

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroenergetiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Možnosti použití indukčního ohřevu při povrchovém kalení
specializovaných a komplikovaných strojních součástí

Autor práce: **Bc. Vojtěch Vurm**
Vedoucí práce: **doc. Ing. David Rot, Ph.D.**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Vojtěch VURM**
Osobní číslo: **E22N0032P**
Studijní program: **N0713A060013 Výkonové systémy a elektroenergetika**
Specializace: **Elektroenergetika**
Téma práce: **Možnosti použití indukčního ohřevu při povrchovém kalení specializovaných a komplikovaných strojních součástí**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky**

Zásady pro vypracování

- Úvod do indukčního povrchového kalení: Uveďte teoretický rámec pro indukční povrchové kalení, včetně principů a možných technik.
- Analyzujte zvolené specializované a komplikované strojní součásti, u kterých by mohlo být indukční povrchové kalení vhodné, ale jeho aplikace náročná, jako je povrchové kalení drážek u válcových součástí, či kalení pat válcových čepů atd. Zahrňte i diskusi o používaných materiálech a jejich vlastnostech.
- Uveďte optimalizační metody použitelné pro stanovení ideálních klíčových parametrů indukčního kalení, jako je provedení induktoru, frekvence, výkon, doba ohřevu atd, s cílem dosáhnout optimálních výsledků kalení.
- Navrhněte s pomocí numerické simulace a zvolené optimalizační metody či metod vhodný induktor či induktory pro vybranou strojní součást, a i celý kalící proces pro vybranou či vybrané strojní součásti, s ohledem na jejich tvar, rozměry a požadavky na povrchové kalení.
- Proveďte experimentální testy na zvolené strojní součásti prostřednictvím optimalizovaného induktoru a optimalizovaných parametrů kalení. Srovnajte výsledky s teoretickými předpoklady a analyzujte účinnost a přesnost navrženého řešení.
- Srovnání s tradičními metodami kalení: Porovnejte výsledky indukčního povrchového kalení s tradičními metodami, jako je povrchové kalení pomocí plynu, laseru nebo objemové kalení v peci, s ohledem na kvalitu, efektivitu a energetickou spotřebu.
- Diskuse o ekonomických a environmentálních aspektech: Zhodnoťte ekonomické a environmentální dopady použití indukčního ohřevu při povrchovém kalení specializovaných a komplikovaných strojních součástí.
- Závěr – zamyslete se nad budoucím vývojem a potenciálními inovacemi oboru a navrhněte možné směry pro budoucí výzkum a inovace v oblasti indukčního ohřevu pro účely povrchového kalení, s důrazem na nové technologie, materiály a aplikace.

Rozsah diplomové práce: **40-60**
Rozsah grafických prací: **10-15**
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Rudnev, V., Totten G. E. AMS Handbook, Volume 4C: Induction Heating and Heat Treatment Hardcover. ASM International, 2014. ISBN 978-1627080125.
2. Rudnev, V. Handbook of induction heating (Manufacturing Engineering and Materials Processing) 2nd. CRC Press, 2017. ISBN 978-1466553958.
3. Lupi, S., Forzan, M., Aliferov, A. Introduction and Direct Resistance Heating. New York : Springer. ISBN 978-3-319-03478-2.
4. Davies, J. Heat Treatment: Conventional and Novel Applications. CRC Press 2018.
5. Langer E. Teorie indukčního a dielektrického tepla , Praha : Academia 1979.
6. Rada J. Elektrotepelná technika , Praha : SNTL 1985.

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

Datum zadání diplomové práce: **6. října 2023**
Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2024**



L.S.

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

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

V Plzni dne 6. října 2023

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce se zabývá návrhem induktoru pro indukční povrchové kalení konkrétní strojní součásti se složitější geometrií nedovolující použití klasického induktoru kvůli nepříznivému rozložení elektromagnetického pole v drážce a na hranách vsázky. Nejprve vznikl prvotní induktor, který svým tvarem umožnil ohřát i dno úzké drážky na požadovanou teplotu. Dále byla vytvořena simulace tohoto ohřevu. Během výpočtu byly nalezeny ideální rozměry induktoru a parametry ohřevu, které umožňují rovnoměrný a dostatečný ohřev dané součásti v požadovaných místech. V práci jsou dále porovnány možné technologie povrchového kalení s přihlédnutím k energetické náročnosti jednotlivých postupů a k jejich možnému environmentálnímu dopadu. Účinnost indukčního povrchového kalení byla posouzena na základě měření.

Klíčová slova

indukční ohřev, povrchové kalení, počítačové modelování

Abstract

The present thesis deals with designing an inductor for induction surface hardening of a specific machine component. Due to the complex shape, a classical cylindrical inductor could not be used because of the unfavorable distribution of the electromagnetic field in the groove and on the edges of the load. First, a prototype of the inductor was made. Its shape made it possible to heat the narrow groove's bottom to the required temperature. Next, a simulation of this heating was created. During the calculations, the ideal inductor dimensions and heating parameters were found. With the designed inductor, achieving a more uniform temperature distribution is possible. The paper also compares possible surface hardening technologies, considering each process's energy consumption and potential environmental impact. The efficiency of induction surface hardening was assessed based on measurements.

Keywords

induction heating, surface hardening, numerical modeling

Prohlášení

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

V Plzni, 24. května 2024

Bc. Vojtěch Vurm

Obsah

1 Úvod do indukčního povrchového kalení	1
1.1 Princip a historie indukčního ohřevu	1
1.1.1 Elektrodynamické potenciály	2
1.1.2 Teplotní pole	6
1.1.3 Optimalizační metody	9
1.1.4 Historie indukčního ohřevu a povrchového indukčního kalení	11
1.2 Kalení	12
1.2.1 Indukční povrchové kalení	14
1.2.2 Další technologie pro povrchové kalení	15
1.3 Zařízení pro indukční ohřev	18
1.4 Komplikované strojní části	20
1.5 Ekonomika a environmentální dopad povrchového kalení	21
1.6 Materiály	26
2 Návrh induktoru	28
2.1 Definice vsázky	28
2.2 Měření s fyzickým induktorem	31
2.3 Numerický model	33
2.3.1 Stanovení parametrů ohřevu	34
2.3.2 Model induktoru	38
3 Závěr	42
3.1 Induktor	42
3.2 Nové trendy a další vývoj	42
Literatura	45

Seznam symbolů

<i>A</i>	$\text{Wb} \cdot \text{m}^{-1}$	magnetický vektorový potenciál
\bar{A}	$\text{Wb} \cdot \text{m}^{-1}$	fázor magnetického vektorového potenciálu
<i>a</i>	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	součinitel teplotní vodivosti
<i>B</i>	T	Magnetická indukce
<i>c_p</i>	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	měrná tepelná kapacita
<i>E</i>	$\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$	intenzita elektrického pole
<i>f</i>	Hz	frekvence
<i>H</i>	$\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$	intenzita magnetického pole
\bar{H}	$\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$	fázor intenzity magnetického pole
<i>H</i>	J	entalpie
<i>h</i>	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$	měrná entalpie
<i>I</i>	A	elektrický proud
<i>J</i>	$\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$	proudová hustota
\bar{J}	$\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$	fázor proudové hustoty
<i>P</i>	W	činný výkon
<i>Q</i>	J	tepelná energie
<i>q</i>	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	hustota tepelného toku
<i>q*</i>	$\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$	vnitřní měrné ztráty
<i>R</i>	Ω	elektrický odpor
<i>T</i>	K	termodynamická teplota
<i>t</i>	s	čas
<i>V</i>	m^3	objem
<i>v</i>	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	okamžitá rychlost

α	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	součinitel přestupu tepla
γ	$\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$	elektrická vodivost
δ	m	hloubka vniku elektromagnetické vlny
ε	$\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$	permitivita
λ	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	součinitel tepelné vodivosti
μ	$\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$	permeabilita
ρ	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	hustota
φ	V	elektrický skalární potenciál
ω	$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$	úhlová rychlost

Seznam zkratek

CCT	Continuous Cooling Transformation Diagrams
FDM	Fused Deposition Modeling
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
MOS FET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
PRI	Parallel Resonant Inverter
SLS	Selective Laser Sintering
SRI	Series Resonant Inverter

1 Úvod do indukčního povrchového kalení

Tepelné zpracování kovů představuje jednu z podstatných znalostí, které se lidstvo naučilo. Existuje mnoho způsobů aplikace tepla v metalurgii od tavení přes tváření, žhánání, svařování atd. až po kalení. Povrchové kalení je základní metodou pro zušlechťování povrchů ocelových strojních součástí za účelem dosažení větší tvrdosti povrchu a tedy větší mechanické odolnosti a pevnosti. Jednou z často používaných metod pro povrchové kalení je indukční ohřev. Jeho uplatnění je velice široké a jeho využití je vhodné pro nejrůznější typy strojních součástí.

Motivace

Ačkoliv je indukční ohřev pro potřeby povrchového kalení používán již desítky let, stále nacházíme konkrétní aplikace, kde použití indukčního ohřevu přináší jisté obtíže. Příkladem těchto aplikací jsou tvarově složité díly, které svojí geometrií znemožňují pronikání elektromagnetického vlnění do všech oblastí. Aby bylo možné účinně prohřát tyto oblasti, je zapotřebí specifických induktorů navržených speciálně pro danou strojní součást. Díky současnému poznání na poli numerického modelování je možné celý proces s jistou spolehlivostí předem připravit a optimalizovat ve virtuálním prostředí a až poté přistoupit k samotnému uskutečnění ohřevu. Ačkoliv předkládaná práce vznikala na základě konkrétního požadavku, jsou použité principy a optimalizační postupy obecně platné. Po určité úpravě je tedy možné je aplikovat i na jiné složité strojní součásti, jejichž geometrie se vyznačuje podobnými prvky jako strojní část (dutý hřídel s drážkou), jejíž povrchové zakalení je předmětem této práce.

1.1 Princip a historie indukčního ohřevu

Podobu indukčního ohřevu lze přirovnat ke vzduchovému transformátoru, kde primární vinutí zastupuje induktor a sekundár spojený nakrátko představuje vodivá vsázka umístěná nejčastěji uvnitř induktoru. Cívka protékající elektrickým proudem ve svém okolí budí elektromagnetické pole. Pro případ ohřevu rovinných těles, například ocelových plechů nebo hranolů, volíme induktor z pásového vodiče. Je žádoucí vytvarovat induktor tak, aby jeho části byly rovnoběžné se stěnami ohříváné vsázky. Je-li předmětem ohřevu válcové těleso, volíme souosou cívku válcového tvaru. Dopadá-li elektromagnetické vlnění na vodivou stěnu vsázky dochází k odrazu vlnění, avšak část ho proniká do vsázky. Vznikají indukované vířivé proudy o proudové hustotě J . Velikost amplitudy proudové hustoty (v případě rovinné stěny velké tloušťky) exponenciálně klesá se vzdáleností od povrchu. Energie vniklého elektromagnetického vlnění je přeměněna na pohybovou energii volných elektronů, které se pohybují ve směru intenzity elektrického pole. Jak se elektrony urychlují, narážejí do molekul materiálu. Molekuly kmitají kolem rovnovážné polohy s větší intenzitou. Makroskopicky se tento jev projeví vzrůstající teplotou vodivé stěny. [1]

Budeme-li uvažovat případ indukčního ohřevu stěny velké tloušťky v rovinném magnetickém poli, pak tepelný výkon dodaný do stěny je:

$$P_{21} = \frac{1}{2\delta\gamma} H_2^2 \text{ (W)}, \quad (1.1)$$

kde δ je hloubka vniku elektromagnetického vlnění, γ je elektrická vodivost materiálu stěny a H_2 je velikost vektoru intenzity magnetického pole na povrchu stěny. Vztah je odvozen například zde [1].

1.1.1 Elektrodynamické potenciály

Tato část obsahuje odvození veličin významných pro numerické modelování elektromagnetických polí. Elektrodynamické potenciály jsou při popisu pole používány pro svoji spojitost a jednoznačnost i mimo regulární body. Při popisu magnetického pole vyjdeme z první Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru:

$$\text{rot}\mathbf{H} = \mathbf{J}, \quad (1.2)$$

kde \mathbf{H} je vektor intenzity magnetického pole a \mathbf{J} je vektor proudové hustoty. Po úpravě pomocí materiálového vztahu získáme tvar:

$$\text{rot}\frac{1}{\mu}\mathbf{B} = \mathbf{J}, \quad (1.3)$$

kde \mathbf{B} je vektor magnetické indukce a μ je celková permeabilita prostředí.

Nyní zavedeme magnetický vektorový potenciál:

$$\text{rot}\mathbf{A} = \mathbf{B}. \quad (1.4)$$

Po dosazení do předchozí rovnice:

$$\text{rot}\frac{1}{\mu}\text{rot}\mathbf{A} = \mathbf{J}. \quad (1.5)$$

S okrajovými podmínkami (viz dále) popisuje tato rovnice stacionární magnetické pole i mimo regulární body. V oblasti indukčního ohřevu se jako vsázka často vyskytuje ocel. Ta může mít remanentní indukci. V takovém případě se rovnice upraví do tvaru:

$$\text{rot}\frac{1}{\mu}(\text{rot}\mathbf{A} - \mathbf{B}_r) = \mathbf{J}. \quad (1.6)$$

Indukce \mathbf{B}_r může představovat i indukci permanentního magnetu.

Odvození rovnice pro nestacionární magnetické pole je založené na druhé Maxwellově rovnici v diferenciálním tvaru, do které dosadíme z definičního vztahu pro magnetický vektorový potenciál:

$$\text{rot}\mathbf{E} = -\text{rot}\frac{d\mathbf{A}}{dt}. \quad (1.7)$$

$$\text{rot}\left(\mathbf{E} + \frac{d\mathbf{A}}{dt}\right) = 0. \quad (1.8)$$

Z rovnice v tomto tvaru je patrné, že uvažované vektorové pole je nevírové. Může být tedy zaveden elektrický skalární potenciál:

$$\left(\mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}\right) = -\text{grad } \varphi. \quad (1.9)$$

$$\mathbf{E} = -\frac{d\mathbf{A}}{dt} - \text{grad } \varphi. \quad (1.10)$$

Totální derivaci vektoru magnetické indukce, která je funkcí času a souřadnic, vyjádříme jako:

$$\frac{d\mathbf{B}}{dt} = \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{B}, \quad (1.11)$$

kde vektor \mathbf{v} představuje směr rychlosti pohybu. Vynásobme nyní rovnici 1.10 elektrickou vodivostí γ . Dostaneme rovnici:

$$\gamma \mathbf{E} = \mathbf{J} = -\gamma \frac{d\mathbf{A}}{dt} - \gamma \text{grad } \varphi. \quad (1.12)$$

Nyní využijme rovnici 1.11 a s její pomocí upravme vztah 1.12 do tvaru:

$$\mathbf{J} = -\gamma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{A} \right) - \gamma \text{grad } \varphi. \quad (1.13)$$

Tento vztah dále upravíme a dostaneme rovnici:

$$\mathbf{J} = -\gamma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \gamma \mathbf{v} \times \text{rot} \mathbf{A} - \gamma \text{grad } \varphi. \quad (1.14)$$

Dosaď me rovnici 1.4 do první Maxwellovy rovnice. Dostaneme proudovou hustotu vyjádřenou vztahem:

$$\mathbf{J} = \text{rot} \mathbf{H} = \text{rot} \frac{1}{\mu} \mathbf{B} = \text{rot} \frac{1}{\mu} (\text{rot} \mathbf{A} - \mathbf{B}_r) \quad (1.15)$$

$$\text{rot} \frac{1}{\mu} (\text{rot} \mathbf{A} - \mathbf{B}_r) = -\gamma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \gamma \mathbf{v} \times \text{rot} \mathbf{A} - \gamma \text{grad } \varphi. \quad (1.16)$$

Označme výraz $\gamma \text{grad } \varphi$ jako proudovou hustotu zdroje \mathbf{J}_z a rovnici upravme do následujícího tvaru:

$$\text{rot} \frac{1}{\mu} (\text{rot} \mathbf{A} - \mathbf{B}_r) + \gamma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \gamma \mathbf{v} \times \text{rot} \mathbf{A} = \mathbf{J}_z. \quad (1.17)$$

Získáváme rovnici nestacionárního magnetického vektorového potenciálu. První část proudové hustoty popisuje stacionární magnetické pole. Druhá část reprezentuje transformační složku, tedy časově proměnný proud protékající vodičem. Třetí část s vektorem rychlosti představuje pohyb ve stacionárním poli, v jehož důsledku vzniká posuvný proud.

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

$$\operatorname{rot} \frac{1}{\mu} (\operatorname{rot} \mathbf{A} - \mathbf{B}_r) + \gamma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = \mathbf{J}_z. \quad (1.18)$$

Pomocí vektorové identity výraz upravíme a zároveň zavedeme fázory, neboť předpokládáme harmonický průběh proudu:

$$-\frac{1}{\mu} (\Delta A) + \gamma j \omega \bar{A} = \bar{J}_z. \quad (1.19)$$

Nyní doplníme okrajové podmínky, které jsou nutné pro analytický i numerický výpočet a při vhodné geometrii modelované úlohy nám zároveň pomohou výpočet zjednodušit. Rozlišujeme dvě okrajové podmínky - Dirichletovu a Neumannovu.

Dirichletova podmínka pro magnetický vektorový potenciál

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

$$\mathbf{A}|_{\Gamma} = f_{1(\Gamma,t)}. \quad (1.20)$$

Funkce $f_{1(\Gamma,t)}$ může být samozřejmě i konstantní. V případě určení magnetického vektorového potenciálu využijeme fakt, že jeho normálová složka odpovídá normálové složce magnetické indukce podle vztahu 1.4. Stanovíme-li v nějakém bodě hodnotu \mathbf{A} konstantní, pak je normálová složka vektoru \mathbf{B} nulová. Toto využijeme v případech, kdy je hranice, pro kterou potenciál definujeme, rovnoběžná se siločárou. Například v námi uvažovaném případě ohřevu válcové vsázky se jedná o osu rotační symetrie. Pro definici okraje modelu přiřazujeme dané geometrii hodnotu $\mathbf{A} = 0$.

Neumanova podmínka

Neumanova okrajová podmínka určuje normálu k dané hranici (ose atd.).

$$\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial \mathbf{n}}|_{\Gamma} = f_{2(\Gamma,t)}. \quad (1.21)$$

Jako v předešlém případě je díky této podmínce možno zjednodušovat numerické výpočty. Neumannova podmínka se často přiřazuje umělé hranici, kterou můžeme zavést díky symetrii geometrie řešené úlohy.

Hloubka vniku

Velikost oblasti, ve které se indukují vířivé proudy a tedy i oblast, kde vzniká ve vsázce teplo, je závislá na *hloubce vniku*. Při odvození vyjdeme z vlnové rovnice elektromagnetického vlnění. Nejprve je nutné vyjádřit elektromagnetickou vlnu jako funkci jedné veličiny. Vyjdeme z první Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru a z materiálových vztahů:

$$\operatorname{rot}\mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial\mathbf{D}}{\partial t} = \gamma\mathbf{E} + \frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon\mathbf{E}). \quad (1.22)$$

Aplikujme nyní na rovnici rotaci.

$$\operatorname{rot}\operatorname{rot}\mathbf{H} = \gamma\operatorname{rot}\mathbf{E} + \varepsilon\frac{\partial}{\partial t}\operatorname{rot}\mathbf{E} = -\gamma\frac{\partial\mathbf{B}}{\partial t} - \varepsilon\frac{\partial^2\mathbf{B}}{\partial t^2}. \quad (1.23)$$

S využitím vektorové identity můžeme psát:

$$\operatorname{grad}\operatorname{div}\mathbf{H} - \Delta\mathbf{H} = 0 - \Delta\mathbf{H} = -\gamma\frac{\partial\mathbf{B}}{\partial t} - \varepsilon\frac{\partial^2\mathbf{B}}{\partial t^2}. \quad (1.24)$$

$$-\Delta\mathbf{H} = -\gamma\mu\frac{\partial\mathbf{H}}{\partial t} - \varepsilon\mu\frac{\partial^2\mathbf{H}}{\partial t^2}. \quad (1.25)$$

$$\Delta\mathbf{H} - \gamma\mu\frac{\partial\mathbf{H}}{\partial t} - \varepsilon\mu\frac{\partial^2\mathbf{H}}{\partial t^2} = 0. \quad (1.26)$$

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

$$\Delta H - j\omega\gamma\mu\bar{H} + \omega^2\varepsilon\mu\bar{H} = 0. \quad (1.27)$$

Takto přepsanou rovnici dále upravme:

$$\Delta H + \bar{H}(\omega^2\varepsilon\mu - j\omega\gamma\mu) = \Delta H + k^2\bar{H} = 0. \quad (1.28)$$

Podoba výrazu v závorce v rovnici 1.28 bude závislá na vlastnostech prostředí, ve kterém elektromagnetickou vlnu vyšetřujeme.

Uvažujme vodivou stěnu. Pak je elektrická vodivost γ nenulová a zároveň mnohem větší než součin $\omega\varepsilon$. Část výrazu $\omega^2\varepsilon\mu$ tak můžeme zanedbat a výraz v závorce, označme jsme jej k^2 , se tak zjednoduší:

$$k^2 = -j\omega\gamma\mu. \quad (1.29)$$

Dostáváme kvadratickou rovnici, jejíž řešení lze zapsat jako:

$$k_{1,2} = \pm \frac{1+j}{\sqrt{2}} \sqrt{\omega\gamma\mu}. \quad (1.30)$$

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

$$\operatorname{RE}\{k\} = \sqrt{\frac{\omega\gamma\mu}{2}} = \frac{1}{\delta}. \quad (1.31)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\gamma\mu}} = \sqrt{\frac{1}{\pi f\gamma\mu}} \text{ (m)}. \quad (1.32)$$

Získanou hloubku vniku δ dosadíme do rovnice 1.1:

$$P_{21} = \frac{1}{2\delta\gamma} H_2^2 = \frac{1}{2\gamma\sqrt{\frac{1}{\pi f\gamma\mu}}} H_2^2 = \frac{\sqrt{\pi f\gamma\mu}}{2\gamma} H_2^2 \text{ (W)}. \quad (1.33)$$

Intenzita magnetického pole H_2 je z první Maxwellovy rovnice přímo úměrná celkovému proudu. Z rovnice 1.33 je zřejmé, že výkon dodávaný do vodivé stěny je úměrný druhé mocnině proudu a druhé odmocnině z frekvence. Tento poznatek je důležitý pro řízení indukčního ohřevu, neboť frekvence a velikost proudu jsou jediné veličiny, které jsme schopni během ohřevu ovlivnit. Skutečnost, že je výkon přenášený do vsázky úměrný druhé mocnině intenzity magnetického pole říká, jak snadno navýšit předávaný výkon zvýšením počtu závitů induktoru. Zvýšíme-li počet závitů z jednoho na dva, vzroste předávaný výkon čtyřikrát (pokud to dovoluje výkon zdroje).

Z hlediska počítačového modelování má hloubka vniku zásadní význam při tvorbě sítě. Jemnost sítě u povrchu vsázky je rozhodující pro přesnost výpočtu. Při vniku elektromagnetické vlny do rovinné stěny je tato utlumená na vzdálenosti $2\pi\delta$, zatímco proudová hustota J už na poloviční vzdálenosti od stěny, tedy v hloubce $\pi\delta$. V této tenké vrstvě je také generováno teplo vířivými proudy. Je proto nutné zajistit dostatečnou jemnost sítě výpočetních bodů právě v této oblasti.

1.1.2 Teplotní pole

Při indukčním ohřevu elektricky vodivé vsázky se v ní indukují vířivé proudy. Ty jsou příčinou vzniku tepla ve vsázce. Takto vzniklé teplo se šíří ve vsázce vedením. Zároveň dochází k přenosu tepla do okolí vsázky prouděním a sáláním. Soustředíme se nyní na teplotní pole ve vsázce. Způsob, jakým se teplo v pevném prostředí vsázky šíří, popisuje Fourier-Kirchhoffova rovnice. Fourier-Kirchhoffova rovnice v diferenciální tvaru vyjadřuje rovnost časové změny tepelné kapacity a celkové změny tepla sdíleného vedením a vzniká-li, resp. zaniká-li, energie (v elementu objemu za element času) i přírůstek, resp. úbytek tepla. [2] [3]

Fourier-Kirchhoffova rovnice

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

$$\frac{dH}{dt} = \int_S -\mathbf{n}\mathbf{q}dS + \int_V q^*dV \quad (1.34)$$

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

Entalpii můžeme vyjádřit jako objemový integrál vyjadřující energii v celém systému:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_V h\rho dV = \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho c_p (T - T_{\text{ref}}) dV, \quad (1.35)$$

kde h je měrná entalpie, ρ je látková hustota, c_p je měrná tepelná kapacita a T je termodynamická teplota.

Po dosazení do rovnice 1.34 dostáváme:

$$\int_S -\mathbf{n}\mathbf{q}dS + \int_V q^*dV = \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho c_p (T - T_{\text{ref}}) dV. \quad (1.36)$$

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

$$\int_S -\mathbf{n}\mathbf{q}dS + \int_V q^*dV = \int_V \frac{\partial}{\partial t} (\rho c_p (T - T_{\text{ref}})) dV. \quad (1.37)$$

Použijme nyní Gaussovu-Ostrogradského větu na úpravu první části výrazu v levé straně rovnice 1.37. Dostaneme rovnici 1.38, kde jsou všechny členy rovnice vyjádřeny pomocí objemových integrálů, můžeme tedy korektně upravit rovnici do podoby 1.39.

$$\int_V -\nabla\mathbf{q}dV + \int_V q^*dV = \int_V \frac{\partial}{\partial t} (\rho c_p (T - T_{\text{ref}})) dV. \quad (1.38)$$

$$-\nabla\mathbf{q} + q^* = \frac{\partial T}{\partial t} \rho c_p. \quad (1.39)$$

$$-\frac{1}{\rho c_p} \nabla\mathbf{q} + \frac{q^*}{\rho c_p} = \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (1.40)$$

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

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v}\nabla T = \frac{dT}{dt}. \quad (1.41)$$

Podívejme se na význam \mathbf{q} v rovnici 1.40 a dosaďme do ní:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{1}{\rho c_p} \nabla \cdot (-\lambda \nabla T + \mathbf{v} \rho c_p (T - T_{\text{ref}})) + \frac{q^*}{\rho c_p}, \quad (1.42)$$

kde λ je součinitel tepelné vodivosti.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\lambda}{\rho c_p} \nabla \nabla T - \nabla \cdot (\mathbf{v} (T - T_{\text{ref}})) + \frac{q^*}{\rho c_p}. \quad (1.43)$$

Využijeme vlastností skalárního součinu vektorů k úpravě prostředního výrazu pravé strany rovnice 1.43:

$$\mathbf{a} \cdot (\mathbf{b} + \mathbf{c}) = \mathbf{a} \cdot \mathbf{b} + \mathbf{a} \cdot \mathbf{c}. \quad (1.44)$$

Po dosazení:

$$\nabla \cdot (\mathbf{v} (T - T_{\text{ref}})) = \nabla \cdot (T - T_{\text{ref}}) \mathbf{v} + (T - T_{\text{ref}}) \nabla \cdot \mathbf{v}. \quad (1.45)$$

Takto upravenou rovnici 1.45 dosadíme do vztahu 1.43:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\lambda}{\rho c_p} \nabla \nabla T - \nabla \cdot (T - T_{\text{ref}}) \mathbf{v} + (T - T_{\text{ref}}) \nabla \cdot \mathbf{v} + \frac{q^*}{\rho c_p}. \quad (1.46)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c_p} \nabla^2 T - \nabla \cdot (T - T_{\text{ref}}) \mathbf{v} - (T - T_{\text{ref}}) \nabla \cdot \mathbf{v} + \frac{q^*}{\rho c_p}. \quad (1.47)$$

Předpokládejme ustálený stav, pak je rychlost šíření tepla ve směrech x , y a z v kartézských souřadnicích konstantní a platí rovnice 1.48. Dále předpokládejme platnost výrazu 1.49.

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0. \quad (1.48)$$

$$\nabla \cdot (T - T_{\text{ref}}) \mathbf{v} = \nabla \cdot T \mathbf{v}. \quad (1.49)$$

Poté můžeme rovnici 1.47 napsat ve tvaru:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c_p} \nabla^2 T - \mathbf{v} \cdot \nabla T + \frac{q^*}{\rho c_p} = a \nabla^2 T - \mathbf{v} \cdot \nabla T + \frac{q^*}{\rho c_p}, \quad (1.50)$$

kde a je součinitel teplotní vodivosti. A konečně dosaďme do této rovnice vztah 1.41. Po dosazení a úpravě dostáváme finální tvar Fourier-Kirchhoffovy rovnice pro šíření tepla v diferenciálním tvaru:

$$\frac{dT}{dt} = a \nabla^2 T + \frac{q^*}{\rho c_p} = a \nabla^2 T + \frac{w_J}{\rho c_p}. \quad (1.51)$$

Záměnu q^* za w_J jsme vzhledem k naší aplikaci v indukčním ohřevu korektně uskutečnili za předpokladu, že

teplo v materiálu vzniká pouze na základě Jouleových ztrát.

Okrajové podmínky

Okrajové podmínky jsou důležitou součástí numerického modelu. Vhodně zvolené mohou zásadním způsobem ovlivnit rychlost simulace a snížit požadavky na hardware. Pro optimalizaci simulace je rovněž důležité vhodně využít případných symetrií. Při řešení problematiky teplotních polí určujeme, stejně jako v případě polí elektromagnetických, Dirichletovu a Neumanovu podmínku. [2]

Dirichletova podmínka

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

$$T|_{\Gamma} = f_{3(\Gamma,t)}. \quad (1.52)$$

Neumanova podmínka

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

$$\frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}}|_{\Gamma} = f_{4(\Gamma,t)}. \quad (1.53)$$

Tato podmínka je často zadávána v osách symetrie (v našem případě v ose válcové vsázky), kde je tepelný tok touto hranicí nulový. Což opět přispívá k rychlejší konvergenci numerického modelu. Za předpokladu nulového toku touto hranicí bude i parciální derivace teploty nulová. [2]

1.1.3 Optimalizační metody

Optimalizace je proces hledání ideálního řešení, extrému nějaké obecné funkce, v rámci předem daných omezujících kritérií. Závislost jednotlivých optimálních řešení na vynaložených prostředcích prezentuje tzv. Paretova fronta. Optimální řešení rovněž nazýváme *cílovou funkcí*. Ta může být jedna, pak hovoříme o monokriteriální úloze, nebo může být hledaných funkcí více, pak je řeč o multikriteriální úloze. Existuje-li více výchozích parametrů, které vedou ke stejnému výsledku, pak tuto úlohu nazýváme multimodální. Kromě výše zmíněného dělení úloh můžeme optimalizační úlohy dále dělit podle funkce například na úlohy *geometrické optimalizace* (rozměr, tvar, topologie), nebo úlohy, ve kterých řešíme změnu vstupních parametrů na základě požadovaného výstupu. Tyto optimalizační úlohy nazýváme *inverzní*. [4]

Za účelem nalezení optimálního řešení vznikla řada postupů, algoritmů apod., které mají nejčastěji za úkol najít minimum funkce díky změně parametrů. Je-li hledáno maximum funkce, pak je to v praxi řešeno jako hledání záporné hodnoty cílové funkce. [4]

Během optimalizace jsou do výpočetního mechanismu dosazovány vstupní hodnoty. Výsledek každého výpočtu, každé iterace, je porovnán s výsledkem z předchozí iterace. K ukončení výpočtu dojde, je-li splněna zadaná podmínka – *konvergenční kritérium*. Následující text se bude věnovat principům, na kterých fungují některé optimalizační metody. Nebudou uvedeny všechny rovnice a formulace, kterými jsou popsány.

Podle postupu při volbě hodnot pro příští iterační výpočet dělíme optimalizační metody na:

- metody gradientní a metody s aproximací gradientu,
- stochastické metody a
- ostatní.

Tam, kde lze popsat hledané řešení pomocí analytické spojité funkce jsou používány metody s výpočtem gradientu, jako například Gradient Descent či SNOPT. Gradient Descent, neboli sestupný gradient, je algoritmus sloužící k nalezení lokálního minima funkce. Z výchozího bodu tak výpočet pokračuje ve směru opačném, než je směr gradientu funkce. Krok výpočtu může být konstantní nebo adaptabilní. Algoritmus s adaptabilním krokem může být při hledání minima úspěšnější. Konvergence optimalizačního algoritmu, využívajícího některou z gradientních metod, záleží nejen na vhodné volbě velikosti kroku, ale rovněž na počáteční podmínce. V případě špatně zvolené počáteční polohy nemusí být algoritmus úspěšný ani při využití adaptabilního kroku.

Jednou z často používaných metod s aproximací gradientu je Nelder-Mead. Tato se stala základem pro další optimalizační algoritmy [4]. Metoda nevyžaduje informaci o derivaci cílové funkce. Řešení hledá aplikací tzv. trojúhelníkových simplexů. Proces výpočtu jedné iterace sestává ze čtyř kroků: zrcadlení, protažení, kontrakce a zmenšení. Představme si 2D úlohu elektrostatického pole se dvěma elektrodami, kde je hledáno místo s nejmenším potenciálem. Výpočet si lze představit tak, že aplikací výše zmíněných kroků na prvotní trojúhelníkový simplex vznikne nový trojúhelník. Následně je posouzena velikost cílové funkce v jeho vrcholech. Ten s nejnižší hodnotou je zachován a stává se jedním z vrcholů nového trojúhelníkového simplexu. Tímto způsobem je hledáno minimum funkce (místo s nejnižším potenciálem) do té doby, než se velikost cílové funkce ve vrcholech simplexu liší maximálně o zadané konvergenční kritérium. Do stejné skupiny jako Nelder-Mead patří i algoritmus BOBYQA.

Mezi stochastické metody patří takzvané generické algoritmy. Postup jejich výpočtu je do jisté míry inspirován principy evoluční biologie v přírodě. Proces generické optimalizace začíná inicializací. Ta představuje náhodné rozložení jedinců (startovních bodů optimalizace) v prostoru tak, aby byla pokryta všechna možná řešení, která se v daném prostoru mohou nacházet. V dalším kroku jsou vybráni ti jedinci, kteří se jeví jako vhodnější. I tak je proces výběru částečně náhodný. Následuje reprodukce, kdy vzniká nová generace jedinců (výpočetních bodů). Nová generace vzniká z té předchozí pomocí generických operátorů, například přechodu nebo mutace. Poté jsou vyhodnoceny vlastnosti nové generace. Pakliže v průběhu vyhodnocování byl nalezen jedinec splňující dané požadavky (konvergenční kritérium), je výpočet zastaven. Pokud nalezen není, opakují se kroky reprodukce a vyhodnocení do doby, než je nalezen hledaný jedinec, nebo dokud není vyčerpán maximální počet kroků. Příkladem generického algoritmu je NSGA-II. [4]

Jednou z nejčastějších optimalizačních úloh při řešení indukčních ohřevů je hledání ideálního tvaru induktoru. Konvergenčním kritériem v tomto případě bývá například velikost magnetické indukce podél požadovaného povrchu.

1.1.4 Historie indukčního ohřevu a povrchového indukčního kalení

Základní myšlenkou indukčního ohřevu je využití ztrát, které vznikají v elektricky vodivém materiálu s konečnou vodivostí vlivem vířivých proudů indukovaných vnějším magnetickým polem. Že průchod proudu vodičem způsobuje jeho oteplení si jako jeden z prvních uvědomil James Prescott Joule (1818-1889), který v roce 1840 formuloval rovnici:

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t \text{ (J)}, \quad (1.54)$$

známou jako Jouleův zákon, kde Q je teplo, R je elektrický odpor vodiče, I je elektrický proud a konečně t je čas. [5] [6]

Jedním z nejpodstatnějších milníků v historii elektrotechniky byl objev elektromagnetismu. Základní myšlenku v této oblasti přinesl dánský fyzik Hans Christian Ørsted (1777-1851). Ten zjistil, že průchod elektrického proudu vodičem vyvolá magnetické pole schopné vychýlit stříčku kompasu. Jeho mladší následovník Michael Faraday (1791-1867) provedl opačný experiment, při kterém objevil, že pohyb magnetu vyvolá proud v uzavřené vodivé smyčce. Popsal tak princip elektromagnetické indukce. Matematické vysvětlení tohoto jevu provedl James Clerk Maxwell (1831-1879), který na základě objevů Ørstedta, Faradaye, Ohma, Joulea a Ampéra formuloval teorii elektromagnetismu. Neméně důležitou roli sehrál Charles Proteus Steinmetz (1865-1923), který se ve své práci zabýval výpočty při návrhu elektrických strojů. Zavedl termín *hloubka vniku*, která je jedním ze stěžejních parametrů při návrhu indukčních zařízení. Za první zařízení cíleně využívající indukční ohřev je považována kanálová pec F. A. Kjellina (1872-1910), která byla poprvé vyzkoušena v roce 1900. [5]

Výhodou použití indukce pro tavbu je zachování maximální čistoty výsledné slitiny. U indukčních pecí nedochází k uvolňování uhlíku z elektrod do vsázky, na rozdíl od pecí obloukových. Zároveň díky dynamickým účinkům indukovaných proudů dochází k mísení roztaveného materiálu. Dojde tak k homogennímu rozložení legur na objemu vsázky. Nejvýznamnější je tavba kovů jako jsou nikl, měď či hliník a jejich slitin. Velký význam má samozřejmě výroba a zpracování ušlechtilých ocelí. [7]

Využití povrchového indukčního kalení bylo od samého počátku zaměřeno na zvýšení tvrdosti povrchu ozubených kol a třecích ploch klikových hřídelí spalovacích motorů. V těchto konkrétních aplikacích probíhá vývoj od 20. let minulého století prakticky do současnosti. Principiálně je proces kalení těchto součástí zvládnutý, řeší se zejména konkrétní aplikace a zefektivnění ohřevu. U hřídelí a obecně u válcových vsázek se hledaly netradiční tvary induktorů, schopné vnútit magnetické pole do tvarově složitější vsázky. V případě ozubených kol menších velikostí často postačil jednozávitový induktor, přičemž se hledal jeho ideální průměr vzhledem k průměru ozubeného kola. V případě větších ozubených kol přichází v úvahu menší speciální induktory, pomocí kterých se kalí každý zub kola separátně. [5]

Pro zlepšování vlastností ozubených kol bylo indukční kalení v průmyslu používáno od 30. let 20. století firmami General Electric nebo Westinghouse. V roce 1935 profesor Valentin P. Vologdin (1891-1953) a B. I. Romanov využívají indukčního ohřevu ke kalení klikových hřídelí spalovacích motorů a hlav železničních kolejnic. Dalším optimalizovaným parametrem po tvaru induktoru byla frekvence.[5]

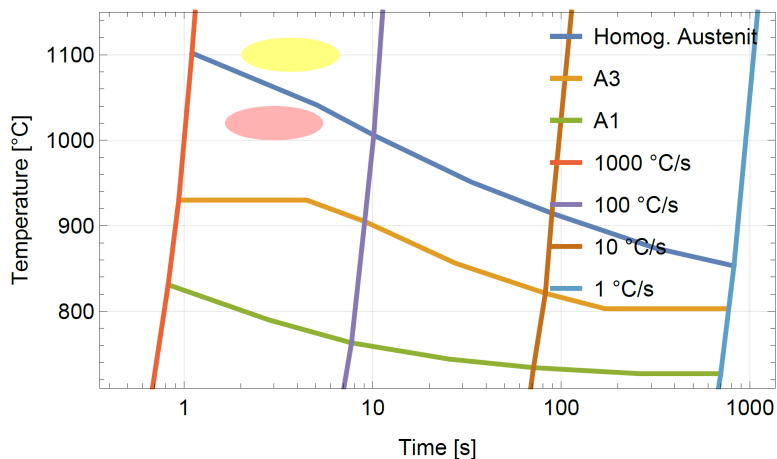
Dlouhou dobu byl hlavním problémem zdroj vysokofrekvenčního proudu pro napájení induktoru. První zdroje využívaly síťový jednofázový transformátor, kdy na sekundární stranu byl připojen rezonanční obvod sestávající z kondenzátoru, cívky a jiskřiště. V roce 1916 takto dosáhl dr. Edwin F. Northrup (1866-1940) frekvence 20 kHz při výkonu desítek kW. Dalšími vysokofrekvenčními zdroji byly rotační generátory. Pomocí nich bylo možné dosahovat frekvencí až v řádu nižších desítek kHz. O další vývoj se zasadily elektronky původně vyvinuté pro potřeby radiokomunikací. V druhé polovině 20. století se do popředí dostává výkonová elektronika. [5]

V minulosti se jako první objevila tyristorová zařízení pro ohřev a tavbu pracující s frekvencemi do 1 kHz při výkonech až 1 MW. Pro potřeby povrchového kalení dnes převládá využití IGBT tranzistorů. Tato technologie je vhodná pro frekvence přibližně do 50 kHz. Pro frekvence od 1 kHz se rovněž využívá technologie MOS FET. Plné uplatnění však nalézá při vyšších frekvencích a to až do řádu stovek kHz. Pro potřeby tavení zejména nevodivých materiálů ve studených kelímcích se využívají elektronky. Pracovní rozsah frekvencí je v tomto případě 200 kHz až 5 MHz. Lze dosahovat výkonů v řádu až stovek kW. Do budoucna lze očekávat využití tranzistorů v celém potřebném frekvenčním rozsahu s tím, jak se budou zlepšovat jejich vlastnosti a klesat jejich cena. [8]

V současnosti nalézá indukční ohřev využití napříč různými obory. Podstatné zastoupení má v již mnohokrát zmiňované metalurgii (kalení, tavení, popouštění, svařování, pájení a jiné). Kromě zpracování nejrůznějších druhů ocelí se indukční ohřev používá i pro další materiály, zejména pro tavbu či rafinační přetavování křemíku, mědi a dalších materiálů a slitin s důrazem na jejich výslednou čistotu. Při přetavování křemíku se používají zdroje s výstupní frekvencí 400 kHz až 5 MHz při výkonu až 50 kW [9]. Zajímavé aplikace nalezneme ve zdravotnictví v podobě „rostoucích“ náhrad kostí určených pro dětské pacienty. Indukční ohřev se rovněž používá pro tavbu nevodivých materiálů ve studeném kelímku. Takto získané materiály nalézají uplatnění např. při výrobě laserů a obráběcích nástrojů. Velké využití nalézá studený kelímek v jaderném inženýrství při zkoumání chování koria. Zmiňme rovněž indukční vařiče. Další uplatnění nalézá indukční ohřev ve strojírenství, kde využíváme tepelnou roztažnost kovů při sesazování dvojkolí pro železniční vozidla, pro umístování obručí přes vinutí elektrických strojů, pro rychlé upínání obráběcích nástrojů apod.

1.2 Kalení

Kalení je tepelný proces zpracování kovů, používaný pro zvýšení tvrdosti a odolnosti proti mechanickému opotřebení. Tím se zásadním způsobem, například u obráběcích nástrojů nebo třecích ploch, prodlužuje životnost výrobku. Zároveň však výrobek po zakalení vykazuje vyšší křehkost a zvětší se jeho objem. Při kalení dochází k ohřátí a následnému rychlému ochlazení oceli danou rychlostí a v daném rozsahu teplot. Rozsah teplot a rychlost je odvislá od složení oceli, požadovaných výsledných parametrů a fyzických rozměrů kaleného dílu.



Obr. 1.1 TTA diagram oceli C35. [2]

Důsledkem výše popsaného procesu jsou materiálové změny, kdy se struktura oceli po ohřevu změní z austenitu na martenzit.

Aby bylo možné ocel zakalit, musí být kalitelná. Kalitelnost závisí na obsahu uhlíku. Od obsahu uhlíku 0,35 % je ocel považována za dobře kalitelnou. Na množství uhlíku závisí výsledná tvrdost oceli. Ta je rovněž funkcí teploty, které bylo dosaženo před ochlazením a hloubky prohřáté vrstvy.

Další vlastností ocelí je prokalitelnost. Tedy hloubka, do jaké se podaří zakalit daný typ oceli. Ta závisí na rychlosti ochlazování v dané vzdálenosti od povrchu, který je v kontaktu s chladícím médiem. Hloubka zakalení se pohybuje od desetin milimetrů do několika centimetrů v závislosti na použité metodě kalení. Významný vliv má chladící médium.

Proces kalení začíná ohřevem. Během ohřevu nad kalící (nebo také austenitizační) teplotu dochází ke změně krystalické struktury oceli, čímž vzniká austenit. Kalící teplota objemové kalení v peci se pro většinu ocelí pohybuje v rozsahu 800 až 1220 °C. Aby byla austenitická struktura homogenní, musí materiál na dané teplotě po nějaký čas setrvat. Tato část procesu se nazývá výdrž a doba jejího trvání závisí na předchozím stavu oceli. Zároveň je vhodné, aby dosažená teplota byla vyšší, než je minimální austenitizační teplota daná pro určitý typ oceli. Tím se docílí větší homogenity vzniklé struktury. Pro určité typy ocelí jsou doporučeny různé kalící teploty v závislosti na použitém chladícím médiu (voda, olej, voda se syntetickými přísadami) [10]. V případě povrchového kalení, kde probíhá ohřev velmi rychle, je potřeba dosáhnout vyšších teplot za kratší čas než v případě kalení objemového. Na obrázku 1.1 je zobrazen TTA diagram, který tuto závislost popisuje. Ohřev může podle použité technologie, požadavků na výsledek a podle složení oceli probíhat na vzduchu, ve spalínách (ohřev plynem), v ochranné atmosféře (často argon nebo vakuum) nebo například v lázni roztavených solích. Ohřev v roztavených solích se používá pro tenké profily vysoce uhlíkatých ocelí nebo pro legované oceli. Výhodou tohoto způsobu ohřevu je malá deformace kalené součásti a zachování houževnatosti. Součást tak není třeba popouštět [11]. V případě indukčních ohřevů je tento proces v porovnání s ohřevem v klasické horkovzdušné peci velmi rychlý. Rychlé je i následné ochlazování, neboť ohřátá vrstva může být, kvůli hloubce

vniku, velmi tenká [8].

Ochlazování probíhá podle CCT diagramů, které ukazují, k jakým fázovým změnám v materiálu dojde v závislosti na rychlosti ochlazování. Tyto diagramy se stanovují experimentálně pro konkrétní oceli na základě dilatometrických měření [12].

1.2.1 Indukční povrchové kalení

Výhodou indukčního povrchové kalení je skutečnost, že jsme schopni přímo ovlivnit velikost zakalené vrstvy a to v rozsahu od desetin mm po desítky mm. Hloubka zakalení se odvíjí od mohutnosti vrstvy materiálu prohřáté na teplotu dovolující fázovou změnu. Tato vrstva je úměrná *hloubce vniku elektromagnetického vlnění* (viz 1.1.1) a dosahuje přibližně 2 až 3 násobku hloubky vniku [9]. Jak vyplývá ze vztahu pro hloubku vniku 1.32, jsou frekvence a velikost proudu jedinými parametry, které jsme schopni aktivně měnit. Ostatní proměnné jsou teplotně závislé materiálové parametry. V tabulce 1.1 jsou uvedeny orientační hloubky prohřáté vrstvy pro ocel C45 v závislosti na frekvenci.

Vliv na hloubku prohřáté vrstvy má i rychlost, s jakou k ohřevu dochází. Kdyby ohřev probíhal pomalu, bude teplo pronikat hlouběji do materiálu. Rychlost ohřevu povrchové vrstvy je proto řádově stovky °C za sekundu a samotný ohřev probíhá jen několik vteřin. To v závislosti na velikosti vsázky a frekvenci klade nemalé požadavky na výkon zdroje. Následuje prudké ochlazení. Proces ochlazování probíhá obdobně, jako u jiných druhů kalení. [13]

Tab. 1.1 Hloubka ohřáté vrstvy v závislosti na frekvenci pro ocel o teplotě 1000°C. [9]

Frekvence f (kHz)	Hloubka vniku (mm)	Hloubka ohřáté vrstvy (mm)
10	5,00	10 až 15
100	1,60	3,2 až 5
1 000	0,50	1 až 1,5
10 000	0,16	0,3 až 0,5
30 000	0,09	0,2 až 0,3
100 000	0,05	0,1 až 0,15

Optimální frekvenci lze určit ze vztahu:

$$\frac{0,015}{d^2} < f < \frac{0,25}{d^2}, \quad (1.55)$$

kde d je požadovaná hloubka zakalení v metrech. Ta je svázána i s výslednou tvrdostí povrchu [9]. Požadovaná hloubka zakalení se odvíjí od daného typu strojní součásti. V případě ložisek, hřídelí, čepů či různých třecích ploch se hloubka zakalení pohybuje od 0,25 do 1,25 mm. Pro dosažení takovéto vrstvy se používají frekvence v řádech vyšších desítek kHz až stovek kHz. Zakalená vrstva u součástí jako vačkové hřídele, hřídele s ozubením apod. se pohybuje v rozmezí 1 až 4 mm. V takovém případě se používají zdroje s výstupní frekvencí v řádu kHz až nižších desítek kHz. Ve všech případech kalení je kritickou fází ochlazování vsázky. To musí probíhat podle

CCT diagramu, aby bylo docíleno požadovaných změn v krystalické struktuře oceli. Rychlost ochlazování lze ovlivnit zejména průtokem média a jeho vlastnostmi. [13]

Indukční povrchové kalení lze rozdělit do několika druhů v závislosti na způsobu manipulace vsázkou během ohřevu nebo podle druhu pohybu induktoru. Základní jsou čtyři metody povrchového indukčního kalení a to:

- Postupné (bodové),
- Kontinuální,
- Jednorázové a
- Statické [13].

Postupné kalení se použije z pravidla tam, kde je povrch tvarově složitější a neumožňuje použití jednorázového kalení. Kaleny jsou postupně různé části vsázky. Může jít například o zuby velkých ozubených kol kalených jednotlivě. Kontinuální kalení se používá pro vsázky s jednoduchým povrchem, kde délka vsázky převládá nad jinými rozměry. Pro vsázky jakými jsou ocelové trubky, tyče nebo dráty lze vystačit s jednozávitovým klasickým induktorem. V takovém případě však používáme vysoké frekvence. Proto je častější použití vícezávitových induktorů. Pro profily nebo pláty jsou zapotřebí induktory, jejichž tvar bude kopírovat povrch určený k zakalení. Vsázka prochází induktorem a následně je ochlazována vodní sprchou. Může procházet i celou sérií induktorů s rozdílnými geometrickými rozměry či různou frekvencí proudu. Lze například provést nejprve zakalení a posléze vsázku opět ohřát a následně nechat řízeně chladnout pro odstranění zbytkového pnutí materiálu. Při jednorázovém kalení se vsázka s induktorem vůči sobě nepohybují v axiálním směru, ale zpravidla vsázka rotuje uvnitř induktoru pro homogenizaci ohřevu. Často jde o hřídele, paty čepů a další rotačně symetrické díly. Statický ohřev se použije v případě, kdy je vsázka natolik tvarově složitá, že není možné s ní pohybovat, anebo to není nutné. [13]

Po ohřevu dochází bezprostředně k ochlazování vsázky. Právě skoková změna teploty v důsledku způsobí vznik martenzitické struktury oceli. Pro ochlazování jsou používány sprchy různých provedení. Například sprchy prstencové obepínají vsázku a ostříkují ji chladivem ze všech stran, nebo sprchy tangenciální, které lze použít u rotujících cylindrických vsázek. Sprcha může mít rovněž podobu trysky, která se pohybuje za induktorem v případě postupného kalení. Speciální případ prstencové sprchy pak představují perforované induktory. Voda, která ochlazuje induktor zároveň slouží k ochlazování vsázky. Toto řešení však není časté. Voda chladící induktor má již zvýšenou teplotu a její chladící schopnost je menší. Výroba takového induktoru je navíc pracná. Rovněž je možné použít objemové ochlazení ponořením vsázky do chladícího média. V tomto případě se vsázka ohřívá v závěsu nad chladící kapalinou a posléze je spuštěna do kapaliny. [9] [13]

1.2.2 Další technologie pro povrchové kalení

Metod zvyšování tvrdosti povrchů založených na fyzikálních či chemických změnách existuje celá řada [8]. Tato práce se omezí na porovnání technologií používaných pro kalení ocelí z hlediska zdroje tepla. Povrch kalené vsázky lze ohřát pomocí plamene (dnes nejčastěji plynem), prostřednictvím vířivých proudů (indukční ohřev)

a pomocí laseru nebo toku elektronů. Pro povrchové kalení nepoužíváme elektrické pece, které jsou vhodnější pro ohřev celého objemu vsázky, například pro popuštění atd.

Ohřev plamenem

Pro ohřev při povrchovém kalení pomocí plamene se v současnosti používají různé plyny ve směsi s kyslíkem. Aby bylo dosaženo požadované tvrdosti je zapotřebí, aby ocel obsahovala dostatečné množství uhlíku, tj. aby byla kalitelná. Požadavek na kalitelnost musí být splněn pro všechny druhy tepelného kalení. Ohřev plamenem je vhodný i pro složitější povrchy. Výsledkem ohřevu plamenem je velmi pevný povrch odolný proti ořezu, ohybu a torznímu namáhání. [8]

Ohřev plamenem se používá pro součásti, které jsou příliš velké pro ohřev v konvenčních pecích. Na rozdíl od těchto pecí vhodných spíše pro objemové kalení, lze pomocí plynového hořáku ohřívat pouze část vsázky. Metody užívané při ohřevu plamenem jsou obdobné metodám používaných u jiných technologiích. Stejně jako v případě indukčního ohřevu lze ohřívat jednotlivé části vsázky, které jsou následně ochlazeny. Pro jednorázové kalení lze použít rotaci vsázky a následného ochlazení pomocí sprchy nebo ponoření do chladicího média. Popřípadě je možné využít hořák integrovaný se sprchou chladicího média do jednoho celku, který se pohybuje lineárně nad povrchem vsázky. [8]

V porovnání s indukčním ohřevem jsou náklady na pořízení technologií nutných pro kalení plamenem menší. Nutné je však zajistit bezpečnost plynového hospodářství. Stejně jako v případě využití indukce je nutné vodní nebo olejové hospodářství pro chlazení vsázky, které může představovat jistou ekologickou zátěž. Více o ekologických a ekonomických aspektech různých technologií pro povrchové kalení je uvedeno v kapitole 1.5.

Ohřev laserem

Laser nalézá široké uplatnění ve zpracování kovových materiálů. Pomocí laseru lze svařovat či řezat a lze ho použít i pro nejruznější zušlechťování povrchů včetně kalení. Ve srovnání s ohřevem pomocí plamene nebo indukce umožňuje využití laseru precizně zakalit i velmi malé přesně definované plochy. Výkon laseru určeného pro povrchové kalení je menší, než výkony laserů pro ostatní aplikace. Pohybuje se v rozsahu 1000 až 2000 W·mm⁻², výjimečně méně nebo více. [8]

Pro potřeby povrchového kalení se rozlišují dva typy laserů podle toho, je-li výkon dodáván v pulzech nebo kontinuálně. Dopadající energie je z části předávána povrchové vrstvě materiálu v podobě tepla. V důsledku dobré tepelné vodivosti feromagnetických ocelí je vyvinuté teplo odváděno dovnitř vsázky. Je-li absorbovaná energie dostatečně velká, dojde k ohřevu povrchové vrstvy materiálu na austenitizační teplotu. Teplo z povrchové vrstvy je odváděno tak rychle, že není nutné dále vsázku ochlazovat. Pouze v případech malých součástek je nutná přítomnost chladicího média. V tomto případě zde není masa materiálu, která by teplo z povrchové vrstvy odvedla. Odvod tepla lze v těchto případech rovněž řešit upnutím malé součástky na jiný kus materiálu s dobrou tepelnou vodivostí. [8]

Množství absorbované energie závisí na pohltivosti povrchu ocelové vsázky. Absorpce ocelí pro infračervené

záření je malá. Povrch dílu se proto opatřuje vrstvou s vyšší schopností absorbovat toto záření. K tomuto účelu se používají například grafitové či křemíkové nátěry. Kromě zvýšení absorpce lez zároveň z degradace této vrstvy určit teplotu, které bylo během ohřevu dosaženo a následně tak upravovat výkon laseru nebo rychlost posuvu. [8]

Hloubka zakalení je zásadně ovlivněna obsahem uhlíku a dalších legur v oceli. U nízkouhlíkatých ocelí se materiál prokalí do 0,25 mm a pro oceli s vyšším obsahem uhlíku až do 2,5 mm. Hloubka je zároveň ovlivněna výkonem a rychlostí pohybu paprsku. Čím je obsah uhlíku v oceli vyšší, tím menší je požadovaný výkon laseru na prokalení do stejné hloubky [8]. Čím rychlejší je pohyb paprsku, tím menší vrstva materiálu je zakalena [14]. Výsledkem kalení pomocí laseru je velmi odolná vrstva na povrchu vsázky. Kromě zvýšení tvrdosti je povrch velmi odolný vůči otěru a mechanickým tlakům. Kalení pomocí laseru se používá pro zvláště namáhané strojní součásti, jako jsou třeba zuby ozubených kol, nápravy, hřídele, skříňové převodovky a ložiska. Používá se také pro kalení nástrojových ocelí. Obecně laser nalezne využití tam, kde je vyžadována precizní tenká zakalená vrstva na povrchu oceli. Nelze s jeho pomocí provádět kalení do hloubky už od 2,5 mm. Ohřev laserem je vhodný pro tvarově složité vsázky, zkracuje dobu trvání celého procesu a většinou nepotřebuje systém chlazení. Povrchové kalení laserem má rovněž menší energetické nároky během provozu, odpadá zde složitější manipulace se vsázkou nebo chladící tryskou.

Ve srovnání s ostatními dosud představenými metodami ohřevů je dosažitelná hloubka zakalení jen malá a velmi závislá na složení oceli. Pořizovací náklady technologie laseru jsou oproti ostatním metodám větší [8]. Kalení pomocí laseru nevyžaduje ochrannou atmosféru, avšak jejím použitím lze docílit lepších výsledků [14]. Ze všech dosud zmíněných druhů kalení je kalení laserem nejrychlejší, kalící teplota je velmi snadno říditelná a při tomto typu kalení nevzniká žádné pnutí v materiálu vsázky.

Ohřev tokem elektronů

Ohřev pomocí toku elektronů je další velmi precizní selektivní metoda pro povrchové kalení ocelí. Zdrojem elektronů je žhavená katoda. Následně jsou elektrony urychleny pomocí napětí mezi katodou a anodou a soustředěny do úzkého paprsku prostřednictvím elektromagnetických čoček podobně, jako v klasické osciloskopické obrazovce. Při dopadu předávají elektrony svou kinetickou energii do struktury materiálu. Ta se přemění na teplo. Aby urychlené elektrony efektivně předaly svoji energii, musí být úhel mezi povrchem vsázky a paprskem toku elektronů alespoň 25° . Energie dopadajícího svazku elektronů může dosahovat až $10 \text{ MW}\cdot\text{cm}^{-2}$. Pro potřeby povrchového kalení se však používají hodnoty řádově nižší. V kombinaci s náležitou rychlostí posuvu paprsku dosahují nanejvýše $50 \text{ kW}\cdot\text{cm}^{-2}$. Obecně platí, že účinnost ohřevu poroste s výkonem zařízení. Pomocí této technologie lze dosahovat tloušťky zakalené vrstvy až do 1,5 mm. Častěji se však pohybujeme v mnohem menších tloušťkách. Podobně jako u laseru je tato hloubka vrstvy rovnoměrná po celém kaleném povrchu, je-li zachována délka pulzu a budeme-li předpokládat homogenní materiálové vlastnosti [15]. Délka pulzu se obvykle pohybuje v nižších stovkách μs . Celý proces probíhá ve vakuu pro zamezení ionizace vzduchu a tím možnosti vzniku oblouku. Vakuum dále brání oxidaci katody emitující elektrony. Stejně jako v případě ohřevu laserem

vyžaduje tato technologie aditivní chlazení pouze v ojedinělých případech. Teplo vzniká v tak malé oblasti, že je okamžitě odvedeno do hloubky vsázky. I přes malé provozní náklady nenalézá kalení tokem elektronů v metalurgii velkého rozšíření. Důvodem jsou značné pořizovací náklady. [8]

Stále však vznikají nové studie, které se využitím elektronového paprsku pro potřeby metalurgie zabývají. Kalení povrchů tokem elektronů lze rovněž použít v kombinaci s předchozím nanesením filmu speciálního materiálu (například silicid niobu) pro další zvýšení výsledné tvrdosti povrchu oceli. [15]

Největší výhody povrchového kalení tokem elektronů jsou:

- Precizně říditelný výkon (a hloubka zakalené vrstvy), opakovatelnost,
- konstantní hloubka zakalení díky přesnému řízení výkonu,
- kalený povrch neoxiduje (na rozdíl od kalení pomocí indukce),
- kalená součást není tepelně namáhána jinde než v povrchové vrstvě,
- ohřev má vysokou účinnost.[8]

1.3 Zařízení pro indukční ohřev

Zařízení pro indukční povrchové kalení sestává z výkonového zdroje, přizpůsobovacího členu (rezonanční obvod s kondenzátory a vysokofrekvenčním transformátorem), induktoru, řídicí jednotky a chladicího okruhu. Nejdůležitější parametry ohřevu jsou frekvence a výkon zdroje a doba trvání ohřevu. Frekvence je volena s ohledem na hloubku, do které chceme vsázku ohřát. Pro malou hloubku volíme vysoké frekvence a naopak pro prohřátí celého objemu frekvence nízké.

Zdroj vysokofrekvenčního proudu sestává z usměrňovače, stejnosměrného meziobvodu a střídače. Je-li použit jednofázový usměrňovač v můstkovém zapojení, pak může být maximální výstupní napětí rovno velikosti amplitudy napětí jedné fáze sítě proti zemi, tedy 325 V. U výkonů nad 3 kW by jednofázová zátěž znamenala velký nesymetrický odběr proudu, který by v důsledku způsobil nesymetrii napětí, která by ovlivnila ostatní spotřebiče připojené na stejném vedení. Proto se pro větší výkony používá třífázový usměrňovač. Velikost napětí je v tomto případě rovna velikosti amplitudy sdruženého napětí sítě, tedy 565 V. Nejčastěji používaným řešením zdroje pro indukční ohřev je kombinace třífázového neřízeného usměrňovače se stejnosměrným napěťovým meziobvodem. Využívají se rovněž usměrňovače tyristorové nebo pulzní. Zejména pulzní usměrňovače poskytují několik výhod oproti diodovému usměrňovači. Jde zejména o vliv zařízení na napájecí síť. Jejich pořízení je však nákladnější a příliš se pro indukční zařízení nepoužívaly. [16]

Technologie střídače se zvolí podle požadované výstupní frekvence. Tato problematika je popsána v závěru části 1.1.4. Nejekonomičtější řešení zdroje představuje neřízený diodový usměrňovač a střídač využívající IGBT tranzistory, které jsou použitelné do frekvencí v řádech desítek kHz. Výstupní střídač může být řízen podle požadované frekvence nebo podle zadaného výkonu. V takovém případě je výstupní frekvence střídače volena automaticky tak, aby výstupní proud odpovídal zadanému výkonu [17]. Nejlepší řešení řízení střídače však představuje takové řízení, kdy velikost výstupního proudu a výstupní frekvence jsou na sobě nezávislé.

Výkonový střídač je řízen tak, aby na jeho výstupu bylo vysokofrekvenční jednofázové střídavé napětí sinusového průběhu. Jedná se tedy o jednofázový střídač v H zapojení čtyř vhodně řízených spínacích prvků. V tabulce 1.2 je uvedena orientační účinnost indukčního ohřevu v závislosti na použitém zdroji. Účinnost celého procesu je dána i dalšími parametry, než jen technologií zdroje. Špatně zvolená frekvence a tedy hloubka vniku elektromagnetické vlny zhoršuje účinnost ohřevu. Celková účinnost povrchového indukčního kalení mimo jiné závisí i na tom, jak ohříváný díl vyplňuje prostor induktoru. Pro nejefektivnější ohřev je žádoucí, aby vzdálenost mezi induktorem a vsázkou byla minimální. Více o účinnosti procesu povrchového indukčního kalení je uvedeno v kapitole 1.5. Další častou možností, jak docílit příznivějšího rozložení elektromagnetického pole je kromě správně zvolené frekvence, velikosti a tvaru induktoru i využití feritových koncentrátorů magnetického pole.

Tab. 1.2 Porovnání účinnosti indukčních ohřevů. [8]

Zdroj energie	Pracovní frekvence	Celková účinnost systému (%)
Napájení přímo ze sítě	50 nebo 60 Hz	45 až 85
Obvody s jiskřištěm a rotační generátory	50 až 180 Hz	40 až 80
	150 až 540 Hz	55 až 85
	1 kHz	55 až 80
	3 kHz	55 až 80
	10 kHz	55 až 80
Střídač	500 Hz	55 až 85
	1 kHz	60 až 85
	3 kHz	60 až 85
	10 kHz	60 až 85
Elektronky	200 až 500 kHz	50 až 60

Z hlediska jednoduchosti řízení, efektivity a rozměrů vycházejí nejlépe zdroje založené na technologii MOS FET. Až od frekvence přibližně 300 kHz rostou spínací ztráty na tranzistorech tak, že jsou porovnatelné s elektronikami. [8]

Volba výkonu zdroje je prováděna podle plochy vsázky obepínané induktorem. Existují doporučené hodnoty výkonu v $\text{kW}\cdot\text{cm}^2$ v závislosti na použité frekvenci, metodě kalení a požadované tloušťce zakalené vrstvy. Uvedeny jsou například zde [8]. Obecně se pohybují v rozmezí 1 až $20 \text{ kW}\cdot\text{cm}^2$ [9].

Induktoru může být a často bývá předřazen vysokofrekvenční transformátor [16]. Vysokofrekvenční transformátor má typicky malý převod s jednotkami závitů na primární straně a jedním až dvěma závity na straně sekundární. Napětí na primáru transformátoru se podle druhu usměrňovače a střídače pohybuje ve stovkách V až jednotkách kV. Díky vysokofrekvenčnímu transformátoru nejsou kladeny tak velké požadavky na proud spínacími součástkami. [17]

Induktor s transformátorem se ke střídači nepřipojují samostatně, ale v kombinaci s kondenzátorovou baterií. Vysokofrekvenční transformátor s induktorem a vsázkou představují indukčnost. Impedance takového obvodu je přímo úměrná frekvenci. Proto se do obvodu zapojuje kondenzátorová baterie, která tvoří s indukčností trať a induktoru rezonanční obvod. Rezonanční obvod může být v sériovém (SRI) nebo paralelním (PRI) provedení. Velikost kondenzátorové baterie rezonančního obvodu je volena s ohledem na indukčnost vysokofrekvenčního transformátoru s připojeným induktorem a vsázkou. Obvod musí být vyladěn tak, aby jeho rezonanční frekvence

byla rovna výstupní frekvenci střídače. Při úplném vyladění obvodu klesne velikost impedance teoreticky na nulu a obvod se vzhledem k měniči chová jako činná zátěž charakterizovaná jen jejím ohmickým odporem. Díky tomu je možné přenést do vazebního transformátoru maximální proud.

Kromě zdrojů s pevně nastavenou frekvencí se lze v praxi setkat ze zdroji, které výstupní frekvenci mění. V těchto případech neodpovídá výstupní frekvence střídače rezonanční frekvenci připojeného obvodu. Změnou velikosti frekvence je řízen výkon dodávaný do vsázky. Jak se vzdaluje výstupní frekvence střídače od rezonanční frekvence obvodu, klesá (v případě sériového obvodu) výstupní proud a tím i výkon přenášený do vsázky. Změna frekvence během ohřevu může být žádoucí v případě překročení Curieho bodu. Po jeho překročení se vsázka často stane průzařnou a ohřev se zastaví. Záleží na materiálových vlastnostech a na rozměru vsázky. Bude-li mít vsázka dostatečné rozměry, bude se v ní alespoň částečně tlumit elektromagnetická vlna i nadále a ohřev se nezastaví, pouze zpomalí.

Design induktoru by měl respektovat tvar a velikosti ohříváné vsázky. Je-li předmětem ohřevu válcová vsázka, je použit souosý válcový induktor. Naopak, je-li vsázkou hranol, pak by měl induktor kopírovat jeho tvar. Podle přenášeného výkonu volíme způsob chlazení induktoru. Příkladem základních tvarů jsou induktry souosé jednozávitové, vícezávitové pro vnější a vnitřní ohřev a dále pak induktry rovinné. První tři typy induktorů mají závity o stejném poloměru umístěny nad sebou a vzhledem ke vsázce vytvářejí podélné elektromagnetické pole. Rovinný induktor má závity umístěny v jedné rovině a jejich poloměr je různý. Je-li vsázka umístěna rovnoběžně s rovinou závitů rovinného induktoru, pak je tento induktor vzhledem ke vsázce zdrojem pole příčného. Obecně platné je pravidlo, že induktor by měl být co nejblíže vsázce. Čím je cívka blíže respektive čím více ohříváný objekt vyplňuje vnitřek cívky, tím klesá rozptyl a s ním i jalové ztráty. Klesají tak i nároky na kapacitu kondenzátorové baterie. Mezeru mezi induktorem a vsázkou je nutné volit s ohledem na případný pohyb vsázky. Vsázka se nesmí dotýkat induktoru. V případě kontaktu vodivé vsázky s induktorem hrozí vyzkratování závitů induktoru. To může vést až k nevratnému poškození střídače a přenosu nebezpečného napětí na vsázku a ostatní části technologie. [2] [8]

1.4 Komplikované strojní části

Ocelové díly, u kterých je požadováno zakalení specifické většinou slabé vrstvy materiálu popřípadě jen konkrétní části například zubu ozubeného kola, třecí plochy atd., nejsou zpravidla vhodné pro kalení v konvenčních pecích. Pro jejich ohřev použijeme některou z metod pro povrchové kalení. Klasicky v případě indukčního ohřevu použijeme pro kalení válcový induktor s malým počtem závitů. Je-li povrch dílu tvarově složitý, vyžaduje to speciální přístup k ohřevu. Z hlediska ohřevu laserem či tokem elektronů to znamená, že systém manipulující se vsázkou nebo zdrojem energie musí disponovat tolika stupni volnosti, aby mohl obsáhnout složitost tvaru kalené plochy. Z pohledu indukčního ohřevu jde pak zejména o využití netradičních tvarů induktorů, specifických zdrojů s požadovanou frekvencí nebo podobně jako ve výše zmíněných případech použití složitějšího manipulátoru. Kromě speciálního tvaru induktoru je také možné využít koncentrátoř elektromagnetického pole v podobě vhodně umístěných feritových prvků. Při ohřevu plamenem nejsou požadavky

odlišné od konvenčních zařízení.

Při indukčním ohřevu představují největší komplikaci ostré hrany a drážky z důvodu nepříznivého rozložení elektromagnetického pole. V oblasti hran je vyšší intenzita elektromagnetického pole, vyvíjí se zde větší ztráty a dochází tedy k intenzivnějšímu ohřevu. V oblastech hran dále chybí materiál, kam by se generované teplo odvedlo. V důsledku velké teploty může dojít k poškození součástí. Naopak pole špatně proniká do drážek nebo k patám čepů. V těchto oblastech pak není dosaženo požadované teploty pro vznik austenitické struktury oceli. Nemůže tak dojít k řádnému zakalení a dosažení požadovaného stupně tvrdosti.

Jako příklad může posloužit ohřev hranolu čtvercového průřezu jednovávitovým induktorem. Bude-li hranol ohříván válcovým induktorem, bude se hranol hřát nejvíce v rozích, které jsou nejbližší induktoru. Když však bude použit induktor, který bude lépe kopírovat tvar vsázky, bude rozložení elektromagnetického pole příznivější. Zároveň bude vzduchová mezera mezi induktorem a vsázkou menší. Díky tomu se zmenší i rozptyl elektromagnetického pole. Ohřev tak bude efektivnější a rychlejší.

Je-li induktor vyroben z měděné trubičky, lze měnit jeho geometrii pouze do určitých mezí. Nesmí například dojít k přiškrtnutí trubičky, které by bránilo průtoku chladicího média. Pokud by byl povrch vsázky složitější a navíc zahrnoval drobné hrany nebo drážky, nebylo by možné těmto tvarům induktor jednoduše přizpůsobit. Pak je nutné tvarovat induktor nejen v jedné rovině. Tento způsob úpravy tvaru induktoru je popsán v jedné z následujících kapitol na straně 28.

Výše popsané obtíže jsou vázány na frekvenci a dobu trvání ohřevu. Je-li požadavek na tenkou zakalenou vrstvu, pak je použita vyšší frekvence a kratší doba ohřevu. Kvůli vysoké frekvenci pole špatně proniká do drážek. Z důvodu krátké doby ohřevu se teplo nemůže na dno drážky dostat vedením. Problémové jevy v oblastech drážek a hran se zmenšují se snižující se frekvencí a s prodlužující se dobou ohřevu. Tím se ovšem zvětšuje ohřátá a tím i prokalená vrstva globálně. Výsledkem zakalení do větší hloubky může být nedostatečná houževnatost dílu po zakalení, jeho praskání apod.

Drážky mohou představovat problém i z hlediska chlazení. Je třeba dbát na vhodnost směřování chladicího vodního paprsku.

1.5 Ekonomika a environmentální dopad povrchového kalení

Ekonomiku indukčního ohřevu a obecně jakéhokoliv výrobního procesu lze posuzovat podle velikosti investičních a provozních nákladů. Zařízení pro indukční ohřev sestává obecně z usměrňovače, střídače, rezonančního obvodu a vysokofrekvenčního transformátoru. Provedení součástí a tím i jejich pořizovací cena se odvíjí od výkonu zařízení. V poměru k cenám materiálů pro výrobu transformátorů ceny polovodičových součástek do posledních let převážně klesaly. Celkově náklady rostou. Pro výrobní náklady je určující cena elektrické energie a dále výdaje spojené se skladováním materiálu a výrobků.

Indukční zařízení menších výkonů, určená například k předehřevu ocelových prvků určených ke svařování, se dodávají i jako vzduchem chlazená. Tím odpadá vodní hospodářství [18]. Naopak zařízení větších výkonů a zařízení pro kalení se zpravidla dodávají vodou chlazená. Induktory určené k povrchovému kalení mají

typicky jen několik závitů a protéká jimi značný proud. Vzniklé ztráty je nutné odvést. Zejména u velkých výkonů a delších časů ohřevu zabírá vodní hospodářství nemalý prostor.

Přímý dopad indukčního kalení na životní prostředí je minimální. Na rozdíl od ohřevu plynem nedochází během ohřevu k uvolňování CO₂. K uvolňování plynů může dojít v případě, byl-li povrch vsázky ošetřen například olejem proti korozi. Zejména ve srovnání s ohřevem pomocí plynu je dále provoz indukčního ohřevu bezpečnější a komfortnější pro obsluhu. Zároveň se během ohřevu indukcí neuvolňuje do okolí tolik tepla [18]. Indukční ohřev je však náročný na spotřebu elektrické energie. Její cena prochází v současnosti překotným vývojem a prognózy její ceny nejsou jednoduché. Obecně lze předpokládat nárůst regulované části ceny elektrické energie, kde značnou část budou představovat náklady za distribuci, související s nutností posílení kapacit stávajících vedení a náklady na systémové služby elektrizační soustavy. Energetické poměry při povrchovém kalení konkrétní hřídele jsou ukázány dále v části zabývající se účinností indukčního povrchového kalení.

Kromě elektrické energie vyžaduje proces povrchového kalení určité množství chladící a kalící vody. I voda použitá pro chlazení komponent kalícího zařízení může představovat zdroj látek, které by v případě úniku mohly poškodit životní prostředí. Často se můžeme setkat s využitím demineralizované nebo destilované vody s obsahem antikorozních příměsí. Voda může obsahovat i přípravky zabraňující růstu řas apod. [19]. Z hlediska ekonomiky provozu je vhodnější využití uzavřeného oběhu chladící vody. Zvláště při dlouhých ohřevech, při kontinuálním kalení nebo při provozu studeného kelímku je třeba značné množství chladící vody. Jak roste teplota vody, klesá její chladící schopnost. Proto je vodní hospodářství často doplněno výměníkem. Ten zvyšuje spotřebu elektrické energie.

Voda použitá pro kalení, tedy ochlazování vsázky, může obsahovat úlomky materiálu uvolněné v důsledku prasknutí vsázky při prudkém ochlazení. Může také nést zbytky olejů, kterými byl ošetřen povrch vsázky. Velmi často se v průmyslových aplikacích používá voda s příměsí kyselin, solí, hydroxidů nebo polymerů. Příměsí mění vlastnosti vody, kdy například zabraňují vzniku vrstvy páry, která se vyvine na povrchu vsázky při ochlazování. Tento parní polštář zabraňuje vodě v kontaktu se vsázkou a tím brání jejímu ochlazování. Polymery ve vodě také mění její chladící schopnost při nižších teplotách. Závěr ochlazování tak probíhá pomaleji, než v případě čisté vody. Výsledkem je popuštění vsázky v jednom procesu s kalením. Popuštěním se omezí zbytkové pnutí v materiálu a tím se zabrání deformacím a vzniku trhlin. Výše uvedené příměsí mohou představovat jisté nebezpečí pro životní prostředí v případě jejich úniku. Některé polymery mohou být toxické nebo těžko rozložitelné. Polymery se zároveň během procesu kalení odpařují a ulpívají na nejrůznějších površích, což může v některých případech způsobit jejich poškození. [2]

Jako chladící médium může být použit i olej. Vzhledem k jeho menší ochlazovací schopnosti je vhodný spíše tam, kde se kalí do malé hloubky. Používání oleje jako chladícího média s sebou nese větší nebezpečí v případě úniku a zároveň může představovat i riziko vzniku požáru.

Ocelové části, které prošly procesem indukčního kalení, kde jako chladící médium slouží voda, je zpravidla nutno ošetřit proti korozi [20]. Povrchové kalení s využitím laseru či toku elektronů přináší jednu zásadní výhodu a tou je absence chladícího média. Díky tomu nedochází během kalení k degradaci povrchu a zároveň je vyloučen

jakýkoliv environmentální dopad způsobený únikem chladicího média. Takto zakalené díly dále nepotřebují žádné další opracování ani speciální skladování. Tím, že odpadne nutnost ošetřování součástí a následné likvidace potřebných kapalin, odpadá i potřeba skladování těchto kapalin. V důsledku těchto opatření lze ušetřit až 16 % nákladů z celkové ceny součásti [14].

Při porovnávání technologií a zkoumání nákladů a dopadů je vždy nutné brát ohled zejména na konkrétní aplikaci, ke které bude zařízení využíváno. Je třeba vzít v úvahu rychlost, přesnost a kvalitu řízení ohřevu, kterou aplikace vyžaduje.

Určení účinnosti indukčního kalení

Elektrická účinnost indukčních ohřevů je závislá na poměru průměru vsázky ku hloubce vniku elektromagnetického vlnění [9]. Často také hovoříme v této souvislosti o velikosti argumentu x_2 , který je dán vztahem:

$$x_2 = \frac{r_2}{\delta} \sqrt{2}, \quad (1.56)$$

kde r_2 je poloměr vsázky a δ je hloubka vniku. Je-li velikost argumentu $x_2 \geq 6$, pak lze průběh amplitudy intenzity magnetického pole a proudové hustoty uvnitř vsázky považovat za exponenciální i v případě válcového vlnění. [1]

Výkon je úměrný druhé mocnině velikosti proudové hustoty. K útlumu velikosti měrného výkonu přenášeného do vsázky se vzdáleností od stěny tak dochází dvakrát rychleji, než v případě velikosti amplitudy proudové hustoty. Elektromagnetická vlna je utlumena na vzdálenosti přibližně $2\pi\delta$. Ve vzdálenosti 3δ je do vsázky přeneseno 99,57 % výkonu. Teoreticky může účinnost indukčního ohřevu oceli při konstantní frekvenci dosahovat hodnot 88 až 93 % v závislosti na teplotě. [9]

Měření účinnosti

Na rozdíl od elektrické účinnosti je účinnost celého procesu indukčního kalení často menší. Parametr x_2 nebo popřípadě poměr průměru vsázky ku hloubce vniku totiž vypovídají pouze o tom, jestli se elektromagnetická vlna utlumí ve vsázce dostatečně, tj. není-li vsázka vzhledem k frekvenci vlnění, tloušťce a materiálovým vlastnostem vsázky průzařná. Na druhou stranu parametr x_2 nebo poměr průměru vsázky ku hloubce vniku ovlivňují i to, jak dlouho bude proces ohřevu trvat. Délka ohřevu je pro celkovou účinnost zásadní. Ztráty ve všech komponentech zařízení jsou funkcí času. Ohřev by tak měl vždy probíhat za splnění výše popsaných podmínek, čímž se přispěje ke zkrácení doby ohřevu. Do celkové účinnosti indukčního kalení při konstantní frekvenci promlouvají například změny materiálových parametrů v průběhu ohřevu, vzájemné rozměry vsázky a induktoru a zejména pak ztráty v komponentech kalícího zařízení. To, jak vsázka vyplňuje prostor induktoru, má vliv na celkovou indukčnost a tím na impedanci obvodu připojeného ke střídači. Jak roste indukčnost, roste i poměr přenášeného jalového výkonu. Indukčnost se kompenzuje kondenzátorovou baterií v sériovém nebo paralelním zapojení. To však vnáší do obvodu další činnou zátěž. Vliv na velikost ztrát má provedení

transformátoru i induktoru. V závislosti na aplikaci se v jednotlivých komponentech na teplo přemění 10 až 60 % energie odebrané ze sítě [19]. Vzniklé teplo se odvede vodním chlazením. Požadavky na komponenty jsou tak maximální možná elektrická vodivost a v případě měniče co nejmenší spínací ztráty. To je však často v rozporu s požadavky na výkon a frekvenci zdroje. Naopak chladící voda by měla mít elektrickou vodivost co nejmenší, neboť je v kontaktu s různými elektrickými potenciály. Probíhá-li ohřev dlouhou dobu, může dojít k přílišnému ohřátí vody, která tak ztrácí svou chladící schopnost a hrozí poškození některých komponent zařízení vlivem vysoké teploty. Proto bývá vodní hospodářství doplněno o výměník, který ovšem zvyšuje spotřebu elektrické energie.



Obr. 1.2 Kalící zařízení s frekvenčním měničem FRQ 60.

Pro určení účinnosti procesu povrchového indukčního kalení jsem uskutečnil měření na kalícím zařízení (obrázek 1.2), jehož základ tvoří měnič FRQ 60. Jedná se o frekvenční měnič s IGBT tranzistory o maximálním příkonu 45 kW. Výstupní napětí střídače je až 560 V a frekvence 3 až 40 kHz. Rezonanční obvod je tvořen baterií vodou chlazených kondenzátorů a vysokofrekvenčním transformátorem s převodem 16:1. Použit byl dvouzátvitový induktor navinutý z měděné trubičky o vnějším průměru 6 mm a tloušťce stěny 1 mm. Kalící zařízení disponuje manipulátorem, který rotuje vsázkou pro homogenizaci ohřevu a dále posouvá induktor ve svislé ose. Na zařízení je tak možné provádět kontinuální kalení vsázky až do délky několika desítek centimetrů.

Jednotlivé komponenty zařízení (výkonové IGBT tranzistory, kondenzátory, primární a sekundární vinutí vysokofrekvenčního transformátoru a induktor) jsou aktivně chlazeny vodou. Každá komponenta má chladící okruh

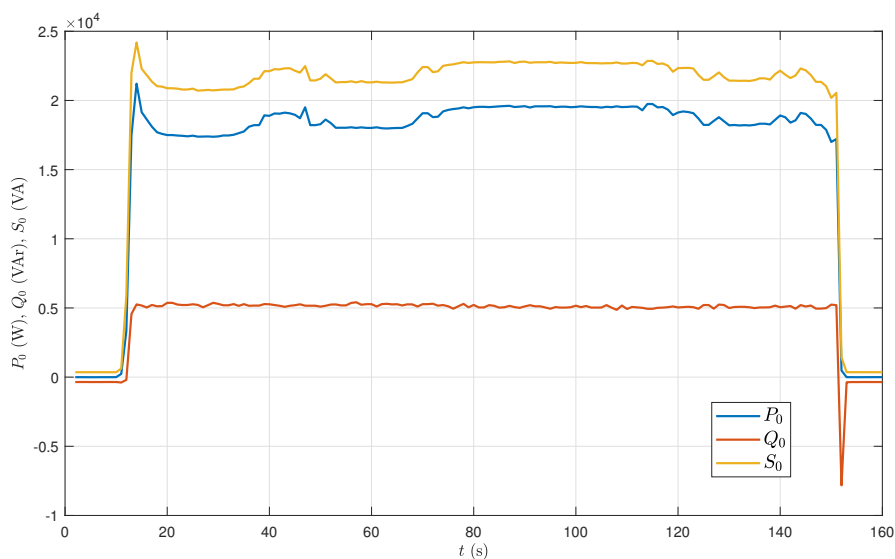
vystrojený precizním průtokoměrem čidly teploty (Pt100) a tlaku. Lze tak přesně stanovit množství chladicí vody a její teplotu před a za chlazenou částí. Díky tomu můžu spočítat výkon odvedený chladicím médiem, tedy ztráty v jednotlivých komponentech způsobené průchodem proudy.

Vsázku představovala konkrétní strojní část, 60 cm dlouhý hřídel (obrázek 1.5), který bylo třeba zakalit. Po upnutí vsázky do manipulátor byla přenosným LCR metrem BK880 změřena indukčnost obvodu vysokofrekvenční transformátor-induktor-vsázka. Velikost indukčnosti byla $L = 110 \mu\text{H}$. Sériový rezonanční obvod dále tvoří kondenzátorová baterie o kapacitě 225 nF. Z Thomsonova vztahu je rezonanční frekvence:

$$f_{\text{rez}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{CL}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{225 \cdot 10^{-9} \cdot 110 \cdot 10^{-6}}} = 31\,991 \text{ Hz.} \quad (1.57)$$

Jako výstupní frekvence střídače byla tedy zvolena frekvence 32 kHz.

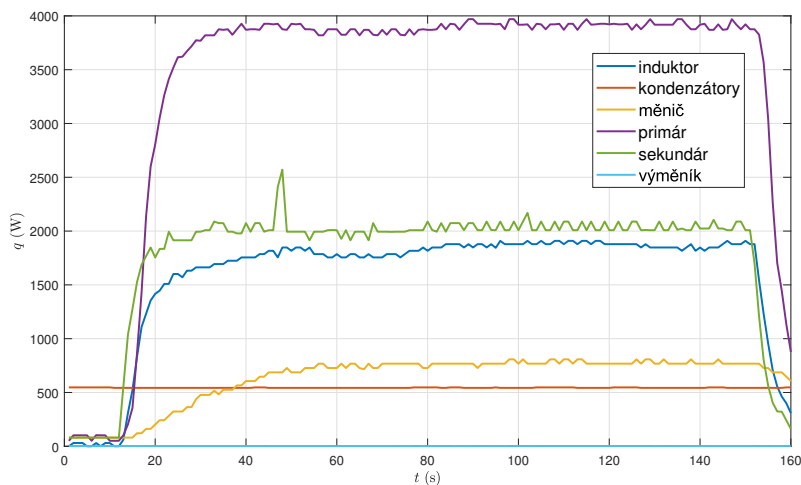
Kalící zařízení bylo připojeno přes analyzátor sítě, který zaznamenával průběhy proudů a napětí odebírané zařízením ze sítě. Z těchto hodnot byly spočteny další veličiny. Na obrázku 1.3 je průběh odebíraného činného, jalového a zdánlivého výkonu během ohřevu. Celková odebraná činná energie za dobu ohřevu byla 722,7 Wh. Během procesu byly zaznamenávány teploty a průtoky vody, kterou byly chlazeny jednotlivé komponenty.



Obr. 1.3 Činný, jalový a zdánlivý výkon odebíraný kalícím zařízením ze sítě.

Analyzátor sítě zaznamenával hodnoty s intervalem 1 s. Teploty a průtoky vody v jednotlivých sekcích byly zaznamenávány pomocí PLC-WAGO PFC200 s příslušnými měřicími kartami rovněž s intervalem 1 s. Rozdíl teplot před a za chlazenou součástí byl společně s průtokem dosazen do kalorimetrické rovnice:

$$Q = c_p \cdot m \cdot \Delta T, \quad (1.58)$$



Obr. 1.4 Výkon odebráný chladící vodou z komponent kalíčky při kontinuálním kalení.

kde c_p je měrná tepelná kapacita vody, m hmotnost a ΔT rozdíl teplot vody před a za chlazenou součástí. Průtok byl zjednodušeně dosazen jako hmotnost. Uvažována hmotnost vody byla 1 kg na liter. Vliv změny teploty na objem a měrnou tepelnou kapacitu jsem i vzhledem k dalším zjednodušujícím předpokladům (například tlak v chladicích větvích) a malým rozdílům teplot zanedbal. Získané hodnoty pro každý interval jsem sečetl a získal tak ztráty odvedené chladivem z každé připojené komponenty zařízení (viz tabulka 1.3).

Tab. 1.3 Teplo odvedené z jednotlivých částí kalícího zařízení.

	primár	sekundár	měníč	induktor	kond.	výměník	Celkem
Q (Wh)	149,98	78,72	28,06	70,16	6,05	0,10	333,07

Zanedbám-li spotřebu měřících přístrojů, servomotorů pro posuv induktoru a oběhového čerpadla, pak rozdíl energie odebrané ze sítě a energie odvedené chladící vodou představuje energii předanou vsázce:

$$Q_{\text{load}} = Q_{\text{in}} - Q_{\text{out}} = 722,73 - 333,07 = 389,36 \text{ Wh.} \quad (1.59)$$

Do vsázky je tak přenesena energie $Q_{\text{load}} = 389,36 \text{ Wh}$. V tomto případě je průměrná účinnost indukčního kalení nanejvýše 53,8 %.

1.6 Materiály

Indukční ohřev nalézá uplatnění v celé řadě průmyslových aplikací. S tím souvisí i množina materiálů, na které je indukční ohřev aplikován. Nejčastěji se jedná o ocel. Ocel je obecně slitina železa, uhlíku a dalších příměsí – legur, které propůjčují oceli různé vlastnosti. Do obsahu uhlíku 2,14 % hovoříme o oceli. Obsahuje-li slitina více uhlíku, pak se jedná o litinu. Litina se používá jako materiál pro odlévání těžkých konstrukčních

prvků zajišťujících stabilitu daného zařízení jako jsou například základny soustruhů a dalších obráběcích strojů. V minulosti se litina používala i pro odlévání uměleckých předmětů, soch či konstrukcí pouličních lamp. Jako legující prvky přidávané do oceli slouží například mangan, křemík, hliník, chróm, nikl a mnoho dalších kovů. Ocel se může vyskytovat v několika fázích a v několika strukturách. Z hlediska indukčního povrchového kalení nás nejvíce zajímá austenit a martenzit a zejména pak přechody mezi těmito fázemi oceli (viz 1.2). Ocelí existuje nepřehledné množství. Liší se svým složením, zpracováním při výrobě, následným opracováním apod. Všechny tyto parametry a procesy mají vliv na výsledné fyzikální a chemické vlastnosti a tím ovlivňují její využití. Výčet možných technik zpracování ocelí a příkladů složení a aplikací by byl nad rámec této práce. Kromě povrchového kalení, které je doménou oceli, se indukční ohřev používá například pro pájení. V takovém případě je předmětem ohřevu měď. Ohřev je možné aplikovat i na tavbu kovů s cílem dosáhnout maximální možné čistoty a homogenity taveniny.



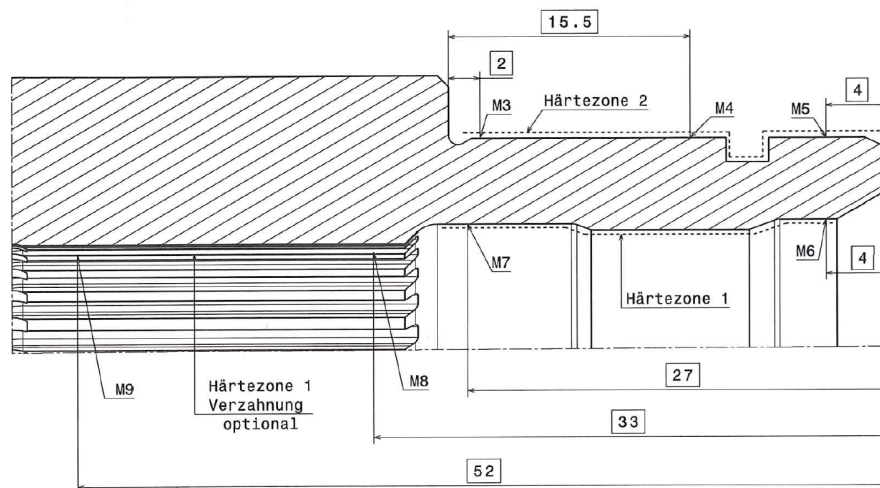
Obr. 1.5 Kontinuální kalení hřídele.

2 Návrh induktoru

Návrh induktoru pro ohřev hřídele s drážkou vznikl, protože k ohřevu takovéto vsázky nelze použít klasický jedno či vícezávitový induktor, který se běžně k ohřevu podobných součástí při procesu kontinuálního kalení využívá. V tomto případě není možné řešit proces jako kontinuální kalení. Jako nástroj pro návrh byla zvolena numerická simulace s tím, že nejprve bude ověřena funkčnost modelu na základě měření a následně proběhne optimalizace tvaru induktoru výpočetní cestou. Využití matematické simulace pro návrh induktoru je ve srovnání s výrobou fyzických induktorů a následným měřením mnohem efektivnější a levnější záležitost, pakliže disponujeme potřebným softwarovým nástrojem. Aby bylo možné validovat výsledek numerické simulace, bylo uskutečněno i měření s reálným induktorem.

2.1 Definice vsázky

Předmětem ohřevu je část ocelového hřídele osobního automobilu.



Obr. 2.1 Výkres části hřídele s vyznačenými plochami pro zakalení.

Povrch vsázky, který je nutné zakalit pomocí indukčního ohřevu je vyznačen na obrázku 2.1 jako *Härtezone 2*. Zde jsou zároveň označeny plochy *Härtezone 1* s finální tvrdostí dosažené předchozím zpracováním, jejichž teplota naopak během ohřevu nesmí překročit žíhací teplotu (550 až 700 °C).

Jedním z požadavků na zakalení hřídele je i zakalení dna drážky. Hlavním záměrem bylo navrhnout takový tvar a rozměry induktoru se kterým se podaří ohřát dno drážky na teplotu potřebnou pro vznik austenitu a zároveň nedojde k přehřátí hran drážky a dalších částí hřídele. Během procesu je pak nutné zajistit, aby se příliš neohřála dutina hřídele, neboť v této části se nachází ozubení, jehož povrch předchozím opracováním již získal potřebnou tvrdost. Pokud by se tato oblast příliš ohřála, došlo by ke znehodnocení tohoto povrchu. Během procesu je tedy



Obr. 2.2 Model horní části ocelového hřídele.

nutné zajistit dostatečnou rychlost ohřevu a odvod tepla z povrchu vrstev s finální tvrdostí. Dalším bodem je návrh parametrů procesu, tedy optimální frekvence a velikost proudu vzhledem k požadavku na hloubku zakalení a době trvání ohřevu.

První měření

Během měření byl nejprve používán originál hřídele a později makety, které představují jen jeho část, která je předmětem ohřevu. Materiál hřídele je ušlechtilá ocel C45. Jedná se o nelegovanou ocel s obsahem uhlíku 0,42-0,50 %, jejíž teplota kalení se pohybuje od 820 do 860 °C pro případ objemového ohřevu v peci. Pro kalení v prostředí vody nebo vody s polymery je vhodnější teplota blíže dolní mezi. Při indukčním povrchovém kalení, které trvá řádově jednotky sekund, je potřebná kalící teplota vyšší. Aby například vznikla homogenní struktura austenitu za dobu 10 sekund, pak musí být dosažena teplota alespoň 1050 °C [21]. Tomu odpovídá přibližná rychlost ohřevu 100 °C za sekundu. Ocel C45 se nechá kalit na tvrdost 50-60 HRC. Tato ocel se používá pro hřídele elektrických točivých strojů, pro výrobu oběžných kol čerpadel, nástrojů, ozubených kol a dalších strojních komponent. [10]

Tab. 2.1 Chemické složení oceli C45.

C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	S
0,42 - 0,50	0,50 - 0,80	0,17 - 0,37	0,25 max.	0,30 max.	0,30 max.	0,40 max.	0,40 max.

Aby nedošlo k prohřátí moc silné vrstvy materiálu, měl by ohřev probíhat rychle. Avšak rychlost je omezena výkonem použitého zdroje a velikostí mezery mezi induktorem a vsázkou. Aby se vsázka dostatečně prohřála pouze na požadovaných místech, bylo nutné vyřešit odvod tepla. Při prvotním měření s pokusným prototypem

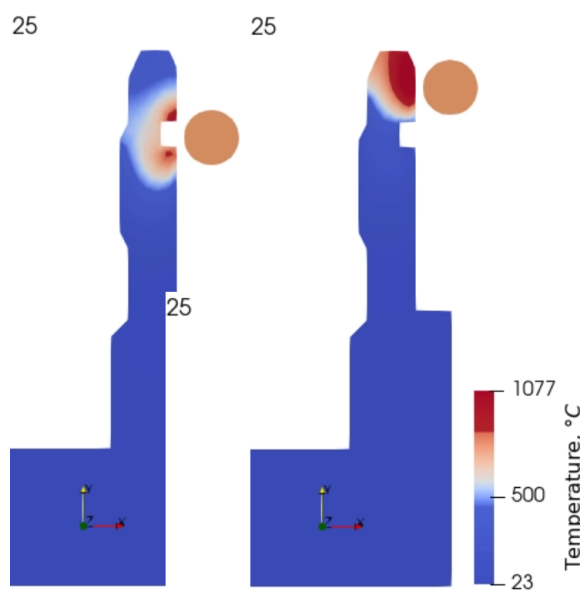


Obr. 2.3 Přípravek pro opevnění hřídele v rotačním manipulátoru.



Obr. 2.4 Hřídel poškozený během kalení dvouzávitovým válcovým induktorem.

induktoru byl vyroben přípravek, který jednak odvedl teplo ze středu hřídele a zároveň umožnil uchytit vsázku v manipulátoru (obrázek 2.3). Do horní duté části vsázky byl zapuštěn ocelový prut, jehož okolí bylo následně vylito roztaveným hliníkem. Po vychladnutí bylo možné jej bez problémů vyjmout. Vznikl tak nástavec plnicí požadované funkce – odvod tepla a fixaci rotující vsázky. Pro průmyslovou aplikaci by bylo vhodné vyrobit tento přípravek z mědi, čímž se ještě zlepšil odvod tepla. Skutečný hřídel byl použit pouze pro ověření funkce tohoto přípravku, zejména spolehlivosti odvodu tepla z povrchu s finální úpravou. Dolní část vsázky byla uchycena do manipulátoru s pohonem zajišťujícím rotaci. Při dalších ohřevech byly použity makety hřídele reprezentující pouze tu část, která má být zakalena (obrázek 2.2). Na obrázku 2.4 je zachycen originální hřídel ohřátý dvouzávitovým induktorem. Jelikož elektromagnetické pole špatně pronikalo na dno drážky, materiál v této oblasti se ohříval pouze vedením. Ve snaze prohřát dostatečně i dno drážky došlo k natavení horního konce hřídele.



Obr. 2.5 Simulace dosažitelných teplot během ohřevu jednozávitovým induktorem.

Induktor

V další fázi byl vytvořen předběžný návrh tvaru induktoru. Klasický válcový induktor je vzhledem ke vsázce zdrojem válcového pole, které špatně pronikalo na dno drážky. Na obrázku 2.5 je zobrazen výsledek simulace ohřevu s použitím jednozávitového induktoru, kde je výše popsán jev patrný. Aby se elektromagnetické vlnění lépe dostalo na dno drážky má navržený induktor dvě části, které jsou rovnoběžné se vsázkou viz obrázek 2.6. Pole v okolí těchto částí induktoru je vzhledem ke vsázce příčné. Siločáry v ideálním případě směřují kolmo k povrchu.

K požadavkům na induktor se přidává další a tím je chlazení. Vzhledem ke značným proudům protékajícím induktorem bylo nutné tento zhotovit dutý aktivně chlazený vodou. Induktor byl vytvořen z měděného čtvercového profilu o hraně 6 mm a šířkou stěny 1 mm. Dostatečný průtok vody pro uchlazení induktoru je zajišťován čerpadlem. Měděný profil pro induktor byl nejprve vyžhán, díky čemuž získal dostatečnou měkkost. Tvarování tak šlo snáze a zároveň nedocházelo k praskání. Následně byl naohýbán do požadovaného tvaru. Spoje byly sletovány. S tímto induktorem proběhl ohřev zjednodušeného vzorku hřídele.

2.2 Měření s fyzickým induktorem

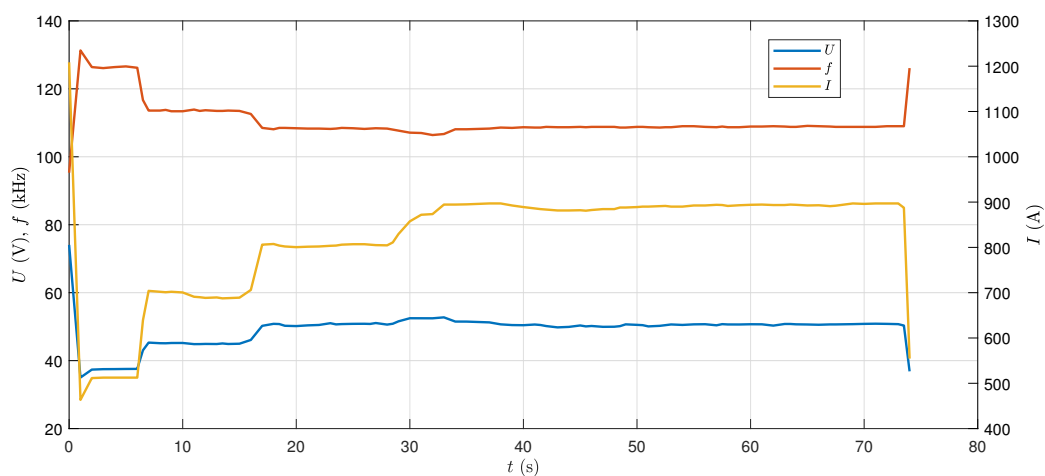
Měření probíhalo na vodou chlazeném kalícím zařízení, jehož střídač pracuje s MOS FET tranzistory, které mu umožňují dosahovat frekvence v řádu až stovek kHz. Střídač nemá pevně stanovenou pracovní frekvenci. Ta se mění podle nastaveného výkonu, respektive výstupního proudu, což se později ukázalo jako problém. Model hřídele byl upevněn do manipulátoru, který umožňuje rotovat vsázkou. Pohyb vsázky vůči induktoru byl pouze rotační. Po připojení instrumentace pro měření proudu, napětí byl spuštěn vysokofrekvenční zdroj. Teploty byly



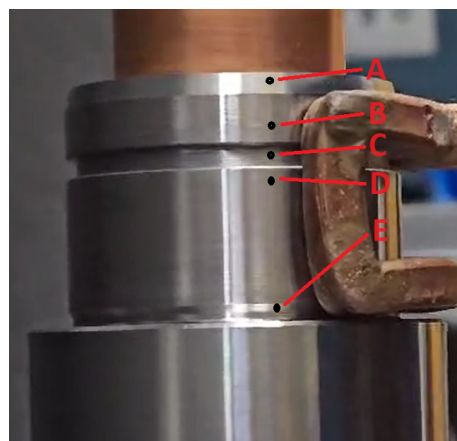
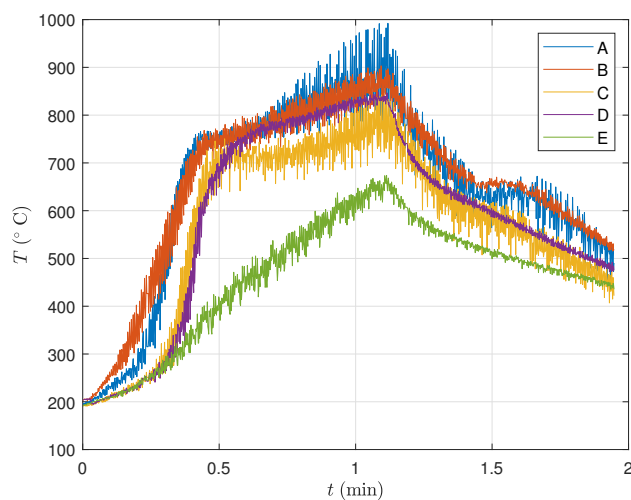
Obr. 2.6 Induktor umožňující prohřát dno drážky.

měřeny pomocí infrakamery. Ohřev vzorku trval přes 70 sekund. Výkon měniče byl zvyšován po dobu přibližně 35 sekund. Jak se během ohřevu vyvíjela velikost proudu, napětí a frekvence zachycuje graf na obrázku 2.7. Po překonání Curieho bodu probíhal již ohřev konstantním výkonem. Průběhy teplot v pěti kontrolních bodech jsou na obrázku 2.8. Je zřejmé, že za Curieho bodem probíhá ohřev podstatně pomaleji. Kromě dna drážky byla teplota měřena na hranách drážky, horní hraně hřídele a na dolním konci plochy určené k zakalení. V těchto místech je při použití válcového sousého induktoru nevhodné rozložení elektromagnetického pole, v důsledku čehož dochází k nedostatečnému ohřevu nebo naopak k přehřívání těchto míst.

Nejdříve rostla teplota v horních měřících bodech, což je vliv přírodních vodičů induktoru. Následně strmě roste i teplota v drážce. Na konci ohřevu se teploty v kontrolních bodech pohybují v rozsahu od 780 do 920 °C. Výjimkou je oblast na obrázku 2.8 označená jako E. Zde rostla teplota jen pomalu a dosáhla teploty pouze 650 °C. V tomto místě však není podle výkresu 2.1 zakalení vyžadováno. Není tedy nutné dosáhnout austenitizační teploty. Teplota v drážce nejprve roste strmě společně s teplotou dolní hrany drážky. Z toho vyplývá, že při použití toho tvaru induktoru proniká elektromagnetické vlnění i na dno drážky. Po překonání Curieho bodu je patrný pokles teploty dna drážky. Jak se velikost relativní permeability vsázky změnila na hodnotu 1, zvětšila se hloubka vniku, čímž klesl výkon přenášený do vsázky. Vlivem přítomnosti drážky je zde navíc menší tloušťka stěny. Předávaný výkon je tak ještě menší. Znovu začíná teplota růst až o několik sekund později, jak do oblasti drážky proniká teplo generované ve zbytku materiálu. Déle je z průběhu na obrázku 2.5 vidět, že i ochlazování probíhalo velmi pomalu. V tomto případě proběhlo pouhým politím vodou. Aby bylo možné dosáhnout zakalení a posoudit jeho kvalitu, bylo by nanejvýš vhodné použít vodní sprchu, která tento problém vyřeší.



Obr. 2.7 Průběh napětí, proudu a frekvence během ohřevu.



Obr. 2.8 Teploty v měřících bodech.

Z naměřených průběhů je zřejmé, že celý proces ohřevu probíhal velmi pomalu. Použitý zdroj není schopen dostatečně rychle prohřát materiál na kalící teplotu, tedy nedosahuje potřebného výkonu. Při pokusech o rychlejší zvyšování výkonu docházelo k působení jisticích prvků. Austenitizační teploty je dosaženo až po více než minutě a to ještě ne po celém kaleném povrchu. Kromě optimalizace tvaru induktoru, který je důležitý pro rozložení elektromagnetického pole na dně drážky, bude nutné provést i optimalizaci velikosti proudu a frekvence s cílem dosáhnout podstatně kratší doby ohřevu. Frekvence 110 kHz byla při tomto výstupním výkonu střídače příliš nízká.

2.3 Numerický model

Proces indukčního ohřevu představuje z hlediska výpočtu sdrúženou úlohu. Ta v sobě zahrnuje jednak řešení elektromagnetického pole a jednak řešení pole teplotního. Vlivem změny teploty dochází ve vsázce k nezanedba-

teelným změnám materiálových vlastností, zejména je-li překračována Curieho teplota. Jak se mění materiálové vlastnosti je zpětně ovlivňováno i rozložení magnetického pole ve vsázce. Bude-li separátně řešeno pole elektromagnetické a následně pole teplotní, pak je řeč o slabě sdružené úloze. Druhým přístupem je nahlížet na problém jako na kvazi sdruženou reps. silně sdruženou úlohu. V takovém případě je nejprve spočteno elektromagnetické pole a na základě Jouleových ztrát následně určeno rozložení teplotního pole. Dojde-li vlivem změny teploty ke změně materiálových parametrů, je nutné provést nový elektromagnetický výpočet se změněnými hodnotami. Jde zejména o vlastnosti určující hloubku vniku elektromagnetického vlnění. Rozdíl mezi kvazi sdruženou a silně sdruženou úlohou je četnost, s jakou je střídavě počítáno elektromagnetické a teplotní pole, v závislosti na velikosti změny materiálových vlastností. [22]

Takto definované úlohy je nereálné řešit analytickým výpočtem. Je proto třeba zvolit vhodnou numerickou metodu. Dnes existuje celá řada počítačových výpočetních softwarů, které řešení elektromagnetických a teplotních polí nabízejí. Z hlediska přístupu k řešení numerické úlohy lze rozeznat dvě nejpoužívanější metody a to metodu konečných prvků (FEM) a metodu konečných diferencí. Mezi dnes nejčastěji používané nástroje pro řešení elektromagnetických a teplotních polí patří ANSYS, COMSOL Multiphysics, CEDRAT Flux, JMAG či QuickField, Agros2D nebo Elmer. [22] [23]

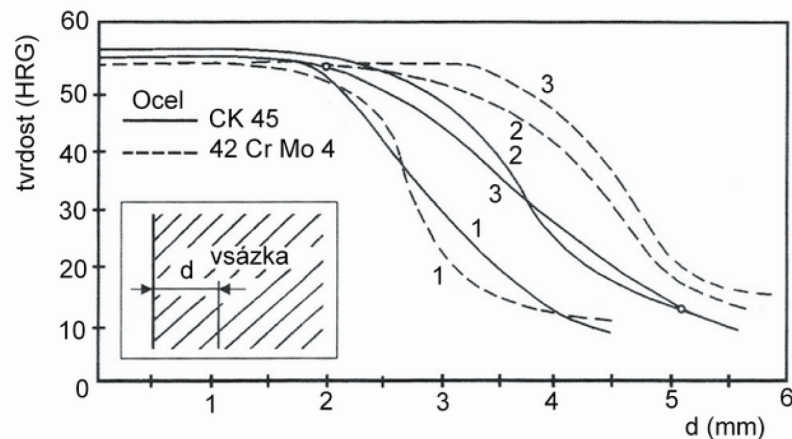
2.3.1 Stanovení parametrů ohřevu

Aby probíhal ohřev co nejkratší možný čas a aby byl výsledek zakalení uspokojivý, je nutné nalézt ideální podmínky, za kterých bude ohřev probíhat. Zásadní pro ohřev je tvar induktoru, frekvence a amplituda proudu a doba ohřevu. Tvar induktoru a částečně i dobu ohřevu je nutné volit tak, aby došlo k rovnoměrnému ohřevu vsázky. Doba ohřevu, frekvence a velikost proudu jsou zásadní parametry pro hloubku prohřátí resp. zakalení. Požadavek na zakalenou vrstvu je hloubka 1 až 1,7 mm při dosažené tvrdosti 54 až 58 HRC. Přibližnou velikost frekvence lze spočítat ze vztahu 1.55. Po dosažení obdržíme interval, ve kterém by se měla požadovaná frekvence nalézat, chceme-li docílit dané hloubky zakalení [9]. Budu-li uvažovat požadovanou hloubku zakalení uprostřed předepsaného intervalu ($d = 1,35$ mm), pak bude hledaná frekvence:

$$\frac{0,015}{d^2} < f < \frac{0,25}{d^2} \Rightarrow f \in (8230, 137\ 174) \text{ Hz.} \quad (2.1)$$

Rozpětí frekvencí získané tímto výpočtem je velice široké. Graf na obrázku 2.9 reprezentuje dosažitelnou tvrdost v dané vzdálenosti od kaleného čela zkušební vzorku. Tato funkce je z hlediska indukčního ohřevu závislá na frekvenci [9]. Čím vyšší je frekvence proudu induktoru, tím menší je hloubka zakalení, neboť se zmenšuje hloubka vniku a tím i hloubka prohřáté vrstvy. Do požadované hloubky 1 až 1,7 mm je však ocel kalitelná vždy, i s použitím frekvence poloviční, než je spočtená dolní mez (8230 Hz). Zde bude záležet na velikosti proudu, která bude určovat dobu ohřevu.

Závislost mocnosti ohřáté vrstvy na frekvenci a výkonu ukazuje například obrázek ???. Ten popisuje potřebné závislosti na frekvencích 10 kHz a 500 kHz.

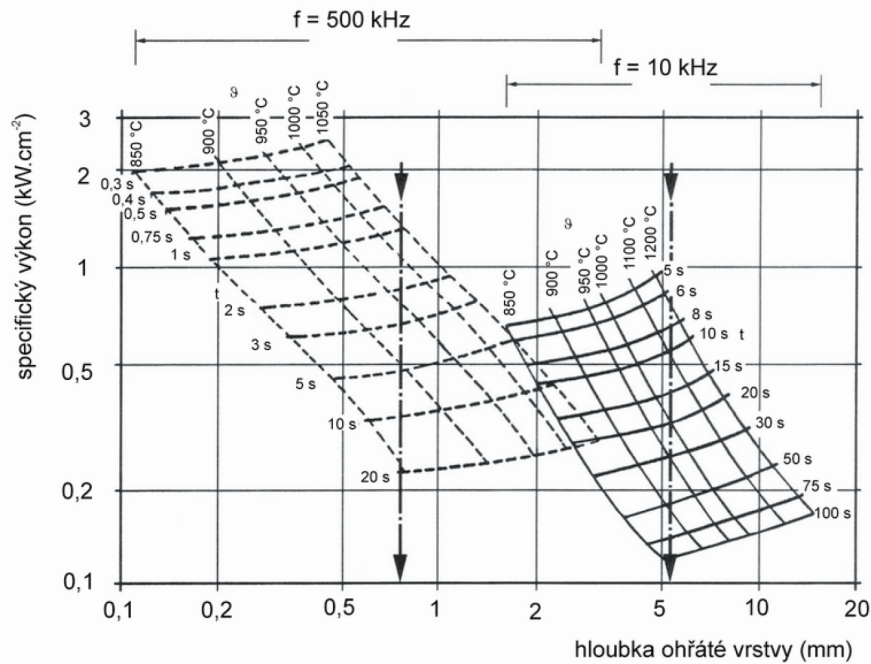


Obr. 2.9 Křivka prokalitelnosti oceli C45 (CK45). 1: $f = 400$ kHz, 2: $f = 10$ kHz a 3: $f = 4$ kHz. [9]

Z výše uvedených informací vyplývá, že alespoň jeden parametr musí být dán, neboť ostatní jsou na něm závislé. Je-li prováděn ohřev konkrétní strojní části, je zpravidla zákazníkem zadána požadovaná tvrdost a hloubka zakalení. Podle složení materiálu je pak zvolena teplota, které musí být v kýžené hloubce zakalení dosaženo. Pro nalezení optimální frekvence a doby ohřevu byla použita numerická simulace. Jako výchozí parametr byl uvažován proud induktorem, který byl zvolen stejný jako v případě prvního měření, tedy $I_{RMS} = 890$ A. Úloha byla řešena pro frekvence v rozsahu 8,23 až 140 kHz (frekvence vzešlá z výpočtu 2.1) s krokem 10 kHz. Simulace probíhala na zjednodušené geometrii vsázky, kdy ve středovém otvoru hřídele v oblasti vyfrézovaného ozubení byl umístěn měděný váleček, představující uchycení hřídele do manipulátoru viz 2.1. Zjednodušení geometrie spočívalo ve vynechání drážky, zkosení hran apod.

Výsledkem této simulace byla sada dat zobrazující, jak se mění teplota vsázky s časem a frekvencí. Graf na obrázku 2.11 zachycuje rozložení teploty pro původní frekvenci 110 kHz. Potřebná teplota pro vznik homogenní austenitické struktury oceli C45 je pro případ povrchového indukčního kalení více než 1050 °C, při době ohřevu 10 sekund. Čím kratší je doba ohřevu, tím vyšší musí být teplota. Této teploty musí být dosaženo minimálně na požadované hloubce zakalení 1,7 mm. Ani za minutu trvající ohřev se při frekvenci 110 kHz nepodařilo dosáhnout potřebné teploty, přitom teplota na vnitřním průměru hřídele dosáhla 780 °C. To představuje problém, neboť tato teplota vysoce převyšuje žhací teplotu oceli C45, která začíná na 550 °C. To by vedlo ke znehodnocení tvrdé vrstvy zajištěné předchozím zpracováním. Na grafu 2.12 je průběh teploty 2 mm pod úrovní zúžení vsázky (na obrázku 2.8 bod E). V tomto místě se na vnitřním průměru hřídele nachází ozubení, na kterém je již dosažena finální tvrdost předchozím zpracováním a rovněž se nesmí ohřát. Z grafů vyplývá, že v oblasti ozubení nepřekročí teplota 400 °C (při ohřevu po dobu 57 sekund). Oblast s takřka konstantní teplotou je měděný obrobek sloužící k odvodu tepla a fixaci vsázky v kaličce.

Z uvedeného vyplývá, že je při proudu 890 A je třeba zvolit vyšší frekvenci než 110 kHz. Graf 2.13 zachycuje výsledky simulace pro frekvenci 140 kHz, tedy přibližně pro horní hranici stanovenou předchozím orientačním výpočtem. Na výsledcích je vidět, že aby se prohřála vrstva materiálu do hloubky 1,7 mm, pak při volbě



Obr. 2.10 Provázání hloubky prohřátí s dobou ohřevu, frekvencí a specifickým výkonem. [9]

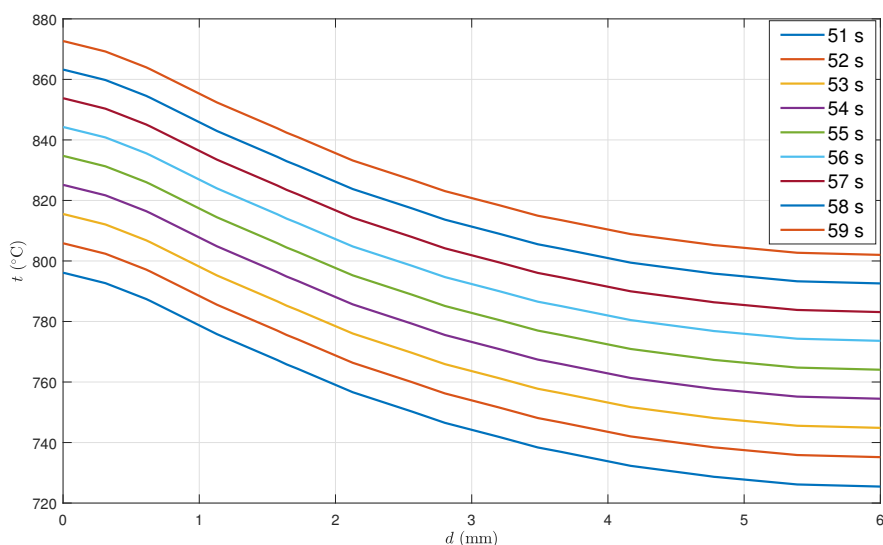
frekvence 140 kHz je nutné ohřívat vsázku do doby přibližně 39 sekund. To s sebou opět nese problém v podobě vysoké teploty dále od stěny.

Dalším řešením je zvýšení výkonu zdroje, tedy větší proud induktorem. Simulace proběhla pro frekvence 8,23 kHz, 110 kHz a 140 kHz a měněna byla velikost proudu v rozsahu 1 až 2 kA. Zvýšení proudu mělo značný vliv na rychlost ohřevu. Výsledky simulace jsou v tabulce 2.2. S frekvencí 8,23 kHz se uspokojivě nepodařilo vsázku prohřát ani s proudem 2 kA.

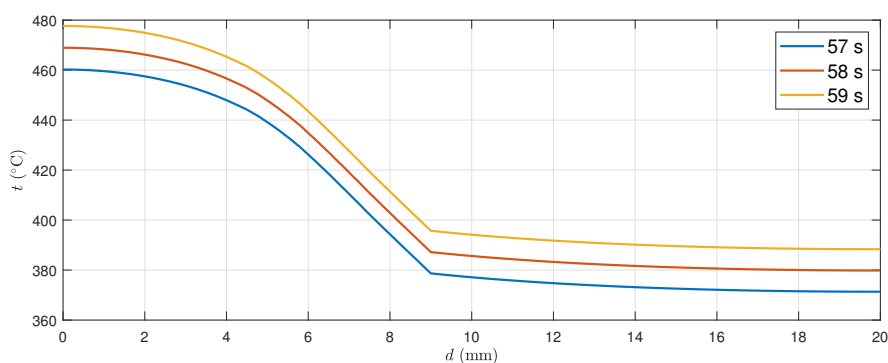
Tab. 2.2 Doba potřebná na prohřátí vrstvy 1,7 mm na teplotu minimálně 820 °C

	8,23 kHz	110 kHz	140 kHz
2 kA	-	5 s	3,8 s

Při frekvenci 140 kHz a velikosti proudu 2 kA trval ohřev potřebné oblasti na požadovanou teplotu 3,8 sekund. Teplota na vnitřním průměru hřídele byla menší než 600 °C, což je však stále příliš velká teplota. I z výsledků dalších simulací bylo zřejmé, že ohřát dostatečně rychle povrchovou vrstvu této vsázky by vyžadovalo velmi vysokou frekvenci a velikost výstupního proudu. Stěna tloušťky 6 mm se v případě dutého hřídele, kde není možný odvod vyvinutého tepla dovnitř materiálu, ohřeje velmi rychle a dojde k vyžhání tvrdé vrstvy na vnitřním povrchu. Rozhodl jsem se tedy využít nutnosti mechanického uložení hřídele v kalícím zařízení a měděný přípravek, který tuto funkci zajišťuje upravit tak, aby neodváděl teplo jen z oblasti ozubení, ale z celého vnitřního povrchu s finální tvrdostí viz obrázek 2.1. Další možností, jak zvýšit odvod tepla z vnitřku hřídele je jeho zalití vodou. Díky její velké tepelné kapacitě a tedy teple potřebnému na ohřev a odpaření, by



Obr. 2.11 Průběh teplot ve stěně vsázky při frekvenci 110 kHz a proudu induktoru 890 A.



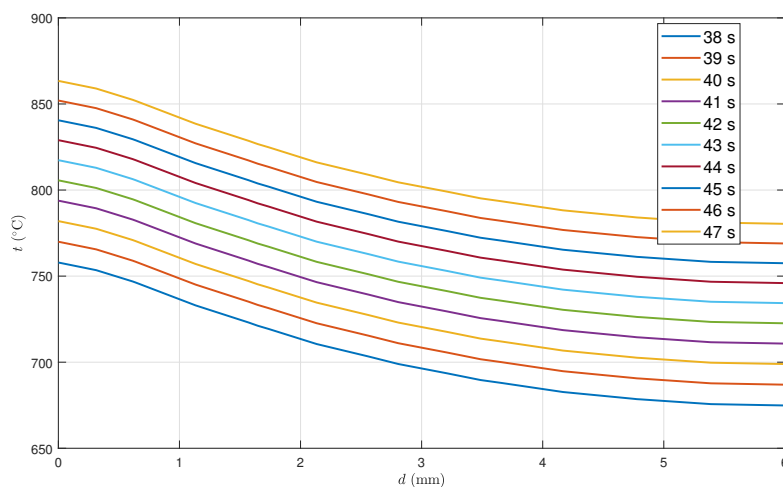
Obr. 2.12 Teploty vsázky v oblasti ozubení.

mohl být odvod tepla dostatečný a teplota povrchu by nemusela překročit žíhací teplotu.

Řešení se zvýšením odvodu tepla

Přípravek na uchycení hřídele do manipulátoru byl rozšířen tak, že teplo odvádí nejen z vnitřní ozubené části hřídele, ale i z hladké části. Díky vynikající tepelné vodivosti mědi dojde k významnému odvodu tepla. Vnitřní povrch hřídele zůstává relativně studený a je zachována jeho tvrdost dosažená předchozím opracováním. Při výpočtu byl vzat v úvahu rozsah frekvencí od 30 kHz do 220 kHz a velikost proudu od 1000 do 3000 A. Limitními parametry pro optimalizační výpočet byly maximální teplota kaleného povrchu 1400 °C (přibližná teplota tavení oceli), maximální teplota vnitřního povrchu 500 °C (žíhací teplota s rezervou), teplota na hloubce 1,7 mm alespoň 1000 °C (minimální kalící teplota oceli C45 s rezervou).

Výsledná frekvence po zaokrouhlení byla 150 kHz a velikost proudu 1600 A. Vybrána byla nejnižší hodnota



Obr. 2.13 Průběh teplot ve stěně vsázky při frekvenci 140 kHz a proudu induktoru 890 A.

frekvence a proudu, pro kterou byly splněny výše uvedené podmínky. V této konfiguraci trval ohřev 4 sekundy, průměrná teplota na vnitřním povrchu dutého hřídele by neměla přesáhnout 300 °C. Spočtená hodnota proudu a frekvence bude dále zvolena jako výchozí při výpočtu modelu induktoru. Později může být upravena podle výsledků výpočtu. Elektromagnetické vlnění této frekvence bude pravděpodobně pronikat do drážky hůře, než tomu bylo v případě frekvence 110 kHz.

2.3.2 Model induktoru

Rozměry induktoru pro ohřev byly stanoveny na základě optimalizace ve výpočetním softwaru. Tvar induktoru vycházel z tvaru cívky použité pro ohřev zkušební vzorku viz výše. Během výpočtu byly měněny geometrické rozměry induktoru. Následně bylo spočteno rozložení elektromagnetického a teplotního pole. Jako řídicí parametr pro optimalizaci byla zvolena teplota povrchu vsázky. Podmínka byla taková, že teplota v kontrolních bodech musí ležet v daném tolerančním pásmu.

Počítačový model jsem vytvořil pomocí software COMSOL Multiphysic s adekvátní licencí. COMSOL pracuje na základě metody konečných prvků. Elektromagnetické pole pak řeší pomocí elektrodynamických potenciálů. Zmíněný software poskytuje nástroje umožňující přímo simulovat celý průběh indukčního kalení na geometrii totožné se skutečným fyzickým model. Disponuje řadou funkcionalit pro optimalizace a je uživatelsky přívětivý. Předmětem simulace nebyl celý průběh kalení, který by zachycoval i ochlazování a strukturální změny v oceli. Zaměřil jsem se pouze na část ohřevu.

Prvním krokem při tvorbě simulace prostřednictvím COMSOL je výběr souřadnicového systému. Vzhledem k tvaru vsázky a hlavně induktoru jsem musel zvolit 3D geometrii, neboť induktor není rotačně symetrický a nelze ho ani zjednodušit do této podoby. Dalším krokem je volba fyziky. COMSOL nabízí přímo fyziku pro indukční ohřev, který představuje sdruženou úlohu, ve které se řeší elektromagnetické a teplotní pole. Dále volím způsob

výpočtu, který se označuje jako *Study*. Při řešení indukčního ohřevu předpokládám v induktoru harmonický proud. Zároveň chci znát výslednou teplotu vsázky jako funkci času. Volím tedy *Frequency-Transient*. Zde byla nastavena doba ohřevu, krok a velikost frekvence, která vzešla z předchozího výpočtu jako nejvhodnější. Jelikož bude zdroj proudu zadáván jako cívka (*Coil* ve fyzice modelu), předřadil jsem před *Frequency-Transient* krok *Geometry Coil Analysis*, který vyřeší rozložení elektromagnetického pole v okolí cívky.

Podle výkresu jsem vytvořil skicu představující řez maketou hřídele. Rotací této skici vznikl 3D model. Při modelování geometrie je vhodné dosazovat rozměry modelu parametricky, díky čemuž je možné je velmi snadno měnit. V tomto případě však byly zadány přímo. Rozměry modelu induktoru již byly zadávány jako parametry. Model induktoru je na obrázku 2.14. Rozměry odpovídají rozměrům skutečného induktoru, který byl použit při měření. Posledním prvkem geometrie je vzduchová obálka. Tvarem vzduchové obálky byla koule, její poloměr je zadán parametricky. Finální poloměr vzduchové obálky vzešel z konvergenční analýzy.

Materiály se přiřazují každému z prvků geometrie. Pro induktor a vzduchovou obálkou posloužily předdefinované materiály *copper* a *air* z knihovny materiálů. Vlastnosti oceli byly použity autentické, teplotně závislé hodnoty odpovídající oceli C45, které jsem měl k dispozici. Využitím teplotních závislostí zvyšujeme přesnost výpočtu zejména u indukčního ohřevu, kde překračujeme Curieho bod, ve kterém dochází k zásadním změnám materiálových parametrů. Zároveň se však silně prodlužuje doba výpočtu. Je tak třeba zvážit přínos k přesnosti v porovnání s délkou výpočtu.

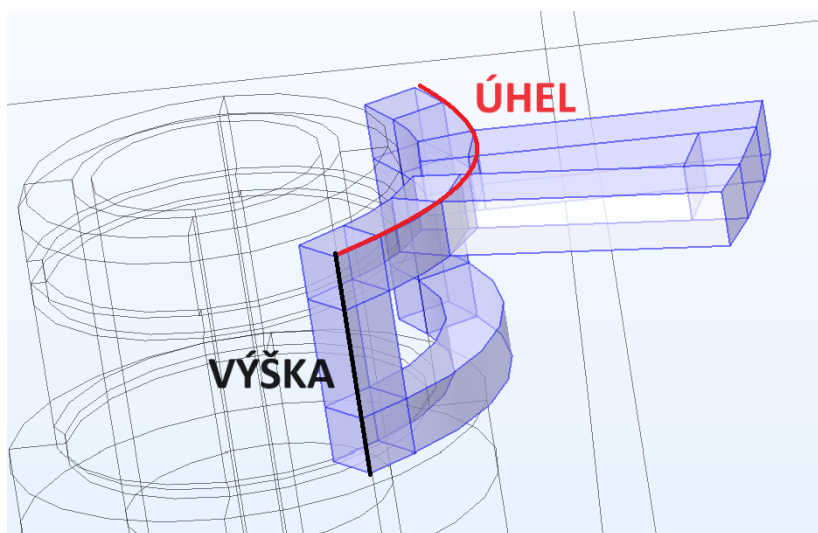
Nastavení fyziky a sítě

Indukční ohřev je sdruženou úlohou, ve které se řeší elektromagnetické a teplotní pole. Zvolením fyziky *Induction Heating* se do modelu přidají větve fyziky *Magmetic Fields*, *Heat Transfer in Solids* a *Multiphysics:Electromagnetic Heating*. *Magmetic Fields* automaticky obsahuje uzly *Ampère's Law*, *Magnetic Insultation* a *Initial Values*. Do těchto prvků není třeba zasahovat. Je pouze nutné označit všechny prvky geometrie, ve kterých si přeje magnetické pole vyhodnocovat. Do větve *Magmetic Fields* jsem přidal *Coil*. Zde je třeba vybrat geometrii induktoru. Proveďte se nastavení typu cívky jako *Single conductor* a zadá se velikost proudu. V poduzlu *Input* jsem vybral stěnu mezi dvěma částmi modelu induktoru. Zde se nastaví směr proudu. Dále jsem přidal *Magmetic Potencial* s hodnotou $\mathbf{A}_0 = [0, 0, 0]$ Wb·m⁻¹ jako okrajovou podmínku pro vzduchovou obálku. Tento prvek přepíše hodnotu v *Magnetic Insultation*.

Teplotní pole bude řešeno pouze ve vsázce. V *Heat Transfer in Solids* jsem tedy vybral pouze model hřídele. Uzel *Solid* řeší šíření tepla pomocí Fourier-Kirchhoffovi rovnice. Větve dále obsahuje počáteční podmínky. Aby se model vsázky ochlazoval, doplnil jsem prvek *Heat Flux*. Aplikační oblastí je povrch vsázky. Nastavil jsem odvod tepla konvekcí. Velikost součinitele přestupu tepla na rozhraní ocel-vzduchu bez výraznějšího proudění je 10 až 20 W·m⁻²·K⁻¹.

Pro ruční nastavení hustoty sítě výpočetních bodů se přepne *Sequence Type* jako *User-controlled mesh*. Pro přesnější výpočet vířivých proudů ve vsázce jsem přidal do větve *Mesh* uzel *Boundary Layers*. V tomto uzlu jsem vybral horní část vsázky. Následně jsem označil stěny této části. Počet elementů pod stěnou vsázky

jsem zvolil 10 velikostně odstupňovaných s násobkem 1,2. Šířku prvního elementu jsem nastavil na čtvrtinu hloubky vniku elektromagnetické vlny. Velikost hloubky vniku se spočte podle rovnice 1.32. Tímto nastavením je docíleno náležité jemnosti sítě. Na vzdálenosti přibližně 3δ , kde je utlumen výkon ohřívající vsázky, tak připadá 6 elementů sítě. Uzel *Boundary Layers* je nutné umístit nad uzel *Free Tetrahedral*, kterým se nastavuje velikost elementů ve zbytku modelu. Velikost elementů sítě ve zbytku modelu není nikterak kritická.



Obr. 2.14 Model induktoru.

Validace modelu

Pro ověření správnosti prvotního modelu, byl zvolen následující postup. Byl vytvořen induktor respektující požadavky na ohřev drážky hřídele. Následně proběhl ohřev makety hřídele na požadovanou teplotu. Jako vysokofrekvenční zdroj byl použit střídač s frekvencí výstupního proudu 110 kHz a efektivní hodnotou proudu přibližně 890 A. Hodnoty napětí a proudu získané během ohřevu byly použity jako vstupy pro simulaci. V prostředí nástroje COMSOL byl vytvořen induktor odpovídající skutečnému fyzickému induktoru a model vsázky - hřídele s drážkou. Výstupem simulace byly, stejně jako v případě měření, teploty v pěti kontrolních bodech.

Finální tvar induktoru

Díky tomu, že byly hlavní rozměry induktoru zadány v modelu parametricky, bylo možné je jednoduše měnit v požadovaném rozsahu. V simulaci jsem nepracoval se vzdáleností induktoru od hřídele. Byly zvolena nejmenší možná vzdálenost, jakou umožňovalo mechanické řešení kalčího zařízení, na kterém měření probíhalo, tedy přibližně 2 mm. Z hlediska maximalizace rychlosti ohřevu, tedy nejefektivnějšího přenosu výkonu do vsázky, je vyžadována co nejtěsnější vazba mezi induktorem a vsázkou.

Tab. 2.3 Porovnání teplot dosažených v kontrolních bodech během simulací s původními parametry ohřevu a optimalizovanými parametry ohřevu.

	horní hrana	drážka	hrana drážky	spodní hrana	čas ohřevu
původní ohřev	1489 °C	1201 °C	1190 °C	793 °C	25 s*
optimalizovaný ohřev	1254 °C	1071 °C	1394 °C	1394 °C	2,5 s

**Děle simulace neprobíhala, neboť byla překročena teplota na vnitřním ozubení hřídele.*

Hledanými ideálními rozměry induktoru byly výška a úhel (viz obrázek 2.14), který vymezuje, jak induktor obepíná vsázku. Výška induktoru byla původně 12 mm. Během výpočtu byla měněna v mezích od 15 do 2 mm s krokem 1 mm. Úhel, kterým induktoru obepínal vsázku byl měněn od 80 do 180°. Omezujícími parametry byly teploty kalené oblasti, které musely být větší než 1000 °C a teplota vnitřní stěny vsázky, která naopak nesměla překročit 500 °C. Dalším parametrem byla rychlost ohřevu. Ta nesměla být delší než 10 sekund. Fixní byla frekvence (150 kHz) a velikost (1600 A) proudu. Tyto parametry vzešly z předchozích výpočtů a simulací. Na základě výpočtu byla stanovena ideální výška induktoru 10 mm a velikost úhlu přibližně 100°. Při této konfiguraci byla v simulaci dosažená teplota v drážce 1071 °C. Teploty v ostatních bodech (horní hrana vsázky, hrany drážky, dolní konec kalené plochy) se pohybovaly v rozmezí od 1254 do 1394 °C.

Simulace byla zpracována jako statická. Při simulaci bez vlivu rotace se požadované teploty podařilo dosáhnout za čas menší než 2,5 sekundy. Takto velká rychlost ohřevu by pro dosažení homogenní austenitické struktury vyžadovala větší konečnou teplotu. Ve skutečnosti bude vsázka rotovat. To bude mít vliv na rozložení teplotního pole. Lze předpokládat, že doba potřebná k ohřevu na potřebnou teplotu bude v případě rotace delší. Ohřev tak bude probíhat s rychlostí adekvátní dosažené teplotě.

3 Závěr

3.1 Induktor

Na základě měření a numerického modelu procesu indukčního ohřevu byly stanoveny ideální rozměry induktoru pro ohřev zadané strojní součásti. Byl nalezen takový tvar cívký, který řeší problém se špatným pronikáním elektromagnetického vlnění na dno drážky feromagnetické vsázky. Na základě analytického výpočtu a následné numerické simulace byly stanoveny parametry proudu induktorem tak, že ohřev probíhá maximálně rychle. Díky tomu nedochází k prohřátí velké vrstvy materiálu. Zakalena by tak měla být pouze požadovaná vrstva o tloušťce 1,7 mm. Zároveň je zachována dostatečná houževnatost zbytku hřídele. Díky měděnému přípravku, který by sloužil zároveň pro uchycení hřídele do kalícího zařízení a zároveň pro zvýšení odvodu tepla z vnitřní dutiny hřídele, by nemělo dojít ke znehodnocení tvrdosti povrchu, kterého již bylo na hřídeli dosaženo předchozím opracováním. Teplota vnitřního povrchu hřídele by díky měděnému přípravku a dostatečně rychlému ohřevu neměla dosáhnout žhací teploty.

Jako další postup je nanejvýš vhodné provést měření s induktorem s rozměry nalezenými při simulaci a tím spočtené výsledky validovat. Jednou z možných technologií pro výrobu induktoru je využití 3D tisku. Díky tomu lze obecně docílit preciznosti a složitosti tvarů, které by byly špatně dosažitelné jinými technologiemi. V další kapitole je tak nastíněno použití 3D tisku k výrobě induktorů pro indukční povrchové kalení s přihlédnutím k fyzikálním vlastnostem takto vzniklé cívký. Aby bylo možné provést ohřev podle parametrů zjištěných při simulaci, je vyžadován zdroj schopný dodat proud o velikosti až 1600 A (s využitím vysokofrekvenčního transformátoru) při frekvenci 150 kHz.

3.2 Nové trendy a další vývoj

3D tisk vodivých materiálů

Jednou z možných technologií, která se jeví jako použitelná v oblasti indukčních ohřevů je 3D tisk vodivých materiálů. Aditivní technologie v podobě 3D tisku umožňuje výrobu složitých tvarů induktorů bez tvarování, řezání a pájení měděných trubek či profilů. V současné době je již na trhu řada výrobců, kteří nabízejí ve svém portfoliu filamentů a materiálů určených pro syntetické tiskárny i směsi obsahující zčásti měď, nebo jsou čistě měděným práškem. Popřípadě nabízejí přímo zakázkový tisk induktorů. U filamentů (tiskových strun určených pro FDM tiskárny) je obsah kovové příměsi obvykle 80 %. V případě tiskáren SLS je náplní prášek vhodného materiálu, v tomto případě mědi nebo jejích slitin, který se selektivně spéká pomocí laseru.

Tisk na FDM tiskárnách není vhodný pro složitější tvary vyžadující tisk podpor, které je po té nutno odstranit a které představují odpad a zvyšují spotřebu drahého filamentu. Druhou možností je využití tisku podpor z jiného materiálu. To však v závislosti na použitém typu tiskárny prodlužuje dobu tisku a rovněž je zdrojem odpadu. Na druhou stranu lze tisk provádět i na běžných tiskárnách, které jsou upravené pro tisk abrazivních

Tab. 3.1 Příklad vlastnosti materiálů pro SLS tisk konkrétního výrobce. [24]

	vodivost	vodivost*	mez pevnosti v tahu (MPa)	rozměr částice (μm)
Cu	>80 % Cu**	>90 % Cu**	200	
CuCu	až 100,2 % Cu**	až 101,4 % Cu**	230	15-53
CuNi30	-	-	450	15-63
CuCrZr	23 % Cu**	88 % Cu**	350	15-75

*po následném tepelném zpracování

**dle IACS.

materiálů. Úprava spočívá ve vybavení tiskárny kalenou ocelovou tryskou a odolnějšími podávacími kolečky extruderu. Tyto úpravy představují jen minimální náklady ve srovnání s cenou filamentu s měděnou maticí. Výtisk na této tiskárně vyžaduje postprocessing. Při tisku se netaví plnivo v podobě měděných částic, ale pouze pojivo. Tisková struna je tvořena pojivem v podobě polymeru, nejčastěji PLA, které je nutné po tisku odstranit. Pro tento účel se používá vhodného rozpouštědla. Poté, co je výtisk zbaven polymeru, je vzniklá kovová matrice vložena do pece, kde dojde ke spečení materiálu v kompaktní celek.

Laserové sintrovací tiskárny představují zcela jiný přístup k tisku. Jako materiál se používají práškové kovy. V tomto případě se jedná o čistou měď či slitiny CuCu, CuNi30 nebo CuCrZr [24]. Nevýhodou sintrovací tiskárny je velký zastavěný prostor vyžadující odvětrávání a zejména pak její pořizovací cena. Výhodou je nulový odpad díky znovuvyužití nespečeného prášku. Na tiskový plát je naprášena vrstva materiálu, která je následně v požadovaných místech spečena pomocí laseru. Poté je naprášena další vrstva materiálu. Přesnost takového tisku je 50 až 150 μm . Velikost tiskového prostoru je relativně malá. To však nepředstavuje zásadní problém pro aplikace, kde by byly induktoři vzniklé SLS tiskem nasazeny, neboť by se zpravidla jednalo o menší precizní aplikace. Díky vrstvě naprášeného materiálu v celé oblasti tisku je možné tisknout bez podpor. Tato technologie se tak více hodí pro výrobu složitých induktorů. Po ukončení procesu je výtisk vyjmut, očištěn od zbytku měděného prášku a je připraven k použití nebo dalšímu tepelnému zpracování. To není nutné, ale může v některých případech značně ovlivnit fyzikální parametry výtisku.

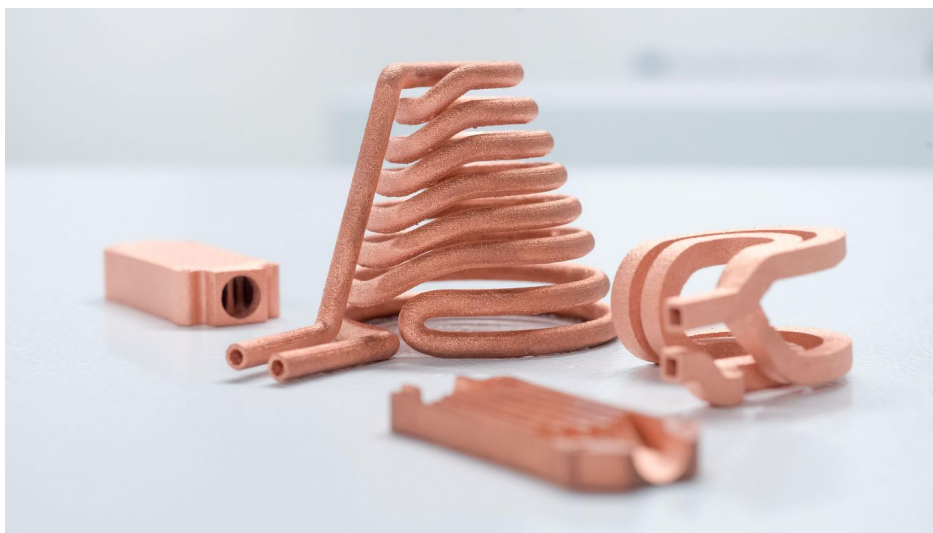
Po zvážení výhod a nevýhod jednotlivých technologií se dále budu věnovat SLS tisku.

Materiály pro sintrovací tiskárny

Oblast tisku měděných prvků je velmi široká a žádaná, kromě tisku induktorů jde zejména o části elektrických strojů. Důležitými parametry výsledných výtisků je jejich mechanická odolnost a zejména elektrická vodivost. Vzhledem k využití výtisků namísto vinutých cívek je vyžadováno, aby elektrická vodivost výtisku byla srovnatelná s vodivostí měděného vodiče. Následující text se věnuje rozboru materiálů pro SLS tiskárny jednoho konkrétního výrobce. Těch ale existuje celá řada a vlastnosti jimi nabízených materiálů se mohou více či méně lišit.

V tabulce 3.1 jsou uvedeny některé parametry měděných prášků určených pro SLS tiskárny. Vlastnosti se mohou lišit podle výrobce. V případě rozlišení tisku bude záležet i na vlastnostech tiskárny.

Po ukončení tisku je výsledný výtisk připraven k použití. U měděných dílů vzniklých SLS tiskem lze dále provést další tepelné zpracování, čímž se docílí změny některých vlastností. Obecně se zlepšuje elektrická vodivost, naopak mechanické vlastnosti jsou horší [24]. Následné tepelné zpracování v případě mědi znamená umístění výtisku do pece, kde je ponechán při teplotě přibližně 1000°C po dobu 1 h. Ohřev je vhodné provádět v ochranné atmosféře (argon).



Obr. 3.1 Příklad SLS tisku ze slitiny CuCrZr. [25]

Výtisk z materiálu CuCp je ve srovnání s práškovou mědí kompaktnější. Tento materiál předurčuje výrobce [24] přímo k výrobě induktorů pro jeho vysokou elektrickou vodivost, která je v podstatě shodná s vodivostí mědi. Materiál CuNi30 je slitina mědi a niklu (přibližně 30 %), která odolává korozi způsobené například slanou vodou. Oproti ostatním slitinám je výsledný výtisk podstatně pevnější a tvrdší. Při dalším tepelném zpracování v peci nevyžaduje ochrannou atmosféru. Naproti tomu má tento materiál horší elektrickou vodivost a je tedy určen spíše pro konstrukční díly zejména tam, kde dochází ke kontaktu s agresivnějším prostředím, jakým je třeba mořská voda. [24]

Nejpoužívanější slitinou pro tisk induktorů je CuCrZr. Složení této slitiny se rovněž liší podle výrobce. Kromě mědi, chromu a zirkonia může obsahovat stopové množství železa, zinku, antimonu či fosforu. Pro dosažení lepší elektrické vodivosti následuje po výtisku dvoustupňový ohřev. Nejprve na teplotu přibližně 980°C v inertní atmosféře. Následuje prudké ochlazení ponořením do vody. V druhém kroku je výtisk ohřát na 430°C a poté se nechá pomalu chladnout. O vlastnostech slitiny CuCrZr je psáno například zde [26].

Literatura

1. LANGER, Emil. *Teorie indukčního a dielektrického tepla*. Praha, Nakladatelství Československé akademie věd, 1964.
2. ROT, David. *Návrh a optimalizace procesů povrchového indukčního kalení pro implementaci do autonomních kalicích strojů s využitím aktuálních technologií a trendů*. Plzeň, 2020. Habilitační práce (Doc.), Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta Elektrotechnická, Katedra elektroenergetiky.
3. SAZIMA, Miroslav. *Sdílení tepla*. Praha, Vydavatelství ČVUT, 1971.
4. KARBAN, Pavel. *Optimalizace*. KEP/MMP, Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektrotechniky a počítačového modelování. Plzeň, 19. 4. 2022.
5. MÜHLBAUER, Alfred. *History of induction Heating and Melting*. Essen, Vulkan-Verlag, 2008. Edition heat processing. ISBN: 9783802729461.
6. RABIN, Michael O; SCOTT, Dana. Finite automata and their decision problems. *IBM journal of research and development*. 1959, roč. 3, č. 2, s. 114–125.
7. LANGER, Emil. *Elektrotepelná technika: Část IV - Indukční pece kanálkové*. Praha, SNTL, 1969.
8. DAVIS, Joseph R. *Surface hardening of steels: understanding the basic*. ASM international, 2002. ISBN: 0-87170-764-0.
9. HRADÍLEK, Zdeněk; LÁZNIČKOVÁ, Ilona; KRÁL, Vladimír. *Elektrotepelná technika*. České vysoké učení technické v Praze, Vydání první. Praha 2011. ISBN: 978-80-01-04938-9.
10. ČSN EN ISO 683-1. *Oceli pro tepelné zpracování, oceli legované a oceli automatové-Část 1: Nelegované oceli k zušlechťování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019, 48 s. Třídící znak 42 0931.
11. *Harden - Temper - What Are The Treatments*. Dostupné také z: https://www.wallworkht.co.uk/content/harden_and_temper/. [citováno 2024-04-23].
12. HALMEŠOVÁ, K; PROCHÁZKA, R; KOUKOLÍKOVÁ, M; DŽUGAN, J; KONOPÍK, P; BUCKI, T. Extended Continuous Cooling Transformation (CCT) Diagrams Determination for Additive Manufacturing Deposited Steels. In: *Materials* (Basel), 2022. Dostupné z DOI: 10.3390/ma15093076.
13. RUDNEV, Valery. *Handbook of induction heating (Manufacturing Engineering and Materials Processing)*. 2nd. New York, CRC Press, 2017. ISBN: 978-1466553958.
14. SHOKRANI, V. Dhokia; NEWMAN, S. T. *Investigation of the effects of cryogenic machining on the surface integrity in CNC and milling of Ti-6Al-4V titanium alloy*. *Jour. Manuf. Proc.*, vol. 21, str. 172-179, 2016.

15. KOVAL, Nikolai; DEVYATKOV, Vladimir; SHUGUROV, Vladimir; IVANOV, Yurii; PETRIKOVA, Elizaveta; AHMADEEV, Yurii. Structure and Properties of the Steel Surface Layer Containing Nitrides and Silicides of High-Melting Metals Formed by Electron-Ion-Plasma Method. In: *2020 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE)*. 2020, s. 796–799. Dostupné z DOI: 10.1109/EFRE47760.2020.9242102.
16. KAWASHIMA, Ryosuke; MISHIMA, Tomokazu; IDE, Chiaki. Three-Phase to Single-Phase Multiresonant Direct AC–AC Converter for Metal Hardening High-Frequency Induction Heating Applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2021, roč. 36, č. 1, s. 639–653. Dostupné z DOI: 10.1109/TPEL.2020.3003026.
17. ESTEVE, Vicente; JORDÁN, José; SANCHIS-KILDERS, Esteban; DEDE, Enrique J.; MASET, Enrique; EJEJA, Juan B.; FERRERES, Agustín. Improving the Reliability of Series Resonant Inverters for Induction Heating Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2014, roč. 61, č. 5, s. 2564–2572. Dostupné z DOI: 10.1109/TIE.2013.2278509.
18. Induction heating is a green technology. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.ambrell.com/learn/induction-heating-is-a-green-technology>. [citováno 2024-04-14].
19. VON STARCK, Alex; MÜHLBAUER, Alfred; KRAMER, Carl. *Handbook of Thermoprocessing Technologies*. Vulkan-Verlag GmbH, Essen 2005. ISBN: 3-8027-2933-1.
20. VERONESI, P.; SOLA, R.; COLOMBINI, E.; GIOVANARDI, R.; PARIGI, G. Laser hardening of steel sintered parts. In: *2017 IEEE 3rd International Forum on Research and Technologies for Society and Industry (RTSI)*. 2017, s. 1–6. Dostupné z DOI: 10.1109/RTSI.2017.8065936.
21. Applications of rapid thermal processing to advanced high strength sheet steel developments. *Materials Characterization*. 2020, roč. 166, s. 110397. ISSN 1044-5803. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110397>.
22. DOLEŽEL, Ivo. *Představení sdružených úloh*. KEP/TEMP, Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektrotechniky a počítačového modelování. Plzeň, 23. 2. 2021.
23. LUPI, Sergio; FORZAN, Michele; ALIFEROV, Aleksandr. *Induction and Direct Resistance Heating*. New York, Springer, 2015. ISBN: 978-3-319-03478-2.
24. EOS GMBH. *Copper in Additive Manufacturing: Newbie on the Rise*. Dostupné také z: <https://www.eos.info/en-us/metal-solutions/metal-materials/copper#eos-copper-cu>. [citováno 2024-05-8].
25. [PRINTED COMPONENTS]. *3D PRINT.COM*. Dostupné také z: <https://3dprint.com/230232/3d-print-steel-copper-and-more-with-truprint-5000/>. [citováno 2024-05-9].

26. LIPÍŇSKA, M.; BAZARNIK, P.; LEWANDOWSKA, M. The electrical conductivity of CuCrZr alloy after SPD processing. In: *2014 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* [B.r.]. Dostupné z doi: 10.1088/1757-899X/63/1/012119.

Seznam obrázků

1.1	TTA diagram oceli C35. [2]	13
1.2	Kalící zařízení s frekvenčním měničem FRQ 60.	24
1.3	Činný, jalový a zdánlivý výkon odebíraný kalícím zařízením ze sítě.	25
1.4	Výkon odebíraný chladící vodou z komponent kaličky při kontinuálním kalení.	26
1.5	Kontinuální kalení hřídele.	27
2.1	Výkres části hřídele s vyznačenými plochami pro zakalení.	28
2.2	Model horní části ocelového hřídele.	29
2.3	Přípravek pro opevnění hřídele v rotačním manipulátoru.	30
2.4	Hřídel poškozený během kalení dvouzávitovým válcovým induktorem.	30
2.5	Simulace dosažitelných teplot během ohřevu jednozávitovým induktorem.	31
2.6	Induktor umožňující prohřát dno drážky.	32
2.7	Průběh napětí, proudu a frekvence během ohřevu.	33
2.8	Teploty v měřících bodech.	33
2.9	Křivka prokalitelnosti oceli C45. [9]	35
2.10	Provázání hloubky prohřátí s dobou ohřevu, frekvencí a specifickým výkonem. [9]	36
2.11	Průběh teplot ve stěně vsázky při frekvenci 110 kHz a proudu induktoru 890 A.	37
2.12	Teploty vsázky v oblasti ozubení.	37
2.13	Průběh teplot ve stěně vsázky při frekvenci 140 kHz a proudu induktoru 890 A.	38
2.14	Model induktoru.	40
3.1	Příklad SLS tisku ze slitiny CuCrZr. [25]	44

Seznam tabulek

1.1	Hloubka ohřáté vrstvy v závislosti na frekvenci pro ocel o teplotě 1000°C. [9]	14
1.2	Porovnání účinnosti indukčních ohřevů. [8]	19
1.3	Teplo odvedené z jednotlivých částí kalícího zařízení.	26
2.1	Chemické složení oceli C45.	29
2.2	Doba potřebná na prohřátí vrstvy 1,7 mm na teplotu minimálně 820 °C	36
2.3	Porovnání teplot v kontrolních bodech.	41
3.1	Příklad vlastnosti materiálů pro SLS tisk konkrétního výrobce. [24]	43