

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATADRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Změny fyzikálních vlastností indukčně ohříváné vsázky

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a zdrojů uvedených v seznamu, které jsou součástí této bakalářské práce.

.....
Podpis

V Plzni dne 3. června 2014

Libor Kučera

Poděkování:

Rád bych poděkoval panu prof. Jířímu Koženému za ochotu, trpělivost a čas, který mi věnoval při zpracování bakalářské práce. Jeho připomínky a poznámky mi velice pomohly k jejímu konečnému zpracování.

Anotace:

Tato práce bude obsahovat problematiku fyzikálních změn indukčně ohříváné vsázky. Bakalářskou práci rozdělím do 4 hlavních kapitol dle zadání. První kapitola bude věnována vysvětlení principu indukčního ohřevu, kde jako příklad poslouží válcová vsázka. V druhé kapitole se pokusím o vysvětlení fyzikální změny naindukovaného tepla, kde jako příklad uvedu výpočty hloubky vniku pod a nad hodnotou Curieho bodu pro ocel. Třetí kapitola popíše změnu fyzikálních vlastností u materiálů, konkrétně popíše změnu intenzity magnetického pole a relativní permeability. Poslední kapitola bude obsahovat, kde všude je možné využití indukčního ohřevu a následné celkové zhodnocení indukčního ohřevu.

Klíčová slova:

Indukční ohřev, naindukované teplo do vsázky jednotkové délky, tepelná vodivost, elektrická vodivost, frekvence, povrchové kalení, indukční lineární svařování, indukční tavící pece kanálkové, indukční tavící pece kelímkové, relativní permeabilita, intenzita magnetického pole, hloubka vniku, elektromagnetické pole

Anotation:

This work will include the issue of physical changes in induction heating charge. The Bachelor thesis is divided into four main chapters according to specification. The first chapter is devoted to an explanation of the principle of induction heating, which will serve as an example of a cylindrical charge. In the second chapter, I will try to change the physical explanation no induction heating, which have for example calculations of the penetration depth below and above the Curie point for steel. The third chapter describes changing the physical properties of materials, specifically describes the intensity of the magnetic field and relative permeability. The last chapter will contain, where all is possible using induction heating and subsequent overall evaluation of induction heating.

Key words:

Induction heating, no induced heat to the charge per unit length, thermal conductivity, electrical conductivity, frequency, surface hardening, linear induction welding, induction melting furnace conduit, induction melting furnaces Crucible, relative permeability, magnetic field penetration depth, the electromagnetic field

Obsah:

Prohlášení	2
Poděkování	3
Anotace a klíčová slova	4
Anotation and keywords	5
Obsah	6
Seznam zkratk a symbolů	7
Úvod	8
1. Ohřev elektromagnetickou indukcí	9
1.1 Princip vzniku tepla v indukčních zařízeních	9
2. Fyzikální závislost naindukovaného tepla	12
2.1 Permeabilita	13
2.1.1 Magnetické materiály	13
2.1.2 Nemagnetické materiály	14
2.2 Výpočet hloubky vniku a pro ocel a následné zhodnocení fyzikálních vlastností ..	15
2.2.1 Výpočet hloubky vniku a do Curiova bodu	15
2.2.2 Výpočet hloubky vniku a nad Curieho bod	16
2.2.3 Zhodnocení dosažených výsledků a fyzikálních vlastností	16
2.2.4 Hodnota frekvence f pro dosažení rovnosti výrazu (2.6)	17
3. Změny fyzikálních vlastností	18
3.1 Změny intenzity magnetického pole a permeability	18
3.2 Změny fyzikálních vlastností u oceli	21
4. Praktické využití indukčního ohřevu a celkové zhodnocení	22
4.1 Indukční ohřevy v normálním životě	22
4.2 Indukční pece	23
4.2.1 Indukční kelímkové pece	23
4.2.2 Indukční kanálkové pece	25
4.2.3 Indukční vysokofrekvenční pece pro tavení metodou „skull melting“	26
4.3 Indukční pájení	27
4.4 Indukční svařování	29
4.5 Zhodnocení	30
5. Závěr	32
Seznam použité literatury	34
Přílohy	35

Seznam zkratk a symbolů:

- E..... vektor intenzity elektrického pole [$V \cdot m^{-1}$]
 J..... vektor hustoty proudu [$A \cdot m^{-2}$]
 H..... vektor intenzity magnetického pole [$A \cdot m^{-1}$]
 B..... vektor magnetické indukce [T]
 P..... příkon indukčního zařízení [W]
 P₂₁..... teplo naindukované do vsázky jednotkové délky [$W \cdot m$]
 γ elektrická vodivost materiálu [$S \cdot m$]
 λ součinitel tepelné vodivosti materiálu [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]
 ρ rezistivita materiálu [$\Omega \cdot m$]
 μ_r relativní permeabilita [-]
 μ_0 permeabilita vakua [$H \cdot m^{-1}$]
 μ poměrná permeabilita [$H \cdot m^{-1}$]
 ω úhlová frekvence [$rad \cdot s^{-1}$]
 c_p měrná tepelná kapacita [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
 f..... frekvence [Hz]
 l..... délka [m]
 a..... hloubka vniku [m]
 b..... šířka mezery [m]
 T..... teplota [$^{\circ}C$]
 T_C..... Curieova teplota [$^{\circ}C$]
 I₁..... budící proud [A]
 N₁..... počet závitů primární cívky [-]
 I₂..... proud procházející vsázkou [A]
 N₂..... počet závitů sekundární cívky [-]
 R₂..... činný odpor vsázky [Ω]
 ϑ teplota [$^{\circ}C$]
 P..... výkon [W]
 t..... čas potřebný pro ohřev [s]
 m..... hmotnost materiálu [kg]
 η celková účinnost [%]

Úvod:

Indukční ohřev je velice oblíbeným typem ohřevu, který se používá pro několik technologických účelů již po dlouhou dobu. Lze jej dle použití rozdělit do několika kategorií. Nejrozsáhlejší a nejznámější využití je při výrobách ušlechtilých ocelí a při tavení barevných kovů. Dále pak pro tepelné zpracování kovů používáme indukční povrchové kalení ocelí. Samozřejmě je také třeba vyzdvihnout použití indukčního ohřev pro přípravu jídel.

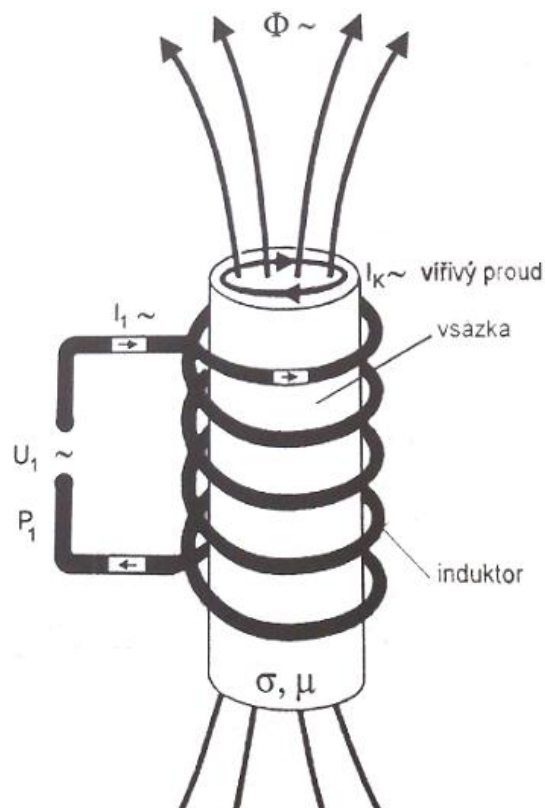
Při všech těchto aplikacích se využívá obrovské výhody indukčního ohřevu oproti ostatním ohřevům, tj. že teplo vzniká přímo v ohřívaném materiálu. Možnost ovlivnit rozložení teplotního a elektromagnetického pole v ohřívaném materiálu jsou vlastnosti, které indukční ohřev vyzdvihují nad všechny ostatní ohřevy. Tím zajistíme jak kvalitu, tak i požadované parametry.

Indukční ohřev je tedy komplexním procesem, ve kterém dochází ke vzájemnému ovlivňování teplotního a elektromagnetického pole.

1. Ohřev elektromagnetickou indukcí

1.1 Princip vzniku tepla v indukčních zařízeních

Indukční ohřev je možný pouze u vodivých materiálů. Předmět z vodivého materiálu je vložen do střídavého magnetického pole, kde dojde k indukování vířivých proudů. Vznikem těchto proudů dojde k ohřívání předmětu. Střídavé magnetické pole je důležité i z hlediska dodávání tepla do vsázky, jelikož právě toto pole dopravuje teplo do vsázky, kde následně dochází k většímu nárůstu tepla. Vsázka se tak stává nejteplejším místem celého tělesa a ostatní části mohou zůstat studené. To, že dochází ke vzniku tepla přímo v sázce, přičemž vsázka není nijak mechanicky spojena s okolním prostředím, můžeme u indukčního ohřevu označit jako jeho největší výhodu.



Obr. 1 – Princip vzniku tepla v indukčních zařízeních

Na obr. 1 lze vidět, že prochází-li proud válcovým zářičem, v jeho okolí vznikne elektromagnetické vlnění rovinné. Podobná situace nastane i tehdy, protéká-li proud zářičem válcovým a podobně jako rovinného zářiče vznikne v okolí válcového zářiče

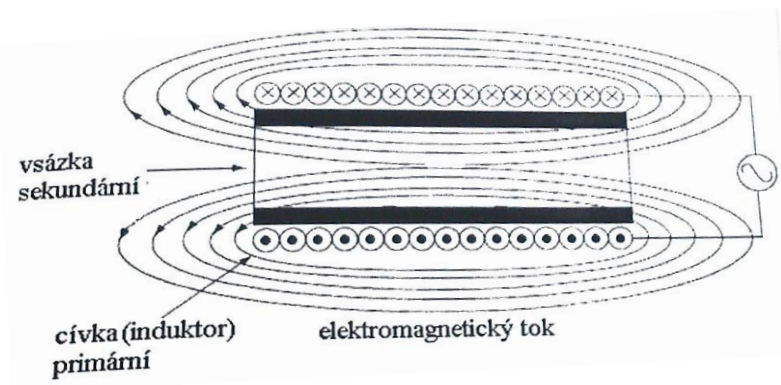
elektromagnetické válcové vlnění. Daná válcová cívka, kterou prochází střídavý proud, vyzařuje válcové elektromagnetické vlnění do své dutiny.

Indukční ohřev se dá v podstatě pochopit jako přeměnu elektromagnetického vlnění v tepelnou energii. Dopadem na vodivý materiál se elektromagnetické vlnění částečně odrazí a částečně projde do vodivého materiálu. Po průchodu do materiálu dojde k vyvolání vířivých proudů.

Vznikem vířivých proudů dojde ke zvýšení kinetické energie volných elektronů, které jsou v materiálu obsaženy. Tyto volné elektrony narážejí na další částice, jako např. molekuly, kterým začnou svou kinetickou energii předávat. Důsledkem předání energie dojde ke zvýšenému kmitání molekul, což následně vede k nárůstu termodynamické teploty daného materiálu. V elektricky vodivém prostředí, se elektromagnetické vlnění utlumuje, tudíž se energie změní nejen na energii tepelnou, ale i mechanickou. Jelikož u indukčního ohřevu uvažujeme periodické děje, mechanická energie se nám dále mění na energii tepelnou. Toto lze považovat za výhodu indukčního ohřevu, jelikož nám tepelná energie (teplo) vznikne přímo v daném materiálu, čímž docílíme menších tepelných ztrát a hlavně vyšší rychlosti ohřevu v porovnání s klasickým např. odporovým nepřímým ohřevem.

Jak plyne z předchozího odstavce, indukční ohřev je poměrně energeticky náročný a je tedy nutné zajistit, aby celý systém (induktor, vsázka a zdroj) byly optimalizovány na co největší účinnost a přesnost ohřevu. Znamená to tedy, že je třeba dohlížet na rozložení teplot v daném materiálu a na časový režim ohřevu.

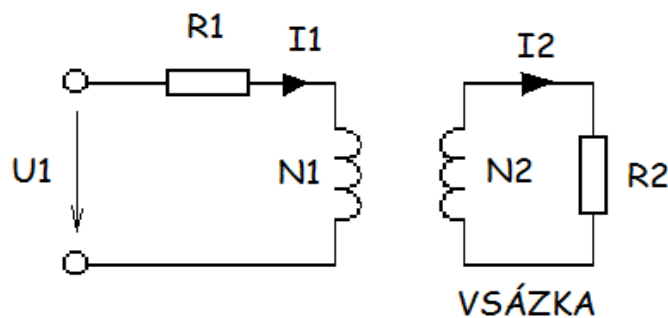
Indukční ohřev můžeme rozdělit na tři odlišné faktory. Prvním faktorem je určitě elektromagnetická indukce, dále pak přenos tepla a posledním faktorem je povrchový jev. Na obr. 2 lze také pozorovat problematiku indukčního ohřevu. Vidíme zde vsázku (v tomto případě jako cívku) a vinutí. Jak vsázkou, tak vinutím teče společný indukční tok



Obr. 2 – Směr proudění elektromagnetického toku u válcové vsázky

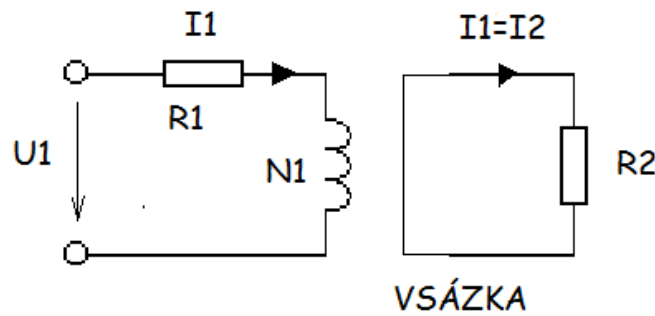
Ve výsledku můžeme říci, že indukční ohřev lze přirovnat ke vzduchovému transformátoru. Za primární vinutí lze považovat induktor, kterým protéká primární proud. Jako sekundární vinutí si lze představit vsázku (ohříváný materiál), které je spojeno nakrátko.

Na obr. 3 je možno vidět nejjednodušší zapojení transformátoru. Sekundární a primární proud jsou v přímé úměrnosti, tudíž převod transformátoru je $p = 1$. Odpor vinutí nám způsobí ztráty jak na primární, tak na sekundární straně, přičemž magnetický rozptylový tok je zanedbán.



Obr. 3 – Primitivní obvod transformátoru

Obr. 4 poukazuje na to, že je cívka sekundárního vinutí spojena nakrátko a má jeden závit. Vlivem zvýšeného proudu, který přes cívku protéká, dojde v obvodu k tepelným ztrátám



Obr. 4 – Sekundární strana transformátoru nakrátko

Na závěr můžeme napsat, že hlavním úkolem indukčního ohřevu je maximalizovat tepelnou energii, která vznikne při průchodu vysokého proudu nakrátko přes vsázku. Elektromagnetickou indukci ohříváme pouze elektricky vodivé materiály a s rostoucí elektrickou vodivostí materiálu nám dochází ke snižování účinnosti indukčního ohřevu.

2. Fyzikální závislost naindukovaného tepla

Jak již víme z předešlé kapitoly, indukčně lze prohřívát pouze materiály, které jsou elektricky vodivé. Naindukované teplo, které průchodem proudu vznikne, začne ohřívát daný materiál. Jak je známo, při zvyšující se teplotě roste měrný elektrický odpor daného materiálu a tím klesá jeho vodivost. Pro názornost jsem uvedl tabulku 2.1, která znázorňuje měrný elektrický odpor a elektrickou vodivost konstrukční oceli při postupném zahřívání do 1300°C.

ϑ [°C]	0	20	100	200	400	600	800	1000	1200	1300
$\rho \cdot 10^{-6}$ [$\Omega \cdot \text{m}$]	0,18	0,2	0,25	0,33	0,52	0,79	1,18	1,22	1,26	1,3
$\gamma \cdot 10^6$ [$\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$]	5,55	5	4	3,03	1,92	1,27	0,85	0,82	0,79	0,77

Tab. 2.1

Abychom mohli zkoumat fyzikální vlastnosti naindukovaného tepla, je třeba si nadefinovat veličiny, které v dané problematice vystupují. Jedná se o elektrickou vodivost γ , měrný elektrický odpor ρ (jak jsem již naznačil v předchozím odstavci) a v poslední řadě relativní permeabilitu μ_r . Je také nutné uvést závislosti pro různé materiály a porovnat jejich závislost na teplotě a magnetické indukci, ke kterým při indukčních ohřevech dochází a které je třeba znát, pokud chceme řešit tepelné a elektromagnetické pole.

2.1 Permeabilita

Permeabilitu lze vnímat jako fyzikální veličinu vyjadřující vliv daného materiálu na účinky magnetického pole. Značíme ji μ a udáváme v jednotkách $H \cdot m^{-1}$. Vyjadřuje ji vztah:

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (2.1) \quad [H \cdot m^{-1}]$$

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad [H \cdot m^{-1}]$$

B... magnetická indukce [T]

H... intenzita magnetického pole [A · m⁻¹]

μ_0 ... permeabilita vakua; konstantní hodnota je $4\pi \cdot 10^{-7}$ [H · m⁻¹]

μ_r ... relativní permeabilita; konstanta určující vlastnosti materiálu [-]

Permeabilita je samozřejmě pro každý materiál odlišná, respektive se jedná o to, jestli se jedná o materiál magnetický nebo nemagnetický. O rozdílných permeabilitách pro tyto dva případy materiálů budu psát v další podkapitole.

2.1.1 Magnetické materiály

Magnetické materiály nebo jinak řečeno *feromagnetika*. Jedná se o zvláštní druh materiálu, kde oblasti elementárních magnetických dipólových momentů, jinak řečeno domény, jsou zmagnetizovány až do stavu úplného nasycení, přičemž není potřeba působení vnějšího magnetického pole. Domény (oblasti) jsou velké přibližně $10^{-3} \div 10^{-1}$ mm³. Domény jsou od sebe odděleny tzv. Blochovou stěnou, což je vlastně přechodová vrstva mezi feromagnetickými sousedními doménami.

Pokud je látka (materiál) vložena do nějakého vnějšího magnetického pole, dojde k tomu, že směr magnetizace v doménách se uspořádá podle směru tohoto magnetického pole, přičemž následně dojde k nasycení této látky.

Pokud se řekne feromagnetismus, pojednává o vlastnosti celé struktury látky. Problém je ale v tom, že tyto vlastnosti se projevují jenom do bodu tzv. magnetické přeměny neboli Curieova bodu. Jakmile hodnota dosáhne Curieova bodu, nastane tzv. skoková změna relativní permeability, což znamená, že z hodnoty $\mu_r \gg 1$ se najednou dostáváme na hodnotu $\mu_r = 1$. To znamená, že se náhle z feromagnetika stává *paramagnetikum*.

2.1.2 Nemagnetické materiály

Nemagnetické materiály se ještě rozdělují na dva druhy. Jedná se o *paramagnetika* a *diamagnetika*. Paramagnetika se vyznačují tím, že jejich relativní permeabilita μ_r je o něco málo větší než jedna. Mezi tyto materiály patří např. cín nebo hliník. Co se týče diamagnetik, ty na rozdíl od paramagnetik mají hodnotu relativní permeability μ_r o něco málo menší než jedna. Sem patří materiály měď, stříbro, zinek nebo zlato.

Jak můžeme vidět, permeabilita je důležitým parametrem pro výpočty elektromagnetického pole. Magnetická permeabilita je nelineární a je za prvé závislá na velikosti magnetické indukce a za druhé na teplotě. Co se týče relativní permeability, ta je závislá na teplotě vsázky. Obecně u magnetických materiálů dosti záleží na intenzitě magnetického pole H . Jak již bylo řečeno, při dosažení teploty magnetické změny (Curieho bodu) se nám permeabilita skokově změní z $\mu_r \gg 1$ na $\mu_r = 1$. V tu chvíli má permeabilita minimální hodnotu na povrchu. Při pronikání do větší hloubky se její hodnota zvyšuje, z čehož vyplývá, že pokud je permeabilita na povrchu rovna jedné, je intenzita magnetického pole maximální a při pronikání do větší hloubky její hodnota klesá. Pro názornost jsem uvedl tabulku 2.2.

H [$A \cdot cm^{-1}$]	2,2	18	70	200	480	800	1200	1600	2200	2600
μ_r [-]	1000	440	125	65	39	23,5	16	12,3	9,2	7,95

Tab. 2.2

2.2 Výpočet hloubky vniku a pro ocel a následné zhodnocení fyzikálních vlastností

Tuto kapitolu rozdělím na dvě části plus konečné zhodnocení. První část bude řešit výpočty hloubky vniku do Curiova bodu, který se pro ocel udává v rozmezí $740^\circ C \div 760^\circ C$. Pro tento případ zvolíme hodnotu $750^\circ C$. Druhá část bude řešit výpočet hloubky vniku nad Curiovo bodem. Pro pomoc při výpočtech použijeme hodnoty z tabulky 1, nadefinujeme si hodnoty μ_{rDO} μ_{rNAD} , přičemž budeme uvažovat frekvenci $f = 50 Hz$.

- relativní permeabilita do Curiova bodu ($750^\circ C$) $\mu_{rDO} = 20$ [-]
- relativní permeabilita nad Curieho bodem $\mu_{rNAD} = 1$ [-]

2.2.1 Výpočet hloubky vniku a do Curiova bodu

Obecný vzorec pro hloubku vniku je dán vztahem:

$$a = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \gamma \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}} \quad (2.2) \quad [\text{m}]$$

ω ... úhlová rychost [rad·s⁻¹]

γ ... elektrická vodivost materiálu [S·m⁻¹]

μ_0 ... permeabilita vakua, jejíž konstantní hodnota je $4\pi \cdot 10^{-7}$ [H·m⁻¹]

μ_r ... relativní permeabilita, která určuje vlastnosti materiálu [-]

Uvážíme-li vsázku indukčně ohřívanou, tak po celou dobu ohřevu nemá stejné fyzikální vlastnosti. Abychom mohli blíže určit chování materiálu v daném teplotním intervalu, je třeba si udělat tzv. střední hodnotu. Pomocí této střední hodnoty poté můžeme určit přibližnou hodnotu elektrické vodivosti pro danou teplotu z tabulky 2.1. Teplotní interval je od 20°C až do 750°C, což je u oceli hodnota Curieova bodu. Střední hodnota tohoto intervalu je přibližně 365°C. Pro tuto teplotu odečteme z tabulky 2.1 hodnotu elektrické vodivosti, což v našem případě znamená, že:

$$\gamma_{DO} = 1,75 \cdot 10^6 \quad [\text{S} \cdot \text{m}^{-1}]$$

Jelikož máme nadefinované všechny potřebné veličiny, můžeme provést samotný výpočet hloubky vniku naindukovaných proudů do Curieova bodu:

$$a_{DO} = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \gamma \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}} = \sqrt{\frac{2}{2\pi \cdot 50 \cdot 1,75 \cdot 10^6 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 20}} = \sqrt{\frac{2}{13816,631}} = \sqrt{0,00014} = 0,0118\text{m}$$

2.2.2 Výpočet hloubky vniku a nad Curieho bod

Již známe obecný vztah pro hloubku vniku, víme, co každá veličina znamená a kde vezmeme její velikost, proto přejdeme již k samotnému výpočtu.

Opět je třeba si nadefinovat střední hodnotu z tepelného intervalu, který je v tomto případě od 750°C do 1500°C, což je hodnota tavení oceli. Střední hodnota přibližně odpovídá hodnotě 375°C. Opět odečteme z tabulky 1 hodnotu elektrické vodivosti pro tuto hodnotu, která je:

$$\gamma_{NAD} = 1,8 \cdot 10^6 \quad [\text{S} \cdot \text{m}^{-1}]$$

Jelikož máme všechny hodnoty nadeřinované, můžeme provést výpočet pro hloubku vniku nad Curieho bodem:

$$a_{NAD} = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \gamma \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}} = \sqrt{\frac{2}{2\pi \cdot 50 \cdot 1,8 \cdot 10^6 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1}} = \sqrt{\frac{2}{710,57}} = \sqrt{0,0028} = 0,0531m$$

2.2.3 Zhodnocení dosažených výsledků a fyzikálních vlastností

Dostali jsme dva výsledky pro hloubku vniku. Pokud porovnáme obě vypočtené hodnoty, dojdeme k závěru, že:

$$a_{DO} < a_{NAD} \quad (2.3)$$

To ovšem platí pouze pro konstantní teplo, které se do vsázky naindukují. Teplo, které je rozloženo na povrchu materiálu o tloušťce přibližně 3a si označíme P_{21} [$W \cdot m^{-1}$].

Pomocí výrazu (2.1) můžeme určit rozložení teploty a naindukovaného tepla.

$$g_{DO} > g_{NAD} \quad (2.4)$$

$$P_{21DO} < P_{21NAD} \quad (2.5)$$

Nyní se pozastavíme nad vztahy (2.3), (2.4) a (2.5). Požadujeme totiž, aby rychlosti ohřevu do i nad Curieho bodem byly shodné. Je tedy třeba, aby se rovnosti ze vztahu (2.3) rovnaly, tedy aby $a_{DO} = a_{NAD}$. Touto rovností dostaneme další nový vztah (2.6). Pokud se trochu pozastavíme nad vztahem (2.4), zjistíme, že teplota nad bodem přeměny roste pomaleji než pod tímto bodem.

$$a_{DO} = a_{NAD} \quad (2.6)$$

Jak jsme při výpočtech mohli vidět, relativní permeability jsou v nerovnosti:

$$\mu_{rDO} \neq \mu_{rNAD} \quad (2.7)$$

Relativní permeabilita a elektrická vodivost jsou konstanty materiálů. Jelikož je nemožné tyto konstanty regulovat, nemůžeme v průběhu indukčního ohřevu dosáhnout našich potřebných požadavků, které jsou $a_{DO} = a_{NAD}$ a $g_{DO} = g_{NAD}$.

Poslední veličinou vztahu pro hloubku vniku, kterou jsme si ještě neprobrali, je úhlová frekvence ω [$rad \cdot s^{-1}$]. Vyjadřujeme ji vztahem:

$$\omega = 2\pi \cdot f \quad (2.8)$$

f... frekvence

[Hz]

Frekvence je pro nás důležitým parametrem, jelikož díky ní můžeme měnit indukční ohřev tak, aby nám nastala rovnost ze vztahu (2.6) $a_{DO} = a_{NAD}$.

Jak je uvedeno ve vztahu (2.7), hodnoty relativních permeabilit se liší. Pokud hloubka vniku vzroste nad hodnotu Curieho bodu, relativní permeabilita se samovolně sníží na 1. Materiál, v našem případě ocel, se v tomto případě stane nemagnetickým materiálem. Právě díky frekvenci, jak jsem demonstroval v minulém odstavci, je možné tuto změnu skokem vykompenzovat. Pokud tedy klesne permeabilita (ve vzorci pro hloubku vniku), je třeba následně tuto změnu vyrovnat a k tomu nám poslouží právě frekvence f .

2.2.4 Hodnota frekvence f pro dosažení rovnosti výrazu (2.6) $\rightarrow a_{DO} = a_{NAD}$

Abychom zjistili, jakou hodnotu frekvence máme zvolit, je třeba dosadit do vztahu (2.6) za obě proměnné.

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

$$\sqrt{\frac{2}{2\pi \cdot 50 \cdot 1,75 \cdot 10^6 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 20}} = \sqrt{\frac{2}{2\pi \cdot f_{NAD} \cdot 1,8 \cdot 10^6 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1}}$$

$$\sqrt{\frac{2}{13816,631}} = \sqrt{\frac{2}{14,211 \cdot f_{NAD}}} \quad (2.9)$$

Jak je možno vidět, neznámou frekvenci f_{NAD} nám tvoří součin dvou veličin. Jedná se o frekvenci do Curieho bodu $f_{DO} = 50\text{Hz}$ a relativní permeability $\mu_{rDO} = 20$. Výsledná frekvence tedy bude mít hodnotu:

$$f_{NAD} = 1000 \text{ Hz}$$

Z tohoto tedy plyne, že pokud teplota vzroste nad hodnotu Curieho bodu, je nutno zvýšit frekvenci na hodnotu 1000Hz. Pokud tak uděláme, je splněn náš požadavek a dochází k rovnosti hloubek vniku $a_{DO} = a_{NAD}$. Jak již tedy víme, indukční ohřev je možné řídit

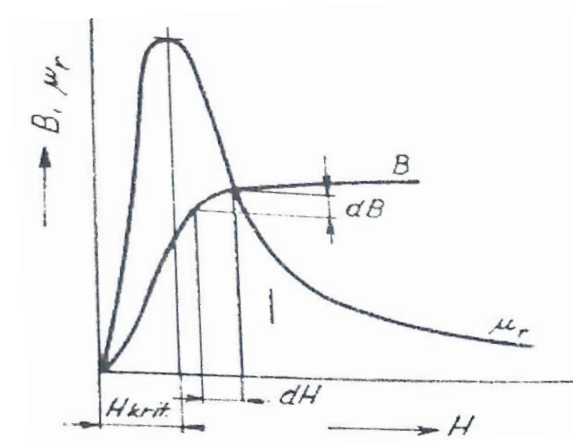
správnou volbou frekvence. Také ovšem záleží, jestli chceme daný materiál ohřívat pouze na povrchu, čemuž je odborně říká kalení, nebo jej chceme prohřát v celém průřezu.

U volby frekvence může samozřejmě dojít k problému. Pokud zvolíme špatnou frekvenci, může se stát, že daný materiál se stane pro určité elektromagnetické vlnění průzařný. V tomto případě by mohlo dojít k tomu, že vlnění projde materiálem, ale jeho teplo se přemění pouze z části.

3. Změny fyzikálních veličin

3.1 Změna intenzity magnetického pole a permeability

Minulá podkapitola víceméně popisovala fyzikální vlastnosti pro materiály, kde relativní permeabilita $\mu_r = 1$. To ovšem platí pouze pro materiály nemagnetické a obecně tato podmínky platí i pro teplotu oceli, jejíž hodnota se pohybuje nad Curieho bodem. Pokud ovšem uvážíme teplotu oceli menší než Curieho bod, tedy méně než 750°C , je třeba si uvědomit, že magnetická indukce B již lineárně nezávisí na intenzitě magnetického pole H , tzn. $B \neq \mu \cdot H$. Magnetickou indukci tedy odečítáme z magnetizační křivky $\rightarrow B = f(H)$.



Obr. 5 – Závislost relativní permeability na intenzitě magnetického pole a magnetizační křivka

Na obr. 5 můžeme vidět typický průběh magnetizační křivky. Podle křivky můžeme říci, že platí:

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

Jelikož v malém intervalu dH můžeme μ_r považovat za konstantní, upravíme předchozí vztah a dostaneme:

$$\mu_r = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{dB}{dH} \quad (3.2)$$

Ze vztahu vyplývá, že μ_r je vlastně derivační křivkou magnetizační křivky, jak je možno na obr. 5 také možno vidět.

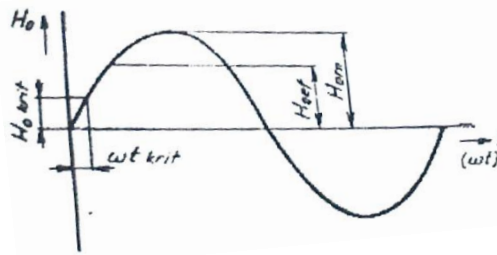
Jak již víme, při indukčních ohřevech je velice velká hodnota intenzity magnetického pole H . Může se stát, že její hodnota vzroste mnohonásobně nad hodnotu H_{KRIT} , i když je hodnota permeability maximální. Z toho plyne, že ohříváný materiál je magneticky hodně přesycován.

Obecně se při výpočtech indukčního ohřevu využívají Maxwellovy rovnice. Pokud ale uvážíme fakt, že relativní permeabilita μ_r bude v každém místě a v každé hloubce dané vsázce jiná, bylo by pro nás řešení přes Maxwellovy rovnice velice obtížné. Pokud si ale naše předpoklady zjednodušíme, je pak počítání pomocí těchto rovnic mnohem snazší. Předpoklady jsou:

1. Průběh intenzity magnetického pole H je závislý na čase, je tedy v komplexní rovině sinusový (harmonický) $\rightarrow \mathbf{H} = \mathbf{H}_m \cdot \sin\omega t \Rightarrow \mathbf{H} = \mathbf{H}_m \cdot e^{j\omega t}$
2. Relativní permeabilita μ_r není závislá na čase jako intenzita magnetického pole, rovná se tedy nějaké střední hodnotě

První předpoklad se v praxi splní celkem snadno. K cívce, která daný materiál ohřívá, jsou připojeny kondenzátory tvořící s cívkou rezonanční obvod, který je přibližně přizpůsobený (naladěný) na napájecí frekvenci. Jelikož tyto dva prvky (cívka a kondenzátor) tvoří přirozený filtr, připouští pouze sinusový (harmonický) průběh.

Druhý předpoklad se již nesplní tak přesně jako první. Pokud ale pro praxi použijeme např. ocel, jejíž obsah uhlíku bude 0,2% ÷ 1% při hodnotě maximální intenzity magnetického pole $H_{0M} = 5000 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$, lze docílit toho, že relativní permeabilita nebude závislá na čase.



Obr. 6 – Sinusový průběh intenzity magnetického pole

Z obr. 6 vidíme harmonický průběh intenzity magnetického pole H_0 v závislosti na čase. Jak již víme z této kapitoly, dosáhne-li intenzita magnetického pole hodnoty H_{0KRIT} , dojde k velkému nasycení materiálu (vsázky), přičemž relativní permeabilita bude značně velká. Postupným přecházením za hodnotu H_{0KRIT} dojde k poklesu relativní permeability. Jelikož se za touto hodnotou relativní permeabilita příliš nemění, lze nadefinovat předpoklad, že pro příslušnou hodnotu H_{0EF} máme danou hodnotu střední permeability $\mu_{STŘ}$ a splníme tak druhý předpoklad.

Z povrchu vsázky do její hloubky intenzita magnetického pole H značně klesá (zhruba podle exponenciály $\rightarrow H = H_0 \cdot e^{-x/a}$, přičemž a je hloubka vniku vypočítaná pro $\mu_{STŘ}$). Poklesem magnetické intenzity roste relativní permeabilita μ_r podle magnetizační křivky do hloubky. To má velký vliv na hloubku vniku, která tímto klesne z a na a_V . Tento pokles znamená nárůst povrchového jevu, tím dojde ke zvýšení odporu vsázky z $R_{2STŘ}$ na R_{2V} a zmenší se vodivý průřez.

Jelikož platí, že pro zvýšenou hodnotu intenzity magnetického pole je průběh magnetizační křivky stejný, dospěl L. P. Nejman (ve své knize *Poverchnostnyj Ėffekt v ferromagnitnyh telach*) k závěru, že:

$$R_{2V} = n \cdot R_{2STŘ} \quad (3.3)$$

$$a_V = \frac{a_{STŘ}}{n} \quad \text{kde } n = 1,37 \quad (3.4)$$

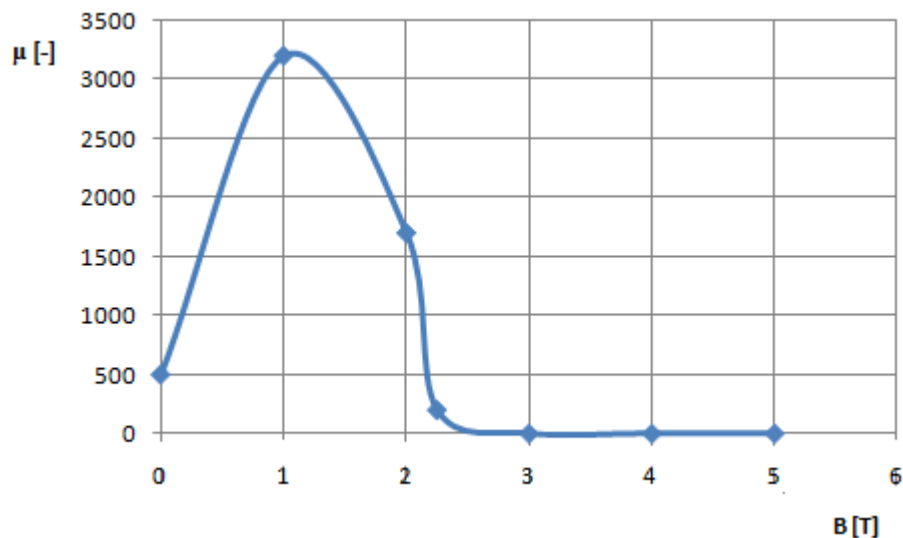
Tyto vztahy můžeme použít pouze v případě, je-li tloušťka daného materiálu, kterým se šíří elektromagnetická energie, rovna alespoň $3a_{STŘ}$. Pokud ale tloušťka $3a_{STŘ}$ bude ve srovnání s tloušťkou $a_{STŘ}$ malá, je pokles intenzity magnetického pole do hloubky vsázky poměrně malý a jev, který byl popisován výše (tj. změna z μ_r na μ_V) se projeví mnohem méně.

Činitel n klesne z hodnoty 1,37 např. na $n = 1,1$ atp., což nám vztahy (3.3) a (3.4) podstatně změní. Tato změna má vliv na zvětšení průzařnosti vsázky pro danou frekvenci a jedná se tedy o neekonomický ohřev. Proto je také nutné zvážit, jak tento problém vyřešit. Buďto zvětšíme frekvenci nebo zmenšíme měrný příkon, čímž zmenšíme i H_0 a zajistíme tím nárůst $\mu_{STŘ}$. Oba tyto způsoby vedou ke snížení průzařnosti a hloubky vniku.

3.2 Změny fyzikálních vlastností u ocelí

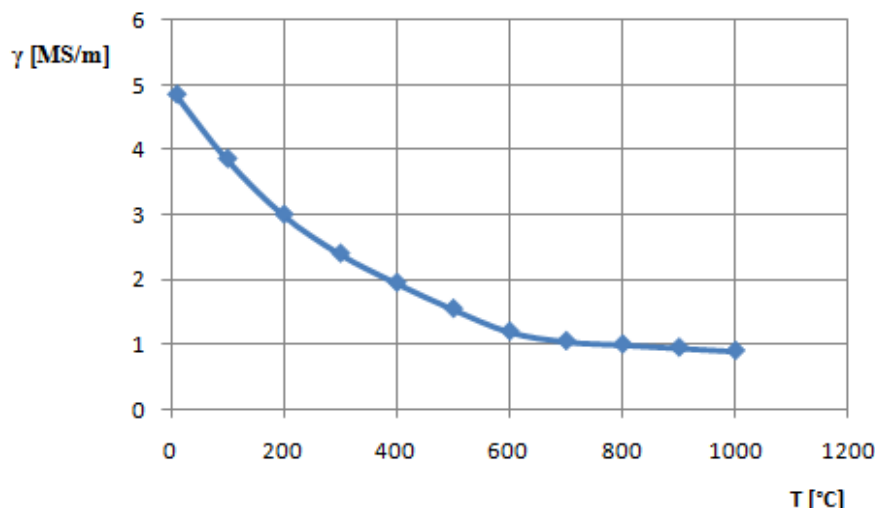
Změny fyzikálních vlastností jsou ukázány v přílohách 1 a 2. Přílohy porovnávají různé typy ocelí a dalších materiálů v závislosti rezistivity na teplotě.

Nyní si uvedeme fyzikální vlastnosti pro standardní uhlíkatou ocel označení 40H (obsahuje 0,65% Mn; 1% Cr; 0,017% P; 0,029% S; 0,42% C). Na obr. 7 vidíme relativní permeabilitu μ_r , která je funkcí magnetické indukce B při teplotě $T = 0^\circ\text{C}$.



Obr. 7 – Závislost relativní permeability μ_r na magnetické indukci B pro teplotu $T = 0^\circ\text{C}$

Na obr. 8 je pak pro tento typ oceli ukázána závislost měrné elektrické vodivosti na teplotě.



Obr. 8 – Závislost měrné elektrické vodivosti γ na teplotě

4. Praktické využití indukčního ohřevu a celkové zhodnocení

4.1 Indukční ohřevy v normálním životě

V běžném životě se poslední dobou užívá indukčního ohřevu v restauračních a rodinných kuchyních jako vařiče a plotny. Důvod je prostý, indukční ohřev má oproti ostatním ohřevům velkou úsporu času. Pokud využijeme normální elektrický ohřev pomocí odporové topné spirály (buď sklokeramická deska, nebo klasický plotýnkový vařič), teplo začne procházet nejprve izolantem, poté kovovou (sklokeramickou) deskou a až poté je předáno dnu u hrnce, ve kterém se začne vařit voda. Takovýto přechod je hodně ztrátový, nejvíce tehdy, pokud k sobě přesně nedoléhají obě plochy (vznikne tak vzduchová mezera, která velice špatně vede teplo) nebo jsou plotýnky (popř. dno hrnce) znečištěné. Oproti tomu při indukčním ohřevu je dno hrnce ohříváno přímo.

Pokud se podíváme na indukční ohřev, pod sklokeramickou deskou jsou zabudovány cívky. Frekvence dosahuje hodnot v intervalu 25÷35 kHz. Pokud položíme hrnec nad cívku, na dně kovové nádoby se začnou indukovat vířivé proudy, které nám způsobí ohřívání přímo dna hrnce. Jelikož vířivé proudy vznikají pouze v kovových materiálech, zůstává povrch varné desky i při zapnutí ohřevu stále chladný.

Jak už bylo řečeno v minulých kapitolách, indukční ohřev má svojí největší výhodu ve svojí vysoké účinnosti. Je to způsobeno tím, že elektronika spotřebovává velmi málo energie s minimálními ztrátami, tzn., že vaření probíhá rychleji při podstatně menší spotřebě

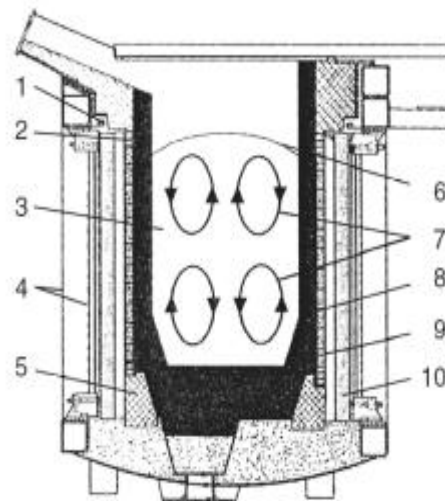
elektrické energie. Další výhodou je, že povrch varné desky se ohřívá jen do teplého hrnce, takže se na něm potraviny nepřipalují a velice snadno se čistí nečistoty. Velkou výhodou je také to, že varná deska nijak neotepluje povrch hrnce, takže riziko popálení je podstatně nižší než u ostatních ohřevů.

Jedinou nevýhodou je, že abychom mohli použít tento způsob vaření, musíme mít materiály z elektricky vodivého a magnetického materiálu, které jsou samozřejmě od obvyklých materiálů dražší. Vhodným nádobím je např. litina, ocel či smaltovaný plech, naopak u materiálů jako je sklo nebo keramika k indukčnímu ohřevu vůbec nedojde.

4.2 Indukční pece

4.2.1 Indukční kelímková pec

Na obrázku 9 je indukční kelímková pec, která se používá pro tavení oceli. Na vnější straně se nachází keramický kelímek, ve kterém se nachází vodou chlazený induktor. Induktor je napájen střídavým proudem o frekvenci $50 \div 10000$ Hz. Ve vsázce uvnitř kelímku dochází vlivem naindukovaných vířivých proudů a elektromagnetických sil k ohřevu a k proudění taveniny. To se projeví vzduutím hladiny, což vede k rovnoměrnému promísení legujících přísad se základní ocelí.



Obr. 9 – Konstrukční uspořádání kelímkové indukční pece

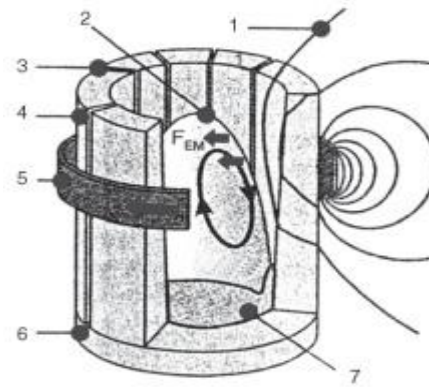
kde značí:

1 – kroužek spojený nakrátko; 2 – vodou chlazený prstenec; 3 – tavenina; 4 – ocelová kostra; 5 – betonový prstenec; 6 – hladina taveniny; 7 – pohyb taveniny; 8 – kelímek; 9 – induktor; 10 – svazek transformátorových plechů jako stínění

Indukční kelímkové pece jsou napájené přímo ze sítě, jejíž frekvence je 50 Hz. Její maximální měrný výkon je omezen na max. 300kW na tunu taveniny. Pokud by výkon dosahoval vyšších hodnot, víření materiálu by bylo příliš intenzivní a výška vzduší hladiny příliš vysoká. Pokud ovšem budeme kelímkové pece napájet frekvencí do 1000 Hz, intenzita proudění taveniny je menší stejně jako výška hladiny. Měrný výkon se poté může volit až 1MW na tunu taveniny. Pokud budeme chtít urychlit tavící dobu a zmenšit ekonomické nároky, je třeba zvýšit měrný výkon.

Obrázek 10 popisuje princip kelímkové pece s chladnými stěnami, které se používají pro tavení neželezných materiálů a vysokým bodem tání. Induktor je tvořen pomocí dutých měděných, vodou chlazených segmentů tvořící kelímek, které jsou odděleny mezerou. Induktor napájíme vysokofrekvenčním zdrojem, přičemž dno kelímku je rovněž chlazeno vodou. Důsledkem velkých teplotních rozdílů mezi stěnami kelímku a taveninou vzniká na povrchu taveniny tuhý potah tzv. skull, z čehož plyne, že tavenina zůstává oddělena od postranních stěn.

Indukční kelímkové pece s chladnými stěnami se používají např. pro výrobu oxido-keramických materiálů na bázi titanu a hliníku, dále pak pro výrobu monokrystalických křemíkových výkonových polovodičů tzv. FZP procesem (Floating-Zone-Process → proces tavby letmou zónou). Zjednodušeně lze říci, že v předem definované zóně dojde k roztavení původního polykrystalu, který se poté působením elektromagnetických sil dotuje vhodnou látkou.



Obr. 10 – Princip indukční kelímkové pece s chladnými stěnami

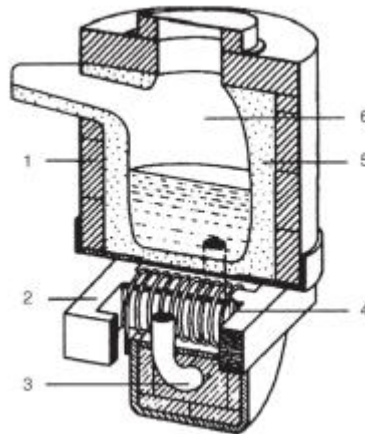
kde značí:

1 – magnetické pole; 2 – hladina taveniny; 3 – mezera; 4 – vodou chlazený díl kelímku; 5 – induktor; 6 – vodou chlazené dno; 7 – „skull“

4.2.2 Indukční kanálková pec

Na obrázku 11 je znázorněno konstrukční schéma indukční kanálkové pece, která je určená pro tavení neželezných kovů. Tavenina je v tomto případě v nístěji s ohnivzdornou vyzdívkou, kde primární cívka navinutá na feromagnetickém jádru je uložena pod nístějí. Induktor je tvořen jedním nebo několika kanálky, které jsou vyvedené do taveniny. V kanálcích se nachází roztavený kov, který tvoří sekundární závit nakrátko a díky působení elektrodynamických sil proudí kov z kanálků do taveniny. Dochází tak k promísení taveniny, tj. k homogenizaci materiální i teplotní. Účinnost těchto pecí je z důvodu jejich principu odpovídající činnosti transformátoru se železným jádrem vyšší než u pecí kelímkových, u kterých je principem vzduchový transformátor.

Velké kanálkové pece se nejčastěji používají jako dané a udržovací. U těchto pecí je třeba vyzvednout jejich účinnost, která se pohybuje kolem 90% a malé ztráty propalem, které se v tomto případě pohybují okolo 1%.



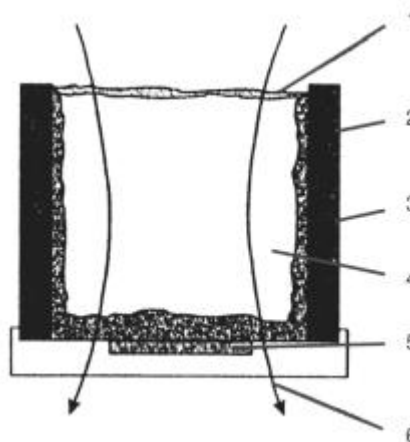
Obr. 11 – Konstrukční uspořádání indukční kanálkové pece

kde značí:

1 – izolace; 2 – jádro transformátoru; 3 – kanálek; 4 – primární cívka; 5 – ohnivzdorná vyzdívka; 6 – prostor pro tavení

4.2.3 Indukční vysokofrekvenční pec pro tavení metodou „skull melting“

Na obrázku 12 je znázorněn zjednodušený náčrt indukční vysokofrekvenční pece, která se používá pro tavení slabě elektricky vodivých materiálů. Tyto pece fungují na technologii SMT (Skull-Melting-Technology → tavící technologie skull). Tato technologie je založena na tom, že na stěnách i na dně vodou chlazeného induktoru se nám opět vytvoří skull, který chrání od vysoké teploty taveniny cívku i dno induktoru, jelikož teplota taveniny často dosahuje teplot vyšších než 3000 °C. Tyto pece lze použít např. pro výrobu oxidokeramických a skleněných materiálů či pro výrobu laserových krystalů, jejichž účinnost dosahuje hodnot více než 90%.



Obr. 12 – Zjednodušený náčrt indukční vysokofrekvenční pece pro „skull melting“

kde značí:

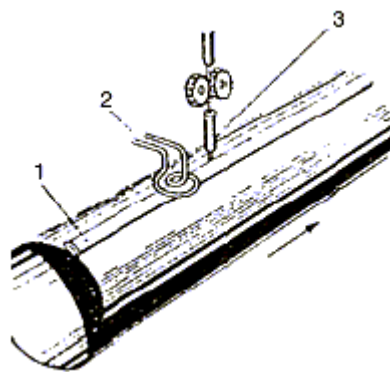
1 – vrstva materiálu na výstupu; 2 – vodou chlazený induktor; 3 - „skull“; 4 – tavenina; 5 – vodou chlazené dno; 6 – magnetické pole

4.3 Indukční pájení

Pojem pájení znamená spojení kovových částí pájkou při teplotě, která je nižší než teplota tavení spojovaných kovů. Pro pájení „natvrdo“ se používají pájky, které mají teplotu tavení o něco nižší než teplota spojovaných kovů. Materiálem pro tvrdé pájky je např. měď, stříbro a jejich slitiny.

Při pájení „naměkko“ se používají pájky, jejichž teplota tavení je o dost menší než teplota spojovaných kovů. Základními materiály pro tyto pájky jsou slitiny cínu a olova. Pájky na pájení hliníku fungují na bázi slitin cínu, zinku, olova a kadmia, ovšem indukční ohřev se uplatňuje v zásadě u „tvrdého“ pájení. V elektrotechnice se pájení používá pro spojení jednotlivých dílů u vinutí transformátorů či velkých elektrických točivých strojů. U hromadné výroby velkých sérií součástí se používají jednoúčelová, ale dosti rozměrná zařízení. Pokud chceme pájet jednotlivé součásti, vyrábějí se přístroje s malými induktory, které lze ovládat ramenem robota nebo klasicky pomocí ruky.

Výhodou indukčního pájení je energetická úspora. Indukční ohřev nám zajistí rychlé prohřátí spojovaného místa, což je zásadní u spojování materiálů s dobrou tepelnou vodivostí. Při pájení natvrdo roztavená pájka proniká do kapilárních spár mezi spojovanými částmi, kde následně po zatuhnutí zanechá spoj. Na obrázku 13 je znázorněno pájení plášťové trubky.

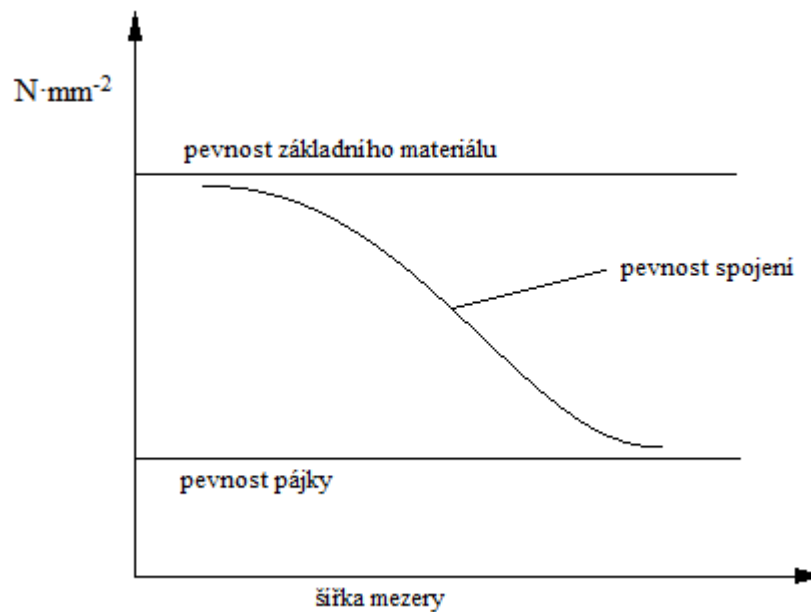


Obr. 13 – Indukční pájení plášťové trubky

kde značí:

1 – přeložená drážka; 2 – induktor; 3 – kontinuální přívádění pájky, kde šipka ukazuje směr pohybu trubky

U pájení nás zajímá pevnost v tahu pájeného spoje. Pevnost je dána pevností pájeného materiálu (pájky), dále šířkou mezery mezi pájenými díly a nakonec vhodným uspořádáním spojovaných součástí. Obrázek 14 naznačuje průběh pevnosti v tahu v závislosti na šířce mezery mezi pájenými díly. Nutno dodat, že pokud máme optimální šířku mezery, pevnost se blíží pevnosti spojovaného materiálu, při příliš velké šířce se blíží pevnosti pájky.



Obr. 14 – Průběh pevnosti v tahu v závislosti na šířce mezery mezi pájenými díly

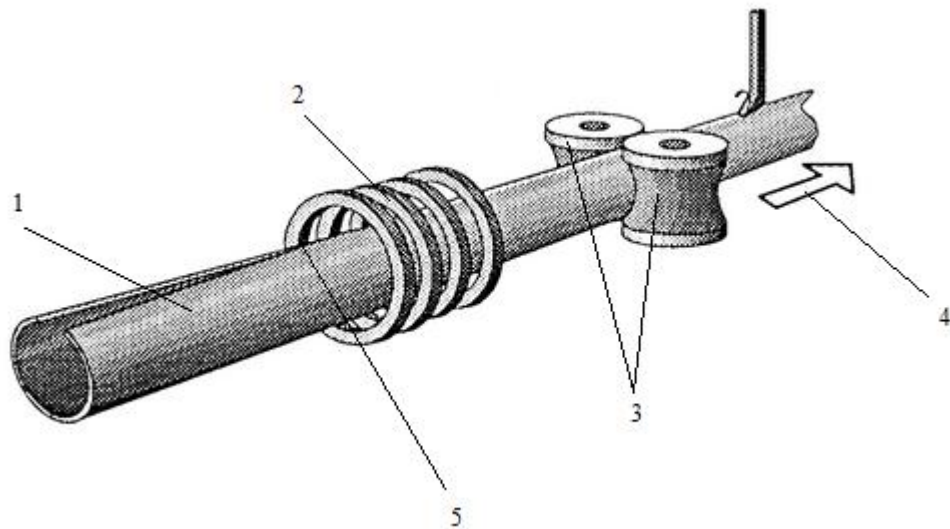
Aby nevznikaly pochyby o tom, jaká je optimální šířka mezery, či která šířka mezery je moc velká, v tabulce 4.1 jsou uvedeny doporučené šířky mezer b (mm) pro různé druhy pájek a spojovaných materiálů.

Základní materiál pájky	Spojovaný materiál		
	Měď	Uhlíkatá ocel	Korozivzdorná ocel
Měď	-	0,01÷0,05	0,02÷0,07
Mosaz	0,08÷0,04	0,08÷0,3	0,1÷0,35
Stříbro	0,05÷0,25	0,05÷0,2	0,08÷0,25

Tab. 4.1

4.4 Indukční svařování

Toto svařování je vhodné u součástek, které se svařují podélně, např. pro podélné svařování trubek. Indukčním svařováním se dobře svařuje např. čistý hliník či hliník, který je legovaný manganem nebo magnéziem. Na obrázku 15 je znázorněn princip podélného indukčního svařování. Induktor je napájen pomocí vysokofrekvenčního zdroje (200÷500 kHz), čímž dojde k rychlému prohřátí svařovaného místa. Poté je třeba dokončit spojení pomocí pýchovacích profilových kladek.

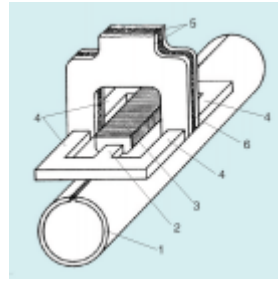


Obr. 15 – Princip podélného svařování trubky

kde značí:

1 – stočený plech do trubky; 2 – vodou chlazený induktor; 3 – pýchovací profilové kladky; 4 – směr pohybu svařované trubky; 5 – svařované místo

Na dalším obrázku (16) je zobrazen lineární induktor. Na středním podélném dílu induktoru se nachází feromagnetické jho, které má za úkol koncentrovat elektromagnetické pole do svařované mezery. Ve svařované trubce dochází k indukovaní sekundárních proudů, které materiál v místě svaru rychleji ohřejí až do plastického stavu a poté se pomocí pýchovacích válců svařované místo stlačuje tlakem, který dosahuje hodnot $20\div 40 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$. Velikost tlaku závisí na tom, jako svařovací teplotu zvolíme. Při nižší teplotě požadujeme vyšší tlaky.



Obr. 16 – Lineární induktor pro svařování trubek

kde značí:

1 – stočený plech do trubky; 2 – střední díl induktoru; 3 – magnetické jho; 4,5 – přívody primárního proudu; 6 – izolační vložka

Svařované ocelové trubky mají většinou 0,1% obsah uhlíku. Pokud je obsah větší než např. 0,3%, může dojít buď k zakalení sváru, nebo k nežádoucímu pnutí materiálu, což vede k tomu, že se pak trubky musí dodatečně žíhat. Pokud chceme svařovat ocelové trubky, musíme použít kmitočty 1÷10 kHz. Pokud bude tloušťka stěny větší, musíme použít nižší kmitočty, aby se celá svařovaná plocha dostatečně prohřála. Pro větší představu je uvedena tabulka 4.2, která poukazuje na doporučené kmitočty pro lineární svařování ocelových trubek.

Kmitočet (Hz)	8÷10	4	2	1
Tloušťka stěny (mm)	1,5÷3,5	2,5÷5,5	4,5÷9	6,5÷13

Tab. 4.2

4.5 Zhodnocení indukčního ohřevu

Pokud zhodnotíme indukční ohřev z hlediska energetického, hlavním parametrem by byl potřebný příkon pro prohřívání, tavení či kalení. Příkon P pro indukční ohřev určíme přibližně ze vztahu:

$$P \cdot t = \frac{m \cdot c \cdot \Delta\vartheta}{\eta} \quad [kWh] \quad (4.1)$$

t ...je čas, který je potřebný pro daný ohřev, přičemž záleží na tom, zda budeme prohřívát v celém průřezu, kalit pouze na povrchu či tavit materiál

m ...je hmotnost materiálu

c ...je střední měrné teplo materiálu ohřátého z 20°C na 1250°C

$c \cdot \Delta\theta$...je průměrné teplo, které je obsažené v jedné kilogramu materiálu ohřátého z 20°C na 1250°C

η ...je celková provozní účinnost indukčního ohřevu přidaná ke spotřebě z napájecího zdroje (frekvenční měnič)

Celková účinnost se skládá z elektrické účinnosti přenosu energie z cívky do vsázky η_e a z tepelné účinnosti přenosu, která zahrnuje ztráty, které byly vyzářené do povrchu η_v . Platí tedy vztah:

$$\eta = \eta_e \cdot \eta_i \quad (4.2)$$

Na tento výkon se tedy případně navrhuje výstupní výkon středofrekvenčního měniče kmitočtu. Potřebný příkon pro indukční ohřev je závislý na zvoleném napájení (např. tyristorové měniče nebo síť), na druhu ohřevu (zda se jedná o prohřívání, tavení či kalení), na frekvenci, ale také na druhu zvoleného materiálu. Prohřívací, tavicí nebo kalicí zařízení je sice v porovnání se zařízeními palivovými či odporovými dražší. To je ovšem způsobeno tím, že indukční zařízení obsahují frekvenční měnič kmitočtu, který cenu rapidně zvyšuje. I přesto se ale vyplatí toto zařízení koupit, jelikož při něm dochází k rovnoměrnému ohřevu za mnohem kratší dobu, než je tomu právě u zmiňovaných palivových či odporových zařízení.

Co se týče elektrotepelných zařízení, ta se v podstatě nedají srovnávat s ostatními zařízeními. Jednak se dají snadno mechanizovat a přidávat do automatických výrobních linek, dále pak snižují zmetkovitost, zvyšují kvalitu výrobků a snižují náklady na výrobu. Za zmínku také stojí, že u indukčních zařízení nedochází k žádnému uvolňování nebezpečných dusičnanů a oxidů, jako např. u palivových pecí.

Jediným „problémem“ je fakt, že v blízkosti indukčních zařízení můžeme pozorovat tzv. rozptylové elektromagnetické pole o kmitočtu, který může být vyšší než síťový. Je proto nutné omezit tyto negativní účinky rozptylových elektromagnetických polí např. stíněním. Stínění může být buď elektrickým vodivým pláštěm, který je umístěn kolem induktoru nebo lze stínit pomocí transformátorových plechů. Zařízení pracující s nízkou či střední frekvencí jsou poměrně bezpečná, ovšem u vysokofrekvenčních zařízení je třeba dbát opatrnosti.

5. Závěr

V této bakalářské práci jsem se zabýval změnami fyzikálních vlastností u indukčně ohřívané vsázky. Pokud se tedy na fyzikální vlastnosti pořádně zaměříme, dojdeme k závěru, že vlastně provádíme rozbor tří hlavních parametrů, kterými jsou relativní permeabilita, tepelná vodivost a elektrická vodivost. Jdou to vlastně parametry, díky kterým lze spočítat hloubku vniku naindukovaných proudů, což jsem také v této práci provedl. Materiálem pro řešení hloubky vniku byla uhlíková konstrukční ocel. Problémem u oceli bylo to, že při dosažení tzv. Curieho bodu (bodu magnetické přeměny) ztrácí ocel své magnetické vlastnosti. V tomto bodě jsem tedy provedl analýzu pro hloubku vniku před a po jeho dosažení. Závěrem tohoto zkoumání bylo, že po dosažení tohoto bodu dochází k rychlé změně relativní permeability μ_r z hodnoty $\mu_r > 1$ na hodnotu $\mu_r \approx 1$. Nemění se ale pouze relativní permeabilita, odpor vsázky i kmitočet. Jelikož rychlost ohřevu není v průběhu celého ohřívacího cyklu stejná, je třeba měnit hodnoty kmitočtu, abychom dosáhli stejné rychlosti ohřevu.

Pokud se podíváme na změnu fyzikálních vlastností u materiálu, je třeba zmínit závislost mezi intenzitou magnetického pole H a relativní permeabilitou μ_r . Jak je možné vidět v příloze 3, relativní permeabilita má nejmenší hodnotu na povrchu, kde je maximální intenzita magnetického pole H a největších hodnot právě dosahuje při pronikání materiálu do hloubky, kde intenzita H klesá.

Samozřejmě je třeba brát ohled na okolní teplotu. V příloze 1 a 2 jsem uvedl závislost rezistivity materiálu na teplotě pro několik druhů ocelí a dalších materiálů. Poté jsem si zvolil standardní uhlíkatou ocel s označením 40H, kde jsem nejprve na obrázku 7 uvedl fyzikální závislost relativní permeability μ_r na magnetické indukci B při teplotě 0°C a na obrázku 8 je ukázaná fyzikální závislost elektrické vodivosti γ na teplotě T .

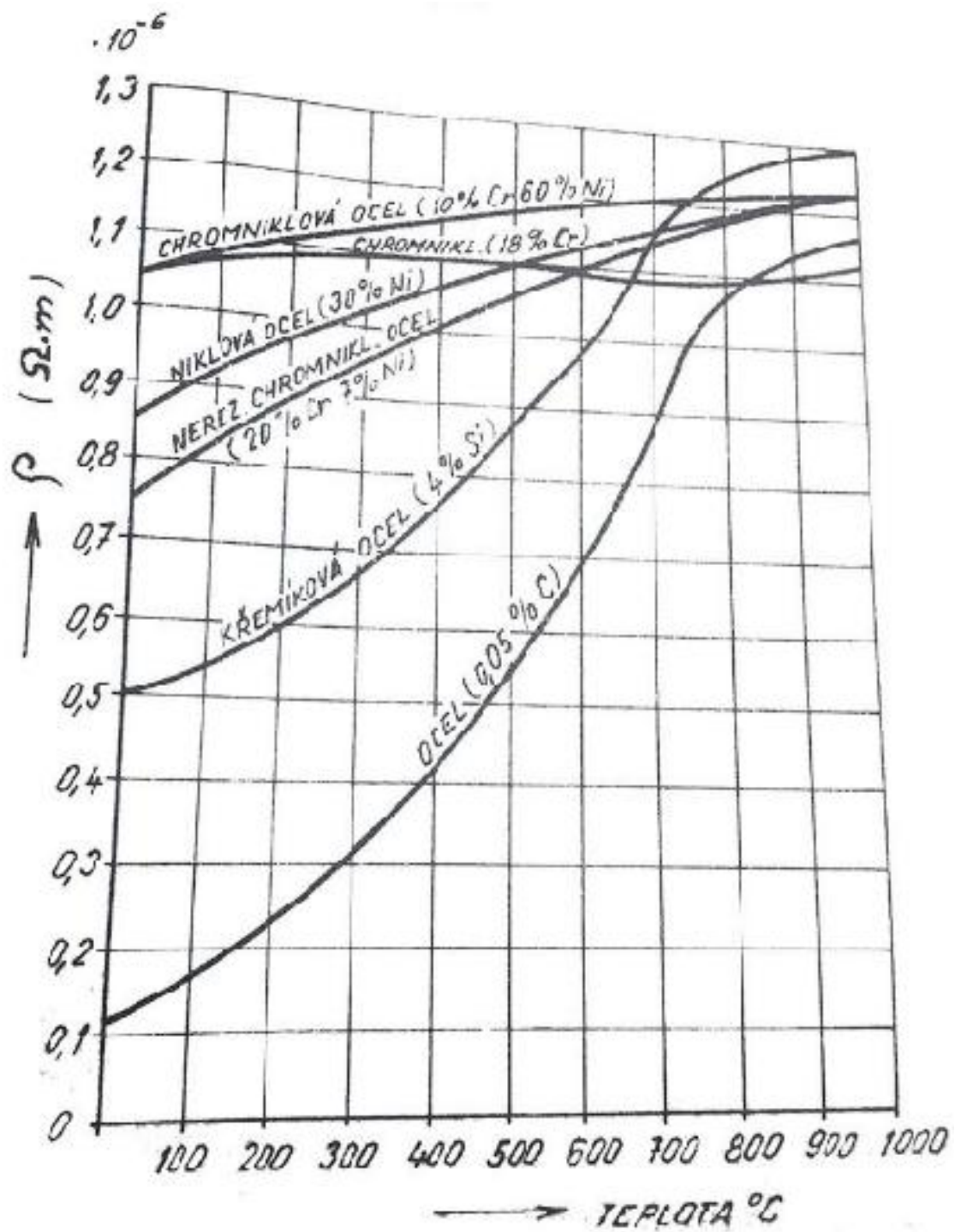
V poslední kapitole jsem se zaměřil na praktické využití indukčního ohřevu. Nejčastěji je používán tento typ pro tavení, kalení a prohřívání, tedy převážně pro průmyslové využití. Velice oblíbený je indukční ohřev v restauračním či domácím prostředí, kde se uplatňuje ve formě vařičů a ploten.

Jak tedy vyplývá z mé práce, indukční ohřev je velice dobrou formou ohřevu, která se hojně využívá jak v průmyslu, tak i v domácnostech, její vlastnosti vysoce převyšují nad

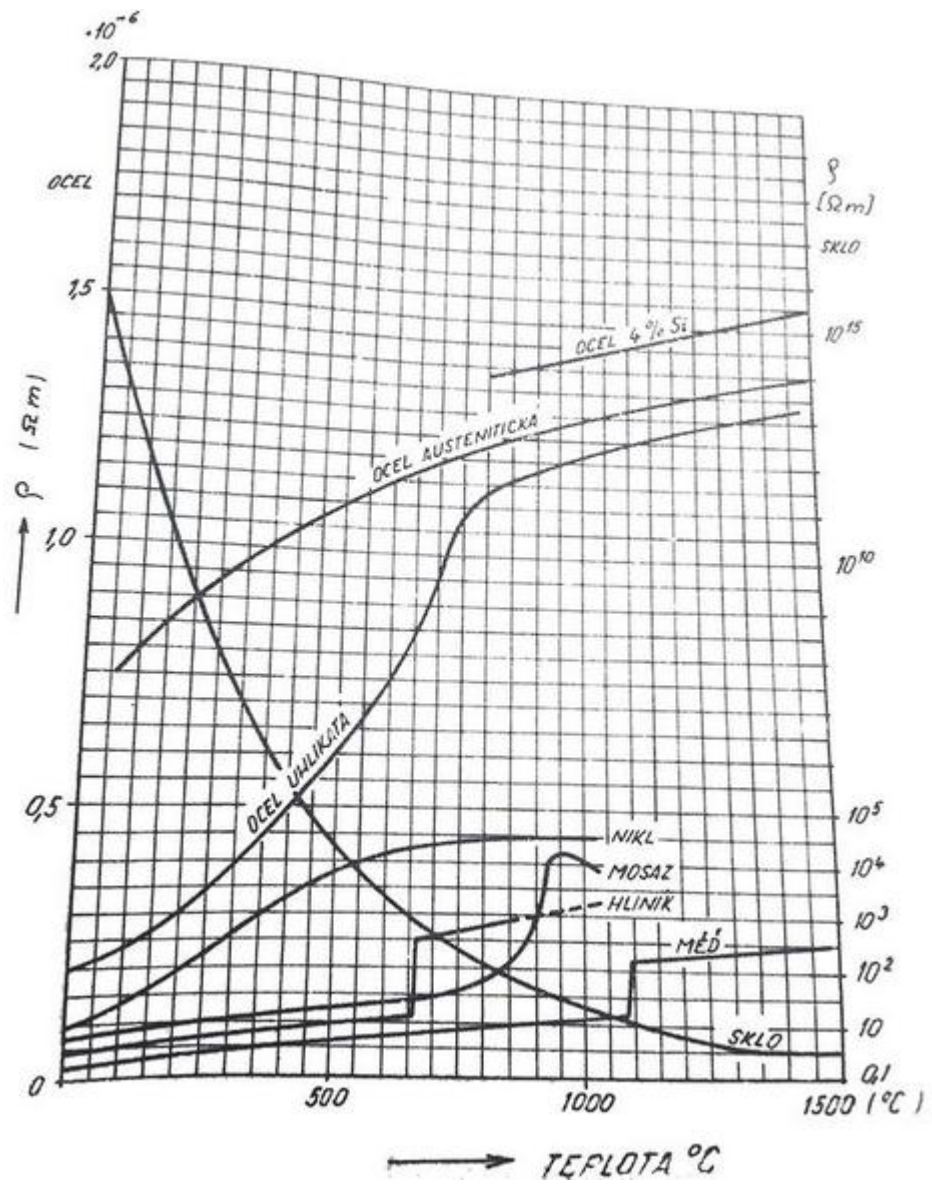
ostatními ohřevy, přičemž největší nevýhodou je finanční náročnost. Zdůraznil bych také jeho přednost, neboť teplo vzniká přímo v ohřívacím materiálu elektromagnetickou indukcí a nikoli sdílením tepla přes povrch ohříváné vsázky součástí, jako je tomu např. u nepřímého odporového ohřevu nebo ohřevu plamenem.

Seznam použité literatury:

- [1] MAYER, Daniel. *Teorie elektromagnetického pole*. 3. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2004. 2 sv. ISBN 80-7082-826-9.
- [2] LANGER, Emil a KOŽENÝ, Jiří. *Elektrotepelná zařízení indukční: základy teorie, výpočty a konstrukce*. 1. vyd. Plzeň: VŠSE, 1982. skripta 185 s.
- [3] LANGER, Emil. *Teorie indukčního a dielektrického tepla*. 1. vyd. Praha: Academia, 1964. 291 s.
- [4] RADA, Josef. *Elektrotepelná technika*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1985. 344 s.
- [5] DOLEŽEL, I. – ULRYCH, B. – ŠKOPEK, M. – BAGRLIK, J.: Modelování indukčního ohřevu kovových materiálů a souvisejících technologických procesů. Část II. ELEKTRO, 2/2002
- [6] ČERNÝ, V.: *Indukční ohřev (1)*. (repetorium). Časopis Elektro 10/2002
- [7] ČERNÝ, V.: *Indukční ohřev (3)*. (repetorium). Časopis Elektro 12/2002
- [8] ČERNÝ, V.: *Indukční ohřev (4)*. (repetorium). Časopis Elektro 1/2003
- [9] ČERNÝ, V.: *Indukční ohřev (5)*. (repetorium). Časopis Elektro 2/2003
- [10] ČERNÝ, V.: *Indukční ohřev (7)*. (repetorium). Časopis Elektro 5/2003
- [11] <http://www.najdiservis.cz>: *Indukční ohřev*

Přílohy:**Příloha č. 1 – Rezistivita materiálu v závislosti na teplotě**

Příloha č. 2 – Rezistivita materiálu v závislosti na teplotě



Příloha č. 3 – Závislost relativní permeability μ_r na intenzitě magnetického pole H 