

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektroenergetiky a ekologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Vliv relativní permeability na ohřev kovů
elektromagnetickou indukcí**

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

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Luděk MAREK, DiS.**
Osobní číslo: **E17N0097P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Název tématu: **Vliv relativní permeability na ohřev kovů elektromagnetickou indukcí**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Objasněte Curieův bod magnetické přeměny u materiálů ohříváných elektromagnetickou indukcí.
2. Jak ovlivňuje relativní permeabilita analytické a numerické výpočty indukčních ohřevů elektricky vodivých materiálů.
3. Uveďte, jak lze respektovat relativní permeabilitu při ohřevech na teplotu do Curieova bodu u konstrukční oceli.
4. Určete podmínky pro optimální průběh ohřevu válcové vsázky o průměru 0,05 m z konstrukční oceli pro tváření za tepla.
5. Z provedených výpočtů a úvah stanovte závěry pro praxi.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **40 - 60 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

- 1. Literaturu určí vedoucí závěrečné práce.**
- 2. Rudnev V.: Handbook of Induction Heating, CRC - USA.**

Vedoucí diplomové práce:

Prof. Ing. Jiří Kožený, CSc.

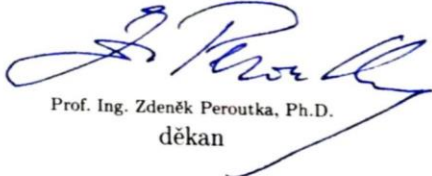
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce:


5. října 2018

Termín odevzdání diplomové práce:

30. května 2019


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




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

V Plzni dne 5. října 2018

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce se zabývá změnou relativní permeability při indukčním ohřevu. V práci jsou popsány změny relativní permeability v závislosti na teplotě a intenzitě magnetického pole. Je zde uvedeno, jaký vliv mají změny relativní permeability na proces ohřevu elektromagnetickou indukcí. Hlavním cílem práce je určit optimální podmínky pro ohřev válcové ocelové vsázky pro tváření za tepla. Na základě výpočtu jsou uvedeny závěry pro praxi.

Klíčová slova

Indukční ohřev, relativní permeabilita, Curieova teplota, ocel, feromagnetikum, průřažnost, frekvence, hloubka vniku

Abstract

This thesis deals with the change of relative permeability in induction heating. Changes in relative permeability in dependence on temperature and intensity of magnetic field are described. The influence of relative permeability changes on the heating process by electromagnetic induction is shown. The main aim of this work is to determine optimal conditions for heating of cylindrical steel charge for hot forming. Based on the calculation, conclusions for practice are presented.

Key words

Induction heating, relative magnetic permeability, Curie temperature, steel, ferromagnetic, transparency, frequency, penetration depth

Prohlášení

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

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

.....
podpis

V Plzni dne 30.5.2019

Luděk Marek

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Jiřímu Koženému, CSc. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	8
ÚVOD	10
1 VZNIK TEPLA U INDUKČNÍHO OHŘEVU	11
1.1 HLOUBKA VNIKU ELEKTROMAGNETICKÉHO VLNĚNÍ	11
1.2 ELEKTROMAGNETICKÁ PRŮZAŘNOST LÁTEK	13
2 VLASTNOSTI KOVŮ	15
2.1 KRYSTALICKÁ STRUKTURA ŽELEZA A JEHO SLITINY.....	15
2.2 MAGNETICKÉ VLASTNOSTI LÁTEK.....	17
2.2.1 Chování látek v magnetickém poli.....	18
2.2.1.1 Třídění magnetických látek podle relativní permeability	18
2.3 CURIEOVA TEPLOTA	21
2.4 MĚRNÁ ELEKTRICKÁ REZISTIVITA KOVŮ.....	22
3 VLIV RELATIVNÍ PERMEABILITY NA OHŘEV KOVŮ	24
3.1 ODVOZENÍ STŘEDNÍ HODNOTY RELATIVNÍ PERMEABILITY	26
3.2 RELATIVNÍ PERMEABILITA VE VÝPOČTECH - SHRNUTÍ.....	29
4 VYUŽITÍ INDUKČNÍHO OHŘEVU	30
4.1 INDUKČNÍ PROHŘÍVACÍ ZAŘÍZENÍ PRO TVÁŘENÍ ZA TEPLA	30
4.1.1 Indukční zařízení pro ohřev přířezů.....	30
4.1.2 Indukční zařízení pro ohřev tyčí	31
4.1.3 Indukční zařízení pro ohřevy konců tyčového materiálu	32
4.1.3.1 Stanovení vhodné frekvence a dalších provozních parametrů.....	32
4.2 INDUKČNÍ PROHŘÍVACÍ ZAŘÍZENÍ PRO TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ.....	34
4.2.1 Indukční zařízení pro povrchové kalení.....	34
4.2.2 Indukční zařízení pro žihání	34
4.3 INDUKČNÍ ZAŘÍZENÍ PRO SPECIÁLNÍ POUŽITÍ	35
4.3.1 Indukční svařování trub.....	35
4.4 INDUKČNÍ ZAŘÍZENÍ PRO TAVENÍ KOVŮ.....	36
4.4.1 Indukční kelímková pec	36
4.4.2 Indukční kanálková pec	37
5 URČENÍ OPTIMÁLNÍHO PRŮBĚHU OHŘEVU PRO KONSTRUKČNÍ OCEL	39
ZÁVĚR	43
6 BIBLIOGRAFIE	44
SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK	45

Seznam symbolů a zkratk

Δr	rozdíl poloměrů (m)
μ	permeabilita ($\text{H}\cdot\text{m}^{-1}$)
μ_0	permeabilita vakua ($\text{H}\cdot\text{m}^{-1}$)
μ_R	relativní permeabilita (-)
$\mu_{stř}$, μ_s	střední hodnota relativní permeability (-)
A_{cm}	teplota tavení ($^{\circ}\text{C}$)
B	indukce magnetického pole (T)
c	měrná tepelná kapacita ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
d , d_z	průměr vsázky (m)
f	frekvence (Hz)
f_{max}	maximální frekvence (Hz)
f_{min}	minimální frekvence (Hz)
f_{opt}	optimální frekvence (Hz)
G	hmotnost (kg)
H	intenzita magnetického pole ($\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$)
h	vzdutí (m)
H_s	střední hodnota intenzity magnetického pole ($\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$)
I	elektrický proud (A)
I_0	elektrický proud na povrchu vsázky (A)
J	proudová hustota ($\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$)
K	konstanta (-)
l	délka vsázky (m)
m	orbitální magnetický moment elektronu ($\text{A}\cdot\text{m}^2$)
m_s	spinový magnetický moment elektronu ($\text{A}\cdot\text{m}^2$)
\mathbf{n}	jednotkový normálový vektor (-)
P_1	příkon (W)
P_2, P	činný výkon (W)
Q	teplo (J)
R	elektrický odpor (Ω)
r , r_2	poloměr vsázky (m)
r_s	střední hodnota poloměru (m)
S	plocha (m^2)

S_pzářivý tok ($W \cdot m^{-2}$)
 T, A, ϑteplota ($^{\circ}C$)
 t_0 doba ohřevu (s)
 T_0okolní teplota ($^{\circ}C$)
 T_c, A_2Curieova teplota ($^{\circ}C$)
 vrychlost elektronu ($m \cdot s^{-1}$)
 w měrná spotřeba elektrické energie ($kWh \cdot kg^{-1}$)
 W_menergie magnetického pole (J)
 y, xvzdálenost od povrchu směrem ke středu vsázky (m)
 αteplotní součinitel odporu ($1/^{\circ}C$)
 δ, a_2pronikání elektromagnetického vlnění do elektricky vodivé vsázky
– zkráceně hloubka vniku (m)
 ρměrná elektrická rezistivita ($\mu\Omega \cdot m$)
 ρ_hobjemová hustota ($kg \cdot m^{-3}$)
 σměrná elektrická vodivost ($S \cdot m^{-1}$)
 χmagnetická susceptibilita (-)
 ωúhlová frekvence (s^{-1})

Rozlišení skalárních a vektorových veličin v textu:

Vektory jsou psány **tučně** a *kurzívou*.

Skalární veličiny jsou psány *kurzívou*.

Důležité konstanty:

Ludolfovo číslo: $\pi = 3,14$

Permeabilita vakua: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} H \cdot m^{-1}$

Úvod

Indukční ohřev se v dnešní době využívá v průmyslu především pro tavení, kalení, žhání, tváření, lisování a svařování. S rozvojem elektroniky se s indukčním ohřevem můžeme potkat i v domácnostech v podobě indukční varné desky. Hlavní výhodou indukčního ohřevu oproti ostatním druhům ohřevu (odporový, dielektrický,...) je jeho vysoká účinnost, protože teplo vzniká přímo v ohřívaném materiálu. Ohřívané materiály musí být elektricky vodivé. Jeho další předností je velmi rychlá doba ohřevu.

V diplomové práci se budu zabývat problematikou vlivu relativní permeability na indukční ohřev. Zaměřím se na popis vlastností, na kterých relativní permeabilita závisí. V další části popíši samotný vliv relativní permeability na proces indukčního ohřevu. Zmíním zde i nejpoužívanější aplikace tohoto ohřevu a to především pro tvářecí účely.

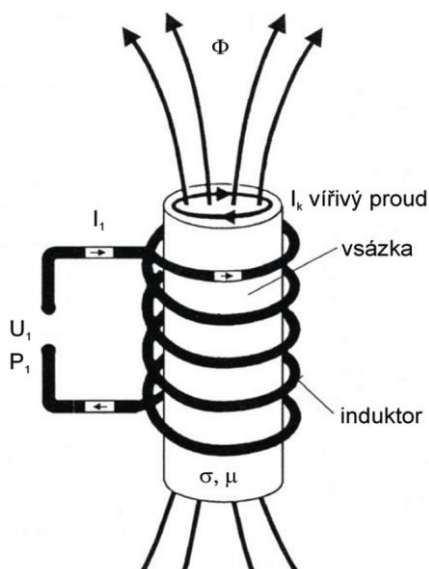
Hlavním úkolem této práce bude stanovit optimální podmínky pro průběh ohřevu válcové vsázky z konstrukční oceli pro tvářecí účely. Na základě těchto zjištěných podmínek pro ohřev uvedu doporučení pro praxi.

1 Vznik tepla u indukčního ohřevu

Zařízení pro indukční ohřev se vždy sestává z induktoru, zdroje a vsázky. Připojíme-li na induktor střídavé napětí, začne jím procházet střídavý proud. Tento střídavý proud vytvoří v okolí induktoru časově proměnné magnetické pole se stejnou frekvencí, jako má procházející proud induktorem. Toto magnetické pole indukuje ve vsázce vířivé proudy, které ji zahřívají. Teplo vznikající uvnitř vsázky je úměrné Jouleovu teplu $R \cdot I^2$. Vířivé proudy mají frekvenci stejnou s magnetickým polem, které je vytvořilo, ale mají opačný směr. Na obrázku (Obr. 1.1) je zobrazen jednoduchý případ, kdy induktor je ve tvaru solenoidu a do něho je umístěna válcová vsázka. V praxi jsou induktory navrženy pro specifické aplikace a mohou mít různé tvary.

Vsázka je nejteplejším místem celé soustavy, zatímco ostatní části soustavy mohou být studené. Teplo vznikající přímo ve vsázce patří mezi největší přednosti indukčního ohřevu.

[1] [2] [3]



Obr. 1.1 Princip indukčního ohřevu [1]

1.1 Hloubka vniku elektromagnetického vlnění

Elektromagnetické záření, které generuje induktor, se šíří do vsázky formou vlnění. Pronikající elektromagnetické vlnění se bude ve vsázce postupně utlumovat a jeho energie se bude měnit na energii tepelnou. To se projeví tak, že vířivé proudy budou největší na povrchu a směrem ke středu vsázky budou klesat přibližně exponenciálně. Tento jev, kdy proud není rovnoměrně rozprostřen uvnitř vsázky (vodiče), se nazývá skin efekt. Útlum naindukovaného proudu ve válcové vsázce lze matematicky zapsat jako:

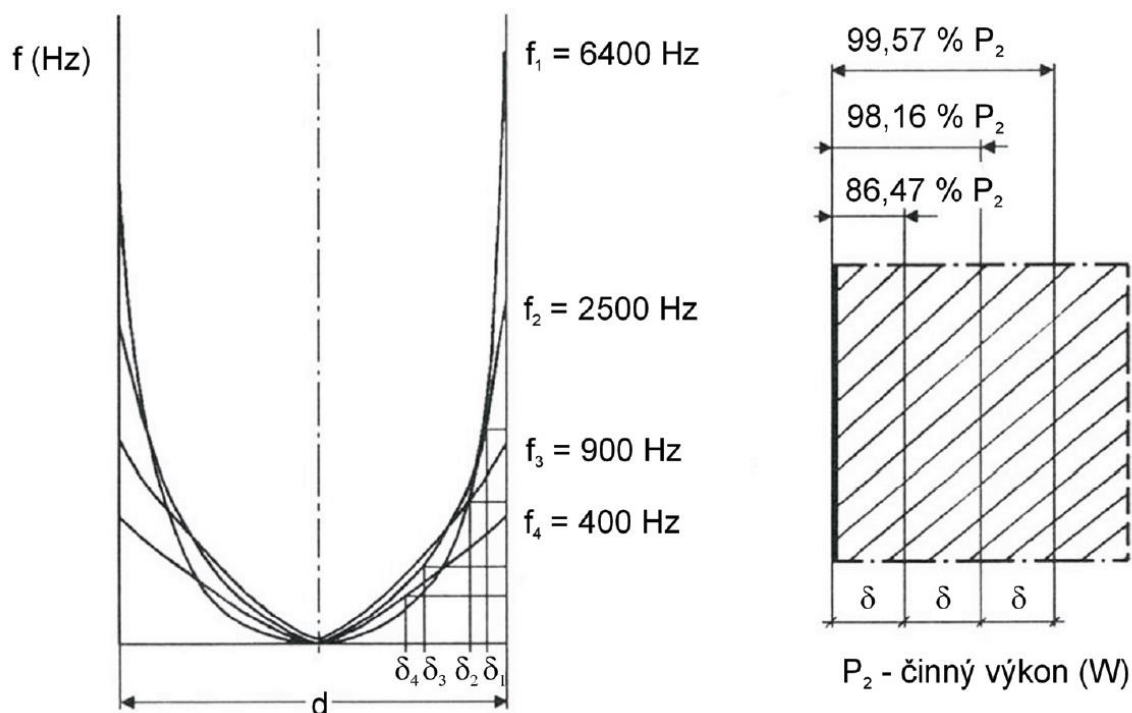
$$I = I_0 \cdot e^{\frac{-y}{\delta}}, \quad (1.1)$$

kde I_0 je proud na povrchu vsázky, y vzdálenost od povrchu směrem ke středu vsázky a δ je hloubka vniku. Hloubka vniku je místo od povrchu vsázky, kde proud poklesne zhruba na 36,8% z původní hodnoty I_0 . Hloubku vniku lze vypočítat ze vztahu:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu \cdot \sigma}} = \sqrt{\frac{2}{2\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma}}. \quad (1.2)$$

Hloubka vniku je všeobecně závislá na teplotě a tím i na materiálových vlastnostech (σ , ρ) vsázky, které se s teplotou mění. Tyto veličiny a jejich závislosti na teplotě a ostatních veličinách jsou podrobněji popsány v kapitole 2.

Dále závisí hloubka vniku na frekvenci proudu v induktoru. Tato závislost je zobrazena pro vsázku o průměru d na obrázku (Obr. 1.2). Lze vidět, že čím větší použijeme frekvenci, tím se vsázka prohřeje v tenčí vrstvě od povrchu. Na Obr. 1.2 vpravo je také znázorněna graficky koncentrace výkonu v hloubce rovné δ , která je přibližně 86,47%. V tabulce (Tabulka 1.1) jsou uvedeny hodnoty δ v závislosti na frekvenci a teplotě pro různé materiály.



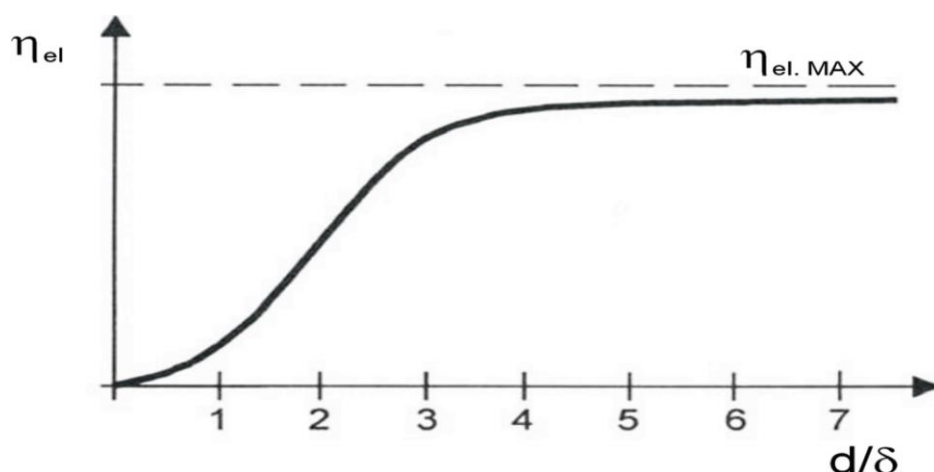
Obr. 1.2 Závislost hloubky vniku na frekvenci [1]

Tabulka 1.1 Závislost hloubky vniku na frekvenci a teplotě pro různé materiály [1]

Frekvence (Hz)	Hloubka vniku (mm)					
	Cu		Al		Ocel	
	20 °C	1100 °C	20 °C	660 °C	20 °C	800 °C
50	9,5	31,8	12,2	31,5	8	71,2
100	2,1	7,1	2,7	7	1,8	15,9
10000	0,67	2,25	0,86	2,2	0,56	5
1000000	0,067	0,22	0,086	0,22	0,056	0,5

Elektrická účinnost indukčního ohřevu závisí na poměru průměru ohřívaného materiálu a hloubky vniku. Tato závislost je zobrazena na obrázku (Obr. 1.3). Kromě toho je závislá i na použité teplotě a materiálu vsázky.

[1] [2] [3]

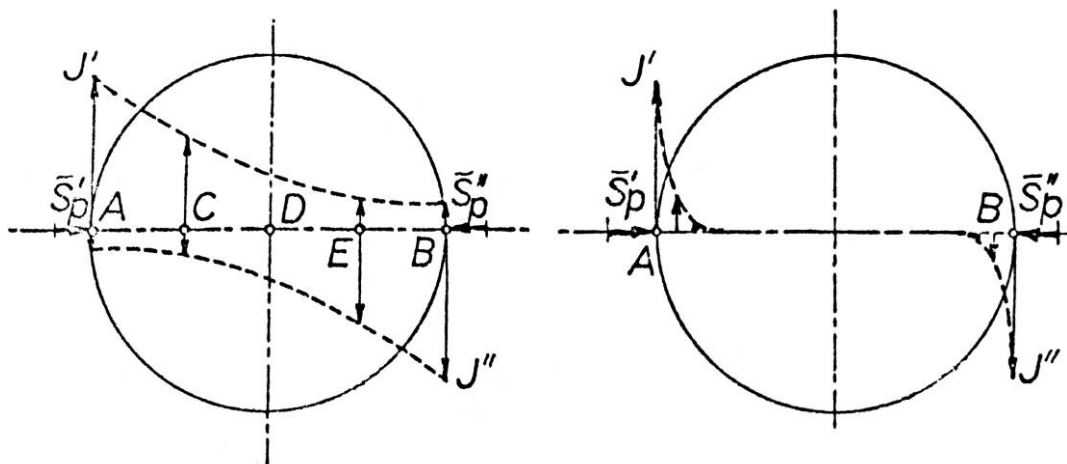
Obr. 1.3 Elektrická účinnost indukčního ohřevu v závislosti na poměru d/δ [1]

1.2 Elektromagnetická průzařnost látek

Pro elektrickou účinnost, jak bylo zmíněno, je důležitý poměr průměru vsázky k hloubce vniku. Jelikož hloubka vniku závisí na frekvenci, je především volba vhodné frekvence pro indukční ohřev důležitým parametrem. Kdybychom zvolili frekvenci příliš nízkou, tak bude hloubka vniku oproti průměru vsázky o hodně větší ($d \ll \delta$) a látka se stane průzařnou. Naopak při zvolení vysoké frekvence se hloubka vniku sice zmenší ($d \gg \delta$), ale naindukované teplo se generuje v tenké vrstvě na povrchu, čímž dojde i ke zvýšení tepelných ztrát z povrchu látky.

Tyto dva případy pro dvě zvolené různé frekvence lze objasnit pomocí obrázku (Obr. 1.4). Vsázka je v tomto případě válcového tvaru a na její povrch dopadá elektromagnetické vlnění (v bodech A a B) reprezentované zářivými toky \mathbf{S}'_p a \mathbf{S}''_p . Obrázek vlevo ukazuje

případ nízké frekvence ($d \ll \delta$). Jak lze vidět, průběhy amplitud proudových hustot J' a J'' mají opačný smysl a dochází tak k jejich částečnému vyrušení. Velikost naindukovaných proudů v jednotlivých naznačených bodech (C, D, E) se tím zmenší.



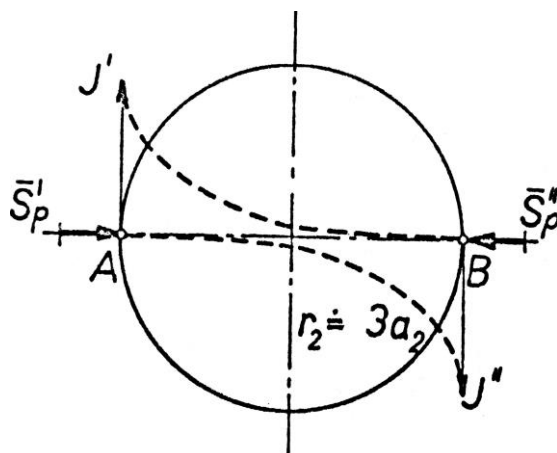
Obr. 1.4 Znáornění průběhu amplitudy proudové hustoty pro nízkou a vysokou hodnotu zvolené frekvence [4]

Na obrázku (Obr. 1.4) vpravo je zobrazen druhý případ pro vysokou frekvenci ($d \gg \delta$). Zde se obě vlnění utlumí v tenké vrstvě od povrchu rovné přibližně trojnásobku hloubky vniku. Teplo se může do vsázky šířit pouze vedením.

Aby se látka co nejefektivněji prohřála, volí se optimální frekvence mezi těmito dvěma krajními případy. Frekvence se volí taková, aby poloměr vsázky byl přibližně 2,5 až 3 krát větší než hloubka vniku, platí tedy:

$$r_2 = (2,5 \div 3) \cdot \delta . \quad (1.3)$$

Tento případ je zobrazen na obrázku (Obr. 1.5). Obě hustoty proudu dosahují nízkých hodnot v ose válcové vsázky a tak se téměř neovlivňují. [4]



Obr. 1.5 Průběh amplitud hustoty proudu pro optimální prohřátí vsázky [4]

2 Vlastnosti kovů

Popsané vlastnosti v této kapitole, ačkoliv je lze aplikovat i na jiné kovové materiály, se budou zaměřovat především na vlastnosti železa a jeho slitin (ocelí a litin). [2]

2.1 Krystalická struktura železa a jeho slitiny

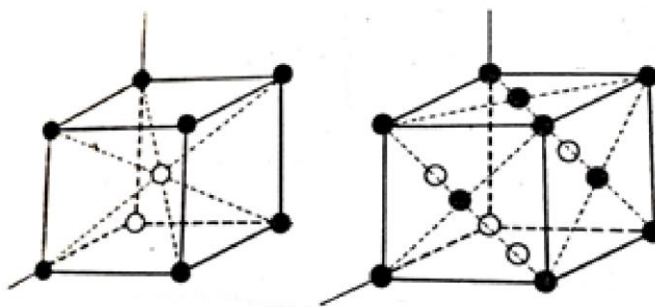
Každá látka se sestává z atomů, které jsou tvořeny jádrem a elektronovým obalem. Jádro je tvořeno protony a neutrony. Okolo jádra obíhá různý počet elektronů, které se pohybují po určitých drahách. Látka tvořená z atomů se stejným počtem protonů (tj. atomy mají stejné protonové číslo) se nazývá prvek. Kombinací dvou a více atomů vznikne molekula.

Spojí-li se skupina atomů tak, že vytvoří krystalovou mřížku, která se pravidelně opakuje i na větší vzdálenosti, vznikne krystal. U železa a jeho slitin závisí struktura krystalové mřížky především na teplotě a tlaku.

V závislosti na teplotě nabývá železo dvou odlišných krystalických modifikací α a γ . Modifikace γ (označovaná také jako austenit nebo γ -železo) se vyskytuje přibližně v rozmezí teplot 912 °C až 1392 °C. V této modifikaci má železo mřížku krychlovou plošně prostorovou (Obr. 2.1 vpravo), je více zhuštěná a tím dosahuje menšího objemu a větší hustoty než je tomu u modifikace α . V této fázi je železo také více kujné a neprojevuje se feromagnetickými vlastnostmi.

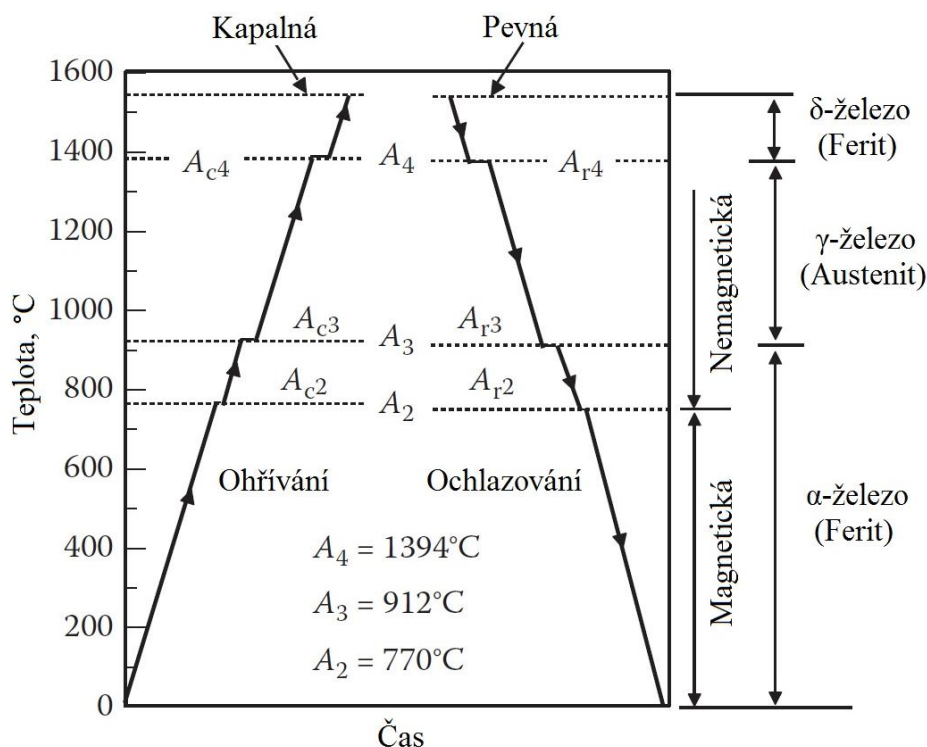
V α modifikaci (označovaná také jako ferit nebo α -železo) má železo mřížku krychlovou prostorově centrovanou (Obr. 2.1 vlevo). Modifikace α se vyskytuje ve dvou teplotních rozmezích. Při teplotě nad 1392 °C se označuje jako δ -železo, které se neliší strukturou krystalické mřížky od α -železa, ale pouze teplotním rozmezím ve kterém se nachází. Druhé teplotní rozmezí je od 0 °C do 912 °C, kde do teploty 770 °C se železo vyznačuje silnými feromagnetickými vlastnostmi.

Po překročení teploty 770 °C ztrácí železo své magnetické vlastnosti a stává se paramagnetickým. Teplota, kde látka ztrácí své feromagnetické vlastnosti a stává se tak paramagnetickou, se označuje jako Curieova teplota. Ve většině aplikací pro indukční ohřev se vyskytuje železo právě ve formě α -železa a γ -železa. S δ -železem se setkáme pouze při indukčním tavení nebo svařování.

Obr. 2.1 Krystalická mřížka železa – vlevo α -železo, vpravo γ -železo [3]

Jiné kovy jako například nikl, hliník, měď a zlato, mají mřížku krychlovou plošně centrovanou již za pokojové teploty a není tak nutné je zahřívát na tak vysoké teploty jako u železa.

Na obrázku (Obr. 2.2) je grafické zobrazení jednotlivých modifikací železa v závislosti na teplotě. Při změně struktury železa z jednoho typu na jiný je potřeba k této transformaci určitě teplo, které se označuje jako latentní teplo. Latentní teplo je při ohřevu dodáváno na podpoření transformace krystalické mřížky, naopak při ochlazování se teplo uvolňuje. Na obrázku (Obr. 2.2) jsou znázorněny čtyři přerušení v závislosti na teplotě (označeny jako kritické teploty A_2 , A_3 , A_4 , A_{cm}). První přerušení při zvyšování teploty je označováno jako A_2 (z fr. Arret) nebo Curieův bod. Zde se dodaná energie využije na rozhození magnetických dipólů uvnitř železa, a tím látka ztrácí své feromagnetické vlastnosti.



Obr. 2.2 Křivky oteplování a ochlazování železa [2]

Druhé přerušení během zvyšování teploty nastává při změně z α -železa na γ -železo ($A_3=912$ °C). K třetímu a čtvrtému přerušení dojde při přechodu z γ -železa na δ -železo ($A_4=1394$ °C) a v bodě tání železa ($A_{cm}=1528$ °C).

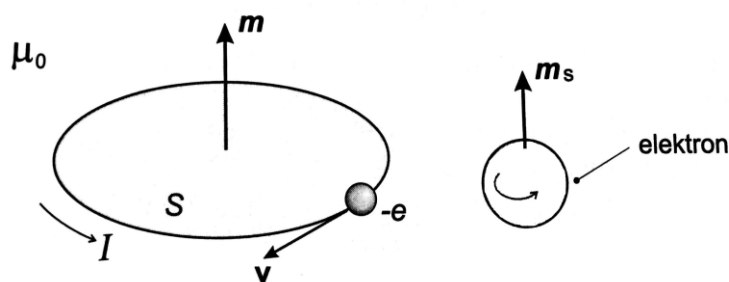
Pro rozlišení kritických teplot při ohřevu se používá index “c” (z fr. Chauffage) a při ochlazování index “r” (z fr. refroidissement). Tyto teploty nejsou stejné z důvodu tepelné hystereze. Tepelná hystereze závisí na rychlosti ohřevu či ochlazování, na chemické příměsi ostatních prvků a mikrostruktuře. Čím rychlejší bude ohřev, tím větší bude rozdíl mezi teplotami A_c a A_r .

Čisté železo se jako samotný materiál nepoužívá. V praxi se pro konstrukční účely setkáme nejčastěji s nelegovanými uhlíkovými oceli. Jde o slitinu železa a uhlíku, kde uhlíku je obsaženo méně než 2%. Kromě toho obsahuje také menší podíl legujících prvků, jako je například nikl, chrom, vanad, atd. Při obsahu uhlíku větší než 2% se směs označuje jako litina.

[2] [5] [6] [7]

2.2 Magnetické vlastnosti látek

Pro vytvoření magnetických vlastností látek je potřeba, aby atomy vykazovaly určitý magnetický moment. Tento magnetický moment se vektorově sčítá především z orbitálního \mathbf{m} a spinového \mathbf{m}_s magnetického momentu elektronu. Magnetický moment jádra se zanedbává, protože nemá téměř žádný vliv na výsledný magnetický moment.



Obr. 2.3 Orbitální a spinový magnetický moment elektronu [6]

Orbitální magnetický moment elektronu si lze objasnit na modelu, kde se elektron pohybuje rychlostí \mathbf{v} okolo jádra atomu (Obr. 2.3). Tento pohybující se elektron představuje elektrický proud I , který vytváří v jeho okolí magnetické pole. V tomto modelu, který představuje elementární magnetický dipól, lze pro orbitální magnetický moment \mathbf{m} psát:

$$d\mathbf{m} = I \cdot dS \cdot \mathbf{n}, \quad (2.1)$$

kde dS je obsah rovinné plochy, kterou uzavírá pohybující se elektron okolo jádra, \mathbf{n} je jednotkový vektor kolmý na tuto plochu a orientovaný pravotočivě vůči směru proudu I . Vyskytuje-li se okolo jádra více elektronů, tak výsledný orbitální magnetický moment je dán vektorovým součtem orbitálních magnetických momentů jednotlivých elektronů.

Spinový magnetický moment elektronu je tvořen magnetickým polem, které elektron vytváří rotací kolem své vlastní osy.

[5] [8]

2.2.1 Chování látek v magnetickém poli

Vystavíme-li látku vnějšímu magnetickému poli s intenzitou \mathbf{H} , dojde k interakci mezi polem a látkou, která způsobí zeslabení nebo zesílení magnetické indukce \mathbf{B} v látce. Mezi \mathbf{B} a \mathbf{H} platí:

$$\mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H} = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \mathbf{H}, \quad (2.2)$$

kde $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$ je permeabilita, μ_0 je permeabilita vakua ($4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m) a μ_r je relativní permeabilita (-). Relativní permeabilita vyjadřuje schopnost materiálu vést magnetický tok lépe než vakuum. Jedná se o veličinu popisující materiálové vlastnosti. Tato veličina do značné míry ovlivňuje hloubku vniku δ .

Někdy se místo relativní permeability můžeme setkat s alternativní veličinou k permeabilitě a to s magnetickou susceptibilitou χ , která je s ní ve vztahu:

$$\chi = \mu_r - 1. \quad (2.3)$$

Tato veličina vyjadřuje o kolik se μ_r liší od vakua či vzduchu.

Chování látek lze kvantitativně posuzovat podle velikosti relativní permeability μ_r .

[2] [8]

2.2.1.1 Třídění magnetických látek podle relativní permeability

Magnetika rozdělujeme na tři základní skupiny podle velikosti jejich relativní permeability na diamagnetika, paramagnetika a feromagnetika.

Diamagnetika mají relativní permeabilitu o něco málo menší než jedna ($\mu_r < 1$). U této skupiny látek dochází k vzájemnému vyrušení jak orbitálního, tak i spinového magnetického momentu. Diamagnetické látky po vložení do magnetického pole toto pole mírně zeslabují. Typické diamagnetické látky jsou například zlato, měď, stříbro, rtuť a bismut.

Diamagnetizmem se projevují všechny látky a nejsou závislé na teplotě.

Paramagnetika mají relativní permeabilitu o něco málo větší než jedna ($\mu_r > 1$). Tyto látky vykazují určitý magnetický moment i bez vnějšího magnetického pole. Po vložení do magnetického pole dochází k souhlasnému natáčení zbytkových magnetických momentů se směrem tohoto pole a tím dochází k mírnému zesílení magnetického pole uvnitř látky. Do této skupiny patří například hliník, platina a mangan.

Obecně se diamagnetika a paramagnetika považují z hlediska indukčního ohřevu za látky nemagnetické. Paramagnetické látky, na rozdíl od diamagnetik, závisí na teplotě.

Feromagnetika se oproti předchozím dvěma typům magnetik vyznačují velmi vysokou hodnotou relativní permeability ($\mu_r \gg 1$). Hodnoty μ_r mohou dosahovat až desetitisíců. Tyto látky tedy značně magnetické pole zesilují. Látek, které vykazují feromagnetické vlastnosti při pokojové teplotě, není mnoho. Mezi nejvýznamnější zástupce feromagnetik patří železo, kobalt a nikl. Tabulka 2.1 zobrazuje hodnoty relativní permeability různých látek ze všech tří uvedených skupin. Stejně jako paramagnetické i feromagnetické látky závisí na teplotě.

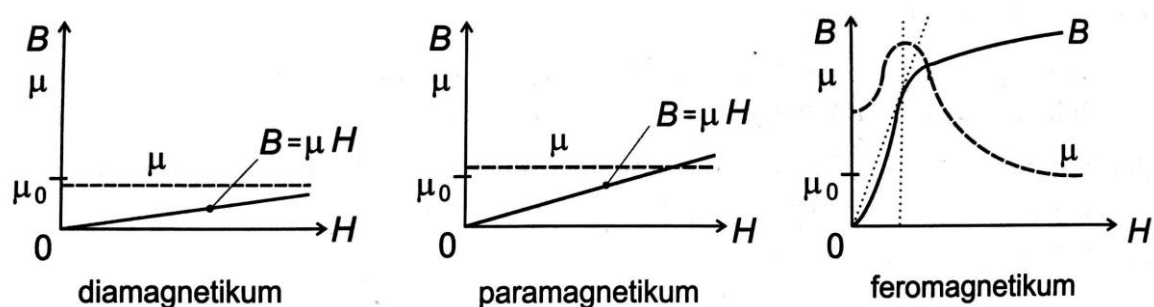
Tabulka 2.1 Příklady μ_r pro různé látky při pokojové teplotě [2]

<i>Materiál</i>	μ_r
<i>Cu</i>	0,999 99
<i>Ag</i>	0,999 97
<i>Au</i>	0,999 96
<i>Al</i>	1,000 02
<i>Pt</i>	1,000 26
<i>Fe</i>	300 – 10 000
<i>Co</i>	80 – 200

Každé feromagnetikum při teplotě, která je nižší než Curieova teplota T_c , se rozpadá na menší oblasti zvané domény. V této oblasti jsou magnetické momenty atomů uspořádány paralelně a mají stejný směr. Jednotlivé domény jsou bez přiloženého magnetického pole orientovány náhodně a tím se navzájem většina magnetických momentů v dané látce téměř vyruší. Teprve po vložení do magnetického pole se domény orientují stejným směrem a látka se chová jako magnet (látka byla zmagnetována). Feromagnetika si zachovávají magnetické vlastnosti i při vyjmutí z magnetického pole. Děj zmagnetování popisuje křivka prvotní

magnetizace (prvotní, neboť látka nevykazovala před magnetováním žádné magnetické vlastnosti) zobrazená na obrázku (Obr. 2.4). Jedná se o závislost $B=B(H)$. Jak lze vidět, pro diamagnetika a paramagnetika je křivka lineární, protože téměř neovlivňují magnetickou indukci B .

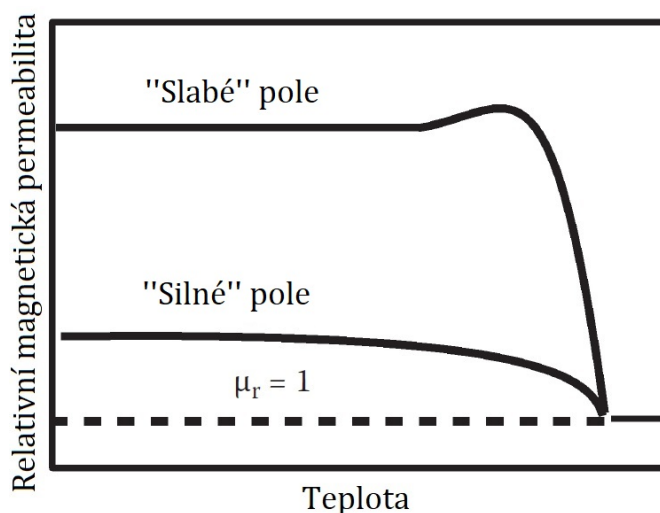
Pro feromagnetika je tato křivka nelineární a již při nízkých hodnotách H dosáhnou vysoké magnetické indukce B . Z těchto důvodů mají feromagnetika široké uplatnění v konstrukci mnoha elektrotechnických zařízení, například při výrobě elektromagnetů, částí elektrických strojů, apod.



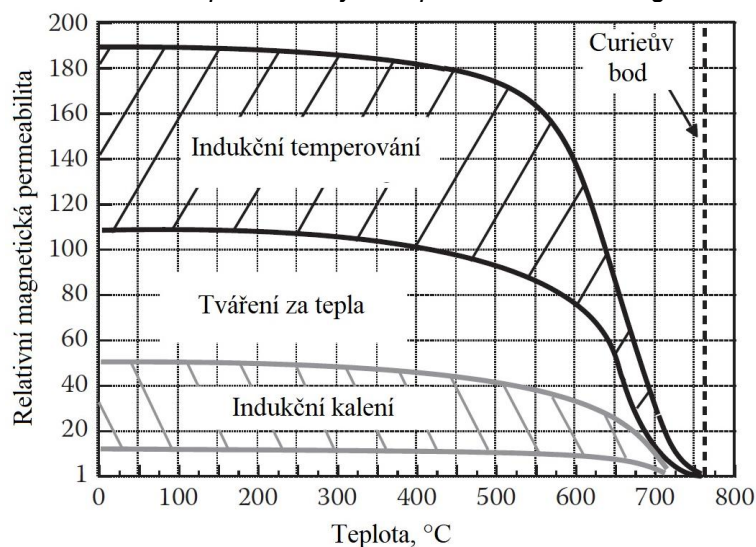
Obr. 2.4 Křivka prvotní magnetizace pro diamagnetika, paramagnetika a feromagnetika [8]

Feromagnetické vlastnosti závisí kromě teploty také na intenzitě magnetického pole, struktuře, frekvenci, velikosti zrn a chemickém složení. Na obrázcích (Obr. 2.5 a Obr. 2.6) lze vidět, jak se může lišit relativní permeabilita uhlíkové oceli při stejné teplotě a frekvenci s jinou použitou intenzitou magnetického pole induktoru. Hodnoty μ_r se pro uhlíkové oceli mohou pohybovat od nízkých hodnot ($\mu_r=2$ nebo 3) až po velmi vysoké hodnoty ($\mu_r>500$) v závislosti na teplotě a intenzitě magnetického pole.

[2] [5] [8] [9]



Obr. 2.5 Závislost relativní permeability na teplotě a intenzitě magnetického pole [2]



Obr. 2.6 Závislost relativní magnetické permeability na teplotě pro různé technologické procesy [2]

2.3 Curieova teplota

Feromagnetické látky mohou své magnetické vlastnosti ztratit při určité teplotě, která se označuje jako Curieova teplota. K této změně dochází skokově a tím mohou nastat určité problémy s procesem ohřívání u indukčního ohřevu. Tím, že se látka stane náhle nemagnetickou, dojde i ke skokové změně relativní permeability na hodnotu blízké jedné ($\mu_r \approx 1$). A protože je relativní permeabilita úzce spojena s hloubkou vniku δ , dojde i ke změně prohřívání vsázky. S touto změnou se musí počítat při návrhu indukčních zařízení. Specifická opatření budou uvedena v další kapitole. Tabulka 2.2 uvádí Curieovy teploty pro nejrozšířenější zástupce feromagnetik.

Tabulka 2.2 Curieova teplota pro různé materiály [2]

Materiál	T_c (°C)
Železo	770
Kobalt	1120
Nikl	358
Permalloy	440

U uhlíkových ocelí závisí Curieova teplota i na velikosti obsahu uhlíku. Například ocel s označením SAE 1008 (C do 0,1%) má $T_c=768$ °C, oproti tomu ocel s označením SAE 1060 (C do 0,55-0,65%) dosahuje Curieova bodu při nižší teplotě ($T_c=732$ °C).

[2] [5]

2.4 Měrná elektrická rezistivita kovů

Jak daná látka brání průchodu elektrického proudu, popisuje veličina zvaná měrná elektrická rezistivita ρ . Kovy a jejich slitiny jsou všeobecně dobrými vodiči a tím mají i nízké hodnoty ρ . V tabulce 2.3 jsou uvedeny hodnoty měrné elektrické rezistivity pro některé kovy.

Tabulka 2.3 Měrná elektrická rezistivita a teplotní koeficient odporu materiálu vybraných kovů [2]

Materiál (za pokojové teploty)	Měrná elektrická rezistivita ρ ($\mu\Omega \cdot m$)	Teplotní součinitel odporu α ($1/^\circ C$)
Měď	0,017	0,004
Hliník	0,027	0,0043
Měkká uhlíková ocel	0,16	0,005 (platí pro čisté železo)
Nikl	0,068	0,0069

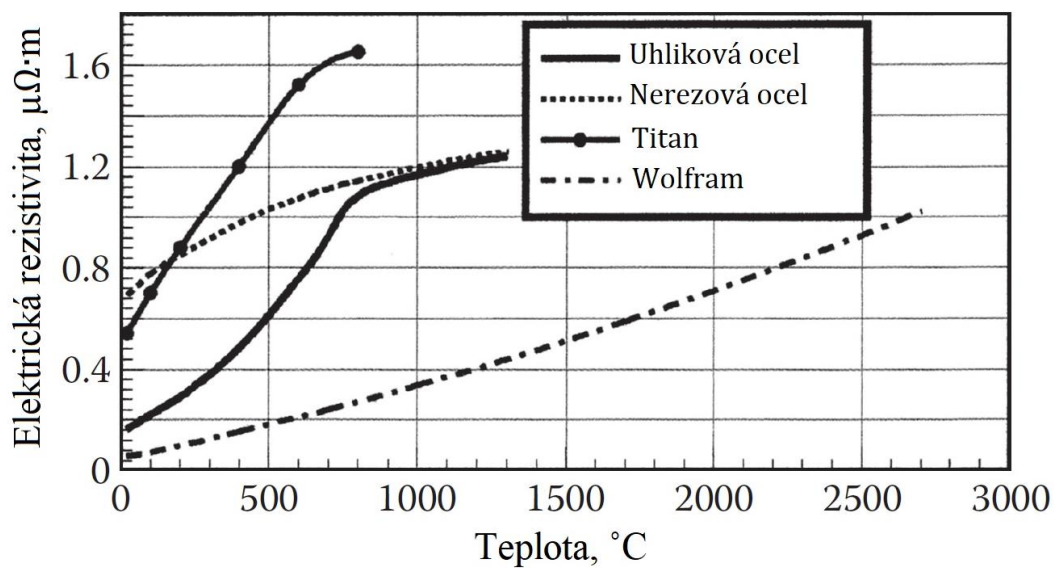
Všeobecně měrná el. rezistivita u většiny kovů se vzrůstající teplotou roste. Potřebujeme-li měrnou el. rezistivitu pro jinou teplotu než pokojovou, můžeme často u čistých kovů použít aproximaci pomocí lineární funkce v závislosti na teplotě:

$$\rho(T) = \rho_0 \cdot [1 + \alpha(T - T_0)], \quad (\mu\Omega \cdot m) \quad (2.4)$$

kde ρ_0 je měrná elektrická rezistivita za okolní teploty T_0 , $\rho(T)$ je elektrická rezistivita za teploty T a α teplotní součinitel odporu ($1/^\circ C$). V tabulce 2.3 jsou uvedeny hodnoty α pro vybrané čisté kovy. Teplotní součinitel odporu α může nabývat i záporných hodnot pro materiály, kde elektrická rezistivita klesá s teplotou.

Pro ostatní materiály (např. uhlíkaté oceli, legované oceli) je α nelineární funkcí teploty, což má za následek nelineární funkci ρ v závislosti na teplotě. Nečistoty a legující prvky

v kovech deformují kovovou mřížku a tím ovlivňují do jisté míry hodnoty ρ . Na obrázku (Obr. 2.7) je zobrazen vliv těchto nečistot a přísad v železe.



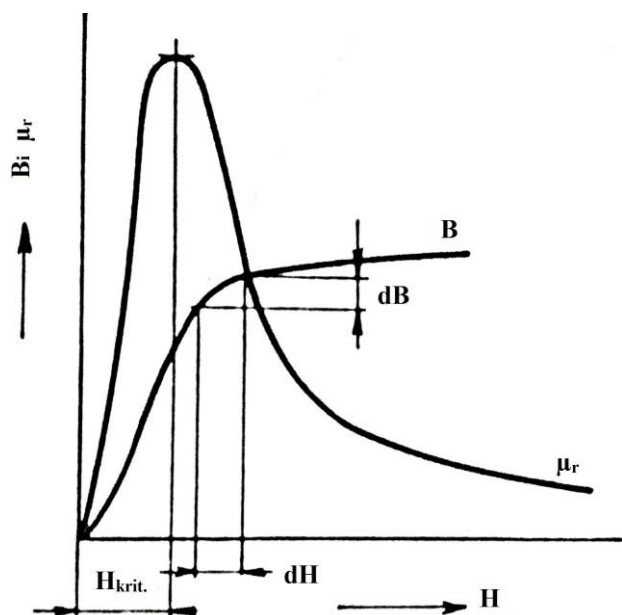
Obr. 2.7 Průběhy měrné elektrické rezistivity ocelí, titanu a wolframu v závislosti na teplotě [2]

Elektrická rezistivita ovlivňuje všechny parametry indukčního systému jako například hloubku vniku δ , rozložení naindukovaného tepla, účinnost ohřevu, impedanci induktoru, atd.

[2]

3 Vliv relativní permeability na ohřev kovů

Jak bylo uvedeno v předešlé kapitole u nemagnetických látek (diamagnetické a paramagnetické) můžeme relativní permeabilitu považovat za konstantní ($\mu_r \approx 1$), neboli závislost B na H je lineární. Toto platí i pro magnetické látky ohříváné nad Curieův bod (pro ocel $T_c \approx 750$ °C). U látek ohříváných do Curieova bodu, kde si daná látka zachovává magnetické vlastnosti, je relativní permeabilita obvykle o dost větší než jedna ($\mu_r \gg 1$) a magnetizační křivka je nelineární $B \neq \mu \cdot H$.



Obr. 3.1 Křivka prvotní magnetizace a závislost relativní permeability na intenzitě magnetického pole [3]

Na obrázku (Obr. 3.1) je typický průběh magnetizační křivky pro magnetickou látku. Pro malý úsek této křivky dH , kde považujeme μ_r za konstantní, můžeme psát:

$$\mu_r = \frac{dB}{\mu_0 \cdot dH} \quad (3.1)$$

Křivka μ_r je také zobrazena na obrázku (Obr. 3.1) a jak lze vidět je to derivační křivka vůči té magnetizační. Relativní permeabilita dosahuje maxima v kolenu křivky. Intenzita magnetického pole, ve které nabývá μ_r maxima, se označuje jako kritická hodnota $H_{krit.}$. Při indukčním ohřevu kovů je H na povrchu vsázky obvykle mnohem větší než $H_{krit.}$, tím dochází k magnetickému přesycování vsázky.

Intenzita magnetického pole H závisí na čase t , protože induktor napájíme střídavým proudem a na vzdálenosti od povrchu vsázky x . Intenzita magnetického pole H , stejně jako

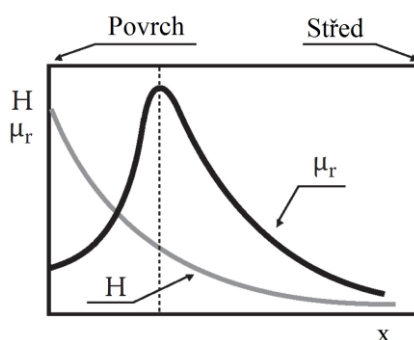
proud I , má maximum na povrchu vsázky a klesá směrem k ose exponenciálně. Je to způsobeno vlivem naindukovaných proudů ve vsázce, které působí proti primární intenzitě H . Platí tedy:

$$H = F_1(t; x). \quad (3.2)$$

Závislost magnetické indukce B na H je daná magnetizační křivkou, platí tedy $B=f(H)$. Dosadíme-li do rovnice (3.1) dostáváme:

$$\mu_r = \frac{1}{\mu_0} \frac{d\{f[F_1(t; x)]\}}{d\{F_1(t; x)\}}. \quad (3.3)$$

Z toho vyplývá, že relativní permeabilita μ_r je obecně rovněž závislá na souřadnici x a času t . Relativní permeabilita je tak v každém okamžiku a hloubce rozdílná (Obr. 3.2). H na povrchu vsázky, za předpokladu použití dostatečně dlouhého induktoru, se může považovat jako intenzita magnetického pole ve vzduchové mezeře mezi induktorem a vsázkou.



Obr. 3.2 Rozložení H a μ_r uvnitř homogenní válcové vsázky z uhlíkové oceli [2]

Řešení Maxwellových rovnic s takto závislým parametrem μ_r by bylo velmi složité. Ve většině případů indukčního ohřevu lze uskutečnit určité zjednodušující předpoklady:

1. Intenzita H se mění sinusově v závislosti na čase

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_m \sin \omega t. \quad (3.4)$$

2. Relativní permeabilita není závislá na čase a je rovna určité střední hodnotě $\mu_{stř}$.

[2] [3]

3.1 Odvození střední hodnoty relativní permeability

Před uvedením samotného postupu odvození střední permeability $\mu_{stř}$ je dobré si uvědomit, že tuto hodnotu není zapotřebí určovat vždy. Určuje se jen pro případy, kdy se magnetická látka prohřívá do teploty pod Curieovým bodem (ocel $T_c \approx 770$ °C). Tak je tomu například u žhání ocelových svarů, které probíhá při teplotě okolo 600 °C. Naopak není nutné určovat $\mu_{stř}$ ve výpočtech u indukčních prohřívacích zařízení, kde se teplota pohybuje okolo 1000 °C a u tavicích pecí, kde se předpokládá ocel již roztavená (okolo 1500 °C). V obou případech se uvažuje $\mu_r = 1$. Samozřejmě se také neurčuje pro vsázky nemagnetické.

V předešlé kapitole byla uvedena závislost μ_r na H bez specifických hodnot. Tabulka 3.1 uvádí pro představu hodnoty této závislosti pro určitý typ oceli.

Tabulka 3.1 Závislost μ_r na intenzitě magnetického pole pro určitý typ konstrukční oceli [4]

H (A/cm)	μ_r (-)	H (A/cm)	μ_r (-)	H (A/cm)	μ_r (-)
2,2	1000	400	46	1400	13,9
6,3	760	480	39	1600	12,3
18	440	600	31	1800	11
36	225	680	27,5	2000	10
50	160	800	23,5	2200	9,2
70	125	900	21	2400	8,5
100	85	1000	19	2600	7,95
200	65	1200	16		

Postup odvození střední poměrné permeability je následující. Za předpokladu, že hloubka vniku δ je o dost menší než poloměr r_2 vsázky, tak válcové elektromagnetické vlnění můžeme nahradit vlněním rovinným. Vsázku si rozdělíme na sousedé jednotlivé řezy s tloušťkami Δr_1 , Δr_2 , atd. (Obr. 3.3).

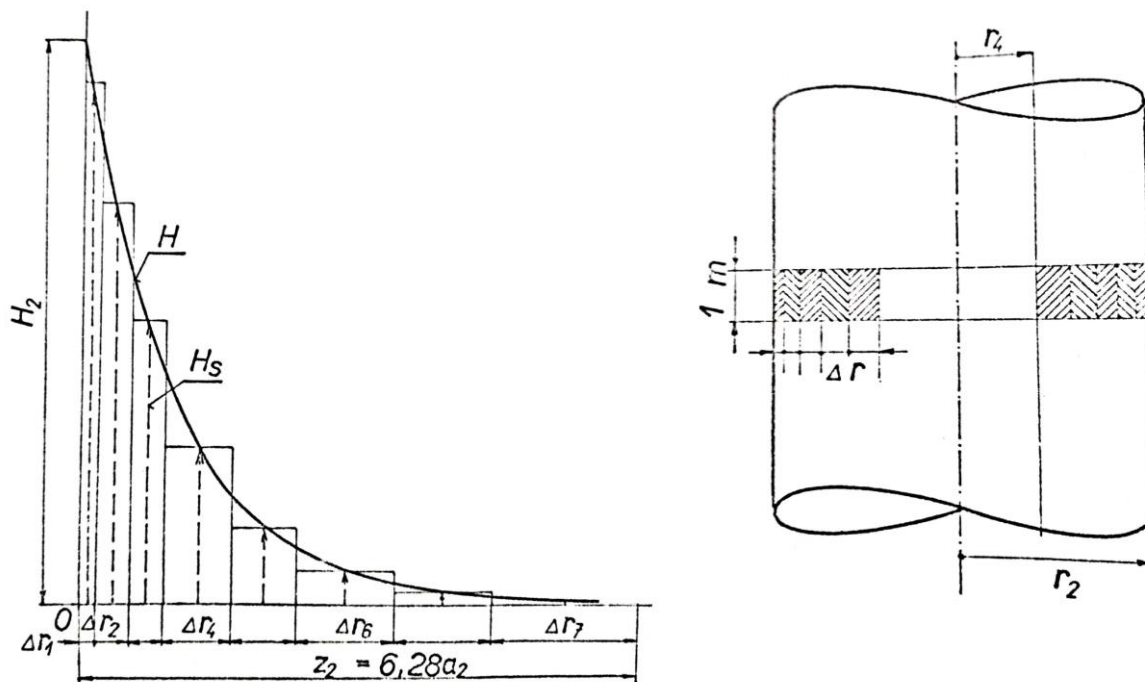
Pro intenzitu magnetického pole H uvnitř vsázky ve vzdálenosti x od povrchu platí:

$$H = H_2 \cdot e^{-\frac{x}{\delta}}, \quad (3.5)$$

kde x je vzdálenost od povrchu, H_2 je intenzita na povrchu a δ hloubka vniku.

Dále si zvolíme hodnotu permeability μ_v , která by měla být stejná jako ta, kterou chceme zjistit $\mu_{stř}$. Jestli jsme zvolili správnou hodnotu μ_v , zjistíme až v dalších krocích. Pokud jsme zvolili špatnou hodnotu, budeme celý postup opakovat pro jinou hodnotu μ_v .

Pro námi zvolenou permeabilitu vypočítáme podle rovnice (1.2) hloubku vniku, kterou dosadíme do rovnice (3.5) a získáme tak intenzitu H pro rostoucí vzdálenost x . Za předpokladu, že ve vzdálenosti $x_2 \approx 6 \cdot \delta$ dojde k téměř úplnému utlumení elektromagnetického vlnění, bude nás zajímat pouze tato vzdálenost z_2 od povrchu ($z_2 = r_2 - r_4$). (Obr. 3.3 vpravo)



Obr. 3.3 Rozdělení vsázky na jednotlivé vrstvy Δr [4]

Jednotlivé tloušťky vrstev volíme různé s ohledem na strmost poklesu H . Blíže k povrchu volíme tloušťku tenčí (Δr_1) a další vrstvy budou vždy o něco silnější $\Delta r_2, \Delta r_3$, atd.

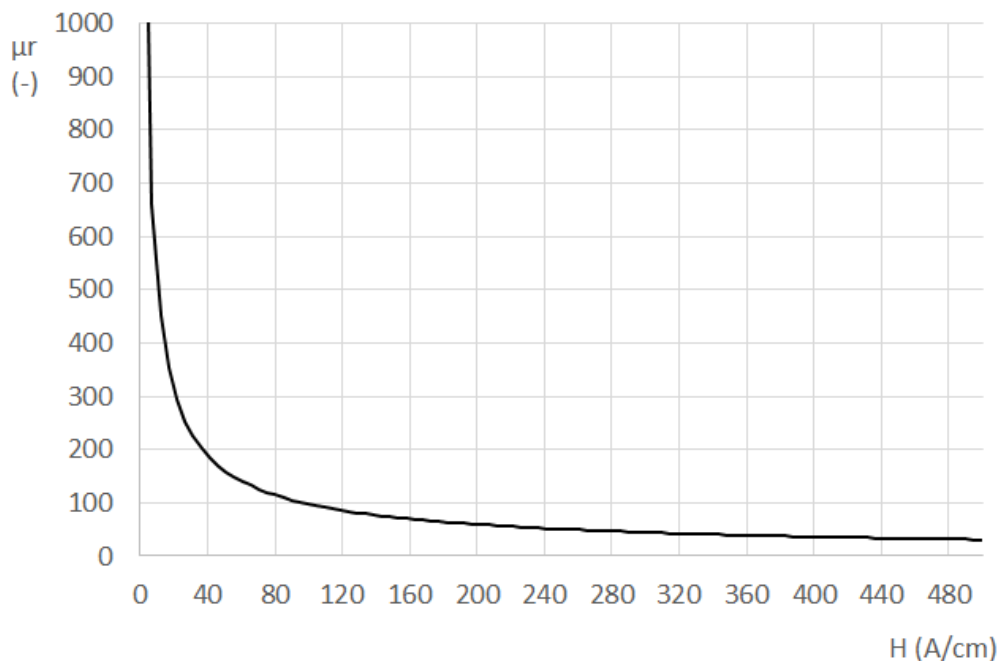
Dalším krokem je určení magnetické energie nahromaděné v uvažované vsázce pro délku 1 m.

$$W_m = \frac{1}{2} \mu_0 \int_0^V \mu \cdot H^2 \cdot dV = \frac{1}{2} \mu_0 \int_0^V \mu \cdot H^2 \cdot 2\pi r l \cdot dr \quad (3.6)$$

Protože neznáme vztah mezi μ a H , tak tento integrál nahradíme sumací, kde pro každou vrstvu Δr určíme magnetickou energii. Po sumaci tak dostaneme výslednou magnetickou energii v uvažované vsázce.

$$W_{m1} = \frac{1}{2} \mu_0 \sum_{r_2}^{r_4} \mu_s \cdot H_s^2 \cdot 2\pi r_s l \cdot \Delta r \quad (3.7)$$

Za hodnoty permeability a intenzity magnetického pole dosadíme střední hodnoty μ_s a H_s (Obr. 3.3 vlevo) určené pro každou vrstvu. H_s určíme z rovnice (3.5), kde H_2 je daná z parametrů induktoru ($H_2 = N_{11} \cdot I_1$). Střední permeabilitu μ_s určíme z grafu (Obr. 3.4) pro příslušnou vypočtenou hodnotu H_s .



Obr. 3.4 Graf závislosti μ_r na H podle tabulky 3.1 [4]

V dalším kroku určíme stejným způsobem magnetickou energii, ale za permeabilitu dosadíme již permeabilitu $\mu_{stř}$, která by měla být ve všech vrstvách stejná.

$$W_{m2} = \frac{1}{2} \mu_0 \mu_{stř} \sum_{r_2}^{r_4} H_s^2 \cdot 2\pi r_s l \cdot \Delta r \quad (3.8)$$

Pro určení $\mu_{stř}$ vyjdeme z rovnosti energií $W_{m1} = W_{m2}$, kde po vykrácení a vytknutí střední permeability dostaneme

$$\mu_{stř} = \frac{\sum_{r_2}^{r_4} \mu_s \cdot H_s^2 \cdot \Delta r}{\sum_{r_2}^{r_4} H_s^2 \cdot r_s \cdot \Delta r} \quad (3.9)$$

Takto vyjádřená střední relativní hodnota permeability $\mu_{stř}$ by měla být shodná s permeabilitou μ_v zvolenou na začátku postupu odvozování. Za tohoto předpokladu jsme zvolili správně a nemusíme postup opakovat.

[4]

3.2 Relativní permeabilita ve výpočtech - shrnutí

Vlivem skokové změny relativní permeability při překročení Curieova bodu může stejně jako při nízké zvolené frekvenci nastat elektromagnetická průžařnost materiálu. Tento jev je nežádoucí, proto je nutné tuto změnu při výpočtech respektovat.

Relativní permeabilita je pro feromagnetické látky závislá na teplotě, intenzitě magnetického pole a struktuře materiálu, jak bylo uvedeno v předešlých kapitolách. Je proto velmi obtížné tuto veličinu správně definovat ve výpočtech. Při zjednodušených analytických výpočtech se ve většině případů uvažuje ocel již rozžhavená a nemagnetická ($\mu_r=1$). Tak je tomu například u prohřívacích zařízení, tavicích pecí na ocel, atd. Tímto se výpočty velmi zjednoduší. V případě ohřevů do Curieovy teploty (např. při žíhání) se při analytických výpočtech určuje střední hodnota relativní permeability. Její postup odvození byl uveden v předešlé kapitole.

U počítačových simulací, které využívají numerického výpočtu, také není lehké definovat relativní permeabilitu. Aby počítačové simulace co nejvíce odpovídali skutečnosti, musí se respektovat materiálové změny (ρ , μ_r), které nastávají se změnou teploty. Do výpočtů se pak v ideálním případě zadávají skutečné charakteristiky materiálů. Zjistit pro každý materiál danou charakteristiku je velmi nákladné. Proto se postupuje tak, že se zadá do výpočtu určitý odhad. Pak závisí především na zkušenostech dané osoby, která musí zvolit vhodný model a eliminovat tak numerickou chybu.

[2] [4] [10]

4 Využití indukčního ohřevu

Indukční ohřev se využívá v průmyslu především pro tavení, tváření za tepla (kování, válcování,...), tepelné zpracování (kalení, žíhání,...), svařování, pájení, atd.

4.1 Indukční prohřívací zařízení pro tváření za tepla

Tato zařízení se používají pro různé způsoby tvarování kovů za tepla jako je kování, válcování, tažení, apod., kde se požaduje prohřátí materiálu v celém jeho objemu. U objemnějších materiálů se teplo šíří do středu materiálu vedením. Pro tyto účely je důležité, aby materiál byl rovnoměrně prohřátý. Pro účely kování se u ocelí musí materiál zahřát až na teplotu okolo 1200 °C a rozdíl teplot mezi povrchem a středem ohřívaného materiálu by neměl být větší než 100 °C až 150 °C.

Indukční ohřev je pro tyto účely velmi výhodný, neboť se teplo generuje přímo v ohřívaném materiálu a nevstupuje do něj jeho povrchem, jako je tomu u pecí palivových a odporových. Tím dosahuje indukční ohřev menších povrchových ztrát a ohřev trvá kratší dobu. Např. u palivové pece trvá prohřátí ocelového vývalku o průměru 10 cm na teplotu 1200 °C až 90 minut. Za tuto dobu ocel oxiduje a dochází tak i k znehodnocení ohřívaného materiálu. U odporových pecí s nepřímým ohřevem je čas ohřátí pro stejný případ až 26 minut. Indukční prohřívací zařízení to zvládnou již do 7 minut.

Konstrukčně se indukční ohříváče přizpůsobují podle charakteru provozu pro periodický nebo průběžný režim. Periodický režim se hodí pro zakázkovou výrobu, kde se vsázka umístí do induktoru a ohřívá se elektromagnetickou indukcí po předepsanou dobu. Poté se vsázka vyjme a dopraví se ke kovacímu zařízení. Zařízení pro průběžný režim se hodí pro sériovou výrobu, kde se jednotlivé kusy vsázky ohřívají postupně. V praxi více převládají zařízení pracující v průběžném režimu.

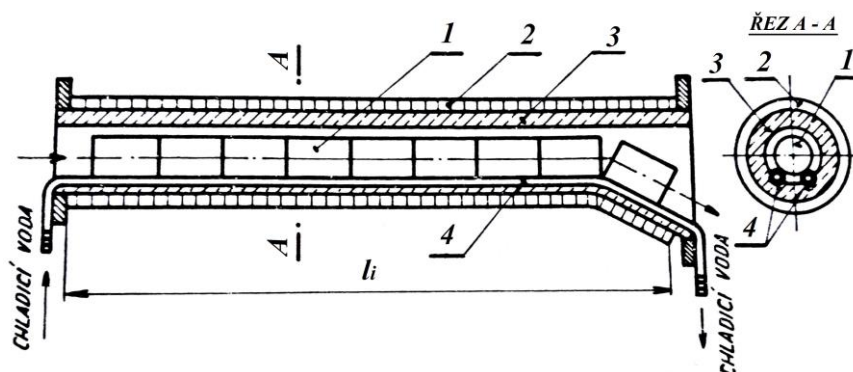
[4] [11]

4.1.1 Indukční zařízení pro ohřev přířezů

Konstrukční uspořádání je na obrázku (Obr. 4.1), kde jsou: 1- vsázka, 2- ohřívací cívka (induktor), 3- keramická vyzdívka, 4- vodičí trubky (válečky).

Induktor je tvořen několika závitů z elektrovodné mědi, které jsou od sebe odizolovány. Vodič cívky je dutý, aby jím mohla procházet chladící voda. Induktor má tvar odpovídající

tvary vsázky a bývá válcový, čtvercový, oválný, apod. K zamezení nežádoucího vlivu rozptylového magnetického pole induktoru na konstrukci ohřivacího zařízení se umísťují kolem induktoru stínění ze svazků transformátorových plechů. Stínění zvyšuje i celkovou mechanickou pevnost induktoru. **Keramická vyzdívka** jednak odděluje elektricky induktor od pohybující se vsázky a také chrání induktor před sálavým teplem vyzařovaným vsázkou.



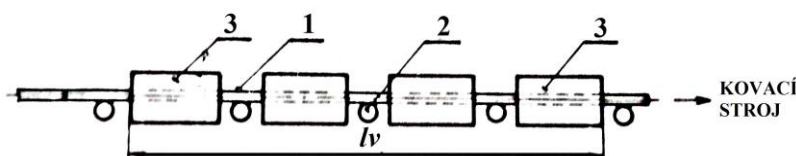
Obr. 4.1 Ohřivací zařízení pro vsázky menší délky [3]

Studené kusy jsou přiváděny z jedné strany a zasouvají se do induktoru pomocí pneumatického, hydraulického nebo jiného systému. Konec induktoru je speciálně tvarován. To přispívá k rovnoměrnosti prohřátí posledního kusu vsázky na lince, který dále pokračuje do kovacího zařízení.

[3] [11]

4.1.2 Indukční zařízení pro ohřev tyčí

Na obrázku (Obr. 4.2) je znázorněno zařízení pro ohřev dlouhých tyčí, kde 1- je ohřivaná tyč, 2- jsou motorem poháněné vodící kladky, které tyč posouvají přes induktory - 3. Toto ohřivací zařízení tvoří spolu se zásobníkem studených tyčí a kovacím strojem plně automatickou kovací linku. Používá se např. pro kování matic, ložiskových kroužků, dílů ručního nářadí, apod.



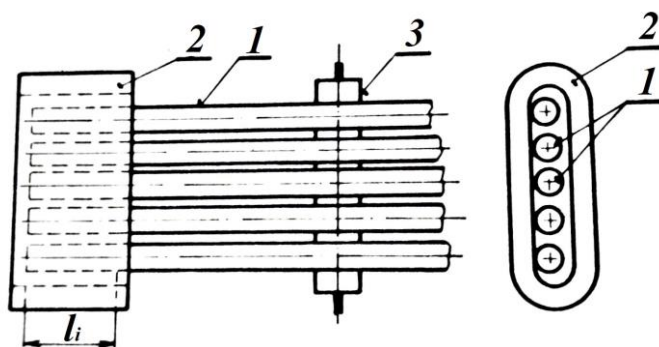
Obr. 4.2 Průběžný indukční ohřev tyčí [3]

Tato zařízení se staví pro větší výkony. Zvládnou vyrobit až 150 výkovků za minutu. Teplota je měřena optickým pyrometrem a řízena automaticky v jednotlivých induktorech.

[3] [11]

4.1.3 Indukční zařízení pro ohřev konců tyčového materiálu

Toto zařízení je na obrázku (Obr. 4.3), kde jsou: 1- ohřívané tyče, 2- oválný induktor, 3- podpěrné kladky pro tyče. Konce tyčí se zahřívají pro tvářecí účely. Studené tyče se do oválného induktoru zasouvají a zahřáté se vysouvají cyklicky.



Obr. 4.3 Zařízení pro ohřev konců tyčí [3]

Zařízení lze konstruovat také pro menší výkon, kdy se ohřívá jedna tyč a induktor má válcový tvar.

[3] [11]

4.1.3.1 Stanovení vhodné frekvence a dalších provozních parametrů

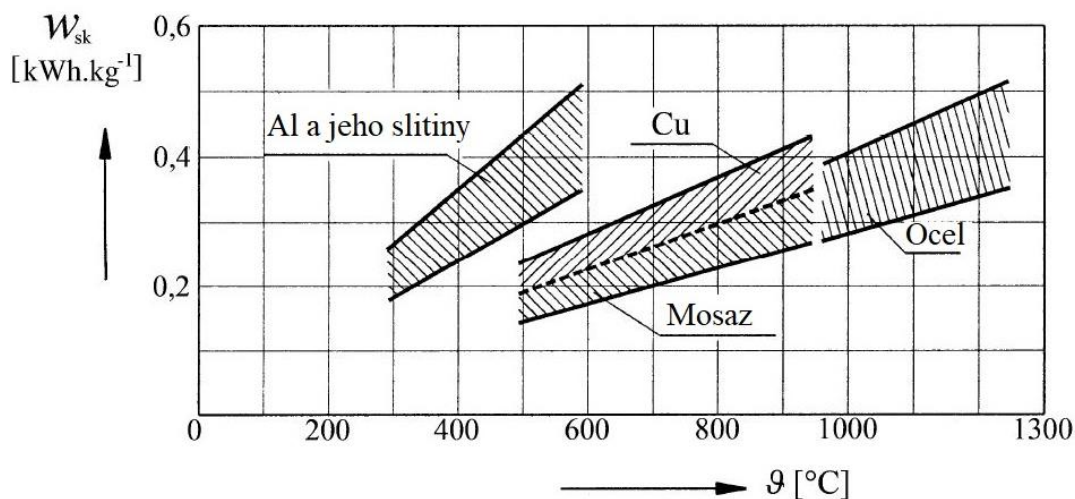
Zajištění rovnoměrnosti ohřevu je snazší u kovů s dobrou tepelnou vodivostí, jako je hliník, měď, stříbro,.... U kovů s menší tepelnou vodivostí (uhlíkové oceli, nerezové oceli, titan,...) se musí dbát na správné řízení celého procesu pro dosažení rovnoměrného prohřátí materiálu. Zvolíme-li frekvenci příliš nízkou, nastane průžažnost materiálu. Naopak při vysoké frekvenci se teplo vyvíjí pouze na povrchu a do osy se šíří vedením. Tyto případy jsou uvedeny v kapitole 1.2. Mezi těmito krajními případy se nachází interval optimálních frekvencí. Pro určení **optimální frekvence** využijeme střední hodnotu z rovnice (1.3). Když dosadíme za hloubku vniku, dostaneme:

$$r_2 = 2,75 \cdot \sqrt{\frac{2}{2\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma}} \quad (4.1)$$

A z této rovnice si vyjádříme optimální frekvenci.

$$f_{opt} = \frac{(2,75 \cdot 503,29)^2}{r_2^2 \cdot \mu_r \cdot \sigma} \quad (4.2)$$

S frekvencí je spojen další parametr a to **měrná spotřeba elektrické energie w** . Budeme-li při konstantní frekvenci snižovat průměr vsázky, látka se bude stávat více pružnou a měrná spotřeba bude stoupat. Na obrázku (Obr. 4.4) je zobrazena měrná spotřeba pro některé kovy.



Obr. 4.4 Závislost měrné spotřeby pro některé kovy na konečné teplotě [11]

Dalším důležitým parametrem je **doba ohřevu t_0** . Doba ohřátí se odvíjí především od použitého způsobu ohřevu (normální nebo zrychlený). Normální ohřev je způsob, kdy se látka ohřívá postupně na konečnou hodnotu při dodržování rozdílu teplot v ose a na povrchu vsázky. Zrychlený ohřev se sestává ze dvou fází. V první fázi se látka ohřívá s velkým měrným příkonem na požadovanou teplotu a poté se na této hodnotě udržuje se snižujícím se měrným příkonem. Ve druhé fázi dochází k přestupu tepla do osy vsázky do té doby, dokud není dosaženo požadované rovnoměrné prohřátí. Poté se ohřev ukončí. Zrychlený ohřev je až o třetinu rychlejší než normální.

Pro normální ohřev můžeme vycházet z bilanční rovnice:

$$P_2 \cdot t_0 = G \cdot c \cdot \Delta T, \quad (4.3)$$

kteřá vyjadřuje zvýšení tepelného obsahu při ohřevu z počáteční teploty na konečnou teplotu při využití výkonu P_2 za dobu t_0 .

Pro válcovou uhlíkovou ocel lze přibližnou dobu ohřevu určit z empirického vztahu:

$$t_0 = \frac{d_2}{20} \cdot (\text{min}; \text{cm}) \quad (4.4)$$

[3] [11]

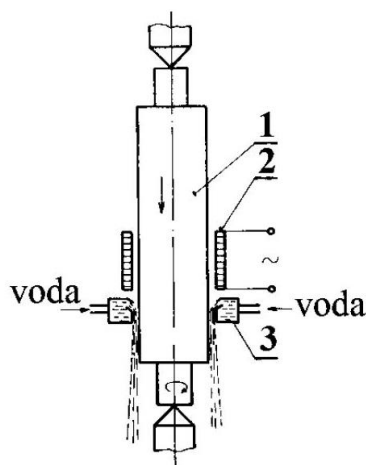
4.2 Indukční prohřívací zařízení pro tepelné zpracování

Tato zařízení se používají pro ohřev materiálů za účelem zkvalitnění jejich povrchu (zvýšení tvrdosti, pevnosti, tažnosti, apod.). Jedná se především o kalení, popouštění, žíhání, atd.

4.2.1 Indukční zařízení pro povrchové kalení

Princip povrchového indukčního kalení pro velké ocelové plechy určené pro válcovací stolice je zobrazen na obrázku (Obr. 4.5). Vsázka 1- válcového tvaru je svisle upevněna mezi hroty a otáčí se kolem své osy. Postup je takový, že se napřed válec přehřeje na určitou teplotu (obvykle na 700 °C) induktorem - 2 tak, aby se teplo rozšířilo i do osy válce. Poté se válec umístí do nejvyšší polohy a postupně se spouští a ohřívá na kalící teplotu. Zároveň za induktorem se prudce ochlazuje pomocí sprchy - 3. Bez přehřevu by vznikl velký teplotní spád a tzv. slupkový jev, kdy dojde k odlupování tvrdé vrstvy válce od měkké a válec se tak zničí. Při povrchovém kalení nedochází k deformaci součásti teplem, protože vnitřek zůstává houževnatý. Používané pracovní frekvence jsou od 50 Hz do 10 kHz. Správně zakalit velké válce o průměru 300 mm až 1 000 mm o délce až 6 m není lehká záležitost a bez větších zkušeností se řeší velmi obtížně.

[3] [11]

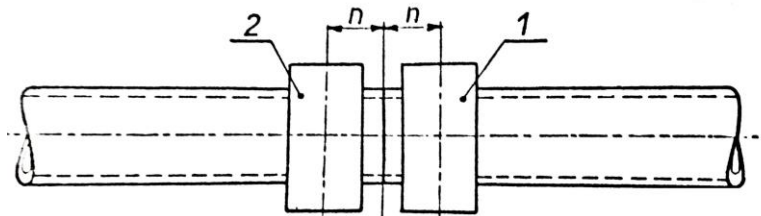


Obr. 4.5 Postupné indukční kalení pro válcové stolice [11]

4.2.2 Indukční zařízení pro žíhání

Žíhání se provádí hlavně za účelem homogenizace struktury kovů. Teplota se u tohoto procesu zvyšuje pomalu až na požadovanou hodnotu, kde se udržuje po určitý čas. A poté se opět pomalu ochlazuje, aby byl dodržen nízký teplotní gradient v kovu.

Zařízení pro žíhání svarů ocelových trub je zobrazeno na obrázku (Obr. 4.6). Pro dodržení stejné teploty v obou směrech od svaru ocelové trubky se využívají dva induktory (číslo 1 a 2). Tyto induktory jsou vhodně izolovány a umísťují se po obou stranách prováděného svaru. Vodiče tvořící induktory jsou chlazené vodou.



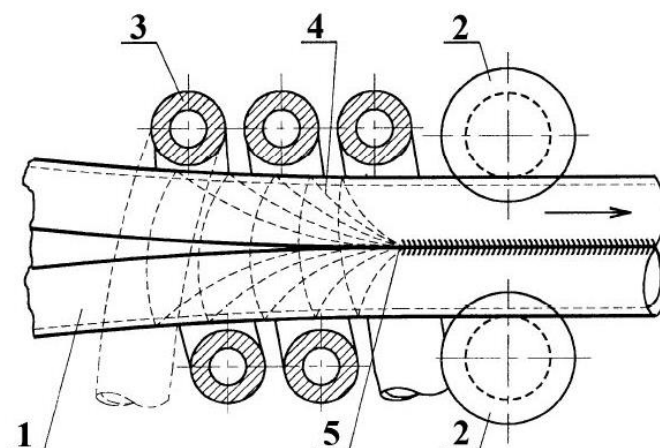
Obr. 4.6 Žíhání svarů ocelových trub [4]

[4] [11]

4.3 Indukční zařízení pro speciální použití

4.3.1 Indukční svařování trub

Princip zařízení pro svařování trub je zobrazen na obrázku (Obr. 4.7). Svařovaná roura - 1 se pomocí kladek - 2 formuje pod tlakem do konečné podoby s úzkou štěrbinou. Induktor - 3 koncentruje do jednoho bodu (bodu svařování) indukované proudy (značeny čárkovaně) a tím vzniká v místě vysoká svařovací teplota (až 1400 °C). Tato teplota zajistí změknutí materiálu a jeho následné spojení pomocí tlaku kladek.



Obr. 4.7 Indukční svařování trubek [11]

Tato zařízení pro podélné svařování dosahují výkonu až 700 kW s pracovními frekvencemi až 0,5 MHz.

[3] [11]

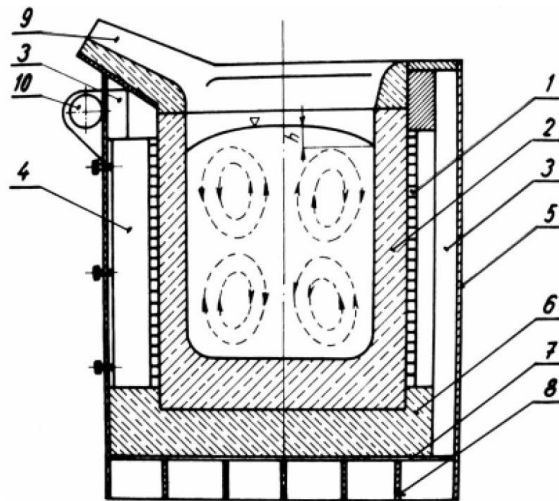
4.4 Indukční zařízení pro tavení kovů

Pro tavení kovů se používají dvě konstrukčně odlišné pece a to kelímkové a kanálkové indukční pece, které jsou popsány v následujících kapitolách.

4.4.1 Indukční kelímková pec

Jedná se o indukční zařízení bez uzavřeného jádra. V principu se jedná o vzduchový jednofázový transformátor, kde na sekundární vinutí je umístěn nevodivý kelímk, ve kterém je tavenina. Energie válcového elektromagnetického vlnění vyzářená vnitřním povrchem cívky dopadá na povrch vsázky a v ní se utlumuje. Tím se kov zahřívá a postupně se taví.

Konstrukční uspořádání kelímkové pece je na obrázku (Obr. 4.8). Sestává se z těchto částí: 1- kruhové ohřívací cívky, která je tvořena dutým měděným vodičem, kterým prochází chladicí voda, 2- keramického zadusaného kelímku, 3- svazků elektrotechnických plechů, 4- středících azbestocementových trámů, 5- ocelového pláště pece, 6- cihlové keramické vyzdívky, 7- stínícího měděného plechu, 8- mřížového dna pece, 9- hubice určená pro odlévání kovu, 10- osy, kolem které se otáčí pec při vyklápění.



Obr. 4.8 Indukční kelímková pec [3]

Tyto pece se používají pro tavení různých kovů a především pro výrobu vysoce kvalitních ocelí. Velké pece jsou napájeny proudy s frekvencemi 500 Hz, menší až 4kHz. Nebo se používají frekvence 50 Hz a 150 Hz. Staví se pro tavení oceli o hmotnosti 10 kg až 100 tun. Proud (tisíce ampérů) se do cívky přivádí ze zdroje obvykle pásovým vedením a ohebnými měděnými lany.

Mezi velké přednosti kelímkové pece patří silné víření taveniny (v obrázku naznačeno čárkovaně) vlivem elektrodynamických sil. V ose taveniny vzniká přetlak a naopak u stěny kelímku podtlak. To má za následek vzduť taveniny v ose kelímku. Výšku vzduť lze vypočítat podle rovnice:

$$h = K \frac{P_1}{\rho_h} \sqrt{\frac{\mu_r \sigma}{f}}. \quad (4.5)$$

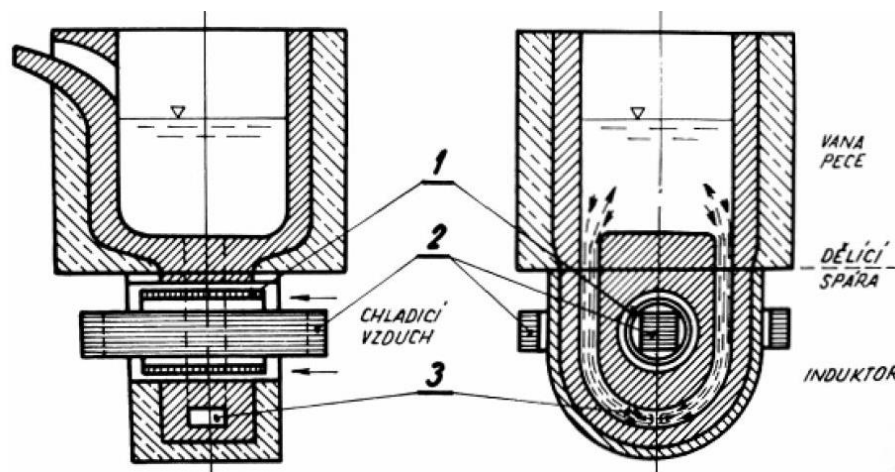
Vzduť roste, a tím zároveň také intenzita víření, s rostoucím příkonem P_1 , s měrnou elektrickou vodivostí σ a klesá s frekvencí f . Víření taveniny je velmi výhodné pro metalurgii, protože zajišťuje homogenitu kovu a to jak z hlediska složení tak i teploty.

[3] [11] [4]

4.4.2 Indukční kanálková pec

Tato pec pracuje na principu transformátoru s uzavřeným jádrem. Primární obvod je tvořen induktorem. Sekundární obvod tvoří tavená vsázka v kanálku a nístěji.

Konstrukce kelímkové pece je na obrázku (Obr. 4.9). Kde jsou: 1- vzduchem chlazený induktor. Induktor je umístěn na středním sloupku jádra -2 a je tvořen z elektrotechnických plechů. 3- je kanálek umístěn okolo induktoru a tvoří tak závit nakrátko.

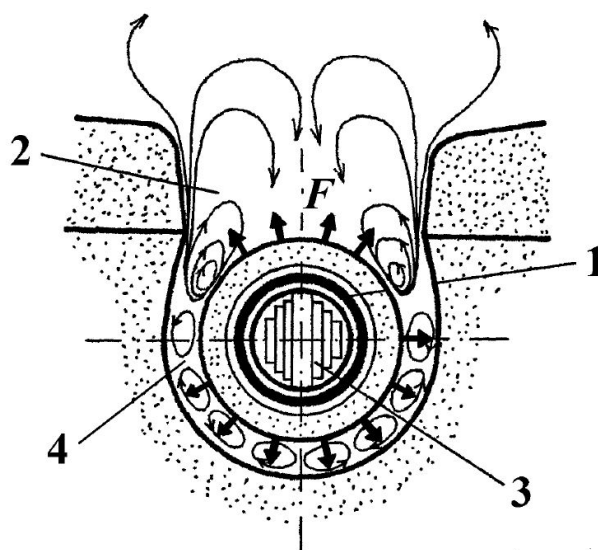


Obr. 4.9 Indukční kanálková pec [3]

Kanálkové pece se používají především pro tavení barevných kovů (měď, hliník, nikl,...) a pro výrobu šedé litiny. Tyto pece se provozují přímo při síťové frekvenci. Z důvodu uzavírání magnetického toku přes transformátorové plechy mají tyto pece lepší účinnost než kelímkové. Dochází také ke snížení magnetizačního proudu v cívce, proto postačuje chlazení cirkulací vzduchem.

Do kanálkových pecí se musí nalít při první tavbě již roztavený kov. Z tohoto důvodu se tento typ pece nehodí pro přerušovaný provoz. Při přerušení tavby by se musela udržovat stálá teplota a tak by klesla energetická účinnost této pece, která je při běžném provozu lepší než u kelímkových pecí. Běžný provoz předpokládá po každém odlití roztavené vsázky ponechání zbytku v kanálku pro vytvoření závitů nakrátko.

Elektromagnetické pole, které se vytvoří v kanálku, odpuzuje kov od stěny a ten je vytlačován k ose kanálku. Vlivem hydrostatického tlaku dochází k natékání nového kovu ke stěnám kanálku a středem je vytlačován kov do vany – nístěje pece. Tímto se tavenina promíchává a dochází k její homogenizaci (Obr. 4.10).



Obr. 4.10 Působení sil na taveninu v kanálku
(1 - induktor, 2 - vana pece, 3 - magnetické jádro, 4 - kanál pece) [11]

[3] [4] [11]

5 Určení optimálního průběhu ohřevu pro konstrukční ocel

Hlavním úkolem této práce je určit optimální průběh pro tvářecí účely válcové vsázky o průměru 0,05 m. Vsázka je z konstrukční oceli a musí se ohřát na tvářecí teplotu 1200 °C.

Jelikož se mění vsázka od studeného stavu, kde si zachovává své magnetické vlastnosti, až do ohřátého, kde po překročení Curieova bodu se skokově změní relativní permeabilita, budu určovat optimální frekvence do T_c a nad T_c . Vlastnosti použité při výpočtu pro tyto dva stavy vsázky jsou uvedeny v tabulce (Tabulka 5.1).

Tabulka 5.1 Vlastnosti pro konstrukční ocel [12]

Teplota	Relativní permeabilita	Měrná el. vodivost
20 °C	20	$7,14 \cdot 10^6$ S/m
1000 °C	1	$1,1 \cdot 10^6$ S/m

Frekvence pro ohřátou nemagnetickou vsázku ($\mu_r=1$)

Pro zjištění optimální frekvence použijí rovnici (4.2).

$$f_{opt} = \frac{(2,75 \cdot 503,29)^2}{\mu_r \cdot r_2^2 \cdot \sigma} = \frac{(2,75 \cdot 503,29)^2}{1 \cdot 0,025^2 \cdot 1,1 \cdot 10^6} = 2,8 \text{ kHz} \quad (5.1)$$

Interval frekvencí, které by vyhovovaly pro optimální účinnost ohřevu, zjistím dosazením krajních hodnot 2,5 a 3.

$$f_{min} = \frac{(2,5 \cdot 503,29)^2}{\mu_r \cdot r_2^2 \cdot \sigma} = \frac{(2,5 \cdot 503,29)^2}{1 \cdot 0,025^2 \cdot 1,1 \cdot 10^6} = 2,3 \text{ kHz} \quad (5.2)$$

$$f_{max} = \frac{(3 \cdot 503,29)^2}{\mu_r \cdot r_2^2 \cdot \sigma} = \frac{(3 \cdot 503,29)^2}{1 \cdot 0,025^2 \cdot 1,1 \cdot 10^6} = 3,32 \text{ kHz} \quad (5.3)$$

Frekvence pro studenou magnetickou vsázku ($\mu_r=20$)

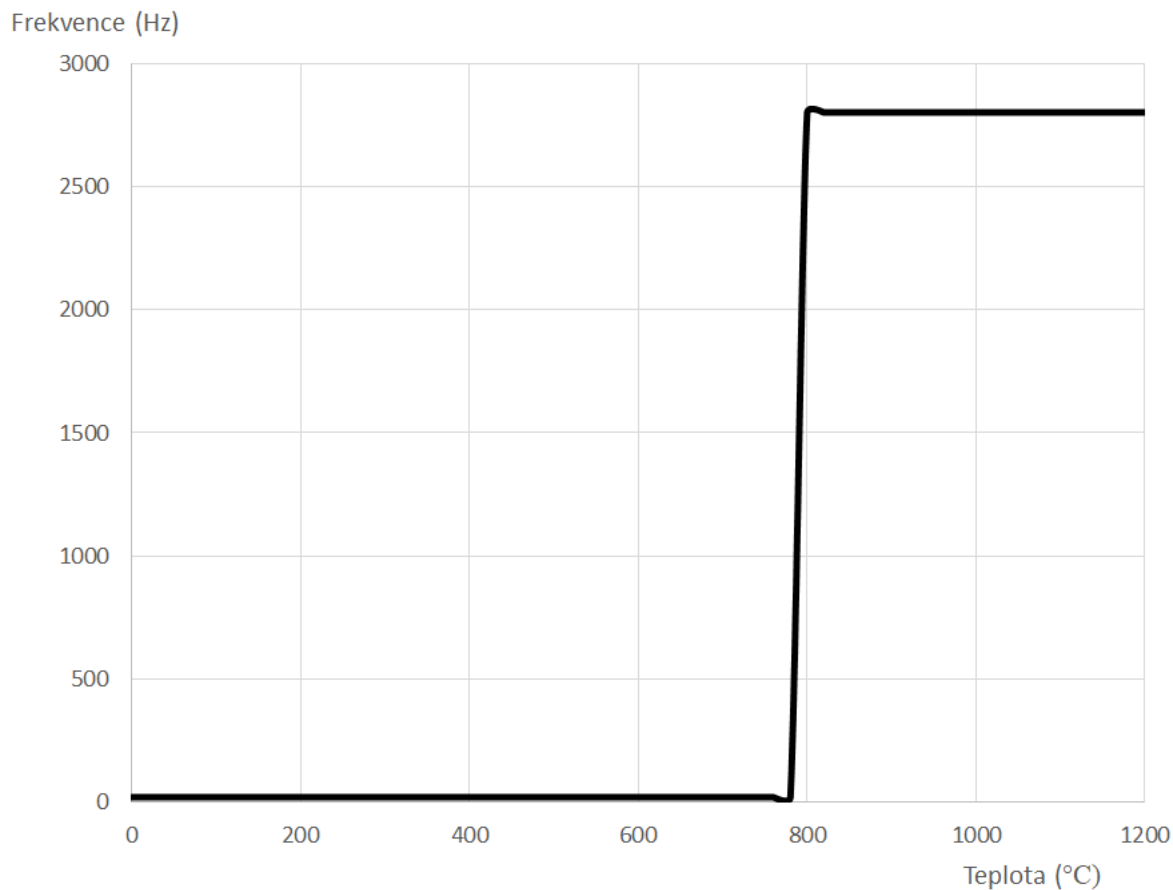
Použijí tytéž rovnice jako pro předešlý případ se změněnými parametry ($\mu_r=20$, $\sigma=7,14 \cdot 10^6$ S/m) a dostanu:

$$f_{opt} = 21,5 \text{ Hz} \quad (5.4)$$

$$f_{max} = 25,5 \text{ Hz} \quad (5.5)$$

$$f_{min} = 17,7 \text{ Hz} \quad (5.6)$$

Na obrázku (Obr. 5.1) je vynesena závislost optimální vypočtené frekvence na teplotě.



Obr. 5.1 Optimální frekvence v závislosti na teplotě

Hloubka vniku při dodržení těchto frekvencí se vypočte jako:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{2\pi f \mu \sigma}} = \sqrt{\frac{2}{2\pi \cdot 21,5 \cdot 20 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 7,14 \cdot 10^6}} = 9,08 \text{ mm} . \quad (5.7)$$

Zde pro obě optimální frekvence (21,5 Hz a 2,8 kHz), jak se očekávalo, vychází stejná hloubka vniku a to přibližně 9,1 mm.

Potřebný výkon induktoru pro ohřátí zadané vsázky

Pro tyto účely bylo nutné zvolit délku válcové ocelové vsázky, abych mohl zjistit objem a z toho hmotnost daného materiálu. Délku jsem zvolil $l = 30 \text{ cm}$ a pro měrnou hustotu oceli jsem našel v tabulkách hodnotu $\rho_h = 7850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

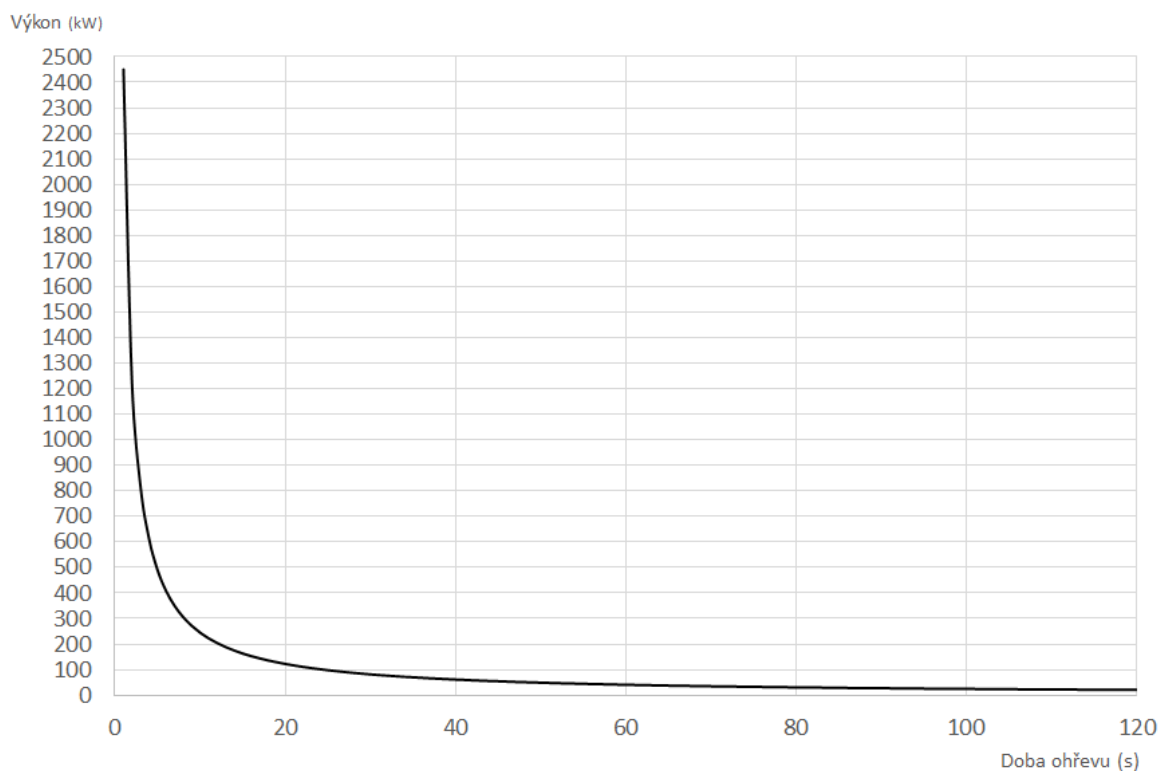
$$G = \rho_h \cdot V = \rho_h \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot l = 7850 \cdot \frac{\pi \cdot 0,05^2}{4} \cdot 0,3 = 4,62 \text{ kg} \quad (5.8)$$

Teplu, které je za potřebí k ohřátí oceli na tvářecí teplotu $1200 \text{ }^\circ\text{C}$, lze přibližně získat z rovnice (5.9). Měrná tepelná kapacita pro ocel je $c = 450 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$. Vsázku ohřívám z teploty $20 \text{ }^\circ\text{C}$ na tvářecí teplotu $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ za 25 sekund.

$$Q = G \cdot c \cdot \Delta T = 4,62 \cdot 450 \cdot (1200 - 20) = 2,45 \text{ MJ} \quad (5.9)$$

A z těchto údajů dopočítám potřebný výkon pro ohřátí zadané válcové vsázky.

$$P = \frac{Q}{t_0} = \frac{2,45 \cdot 10^6}{25} = 98 \text{ kW} \quad (5.10)$$



Obr. 5.2 Závilost požadovaného výkonu na době ohřevu

Diskuze výsledků:

Pro ohřívání ze začátku tj. za studeného stavu jsem vypočetl optimální frekvenci 21,5 Hz. Po překročení Curieova bodu by se tato frekvence měla zvýšit na 2,8 kHz. Rozsah frekvencí můžeme volit v rozmezí pro vsázku ohřivanou do T_c <17,7 Hz; 25,5 Hz> nad T_c <2,3 kHz; 3,32 kHz>. Touto změnou frekvence se dosáhne optimálního prohřátí vsázky. Hloubka vniku za dodržení těchto frekvencí je přibližně 9,1 mm.

Pro tento případ by bylo výhodnější, aby se začínala vsázka ohřívat při frekvenci 50 Hz. Byla by sice dosažena horší účinnost ze začátku, ale vlivem zvyšování měrné elektrické resistivity by se postupně zlepšovala. Až po překročení T_c by se zvolila frekvence v intervalu <2,3 kHz; 3,32 kHz>. Při 50 Hz vychází hloubka vniku pro teplotu 20 °C necelých 6 mm.

Výkon potřebný pro ohřátí vsázky o zvolené délce 30 cm je závislý na požadované době, za kterou bychom chtěli vsázku ohřát. Pro mnou zvolený čas 25 sekund bych potřeboval induktor o výkonu nejméně 98kW. Při zvyšování požadované doby ohřevu by potřebný výkon samozřejmě klesal, jak zobrazuje obrázek (Obr. 5.2).

Závěr

Cílem této práce bylo popsat vliv relativní permeability na proces ohřevu elektromagnetickou indukcí. Největší změny této veličiny nastávají po překročení tzv. Curieovy teploty, kdy látka ztrácí své magnetické vlastnosti a relativní permeabilita tak klesne až několikanásobně na hodnotu rovné jedné. Tím dojde ke zvýšení hloubky vniku naindukovaných proudů. Je-li hloubka vniku příliš vysoká v porovnání s poloměrem ohřívané válcové vsázky, může nastat nežádoucí jev nazývaný elektromagnetická průžařnost. V tomto případě se jen malá část elektromagnetické energie přemění na teplo a dochází tak k neefektivnímu ohřívání. Naopak při malé hloubce vniku může docházet k přehřívání povrchu materiálu. Omezení těchto nežádoucích efektů lze provést volbou vhodné frekvence. U válcové vsázky se pak frekvence volí tak, aby hloubka vniku byla 2,5 až 3 krát menší než poloměr vsázky.

Kromě teploty závisí relativní permeabilita také na intenzitě magnetického pole a struktuře ohříváního materiálu. Je proto velmi obtížné tuto veličinu správně určit, protože v každé vzdálenosti od povrchu nabývá různé hodnoty. V případě ohřevů na teploty do Curieovy bodu se při analytických výpočtech určuje hodnota střední relativní permeability. Její postup odvození pomocí úvahy přes rovnost energie jsem uvedl v kapitole třetí.

Ve čtvrté kapitole uvádím nejpoužívanější průmyslová zařízení pro indukční ohřev za účelem tváření, zkvalitnění vlastností materiálu, tavení a jiných speciálních případů.

V poslední kapitole jsem výpočtem určil optimální frekvence pro válcovou ocelovou vsázku o průměru 0,05 m za účelem tváření za tepla, kdy se ocel ohřívá až na teplotu 1200 °C. Ocel se při překročení teploty 760 °C stává nemagnetickou a její relativní permeabilita klesne na hodnotu jedna. Z toho důvodu jsem pro optimální průběh ohřevu počítal frekvence pro oba případy a určil tak frekvence do a nad Curieovým bodem. Hodnota frekvence vyšla za teploty 20 °C 21,5 Hz. Při překročení Curieova bodu by se frekvence měla zvýšit ideálně na 2,3 kHz. Při dodržení změny frekvence po překročení Curieova bodu se zajistí rovnoměrné prohřátí vsázky v celém jejím průřezu a stejné rychlosti jejího ohřevu.

Změna relativní permeability při použití zdroje o stálé frekvenci způsobuje prodloužení doby ohřevu. Pro snížení doby ohřevu je proto výhodné respektovat tuto změnu a zajistit změnu frekvence zdroje při překročení Curieova bodu.

6 Bibliografie

- [1] I. L. V. K. Zdeněk Hradílek, Elektrotepelná technika, Praha: ČVUT, 2011.
- [2] V. Rudney, D. Loveless and R. Cook, Handbook of Induction Heating, Boca Raton: CRC Press, 2017.
- [3] J. Rada a kolektiv, Elektrotepelná technika, Praha: SNTL, 1985.
- [4] E. Langer a J. Kožený, Elektrotepelná zařízení indukční, Plzeň: Fakulta elektrotechnická, 1982.
- [5] E. Kučerová, Elektrotechnické materiály, Plzeň: ZČU, 2002.
- [6] O. Benda, FEROMAGNETIZMUS, Bratislava: Slovenské vydavateľ'stvo technickej literatúry, 1963.
- [7] J. Dubský a Z. Kraus, Elektrotechnické materiály: Vodiče a magnetické materiály, Plzeň: Státní nakladatelství technické literatury Praha, 1965.
- [8] D. Mayer, Aplikovaný elektromagnetismus, České Budějovice: KOPP, 2012.
- [9] D. Halliday, R. Resnick a J. Walker, Fyzika 2, Brno: VUTIUM, 2013.
- [10] „www.roboterm.cz,“ [Online]. Available: <https://www.roboterm.cz/home/numericke-simulace-indukcniho-ohrevu>. [Přístup získán 5 Březen 2019].
- [11] P. Novák, Elektrické teplo: Základy teórie elektrických ohrevov a aplikácie, Košice: Equilibria, s.r.o., 2010.
- [12] E. Langer, Teorie indukčního a dielektrického tepla, Praha: ACADEMIA, 1979.

Seznam obrázků a tabulek

OBR. 1.1 PRINCIP INDUKČNÍHO OHŘEVU [1]	11
OBR. 1.2 ZÁVISLOST HLOUBKY VNIKU NA FREKVENCI [1].....	12
OBR. 1.3 ELEKTRICKÁ ÚČINNOST INDUKČNÍHO OHŘEVU V ZÁVISLOSTI NA POMĚRU D/Δ [1].....	13
OBR. 1.4 ZNÁZORNĚNÍ PRŮBĚHU AMPLITUDY PROUDOVÉ HUSTOTY PRO NÍZKOU A VYSOKOU HODNOTU ZVOLENÉ FREKVENCE [4]	14
OBR. 1.5 PRŮBĚH AMPLITUD HUSTOTY PROUDU PRO OPTIMÁLNÍ PROHŘÁTÍ VSÁZKY [4].....	14
OBR. 2.1 KRYSALICKÁ MŘÍŽKA ŽELEZA – VLEVO α -ŽELEZO, VPRAVO γ -ŽELEZO [3]	16
OBR. 2.2 KŘIVKY OTEPLOVÁNÍ A OCHLAZOVÁNÍ ŽELEZA [2]	16
OBR. 2.3 ORBITÁLNÍ A SPINOVÝ MAGNETICKÝ MOMENT ELEKTRONU [6]	17
OBR. 2.4 KŘIVKA PRVOTNÍ MAGNETIZACE PRO DIAMAGNETIKA, PARAMAGNETIKA A FEROMAGNETIKA [8]	20
OBR. 2.5 ZÁVISLOST RELATIVNÍ PERMEABILITY NA TEPLOTĚ A INTENZITĚ MAGNETICKÉHO POLE [2].....	21
OBR. 2.6 ZÁVISLOST RELATIVNÍ MAGNETICKÉ PERMEABILITY NA TEPLOTĚ PRO RŮZNÉ TECHNOLOGICKÉ PROCESY [2]	21
OBR. 2.7 PRŮBĚHY MĚRNÉ ELEKTRICKÉ REZISTIVITY OCELÍ, TITANU A WOLFRAMU V ZÁVISLOSTI NA TEPLOTĚ [2]	23
OBR. 3.1 KŘIVKA PRVOTNÍ MAGNETIZACE A ZÁVISLOST RELATIVNÍ PERMEABILITY NA.....	24
OBR. 3.2 ROZLOŽENÍ H A M_R UVNITŘ HOMOGENNÍ VÁLCOVÉ VSÁZKY Z UHLÍKOVÉ OCELI [2].....	25
OBR. 3.3 ROZDĚLENÍ VSÁZKY NA JEDNOTLIVÉ VRSTVY Δr [4]	27
OBR. 3.4 GRAF ZÁVISLOSTI M_R NA H PODLE TABULKY 3.1 [4].....	28
OBR. 4.1 OHŘIVACÍ ZAŘÍZENÍ PRO VSÁZKY MENŠÍ DÉLKY [3]	31
OBR. 4.2 PRŮBĚŽNÝ INDUKČNÍ OHŘEV TYČÍ [3]	31
OBR. 4.3 ZAŘÍZENÍ PRO OHŘEV KONCŮ TYČÍ [3].....	32
OBR. 4.4 ZÁVISLOST MĚRNÉ SPOTŘEBY PRO NĚKTERÉ KOVY NA KONEČNÉ TEPLOTĚ [11]	33
OBR. 4.5 POSTUPNÉ INDUKČNÍ KALENÍ PRO VÁLCOVÉ STOLICE [11]	34
OBR. 4.6 ŽIHÁNÍ SVARŮ OCELOVÝCH TRUB [4]	35
OBR. 4.7 INDUKČNÍ SVAŘOVÁNÍ TRUBEK [11].....	35
OBR. 4.8 INDUKČNÍ KELÍMKOVÁ PEC [3]	36
OBR. 4.9 INDUKČNÍ KANÁLKOVÁ PEC [3]	37
OBR. 4.10 PŮSOBENÍ SIL NA TAVENINU V KANÁLKU	38
OBR. 5.1 OPTIMÁLNÍ FREKVENCE V ZÁVISLOSTI NA TEPLOTĚ	40
OBR. 5.2 ZÁVILOST POŽADOVANÉHO VÝKONU NA DOBĚ OHŘEVU.....	41
TABULKA 1.1 ZÁVISLOST HLOUBKY VNIKU NA FREKVENCI A TEPLOTĚ PRO RŮZNÉ MATERIÁLY [1].....	13
TABULKA 2.1 PŘÍKLADY μ_R PRO RŮZNÉ LÁTKY PŘI POKOJOVÉ TEPLOTĚ [2]	19
TABULKA 2.2 CURIEOVA TEPLOTA PRO RŮZNÉ MATERIÁLY [2]	22
TABULKA 2.3 MĚRNÁ ELEKTRICKÁ REZISTIVITA A TEPLOTNÍ KOEFICIENT ODPORU MATERIÁLU VYBRANÝCH KOVŮ [2]	22
TABULKA 3.1 ZÁVISLOST M_R NA INTENZITĚ MAGNETICKÉHO POLE PRO URČITÝ TYP KONSTRUKČNÍ OCELI [4].	26
TABULKA 5.1 VLASTNOSTI PRO KONSTRUKČNÍ OCEL [12]	39