

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Indukční ohřev těles se silně zakřivenými plochami

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Ondřej VITOUŠ**
Osobní číslo: **E13N0035P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Indukční ohřev těles se silně zakřivenými plochami**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Proveďte rešerši různých provedení induktoru pro indukční ohřev magnetických i nemagnetických těles. Zaměřte se na konstrukční limity při výrobě a využití materiály.
2. Formulujte matematický model obecného systému pro indukční ohřev a proveďte jeho teoretický rozbor.
3. Na základě rešerše a teoretického rozboru formulovaného modelu sestavte možná konstrukční provedení induktoru a jeho přídatných prvků pro případ ohřevu těles se silně zakřivenými plochami.
4. Na ilustrativním příkladě proveďte parametrickou studii sestavených konstrukčních provedení s ohledem na charakteristiky ohřevu.
5. Výsledky provedené studie vyhodnoťte a pokuste se z výsledků práce vytvořit obecnou metodiku.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. V. Rudnev, D. Loveless, R. L. Cook, M. Black: Handbook of Induction Heating, CRC Press, 2002
2. S. L. Semiatin: Elements of Induction Heating: Design, Control, and Applications, ASM International, 1988
3. A. Boadi, Y. Tsuchida, T. Todaka, M. Enokizono: Designing of suitable construction of high-frequency induction heating coil by using finite-element method, IEEE Transactions on Magnetics, 2005


Vedoucí diplomové práce: **Ing. František Mach**
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2014**

Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2015**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na problematiku indukčního ohřevu zakřivených ploch elektricky vodivých těles. Hlavním cílem práce je sestavit obecný matematický model indukčního ohřevu, aplikovat jej pro konkrétní vybrané příklady a prozkoumat možnosti využití technologie indukčního ohřevu. V úvodu práce je zařazeno stručné přiblížení tepelného zpracování kovů, vlastností prostředí a běžných konstrukcí induktorů. Poté je formulován matematický model teplotního a magnetického pole. Matematický model je dále aplikován pro vybrané příklady ohřevu za účelem kalení razících nástrojů, ozubených kol a indukčního pájení trubek.

Klíčová slova

Indukční ohřev, tepelné zpracování kovů, induktor, matematický model, sdružená úloha, Agros2D, magnetické pole, teplotní pole

Abstract

The master theses is focused on the issue of induction heating of bodies with curved surfaces. The main objective is to draw up a general mathematical model of induction heating and apply it to specific selected examples and explore the possibility of using induction heating technology. In the beginning is situated close insight heat treatment of metals, environmental features and structures common of inductors. It is formulated the mathematical model of temperature and magnetic field. The mathematical model is applied to selected examples of heating like hardening of the stamping tools, gears and induction soldering pipes.

Key words

Induction heating, heat treatment of metals, inductor, mathematical model, coupled problém, Agros2D, magnetic field, temperature field

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 11.5.2015

Ondřej Vitouš

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Františku Machovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

Obsah	7
Seznam symbolů a zkratk	9
Elektromagnetické pole	9
Teplotní pole	9
Materiálové parametry	9
Obecné	9
Úvod	10
1 Indukční ohřev	11
1.1 Historie	11
1.2 Obecné fyzikální principy	11
2 Tepelné zpracování kovů	13
2.1 Žihání	14
2.2 Normalizace	15
2.3 Kalení	15
2.4 Temperování	15
2.5 Slinování	15
2.6 Spojování, svařování, pájení, lepení	15
2.7 Indukční tavení	16
2.7.1 Tavení pomocí kanálkových a kelímkových pecí.....	16
2.7.2 Levitační indukční ohřev	16
3 Současný stav a cíle práce	17
4 Prostředí a vlastnosti materiálů	18
5 Provedení induktorů	20
5.1 Základní konstrukční úvahy	20
5.2 Základní konstrukce induktoru	23
5.2.1 Nízkofrekvenční ohřev.....	23
5.2.2 Středně-vysokofrekvenční ohřev	23
5.2.3 Vnitřní ohřev	25
5.2.4 Speciální konstrukce induktorů	26
6 Koncentrátory, stínění a susceptory	29
6.1 Koncentrátory	29
6.2 Stínění	31
6.3 Susceptory	31
7 Obecný matematický model	33
7.1 Model magnetického pole	33
7.2 Model teplotního pole	34
8 Modelování vybraných příkladů	36
8.1 Okrajové a počáteční podmínky	37
8.1.1 Okrajové podmínky magnetického pole.....	37
8.1.2 Okrajové podmínky teplotního pole.....	37
8.2 Ilustrativní příklad indukčního kalení hrany razicího stroje	38
8.2.1 Model magnetického pole pro indukční kalení hrany razicího stroje	39
8.2.2 Model teplotního pole pro indukční kalení hrany razicího stroje	40
8.2.3 Konvergence řešení	41

8.2.4	Výsledky řešení	42
8.3	Ilustrativní příklad povrchové kalení ozubeného kola	43
8.3.1	Model magnetického pole pro povrchové kalení ozubeného kola	44
8.3.2	Model teplotního pole pro povrchové kalení ozubeného kola	46
8.3.3	Konvergence řešení	46
8.3.4	Výsledky řešení	48
8.4	Ilustrativní příklad pájení dvou trubek	50
8.4.1	Model magnetického pole pájení dvou trubek	50
8.4.2	Model teplotního pole pájení dvou trubek	52
8.4.3	Konvergence řešení	53
8.4.4	Výsledky řešení	54
Závěr	57
Seznam literatury	59

Seznam symbolů a zkratek

Elektromagnetické pole

E	$V \cdot m^{-1}$	intenzita elektrického pole
D	$C \cdot m^{-2}$	elektrická indukce
H	$A \cdot m^{-1}$	intenzita magnetického pole
B	T	magnetická indukce
A	Wb / m	vektorový magnetický potenciál
J	$A \cdot m^{-2}$	proudová hustota
Φ	Wb	magnetický indukční tok
p_J	$W \cdot m^{-3}$	měrné Jouleovy ztráty

Teplotní pole

T	°C	teplota
q	$W \cdot m^{-2}$	tepelný tok

Materiálové parametry

γ	$S \cdot m^{-1}$	elektrická vodivost
μ	$H \cdot m^{-1}$	permeabilita
λ	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	tepelná vodivost
c_p	$J \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	měrná tepelná kapacita
ρ	$kg \cdot m^{-3}$	měrná hmotnost

Obecné

f	Hz	frekvence
η	%	účinnost
I	A	elektrický proud

Úvod

Indukční ohřev se v praxi využívá jako jeden z postupů ohřevu materiálů za účelem kalení, žíhání, tváření, letování, pájení a tavení. Mimo indukční ohřev se v praxi lze setkat také s přímým odporovým ohřevem, ohřevem pomocí plynových hořáků, infračerveným ohřevem a ohřevem v obloukových pecích. Každá metoda ohřevu má svoje klady a zápory. Indukční ohřev se stal v posledních letech velice populárním a jeho největší výhodou oproti nepřímým ohřevům je, že teplo vzniká přímo v ohřívaném tělese a není potřeba média pro jeho přenos. Ohřívané těleso je tedy nejteplejší částí v soustavě. Dalšími výhodami indukčního ohřevu jsou vlastnosti jako přesné rozložení teploty a rychlá možnost regulace intenzity ohřevu. Z energetického hlediska je indukční ohřev velice efektivní a nezatěžuje životní prostředí. Zařízení pro indukční ohřev se skládá z vysokovýkonného generátoru, induktoru a ohřívaného předmětu čili vsázky. [1]

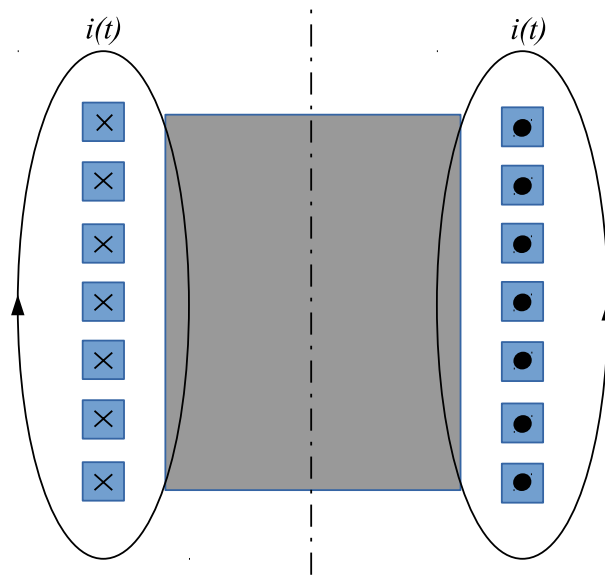
1 Indukční ohřev

1.1 Historie

Základ pro ohřev pomocí indukce položil v roce 1831 (indukční zákon) anglický fyzik Michael Faraday. Jeho experimenty a představy později matematicky formuloval James Clerk Maxwell a v roce 1873 publikoval nejslavnější dílo *Treatise on Electricity and Magnetism*. Původně formulované Maxwellovy rovnice byly do současného tvaru upraveny fyziky Heinrichem Hertzem, Olivierem Heavisidem a Joasihem Gibbsem. Za zmínku také stojí německý fyzik Heinrich Lenz, jenž formuloval Lenzův zákon o směru indukovaného proudu a anglický fyzik James Prescott Joule, který popsal vzájemný vztah mezi elektrickým proudem protékajícím elektrickým odporem a vznikajícím teplem na tomto odporu, jakožto výsledek výkonu na tomto odporu. [2], [6]

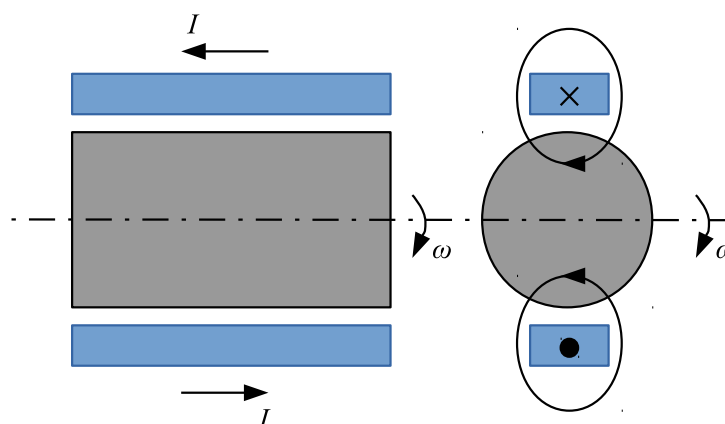
1.2 Obecné fyzikální principy

Pro uskutečnění indukčního ohřevu je potřeba vzniku časově proměnného magnetického (nestacionárního) pole uvnitř ohřívaného tělesa. Tohoto stavu lze docílit dvěma způsoby. Jako první je možnost využití zdroje časově proměnného magnetického pole, nejčastěji induktor, kterým protéká harmonický elektrický proud. [3]

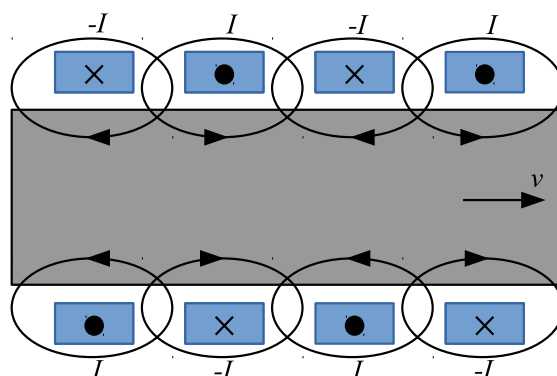


Obr. 1.1 Indukční ohřev v nestacionárním poli, překresleno z[3]

Druhá možnost je využít pohybu tzn. rotace nebo posuvu vsázky v časově neproměnném magnetickém poli. V tomto případě mohou být zdrojem permanentní magnety či cívky protékané stejnosměrným elektrickým proudem. [3]



Obr. 1.2 Rotační indukční ohřev, překresleno z[3]

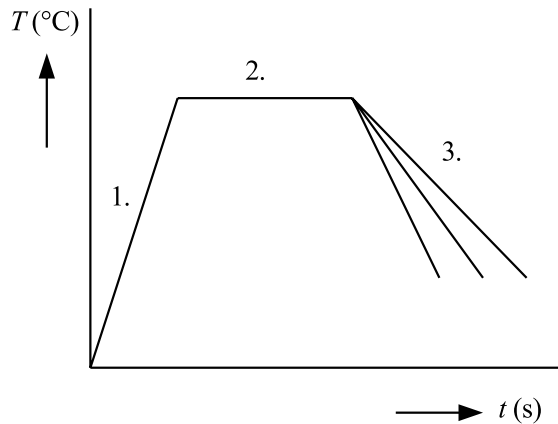


Obr. 1.3 Posuvný indukční ohřev, překresleno z[3]

Je-li splněna podmínka vzniku proměnného magnetického pole, indukují se vířivé proudy v sázce umístěné uvnitř cívky. Tyto vířivé proudy mají stejnou frekvenci jako proud v cívice pouze jejich směr je opačný. Uvnitř vsázky vzniká teplo, tento jev vysvětluje Jouleův zákon. Teplo uvnitř vsázky není rovnoměrně rozloženo. Skin efekt má za následek rozložení tepla do většinou slabé povrchové vrstvy jejíž tloušťka bývá označována jako hloubka vniku. Její rozměr se snižuje s rostoucí frekvencí primárního magnetického pole, s elektrickou vodivostí a permeabilitou vsázky. U posledních dvou zmíněných vlastností je potřeba brát v úvahu, že jsou funkcí teploty a nemají stálou velikost. Proto pro optimální a plynulý ohřev se v jeho průběhu musí dbát na korekci rychlosti změny magnetického pole. [1], [3]

2 Tepelné zpracování kovů

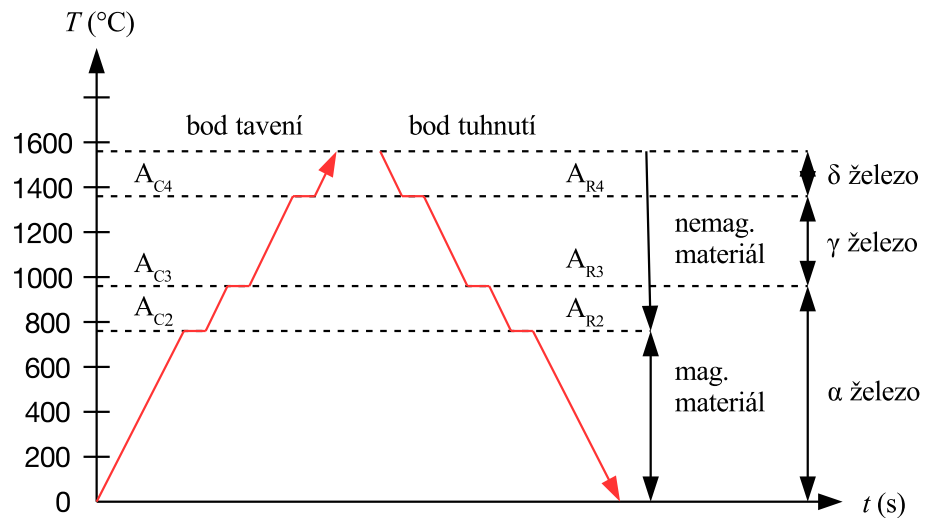
Postup tepelného zpracování zobrazený na Obr. 2.1 se rozděluje do tří částí, ohřev na teplotu, výdrž na teplotě a ochlazování.



Obr. 2.1 Schematické znázornění tepelného zpracování.
1 – ohřev, 2 – výdrž na teplotě, 3 různé rychlosti ochlazení, překresleno z[4]

Na rychlosti ohřevu, rychlosti ochlazování, ale také na času izotermické fáze tepelného zpracování kovů závisí průběh fázových přeměn v matici. Tyto přeměny mají za příčinu změnu struktury ocelí a litin. [4]

K první změně dochází při teplotě A_{c2} neboli Curieho bod, železo se stává nemagnetickým. Železo si stále zachovává kubické uspořádání a označuje se jako α železo. Kritickou teplotou je teplota A_{c3} , teplota 912 °C u které dochází ke změně struktury železa z α na γ a železo změní strukturu na austenitickou. Při dosažení teploty A_{c4} se struktura změní opět na kubickou a hovoří se o tzv. δ železe. Následuje bod tavení 1528 °C , kdy dochází ke změně skupenství železa s pevného na kapalné. Všechny kritické teploty jsou zakreslené v Obr. 2.2, vodorovné části křivky v grafu znázorňují spotřebovaný výkon latentním teplem, těleso v tomto okamžiku nezvyšuje svoji teplotu. Je třeba si uvědomit rozdíl kritických teplot pro ohřev a kritických teplot pro chlazení, které jsou vždy nižší. V praxi jsou velmi blízké a proto je není potřeba uvažovat jako odlišné.[5], [10]



Obr. 2.2 Ohřev a chlazení typické oceli, překresleno z[10]

Obecný přehled běžných aplikací tepelného zpracování kovů je uveden na Obr 2.3.



Obr. 2.3 Průmyslové aplikace tepelného zpracování kovů, překresleno z[10]

2.1 Žihání

Žiháním se nazývá proces, který má za následek odstranění nerovnoměrnosti struktury a její zjemnění, homogenizaci, snížení zbytkových pnutí či obnovení deformovaných zrn. Obvykle je žihání využito jako příprava vlastností materiálu pro další operace. Po zahřátí struktury dochází k pomalému ochlazení. Žihání lze rozdělit podle přeměn do dvou skupin. První z nich se označuje žiháním bez překrytalizace (nedochází k překročení teploty A_{c1} , hlavním účelem je stabilizace rozměrů, snížení zbytkových pnutí) a druhá žiháním s překrytalizací (zahřátí nad teplotu A_{c3} , dochází především k dosažení jemnozrnné a homogenní struktury. Dále se dosahuje zlepšení obrobitelnosti a tvářítečnosti oceli, snížení tvrdosti a zbytkového pnutí). [5]

2.2 Normalizace

Normalizace se provádí zahříváním oceli na teplotu asi 100 °C, poté se materiál nechá vzduchem ochladit na teplotu místnosti. Normalizace trvá dlouhou dobu, povětšinou několik hodin. Provádí se ke zpřesnění feritických a austenitických velikostí zrn v materiálu. Materiál je poté připravený k dalšímu tepelnému zpracování nejčastěji kalení. [1], [5]

2.3 Kalení

Použití indukčního ohřevu při kalení je významné pro vlastnosti ocelí a litin, kde klademe důraz na odolnost do určité hloubky. Kalení probíhá zahřátím tělesa nad austenitizační teplotu A_{c3} , poté je tuto teplotu třeba udržovat, než se vytvoří austenitizační struktura. Následuje výrazné přechlazení pod teplotu M_s a dojde ke změně materiálu na martenzitickou strukturu. V závislosti na době chlazení je výsledkem velice tvrdá struktura, která je zároveň křehká. Chlazení se provádí pomocí chladicího média, nejpoužívanějšími jsou vzduch, olej a voda.

Cílem indukčního kalení je vytvořit na povrchu materiálu martenzitickou vrstvu, která je odolná proti odírání. Vnitřní struktura materiálu zůstává nezměněna. [1], [5]

2.4 Temperování

Temperování následuje většinou po procesu kalení z důvodu příliš křehké struktury pro komerční využití. Hlavním přínosem temperování je odstranění pnutí materiálu, zlepšení houževnatosti, meze kluzu a zmírnění povrchové křehkosti při zachování pozitivních vlastností z procesu kalení. Teplota při níž se provádí temperování se pohybuje většinou mezi 120 °C a 600 °C. Poté dochází k pozvolnému ochlazení. Rozmezí teploty není náhodné, při teplotě nad 600 °C dochází ke ztrátě tvrdosti materiálu a naopak při teplotě pod 100 °C nedochází k žádným změnám. [1], [5]

2.5 Slinování

Slinování je spojování molekulární struktury práškového kovu. Tato vazba se provádí zahříváním kovu na vysokou teplotu pod jeho bod tání a dochází k rekrytalizaci. Vysoká teplota slinování produkuje více konzistentní strukturu, než lze dosáhnout litím nebo kováním. Slinování práškového kovu je podobné normalizaci uhlíkové oceli a je doporučeno, pokud následuje další tepelné zpracování. [1], [5]

2.6 Spojování, svařování, pájení, lepení

Velmi běžné je použití indukce jako zdroje tepla pro spojování dvou kusů kovu dohromady. Pro dosažení správnosti spoje je nezbytné přesně kontrolovat teplotu a polohu

obou spojů. Lepení dvou různých částí kovu prostřednictvím tepelného vytvrzování epoxidu nebo lepidla se v praxi využívá pro spojování ploch různých tvarů. [1], [5]

2.7 Indukční tavení

Indukční ohřev lze v praxi využít pro tavení. Nejběžněji využívané postupy jsou využití kelímkových a kanálkových pecí. Dále se pak využívá levitační tavení, které je v současné době finančně velmi náročné.

2.7.1 Tavení pomocí kanálkových a kelímkových pecí

Využití pecí pro tavení umožňuje roztavit kovy při vzniku minimálních energetických ztrát. Rozdíl mezi kanálkovou a kelímkovou pecí je většinou v jejím použití a konstrukci. Pro tavení oceli se využívá pec kelímková. Pec je složena ze zdroje střídavého proudu a chlazeného induktoru obepínajícího keramický kelímek. Vzájemné působení proudu induktoru a vířivých proudů vzniklých v tavenině způsobuje míchání roztaveného kovu v kelímku. Pro tavení neželezných kovů nebo prohřívání litin se využívá pec kanálková, ta se skládá z jednoho či více kanálků, které jsou spojeny s kelímek. Kanálek s kovem tvoří sekundární závit a kov se taví přímo v kanálku. Primární vinutí se umísťuje na feromagnetické jádro. Vzniklé elektromagnetické síly mají za následek pohyb roztaveného kovu do kelímku a dochází tak k promíchání. Důležité pro tento typ pece je udržení taveniny neustále v tekutém stavu, jinak dochází ke snížení energetické účinnosti. [7], [8]

2.7.2 Levitační indukční ohřev

Tato perspektivní a v současné době stále finančně náročná technologie slouží k bezdotykovému tavení kovů, kde je potřeba zajistit čistotu kovu, např. v medicinském prostředí. Princip zařízení spočívá ve využití Lorentzovi síly. Pomocí cívky, kterou je protékán proud s vysokým kmitočtem, se indukují v kovu vířivé proudy. Tyto proudy v interakci se vzniklým magnetickým polem působí na kov silovými účinky, které jsou orientované proti gravitační síle, přičemž kov levituje. Vířivé proudy také zapříčiňují ohřev kovu na povrchu, jelikož hloubka vniku je v důsledku velké frekvenci minimální. Kovy však disponují dobrou tepelnou vodivostí a teplo se šíří směrem ke středu vsázky velmi rychle. Roztavený kov lze poté odlévat do předem připravených forem. [9]

3 Současný stav a cíle práce

Jak již bylo uvedeno v úvodu, indukční ohřev má své velké výhody a v poslední době se velmi rozšířil v praxi. K ohřevu silně zakřivených ploch se však prozatím příliš nepoužívá a nejsou známé rozsáhlé publikace věnující se podrobně tomuto tématu. Cílem této práce je prozkoumat, zda tato perspektivní technika ohřevu může být vhodná pro specifický typ aplikací.

První část má za cíl informovat čtenáře o obecně fyzikálních principech indukčního ohřevu, o jeho historii a současném stavu. Dále o aktuálním využívání metod pro tepelné zpracování kovů.

Druhá část se věnuje rozdělení typů prostředí, vlastnostem využitých materiálů a rešerši různých provedení induktoru pro indukční ohřev magnetických i nemagnetických těles. Je formulován matematický model obecného systému pro indukční ohřev a proveden jeho teoretický rozbor.

Třetí část se na základě rešerše a teoretického rozboru formulovaného matematického modelu věnuje možným konstrukčním provedení induktoru a jeho přídatným prvkům pro případ ohřevu vybraných úloh. V závěru je uvedeno zhodnocení dosažených výsledků.

4 Prostředí a vlastnosti materiálů

Znalost prostředí a vlastností materiálů (přehled některých vlastností je uveden v Tab. 4.1) je důležitá pro formulaci daného problému. Prostředí lze obecně s ohledem na indukční ohřev dělit podle níže uvedených vlastností.

- Homogenním prostředím je takové prostředí, ve kterém nejsou parametry jako permitivita, permeabilita, elektrická vodivost a tepelná vodivost funkcí polohy. Opakem je nehomogenní prostředí.
- Lineárním prostředím se označuje prostředí, pokud jeho parametry neovlivňuje přítomné pole. V opačném případě se jedná o nelineární prostředí.
- V izotropním prostředí se uvažuje jeho nezávislost na směru pole a materiálové vlastnosti jsou skalárními veličinami. Opačným případem je prostředí anizotropní, kde jsou materiálovými vlastnostmi tenzorové veličiny a lze je vyjádřit maticovým zápisem. [10]

Vezmeme-li v úvahu vlastnosti materiálů v přítomnosti elektromagnetického pole, lze materiály rozdělit do tří skupin (vodiče, dielektrika a magnetické materiály). Je zapotřebí uvést chování materiálů v magnetickém poli $\mathbf{H}(r,t)$ v závislosti na permeabilitě.

- Diamagnetické látky, jejich relativní permeabilita $\mu_r < 1$, patří mezi ně například měď, stříbro, zlato, rtuť, cín a olovo. V jejich přítomnosti velikost vnějšího magnetického pole klesá.
- Paramagnetické látky, jejich relativní permeabilita $\mu_r > 1$, do skupiny paramagnetických látek jsou řazeny například alkalické kovy, hliník a platina. Tyto látky mohou vnější magnetické pole zesilovat, ale pouze nepatrně.
- Feromagnetické látky, mají relativní permeabilitu $\mu_r \gg 1$, do této skupiny spadá železo, nikl, kobalt a další. Jejich atomy se vyznačují uspořádáním do tzv. Weissových domén a momenty všech částic v nich mají stejný směr. Při nepřítomnosti magnetického pole se účinky momentů kompenzují, naopak přiložením magnetického pole dojde k orientaci těchto domén ve směru pole a velikost magnetického pole výrazně roste.

	λ (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	ρ (kg · m ⁻³)	c_p (J · kg ⁻¹ · K ⁻¹)	μ_r (-)	γ (S · m ⁻¹)
Hliník	237	2702	903	1,000023	$37,7 \cdot 10^6$
Měď	385	8933	401	0,999999	$58,1 \cdot 10^6$
Železo	80	7870	447	100-10000	$9,9 \cdot 10^6$
Vzduch	0,026	1,29	1010	1	10^{-8}
Ocel	50	7850	469	100	$1,8 \cdot 10^6$

Tab. 4.1 Hodnoty tepelné vodivosti, hustoty, tepelné kapacity, a permeability vybraných materiálů při pokojové teplotě [10],[16]

5 Provedení induktorů

Konstrukce induktoru pro indukční ohřev je postavena na velkém množství empirických údajů, jejichž vývoj pramenil z teoretických analýz několika poměrně jednoduchých tvarů válcových induktorů. Z tohoto důvodu se konstrukce induktoru zakládá obecně na zkušenostech. [11]

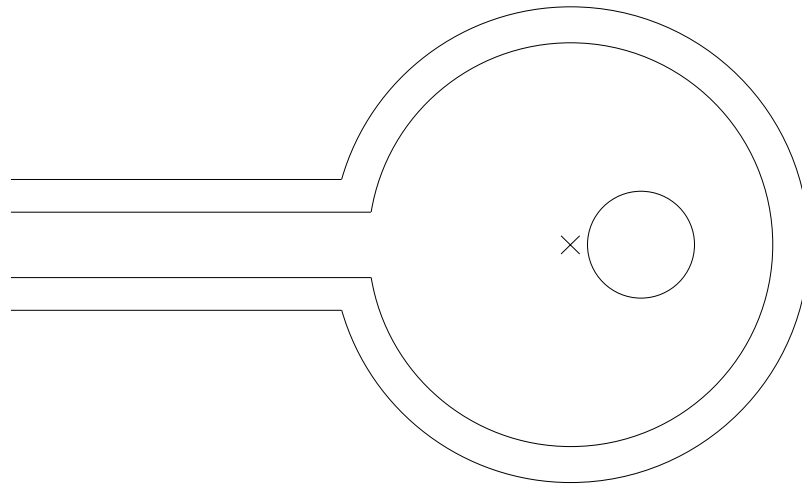
5.1 Základní konstrukční úvahy

Kombinaci induktor/vsázka je možné zjednodušeně považovat jako analogii k transformátoru. Induktor plní funkci primáru transformátoru a vsázka je ekvivalentem sekundáru s jedním závitem. Proto některé z vlastností transformátorů mohou být užitečné při navrhování konstrukce induktoru. Jedna z nejdůležitějších vlastností transformátorů spočívá v tom, že účinnost vazby mezi vinutími je nepřímo úměrná vzdálenosti mezi nimi. Kromě toho, proud v primáru transformátoru násobený počtem primárních závitů se rovná proudu v sekundáru násobený počtem sekundárních závitů. Na základě těchto vlastností, existuje několik podmínek, které je třeba brát v úvahu při konstrukci jakéhokoliv induktoru pro indukční ohřev:

1. Pro maximální přenos energie by měl být induktor přiblížen k vsázce tak blízko, jak je to možné. Je žádoucí, aby co největší počet siločar protínal vsázku v oblasti, která má být ohřívána. Čím hustší bude tok v tomto bodě, tím vyšší bude generovaný proud v této části.

2. Magnetické pole je soustředěno uvnitř válcového, kde je největší magnetická indukce a tím je v těchto místech zapříčiněn rychlý ohřev.

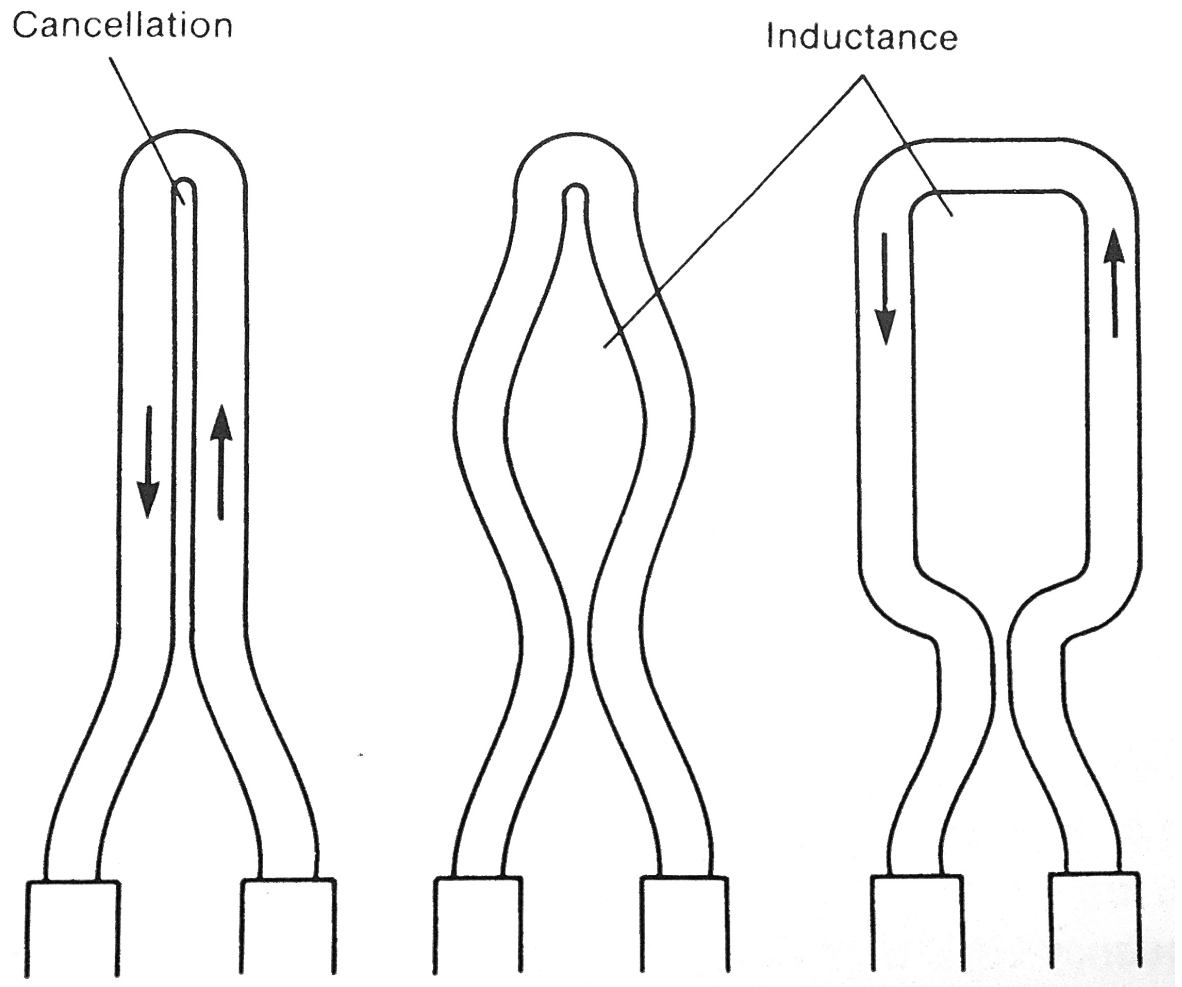
3. Protože se tok nejvíce koncentruje v blízkosti induktoru a se zvyšující se vzdáleností klesá, v geometrické středu induktoru je tok slabý. Tudíž, pokud bude část umístěna mimo středovou oblast induktoru blíže k závitům, bude tuto část protínat silnější pole, a proto se bude zahřívat na vyšší teplotu větší rychlostí. Tento účinek je výraznější u vysokofrekvenčního indukčního ohřevu.



Obr. 5.1 Geometrický střed a magnetický střed kruhového induktoru [11]

4. V místě, kde se vodiče a induktor spojují je magnetické pole slabší, proto magnetický střed induktoru nemusí být nutně geometrický střed. Tento efekt se nejvíce projevuje u jednozávitových induktorů. Výsledné schéma je znázorněno na Obr. 5.1. Jelikož počet závitů induktoru zvyšuje tok, tento stav se stává méně důležitým.

5. Induktor musí být navržena tak, aby se zabránilo vyrušení pole magnetické indukce od opačných stran induktoru. Induktor vlevo na Obr. 5.2 má velmi malou indukčnost, protože protilehlé strany induktoru jsou příliš blízko u sebe. Umístěním smyčky do středu induktoru získáme určitou indukčnost. Induktor poté bude ohřívat vodivý materiál vložený do smyčky. Konstrukce vpravo zajišťuje vyšší indukčnost a více reprezentuje dobrý návrh induktoru. [11]



Obr 5.2 Vliv konstrukce induktoru na indukčnost [11]

Z výše uvedených podmínek plyne, že některé induktory přenášejí energii snadněji do zátěže z důvodu jejich schopnosti soustředit magnetický tok v oblasti, která má být ohřívána. Tři příkladné konstrukce induktorů vhodné k indukčnímu ohřevu jsou následující:

- Spirála s vsázkou nebo oblastí, která má být zahřívána umístěnou uvnitř induktoru a tím v oblasti největšího magnetického toku.
- Kruhová rovinná spirála, kde tok z povrchu protíná vsázkou.
- Induktor pro ohřev otvorů, kde je využit tok pouze na vnější straně induktoru.

Obecně platí, že spirálové induktory používané k ohřevu kruhové vsázky mají nevyšší hodnoty účinnosti a naopak induktory k ohřevu děr mají hodnoty nejnižší. Účinnost induktoru η je poměr energie přenášené na vsázkou ku energii dodávané induktoru. Účinnost induktoru by neměla být zaměňována s účinností celého systému. Vzhledem k tomu, že účinnost je závislá na geometrii induktoru, je tento faktor považován za nejdůležitější. [11]

5.2 Základní konstrukce induktoru

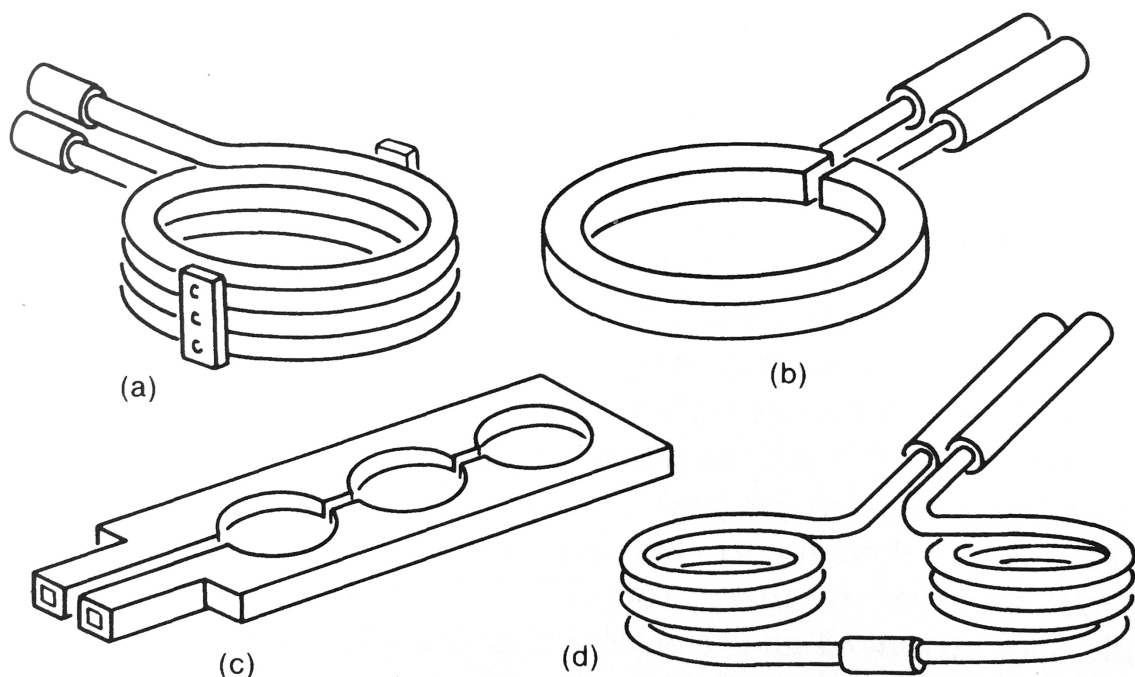
5.2.1 Nízkofrekvenční ohřev

Nízkofrekvenční indukční ohřev je obecně žádoucí pro zahřátí kovů, obzvláště v případech ohřevu velkých a relativně jednoduchých průřezů. Typickými aplikacemi jsou kulatiny nebo čtverec s kulatými rohy na kování nebo vytlačování a desky pro válcování za tepla. V těchto případech je konstrukce induktoru poměrně jednoduchá, obvykle sestávající ze válcového induktoru, nebo varianta toho, kde induktor odpovídá základnímu tvaru průřezu vsázky. Např. lichoběžníková, obdélníková, čtvercová atd.

Nízkofrekvenční induktory mají obvykle více závitů. Obecně platí, že čím nižší frekvence, tím větší je induktor nebo větší počet závitů. [11]

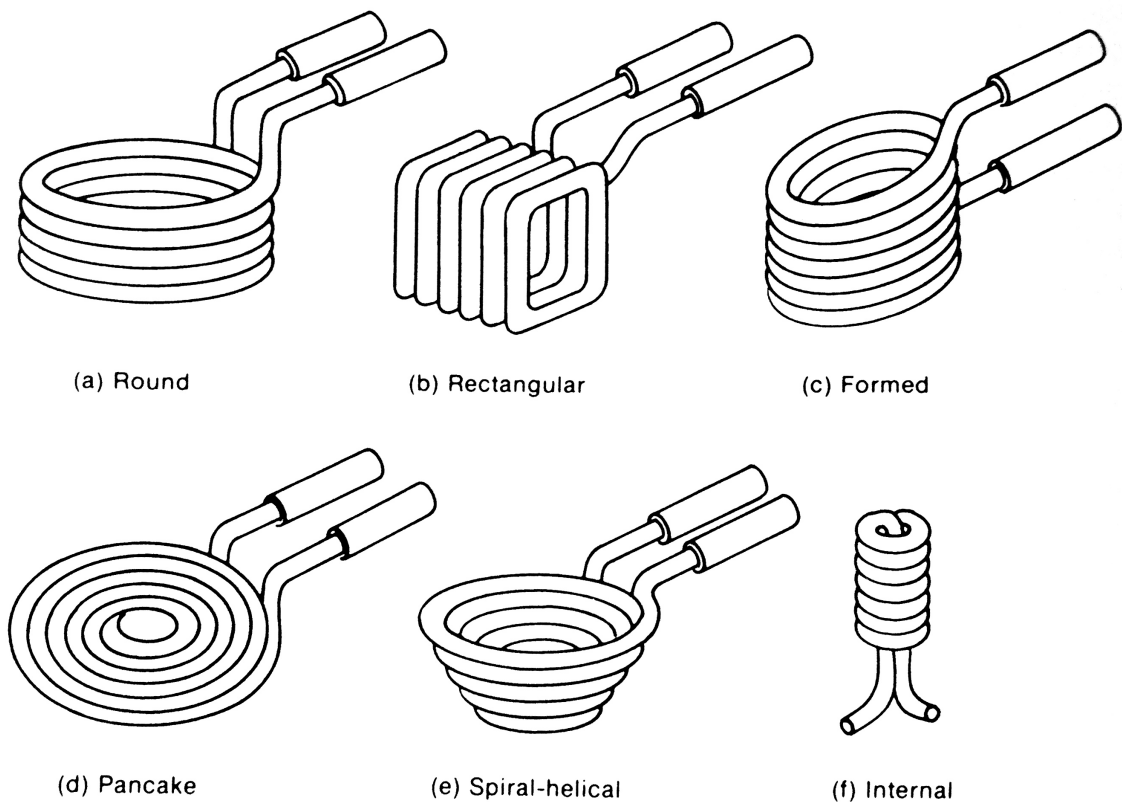
5.2.2 Středně-vysokofrekvenční ohřev

Válcové induktory, stejně tak dobře jako jejich varianty, jsou aplikovány pro středně-vysokofrekvenční tepelné zpracování. Induktory mohou být jak jedno, tak více závitové. Obr. 5.3 zobrazuje několik typů na základě válcové konstrukce.



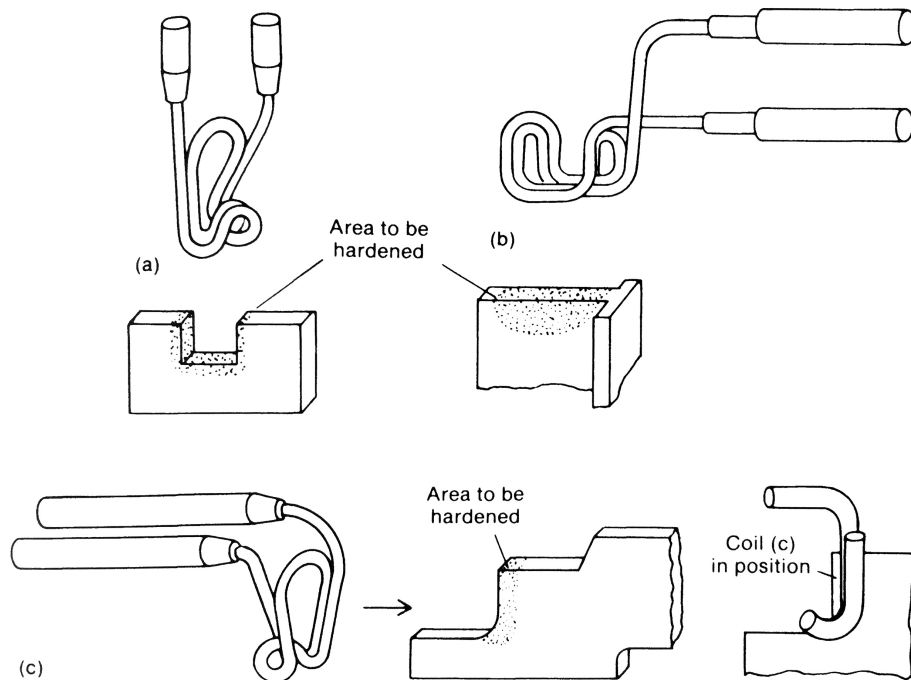
Obr 5.3 Typické uspořádání pro indukční induktory a) více závitové, pro jednu vsázku, b) jedno závitové, pro jednu vsázku, c) jedno závitové, pro více vsázek, d) více závitové, pro více vsázek [11]

Častěji aplikace vyžadují speciálně konfigurované nebo tvarované induktory s upravenou vzdáleností mezi induktorem a vsázkou tak, aby zůstala zachována rovnoměrnost ohřevu, tak jak je zobrazeno na obr. 5.4.



Obr. 5.4 Vícezátvitové indukční tělesa pro ohřev vsázek různých tvarů: a) válcový, b) obdélníkový, c) upravený, d) plochý „palačinkový“, e) spirálový, f) vnitřní [11]

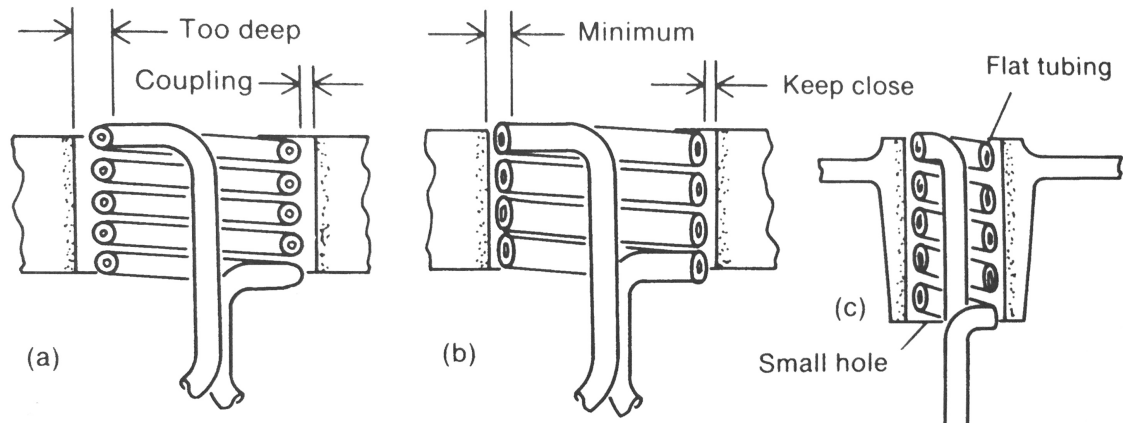
Bez ohledu na finální tvar obrysu, nejúčinnější indukční tělesa jsou v zásadě modifikace standardu, tedy válcových induktorů. Na indukční tělesa upravená pro lokalizovaný ohřev může být nahlíženo jako na obdélníkové indukční tělesa, jejichž konce jsou ohnuty pro vytvoření „mostu“. Obr. 5.5 znázorňuje podobnou situaci, ve které oblasti, které budou kalené jsou u středu závitů induktoru, a tak jsou umístěny v místě největšího toku. [11]



Obr. 5.5 Modifikace induktorů pro lokalizovaný ohřev [11]

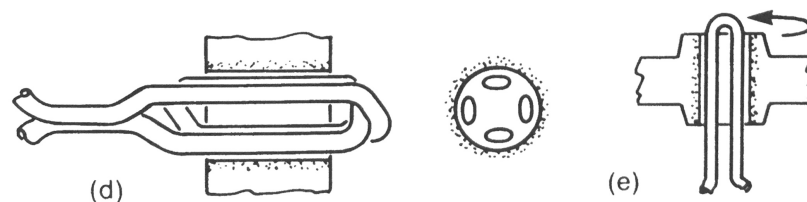
5.2.3 Vnitřní ohřev

Ohřev vnitřních otvorů, ať už pro kalení nebo popouštění, je jedním z nejčastějších problémů. V praxi otvor s vnitřním průměrem 1,1 cm je nejmenší, který může být zahříván zdrojem o frekvenci 450 kHz. Při 10 kHz je pak minimum 2,5 cm. Trubky vnitřních cívek by měly být co možná nejtenčí a otvor by měl být umístěn co nejbližší jak je to možné k povrchu induktoru. Protože proud prochází vnitřkem induktoru, pravá vzdálenost maximálního toku je vzdálenost od vnitřního průměru induktoru k ohřivané části otvoru. To znamená, že průřez vodiče by měl být minimální. Vzdálenost od vnějšího průměru induktoru k ohřivané části by se měla blížit 0,16 cm. Na Obr. 5.6 a) je znázorněna příliš velká spojovací vzdálenost. Upravená konstrukce cívky je pak znázorněna na Obr. 5.6 b). Zde byly trubky induktoru zploštěny a vzdálenost byla zmenšena na minimum. [11]



Obr. 5.6 Konstrukce induktoru pro vnitřní ohřev [11]

Více závitů nebo jemnější rozteči vnitřního induktoru se dosáhne zvýšení hustoty toku. V souladu s tím, prostor mezi závitů by neměl být větší než polovina průměru trubky. Dále by neměla výška induktoru být větší než dvojnásobek jejího průměru. Obr. 5.7 ukazuje speciální konstrukce induktoru pro ohřev otvorů. Induktor vlevo je složen ze 4 svislých pásů, a proto by měla být ohřívaná část otáčena z důvodu dosažení rovnoměrnosti ohřevu. [11]

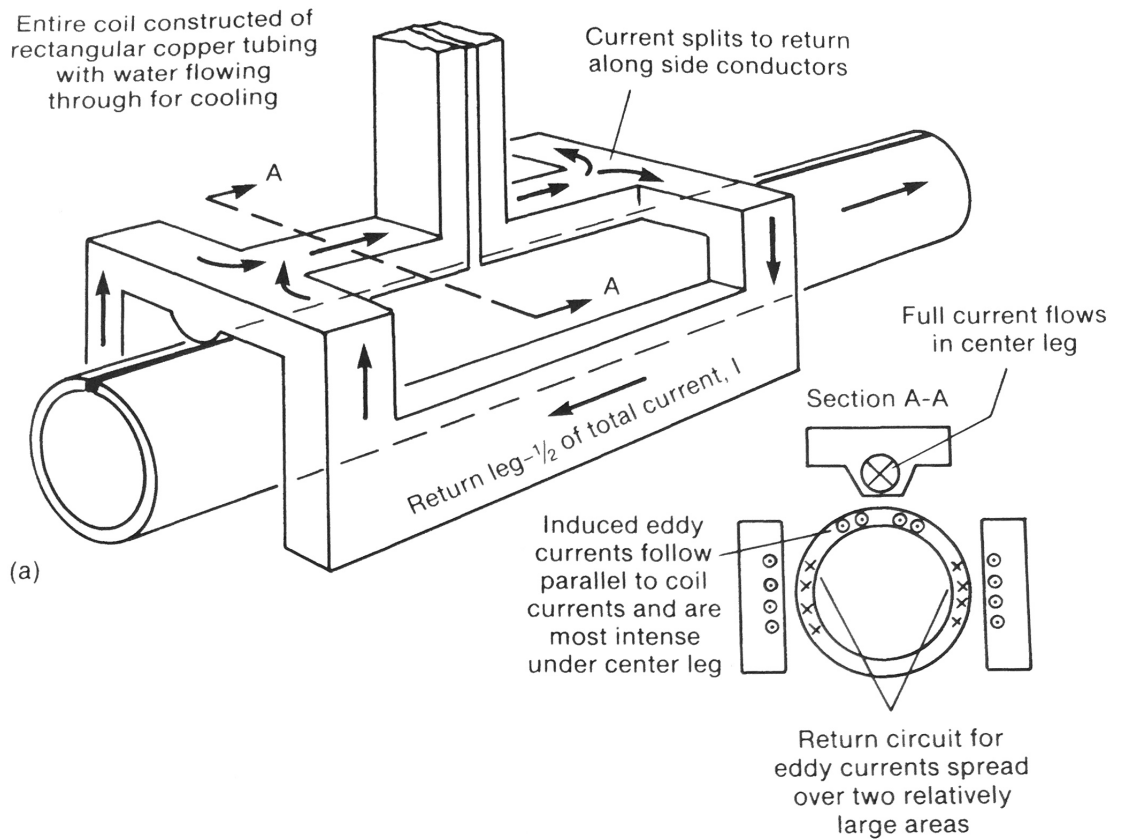


Obr. 5.7 Speciální konstrukce cívek pro vnitřní ohřev [11]

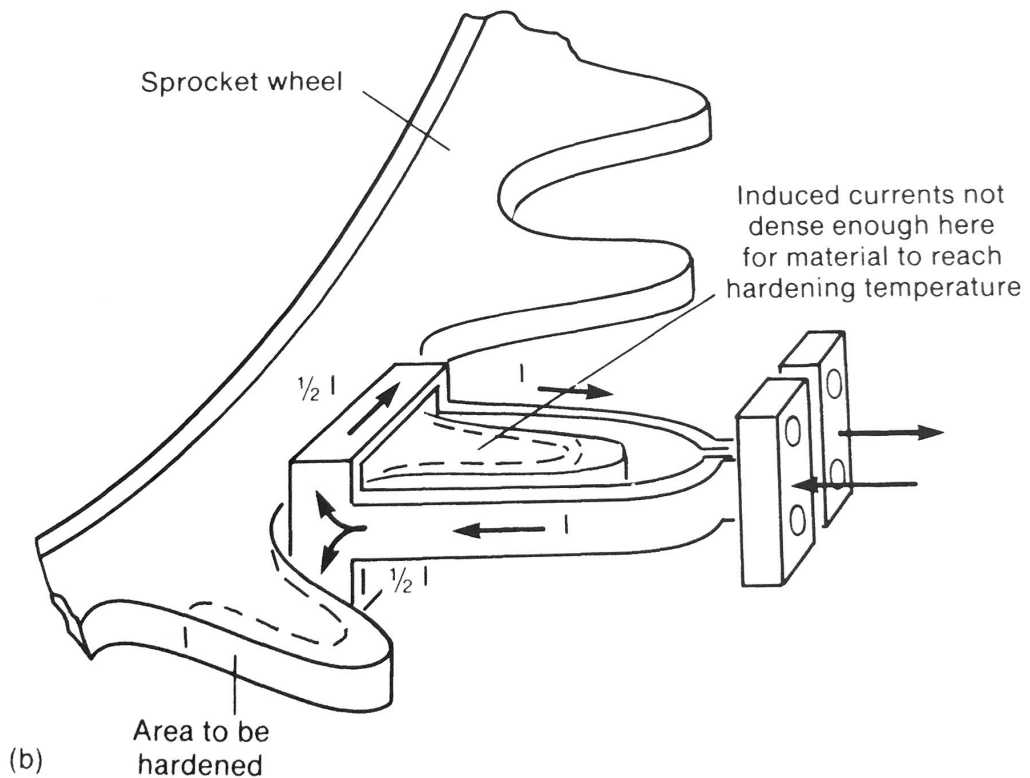
U vnitřního induktoru je nutností využívat trubky s malými rozměry, neboť je chlazení do jisté míry omezeno. Dále, vzhledem k poměrně nízké účinnosti, potřebují velmi vysoký výkon generátoru k ohřevu malých hloubek. Vzhledem k vysokým proudům, procházejícím induktorem v průběhu ohřevu, stejně tak jako k vyzařovanému teplu z povrchu vsázky je zde nutnost využít samostatného vysokotlakého napájení vody do induktoru pro dosažení optimálního průtoku. [11]

5.2.4 Speciální konstrukce induktorů

Pokud je vyžadován úzký pás tepla a ohřev musí být proveden z jedné plochy pouze pro svár, induktor na Obr. 5.8 se nabízí jako výhodný. U této konstrukce je docíleno vzniku čtyřikrát většího tepla v horní části induktoru oproti ostatním částem. Při správném vyvážení teplo vzniklé po stranách vsázku výrazně neovlivní. [11]



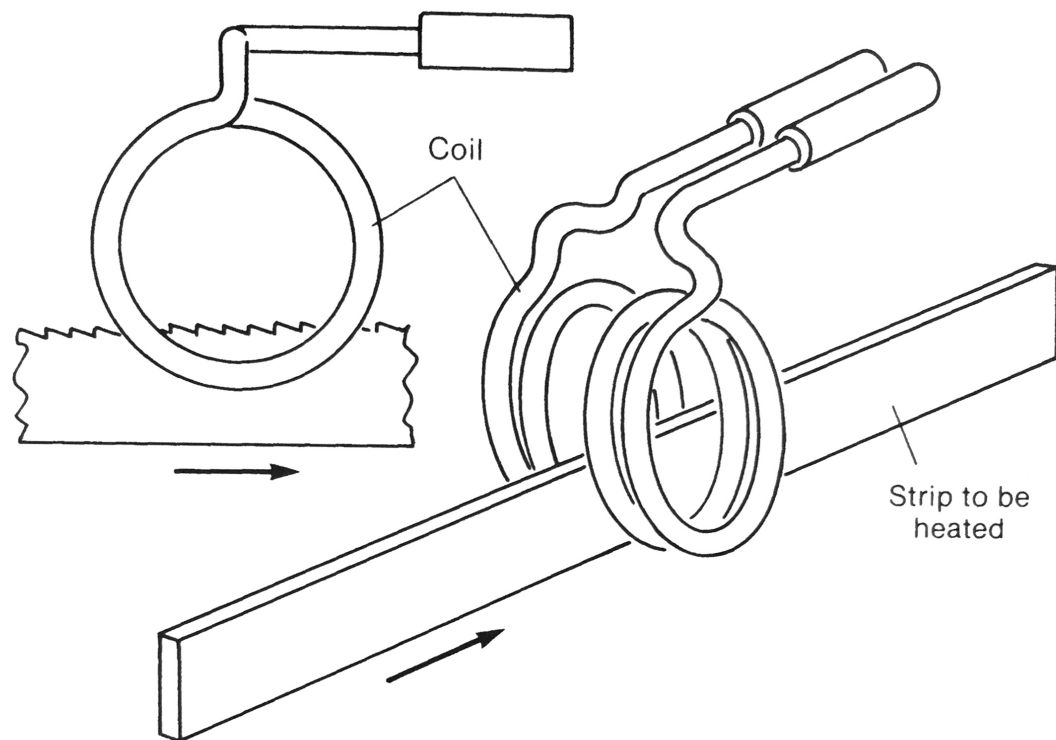
(a)



(b)

Obr. 5.8 Dva typy induktorů s rozděleným zpětným tokem [11]

Při ohřevu částí, které mají dlouhou podélnou osu a tenký průřez, se využije kruhového induktoru ovinutého kolem vsázky, tak jak je zobrazeno na Obr. 5.9. Vzhledem ke konstrukci je toto řešení účinné pouze na okrajích. [11]



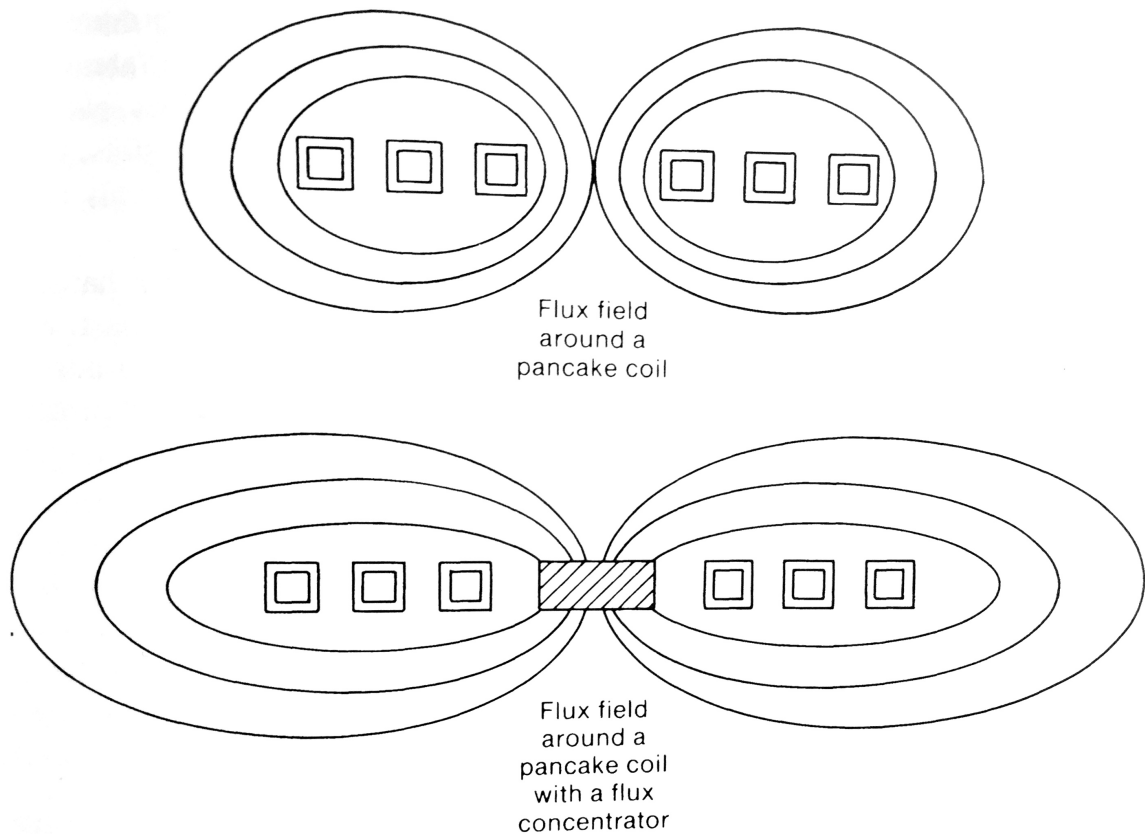
Obr. 5.9 Induktor pro ohřev tenkých plátů [11]

6 Koncentrátory, stínění a susceptory

Do značné míry je vazba mezi vsázkou a induktorem určena již známou koncepcí, jenž byla popsána v předchozí kapitole. Nicméně jsou situace často žádoucí zavedený vzor pozměnit za účelem vytvoření speciálního ohřevu nebo za účelem zvýšení energetické účinnosti. V jiných případech je zapotřebí ohřevu nevodivých materiálů. K dosažení těchto cílů poslouží tři hlavní možnosti. Mezi ně patří využití koncentrátorů, stínění a susceptorů. Tokové koncentrátory a stínění se využívají k modifikaci magnetického pole nebo k zahřátí určité části vsázky. Susceptory jsou materiály, které lze snadno indukčně zahřát. Následně je teplo využito pro ohřev nevodivých materiálů pomocí přenosu tepla vedením či zářením. [1], [11]

6.1 Koncentrátory

Při umístění v magnetickém poli mají magnetické materiály tendenci koncentrovat tok. Naopak nemagnetické materiály jako např. měď a hliník tuto vlastnost nemají a mají podobné vlastnosti jako vzduch. Klíčovou roli hraje relativní permeabilita, hodnota u vzduchu je rovna jedné oproti tomu magneticky vodivé materiály mají relativní permeabilitu přibližně v rozmezí 100-1000 v závislosti na síle magnetického pole, ve kterém jsou umístěny. Při dosažení Curieho teploty však své feromagnetické vlastnosti ztrácí a jejich permeabilita klesá k jedné. Koncentrátory jsou magnetické materiály, které jsou využívány k usměrnění toku pole nastaveného během indukčního ohřevu. Zjednodušený způsob, jak toho lze dosáhnout je zobrazen na Obr. 6.1. Zde je vidět jak koncentrátor v podobě železného jádra ovlivňuje magnetické pole obklopující induktor. Magnetický materiál představuje snadnější cestu pro siločáry, a tak jsou zde soustředěny. Tato výhoda vede ke zvýšení vířivých proudů ve vsázce. [1], [11]



Obr. 6.1 Vliv koncentrátoru na magnetické pole [11]

Materiály pro koncentrátorů jsou rozděleny do dvou základních typů:

- Vrstvené křemíkové oceli s děrováním používané při frekvencích pod 10 kHz,
- feritová jádra nebo práškové kombinace železa pro vyšší frekvence, včetně těch, které jsou v pásmu rádiových frekvencí.

Tyto plechy z křemíkové oceli pro nízko a středně frekvenční koncentrátorů jsou obvykle orientované. Takové oceli by měly v magnetickém poli tendenci dramaticky se zahřívát, pokud by nebyly ve formě vrstvené struktury. Tímto způsobem jsou minimalizovány vířivé proudy a tím i ztráty. Pro vysoké frekvence se používá prášková metalurgie a keramické materiály, protože velikosti částic materiálu musí být velmi malé. Výrobou koncentrátorů se zabývají specializované firmy jako např. firma FLUXTROL. Portfolio jejich výrobků s materiálovými vlastnostmi je uvedeno v Tab. 6.1. [15]

	Fluxtrol 100	Fluxtrol A	Fluxtrol 50	Ferrottron 559H	Alphaform LF	Alphaform MF
Hustota ($\pm 2\%$) [g/cm ³]	6,8	6,6	6,1	5,9	4,1	4
Provozní frekvence [kHz]	do 50	do 50	10-1000	402042	29221	10-1000
Maximální permeabilita [-]	130	120	55	18	13	10
Tepelná vodivost [W/cm °C]	0,23	0,2	0,06	0,04	0,02	0,02
Rezistivita [kOhmcm]	12,5	0,5	0,5	>15	>15	>15

Tab 6.1 Materiálové vlastnosti koncentrátorů vyráběných firmou Fluxtrol [15]

6.2 Stínění

V mnoha případech pole obklopující vodič může produkovat teplo tam, kde to není žádané. Například vyskytuje-li se magnetické pole na konci induktoru, nebo pokud jsou samostatné a nezávislé induktory vedle sebe, může dojít k interakci a zde využijeme stínění.

Stínění se skládá z plochých nebo tvarovaných kusů plechu hliníku či mědi. Stínění musí mít takovou tloušťku, aby bylo schopné absorbovat celé magnetické pole, kterému je vystavené. [1], [11]

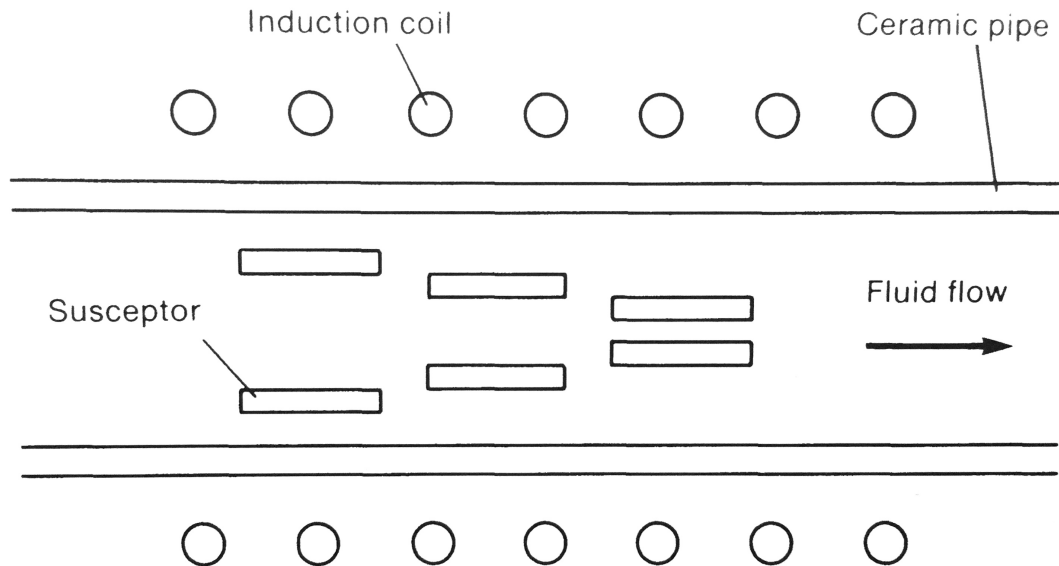
6.3 Susceptory

Susceptor je materiál, který se zahřívá v přítomnosti magnetického pole. Poté předá své teplo vsázce vedením, prouděním nebo zářením. Využívá se u případů, kdy vsázku není možné zahřát na požadovanou teplotu přímo indukci. Vzhledem k tomu, že je pouze zdrojem tepla a není součástí samotného procesu, musí susceptor vykazovat určité vlastnosti:

- Snadno lze zahřát indukci na požadovanou teplotu,
- inertní s ohledem na proces,
- jednoduše tvarovatelný či zpracovatelný.

Nejběžnější materiál je grafit, který má poměrně vysokou odolnost a je snadno zpracovatelný. Grafit byl úspěšně aplikován při teplotách až 3000 °C. V aplikacích, kde by mohlo dojít ke kontaminaci vsázky uhlíkem, se využívá jako susceptor molybden. Tento

materiál má velkou nevýhodu oproti grafitu v otázce ceny. Má výborné elektrické i mechanické vlastnosti pro indukční ohřev a lze ho použít například při slinování vysokoteplotních materiálů jako je wolfram. Ilustrace aplikování susceptoru je zobrazena na Obr. 6.2. [1], [11]



Obr. 6.2 Aplikace susceptoru pro ohřev elektricky nevodivé tekutiny proudící zkrv keramickou trubku [11]

7 Obecný matematický model

Matematický model indukčního ohřevu popisuje dvě fyzikální a navzájem sdružené pole. Těmito poli jsou pole magnetické a pole teplotní.

7.1 Model magnetického pole

Pro matematický popis magnetického pole využijeme první Maxwellovu rovnici v diferenciálním tvaru. Posuvný neboli Maxwellův proud je vůči vodivému proudu při nízkých frekvencích zanedbatelný a dochází k minimálním změnám elektrického pole. Rovnici lze zapsat vztahem

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J}, \quad (7.1)$$

kde \mathbf{H} je intenzita magnetického pole a \mathbf{J} proudová hustota. Zavedením magnetického vektorového potenciálu získáme vztah

$$\mathbf{B} = \operatorname{rot} \mathbf{A}, \quad (7.2)$$

a využitím materiálového vztahu

$$\mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H}, \quad (7.3)$$

kde \mathbf{B} je magnetická indukce, μ permeabilita, získáme tvar

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \mathbf{A} \right) = \mathbf{J}, \quad (7.4)$$

za pomoci dalšího materiálového vztahu

$$\mathbf{J} = \gamma (\mathbf{E} + \mathbf{E}_v), \quad (7.5)$$

kde γ je elektrická vodivost, \mathbf{E} intenzita elektrického pole a \mathbf{E}_v intenzita vtištěných sil a dosazením rovnic (6.5), do první rovnice (6.4) získáme parciální diferenciální rovnici

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \mathbf{A} \right) = \gamma (\mathbf{E} + \mathbf{E}_v), \quad (7.6)$$

dále je nutné vyjádřit obecnou elektrickou intenzitu \mathbf{E}' , která respektuje Lorentzův zákon a je součtem intenzit vnějšího elektrického pole a intenzity zahrnující vliv pohybu prostředí a vnějšího magnetického pole

$$\mathbf{E}' = \mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} = \mathbf{E} + \mathbf{v} \times \operatorname{rot} \mathbf{A}, \quad (7.7)$$

kde \mathbf{v} je rychlost vzájemného pohybu prostředí a magnetického pole \mathbf{B} . Dosazením (7.7) a (7.2) do druhé Maxwellovy rovnice

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (7.8)$$

získáme vztah

$$\operatorname{rot} (\mathbf{E}' - \mathbf{v} \times \operatorname{rot} \mathbf{A}) = -\operatorname{rot} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}, \quad (7.9)$$

uvedený výraz matematicky upravíme odstraněním operátoru rotace a vynásobením elektrickou vodivostí γ . Poté dosadíme vztah do rovnice (7.6) a získáme výslednou parciální diferenciální rovnici pro rozložení magnetického pole

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \mathbf{A} \right) = \gamma (\mathbf{v} \times \operatorname{rot} \mathbf{A}) - \gamma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \gamma \operatorname{grad} \varphi + \mathbf{J}_{ext}, \quad (7.10)$$

kde první člen na pravé straně rovnice popisuje pohybovou složku, druhý člen transformační, třetí potenciální a \mathbf{J}_{ext} se rovná proudové hustotě vytvořené ostatními vlivy. Převedeme-li členy na druhou stranu rovnice, dostaneme výsledný vztah

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \mathbf{A} \right) + \gamma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \gamma (\mathbf{v} \times \operatorname{rot} \mathbf{A}) = \mathbf{J}_{ext} - \gamma \operatorname{grad} \varphi, \quad (7.11)$$

tato rovnice platí obecně, tedy jak pro stacionární, tak pro nestacionární pole. Využijeme-li jako zdroj induktor, kterým prochází harmonický proud, lze použít při řešení symbolicko-komplexní metodu. [3], [17]

7.2 Model teplotního pole

Celková energetická bilance tělesa lze pomocí prvního termodynamického zákona zapsat rovnicí

$$-\oint_S \mathbf{q} dS = \int_V \frac{dw}{dt} dV - \int_V p dV, \quad (7.12)$$

kde w zobrazuje vnitřní energii tělesa, p teplo vznikající uvnitř tělesa vnějšími vlivy, kterými mohou být například Jouleovy ztráty, \mathbf{q} tepelný tok v homogenním tělese, jenž lze popsat vztahem

$$\mathbf{q} = -\lambda \operatorname{grad} T, \quad (7.13)$$

zde λ vyjadřuje tepelnou vodivost a T teplotu. Při dosazení (7.13) do rovnice (7.12) získáme vztah

$$\oint_S \lambda \operatorname{grad} T dS = \int_V \frac{dw}{dt} dV - \int_V p dV, \quad (7.14)$$

vyjádřením energie tělesa w jako součin měrné hmotnosti ρ , tepelné kapacity c_p a teploty T lze získat ekvivalent, tedy

$$\int_v \frac{dw}{dt} dV = \int_v \rho c_p \frac{dT}{dt} dV, \quad (7.15)$$

který lze dosadit do rovnice (6.13) a při využití Gauss-Ostrogradského věty, úpravě obou stran rovnice, vyjde konečný vztah

$$\operatorname{div} (\lambda \operatorname{grad} T) = \rho c_p \frac{dT}{dt} - p_j, \quad (7.16)$$

kde p_j jsou již zmíněné Jouleovy ztráty. Nahrazením úplné derivace teploty T tvarem pro kartézský souřadnicový systém tedy

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial T}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial T}{\partial y} \frac{dy}{dt}, \quad (7.17)$$

a nahrazením složek polohy danými rychlostmi v_x a v_y , získáme výslednou rovnici pro rozložení teplotního pole

$$\operatorname{div} (\lambda \operatorname{grad} T) = \rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \operatorname{grad} T \right) - p_j, \quad (7.18)$$

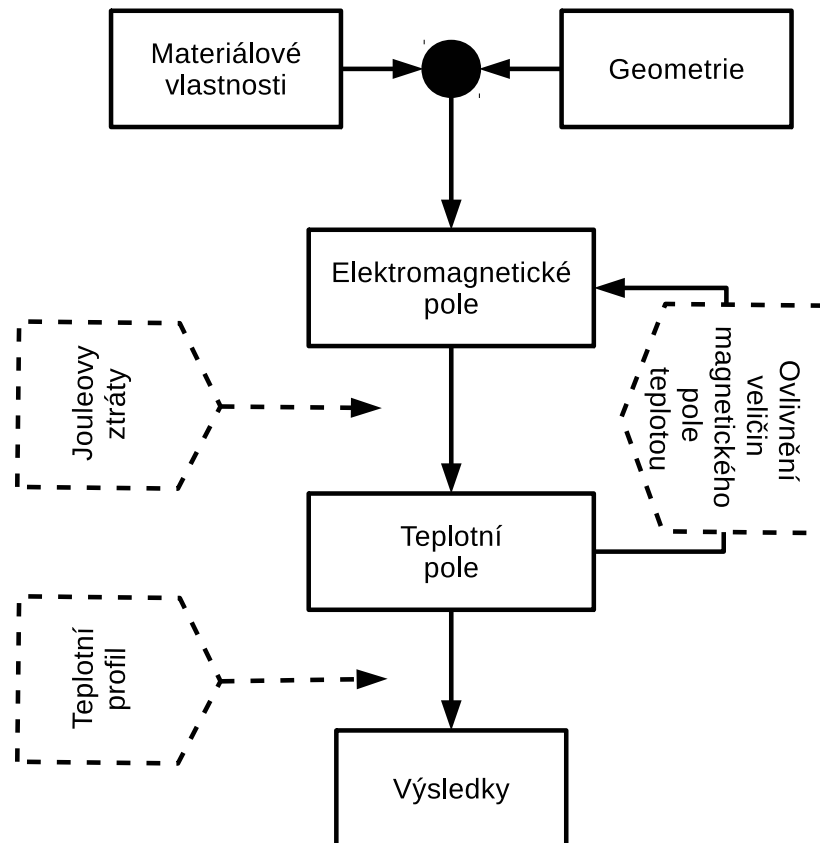
kde \mathbf{v} znamená vektor rychlosti pohybu oproti okolnímu prostředí. [3], [18]

8 Modelování vybraných příkladů

Při simulaci sdružené úlohy teplotního a magnetického pole musí být kladen důraz na fakt, že materiálové vlastnosti se s teplotou během indukčního ohřevu výrazně mění. Modelování tohoto sdruženého problému je možné pomocí výkonných počítačů použitím numerických nástrojů, např. metody konečných prvků (FEM). Tato univerzální metoda se dá aplikovat na široké spektrum úloh. Její vývoj dnes vede k verzím s vyšším řádem přesnosti s automatickou adaptivitou sítě. [12], [13]

Modelování vybraných příkladů týkajících se běžných problémů v praxi bude v této kapitole provedeno pomocí programu Agros2D. Tento program je vyvíjen na katedře teoretické elektrotechniky na Západočeské univerzitě v Plzni a je volně dostupný pro více platforem. Při řešení využívá knihovny Hermes2D založené na metodě konečných prvků vyšších řádů přesnosti. Příklady se týkají slabě sdružených úloh, konkrétně kombinace teplotního a magnetického pole. Program řeší rozložení magnetického pole a výpočet měrných Jouleových ztrát p_j , které vzniknou v ohřívaném tělese. Pomocí těchto ztrát, které znázorňují zdroj tepla, je poté řešen časový vývoj rozložení teplotního pole. Celý tento postup je znázorněn na Obr. 8.1. [10], [14]

Během vysokofrekvenčního ohřevu se indukovaný proud obvykle nevyskytuje ve vsázce rovnoměrně, nýbrž je koncentrován na povrchu. Tento jev může zapříčinit špatné nebo nechtěné výsledky ohřevu, proto indukční ohřev musí být správně a pečlivě optimalizován. Výběr vhodného tvaru induktoru obvykle závisí na dobrých zkušenostech.



Obr.8.1 Postup řešení sdruženého problému, překresleno z[11]

8.1 Okrajové a počáteční podmínky

Při modelování úloh je nutné určit podmínky na rozhraní dvou prostředí a tím zajistit jednoznačnost řešení.

8.1.1 Okrajové podmínky magnetického pole

Dirichletova okrajová podmínka pro magnetické pole

$$A(\Gamma, t) = \mathbf{0}, \quad (8.1)$$

tuto podmínku využijeme při antisymetrii. Neumannova okrajová podmínka pro magnetické pole

$$\frac{\partial A(\Gamma, t)}{\partial r} = \mathbf{0}, \quad (8.2)$$

zde platí symetrie pole i oblasti.

8.1.2 Okrajové podmínky teplotního pole

Dirichletova okrajová podmínka pro teplotní pole

$$T_{\Gamma} = T(x, y, z), \quad (8.3)$$

zde známe povrchovou teplotu. Nulová Neumannova okrajová podmínka

$$\frac{\partial T_{\Gamma}}{\partial n} = 0, \quad (8.4)$$

jedná se o dokonale izolovaný povrch, dále pak využijeme vztah pro tepelný tok

$$-\lambda \frac{\partial T_{\Gamma}}{\partial n} = q', \quad (8.5)$$

vztah pro konvekci

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T - T_{ext}), \quad (8.6)$$

kde α vyjadřuje koeficient přestupu tepla, T teplotu vsázky a T_{ext} teplotu okolního prostředí. Poslední rovnice vyjadřuje vztah pro radiaci

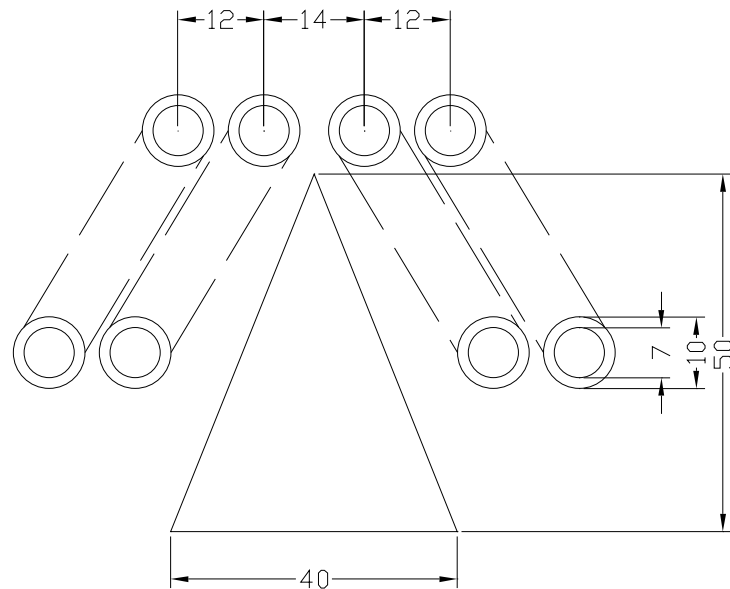
$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \varepsilon \sigma (T^4 - T_{ext}^4), \quad (8.7)$$

kde ε znázorňuje emisivitu povrchu a σ Stefan-Boltzmannovu konstantu. Při nízkých teplotách lze přenos tepla sáláním zanedbat. [10]

8.2 Ilustrativní příklad indukčního kalení hrany razicího stroje

Problém kalení razicího stroje se v praxi nejčastěji řeší ohřevem pomocí laseru, tato metoda však s sebou nese určitá rizika a nevýhody. Hlavní nevýhodou je ohřev v částech, kdy se hlava s laserem musí otáčet, tím dojde k minimální časové odchylce při ohřevu určité části a důsledkem je nerovnoměrný ohřev. Následkem bývá, že razicí stroj má sníženou životnost a v přehřátých částech hrana praská.

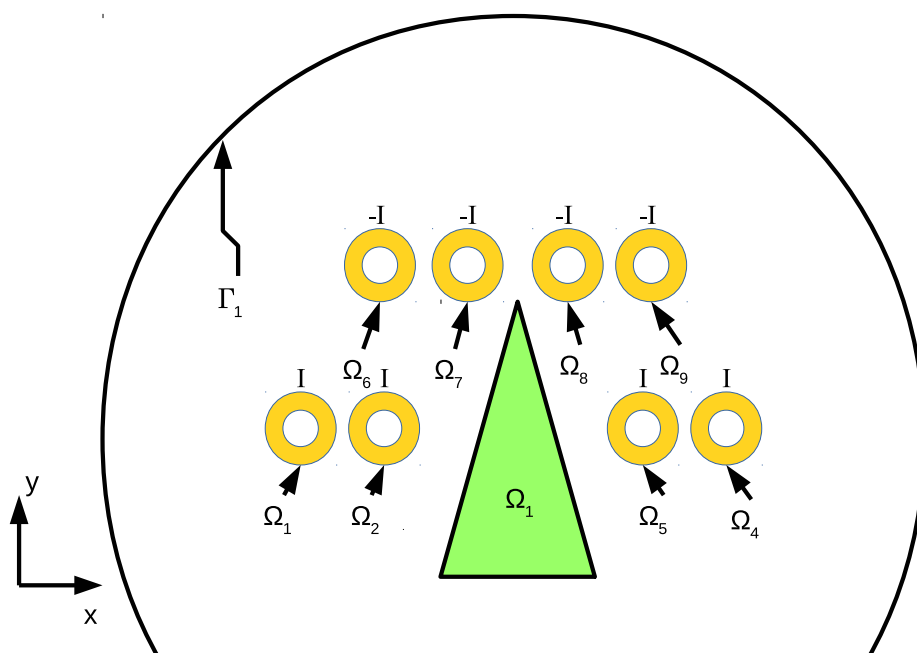
Základní rozměry počítaného modelu jsou znázorněny na Obr. 8.2, výška kalené hrany je 50 mm vysoká a její základna je široká 40 mm. Indukční cívka sestává ze dvou závitů na každé straně hrany. Vnitřní průměr vodičů je 7 mm a vnější 10 mm. U induktoru je počítáno, že bude chlazen vodou a napájen střídavým harmonickým proudem o velikosti 1000 A a frekvenci 10 kHz. Sledovány jsou body v rozmezí 1 mm až 5 mm postupně od nejvyššího bodu v ose hrany.



Obr. 8.2 Rozměry modelu kalení hrany

8.2.1 Model magnetického pole pro indukční kalení hrany razícího stroje

Definiční oblast modelu magnetického pole hrany razícího stroje (Obr. 8.3) tvoří několik oblastí. Oblast vsázky Ω_1 , oblasti induktoru Ω_2 - Ω_9 a oblast okolního vzduchu ohraničená hranicí Γ_1 .



Obr. 8.3 Definiční oblast modelu magnetického pole

Tento model magnetického pole indukčního ohřevu popisuje rovnice (7.11) uvedená v kapitole 7.1

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \underline{\mathbf{A}} \right) + j\omega\gamma \underline{\mathbf{A}} = \underline{\mathbf{J}}_{ext} \quad (8.8)$$

Při využití harmonického zdroje, lze využít symbolicko-komplexní metody a počítat tak s fázory. Tato rovnice jde pro větší přehled rozepsat pro jednotlivé oblasti ohřevu. Oblast vsázky Ω_1 neobsahuje žádné budící proudy a rovnice je zjednodušena na tvar

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \underline{\mathbf{A}} \right) + j\omega\gamma \underline{\mathbf{A}} = \mathbf{0}, \quad (8.9)$$

oblasti induktoru Ω_2 - Ω_9 nezahrnují vířivé proudy a rovnice je dána vztahem

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \underline{\mathbf{A}} \right) + j\omega\gamma \underline{\mathbf{A}} = \underline{\mathbf{J}}_{ext}, \quad (8.10)$$

poslední oblastí je oblast vzduchu, ve které se nenacházejí ani vířivé proudy ani budící proudy, relativní permeabilita se rovná jedné a rovnice má tvar

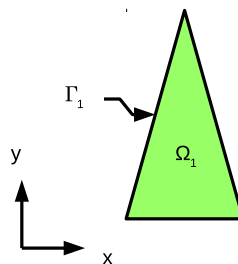
$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu_0} \operatorname{rot} \underline{\mathbf{A}} \right) = \mathbf{0}, \quad (8.11)$$

zavedená hranice Γ_1 vymezuje oblast magnetického pole. Na této hranici za podmínky dostatečné vzdálenosti od magnetického obvodu platí okrajová podmínka (8.1), kde vektorový potenciál se rovná nule, tedy

$$\underline{\mathbf{A}} = \mathbf{0}. \quad (8.12)$$

8.2.2 Model teplotního pole pro indukční kalení hrany razícího stroje

Oblast modelu teplotního pole (Obr. 8.4) se skládá pouze z oblasti vsázky Ω_1 , Γ_1 je pak hranice modelu.



Obr. 8.4 Definiční oblast modelu teplotního pole

Model teplotního pole vychází z Fourier-Kirchhoffovy parciální rovnice (7.18), popsané v kapitole 7.2

$$\operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - p_j, \quad (8.13)$$

pro hranici Γ_1 platí rovnice respektující přestup tepla prouděním ve tvaru

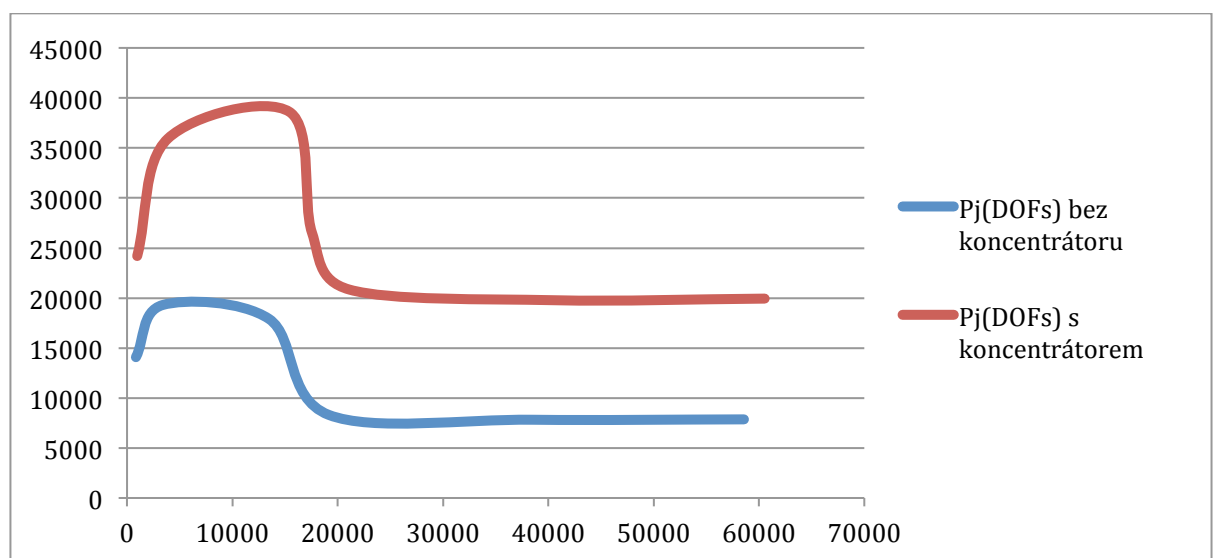
$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T - T_{ext}). \quad (8.14)$$

8.2.3 Konvergence řešení

V aplikaci Agros2D bylo pro výpočet nastaveno ruční zjemnění sítě h a řádu polynomu na elementu p . V Tab. 8.1 jsou uvedeny hodnoty Jouleových ztrát p_j , magnetické energie W_m , a počet stupňů volnosti DOFs. Z tabulky a Obr. 8.5, jenž udává konvergenci výpočtu, je patrné, že hodnoty h - p 0-1, 1-1, 0-2, 1-2, 2-2, nejsou pro řešení vhodné, jelikož výsledky mohou být zkreslené. K dalším výpočtům bylo zvoleno nastavení hodnot h - p 2-3.

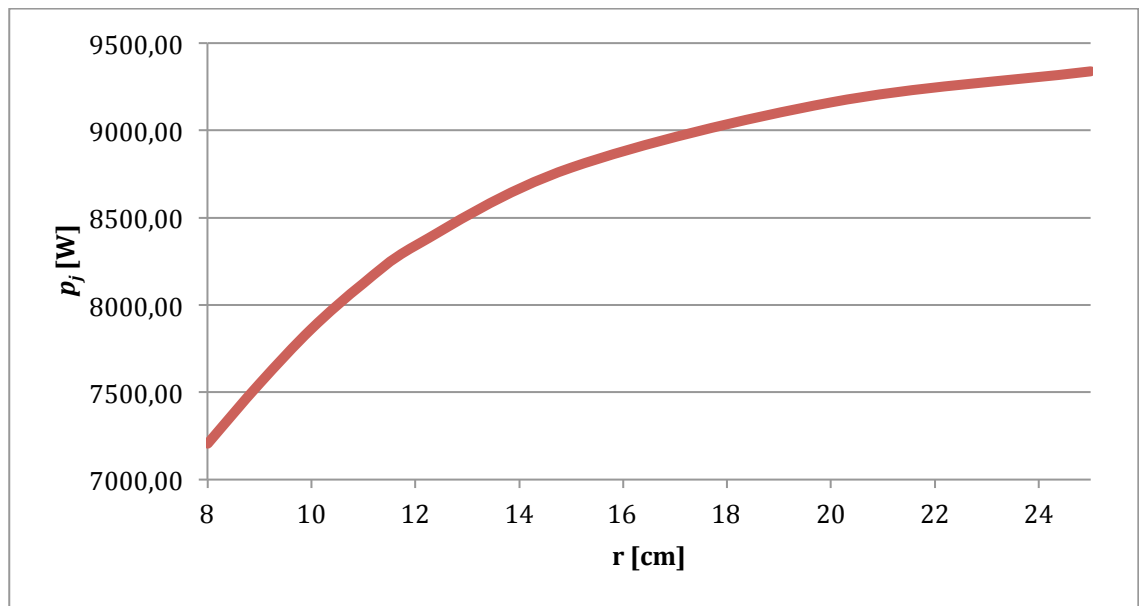
h - p	p_j [W]	W_m [J]	DOFs
0-1	14080	5,93E-05	869
1-1	19300	6,18E-04	3383
1-2	17920	3,30E-03	13463
2-2	11320	1,99E-02	17831
2-3	8312	3,69E-02	19151
3-3	7826	4,34E-02	38483
3-4	7863	4,41E-02	58571

Tab. 8.1 Konvergence výsledků



Obr. 8.5 Závislost Jouleových ztrát na počtu stupňů volnosti

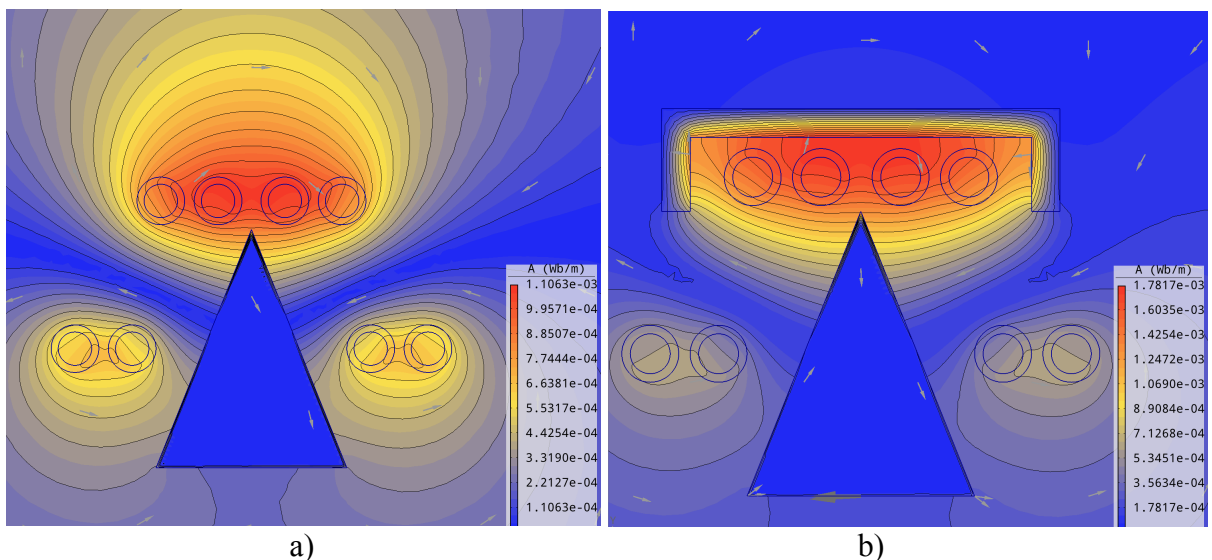
Na Obr. 8.6 může být viděn vliv vzdálenosti okrajové podmínky pro vektorový potenciál $A=0$.



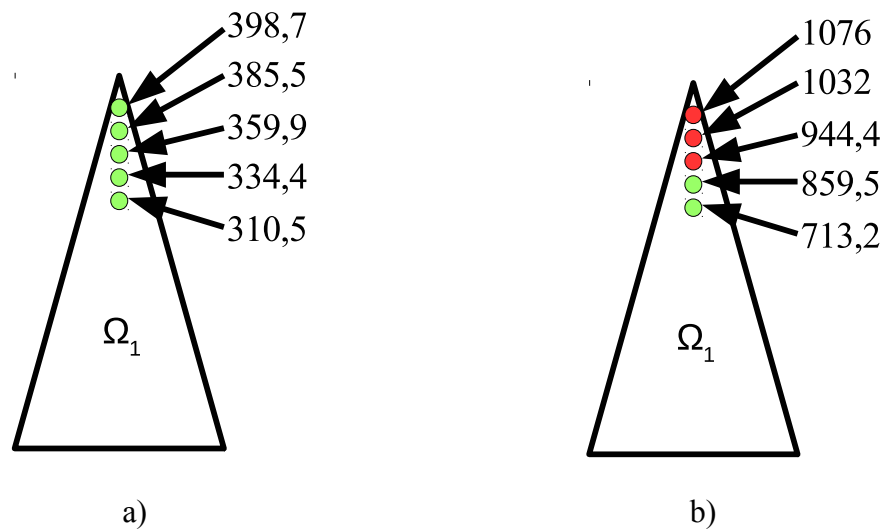
Obr 8.6 Závislost Jouleových ztrát na poloměru hranice okrajové podmínky

8.2.4 Výsledky řešení

Pro porovnání byly řešeny dvě varianty. První variantou Obr. 8.7 a) bylo řešení bez koncentrátoru a druhou Obr. 8.7 b) řešení s využitím koncentrátoru. Z Obr. 8.8 lze vyčíst, že přítomnost koncentrátoru výrazně zvýšila účinnost ohřevu a umožnila zakalení ohřívané hrany do hloubky tří milimetrů, kde se teplota dostala nad austenitizační teplotu A_{c3} , naznačeno červenou barvou. Uvnitř naopak těleso nedosáhne teploty A_{c3} , zůstane nezakaleno, jak je naznačeno zelenou barvou a nezmění svoji krystalickou strukturu. Těleso si tedy zachová svoji houževnatost.



Obr. 8.7 Rozložení vektorového potenciálu a) bez koncentrátoru, b) s koncentrátorem

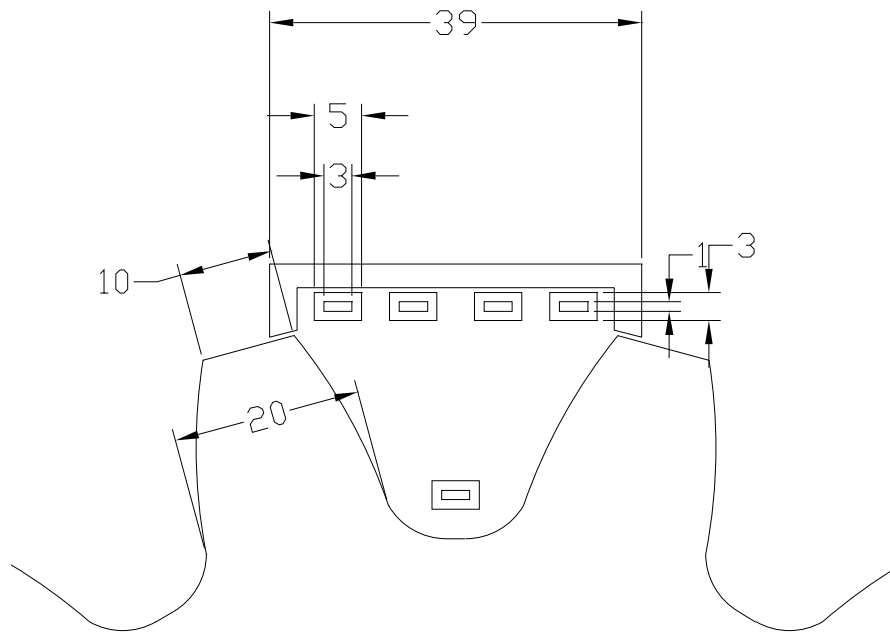


Obr. 8.8 Teploty ve °C ohřívání vsázky do hloubky 5 mm a) bez koncentrátoru, b) s koncentrátorem

8.3 Ilustrativní příklad povrchové kalení ozubeného kola

Vzhledem k silně zakřivenému tvaru ozubeného kola a přesně definované povrchové části, která má být zakalena, je tento ohřev poměrně složitý a náročný. Následující podkapitola se věnuje jedné z možností indukčního kalení ozubeného kola. Mimo této alternativy se běžně používá technika ohřevu pomocí jednozávitového induktoru okolo celého kola menších rozměrů. Pro rozměrově větší kola se pak jednotlivé zuby kalí samostatně zub po zubu.

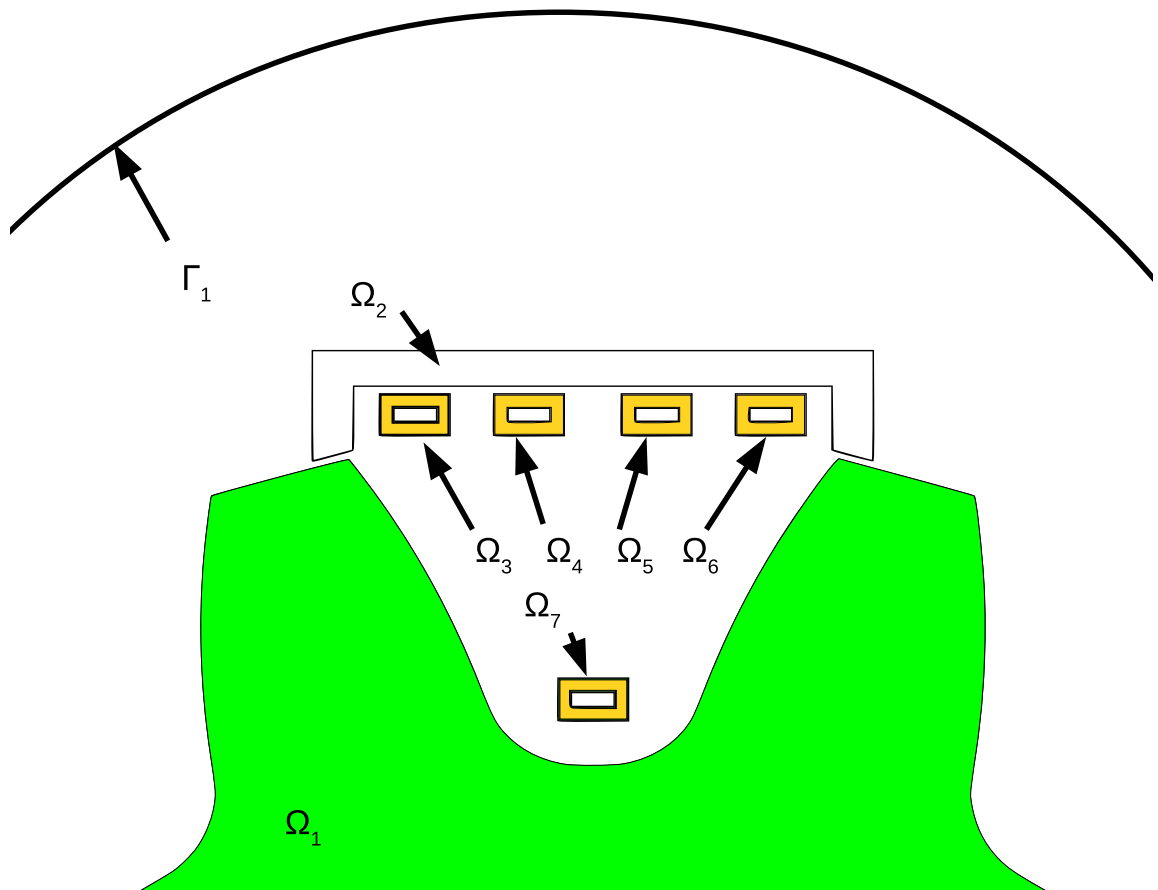
Základní rozměry počítaného modelu jsou znázorněny na Obr. 8.9, první indukční cívka sestává ze čtyř závitů a druhá přidaná pro výpočet dalších variant z jednoho závitů. Na obrázku je zobrazen pouze výřez bez vodičů s opačným směrem proudu. Rozměry vodičů jsou 5x3 mm pro vnější hrany a 3x1 mm pro vnitřní hrany. U induktoru je počítáno, že bude chlazen vodou a napájen střídavým harmonickým proudem o velikosti 1000 A a frekvenci 10 kHz. Sledovány jsou body u povrchu zubu jak je naznačeno na Obr. 8.15.



Obr. 8.9 Rozměry modelu kalení ozubeného kola

8.3.1 Model magnetického pole pro povrchové kalení ozubeného kola

Definiční oblast modelu magnetického pole povrchového kalení ozubeného kola (Obr. 8.10) tvoří několik oblastí. Oblast vsázky Ω_1 , oblasti induktoru Ω_3 - Ω_7 , oblast koncentrátoru Ω_2 a oblast okolního vzduchu ohraničenou hranicí Γ_1 , která je v obrázku naznačena.



Obr. 8.10 Definiční oblast modelu magnetického pole

Tento model magnetického pole indukčního ohřevu opět vychází z rovnice (7.11) uvedené v kapitole 7.1

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \underline{\mathbf{A}} \right) + j\omega\gamma \underline{\mathbf{A}} = \underline{\mathbf{J}}_{ext} \quad (8.15)$$

Tato rovnice lze opět pro větší přehled rozepsat pro jednotlivé oblasti ohřevu. Oblast vsázky Ω_1 a koncentrátoru Ω_2 neobsahuje žádné budící proudy a rovnice je zjednodušená na tvar

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \underline{\mathbf{A}} \right) + j\omega\gamma \underline{\mathbf{A}} = \mathbf{0}, \quad (8.16)$$

oblasti induktoru Ω_3 - Ω_4 nezahrnují vířivé proudy a rovnice je dána vztahem

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \underline{\mathbf{A}} \right) + j\omega\gamma \underline{\mathbf{A}} = \underline{\mathbf{J}}_{ext}, \quad (8.17)$$

poslední oblastí je oblast vzduchu, ve které se nenacházejí ani vířivé proudy ani budící proudy, relativní permeabilita se rovná jedné a rovnice má tvar

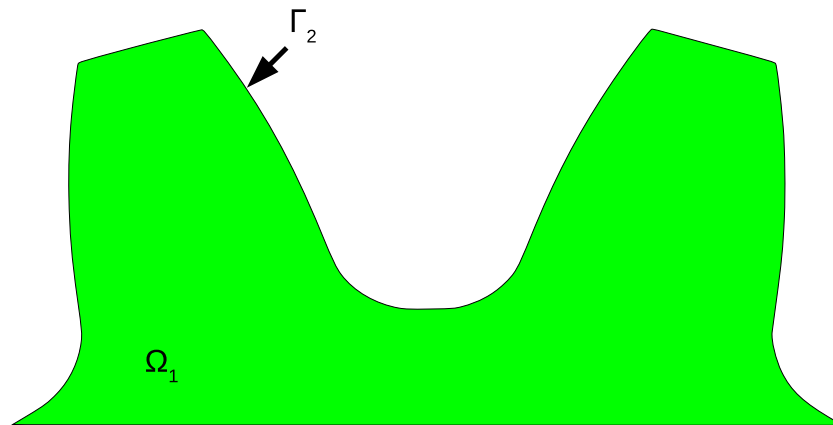
$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu_0} \operatorname{rot} \underline{A} \right) = \mathbf{0}, \quad (8.18)$$

zavedená hranice Γ_1 vymezuje oblast magnetického pole. Na této hranici za podmínky dostatečné vzdálenosti od magnetického obvodu platí okrajová podmínka (8.1), kde vektorový potenciál se rovná nule, tedy

$$\underline{A} = \mathbf{0}. \quad (8.19)$$

8.3.2 Model teplotního pole pro povrchové kalení ozubeného kola

Oblast modelu teplotního pole ozubeného kola je zobrazena na obr. 8.11 a skládá se z oblasti ohřívaného tělesa Ω_1 , Γ_2 je pak hranice modelu.



Obr. 8.11 Definiční oblast modelu teplotního pole

Model teplotního pole vychází z Fourier-Kirchhoffovy parciální rovnice (7.18), popsané v kapitole 7.2

$$\operatorname{div} (\lambda \operatorname{grad} T) = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - p_j, \quad (8.20)$$

pro hranici Γ_2 platí rovnice pro přestup tepla prouděním ve tvaru

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha (T - T_{ext}). \quad (8.21)$$

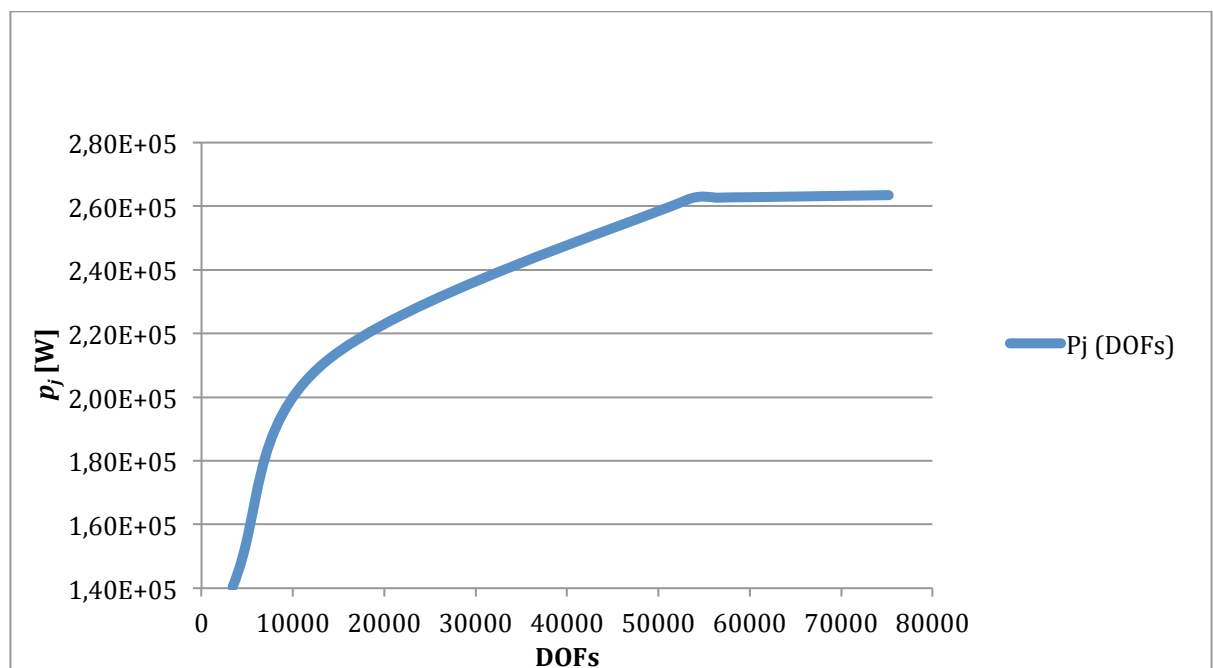
8.3.3 Konvergence řešení

V aplikaci Agros2D bylo pro výpočet nastaveno ruční zjemnění sítě h a řádu polynomu na elementu p . V Tab. 8.2 jsou uvedeny hodnoty Jouleových ztrát p_j , magnetické energie W_m , a počet stupňů volnosti DOFs. Z tabulky a Obr. 8.12, jenž udává konvergenci výpočtu, je patrné, že hodnoty h - p 0-1, 1-1, nejsou pro řešení vhodné, jelikož výsledky mohou být

zkreslené. K dalším výpočtům bylo zvoleno hodnoty $h-p$ a ruční zjemnění sítě v oblasti vsázky.

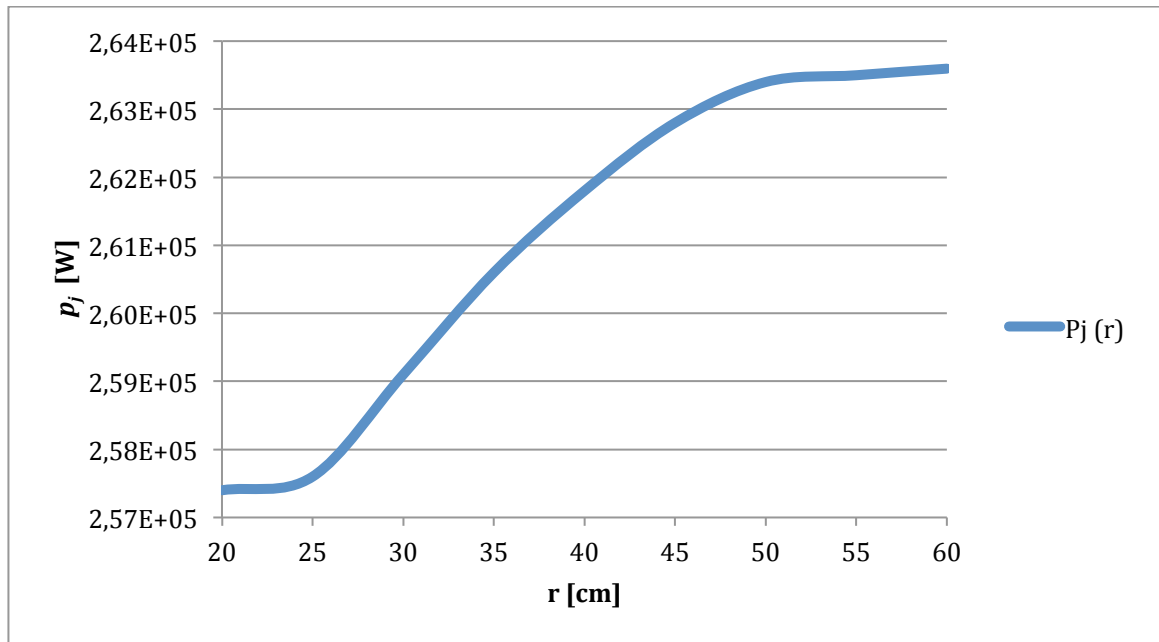
$h-p$	p_i [W]	W_m [J]	DOFs
0-1	1,40E+05	2,22E-02	3429
1-1	2,11E+05	1,77E-01	13413
1-2	2,62E+05	1,243	53193
1-2 (zjemněna síť v oblasti vsázky)	2,62E+05	1,243	53913
1-2 (zjemněna síť v oblasti vsázky)	2,62E+05	1,243	54105
1-2 (zjemněna síť v oblasti vsázky)	2,63E+05	1,243	56295
1-2 (zjemněna síť v oblasti vsázky)	2,63E+05	1,243	61065
1-2 (zjemněna síť v oblasti vsázky)	2,63E+05	1,243	75195

Tab. 8.2 Konvergence řešení



Obr. 8.12 Závislost Jouleových ztrát na počtu stupňů volnosti

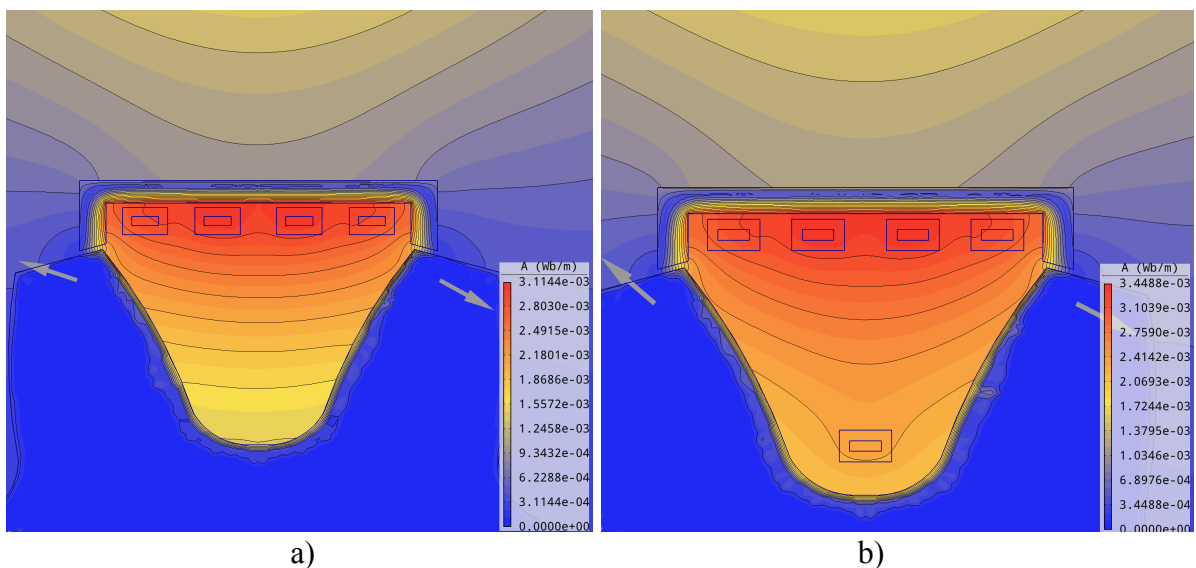
Na Obr. 8.13 může být viděn vliv vzdálenosti okrajové podmínky pro vektorový potenciál $A=0$.

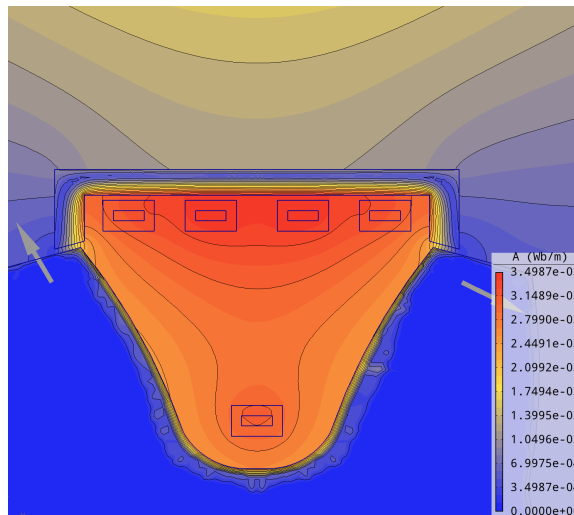


Obr. 8.13 Závislost Jouleových ztrát na poloměru hranice okrajové podmínky

8.3.4 Výsledky řešení

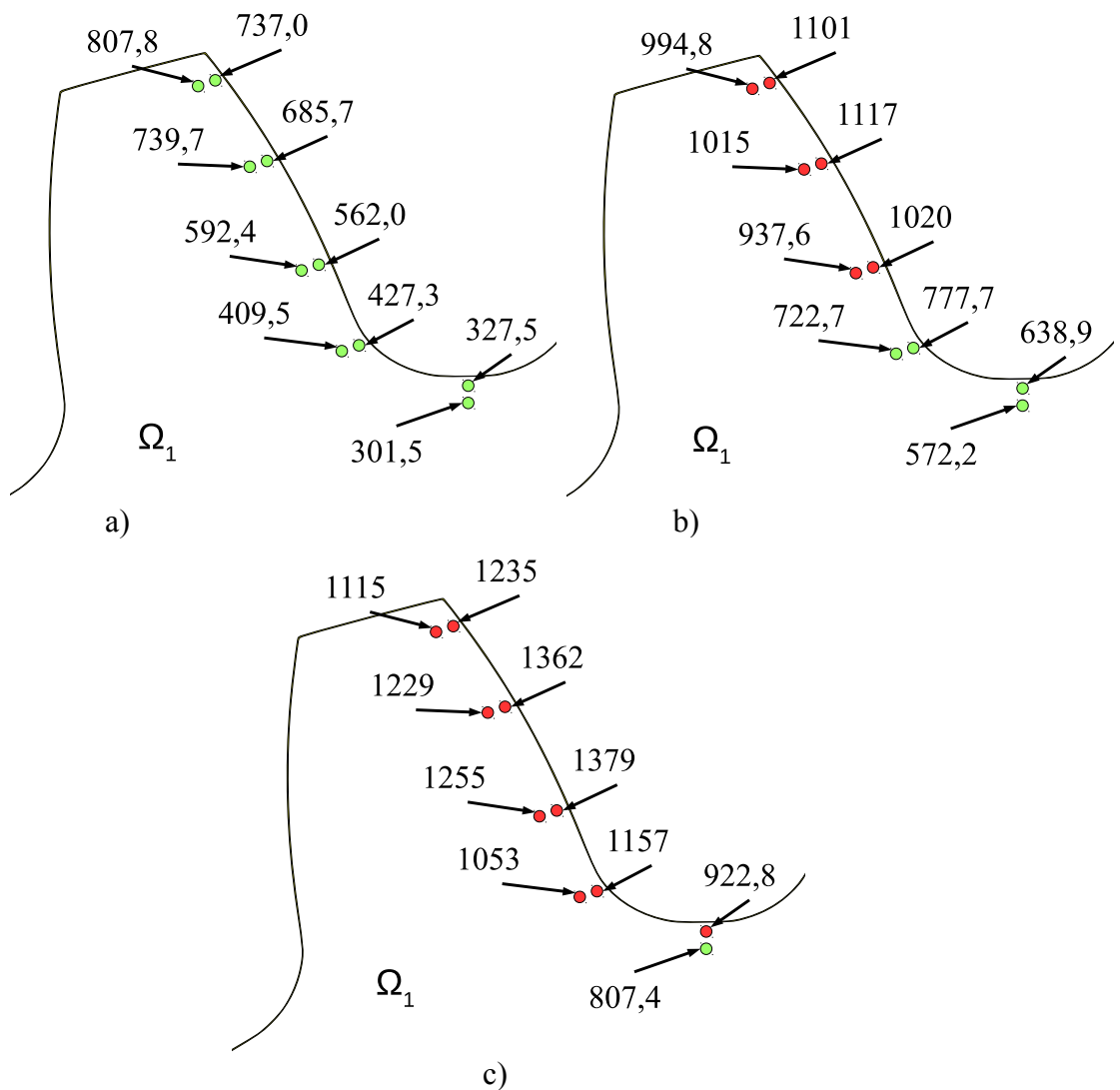
Pro porovnání byly řešeny 3 varianty ohřevu ozubeného kola. Vektorový potenciál je zobrazen na Obr. 8.14. První variantou byl ohřev za přítomnosti jednoho induktoru o čtyřech závitěch a proudu 1000 A. Při této variantě, jak je zobrazeno na Obr. 8.15 a) nedošlo k zakalení povrchové vrstvy po 10 s ohřevu. Zelené body na obrázku znázorňují teplotu pod A_{c3} a červené body teplotu nad A_{c3} . V druhé variantě byl přidán induktor o jednom závitě a proudu 1000 A. Zde došlo k výraznému zlepšení a z Obr. 8.15 b) je vidět, že došlo k zakalení části povrchové vrstvy. Pro třetí variantu byl optimalizován proud induktoru se čtyřmi závitěmi na 900 A, pro přidání jednozávitového induktoru byl proud upraven na 1800 A. Bylo dosaženo lepších hodnot jak je vidět z Obr. 8.15 c).





c)

Obr. 8.14 Rozložení vektorového potenciálu pro jednotlivá řešení



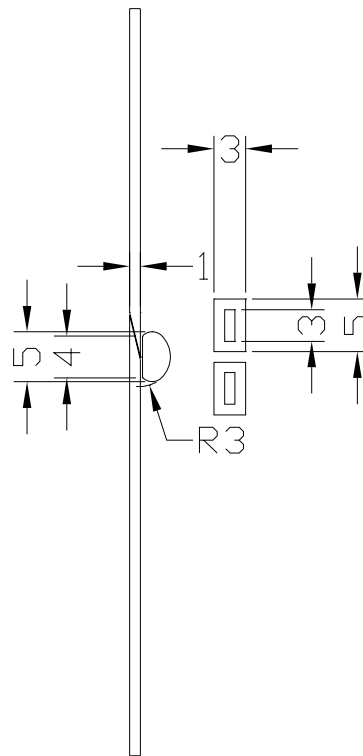
c)

Obr. 8.15 Hodnoty teplot ve °C na povrchu ozubeného kola a) bez přidaného závitu, b) s přidaným závitem, c) s přidaným závitem a optimalizovanými proudy

8.4 Ilustrativní příklad pájení dvou trubek

Tato podkapitola se věnuje indukčnímu pájení a spojení dvou hliníkových trubek. Jedná se o ohřev zakřivené části v podobě pájky. V příkladu se porovnává možnost ohřevu bez a za pomoci koncentrátoru, při modelování je využito řešení problému jako osově symetrického.

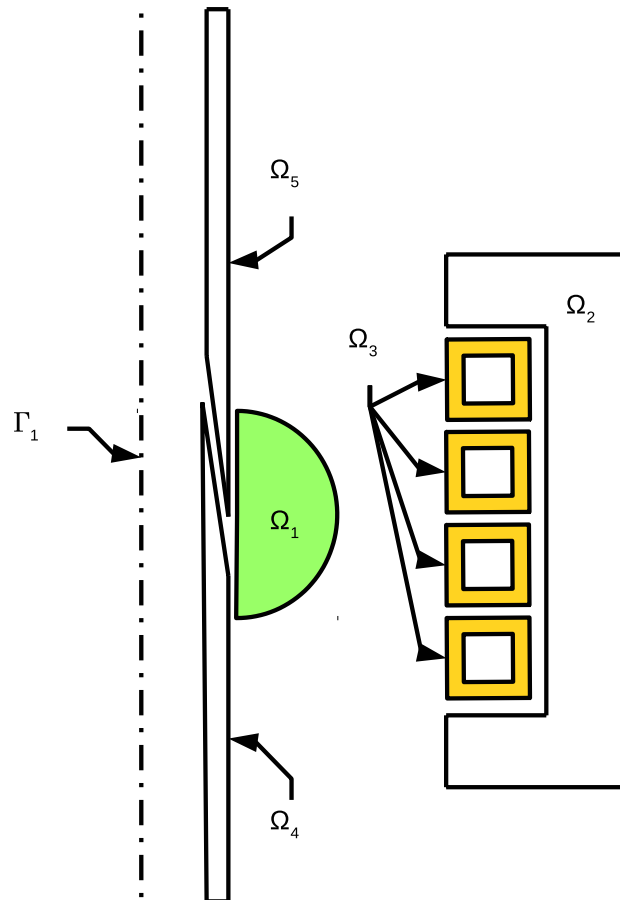
Základní rozměry počítaného modelu jsou znázorněny na Obr. 8.16, poloměr pájky je 3 mm a v nejširším místě je široká 5 mm. Indukční cívka sestává ze dvou závitů. Rozměry vodičů jsou 5x3 mm vnější hrany a 3x1 mm vnitřní hrany. U induktoru je počítáno, že bude chlazen vodou a napájen střídavým harmonickým proudem o velikosti 960 A a frekvenci 10 kHz.



Obr. 8.16 Rozměry modelu spojování trubek

8.4.1 Model magnetického pole pájení dvou trubek

Definiční oblast modelu magnetického pole pájení (Obr. 8.17) tvoří několik oblastí. Oblast pájky Ω_1 , oblasti induktoru Ω_3 , oblast koncentrátoru Ω_2 , oblast trubek $\Omega_{4,5}$, oblast okolního vzduchu ohraničenou hranicí Γ_2 , která není na obrázku vyznačena a hranice Γ_1 představující osu symetrie modelu.



Obr. 8.17 Definiční oblast modelu magnetického pole

Tento model magnetického pole indukčního ohřevu opět vychází z rovnice (7.11) uvedené v kapitole 7.1

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \underline{\mathbf{A}} \right) + j\omega\gamma \underline{\mathbf{A}} = \underline{\mathbf{J}}_{ext} \quad (8.22)$$

Tato rovnice lze opět pro větší přehled rozepsat pro jednotlivé oblasti ohřevu. Oblast vsázky Ω_1 , koncentrátoru Ω_2 a oblasti trubek Ω_4 a Ω_5 neobsahují žádné budící proudy a rovnice je zjednodušena na tvar

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \underline{\mathbf{A}} \right) + j\omega\gamma \underline{\mathbf{A}} = \mathbf{0}, \quad (8.23)$$

oblasti induktoru Ω_3 nezahrnují vířivé proudy a rovnice je dána vztahem

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \underline{\mathbf{A}} \right) + j\omega\gamma \underline{\mathbf{A}} = \underline{\mathbf{J}}_{ext}, \quad (8.24)$$

poslední oblastí je oblast vzduchu, ve které se nenacházejí ani vířivé proudy ani budící proudy, relativní permeabilita se rovná jedné a rovnice má tvar

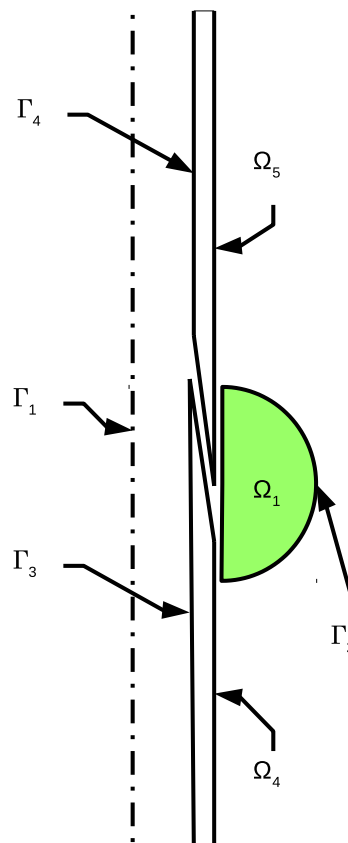
$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu_0} \operatorname{rot} \underline{A} \right) = \mathbf{0}, \quad (8.25)$$

zavedené hranici Γ_1 představující osu symetrie modelu je nutné předepsat okrajovou podmínku, stejně tak jako hranici Γ_2 vymežující oblast magnetického pole. Na této hranici za podmínky dostatečné vzdálenosti od magnetického obvodu platí okrajová podmínka (8.1), kde vektorový potenciál se rovná nule, tedy

$$\underline{A} = \mathbf{0}. \quad (8.26)$$

8.4.2 Model teplotního pole pájení dvou trubek

Oblast modelu teplotního pole pájení je zobrazena na obr. 8.18 a skládá se z oblasti ohřívání pájky Ω_1 a dvou spojovaných trubek Ω_4 a Ω_5 , Γ_1 , Γ_2 , Γ_3 , Γ_4 představují hranice modelu.



Obr. 8.18 Definiční oblast modelu teplotního pole

Model teplotního pole vychází z Fourier-Kirchhoffovy parciální rovnice (7.18), popsané v kapitole 7.2

$$\operatorname{div} (\lambda \operatorname{grad} T) = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - p_j, \quad (8.27)$$

pro hranici Γ_1 je nulový tepelný tok přes hranici a platí zde Neumannova okrajová podmínka

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = 0, \quad (8.28)$$

pro hranici $\Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4$ platí rovnice pro přestup tepla prouděním ve tvaru

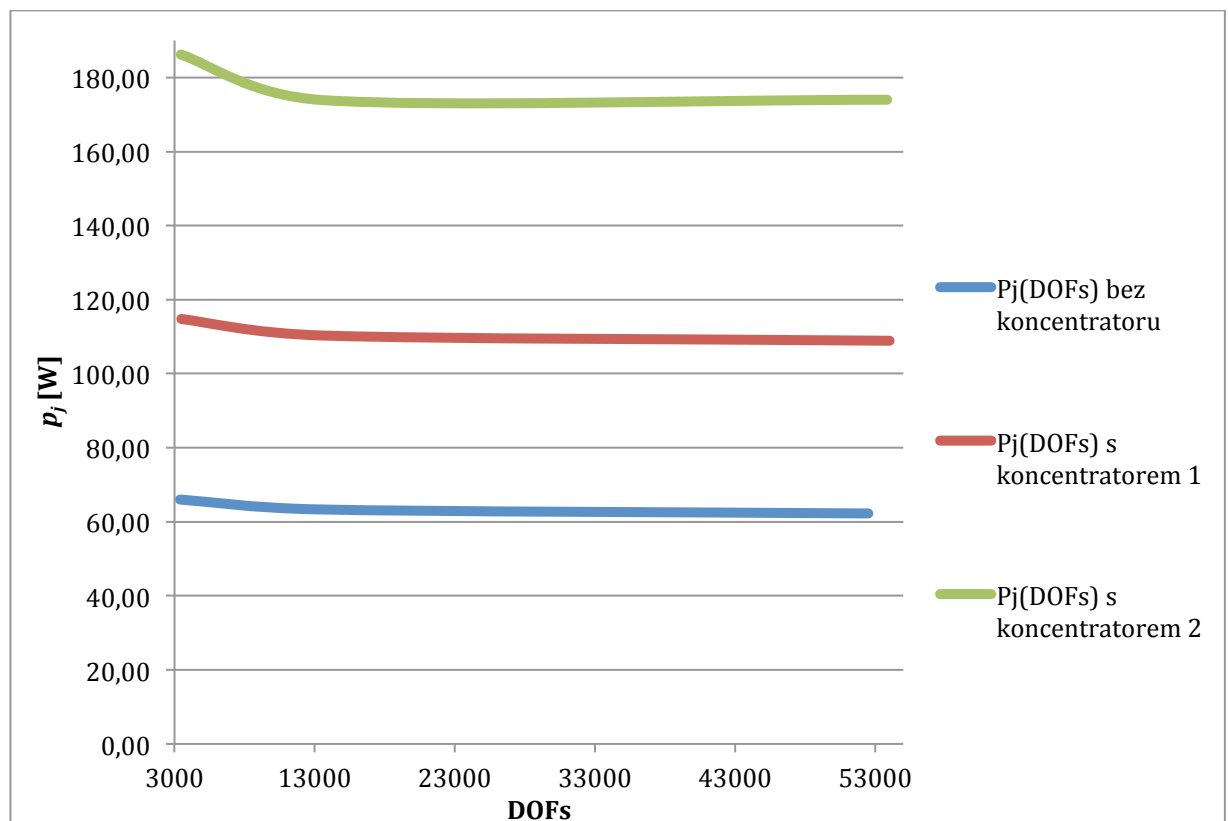
$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T - T_{ext}). \quad (8.29)$$

8.4.3 Konvergence řešení

V aplikaci Agros2D bylo pro výpočet nastaveno ruční zjemnění sítě h a řádu polynomu na elementu p . V Tab. 8.3 jsou uvedeny hodnoty Jouleových ztrát p_j , magnetické energie W_m , teploty vsázky a počet stupňů volnosti DOFs. Z tabulky a Obr. 8.19 je patrné, že hodnoty $h-p$ 0-1, 1-1 a 0-2 nejsou pro řešení vhodné, jelikož výsledky mohou být zkreslené. K výpočtu bylo zvoleno nastavení hodnot $h-p$ 1-2.

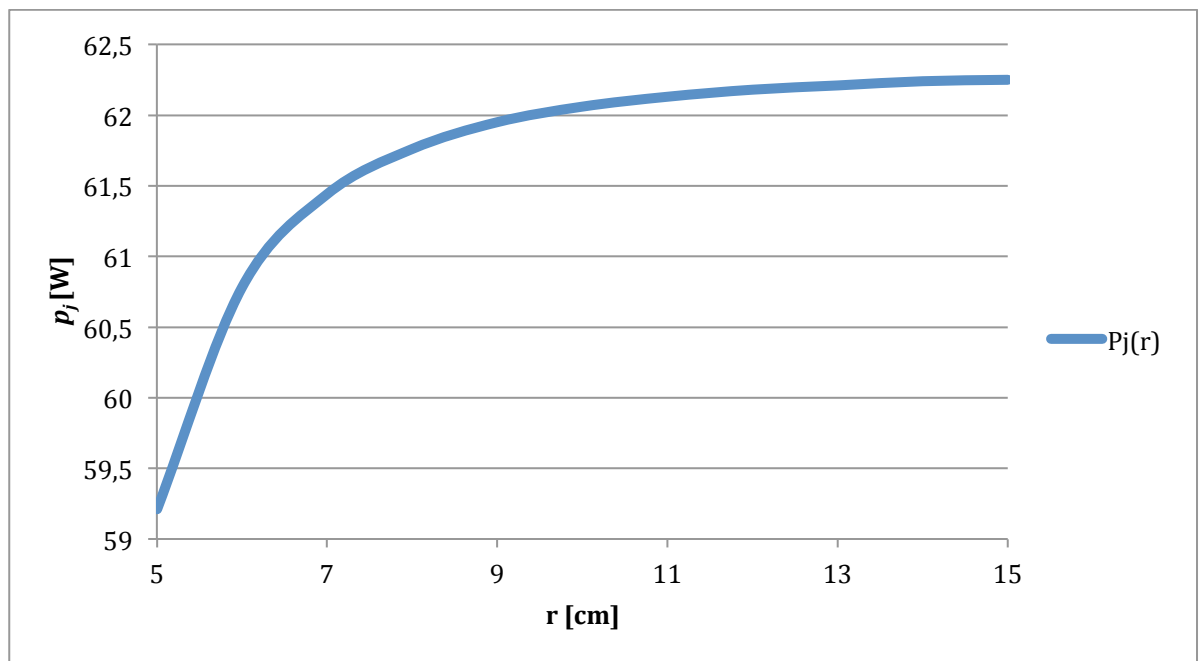
$h-p$	P_j	W_m	DOFs	Teplota vsázky
0-1	66,05	4,16E-04	3380	544,52
1-1	63,34	4,40E-04	13247	548,20
0-2	62,34	4,48E-04	13247	540,58
1-2	62,25	4,48E-04	52505	539,84

Tab. 8.3 Konvergence řešení



Obr. 8.19 Závislost Jouleových ztrát na počtu stupňů volnosti

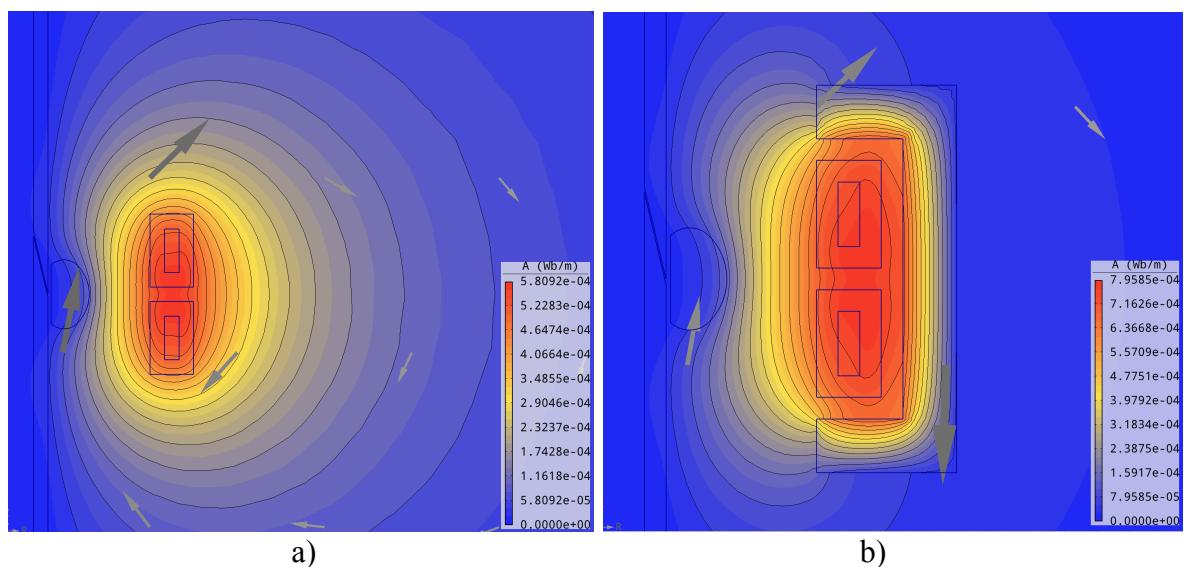
Na Obr. 8.20 může být viděn vliv vzdálenosti okrajové podmínky pro vektorový potenciál $A=0$.

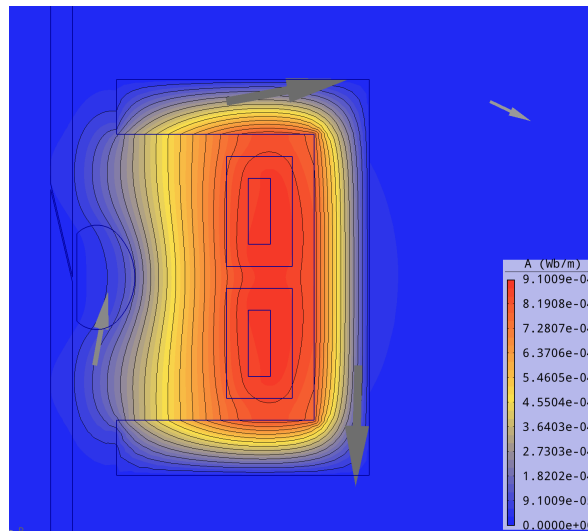


Obr. 8.20 Závislost Jouelových ztrát na poloměru hranice okrajové podmínky

8.4.4 Výsledky řešení

Pro srovnání byly porovnány 3 varianty řešení problému, výchozím řešením byl ohřev s využitím jednoduchého induktoru zobrazeno na Obr. 8.21 a), druhou variantou byl výpočet proveden s využitím koncentrátoru zobrazeno na Obr. 8.21 b), stejně tak jako poslední výpočet zobrazeno na Obr. 8.21 c), kde byla pozměněna konstrukce koncentrátoru.

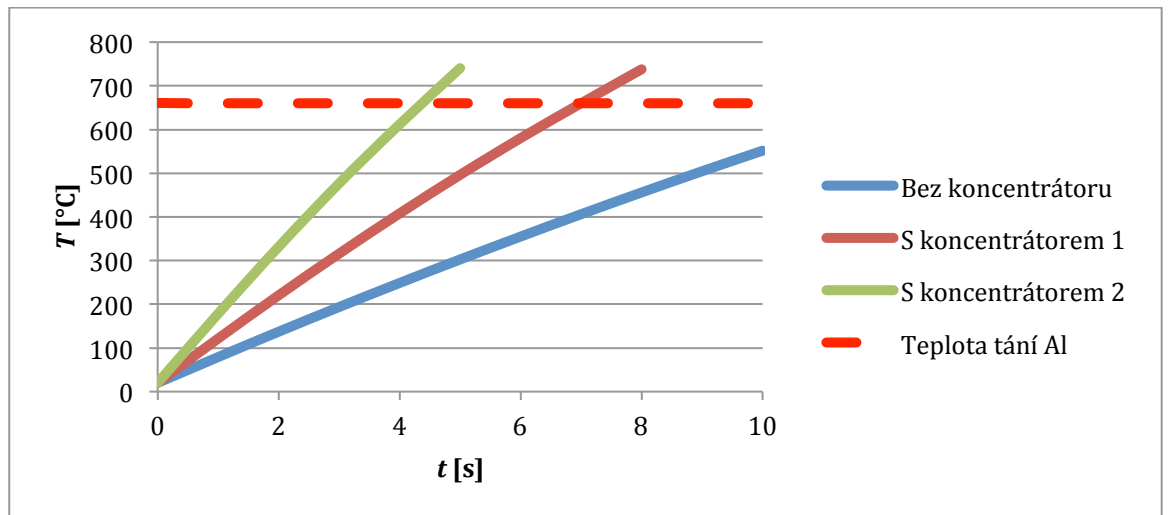




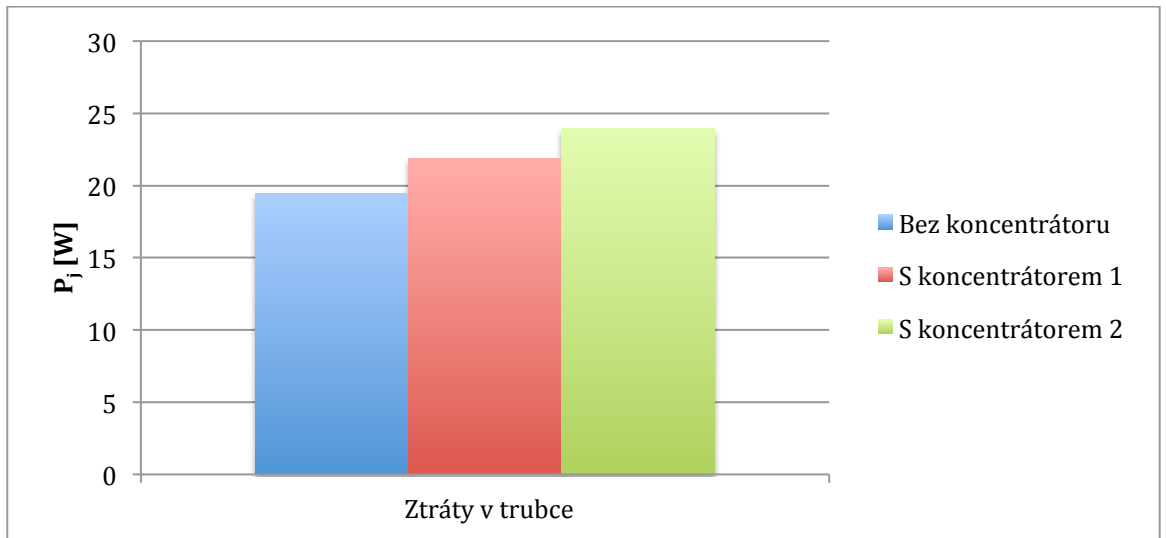
c)

Obr 8.21. Rozložení vektorového potenciálu a) bez koncentrátoru, b) s koncentrátorem, c) s upraveným koncentrátorem

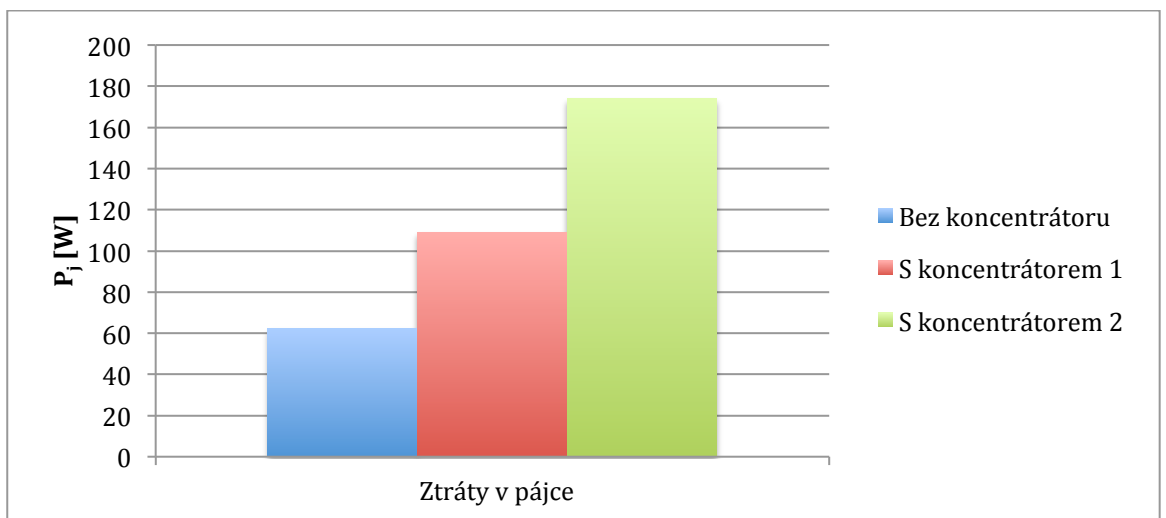
Průběh vypočtených teplot pájky v závislosti na čase pro jednotlivé varianty je zobrazen v Obr 8.22. Z tohoto obrázku lze také vysledovat výrazné zlepšení účinnosti ohřevu v závislosti na zvolené variantě konstrukce induktoru a jeho přídatných prvků. Zatímco v první variantě se teplota za 10 s nevyšplhala ani na teplotu tání hliníku $660,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, při použití koncentrátoru se to podařilo již za 7 s a u poslední varianty s upraveným koncentrátorem dokonce za 4,5 s. Jak je vidět na Obr. 8.23 nechtěné ztráty v trubce se zvýšily pouze minimálně, oproti tomu Obr. 8.24 ukazuje výrazný nárůst žádaných ztrát v pájce.



Obr. 8.22 Hodnoty průběhu teploty v čase v závislosti na variantě



Obr. 8.23 Ztráty v trubce pro jednotlivé varianty



Obr. 8.24 Ztráty v pájce pro jednotlivé varianty

Závěr

Cílem této závěrečné diplomové práce bylo vytvoření studie indukčního ohřevu těles se silně zakřivenými plochami. Práce byla rozdělena do tří hlavních částí (seznámení s problematikou, rešerše provedení induktorů a matematický model, praktické příklady a jejich zhodnocení). Nejprve byla pozornost zaměřena na teoretické seznámení s danou problematikou a poté na konkrétní praktická řešení, která byla simulována a počítána v programu Agros2D.

V teoretické části byl popsán princip magnetického indukčního ohřevu, bez jehož pochopení by nebylo možné vytvořit simulaci reálných modelů. Metoda indukčního ohřevu je jednou z mnoha a proto teoretická část obsahuje další způsoby tepelného zpracování kovů. Důležité také bylo popsat prostředí a vlastnosti materiálů, protože těchto poznatků pak bylo následně využito při výpočtech.

Po obecném seznámení čtenáře je popisován induktor, jeho tvary a využití. Bylo zapotřebí shrnout základní typy induktorů a jejich principy (tj. základní konstrukční úvahy). Nedílnou součástí této části byl i popis základních konstrukcí induktorů a jejich následné využití. V praxi, ale pro indukční ohřev není použití induktorů dostačující, jelikož jejich výroba do specifických tvarů je náročná a musí se využít další možnosti pro zvýšení efektivity ohřevu. Pro zvýšení účinnosti se využívá koncentrátorů, stínění a susceptorů. Všechny tyto zlepšující způsoby byly taktéž zmíněny. Po získání všech důležitých informací a poznatků byl vytvořen obecný matematický model.

V praktické části bylo zpracováno několik příkladů, se kterými se lze v soudobé technické praxi setkat. Pro každý příklad byl sestaven matematický model indukčního ohřevu. Poté bylo postupně zkoumáno, které varianty kombinace induktoru s přídatným prvkem by mohly být pro daný typ plochy nejúčinnější a nejjednodušší pro výrobu. Ve všech případech se potvrdilo, že využití koncentrátoru při ohřevu výrazně zvyšuje jeho efektivitu.

V prvním příkladu se ukázal značný vliv způsobu navinutí induktoru a směry proudů pro zakalení špičky kalené hrany. Na omezeném prostoru této práce byl ukázán pouze jeden vybraný způsob, u kterého nadále byly rozvinuty varianty bez koncentrátoru a s koncentrátorem.

Ve druhém příkladu bylo zpracováno alternativní a více variabilní řešení kalení ozubeného kola, oproti standardní používané metodě jednozávitového induktoru, kde induktor

musí být vyroben pro každý rozměr kola zvlášť. U zvolené alternativy je nadále řešen zásadní vliv přidaného závitu uvnitř zubu a ovlivnění velikostí proudů na zakalení potřebné plochy.

Ve třetím příkladu byl porovnáván jednak čas potřebný pro pájení trubek, ale také vliv konstrukce koncentrátoru na ztráty v trubce a ztráty v pájce. Konstrukce s přetaženým koncentrátorem oproti jednoduchému koncentrátoru měla za následek pomalé zvyšování ztrát v trubce, potřebné pro zahřátí trubky pro lepší spojení, ale také výrazný nárůst ztrát v pájce a tudíž k rychlejšímu pájení.

Seznam literatury

- [1] RUDNEV, V. *Handbook of induction heating*. New York: Marcel Dekker, 2003. 777 s. Manufacturing engineering and materials processing; 61. ISBN 0-8247-0848-2.
- [2] MAYER, D. *Pohledy do minulosti elektrotechniky: objevy, myšlenky, vynálezy, osobnosti*. 2., dopl. vyd. České Budějovice: Kopp, 2004. 427 s. ISBN 80-7232-219-2.
- [3] MACH, František. *Rotační ohřev nemagnetických válců ve stacionárním magnetickém poli*. Plzeň, 2011. Diplomová práce (Ing.). Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Pavel Karban.
- [4] SKÁLOVÁ, J. a BENEDIKT, V. *Nauka o kovech*. 2. vyd. Plzeň: ZČU, 1992. 192 s.
- [5] KRAUS, V. *Tepelné zpracování a slinování*. 3. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2013. 273 s. ISBN 978-80-261-0260-1.
- [6] MAYER, D. *Dějiny elektrotechniky*. 1.vyd. Plzeň: ZČU, 1997. 148 s. ISBN 80-7082-376-3.
- [7] KYNCL, J. *Návrh výkonové řady kanálkových pecí*. Habilitační přednáška, FEL ČVUT, Praha, 2003.
- [8] ČERNÝ, V. *Indukční ohřev*. Repetorium. ELEKTRO: Časopis pro elektrotechniku. 2002- č. 10,11,12, 2003- č. 1,2,3.
- [9] SERGEANT, P., HECTORS, D., DUPRÉ, L., VAN REUSEL, K. *Magnetic Shielding of Levitation Melting Devices*, In: IEEE transactions on magnetics, vol. 46, no. 2, 2010.
- [10] KARBAN, Pavel. *Zpracování kovových materiálů s využitím elektromagnetického pole a počítačového modelování příslušných procesů*. [habilitační práce]. Plzeň: Západočeská univerzita, 2010. 168 l.
- [11] ZINN, Stanley a SEMIATIN, S. L. *Elements of induction heating: design, control and applications*. Palo Alto: EPRI, Electric Power Research Institut, [2011]. 335 s. ISBN 978-0-87170-308-8.
- [12] BOADI, A., TSUCHIDA, Y., TODAKA, T. a ENOKINOZO, M. *Designing of suitable construction of high-frequency induction heating coil by using finite-element method*. Faculty of Engineering, Oita University, Japan [2005]
- [13] ENOKIZONO, M. a HASAMA, S. *Thermal and magnetic field analysis of high frequency induction heating by finite element method*. in Proc. ISEM, vol. 1. Amsterdam, The Netherlands.

- [14] DOLEŽEL, Ivo. *Příklady sdružených úloh*. Učební text. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická.
- [15] FUXTROL. *Fluxtrol Soft Magnetic Composites* [online]. Fluxtrol, Inc., 2013 [cit. 2015 – 2-14]. Dostupné z: <http://fluxtrol.com>.
- [16] GLÜCK, B.: *Heizwasser Netze*. VEB Verlag für Bauwesen Berlin. Berlin 1985.
- [17] MAYER, Daniel. *Teorie elektromagnetického pole*. 3. Vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2001. ISBN 80-7082-826-9.
- [18] KARBAN, Pavel. *Teplotní pole*. Učební text. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, 2014.