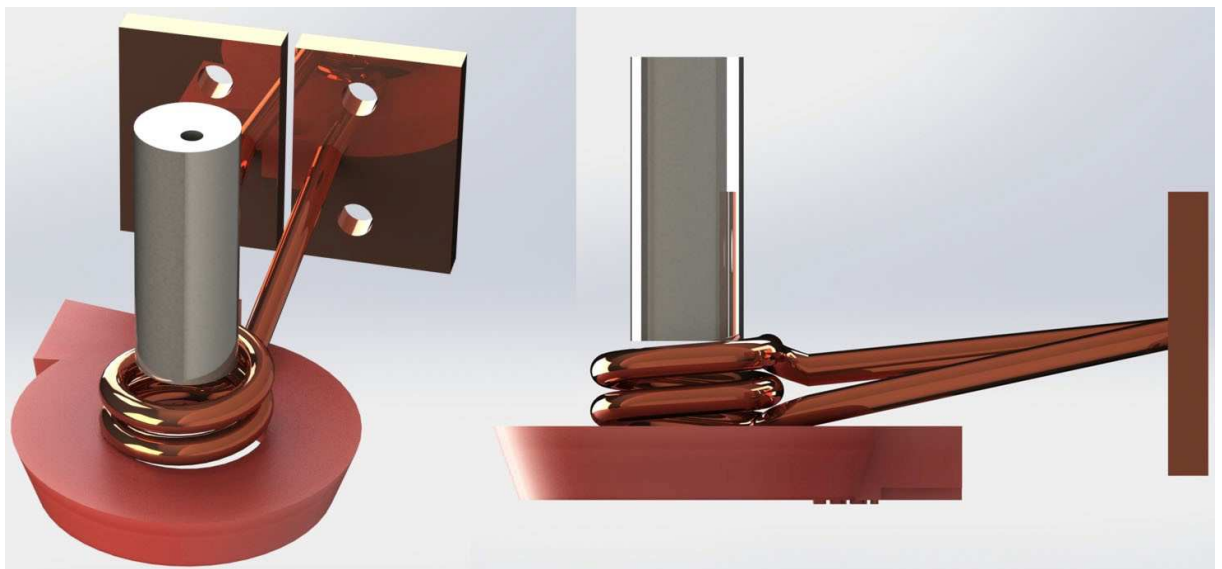
Obr. 3.1.4 Příčný řez zakalenou vrstvou [12]

3.2 Elektrické parametry

Napětí na vstupu vysokofrekvenčního transformátoru bylo 2 120V (dané střídačem) a na výstupu 245 V. Po umístění vsázky do induktoru jsme našli rezonanční frekvenci 25 kHz, při které tekla proud 75 A. Rezonanční frekvenci obvodu můžeme ovlivnit volbou kompenzačních kondenzátorů. V našem případě se jednalo o trojici sériově zapojených kondenzátorů o kapacitě 0,3 μ F. [12]

Činný příkon celého systému 13 kW se skládal ze ztrát na induktoru 0,9 kW, ztrát v transformátoru 3,3 kW, ztrát v generátoru a na kondenzátorech 0,8 kW. Přenesený výkon do vsázky tedy činil 8 kW. [12]

3.3 Kalicí prostředí



Obr. 3.3.1 Induktor se sprchou a válcovou vsázkou ve startovací pozici [12]

Pro chlazení byla využita sprcha s vnitřním průměrem 45mm, vyrobená na fakultě pomocí 3D tiskárny. Vnitřní stěnu tvoří 200 trysek o průměru 1 mm, které ochlazují vsázku pod úhlem 20°. [12]

3.4 Průběh experimentu

Na začátku kalicího procesu je zapnuta kalicí sprcha společně s posuvem a indukčním ohřevem, který má nastavené zpoždění 9s. Vsázka se posouvá směrem dolů do induktoru prvními 9mm rychlostí 1 mm s⁻¹ než se spodní čelo vsázky ocitne v induktoru. Poté se spíná

indukční ohřev a posuv zrychluje na 2 mm s^{-1} a sjíždí dolů o 75 mm (výška vsázky). Následně je indukční ohřev vypnut, posuv skokově uskočí o 20 mm dolů rychlostí 75 mm s^{-1} , aby se vrchní čelo vsázky rychle ochladilo. [12]

Poté se vsázka pomalu pohybuje směrem nahoru po dráze 25mm (8,3 s), aby došlo k jejímu celkovému dochlazení. Následně se posuv vrací zpět nahoru do počáteční polohy. [12]

3.5 Měřené parametry

Celkový příkon spolu s ostatními vstupními parametry byl měřen pomocí síťového multimetru Nemo 96HD. Průměrná hodnota příkonu celého systému byla pro všechny vsázky 13 kW. Chladicí ztráty všech komponentů v systému, byly kalorimetricky monitorovány. Rozdíl příkonu a ztrát lze považovat za výkon přenášený do vsázky. V našem případě přenášený výkon pro všechny vsázky vycházel na 8 kW. [12]

Teplota na povrchu vsázky byla měřena pyrometrem Kleiber 273, který byl namířen na mezeru mezi závity. Nejednalo se tedy o maximální teplotu, které vsázka dosahuje až po průchodu induktorem. Měření maximální teploty vsázky není vzhledem k umístění kalicí sprchy a přítomnému kalicímu médiu možné. [12]

3.6 Vliv teploty kalicího média na kalicí proces

Jak bylo zmíněno v předchozí kapitole, rychlost ochlazení vsázky je klíčová pro dosažení čisté martenzitické transformace.

Aby nedošlo k příliš velkému mechanickému pnutí, vlivem vzniku nových struktur, je důležité zjistit správnou ochlazovací charakteristiku pro daný materiál.

V experimentu bylo jako kalicí médium použita voda o teplotách 20, 35 a 50°C. Nižší teploty mají kladný vliv na výslednou tvrdost, ale hrozí prasknutí kalení vrstvy, vlivem vysokého pnutí.

Naopak vysoké teploty kalicího prostředí omezují vznik prasklin, ale negativně ovlivňují výslednou tvrdost, z důvodu vzniku i jiných než martenzitických transformací. [12]

3.7 Užití polymerů v kalicím médiu

Polymery v kalicím prostředí omezují vznik teplotního polštáře a tím zvyšují účinnost chlazení vsázky. Užití 100% polymeru by mělo chladicí charakteristiky blížíci se k oleji. Proto se polymer míchá s vodou, aby kalicí prostředí disponovalo dostatečně velkou intenzitou chlazení vody a polymer přispíval k omezení teplotního polštáře.

V experimentu jsme použili polymer Serviscol 98S-D1 smíchaný se studenou vodou o teplotě 20°C v koncentracích 4,2%, 8,2% a 12,5%. [12]

3.8 Deformace vzniklá kalením

Pnutí vzniklé teplotními rázy a změnou vnitřních struktur, mají vliv na celkovou geometrickou deformaci vsázky. V případě povrchového kalení vzniká navíc pnutí i mezi kalenou vrstvou od středu vsázky.

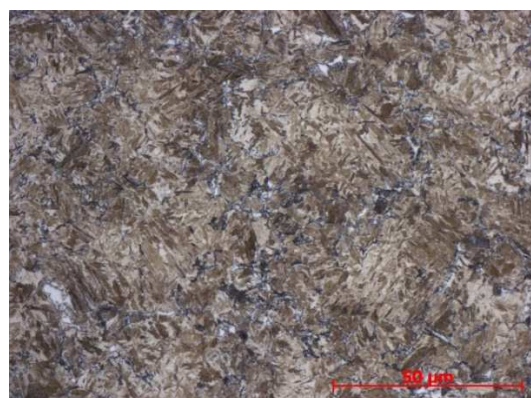
3.9 Metalografické hodnocení kalené vrstvy

Na obrázcích můžeme vidět příčné řezy vsázky, která byla chlazena vodou o teplotě 20°C. Nejprve se zaměříme na tloušťku a rozložení kalené vrstvy. Jak už bylo patrné na obr. 3.1.4, kalenou vrstvu ovlivňuje přítomný otvor. Ten má za následek horší odvod tepla a tím i hlubší austenitizaci. [12]

Celkový pohled na prokalenou vrstvu ukazuje obr. 3.9.1 a obr. 3.9.2. Přejít mezi kalenou vrstvou a jádrem vsázky je pozvolný a nehrozí tak k odtržení zakalené vrstvy. Vrstva je tvořena základnou strukturou martenzitu a dolního bainitu (obr. 3.9.2) [12]

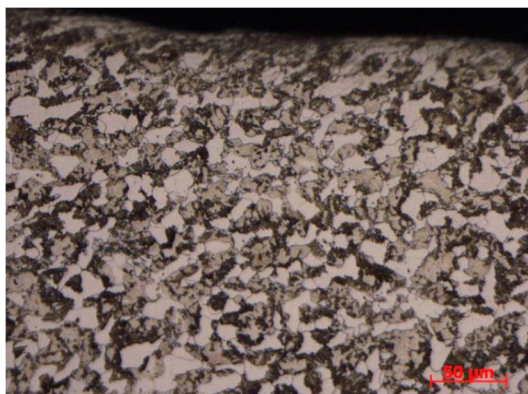


Obr. 3.9.1 Mikrostruktura kalené vrstvy
Zvětšení 25x [12]

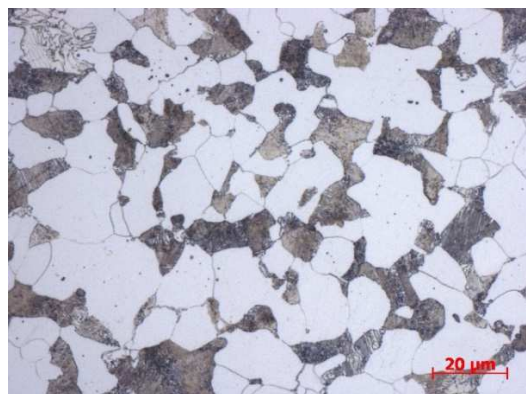


Obr. 3.9.2 Mikrostruktura kalené vrstvy
Zvětšení 500x [12]

Bílé oblasti obr. 3.9.3 jsou masivní zrna feritu a tvoří přibližně 50% struktury, zbytek je tvořen martenzitem společně s jemným perlitem. Směrem k jádru je struktura feriticko-perlitická. To znamená, že bylo dosaženo teploty k tvorbě homogenního austenitu. [12]

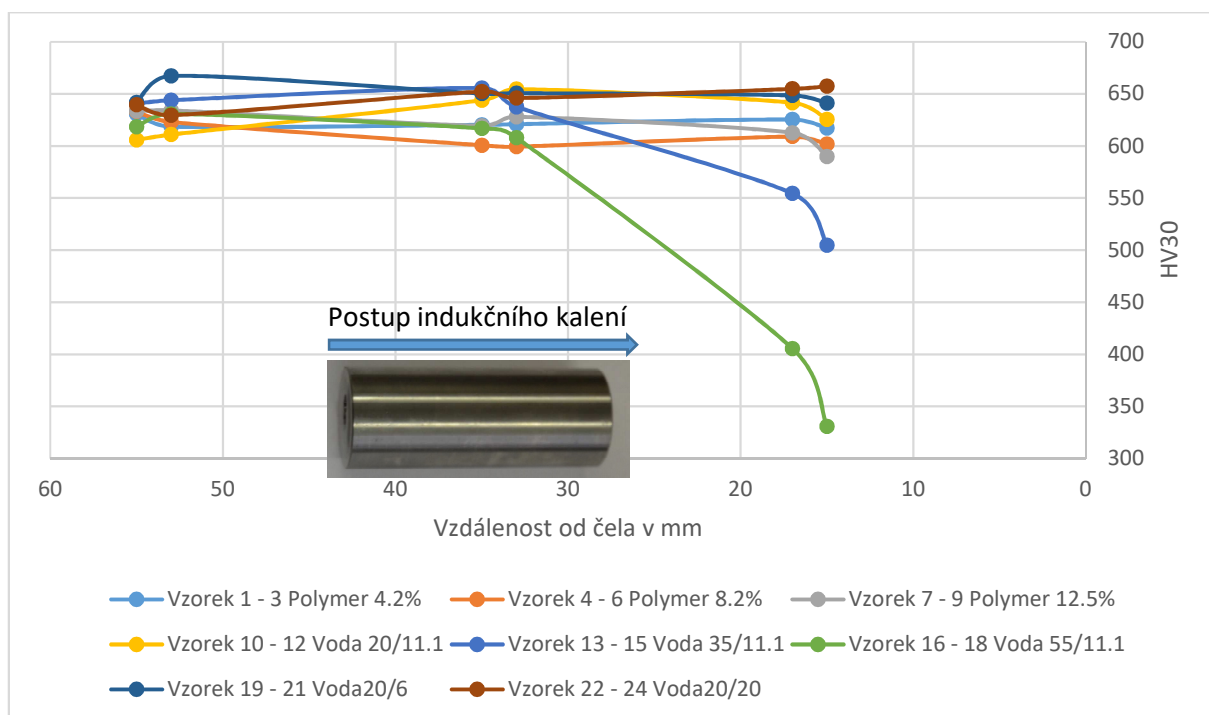


Obr. 3.9.3 Mikrostruktura kalené vrstvy v oblasti otvoru. Zvětšení 200x



Obr. 3.9.4 Mikrostruktura kalené vrstvy v oblasti otvoru. Zvětšení 500x

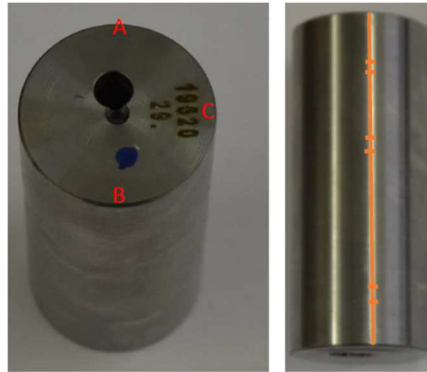
3.10 Kontrola tvrdosti



Obr. 3.10.1 Průběhy tvrdostí na povrchu vsázek [12]

Hodnoty tvrdosti nejsou ve vsázce konstantní a to hlavně ze dvou důvodů. Na čelech vsázky nedochází k tak velkým ztrátám kondukcí, jako uprostřed, a proto v těchto místech nedochází k takové tvorbě austenitu jako na čelech. Dalším důvodem je nerovnoměrné chlazení vsázky. Spodní část vsázky, je na rozdíl od horní části chlazená celou dobu kalicího procesu. To má za následek vyšší hodnoty tvrdosti ve spodní části vsázky. Na horním čele tak nedochází k čisté martenzitické transformaci, čímž se snižuje výsledná tvrdost.

Z výsledků je patrné, že zcela nejhorší výsledků bylo dosaženo při užití vody o teplotě 55°C. Teplotní jímavost je oproti chladnějšimu mediu nižší a nedochází tak k dostatečnému ochlazení.

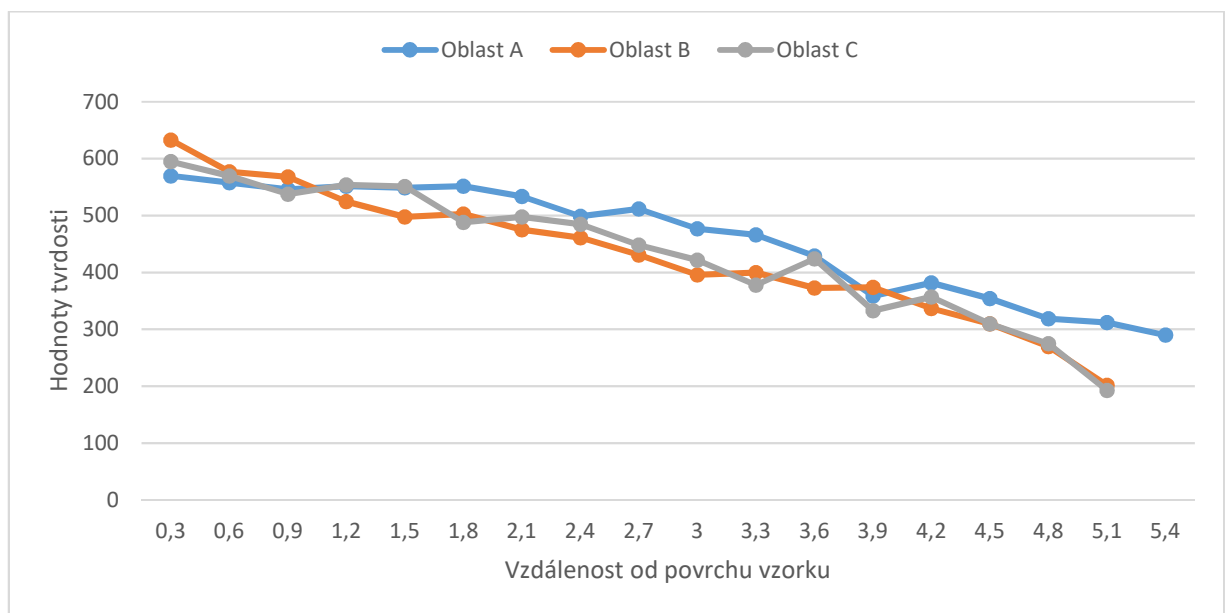


Obr. 3.10.2 Oblasti kontroly tvrdosti součásti [12]

Cílem měření bylo i zjistit rovnoměrnost kalené vrstvy vsázky chlazené vodou 20°C.

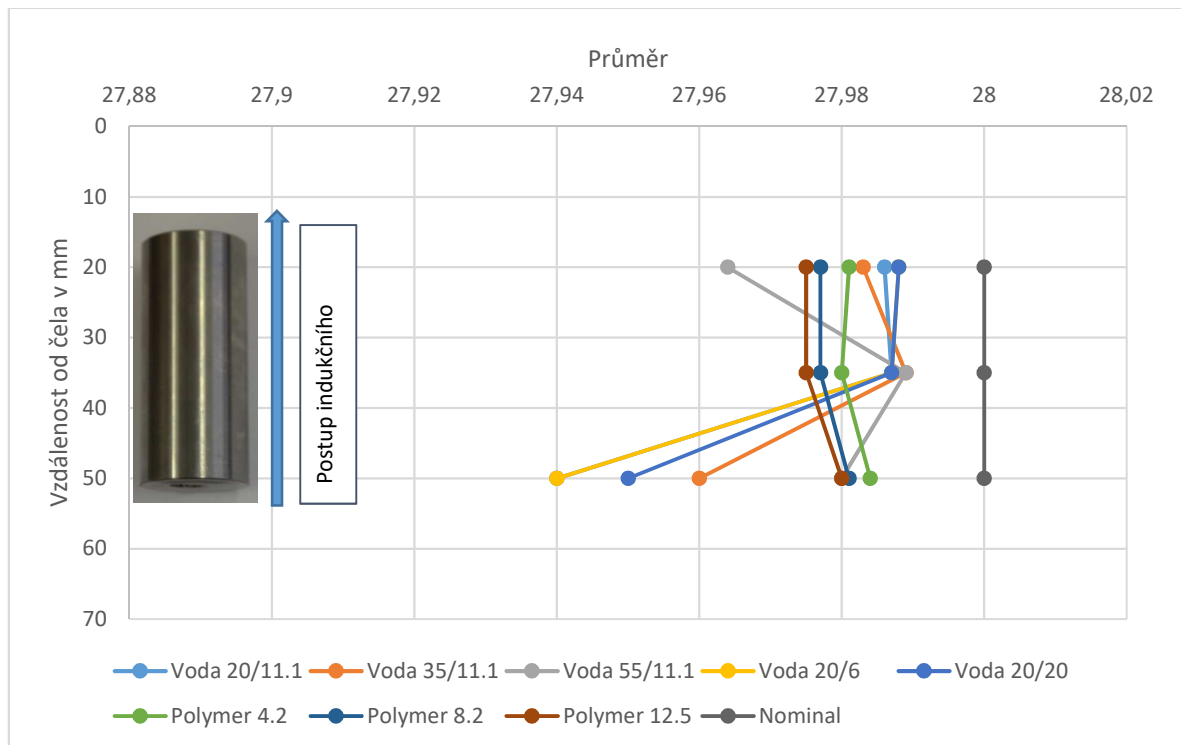
Výsledky jsou ovlivněny přítomným otvorem v blízkosti oblasti A. Chybějící materiál snižuje odvod tepla kondukcí a proto můžeme vidět hlubší prokalitelnost.

Oblast C proti oblasti B dosahuje mírně vyšších hodnot tvrdosti, které můžeme také přisuzovat přítomnému otvoru, který má na oblast C také nezanedbatelný vliv.



Obr. 3.10.3 Průběh tvrdostí v řezu [12]

3.11 Kontrola vnějšího průměru



Obr. 3.11.1 Deformace vnějšího průměru vsázky [12]

Z grafu je patrná nerovnoměrná změna průměru vzniklá deformací během kalení. Zatímco vodou chlazené vsázky mají spíše soudkovitý tvar, vsázky chlazené polymerem mají špulkovitý tvar. [12]

Je patrné, že polymery dopomáhají k rovnoměrnosti vzniklé deformace. Rozdíly mezi jednotlivými průměry nejsou tak velké jako u vody.

3.12 Závěr měření

Ačkoliv jsme dosáhli nejvyšších hodnot tvrdosti za použitím vody v kalicím prostředí, docházelo také k největší deformaci. Je nutné uvážit, pro jakou aplikaci by byl materiál použit a podle toho zvolit vhodné kalicí prostředí.

Umístění otvoru ve vsázce má výrazný vliv na prokalení vsázky a je důležité s ním počítat.

Výsledky měření ukazují, že úprava kalicího cyklu by mohla zlepšit výslednou tvrdost na horním čele vsázky. Chlazení se po dosažení horního čela okamžitě stahuje dolů, a tak nedochází k dostatečnému ochlazení.

4 Numerický model a optimalizace kalicího procesu

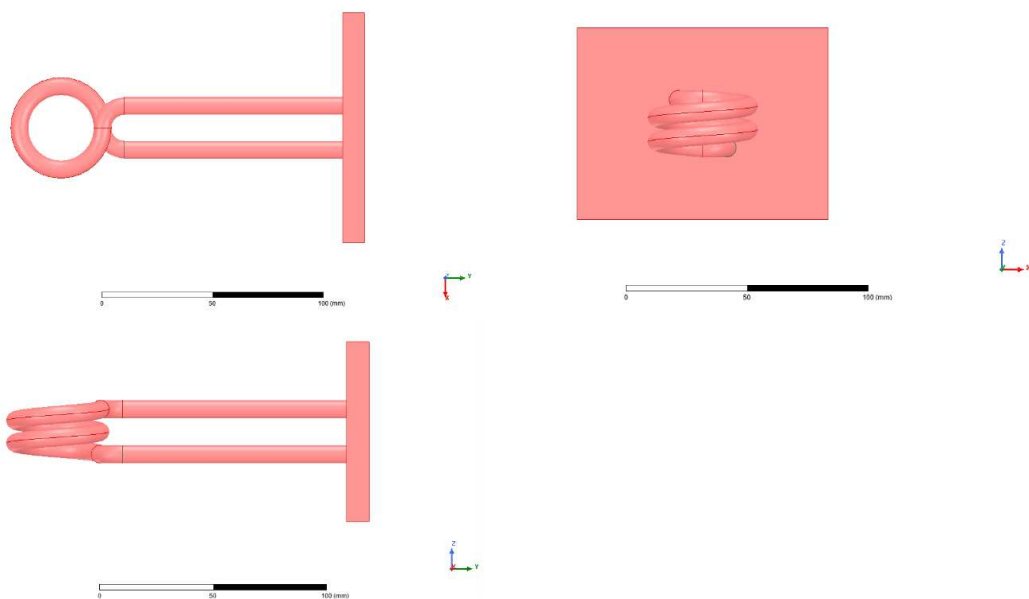
Úkolem je vytvořit numerický model dle experimentu a vymyslet možnosti jeho optimalizace. Pro tyto účely bude použit software skupiny ANSYS, součástí kterého jsou jak elektromagnetické simulace, tak i simulace zabývající se tepelnými charakteristikami.

4.1 ANSYS Maxwell 3D

Maxwell 3D nám umožňuje vytvořit 3D model induktoru a vsázky. Vytvořeným modelům, můžeme přiřadit elektrické a materiálové vlastnosti, tak aby korespondovaly s experimentálním měřením.

Výstupem může být jak samotný výpočet námi požadovaných veličin, tak i 3D vizualizace námi zadaných parametrů.

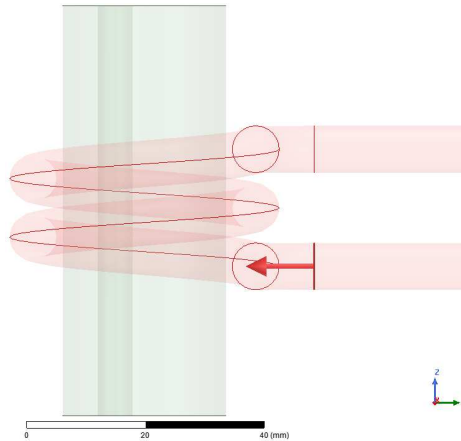
4.1.1 Induktor



Obr. 4.1 Vizualizace induktoru

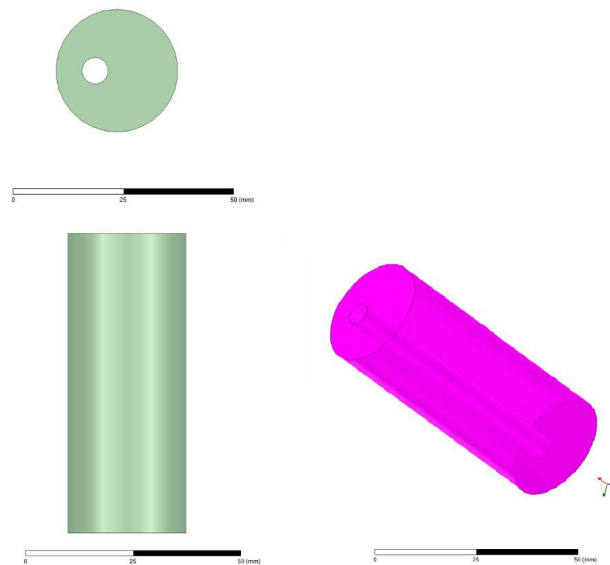
Model induktoru byl navrhován tak, aby jeho parametry byly nastaveny jako proměnné. To nám dovoluje volně upravovat jeho výšku, počet závitů, rozteč mezi závity, nebo délku přívodů.

Dále bylo potřeba vytvořit proudovou cestu, aby induktor mohl plnit svojí elektromagnetickou funkci. Za tímto účelem byl vytvořen proměnný parametr proudu, která vystupuje z čela elektrických přívodů do samotného induktoru.



Obr. 4.2 Nastavení proudové cesty

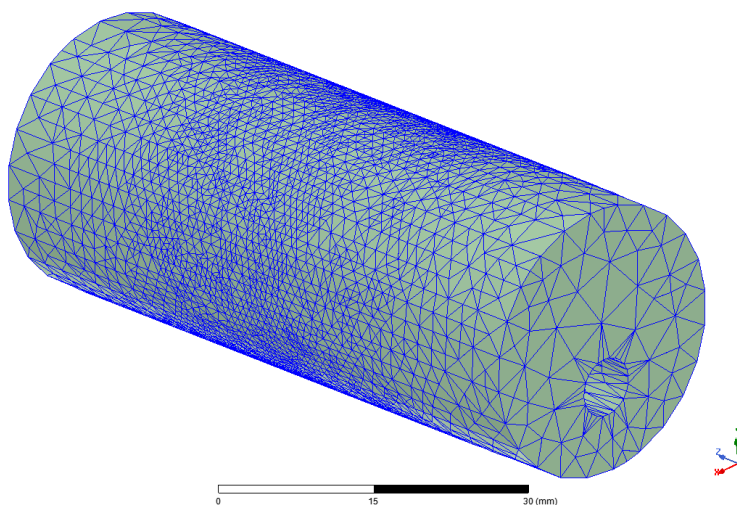
4.1.2 Vsázka



Obr. 4.3 Vizualizace vsázky

Obdobně jako u induktoru, jsou parametry vsázky tvořeny pomocí proměnných. Je tak možné volně upravovat výšku, nebo poloměr vsázky. Jako materiál je použita nerezová ocel.

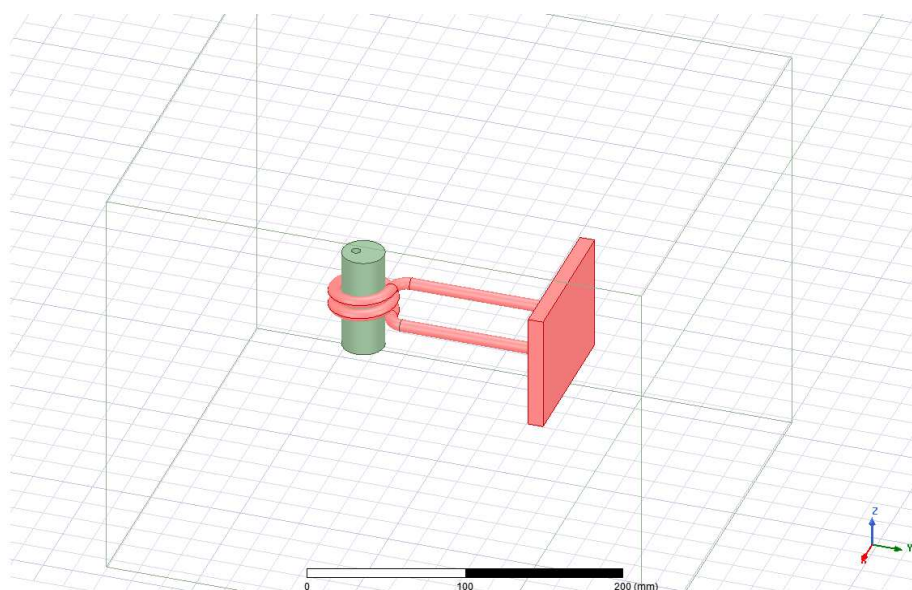
Na přesnost konečných výsledků má vliv tzv. „mesh“. Každému poli v meshi náleží jeden výsledek simulace. Čím jemnější mesh, tím delší výpočetní doba, ale vyšší přesnost.



Obr. 4.4 Vytvořená mesh

V našem případě byla použita adaptivní mesh, která je programem automaticky generována. Způsob jak se program k dané meshi dostane je takový, že začne s jednoduchou meshí, kterou upravuje do doby, než je maximální výpočtová chyba pod tolerovanou mez.

Dalším parametrem, který ovlivňuje výsledky je velikost okolního prostředí. Opět platí, že čím větší prostředí, tím přesnější výsledky. V našem případě tak prostředí tvoří kvádr, který je definován proměnou „prostředí“, která určuje minimální vzdálenost od vytvořených modelů.

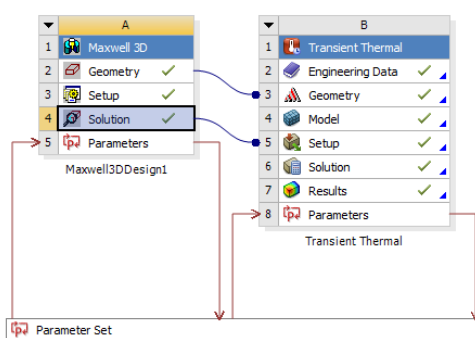


Obr. 4.5 Vizualizace prostoru

4.2 ANSYS Workbench

ANSYS Workbench je prostředí, které propojuje celou řadu simulačních programů skupiny ANSYS. V našem případě jsme díky tomu mohli propojit elektromagnetické výpočty Maxwell 3D a tepelné výpočty Transient Thermal.

Jak je vidět na obr. 4.6, prostředí programu nám dovoluje navázat parametry z jednoho programu do druhého a zároveň nám dává možnost upravovat námi nadefinované parametry induktoru, nebo vsázky.

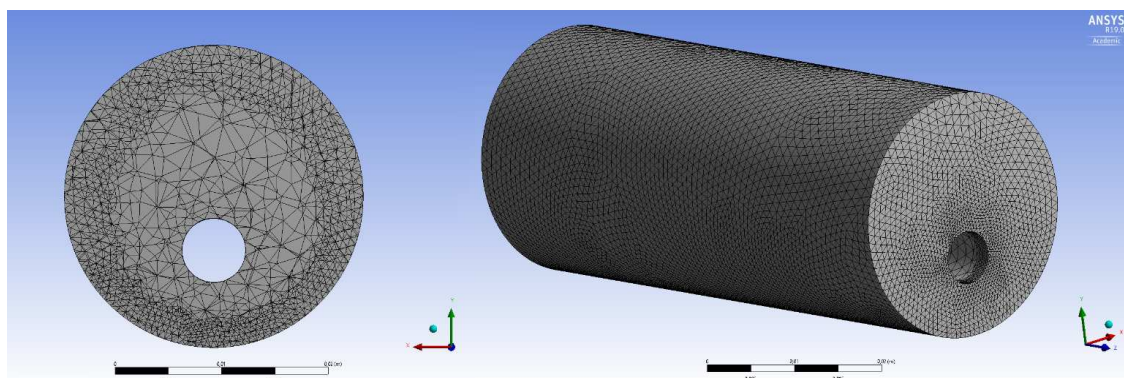


Obr. 4.6 Prostředí ANSYS Workbench

4.3 Transient thermal

Transient thermal dokáže převzít vytvořený model a výsledky elektromagnetických simulací z Maxwell 3D.

Obdobně jako u Maxwell 3D je zapotřebí vytvořit mesh. (Obr. 4.7) Vlevo je řez vsázky, kde je patrné, že mesh je směrem k povrchu jemnější než ve středu vsázky. Splňuje tak naše požadavky na povrchové kalení.

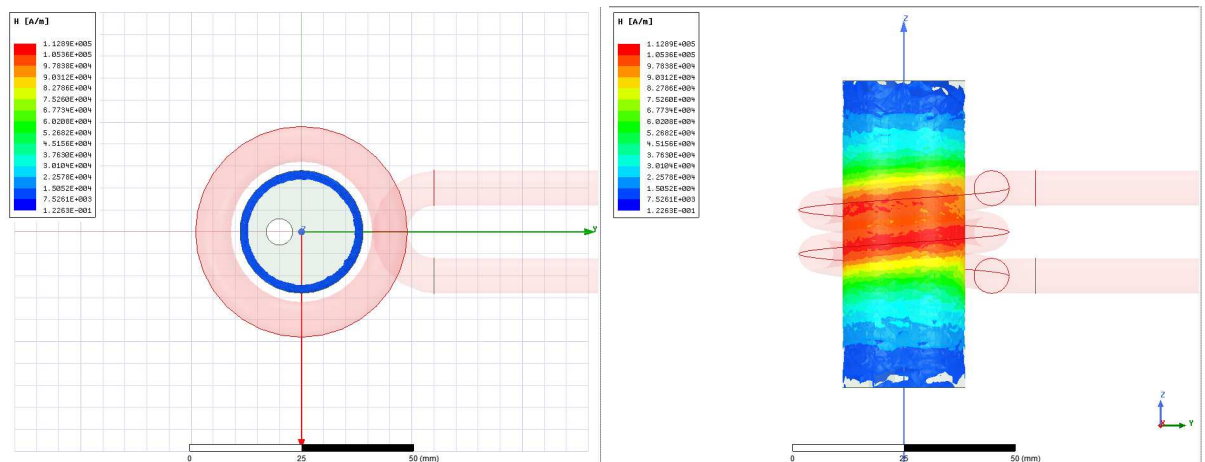


Obr. 4.7 Vytvořená mesh

Dále musíme nastavit hodnotu okolního prostředí (21°C) a dobu indukčního ohřevu (5s). Pro zjednodušení simulace, je vsázka na rozdíl od reálného kalení statická. Ohřev tak probíhá jen v jedné poloze.

4.4 Výsledky simulace Maxwell 3D

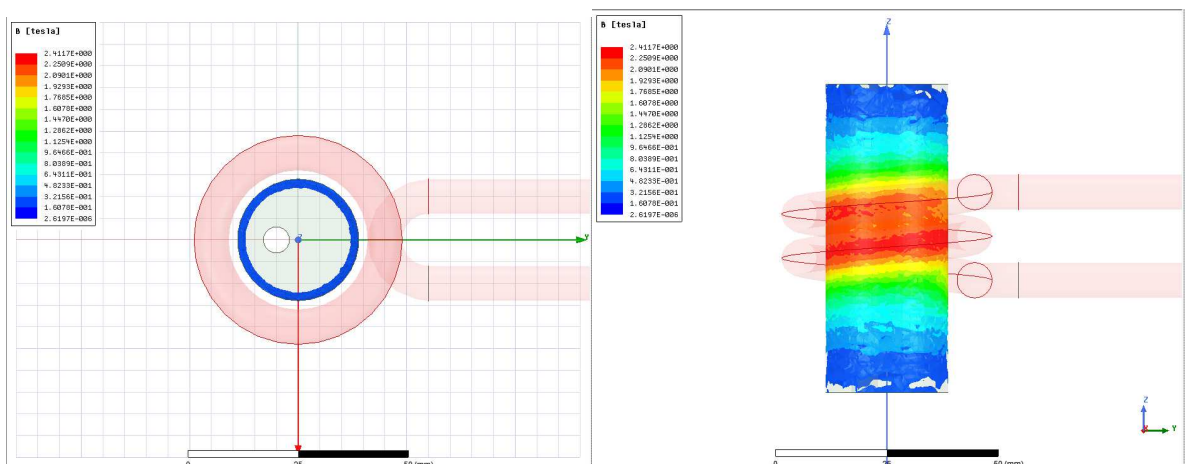
4.4.1 Intenzita magnetického pole H



Obr. 4.8 Intenzita magnetického pole

Vliv magnetické intenzity na vsázku. Magnetická intenzita je časově proměnná veličina, která vyvolává uvnitř vsázky vířivé proudy. Na obr. 4.8 můžeme vidět, že největší intenzita je v blízkosti induktoru a klesá se vzdáleností od něj.

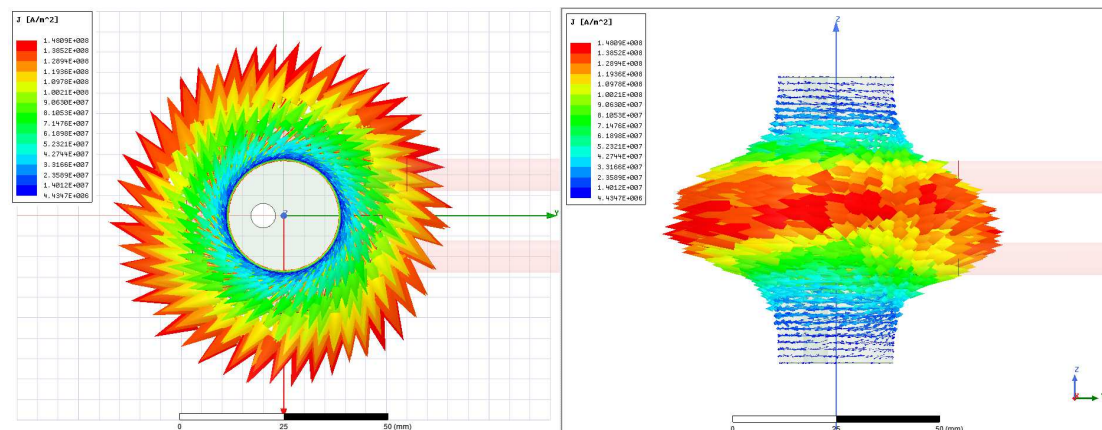
4.4.2 Magnetická indukce B



Obr. 4.9 Magnetická indukce

Vzhledem k tomu, že magnetická indukce je definována jako součin magnetické intenzity a permeability, jsou výsledné simulace graficky téměř totožné.

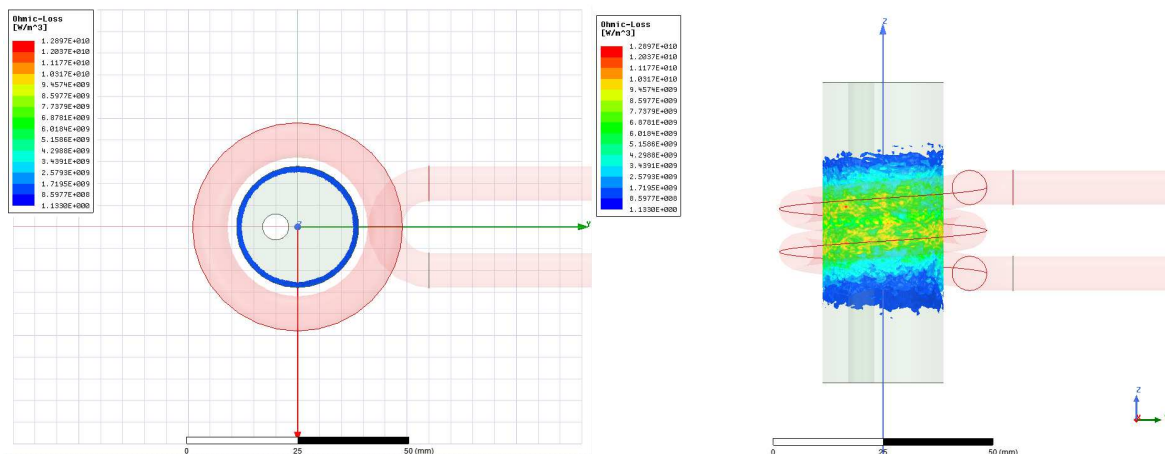
4.4.3 Proudová hustota



Obr. 4.10 Proudová hustota

Vizualizace je tvořena jednotlivými vektory, které znázorňují směr a velikost proudové hustoty uvnitř vsázky. Je zřejmé, že nejvyšších hodnot dosahuje ve středu induktoru, s rostoucí vzdáleností od induktoru velikost vektoru a úhel vůči vsázce klesá.

4.4.4 Činné ztráty v objemu vsázky

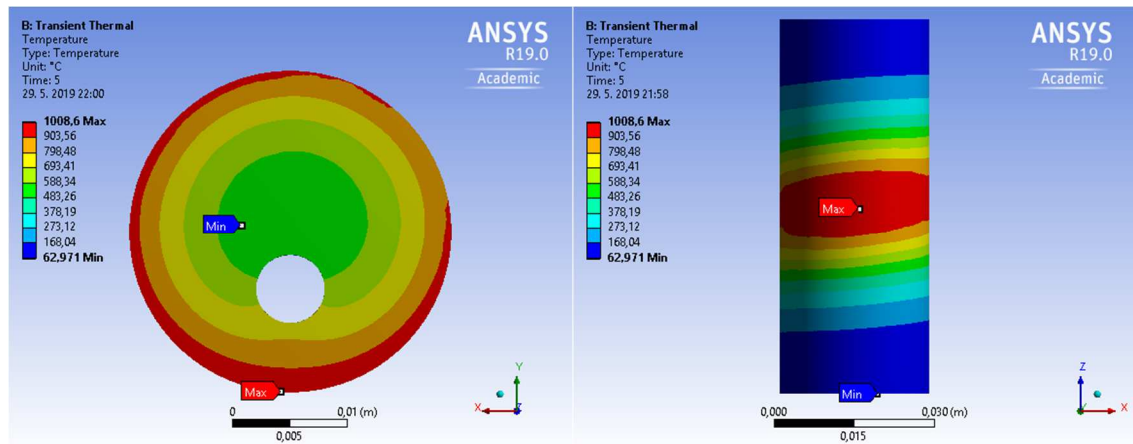


Obr. 4.11 Činné ztráty v objemu vsázky

Obr. 4.11 ukazuje činné ztráty v objemu vsázky. Je nutné si uvědomit, že během kalení je vsázka v pohybu. Simulace však počítá s tím, že se vsázka nepohybuje, a proto jsou výsledné hodnoty tak vysoké.

4.5 Výsledky simulace Transient thermal

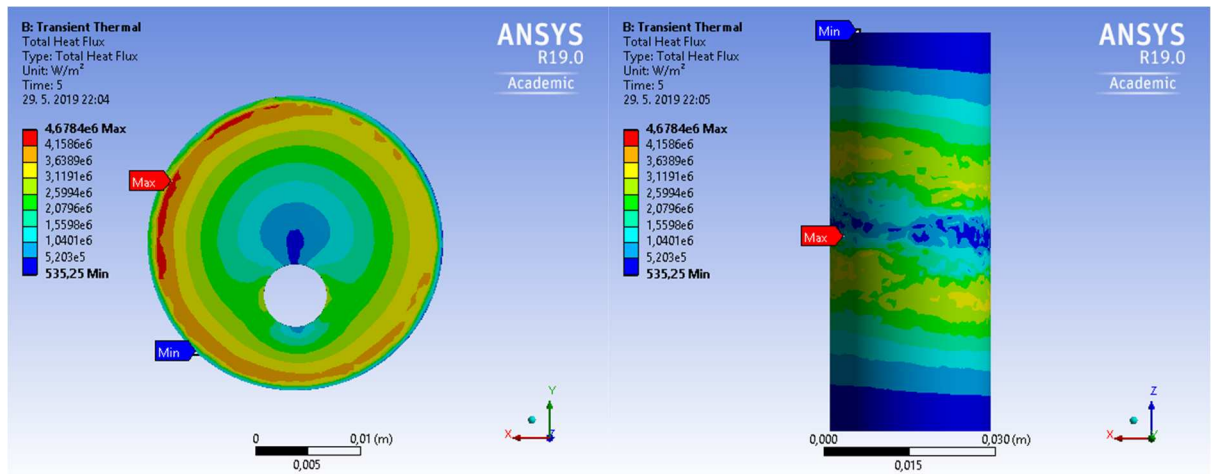
4.5.1 Maximální teplota (model experimentu)



Obr. 4.12 Simulace maximální teploty (experiment)

V řezu je patrné, že otvor znatelně ovlivňuje maximální dosaženou teplotu a tím i hloubku prokalení. Pro dosažení dostatečné austenitizace, musí vsázka dosáhnout teploty mez 840-880°C.

4.5.2 Maximální tepelný tok (model experimentu)



Obr. 4.13 Simulace tepelného toku ve vsázce (experiment)

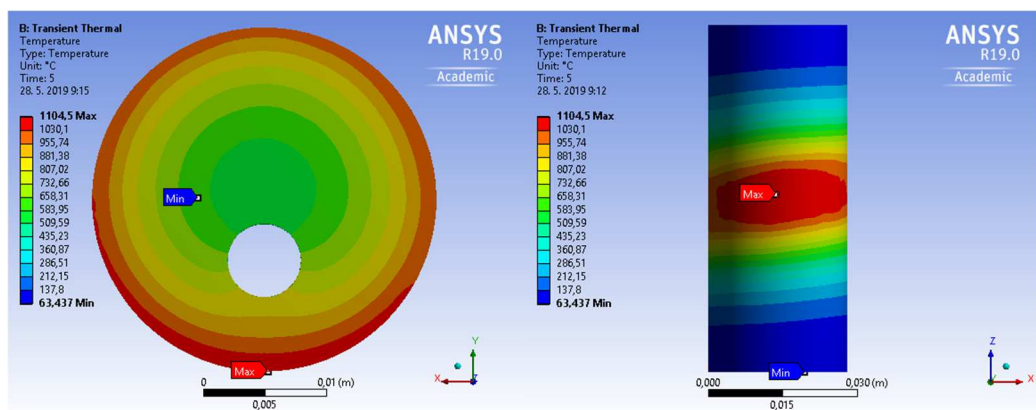
Obr. 4.13 nám ukazuje tepelný tok. Je zde patrné, jak změna objemu v místě otvoru snižuje odvod tepla od povrchu vsázky.

4.6 Optimalizace indukčního kalicího procesu

Základní úvahou optimalizace provedených experimentů je zmenšit průměr induktor, a tím docílit vyšší účinnosti přenosu energie do vsázky.

Za těmito účely byla v programu ANSYS Workbench vytvořena tabulka s rozdílnými průměry induktorů. Nejlepších výsledků jsme docílili s induktorem, u kterého byla vzdálenost od vsázky 1mm (v experimentu 2 mm). Menší průměry by byly v praxi už nepoužitelnými, vzhledem k riziku kontaktu vsázky s induktorem.

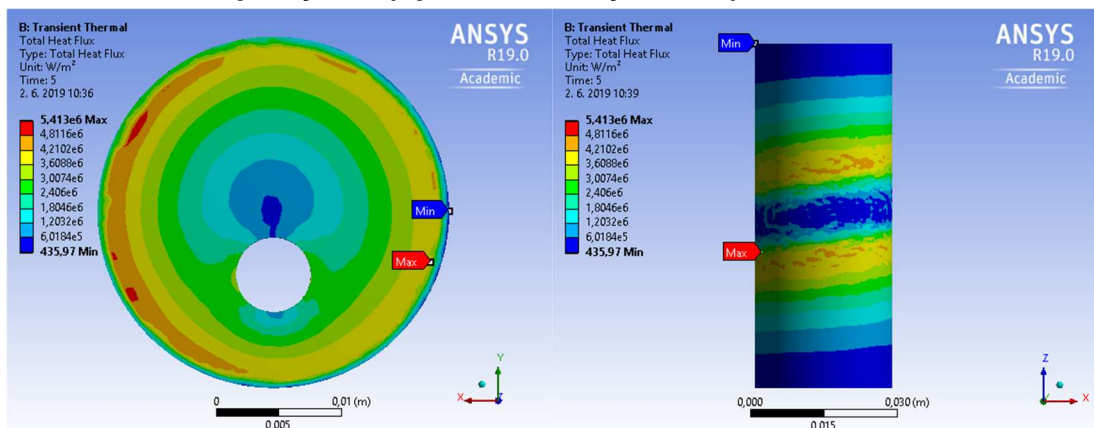
4.6.1 Maximální teplota (optimalizovaný model)



Obr. 4.14 Simulace maximální teploty (optimalizovaný model)

Oproti experimentu zde maximální teplota vsázky vzrostla o necelých 100°C i teplota v okolí otvoru vzrostla přibližně o stejnou hodnotu.

4.6.2 Maximální tepelný tok (optimalizovaný model)



Obr. 4.15 Simulace tepelného toku ve vsázce (optimalizovaný model)

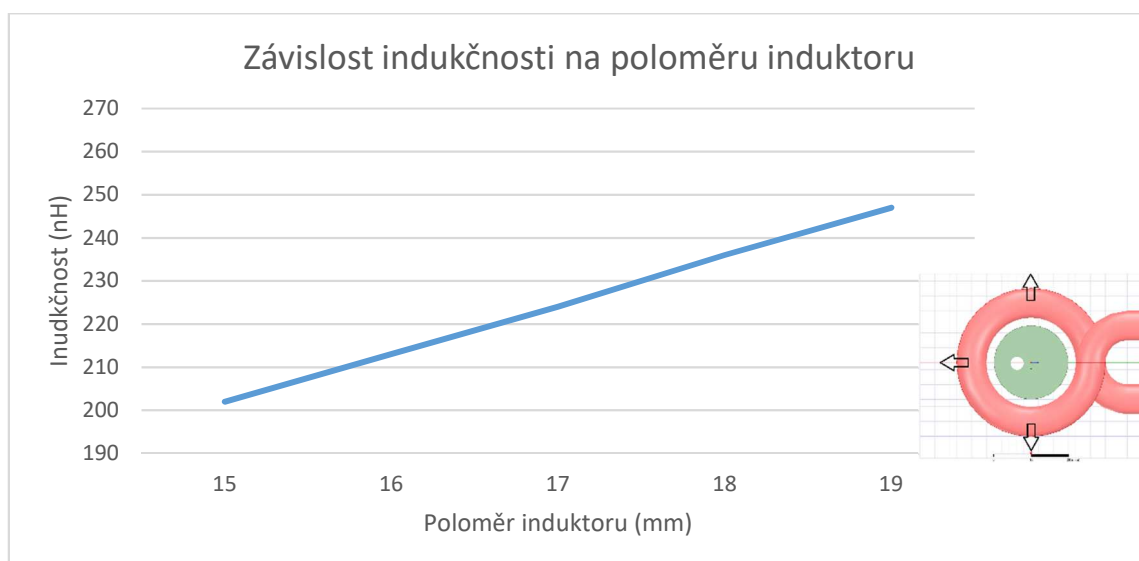
Odvod tepla uvnitř vsázky na rozdíl od maximální teploty, není možné ovlivnit změnou induktoru. Výsledky tepelných toků jsou tedy téměř identické a opět můžeme sledovat vliv otvoru na odvod tepla od povrchu vsázky.

4.6.3 Výsledky

Tab. 5 Výsledky simulace

Poloměr induktoru (mm)	Maximální teplota (°C)	Indukčnost (nH)	Odpor (mΩ)	Impedance (mΩ)	Ztráty (kW)	Ztráty ve vsázce (kW)	Ztráty v induktoru (kW)	Účinnost induktoru (%)
15	1104,5	202	6,4	29,3	11,17	9,80	1,36	87,79
16	1008,6	213	6,0	30,7	10,45	9,04	1,41	86,47
17	907,5	224	5,6	32,2	9,69	8,23	1,46	84,95
18	837,5	236	5,3	33,7	9,20	7,71	1,49	83,80
19	763,6	247	5,0	35,3	8,78	7,25	1,53	82,56

Grafy



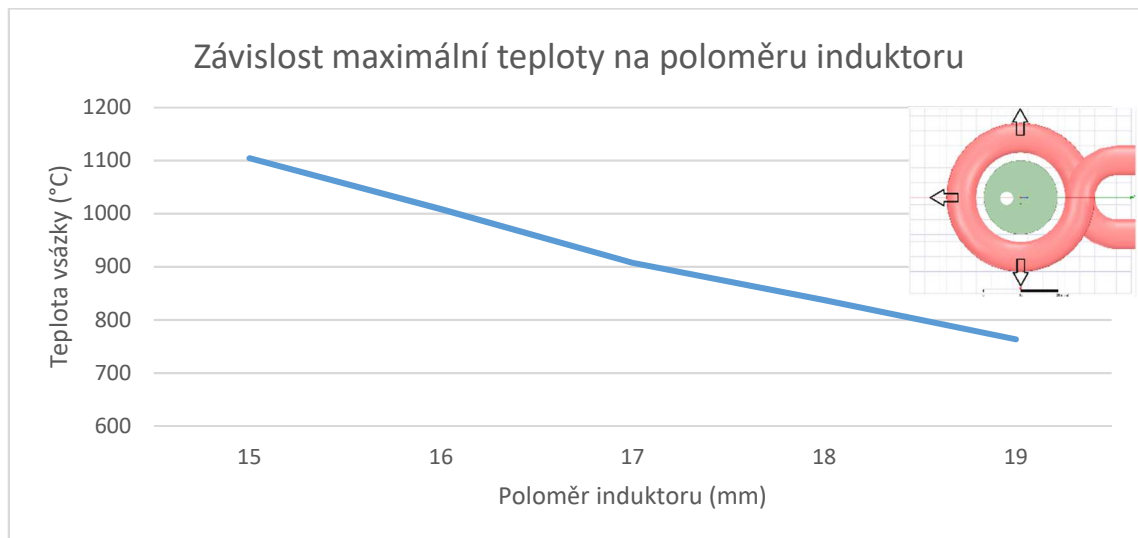
Obr. 4.6.4 Graf: Závislost indukčnosti na poloměru induktoru

Indukčnost lze definovat jako:

$$L = \frac{\mu N^2}{l} S$$

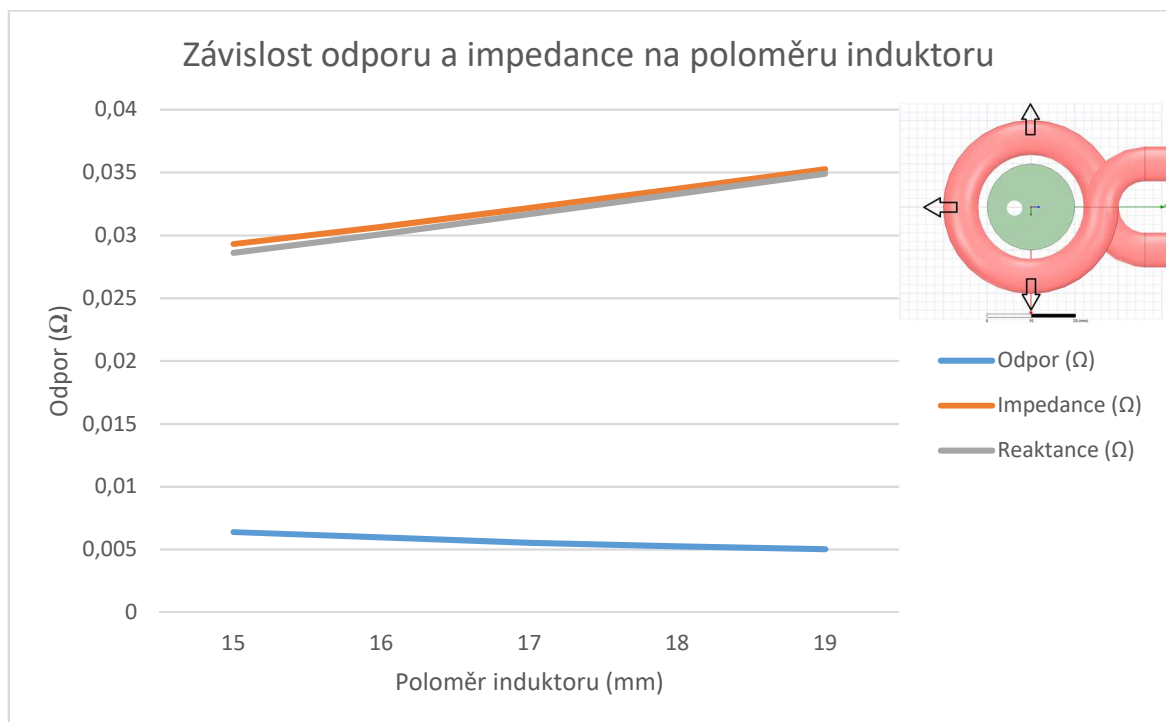
μ - permeabilita, N - počet závitů, l - délka cívky, S - průřez cívky

V grafu tedy můžeme pozorovat, jak indukčnost s narůstajícím poloměrem roste.



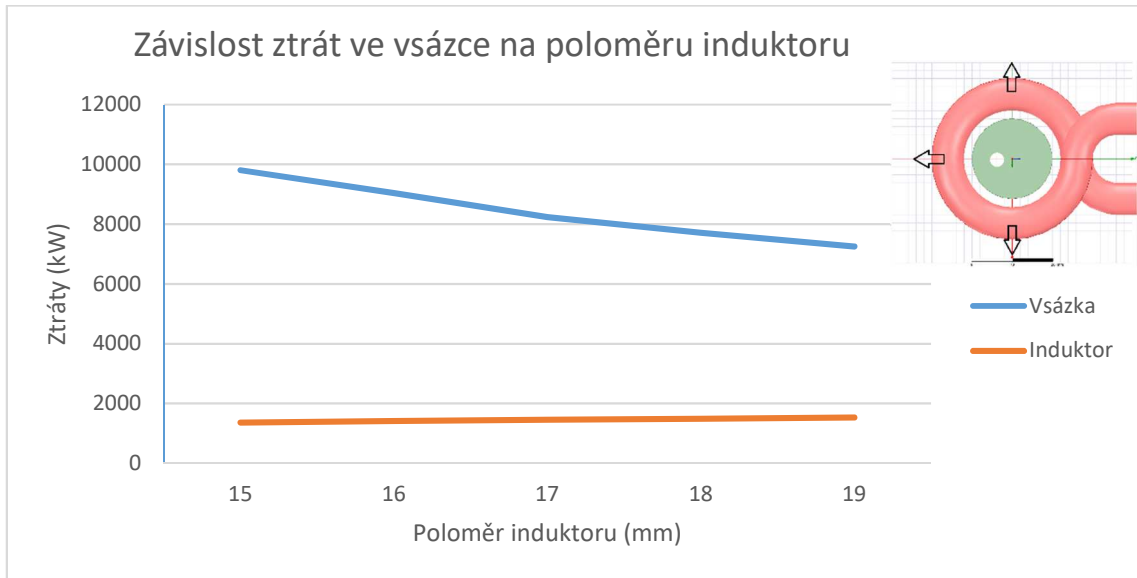
Obr. 4.6.5 Graf: Závislost maximální teploty vsázky na poloměru induktoru

Výsledná maximální teplota vsázky, vzhledem k rostoucímu poloměru induktoru klesá. Se zvyšujícím se poloměrem sice indukčnost roste, ale stejně tak i vzdálenost od vsázky, která snižuje účinnost přenosu energie.



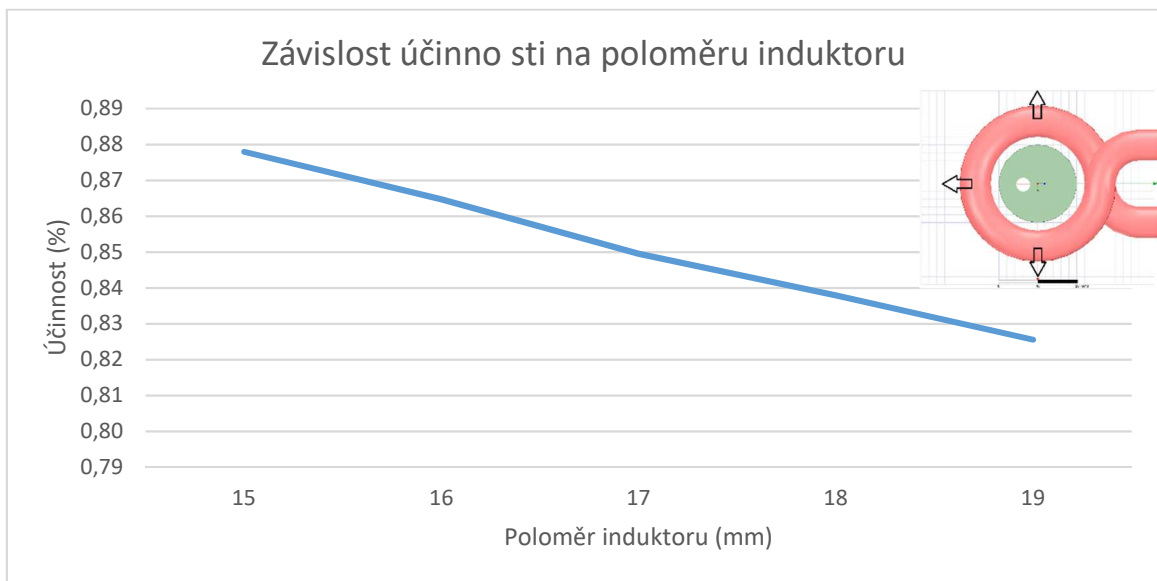
Obr. 4.6.6 Graf: Závislost odporu a impedance na poloměru induktoru

Impedance je téměř celá tvořena reaktancí induktoru. Vliv činného odporu je téměř zanedbatelný. Reaktance s rostoucí indukčností pochopitelně roste, naopak odpor klesá.



Obr. 4.6.7 Graf: Závislost ztrát ve vsázce na poloměru induktoru

Ztráty v induktoru vzhledem ke zvyšující se impedanci mírně rostou. Naopak ztráty ve vsázce klesají, vzhledem ke snižující se účinnosti induktoru.



Obr. 4.6.8 Graf: Závislost účinnosti induktoru na poloměru induktoru

Jak už lze poznat z předchozích grafů, tak celková účinnost induktoru s rostoucí vzdáleností od vsázky klesá. Pro optimalizaci kalicího systému, je tedy důležité, aby induktor co nejlépe kopíroval geometrii vsázky.

5 Ověření naměřených změn a možnosti do praxe

Ze simulace je zřejmé, že vzdálenost induktoru od vsázky, má negativní vliv na účinnost indukčního kalení. Pro zlepšení účinnosti kalicího systému musíme zajistit, aby vzdálenost induktoru od vsázky byla co nejmenší.

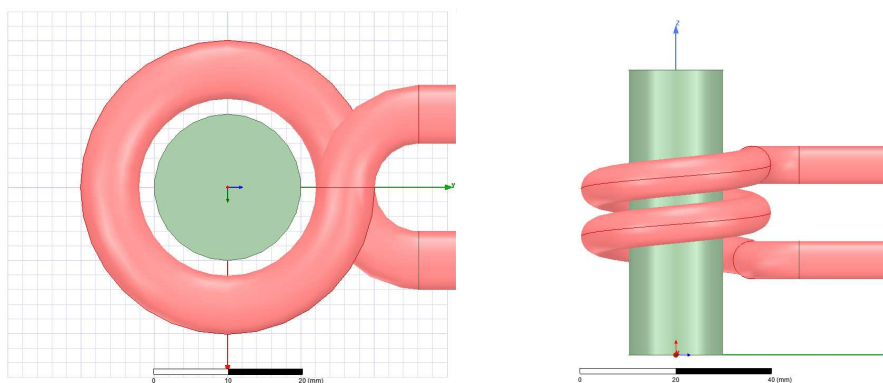
Během experimentů byla vzdálenost mezi induktorem a vsázkou 2 mm. Při snížení této vzdálenosti, se vzhledem k vibracím vzniklými vysokými otáčkami vsázky zvyšuje riziko kontaktu vsázky s induktorem. To by mělo za následek zkratování transformátoru.

Abychom mohli prakticky ověřit výsledky simulace, musíme použít dva rozdílné induktory a menší vsázku.

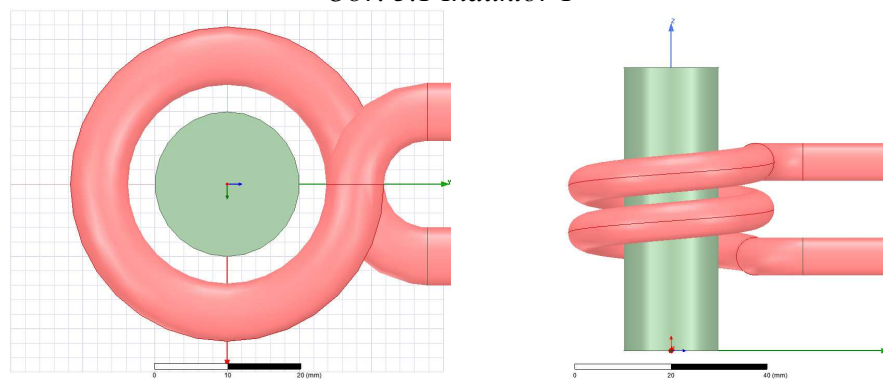
Tab. 6 Parametry induktorů

	Vnitřní průměr (mm)	Výška (mm)
Induktor 1	32,2	20
Induktor 2	35.5	20

Rozměry vsázky pro dané měření: průměr 20 mm, výška 70 mm.



Obr. 5.1 Induktor 1



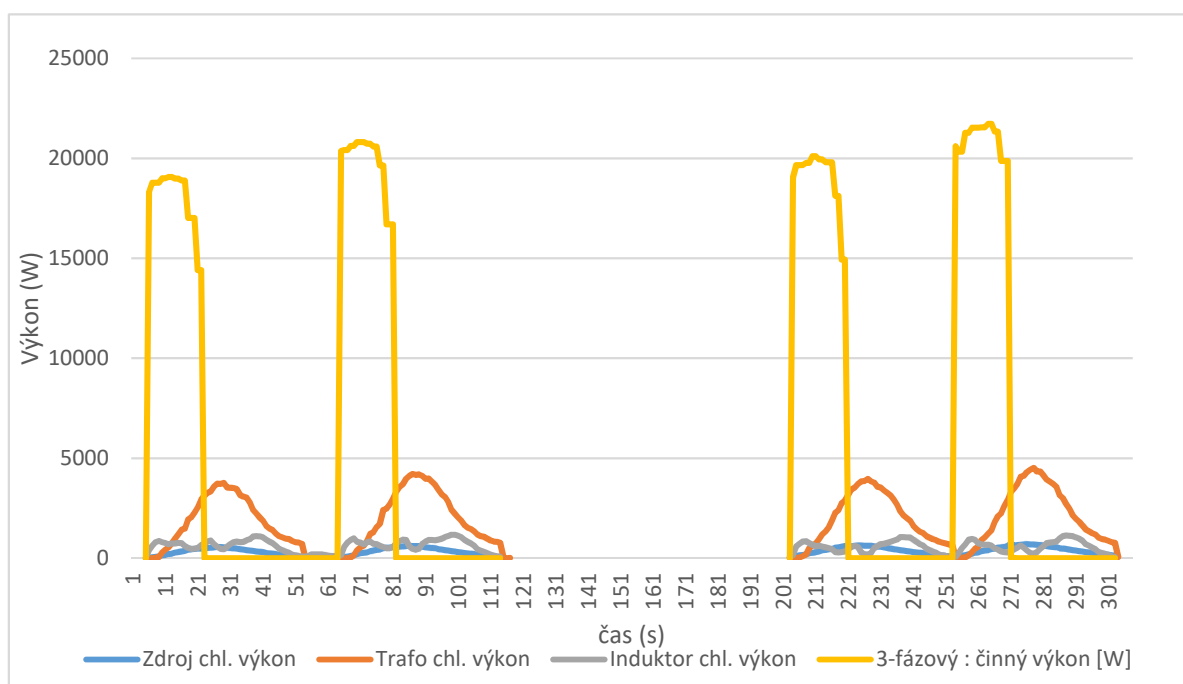
Obr. 5.2 Induktor 2

5.1 Měření

Napájecí proud byl nastaven na 85 A, po zakalení prvního vzorku byl zvýšen na 90 A. Celkový postup kalení i způsob měření je totožný s experimentálním kalením vsázek (viz kapitola 3)

5.2 Výsledky měření

Z výsledného grafu můžeme sledovat celkový příkon a jednotlivé chladicí charakteristik komponentů.



Obr. 5.3 Graf: Výsledky měření

Jednotlivé chladicí systémy jsou časově posunuté. Určitou dobu trvá, než se tepelné ztráty dostanou do chladicího systému a to způsobuje pozorovatelné zpoždění.

Po první dva průběhy byl měřen induktor č. 1 (tzn. větší průměr), při napájení 85 A a 90 A. Poslední dva průběhy patří druhému induktoru s menším průměrem pro stejné hodnoty proudů.

Z grafu je patrné, že u posledních dvou průběhů dosahuje příkon vyšších hodnot, to znamená, že dochází k lepší vazbě mezi vsázkou a induktorem. To nám umožňuje do vsázky přenést větší výkon.

5.3 Výpočet

Výkon přenesený do vsázky, můžeme vypočítat rozdílem třífázového činného příkonu vůči ztrátám v chladicím systému.

Účinnost celého systému můžeme vypočítat rozdílem třífázového činného příkonu vůči ztrátám v chladicím systému.

Výkonové charakteristiky vynesené v grafu zintegrujeme a dostaneme tak energii jednotlivých komponentů. Výslednou energii chladicího výkonu, odečteme od energie třífázového příkonu a získáme tak energii přecházející do vsázky.

$$E_{vsázka} = \int P_{vsázka} = \int P_{3f} - \int P_{chlad}$$

Z výsledků pak můžeme vypočítat celkovou účinnost kalicího systému.

$$\eta = \frac{E_{vsázka}}{E_{3f}} = \frac{\int P_{vsázka}}{\int P_{3f}}$$

Tab. 7 Výsledky praktického ověření simulace

Induktor	Proud (A)	E_{3f} (kJ)	E_{chlad} (kJ)	$E_{vsázka}$ (kJ)	Účinnost systému (%)
i4	85	297,30	99,99	197,31	66,4
i4	90	326,75	154,04	172,71	52,9
i3	85	313,76	113,99	199,77	63,7
i3	90	347,07	140,80	206,27	59,4

5.4 Závěr měření

Ačkoliv výsledná účinnost zpochybňuje výsledky simulace, musíme si uvědomit, s jakou přesností bylo kalení měřeno. Kalorimetr, který měří teploty v celém oběhu nelze považovat za přesný. Vzhledem k tomu, že chlazení prochází celým systémem a kalorimetr měří jednotlivé přírůstky tepla, přináší tak chybu do měření. Pokud by jednotlivé části měly svoji izolovanou chladicí smyčku, výsledky by byly přesnější.

Po uvážení chyb měření, můžeme prohlásit, že výsledky potvrzují závěry získané ze simulace. Omezení vzdálenosti mezi vsázkou a induktorem, zvyšuje účinnost induktoru a to se projevuje v celkové účinnosti kalicího systému. To je patrné z grafu (obr. 5.3), kde při použití menšího induktoru, byl přenášen větší výkon.

Vzhledem k tomu, že Jouleovy ztráty rostou s kvadrátem proudu, je pochopitelné, že se účinnost systému bude s rostoucím proudem měnit.

V praxi se tak setkáme s induktory, které co možná nejlépe kopírují tvar vsázky, aby dosáhli co možná nejvyšší účinnosti. Vzhledem k hospodárnosti celého systému je důležité, aby hodnota napájecího proudu (vzhledem ke klesající účinnosti) nebyla zbytečně vysoká.

6 Závěr

Indukční kalení je v praxi velmi důležitou součástí povrchového kalení. Jedná se v současnosti o velmi používaný způsob, jak dosáhnout vyšší hloubky prokalení. Ačkoliv laserová metoda kalení má své benefity ve vysoké přesnosti, omezené deformaci vsázky a možnosti tvrzení i velmi složitých tvarů. Není schopna dosáhnout takové hloubky prokalení, jako v případě indukčního kalení.

Nejkritičtější bodem kalicího procesu je chlazení vsázky. Ačkoliv se v experimentu ukázalo, že čím chladnější voda v kalicím prostředí, tím vyšších hodnot tvrdostí jsme docílili. Má to za následek také vysoké pnutí v materiálu, které způsobuje větší míru deformace a zvyšuje se riziko prasknutí vsázky. Užití polymerů v kalicím prostředí omezuje vznik teplotního polštáře a částečně omezuje vnitřní pnutí vsázky. To má za následek snížení celkové deformace vsázky i rizika prasknutí kalené vrstvy.

Se zvyšující se koncentrací polymerů ve vodě, však výrazně klesá intenzita chlazení, která se projevuje vyšší teplotou vsázky na konci kalicího procesu. To má za následek nižší hodnoty výsledné tvrdosti.

Otvor uvnitř vsázky, měl znatelný vliv na hloubku prokalení. Vzhledem k chybějícímu materiálu, je omezen odvod tepla a vsázka tak v místě otvoru dosahovala vyšších teplot.

Programové simulace společnosti ANSYS jsou velmi účinným nástrojem. Možnost upravovat jednotlivé parametry v prostředí ANSYS Workbench usnadňují případné modifikace vytvořeného modelu. Výsledné charakteristiky a vizualizace, které nám simulace přinesla, jsou přínosné k pochopení dané problematiky. Omezováním vzdálenosti mezi induktorem a vsázkou, se zvyšovala účinnost induktoru, která se projevovala intenzivnějším ohřevem.

Výsledky praktického ověření optimalizace indukčního kalicího procesu se zprvu zdají zavádějící, avšak je nutné si uvědomit nepřesnost našeho měření. Jednotlivé komponenty mají společnou chladicí smyčku. Kalorimetr tedy měří jednotlivé přírůstky teplot za každým komponentem. To přináší do měření nezanedbatelnou chybu. Pokud by každý komponent měl svojí chladicí smyčku, kalorimetrické měření by bylo mnohem přesnější.

Induktor s menší vzdáleností od vsázky dosahuje vyšší účinnosti a to se projevuje v nárůstu příkonu, který přenášíme přes induktor.

Vzhledem k tomu, že Jouleovy ztráty rostou se druhou mocninou proudu, účinnost celého kalicího systému se s rostoucím napájecím proudem mění.

Vzhledem k výsledkům je v praxi důležité zajistit co nejmenší vzdálenost mezi vsázkou a induktorem. Zároveň je nutné dodržet bezpečnostní vzdálenost, aby nedošlo k vyzkratování induktoru, které by mohlo vést k poškození kalicího systému.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] SKÁLOVÁ, Jana, Jaroslav KOUTSKÝ a Vladislav MOTYČKA. *Nauka o materiálech*. 4. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2010. ISBN 978-80-7043-874-9.
- [2] LANGER, Emil a Jiří KOŽENÝ. *Elektrotepelná zařízení indukční: základy teorie, výpočty a konstrukce*. Plzeň: Vysoká škola strojní a elektrotechnická, 1982.
- [3] RUDNEV, Valery, Don LOVELESS a Raymond COOK. *Handbook of induction heating*. Second edition. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group, [2017]. Manufacturing engineering and materials processing, 61. ISBN 9781138748743.
- [4] HRADÍLEK, Zdeněk. *Elektrotepelná zařízení*. Praha: IN-EL, 1997. Knižnice Elektro. ISBN 80-902333-2-5.
- [5] RUDNEV, Valery. *Handbook of induction heating*. New York: Marcel Dekker, c2003. ISBN 0824708482.
- [6] LIŠČÍČ, B. *Quenching theory and technology*. 2nd ed. Boca Raton: International Federation for Heat Treatment and Surface Engineering, c2010. ISBN 0849392799.
- [7] LUCAS, J., electromagnetic induction and electric conduction in industry, 1997
- [8] RUDNEV, Valery. *ASM Handbook Volume 4C: Induction Heating and Heat Treatment*, 2014, ISBN: 978-1-62708-012-5
- [9] STÝSKALA, V, Transformátory- učení texty pro inženýrské studium, Ostrava 1998
- [10] KRAUS, Václav. *Tepelné zpracování a slinování*. 3. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2013. ISBN 978-80-261-0260-1.
- [11] PTÁČEK, L, a kolektiv, *Nauka o materiálu 1*, 2003
- [12] HÁJEK, J., ROT, D., JIŘINEC, J., *Vliv volby parametrů při indukčním kalení na deformaci a vlastnosti výrobku*, 2018
- [13] *Bolzano / Úvod* [online]. Copyright © [cit. 20.04.2019]. Dostupné z: https://www.bolzano.cz/assets/files/TP/MOP_%20Tycova_ocel/EN_10083/MOP_vlastnosti_C35.pdf
- [14] Kavková, D, *Metody povrchového tvrzení, Přednáška*, SPŠ Na Třebešíně, 2016
- [15] *Povrchové kalení oceli kalení laserem laserové kalení tepelné zpracování. Kovomont* [online]. Dostupné z: <https://www.kovomontprerov.cz/laserove-kaleni/>
- [16] *O KATEDŘE / KMT TU Liberec* [online]. Copyright © [cit. 01.05.2019]. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/TTZ/tz%20Dad/povrkal.pdf
- [17] *Rozpad austenite* [online] Copyright © [cit. 01.05.2019]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/download/Tepelne%20zpracovani%2009_10.pdf
- [18] 2008 Thermal proces information book
- [19] *Rizika kalicího procesu - Strojárstvo / Strojírnoství. Prvý strojársky server - Strojárstvo / Strojírnoství* [online]. Copyright © 2019 Strojárstvo [cit. 03.06.2019]. Dostupné z: <https://www.engineering.sk/clanky2/povrchove-upravy/4140-rizika-kaliciho-procesu>
- [20] *Quenching and tempering of welded carbon steel tubulars. The Fabricator - Metal Fabricating News, Products, Articles, and More* [online]. Copyright © 2019 FMA Communications, Inc. All rights reserved. [cit. 03.05.2019]. Dostupné z: <https://www.thefabricator.com/article/tubepipefabrication/quenching-and-tempering-of-welded-carbon-steel-tubulars>

- [21] RADA, Josef. *Elektrotepelná technika: vysokoškolská příručka pro elektrotechnické fakulty vysokých škol technických*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1985.
- [22] *Návrh technologie povrchového kalení laserem u konstrukčních ocelí* [online]. Copyright ©MN [cit. 20.05.2019]. Dostupné z: [https://www.old.fst.zcu.cz/files_web_FST/SP_FST\(SVOC\)/2010/_sbornik/PapersPdf/Mgr/Klufova_Pavla.pdf](https://www.old.fst.zcu.cz/files_web_FST/SP_FST(SVOC)/2010/_sbornik/PapersPdf/Mgr/Klufova_Pavla.pdf)
- [23] *Vysoké učení technické v Brně* [online]. Copyright © [cit. 15.05.2019]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=64707
- [24] JIŘINEC, S., Vysokoteplotní tavení nekovových materiálů elektromagnetickou indukcí ve studením kelímku, Dizertační práce, 2017, ZČU, FEL, Katedra elektroenergetiky a ekologie
- [25] JUNGWIRTH, J., Průmyslové využití ohřevů elektromagnetickou indukcí, Plzeň, 2017, Bakalářská práce, ZČU, FEL, Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky
- [26] TOTTEN, George E. *Steel heat treatment: equipment and process design*. 2nd ed. Boca Raton, FL: Taylor & Francis, c2007. ISBN isbn9780849384547.