

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektroenergetiky a ekologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Tvarová optimalizace koncentrátoru pro indukční ohřev
upínací hlavy**

Originál (kopie) zadání

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce se zaměřuje na velmi aktuální problematiku, kterou je tepelné upínání nástrojů. Hlavním cílem této práce je vytvoření přehledného úvodu do problematiky tepelného upínání a pomocí zvoleného příkladu a jeho numerického modelu analyzovat možnosti využití indukčního ohřevu. V úvodu práce jsou popsány požadavky na upnutí nástrojů a různé způsoby upínání. V další kapitole se nachází popis celého systému tepelného upínání, kde je uveden princip upínání, vlastnosti použitých materiálů, výhody, nevýhody a porovnání různých druhů upínacích zařízení. Následně pokračuje matematický model, kde jsou popsána všechna využitá pole a optimalizace geometrie koncentrátoru. V závěru práce se nachází ilustrativní příklad upínání a vyhodnocení výsledků.

Klíčová slova

Tepelné upínání, konvenční upínání, magnetické pole, teplotní pole, pole termoelastických deformací, numerický model, metoda konečných prvků, tvarová optimalizace, koncentrátor.

Abstract

The present diploma thesis is focused on a very current issue, which is the thermal clamping of the tools. The main aim of this work is to create a clear introduction to the problem of thermal clamping and to use the selected example and its numerical model to analyze the possibilities of induction heating. At the beginning of the thesis there are described the requirements for clamping of tools and various methods of clamping. In the next chapter is described the whole system of thermal clamping, where the principle of clamping, properties of used materials, advantages, disadvantages and comparison of different types of clamping devices are given. Subsequently, the mathematical model is presented, describing all used fields and optimizing the concentrator geometry. At the end of the thesis there is an illustrative example of clamping and evaluation of results.

Keywords

Thermal clamping, conventional clamping, magnetic field, temperature field, field of thermo elastic deformations, numerical model, finite element method, shape optimization, concentrator.

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: 18. 5. 2017

Bc. Lukáš ŠIMANDL

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Václavu Kotlanovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce, dále pak děkuji mým rodinným příslušníkům a přátelům za podporu při tvorbě této diplomové práce.

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	8
SEZNAM TABULEK.....	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ČÁST I. - DIPLOMOVÁ PRÁCE.....	10
1 UPÍNÁNÍ NÁSTROJŮ.....	12
1.1 POŽADAVKY UPÍNÁNÍ NÁSTROJŮ	12
1.2 ZPŮSOBY UPÍNÁNÍ NÁSTROJŮ DO UPÍNACÍ HLAVY	12
1.3 KONVENČNÍ UPÍNÁNÍ.....	13
1.4 MODERNÍ UPÍNÁNÍ.....	17
2 SYSTÉM TEPELNÉHO UPÍNÁNÍ.....	19
2.1 PRINCIP.....	19
2.2 MATERIÁL	21
2.3 ZPŮSOB UPÍNÁNÍ.....	21
2.4 VÝHODY	23
2.5 POROVNÁNÍ RŮZNÝCH DRUHŮ UPÍNACÍCH ZAŘÍZENÍ	24
3 MATEMATICKÝ MODEL.....	25
3.1 ELEKTROMAGNETICKÉ POLE.....	25
3.2 TEPLTNÍ POLE.....	25
3.3 POLE TERMOELASTICKÝCH DEFORMACÍ	26
4 OPTIMALIZACE.....	27
4.1 METODA MONTE CARLO	27
4.2 METODA NELDER MEAD	29
4.3 METODA BOBYQA	31
5 PATENTY	32
6 ILUSTRATIVNÍ PŘÍKLAD.....	38
6.1 DEFINICE PROBLÉMU	38
6.2 GEOMETRIE	38
6.3 STANOVENÍ PROUDOVÉ HUSTOTY	39
6.4 DEFINOVÁNÍ MATEMATICKÉHO MODELU	40
6.5 VÝSLEDKY.....	43
7 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ.....	55
8 SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	57
9 SEZNAM PATENTŮ	58
ČÁST II. - PŘÍLOHY.....	59

Seznam obrázků

OBR. 1: SCHÉMA RŮZNÝCH ZPŮSOBŮ UPNUTÍ NÁSTROJE DO UPÍNACÍ HLAVY	13
OBR. 2: PRINCIP UPÍNÁNÍ SYSTÉMU TRIBOS	14
OBR. 3: POLYGONÁLNÍ UPÍNACÍ TECHNIKA JE PATENTOVANÝM VÝROBKEM FIRMY SCHUNK	14
OBR. 4: ZNÁZORNĚNÍ UPÍNACÍ JEDNOTKY	15
OBR. 5: UNIVERZÁLNÍ UPÍNAČ SINO S PEVNÝMI DEFORMAČNÍMI SEGMENTY	16
OBR. 6: UPÍNÁNÍ TYPU COROMANT CAPTO	17
OBR. 7: PRINCIP HYDRAULICKÉHO UPÍNÁNÍ	18
OBR. 8: PŮVODNÍ STAV.....	19
OBR. 9: ZAHŘÁTÍ UPÍNACÍ HLAVY	20
OBR. 10: VSUNUTÍ NÁSTROJE DO UPÍNACÍ HLAVY	20
OBR. 11: OCHLAZENÍ UPÍNACÍ HLAVY	20
OBR. 12: ZNÁZORNĚNÍ TEPLoty UPÍNACÍ HLAVY	21
OBR. 13: SROVNÁNÍ RŮZNÝCH SYSTÉMŮ UPÍNÁNÍ V ZÁVISLOSTI PŘENÁŠENÉHO KROUTICÍHO MOMENTU NA UPÍNACÍ PRŮMĚR NÁSTROJE.....	24
OBR. 14: SOUŘADNICE STŘEDU JEHLY	29
OBR. 15: NÁKRES METODY.....	30
OBR. 14: NÁKRES PATENTOVANÉHO UPÍNAČE	32
OBR. 15: NÁKRES ZAŘÍZENÍ S CHLADICÍ JEDNOTKOU	33
OBR. 16: ZAŘÍZENÍ BILZ.....	34
OBR. 17: NÁKRES ZAŘÍZENÍ PRO TEPELNÉ UPÍNÁNÍ A UVOLŇOVÁNÍ NÁSTROJŮ	35
OBR. 18: REÁLNÁ PODOBA ZAŘÍZENÍ	36
OBR. 19: NÁKRES SKLÍČIDLA	37
OBR. 20: NÁKRES UPÍNACÍ HLAVY.....	38
OBR. 21: ZOBRAZENÍ PARAMETRŮ CÍVKY.....	39
OBR. 22: DEFINOVANÉ OBLASTI	41
OBR. 23: ŘEŠENÉ OBLASTI V ELEKTROMAGNETICKÉM POLI	41
OBR. 24: ŘEŠENÉ OBLASTI V TEPLOTNÍM POLI A POLI TERMOELASTICKÝCH POSUNŮ	42
OBR. 25: ZNÁZORNĚNÍ ZVĚTŠENÍ OTVORU HLAVY.....	44
OBR. 26: ZNÁZORNĚNÍ IDEÁLNÍ VZDÁLENOSTI INDUKTORU OD UPÍNACÍ HLAVY	45
OBR. 27: ZNÁZORNĚNÍ ROZTAŽNOSTI HLAVY OD OSY SYMETRIE.....	45
OBR. 28: ZNÁZORNĚNÍ NEVHODNĚ ZVOLENÉ VZDÁLENOSTI INDUKTORU OD UPÍNACÍ HLAVY	46
OBR. 29: ZNÁZORNĚNÍ ROZTAŽNOSTI HLAVY OD OSY SYMETRIE.....	46
OBR. 30: ZNÁZORNĚNÍ ZVĚTŠENÍ OTVORU HLAVY V ZÁVISLOSTI NA DÉLCE OHŘEVU.....	47
OBR. 31: ZNÁZORNĚNÍ ZVĚTŠENÍ OTVORU HLAVY V ZÁVISLOSTI NA DÉLCE OHŘEVU.....	48
OBR. 32: SCHÉMA KONCENTRÁTORU.....	49
OBR. 33: MĚŘENÉ ČÁSTI UPÍNACÍ HLAVY	50
OBR. 34: VARIANTA BEZ KONCENTRÁTORU	51
OBR. 35: VARIANTA S KONCENTRÁTOREM	51
OBR. 36: METODA MONTE CARLO	52
OBR. 37: SCHÉMA NEVHODNÉHO ŘEŠENÍ.....	53
OBR. 38: SCHÉMA VHODNÉHO ŘEŠENÍ.....	53
OBR. 39: SCHÉMA MĚNĚ VHODNÉHO ŘEŠENÍ	54

Seznam tabulek

TAB. 1: SROVNÁNÍ RŮZNÝCH DRUHŮ UPÍNÁNÍ DLE VELIKOSTI UPÍNACÍ SÍLY	24
TAB. 2: CHARAKTERISTICKÉ VLASTNOSTI VZDUCHU	42
TAB. 3: CHARAKTERISTICKÉ VLASTNOSTI CÍVKY	43
TAB. 4: CHARAKTERISTICKÉ VLASTNOSTI UPÍNACÍ HLAVY.....	43
TAB. 5: ZNÁZORNĚNÍ HODNOT KONCENTRÁTORU	49

Seznam symbolů a zkratek

μ	Permeabilita
A	Magnetický vektorový potenciál
H_c	Koercitivní síla
γ	Elektrická vodivost
v	Rychlost pohybujících se částí
t	Čas
J_{ext}	Proudová hustota
ν	Poissonovo číslo
E	Youngův modul pružnosti v tahu
u	Vektor posunutí
α_T	Koeficient teplotní roztažnosti
f	Vektor vnitřních sil
λ	Teplotní vodivost
T	Teplota
ρ	Měrná hmotnost
c_p	Specifické teplo
v	Rychlost částic
Q	Zdroj tepla
ϵ_r	Relativní permitivita
C_p	Tepelná kapacita
ρ	Hustota

Část I.
Diplomová práce

Úvod

V dnešní době jsou ve strojírenském průmyslu kladeny co největší nároky na dosažení maximální produktivity práce a hospodárnosti výroby. Jednou z velmi důležitých částí ve strojírenství je samotné upínání nástrojů a obrobků. Při upínání nástrojů je zásadní řídit se požadavky zákazníka a současně klást důraz na bezpečnost a spolehlivost upnutí nástroje či obrobku. Je nutné dodržet jeho důkladné zajištění, aby nedošlo vlivem působení řezné a odstředivé síly k uvolnění. Na dnešním trhu nalezneme širokou nabídku různých typů upínacích hlav a způsobu jejich upínání. V této práci se seznámíme s různými druhy upínání a zaměříme se převážně na tepelné upínání pomocí indukčního ohřevu. Mezi přednosti tepelného upínání patří především velká upínací síla, rychlost, přesnost upnutí a výrazné snížení nákladů. Jedná se také o komfortní a poměrně jednoduché řešení. Tuhost upnutí nástroje je zaručena po celém obvodu nástroje. Zejména z těchto důvodů se stává ve strojírenství stále více oblíbeným. Díky svým vlastnostem se stává velmi vhodným řešením například pro vysokorychlostní obrábění [9]. V této práci budeme pro modelovaný příklad řešit elektromagnetické pole, teplotní pole a pole termoelastických posunů. Cílem práce je také navrhnout geometrii koncentrátoru, díky které by se tato metoda upínání stala efektivnější.

1 Upínání nástrojů

Nástroj musí být pevně a bezpečně upnut, aby se zabránilo poškození nástroje či dokonce zranění obsluhy. Nedostatečná síla upnutí má zásadní vliv na životnost nástroje a kvalitu opracování obrobku.

1.1 Požadavky upínání nástrojů

Mezi požadavky upínání nástrojů patří:

- jednoduché upnutí nástroje,
- dostatečná síla upnutí, aby vlivem řezného odporu a odstředivé síly nedošlo k uvolnění nástroje,
- minimalizace nákladů na provedení upnutí,
- rychlost výměny nástroje,
- minimální excentricita,
- životnost upínacího prostředku [1].

1.2 Způsoby upínání nástrojů do upínací hlavy

V praxi existuje spousta způsobů upínání nástrojů, ovšem v dnešní době dostávají prostor i nové trendy, kdy je zachována požadovaná spolehlivost a bezpečnost upnutí. Dnes používané způsoby můžeme vidět na následujícím schématu.



Obr. 1: Schéma různých způsobů upnutí nástroje do upínací hlavy

1.3 Konvenční upínání

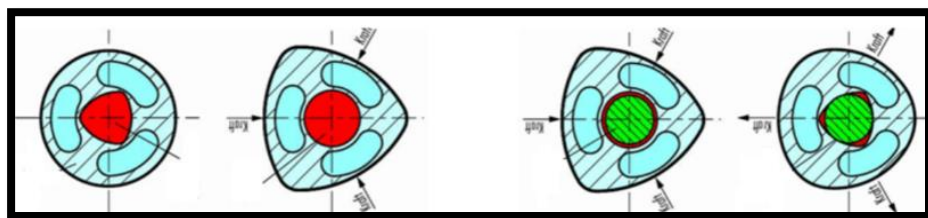
U konvenčního upínání je k upnutí nástroje potřeba určitá síla, která bezpečně zajistí uchycení nástroje a nedopustí jeho uvolnění. Jedná se o pružné uchycení nástroje a je tedy možné opakovat upínání v neomezeném počtu.

○ Systém Tribos

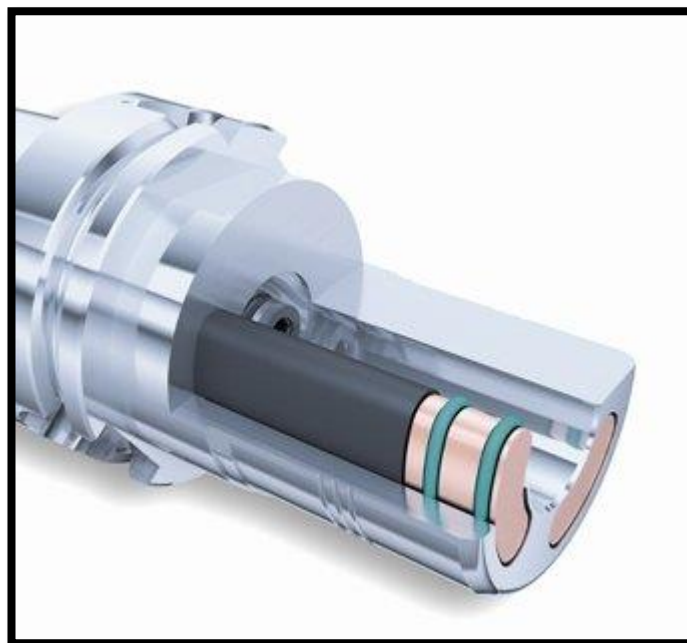
Jedná se o princip polygonálního upínání, kde má upínací dutina před upínáním nástroje tvar připomínající zaoblený trojúhelník. Následně dojde k zatížení pomocí hydraulického přístroje, kde dutina dostane válcový tvar. Dále se do dutiny vloží požadovaný nástroj a následně se uvolní hydraulické zatížení. Poté se dutina snaží vrátit zpět do původního tvaru a tím dojde k dostatečnému upnutí nástroje (viz Obr. 2 a Obr. 3). Polygonální upínací technika Tribos byla vyvinuta a patentována zhruba před deseti lety.

Mezi výhody upínače Tribos patří:

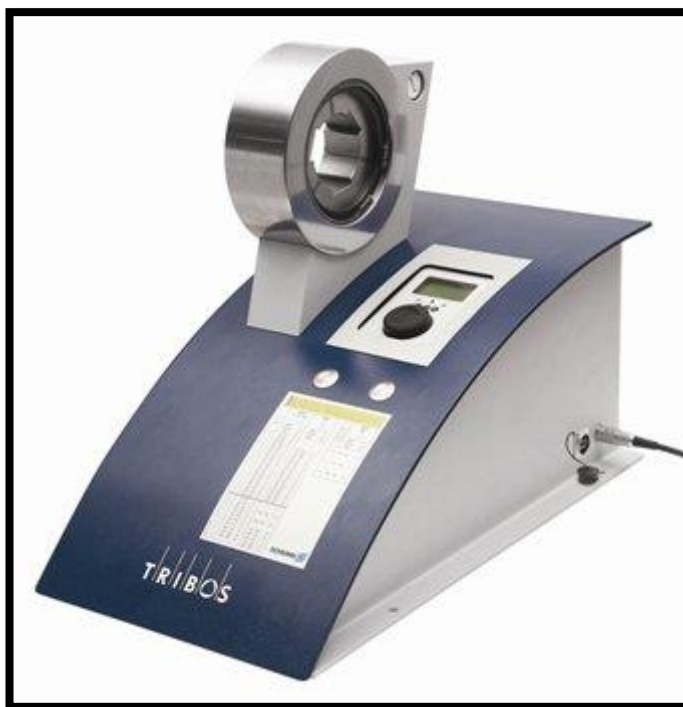
- vysoká bezpečnost upnutí,
- dlouhá životnost nástrojů,
- možnost použití vysokých otáček vřetene,
- není potřeba externí zdroj energie.



Obr. 2: Princip upínání systému Tribos [2]



Obr. 3: Polygonální upínací technika je patentovaným výrobkem firmy Schunk [6]



Obr. 4: Znárodnění upínací jednotky [2]

○ **Univerzální upínač Sino**

Jedná se o náhradu klasických mechanických upínačů. Princip je zde podobný jako v předchozím případě u hydraulického upínače, ale tlakové médium tvoří tvrdý elastomer. Uchycení nástroje probíhá pomocí klíče, který po dotažení upínacího pouzdra vyvine tlak na elastické médium a následně na rozpínací pouzdro. To zapříčiní, že nástroj je dostatečně a bezpečně upevněn v upínací hlavě. Tento systém se využívá například pro dokončovací práce u frézování.

Mezi výhody upínače Sino, patří:

- vysoká upínací síla,
- dobré tlumení vibrací,
- rychlá a jednoduchá výměna nástrojů,
- schopnost přenést velké krouticí momenty.



Obr. 5: Univerzální upínač Sino s pevnými deformačními segmenty [3]

○ **Systém Coromant Capto**

Tento systém patří mezi první rychlo-výměnné nástrojové systémy. Využívá se pro všechny možnosti obrábění reznými nástroji. Systém se skládá z kuželového polygonu, který je pomocí napětí vtahován do upínací jednotky. Tím dochází k namáhání, které zajistí požadované spojení.

Mezi výhody upínače Coromant Capto patří:

- malé rozměry a hmotnost,
- jednodušší manipulace,
- možnost plného využití výkonu stroje.



Obr. 6: Upínání typu Coromant Capto [7]

1.4 Moderní upínání

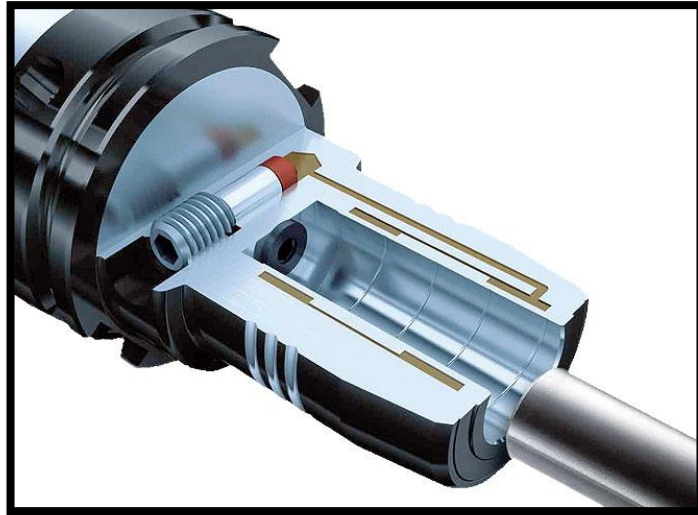
Moderní upínání stejně jako silově-deformační upínání využívá princip elastické deformace materiálu. Rozdíl nastává až ve způsobu vyvolání této deformace. V následující části se tedy seznámíme se dvěma moderními principy upínání, kterými jsou hydraulické a tepelné upínání.

○ **Systém hydraulického upínání**

Princip upnutí nástroje spočívá v otáčení upínacího šroubu, který vytváří tlak na hydraulickou kapalinu uvnitř upínací hlavy. Tato kapalina stejným tlakem působí na upínací pouzdro, díky kterému dochází k dostatečnému upnutí nástroje.

Mezi výhody hydraulického upínání patří:

- univerzálnost upínacího zařízení,
- vysoká přesnost upnutí nástroje,
- dobře tlumí vibrace.



Obr. 7: Princip hydraulického upínání [4]

- **System tepelného upínání**

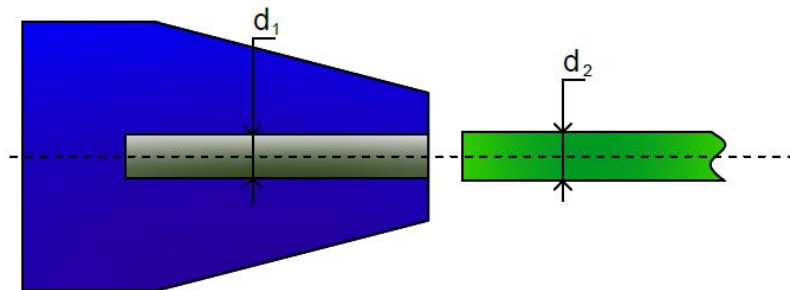
Nyní si popíšeme další možnost upínání, kterou je tepelné upínání nástrojů. Jedná se o nejpodstatnější část této diplomové práce, a proto se jí v následující kapitole budeme věnovat detailněji.

2 Systém tepelného upínání

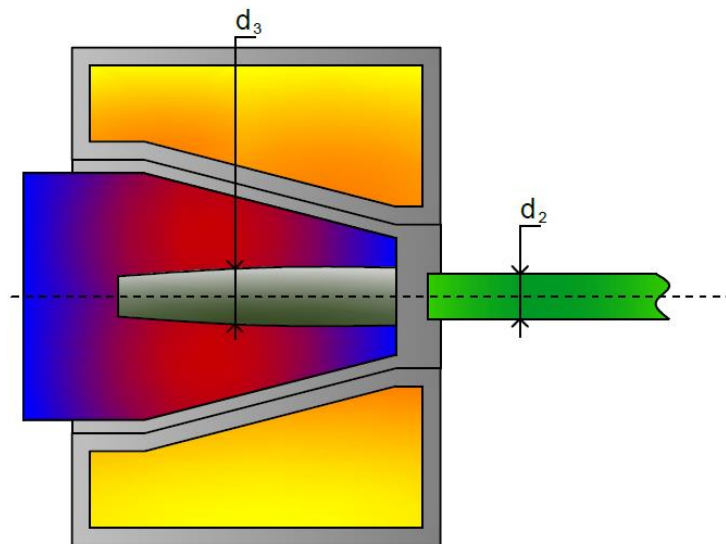
Tepelné upínání nástrojů ve strojírenství zažívá v posledních letech velký rozkvět. Tento zájem je způsoben především výhodami, mezi které patří rychlost, přesnost a ve výsledku i výrazné snížení nákladů. Další podstatnou výhodou je možnost provádět obrábění těžko obrobitelných materiálů.

2.1 Princip

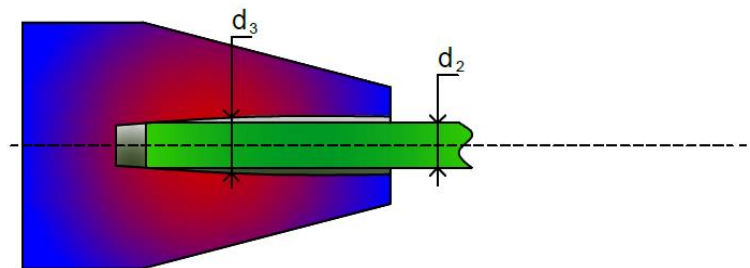
Základní část tepelného upínání tvoří tepelná roztažnost materiálu, neboť pomocí ohřevu a následného ochlazení upínáče dochází k upnutí nástroje. Ohřátím upínací části dojde k rozevření pouzdra (viz Obr. 9) a následně je možné nástroj volně vsunout do upínací hlavy (viz Obr. 10). Při následném ochlazení se pouzdro vrátí do původní polohy a tím dojde k bezpečnému zajištění nástroje (viz Obr. 11).



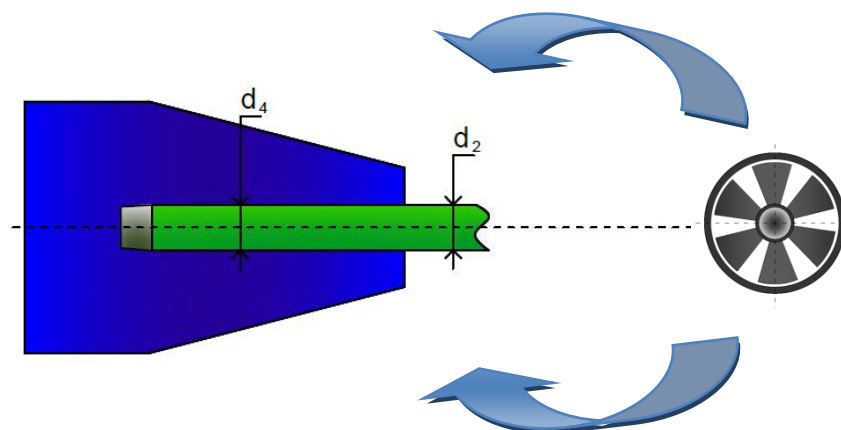
Obr. 8: Původní stav



Obr. 9: Zahřátí upínací hlavy

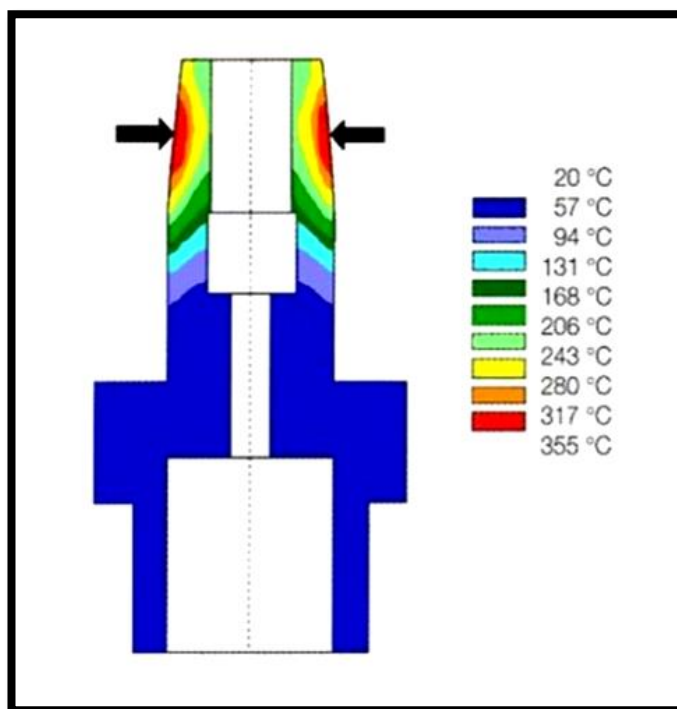


Obr. 10: Vsunutí nástroje do upínací hlavy



Obr. 11: Ochlazení upínací hlavy

Na obrázku níže je možné vidět rozložení teploty při upínání nástroje do upínací hlavy.



Obr. 12: Znázornění teploty upínací hlavy[5]

2.2 Materiál

Pro tepelné upínání není vhodné využívat stejný druh materiálu jako je tomu například u kleštinových upínacích zařízení, neboť tento materiál nemá potřebné vlastnosti. Nedokáže odolávat opakovaným cyklům zahřívání na teplotu 500 - 600 °C a následným ochlazováním bez narušení struktury materiálu. Je potřeba využít takový druh materiálu, jehož struktura dokáže odolávat opakovanému zahřívání a ochlazování materiálu. Měl by být schopen odolávat teplotám okolo 500 °C a provádět výměnu nástroje libovolně často (cca 5000 cyklů) bez vlivu na kvalitu upnutí nástroje. Materiál upínací hlavy je vhodné mít s mnohem vyšším koeficientem teplotní roztažnosti než samotný nástroj z důvodu možnosti vyjmutí nástroje.

2.3 Způsob upínání

Pro ohřev upínací hlavy se nejčastěji využívá způsob získávání tepla pomocí indukčního ohřevu, neboť právě indukční ohřev dokáže efektivně a do hloubky prohřát

potřebnou část materiálu. U ohřevu upínače hraje velmi důležitou roli rychlost ohřevu, která by se měla pohybovat kolem 5 sekund. Další podstatnou částí se stává chlazení. Pokud by nedocházelo k chlazení, doba chladnutí materiálu by se pohybovala kolem 10 minut. Vzhledem k nutnosti operativního využití nástroje je možné pomocí chlazení tuto dobu výrazně snížit až na hodnotu pohybující se do 1 minuty. Mezi nejrozšířenější metodu chladnutí patří chlazení pomocí kapaliny, kde se zahřátý upínač vloží do lázně s chladicí kapalinou a tím dojde k ochlazení na okolní teplotu. Přitom časová doba tohoto cyklu nemusí přesahovat ani 20s. Upínací cyklus probíhá následujícím způsobem. Na Obr. 8 vidíme původní stav nástroje a upínací hlavy, kde průměr nástroje d_2 je větší než průměr hlavy d_1 . Pro možnost vsunutí nástroje do otvoru je tedy potřeba zahřát hlavu na požadovanou teplotu a docílit tak zvětšení otvoru na průměr d_3 . Tato změna velikosti se obvykle pohybuje v řádu tisícín milimetru. Nyní je možné vsunout nástroj do upínací hlavy. Po vsunutí nástroje dochází k následující části, kterou je chlazení. Chlazení nám způsobí, že průměr upínací hlavy se snaží vrátit do původního stavu. Z důvodu, že d_2 je větší než d_1 dochází k velice pevnému upnutí nástroje. Tato nová velikost průměru je označena jako d_4 . Na nástroj tedy bude působit vysoký, radiální upínací tlak po celé ploše upnutí. Dosažená upínací síla je mnohem vyšší, než by tomu bylo například při využití konvenční upínací techniky. Princip indukčního ohřevu spočívá v průchodu střídavého proudu přes induktor, který ve svém okolí vytváří střídavé elektromagnetické pole. Pokud do tohoto pole vložíme upínací hlavu z vodivého materiálu, indukuje se v ní napětí, které zapříčiní vznik vířivých proudů a tím ohřeje hlavy. Díky tomu dochází k bezdotykovému přenosu výkonu, neboť teplo je vytvářeno přímo v upínací hlavě a není tedy přenášeno prouděním, zářením či vedením tepla.

V porovnání indukčního ohřevu s konvenční upínací technikou získáme následující výhody:

- rychlejší upnutí a uvolnění nástroje,
- vyšší upínací síla (přenos až čtyřnásobného krouticího momentu),
- dobrá kvalita obrábění daná vysokou tuhostí nástroje,

- menší hodnoty obvodového házení a tím zvýšení životnosti,
- možnost použití pro vysoké otáčky.

Velikost upínací síly závisí na průměru nástroje d_2 vztažené k velikosti otvoru hlavy po zahřátí, tedy průměru d_3 . Při využití většího nástroje než je velikost nástroje o průměru d_2 , ovšem musí být menší než velikost otvoru d_3 , dojde k větší upínací síle a tedy i k přenosu většího krouticího momentu.

2.4 Výhody

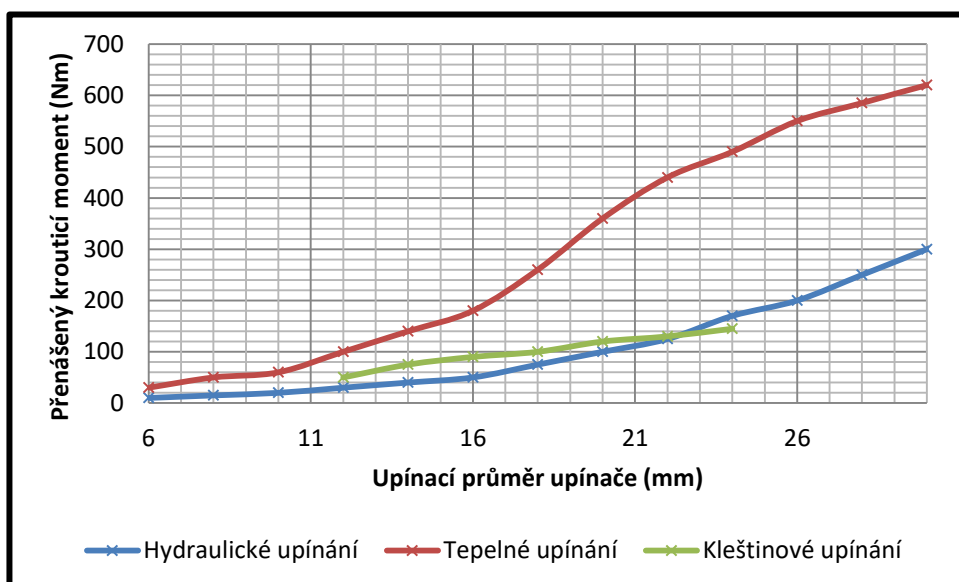
Tepelné upínání v dnešní době patří k velice oblíbeným způsobům upínání nástrojů. Je to způsobeno především díky následujícím výhodám, mezi které patří:

- maximální síla upnutí nástroje,
- výborná tuhost upnutí,
- rychlé upnutí nástroje,
- dlouhá životnost upínače (až tisíce upnutí),
- vysoká přesnost,
- finanční efektivita,
- delší životnost vřetena díky minimální házivosti systému upnutí.

2.5 Porovnání různých druhů upínacích zařízení

Tab. 1: Srovnání různých druhů upínání dle velikosti upínací síly

<i>Druh systému</i>	<i>Síla upnutí (N)</i>
<i>Upínač Tribos</i>	3 000
<i>Hydraulický upínač</i>	6 000
<i>Kleštinový upínač</i>	7 000
<i>Tepelný upínač</i>	22 000



Obr. 13: Srovnání různých systémů upínání v závislosti přenášeného krouticího momentu na upínací průměr nástroje

3 Matematický model

Matematický model uvažovaného problému se skládá ze tří fyzikálních polí: elektromagnetického, tepelného a termoelastického pole. Problém je řešen jako silně sdružená úloha s respektováním nelineárních, teplotně závislých charakteristik materiálových vlastností v osově symetrickém uspořádání.

3.1 Elektromagnetické pole

Rovnice popisující elektromagnetické pole je odvozena z diferenciálního tvaru Maxwellových rovnic. Tato rovnice znázorňující magnetický vektorový potenciál má v ustáleném stavu následující tvar

$$\operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu}\operatorname{rot}\mathbf{A} - \mathbf{H}_C\right) - \gamma\mathbf{v} \times \operatorname{rot}\mathbf{A} + \gamma\frac{\partial\mathbf{A}}{\partial t} = \mathbf{J}_{\text{ext}}, \quad (3.1)$$

kde μ představuje permeabilitu, \mathbf{A} značí magnetický vektorový potenciál, \mathbf{H}_C představuje koercitivní sílu, γ označuje elektrickou vodivost, \mathbf{v} je rychlost pohybujících se částí, t je čas a \mathbf{J}_{ext} představuje proudovou hustotu.

Pro uvažovaný model nepočítáme s rychlostí pohybujících se částí ani s koercitivní silou, neboť nevyužijeme permanentní magnety. Po úpravě získáme následující tvar rovnice:

$$\operatorname{rot}\frac{1}{\mu}\operatorname{rot}\mathbf{A} + \gamma\frac{\partial\mathbf{A}}{\partial t} = \mathbf{J}_{\text{ext}}. \quad (3.2)$$

3.2 Teplotní pole

Rovnice řešící teplotní pole je odvozena z energetické bilance systému. Následující vztah znázorňuje Fourierovu-Kirchhoffovu diferenciální rovnici pro vedení tepla

$$-\operatorname{div}(\lambda\operatorname{grad}T) + \rho c_p\left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \operatorname{grad}T\right) = Q, \quad (3.3)$$

kde λ značí teplotní vodivost, T představuje teplotu, ρ je měrná hmotnost, c_p značí specifické teplo pro stálou hodnotu tlaku, \mathbf{v} znázorňuje rychlost částic v pohybu a Q představuje zdroj tepla.

3.3 Pole termoelastických deformací

Lamého rovnice termoelastických deformací vychází z Hookova zákona a má následující tvar

$$(\varphi + \psi) \cdot \text{grad}(\text{div}\mathbf{u}) + \psi \cdot \Delta\mathbf{u} - (3\varphi + 2\psi) \cdot \alpha_T \cdot \text{grad}T + \mathbf{f} = 0 \quad (3.4)$$

$$\varphi = \frac{\nu \cdot E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (3.5)$$

$$\psi = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}, \quad (3.6)$$

kde po dosazení koeficientů vznikne následující rovnice

$$\left(\frac{\nu \cdot E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} + \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \right) \cdot \text{grad}(\text{div}\mathbf{u}) + \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \cdot \Delta\mathbf{u} - \left(\frac{3 \cdot \nu \cdot E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} + \frac{2 \cdot E}{2 \cdot (1 + \nu)} \right) \cdot \alpha_T \cdot \text{grad}T + \mathbf{f} = 0. \quad (3.7)$$

Označení ν značí Poissonovo číslo, E je Youngův modul pružnosti v tahu, \mathbf{u} označuje vektor posunutí, α_T je koeficient teplotní roztažnosti a \mathbf{f} značí vektor vnitřních sil.

4 Optimalizace

Optimalizace výrobku, produktu či služeb patří mezi zásadní termíny dnešní moderní doby. Jedná se tedy o velice aktuální téma, bez kterého bychom si jen stěží dokázali představit dnešní výrobu. Optimalizace zaznamenala významný rozvoj již v minulém století v oblasti techniky, kde se využívala především ve stavebnictví, strojírenství a vojenství.

Jedná se o proces, který se snaží najít takové hodnoty stavových veličin, při kterých dojde k co největšímu přiblížení požadovaného cíle. Možnosti volby stavových veličin dochází v definované oblasti. Tato oblast bývá často omezena soustavami rovnic či nerovnic. Významem těchto rovnic je zamezit prohledávání prostoru, pro nějž je nalezené řešení nežádoucí. Při řešení optimalizace různých úloh je možné využít nespočet výpočetních programů. V našem případě jsme využili program COMSOL Multiphysics, který tuto funkci nabízí. Možnosti optimalizace jsou velice rozsáhlé. Je možné například optimalizovat geometrický tvar dané součásti či rozložení materiálů [12]. Optimalizační metody lze rozdělit na globální a lokální.

Lokální metody umožňují nalézt minimum či maximum kriteriální funkce pouze v blízkém okolí počátečního bodu optimalizace či uvnitř daného intervalu. Pokud se optimum nalézá ve velké vzdálenosti od počátečního bodu, lokální metody většinou nepostačí a je tedy zapotřebí volit globální metody. Při využití globálních metody se jedná o výpočtově náročnější řešení. V této práci byly využity pouze lokální metody, které umožňuje program COMSOL.

4.1 Metoda Monte Carlo

Jedná se o metodu zabývající se řešením matematických úloh pomocí modelování náhodných veličin a statického odhadu jejich charakteristik. Pomocí metody Monte Carlo je možné řešit jakékoliv matematické úlohy. Není potřeba splňovat pravděpodobnostní charakter.

Samotná myšlenka této metody je velice jednoduchá a při vhodné transformaci se dá využít na mnoho problémů. Jedna z prvních zmínek o této metodě pochází z 19. století, kde v jistém článku pana A. Halla bylo obsaženo určení čísla pomocí náhodného házení jehly na rovinu pokrytou rovnoběžkami. Tento pokus je dnes znám jako Buffonova úloha o jehle.

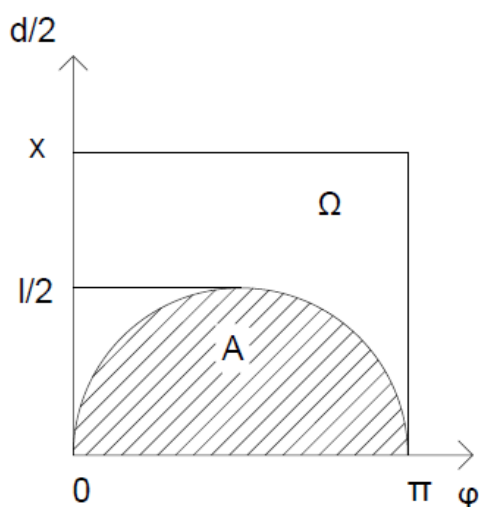
Pro bližší seznámení se s tímto pokusem si popíšeme princip metody. Představme si rovnoběžky nakreslené na rovině a vzdálenost mezi rovnoběžkami je označena d . Na tuto rovinu necháme náhodně dopadat jehlu o délce l . Délka jehly je nanejvýš stejně dlouhá jako vzdálenost d . Nyní se ptáme, jaká je pravděpodobnost, že jehla přetne některou rovnoběžku?

Vzdálenost mezi středem jehly a nejbližší rovnoběžkou si označíme písmenem x . Úhel svírající jehlu s rovnoběžkami si označíme jako φ . Souřadnice jehly budou tedy (φ, x) , kde $0 \leq \varphi \leq \pi$ a $0 \leq x \leq \frac{d}{2}$. K přetnutí jehly s rovnoběžkou dojde tehdy, pokud bude platit, že $x \leq \left(\frac{l}{2}\right) \cdot \sin\varphi$. Střed jehly může nabývat libovolných hodnot z oblasti Ω a k přetnutí jehly s rovnoběžkou může dojít tehdy, pokud se střed jehly bude nacházet v oblasti A .

Pravděpodobnost protnutí rovnoběžky bude rovna poměru obou oblastí. Získáme tedy vztah:

$$P = \frac{P(A)}{P(\Omega)} = \frac{\int_0^{\pi} \frac{l}{2} \sin\varphi d\varphi}{\frac{\pi d}{2}} = \frac{2l}{\pi d}. \quad (4.1)$$

Při popisu tohoto pokusu je tedy pravděpodobnost přetnutí jehly s rovnoběžkou popsána pomocí π . Pokud provedeme počet hodů n a četnost bodů m , kdy jehla přetne rovnoběžku, je možné pomocí poměru $\frac{n}{m}$ odhadnout pravděpodobnost a tak vypočítat číslo π dle vztahu $\frac{2l}{\pi d} \cong \frac{m}{n}$. Díky tomuto postupu již v roce 1850 se pan Volf po 5000 hodech dostal na hodnotu $\pi = 3,1596$. Tento postup byl velice zdlouhavý, ovšem po zavedení počítačů se tento postup výrazně zrychlil.



Obr. 14: Souřadnice středu jehly

Největší rozvoj metody Monte Carlo tedy nastal až po zavedení počítačů. Ve 20. století byla metoda využita při vývoji atomové bomby, kde pánové Neumann a Ulam, přirovnali metodu k náhodnému točení rulety. Metoda byla pojmenována podle města v Monackém knížectví, pro které je právě charakteristická ruleta [10].

4.2 Metoda Nelder Mead

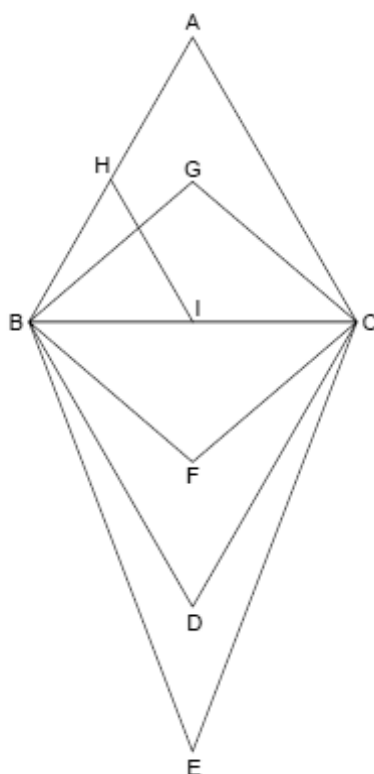
Tato technika řešení vznikla díky Johnu Nelderovi a Rogeru Meadovi v roce 1965. Jedná se o běžně používanou numerickou metodu, která se využívá k nalezení minimálního, nebo maximálního počtu objektivních funkcí v multidimenzionálním prostoru. Slouží k řešení nelineárních optimalizačních problémů, u kterých není potřeba znát derivace. Metoda aproximuje lokální optimum problému s n proměnnými, když se objektivní funkce plynule mění a je unimodální.

Jako příklad si uvedeme inženýra závěsného mostu, který musí zvolit, jak silné musí být vzpěry, lana a pilíře. Tyto prvky jsou vzájemně závislé, ale není jednoduché si představit, jaký dopad má konkrétní prvek na celek. Provedení simulace takovýchto komplikovaných částí může trvat až několik hodin. Je tedy možné využít metodu Nelder-Mead, který vyžaduje menší počet iterací než jiné optimalizační metody. Tato metoda v n dimenzích udržuje testovací body o hodnotě $n+1$. Dále provádí extrapolaci cílové funkce v každém zkušební bodě za účelem nalezení nového zkušební bodu

a nahrazením jednoho ze starých zkušebních bodů za nový a tímto způsobem postupuje dále.

Na rozdíl od moderních metod optimalizace, metoda Nedler-Mead může konvergovat do nestacionárního bodu, které jsou pro moderní metody náročné.

Princip této metody si vysvětlíme na následujícím obrázku.



Obr. 15: Nákres metody

Máme trojúhelník ABC, ve kterém bod A je nejhorším bodem a nevyhovuje řešení. Určíme si tedy bod D na opačné straně než je bod A. Pokud je řešení pro bod D lepší než A, postupujeme správným směrem a stanovíme bod E ve stejném směru jako D, jen o polovinu vzdálenosti dále. Je – li $D = A$, určíme si body F a G. Pokud mají tyto body lepší řešení než bod A, nové řešení bude BCF či BCG. Jsou – li ovšem body F a G horší než bod A, vypočteme body H a I. Nové řešení je tedy BHI a opakujeme znovu celý algoritmus [13].

4.3 Metoda BOBYQA

Název BOBYQA vznikl zkratkou slov z anglického Bound Optimization by Quadratic Approximation. Jedná se o numerický optimalizační algoritmus, který vznikl díky Michaelu J. D. Powelllovi. Metoda BOBYQA je iterativní algoritmus sloužící pro nalezení minimální funkce $F(x)$, kde $x \in R_n$, s omezeními $a \leq x \leq b$ na proměnných. Tento algoritmus řeší problém metodou důvěryhodnosti, která vytváří kvadratické modely interpolací. Na každé iteraci se vypočítá jeden nový bod, obvykle vyřešením subproblému oblasti důvěryhodnosti pod podmínkou vázaných omezení, nebo alternativně volbou bodu, který má nahradit interpolační bod, aby se podpořila dobrá lineární nezávislost v interpolačních podmínkách. Funkce F je určena tzv. černou skřínkou, která vrací hodnotu $F(x)$ pro všechny možné x . Každá iterace zaměstnává kvadratické aproximace Q až F , která splňuje $Q(y_j) = F(y_j)$, kde $j = 1, 2, \dots, m$. Interpolační body y_j jsou zvoleny a nastaveny automaticky, ale m je předepsaná konstanta, přičemž její typická hodnota je $m = 2n + 1$. Pokud je model aktualizován velmi úspěšnou technikou minimalizace pomocí Frobeniovy normy pro změnu na druhou derivační matici Q , jsou tyto podmínky ponechány volnosti v Q . Proto nejsou vyžadovány žádné deriváty prvního stupně funkce F . Většina změn proměnných jsou přibližným řešením subproblému s oblastí důvěryhodnosti pomocí aktuálního kvadratického modelu s dolní vazbou na okraji oblasti důvěryhodnosti. Ta je opatrně snižována, aby se interpolační body udržely dobře odděleny až do posledního výpočtu. To snižuje škody způsobené chybami zaokrouhlení počítače. Některé další změny proměnných jsou navrženy tak, aby zlepšily model bez snížení počtu F . Počet proměnných bývá obvykle mezi 10 až 320 [11].

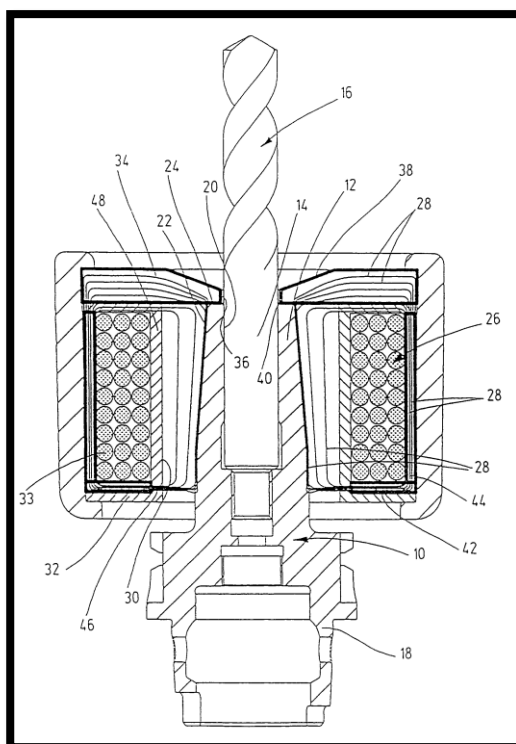
5 Patenty

Patentování výrobku v oblasti tepleného upínání tvoří velmi podstatnou roli. Díky patentům není možné kopírovat konkurenční výrobky, a tedy společnost si uchová své drahocenné vlastnosti svých zařízení. Podstatou indukčního ohřevu je jak optimální rozšíření pouzdra nutné pro snadné vložení a vyjmutí nástroje, tak i pólové stínící kroužky, které umožňují velmi rychlý, šetrný a cílený ohřev. Právě tyto odlišnosti oproti konkurenci je potřeba patentovat. V následující části si uvedeme některé z předních společností v oboru tepelného upínání nástrojů, mezi které patří společnost Bilz či Gühring.

5.1 Zařízení pro upínání nástrojů

Číslo patentu: US 6991411 B2

Nabyvatel: BilzWerkzeugfabrikGmbH& Co. Kg



Obr. 14: Nákres patentovaného upínače [14]

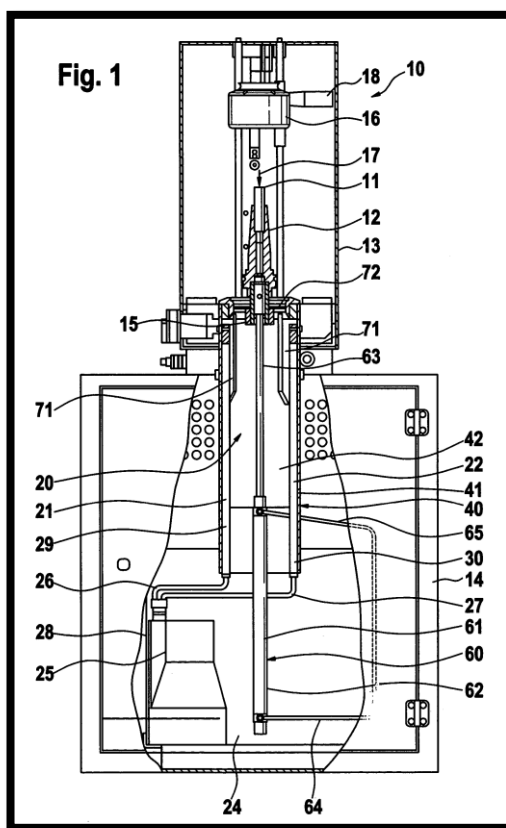
Tento patent se týká zařízení pro upínání a uvolňování nástroje (16). Na konci upínací hlavy se nachází část (12), která je přizpůsobena na přenos tření mezi upínací hlavou a nástrojem (14). Pro možnost vsunutí nástroje do upínací hlavy je zde cívka

(26), která je napájena vysokofrekvenčním proudem. Pro zamezení úniku tepla v oblasti, kde by mohlo dojít k nežádoucímu ohřevu pracovního nástroje (16) je využit pólový nástavec (34). Tento nástavec se skládá z magneticky vodivého a elektricky nevodivého materiálu.

5.2 Zařízení s chladicí jednotkou pro tepelné upínání a uvolňování nástroje.

Číslo patentu: US 7157676 B2

Nabyvatel: BilzWerkzeugfabrikGmbH& Co. Kg



Obr. 15: Nákres zařízení s chladicí jednotkou [15]

Zařízení (10) pro tepelné upínání a uvolňování nástroje (11) je vybaveno ohřevací jednotkou (16), která se může pohybovat ve vertikální ose. Dále je vybavena chladicí jednotkou (20), která umožňuje urychlovat chlazení zahřátého sklíčidla.

Na obrázku níže je znázorněna reálná podoba zařízení s chladičí technikou.



Obr. 16: Zařzení Bilz 5040434 ISG3400WK-11-FS-BIL [18]

Vlastnosti:

Upínací rozsah SC: 3 mm – 32 mm

Upínací rozsah HSS: 6 mm – 32 mm

Cívka: pevná

Max. délka nástroje: 400 mm

Typ chlazení: Chlazení pomocí tekutiny včetně sušení

Doba chlazení: 20s

Vodní nádrž: 40 l

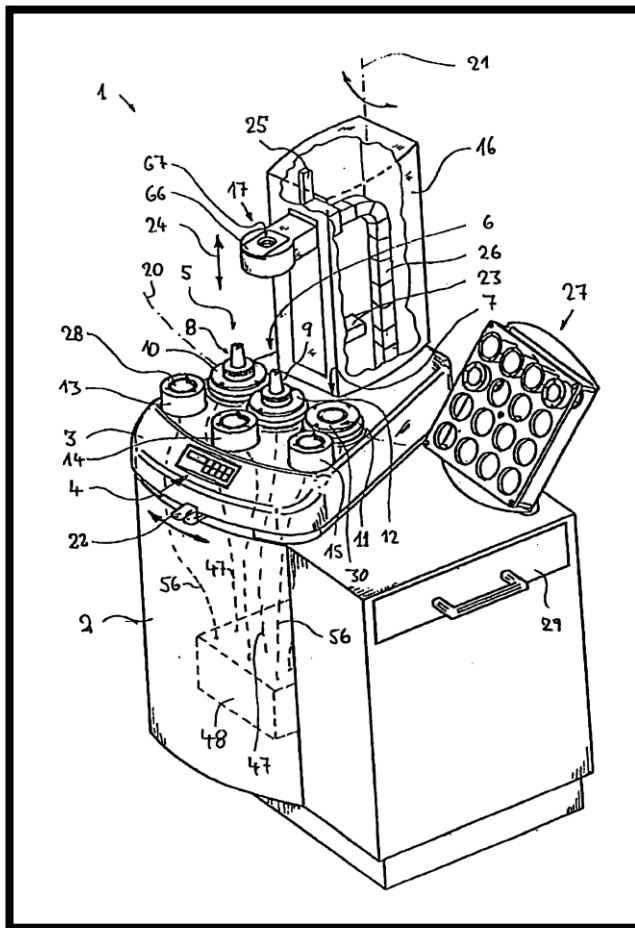
Rozměr (x š x h): 800 x 560 x 1720

Hmotnost: 150 kg

5.3 Zařízení pro tepelné upínání a uvolňování nástrojů

Číslo patentu: US 6755228 B2

Nabyvatel: KelchGmbh& Co. Werkzeugmaschinenfabri



Obr. 17: Náskres zařízení pro tepelné upínání a uvolňování nástrojů [16]

Zařízení je vybaveno jednotkou indukčního topného zařízení (17) pro ohřev nástrojů. Dále je vybaveno aktivní chladicí jednotkou pro účinné ochlazení sklíčidla (3). Zařízení je vybaveno třemi pracovními stanicemi (5, 6, 7), kde v každé stanici je možné ohřívat, ale také i chladit sklíčidlo. Pomocí otočného sloupce (16) je možné se pohybovat mezi stanicemi.

Na obrázku níže je znázorněna reálná podoba zařízení od firmy Kelch.



Obr. 18: Reálná podoba zařízení [19]

Vlastnosti:

Upínací rozsah SC: 3 mm – 32 mm

Upínací rozsah HSS: 6 mm – 32 mm

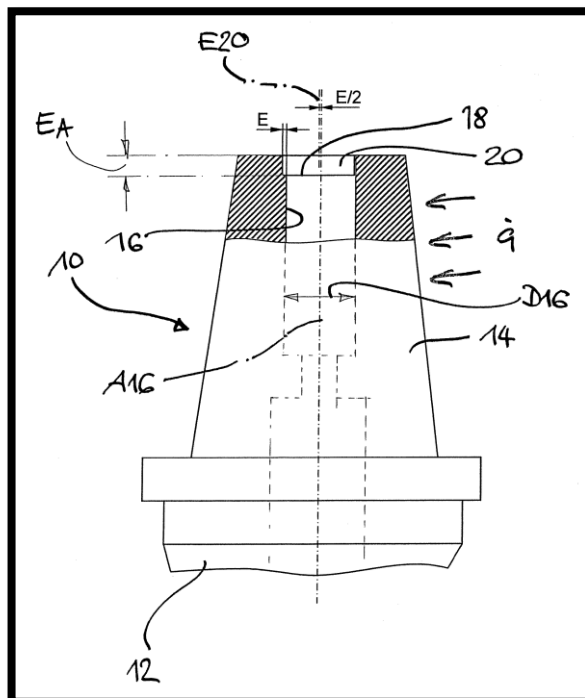
Max. délka nástroje: 650 mm

Typ chlazení: Jemné a suché chlazení

5.4 Patent sklíčidla s excentrickým upevněním nástroje

Číslo patentu: US7390153 B2

Nabyvatel: GuehringOhg



Obr. 19: Nákres sklíčidla [17]

Tento druh sklíčidla se využívá pro upínání válcových nástrojů. Upínací část má na svém konci jakési speciální vybrání. Toto vybrání zapříčiní, že již před ohřevem sklíčidla zůstane nástroj ve správné poloze a nedojde tak k možnosti špatného uchycení.

6 Ilustrativní příklad

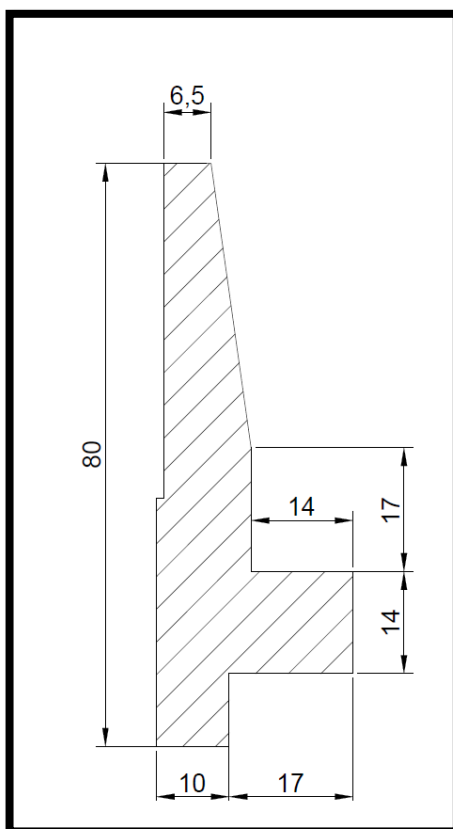
V následujícím úseku práce je obsažen ilustrativní příklad. V první části je popsána definice problému, v další poté geometrie upínací hlavy a následně další části týkající se simulace v programu COMSOL.

6.1 Definice problému

Jako ilustrativní příklad je uvedeno numerické řešení ohřevu upínací hlavy od společnosti Gühring. Jedná se o zařízení určené pro upínání nástrojů o průměru 8mm. Ohřev je realizován pomocí induktoru. Efektivita procesu je vylepšena využitím koncentrátoru, jehož vhodný tvar je předmětem řešení pomocí tvarové optimalizace.

6.2 Geometrie

Parametry upínací hlavy jsou reálné a jsou převzaty od společnosti Gühring. Na následujícím obrázku jsou zobrazeny parametry použité upínací hlavy. Všechny hodnoty v obrázcích níže jsou zobrazeny v mm.



Obr. 20: Nákres upínací hlavy

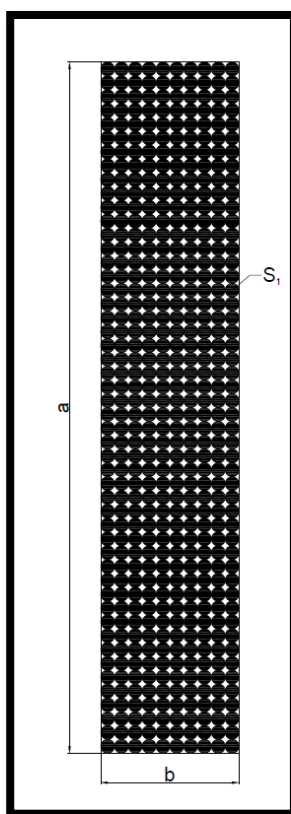
6.3 Stanovení proudové hustoty

Jak již jsme si uvedli dříve, podstatnou roli v procesu tepelného upínání hraje induktor, neboť díky němu dochází k přenosu energie a následně k ohřevu upínací hlavy. Proto se v této kapitole budeme věnovat právě induktoru. Jedná se o cívku, která se skládá z vodiče o průměru $r_{\text{vodiče}}$ a počtu závitů P_z . Abychom docílili potřebných parametrů pro dostatečný ohřev hlavy, musíme si nejprve vypočítat proud protékající tímto vodičem a z něj následně proudovou hustotu celé cívky.

Poloměr vodiče cívky byl zvolen o velikosti 0,5 mm.

$$r_{\text{vodiče}} = 0,5 \text{ mm}$$

$$S_1 = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot 0,5^2 = 0,785 \text{ mm}^2 \quad (6.1)$$



Obr. 21: Zobrazení parametrů cívky

Proudová hustota vodiče v cívce by neměla překročit hodnotu $6A/mm^2$. Pomocí této informace si vypočítáme procházející proud vodičem.

$$J_{max} < 6A/mm^2$$
$$I_1 < S_1 \cdot J_{max} \quad (6.2)$$

$$I_1 < 0,785 \cdot 6$$

$$I_1 < 4,71 A$$

Pro obdélníkový průřez cívky volíme činitel k o velikosti 0,7. Následně si vypočítáme plochu mědi v celé cívce. Dále počet závitů a poté i výsledný proud I_C . Z této hodnoty a plochy cívky vypočítáme výslednou hodnotu proudové hustoty.

$$S_{Cu} = a \cdot b \cdot k = 10 \cdot 50 \cdot 0,7 = 350 mm^2 \quad (6.3)$$

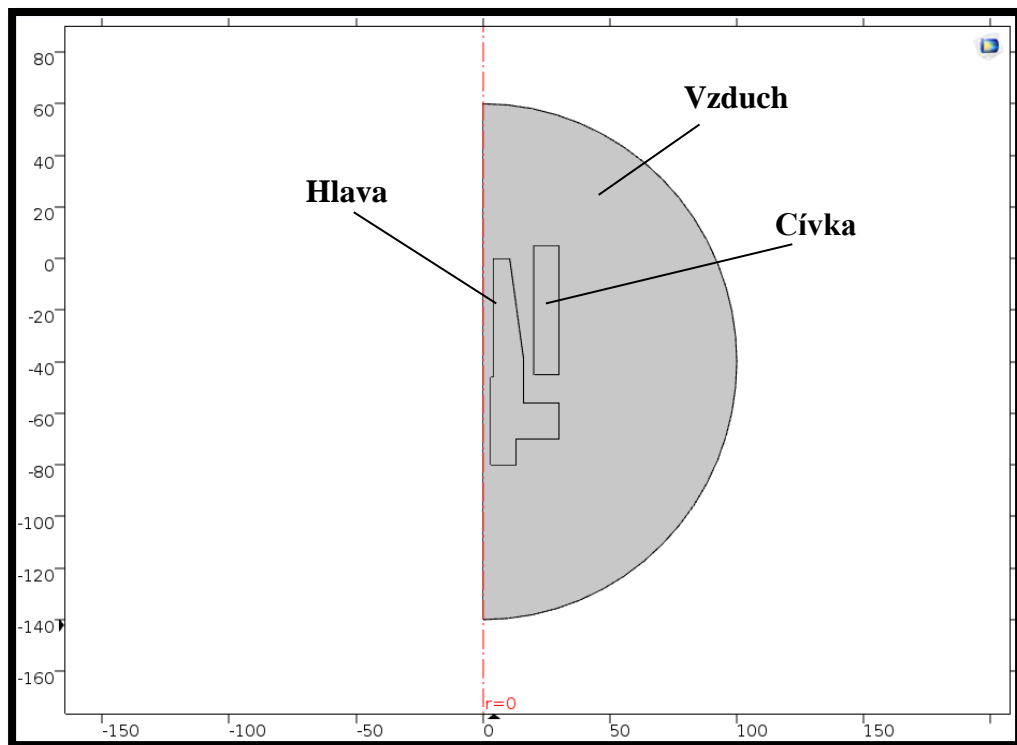
$$P_z = \frac{S_{Cu}}{s_1} = \frac{350}{0,785} = 446 z \quad (6.4)$$

$$I_C = I_1 \cdot P_z = 4,71 \cdot 466 = 2195 A \quad (6.5)$$

$$J_{ext} = \frac{I_C}{a \cdot b} = \frac{2195}{10 \cdot 50} = 4,39 A/mm^2 \quad (6.6)$$

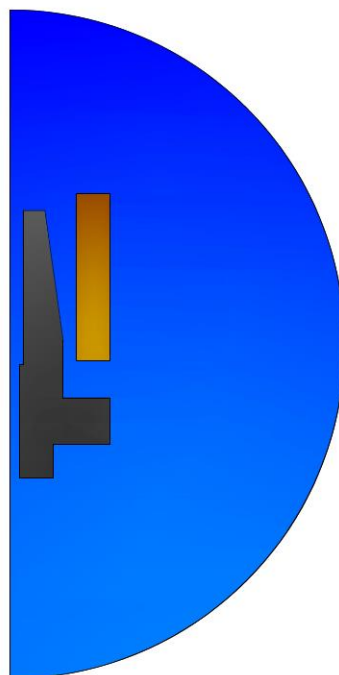
6.4 Definování matematického modelu

V následující části jsou zobrazeny obrázky, na kterých můžeme vidět definované oblasti. Jak je vidět, nejprve jsme se v této práci zaměřili na 2D symetrický model. Tento model se skládá z oblasti pro vzduch, cívku a upínací hlavu.



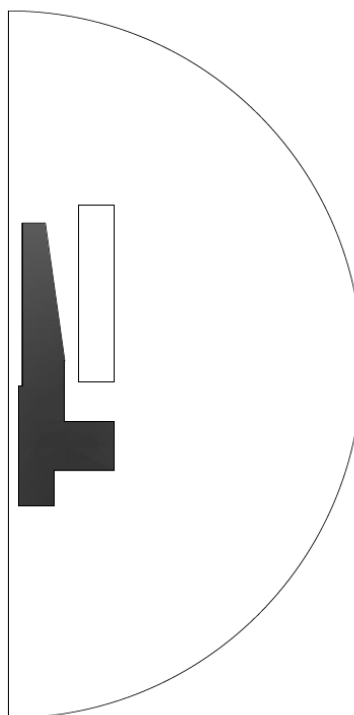
Obr. 22: Definované oblasti

Pro řešení magnetického pole jsme počítali se všemi částmi objektu, neboť magnetické pole nám ovlivňuje celý model. Vybarvení určitých částí na následujících obrázcích znázorňuje využití dané části pro dané pole.



Obr. 23: Řešené oblasti v elektromagnetickém poli

U teplotního pole a pole termoelastických posunů jsme uvažovali jen oblast s upínací hlavou, neboť při uvažování i dalších částí nedojde k ovlivnění našich výsledků. Při uvažování i ostatních částí by se výrazně zvýšil počet řešených rovnic v programu a tím by se znatelně navýšila i doba řešení. Proto je velice užitečná možnost programu COMSOL volit jen ty části, které využijeme.



Obr. 24: Řešené oblasti v teplotním poli a poli termoelastických posunů

Tab. 2: Charakteristické vlastnosti vzduchu

Název	Značení	Hodnota	Jednotka
Relativní permeabilita	μ_r	1	-
Relativní permitivita	ϵ_r	1	-
Elektrická vodivost	γ	0	$S \cdot m^{-1}$
Tepelná kapacita	C_p	1021	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
Hustota	ρ	0,93	$kg \cdot m^{-3}$
Tepelná vodivost	λ	0,032	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$

Tab. 3: Charakteristické vlastnosti cívky

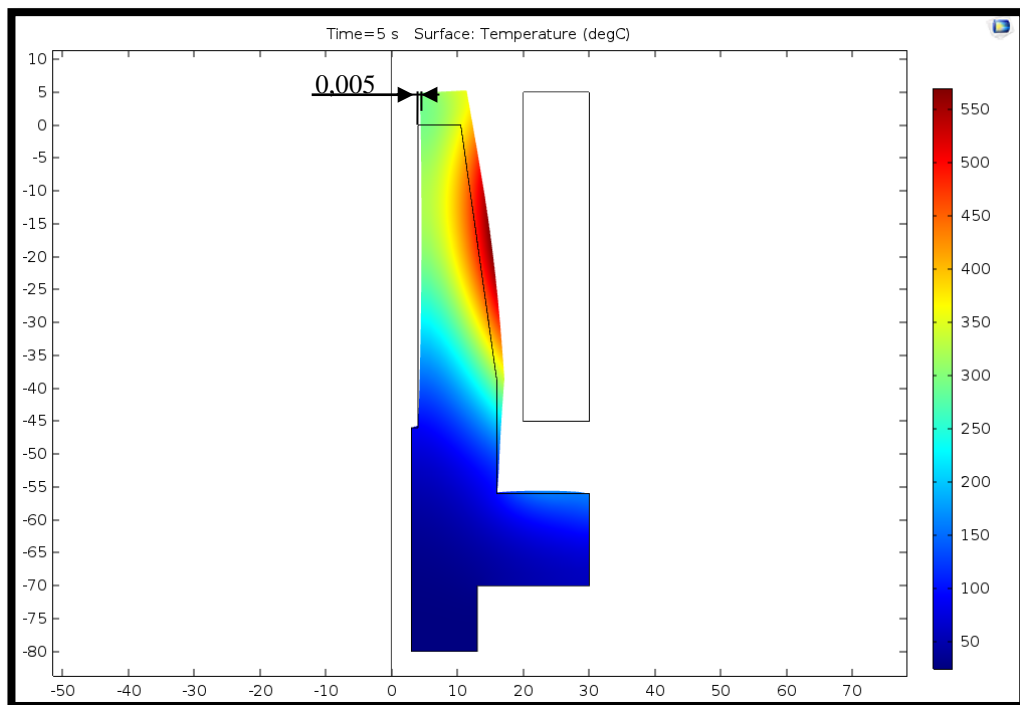
Název	Značení	Hodnota	Jednotka
Relativní permeabilita	μ_r	1	-
Relativní permitivita	ϵ_r	1	-
Elektrická vodivost	γ	0	$S \cdot m^{-1}$
Tepelná kapacita	C_p	385	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
Hustota	ρ	8960	$kg \cdot m^{-3}$

Tab. 4: Charakteristické vlastnosti upínací hlavy

Název	Značení	Hodnota	Jednotka
Relativní permeabilita	μ_r	800	-
Relativní permitivita	ϵ_r	1,00E+00	-
Elektrická vodivost	γ	2,00E+06	$S \cdot m^{-1}$
Koeficient tepelné roztažnosti	α	1,1E-05	K^{-1}
Tepelná kapacita	C_p	500	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
Hustota	ρ	7740	$kg \cdot m^{-3}$
Tepelná vodivost	λ	39	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
Youngův modul pružnosti	E	2,1E+11	Pa
Poissonovo číslo	ν	0,3	-

6.5 Výsledky

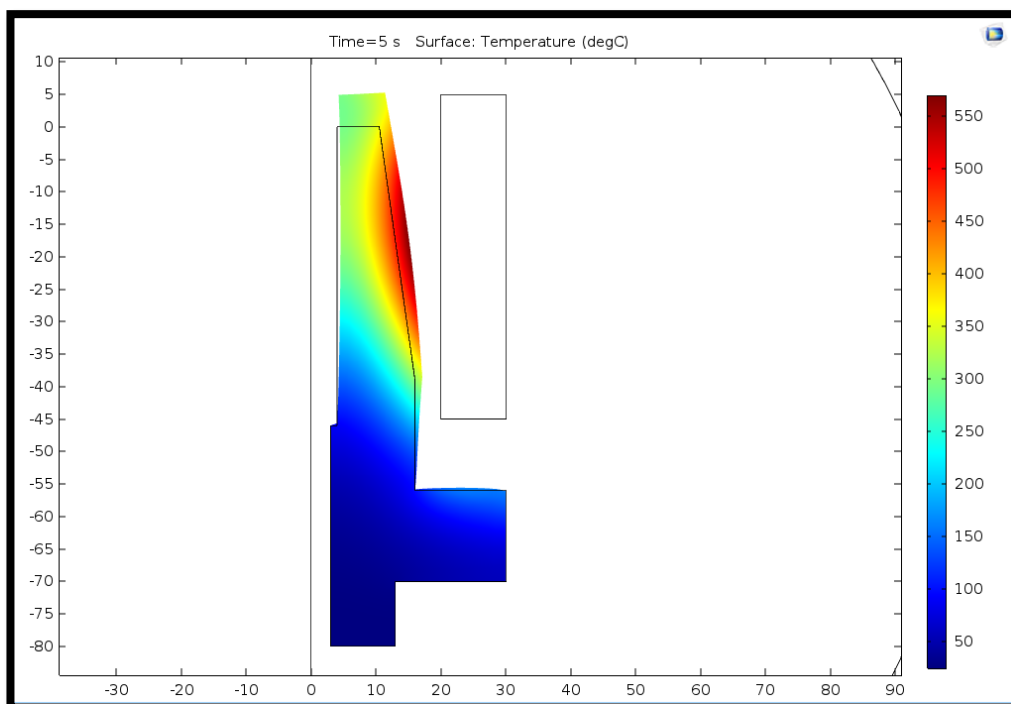
Pro vsunutí otvoru je potřeba upínací hlavu zahřát na teplotu odpovídající rozmezí 500 – 600 °C. Pokud by došlo k překročení tohoto rozmezí až nad hodnotu Curieovy teploty, došlo by ke strukturálním změnám materiálu. Tyto změny by způsobily, že materiál by ztratil schopnost elasticity a docházelo by tak k nevratným změnám. U tepelného upínání je potřeba docílit stále stejné struktury a požadovaných vlastností materiálu i při několika tisících opakování. U tepelného upínání se zvětšení otvoru upínací hlavy těchto rozměrů pohybuje v rozmezí 4 – 10 μm . Jak je možné vidět z následujícího obrázku, otvor simulované hlavy se zvětšil o 0,005 mm (při použití parametrů: $f = 50 \text{ kHz}$, $J_{ext} = 4,39 \frac{A}{mm^2}$, $I_C = 2195A$, $t = 5s$).



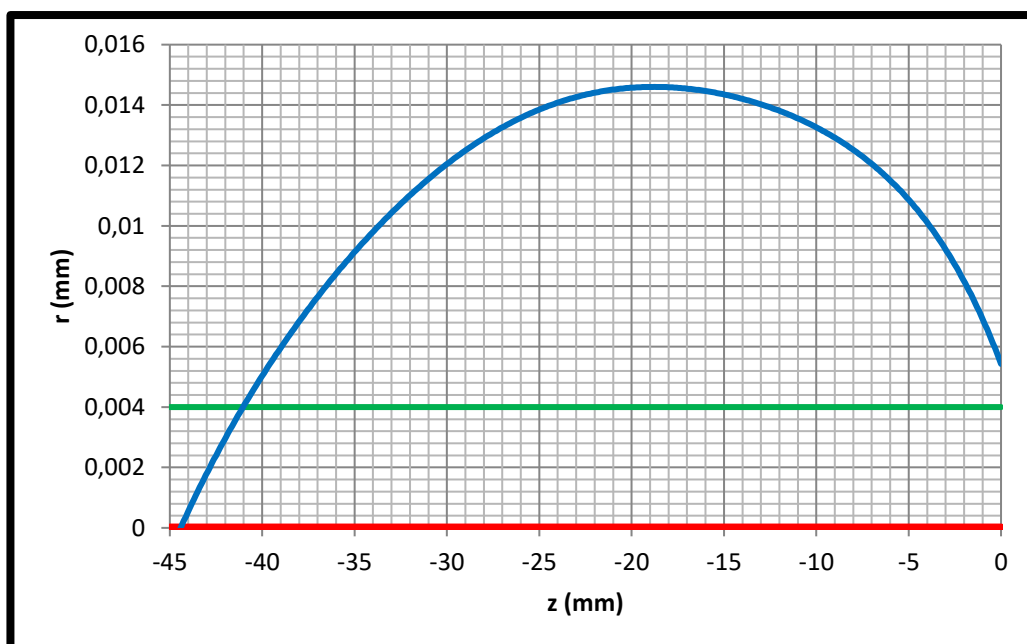
Obr. 25: Znáznornění zvětšení otvoru hlavy

Velice důležitou roli hraje také poloha induktoru, neboť jak můžeme na dalších obrázcích vidět, při nevhodně zvolené vzdálenosti induktoru od upínací hlavy nedojde k potřebnému ohřátí na požadovanou teplotu.

Při zvolení vhodné vzdálenosti upínací hlavy od induktoru dojde k požadovanému zahřátí hlavy. V tomto případě je vzdálenost od osy symetrie rovna 20 mm.



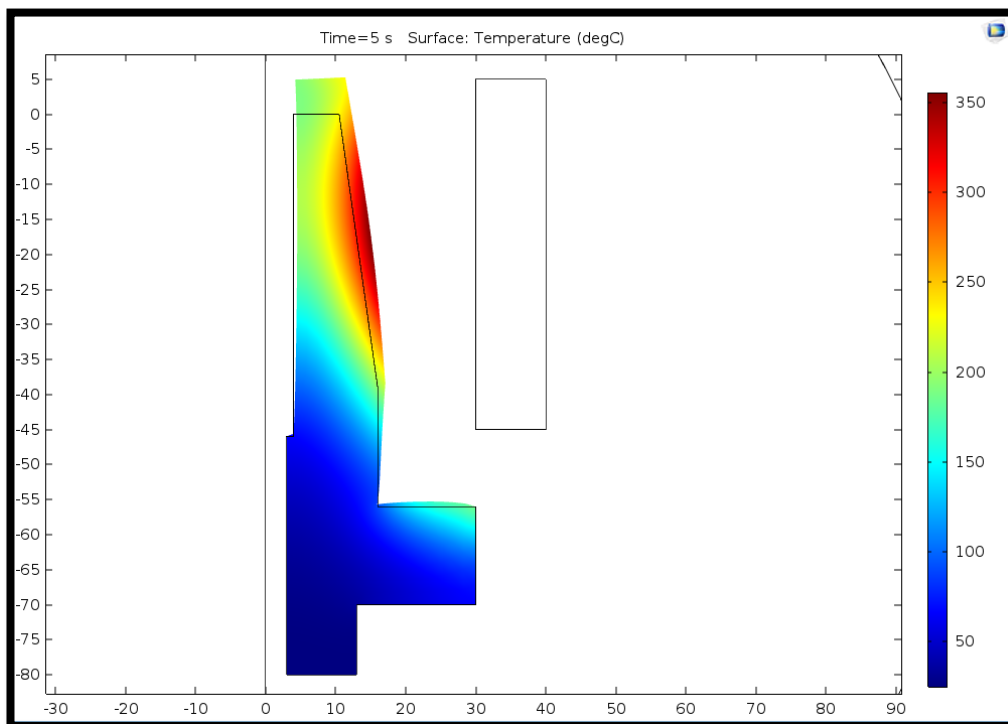
Obr. 26: Znázornění ideální vzdálenosti induktoru od upínací hlavy



Obr. 27: Znázornění roztažnosti hlavy od osy symetrie

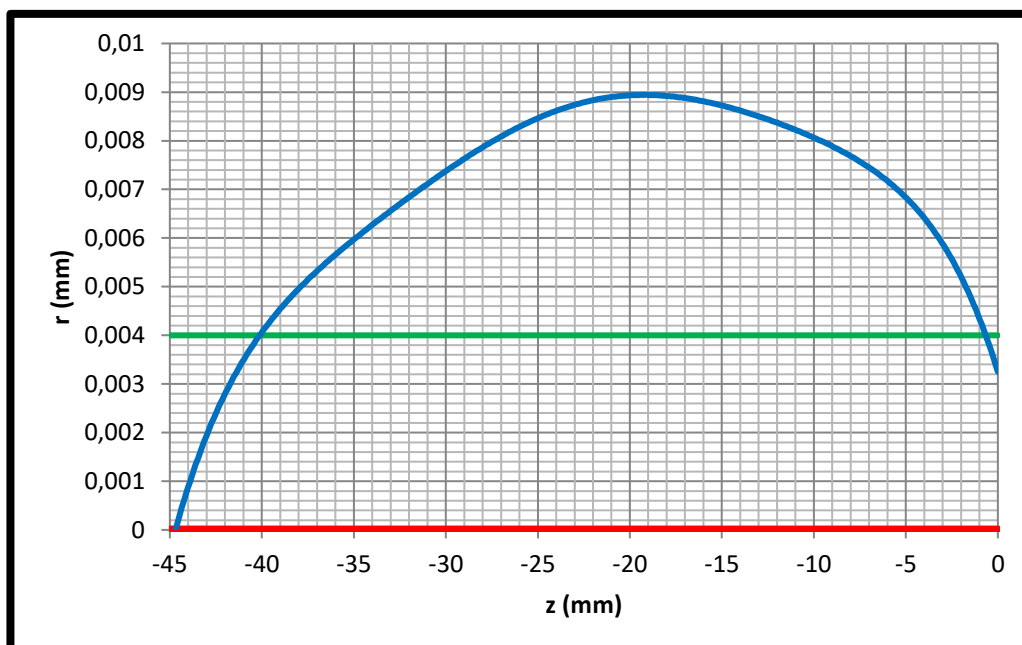
Červená přímka na Obr. 27 znázorňuje původní polohu upínací hlavy, modrá křivka následně hranu upínací hlavy po ohřevu a zelená přímka značí potřebnou minimální velikost poloměru pro vsunutí nástroje.

Pro nevhodně zvolenou vzdálenost nedojde k dostatečnému zahřátí hlavy. V tomto případě je vzdálenost 30 mm.



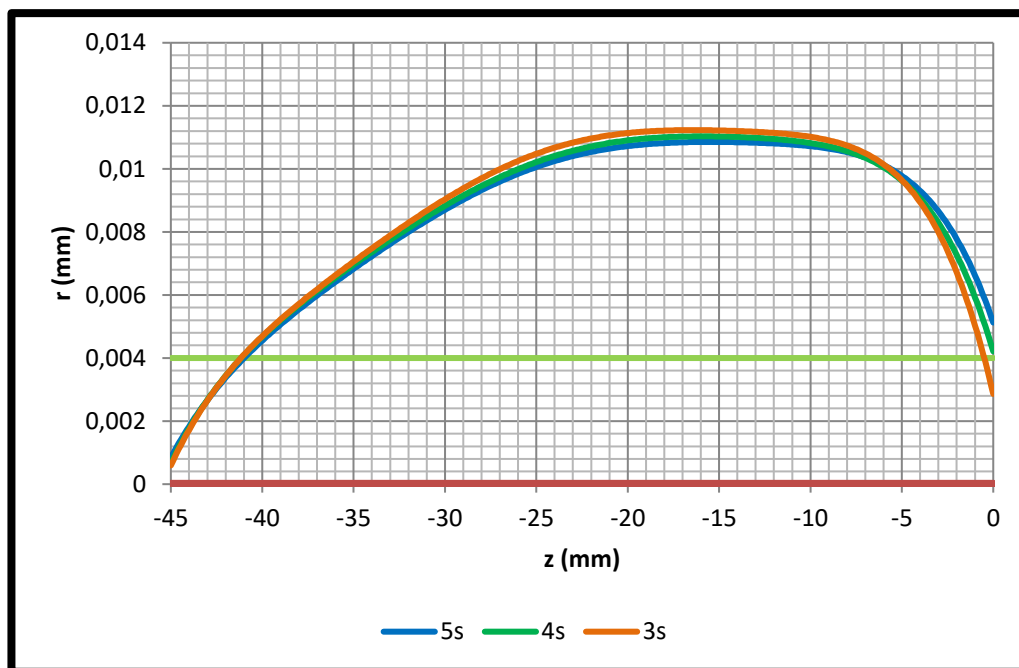
Obr. 28: Znázornění nevhodně zvolené vzdálenosti induktoru od upínací hlavy

Stejně jako v předchozím případě, červená přímka na Obr. 29 znázorňuje původní polohu upínací hlavy, modrá křivka následně hranu upínací hlavy po ohřevu a zelená přímka značí potřebnou minimální velikost poloměru pro vsunutí nástroje.



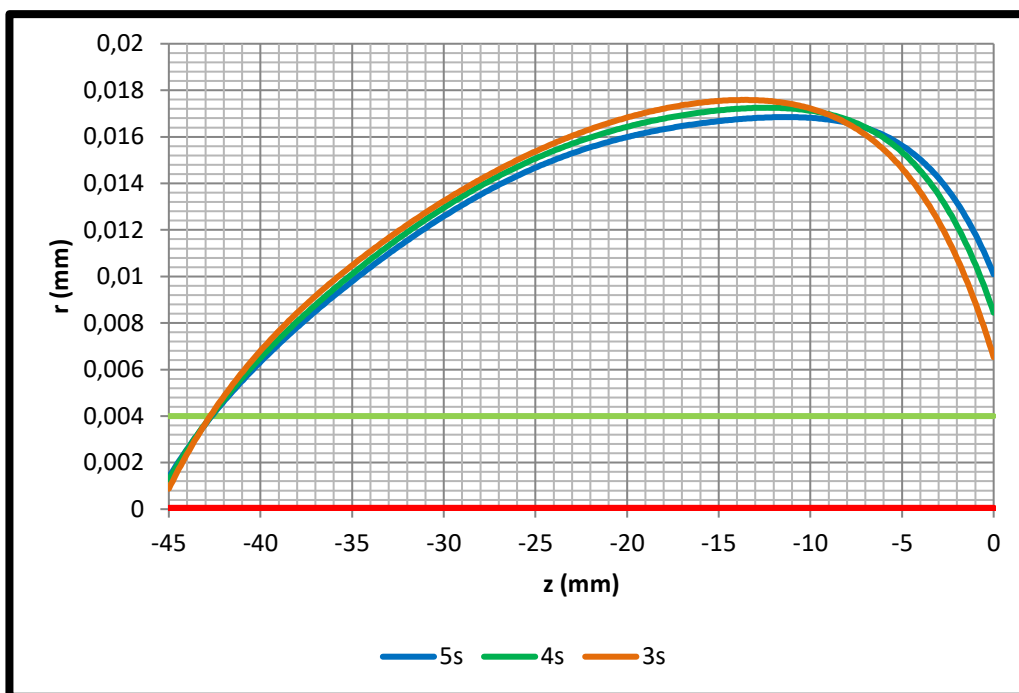
Obr. 29: Znázornění roztažnosti hlavy od osy symetrie

Graf na Obr. 30 znázorňuje, jakým způsobem závisí doba ohřevu na velikosti otvoru pro vsunutí nástroje. Při ohřevu po dobu 5s docílíme nejlepších výsledků, neboť minimální velikost otvoru činí 0,005 mm.



Obr. 30: Znázornění zvětšení otvoru hlavy v závislosti na délce ohřevu

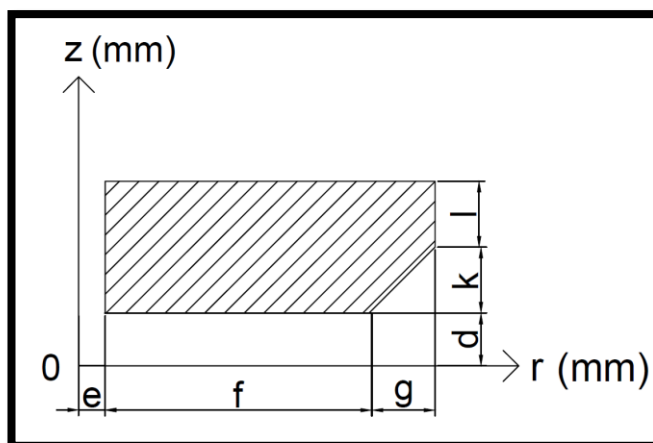
Dále si ukážeme, jakým způsobem se mění parametry a geometrie upínací hlavy při použití koncentrátoru. Na Obr. 31 můžeme vidět, že oproti variantě bez koncentrátoru se otvor upínací hlavy výrazně zvětšil. Vyhovuje dokonce i varianta zahřátí po dobu 3s. Detailnější popis průběhu teploty pro různé délky ohřevu jsou uvedeny v příloze A a B.



Obr. 31: Znázornění zvětšení otvoru hlavy v závislosti na délce ohřevu

V následující části se budeme věnovat koncentrátoru. V našem případě byl využit koncentrátor z kompozitního materiálu Fluxtrol 50. Jedná se o materiál americké firmy Fluxtrol, která se zabývá vývojem a výrobou feromagnetických materiálů po indukční technologii. Mezi charakteristické vlastnosti využitého koncentrátoru patří zejména výborný výkon v širokém pásmu frekvencí (10 - 1000 kHz), dále dobrá magnetická permeabilita v pásmu nízkých a středních frekvencí a nejvyšší permeabilita v pásmu vysokých frekvencí.

Bližší informace ohledně simulovaného koncentrátoru jsou uvedeny na následujícím Obr. 32 a v Tab. 5.



Obr. 32: Schéma koncentrátoru

Tab. 5: Znázornění hodnot koncentrátoru

Název parametru	Výchozí hodnota	Dolní hranice	Horní hranice
d	4	2	20
e	2	1	20
f	20	5	30
g	5	1	20
k	5	1	20
l	5	1	30

V simulaci jsme sestrojili následující rovnici pro posun

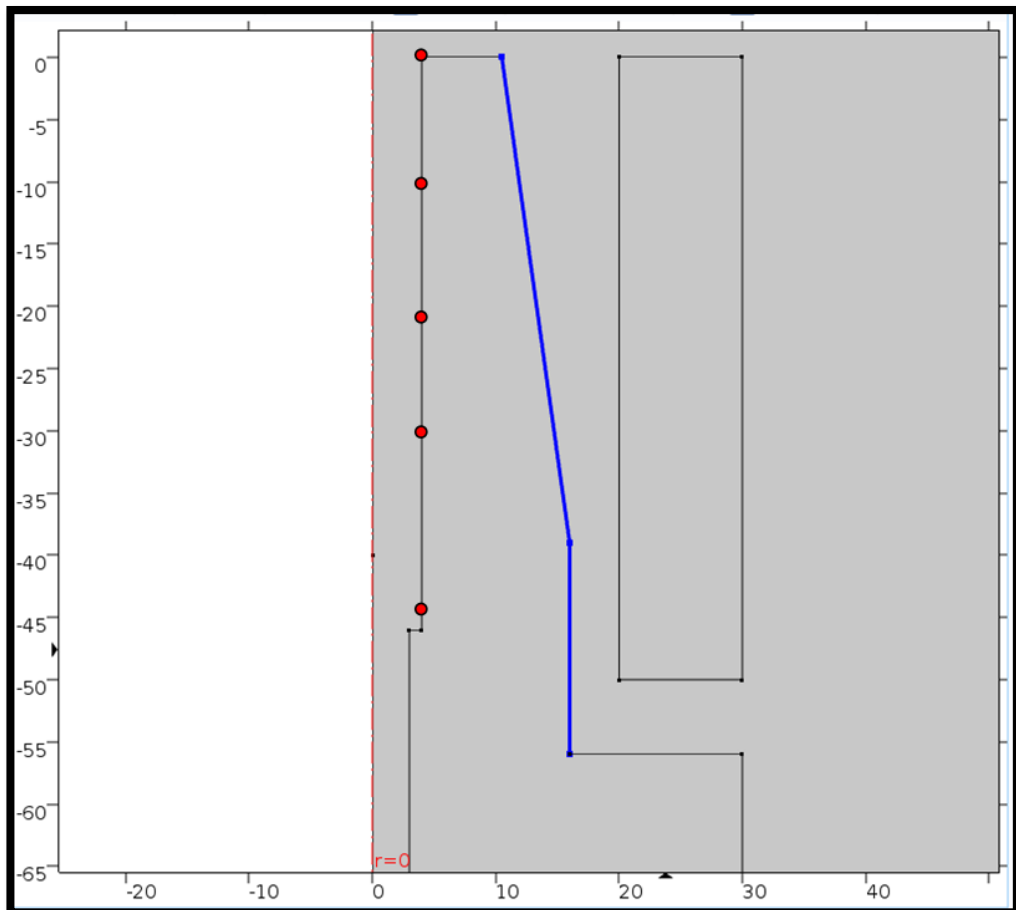
$$\left\{ \begin{array}{l} [((u_i \cdot p) < (u_k \cdot p)) \cdot (((u_k \cdot p) - (u_i \cdot p))^m) + PK] + \\ [((u_i \cdot p) > (u_k \cdot p)) \cdot (((u_k \cdot p) - (u_i \cdot p))^n) + PPK] \end{array} \right\} \quad (6.7)$$

kde u_i značí posun v měřených bodech vnitřní strany upínací hlavy (viz Obr. 33), dále p je převod na základní jednotky, u_k znázorňuje minimální požadovanou hodnotu posunu, m a n značí umocnění pro nevyhovující hodnotu posunu, PK je konstanta pro nesprávnou hodnotu posunu a PKK označuje konstantu pro správnou hodnotu posunu. Konstanty ve vzorci jsou umístěny z důvodu odlišení vyhovující a nevyhovující hodnoty, neboť v programu využíváme možnosti součtu všech funkcí a minimalizaci jejich hodnot. Daná metoda tedy hledá nejmenší možné řešení, a pokud není dosažena minimální požadovaná hodnota, dojde pomocí konstant k umělému zvětšení hodnoty a tím k vyloučení dané hodnoty.

Také jsme sestrojili rovnici pro teplotu, která má následující tvar

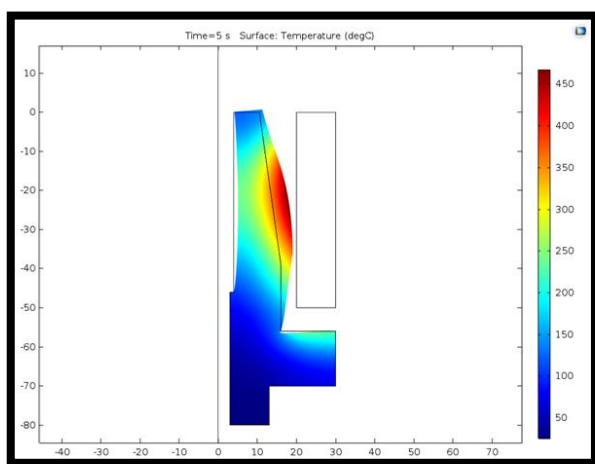
$$\{[(T_i > T_k) \cdot (T_i - T_k)^o + PPT] + [(T_i < T_k) \cdot pT]\}. \quad (6.8)$$

Rovnice 6.8 slouží k zamezení příliš velkému ohřevu upínací hlavy, kde na vnější straně hlavy nesmíme překročit hodnotu 500 °C. Podobně jako u minulé rovnice, T_i značí hodnotu teploty přímky vnější části hlavy (viz. Obr. 33), dále T_k je maximální požadovaná hodnota teploty, o představuje mocninu pro nesprávnou hodnotu, PPT je konstanta pro nesprávnou hodnotu teploty a pT značí konstantu pro správnou hodnotu teploty. V simulaci jsme řešili rovnice posunu pro 5 bodů a 1 rovnici pro kontrolu teploty na přímce, jak je uvedeno na následujícím obrázku. U rovnice přímky jsme měřili střední hodnotu teploty.

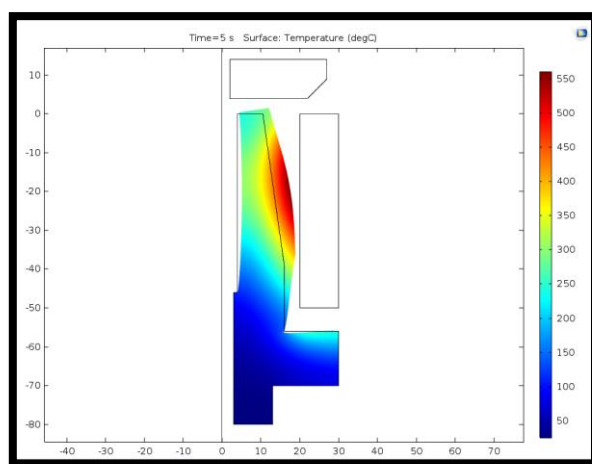


Obr. 33: Měřené části upínací hlavy

Na následujících obrázcích (viz Obr. 34 a Obr. 35) můžeme vidět rozdíl ve variantě s koncentrátorem a bez koncentrátoru. Jak je při porovnání těchto dvou obrázků vidět, tak při použití koncentrátoru docílíme efektivnějšího ohřevu. Dojde k rychlejšímu ohřevu a k výrazně lepšímu prohřátí koncové části hlavy.

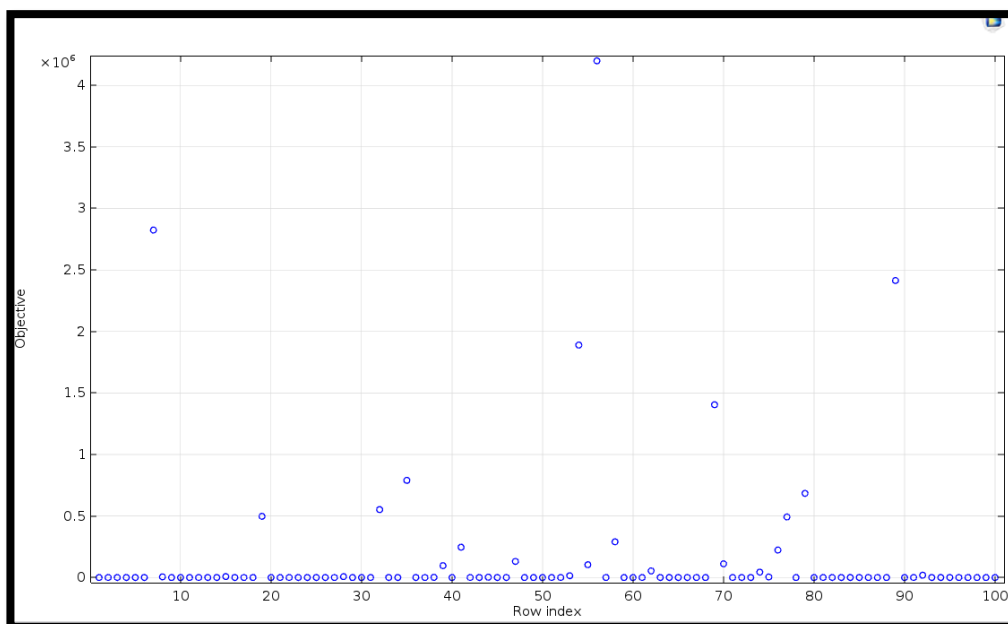


Obr. 34: Varianta bez koncentrátoru



Obr. 35: Varianta s koncentrátorem

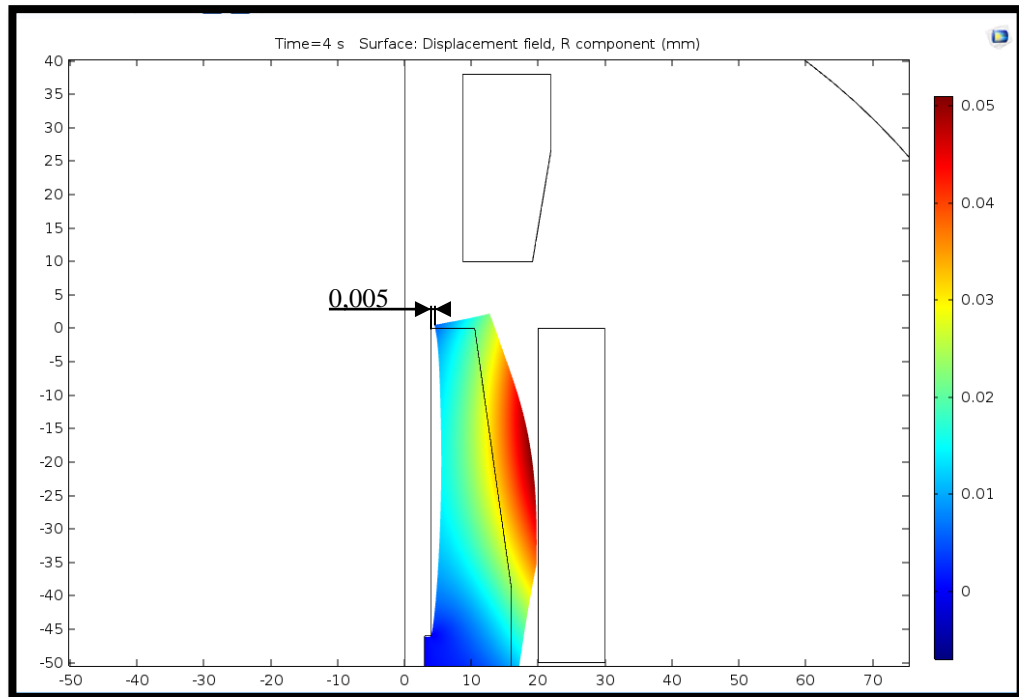
V následující části porovnáme různá řešení optimalizace. Jak již jsme si dříve uvedli, u nevyhovujících parametrů simulace dochází k umělému zvětšení jejich hodnoty a tím k docílení přehledného vyloučení nevhodné geometrie koncentrátoru. Na Obr. 36 jsou znázorněny výsledné hodnoty optimalizace pro metodu Monte Carlo. Díky možnosti vykreslení grafu velikosti výsledné funkce v závislosti na počtu řešení lze velice přehledně odlišit vhodné a nevhodné řešení.



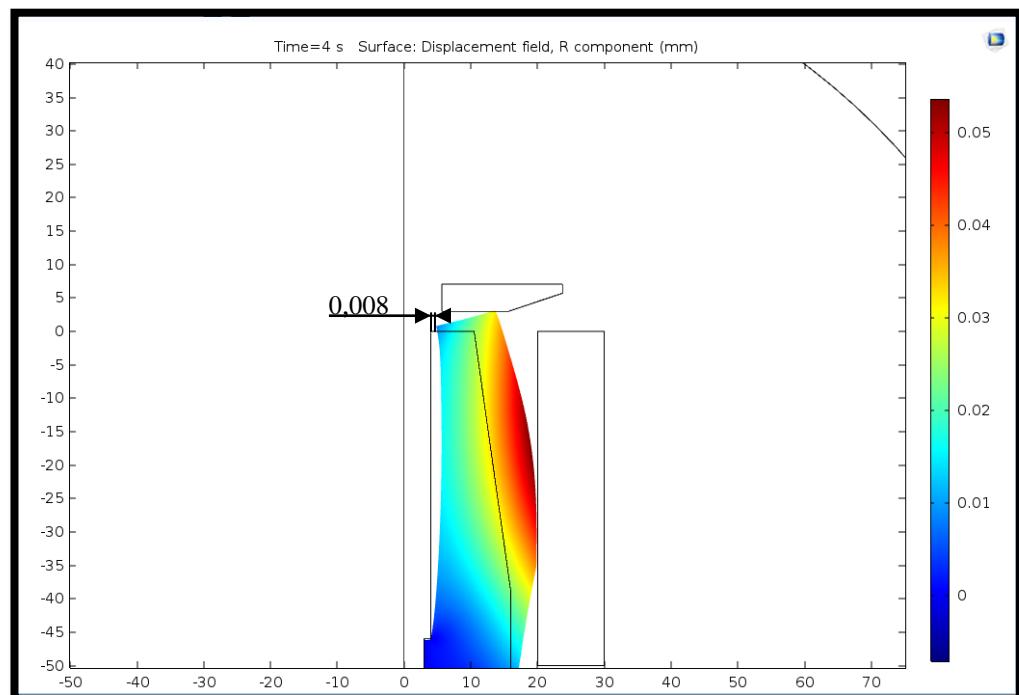
Obr. 36: Metoda Monte Carlo

Dále jsme si provedli výpočet pro konkrétní řešení. Tedy provedeme porovnání vhodného a nevhodného řešení. Při porovnání vhodného a nevhodného řešení (viz Obr. 37 a Obr. 38) je možné vidět rozdíl v rozložení teploty upínací části hlavy, kde u nevhodného řešení nedojde k dostatečnému ohřevu a tedy k nemožnosti vsunutí nástroje.

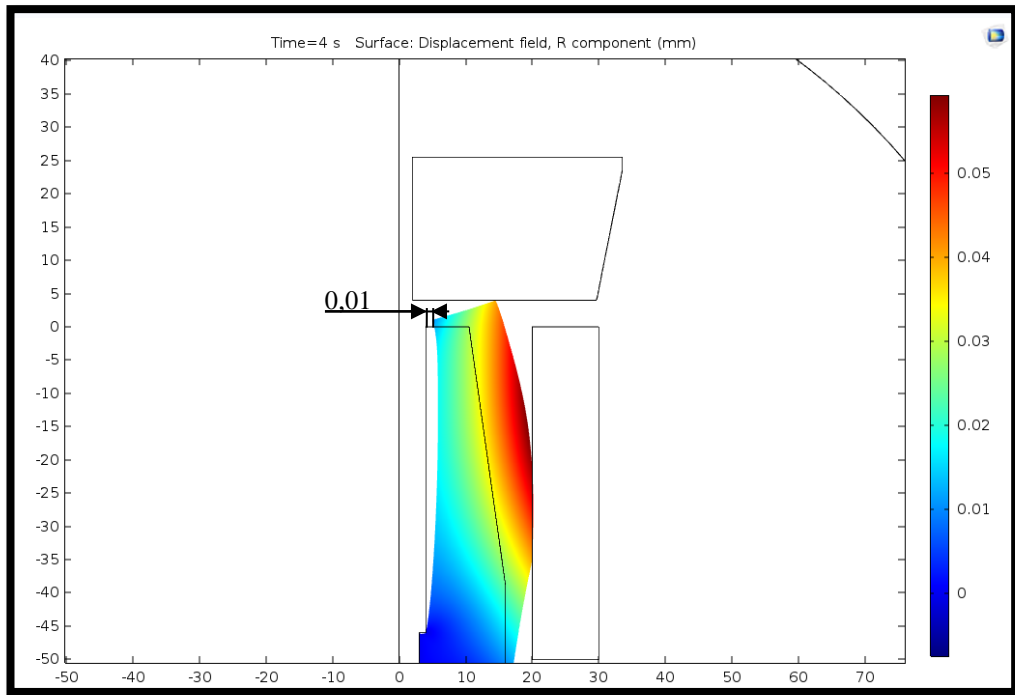
Také je důležité z vhodných variant vybrat tu, u které je reálné vyrobit koncentrátor, neboť program řeší parametry koncentrátoru s přesností 0,001mm. To způsobí, že v reálné situaci lze využít jen některé vhodné možnosti. Dále je potřeba se zaměřit na ekonomickou stránku věci, kde je potřeba vzít v úvahu objem a parametry daného řešení. Neboť lze docílit stejného efektu prohřátí i při použití menšího koncentrátoru jak je možné vidět na Obr. 37 a Obr. 38. Bližší informace ohledně teploty a roztažnosti upínací hlavy jsou uvedeny v příloze C.



Obr. 37: Schéma nevhodného řešení



Obr. 38: Schéma vhodného řešení



Obr. 39: Schéma méně vhodného řešení

7 Zhodnocení výsledků

V této práci jsme se nejprve seznámili s různými způsoby upínání nástrojů. Popsali jsme si jak konvenční, tak i moderní způsoby upínání nástrojů. Věnovali jsme pozornost zejména tepelnému upínání, které v posledních letech zaznamenalo velký rozkvět. Tento zájem je způsoben především výhodami oproti konkurenčním systémům. Mezi tyto přednosti patří především velká upínací síla, která dosahuje až trojnásobek hodnoty oproti klasickým způsobům upínání. Upínací síla vzniká po celé stykové ploše mezi upínací plochou a nástrojem. Další podstatnou výhodou je přesnost upnutí a také rychlost upnutí, kde při zvolení vhodného typu induktoru k dané upínací hlavě dojde k zahřátí na potřebnou hodnotu za několik málo sekund. Obvykle se tento časový interval pohybuje mezi 3 až 5 sekundami. Následně jsme se v této práci zabývali matematickým modelem, kde jsme si popsali magnetické pole, teplotní pole a pole termoelastických deformací. Poznatky z těchto polí jsme následně využili při provádění simulace v programu COMSOL, kde jsme si nejprve vytvořili geometrii upínací hlavy. Využili jsme reálné parametry hlavy od firmy Gühring. Následně jsme se zabývali induktorem, u kterého jsme si nejprve vypočítali proudovou hustotu. Tento parametr je velice důležitý, neboť při nesprávném výpočtu by nedošlo k požadovanému prohřátí hlavy. Hodnota proudové hustoty pro náš induktor činila $J_{ext} = 4,39 \frac{A}{mm^2}$, kde při frekvenci $f = 50 \text{ kHz}$ a době ohřevu $t = 5 \text{ s}$ jsme se pohybovali v ideálním rozmezí 500 – 600 °C. Pokud by došlo k překročení této teploty, docházelo by k překročení Courieroovy teploty a ke strukturálním změnám. Tyto změny by byly nežádoucí, neboť pro tepelné upínání je důležité si zachovat svoji elasticitu. Naopak při prohřátí upínací hlavy na nižší teplotu než je dané rozmezí by došlo k nedostatečnému rozevření otvoru a tudíž by nebylo možné vsunout nástroj. Vyzkoušeli jsme si řadu možností simulace. Provedli jsme porovnání polohy induktoru, kde při zvětšení vzdálenosti induktoru od upínací hlavy o pouhých 10 mm může způsobit teplotní rozdíl až 200 °C. Dále jsme si vyzkoušeli, jaký vliv má čas ohřevu na roztažnost hlavy. Například při ohřevu hlavy po dobu 5s se otvor rozevře o 0,005 mm. Při porovnání 4s a 5s ohřevu činí rozdíl rozevření minimálních poloměrů hlavy 0,001 mm. V další části práce jsme se věnovali koncentrátoru, který slouží k usměrnění toku a tedy k efektivnějšímu řešení tepelného upínání. Navrhli jsme si vlastní geometrii koncentrátoru, pro který jsme využili materiál od společnosti

Fluxtrol. Nejprve jsme si vyzkoušeli pro pevnou geometrii, jaký vliv má koncentrátor na daný ohřev. V další části jsme se zabývali optimalizací, kde díky možnosti v programu COMSOL jsme si vytvořili rovnice pro námi požadované parametry. Měli jsme požadavek, že střední teplota na vnější straně hlavy nesmí překročit 500 °C a posun vnitřní hrany musí být větší než 0,0055 mm. Provedli jsme optimalizace pro různé metody řešení, kdy každá metoda při každém kroku vypočetla určitou geometrii a pomocí námi daných rovnic byla vyhovující či nikoliv. Tento způsob simulace v dnešní době velice usnadňuje práci, neboť je možné si danou situaci vyzkoušet a není potřebné provádět metodu „pokus-omyl“ v reálném prostředí. Metoda nám vypočítala mnoho variant geometrie koncentrátoru. Většina těchto hodnot se jevila jako vyhovující, ale je potřeba brát zřetel na možnosti výroby. Metoda nám vypočítala parametry koncentrátoru s přesností 0,001 mm. Koncentrátor s takovouto přesností není možné reálně vyrobit a je tedy potřeba vybrat vhodnou geometrii, která je proveditelná. Je také důležité brát ohled na cenu materiálu, neboť ve vhodných variantách jsou také velice odlišné geometrické tvary. Například koncentrátor, který je v porovnání hmoty trojnásobný nemusí automaticky splňovat lepší parametry. Je tedy potřeba zhodnotit všechny možnosti, jako je úspora energie a času při použití koncentrátoru v porovnání s cenou materiálu koncentrátoru. Jak již jsme si dříve uvedli, tato diplomová práce měla za cíl vytvořit přehledný úvod do problematiky tepelného upínání. V další práci bych chtěl tímto tématem pokračovat a získat další informace ohledně tepelného upínání a přispět k efektivnějšímu využití této metody.

8 Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Grumant s.r.o. Upínání nástrojů [online]. Praha: Grumant, 2013 [cit. 2016-10-5]. Dostupné z: <http://www.grumant.cz/produkty/nastroje-pro-obrabeni/upinani-nastroju>
- [2] PRUDILOVÁ, Gabriela. Polygonální upínače nástrojů. Mmspektrum [online]. 2014 (140623) [cit. 2016-11-8]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/polygonalni-upinace-nastroju.html>
- [3] AMBROŽ, Pavel. Moderní systémy upínání. Mmspektrum [online]. 2006, (060626) [cit. 2016-11-8]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/moderni-systemy-pro-upinani-stopkovych-nastroju.html>
- [4] HANA, Sochová, Skácelík JIŘÍ a Vávra TOMÁŠ. Upínání nástrojů [online]. 2015 [cit. 2016-11-5]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/2661>
- [5] Habilissteel. Tepelné upínání nástrojů [online]. 2016 [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <https://www.kovoobrabeci-nastroje.cz/sekce/tech-news/>
- [6] SCHUNK Intec s.r.o. [online]. 2016 [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: http://cz.schunk.com/cz_de
- [7] Sandvik coromant. Polygonální upínání [online]. 2014 [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <http://news.cision.com>
- [8] M. J. D. POWELL. *The BOBYQA algorithm for bound constrained optimization without derivatives* [online]. 2009 [cit. 2017-04-27]. Dostupné z: http://www.damtp.cam.ac.uk/user/na/NA_papers/NA2009_06.pdf
- [9] *Obráběcí stroje a technologie* [online]. 2004, (040541), 30 [cit. 2017-04-29]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nova-koncepce-tepelneho-upinani-nastroju.html>
- [10] DŘÍMAL, Jiří, David TRUNEC a Antonín BRABLEC. *Úvod do metody Monte Carlo* [online]. Brno, 2006 [cit. 2017-04-29]. Dostupné z: <http://www.physics.muni.cz/~trunec/mc.pdf>
- [11] HRUŠ, Tomáš. *Základy optimalizace - Klasické metody* [online]. In: . [cit. 2017-04-30]. Dostupné z: http://www.kmp.tul.cz/system/files/zaklady-optimalizace-1-of-2_0.pdf
- [12] LUDVÍK, Pavel. *Optimalizace aneb mocné zaklínadlo moderní doby* [online]. 2016 [cit. 2017-05-04]. Dostupné z: <https://cz.linkedin.com/pulse/optimalizace-aneb-mocné-zaklínadlo-moderní-doby-pavel-ludvík>
- [13] HRUŠ, Tomáš. *Základy optimalizace: Klasické metody* [online]. [cit. 2017-05-04]. Dostupné z: http://www.kmp.tul.cz/system/files/zaklady-optimalizace-1-of-2_0.pdf
- [18] *BILZ Werkzeugfabrik GmbH & Co. KG* [online]. In: . [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: <http://www.bilz.de/en/applications-products/thermogripr/isg-shrink-units/isg3400-professional/>

- [19] *Direct industry: Kelch* [online]. In.:2017 [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/kelch/product-11964-399370.html>

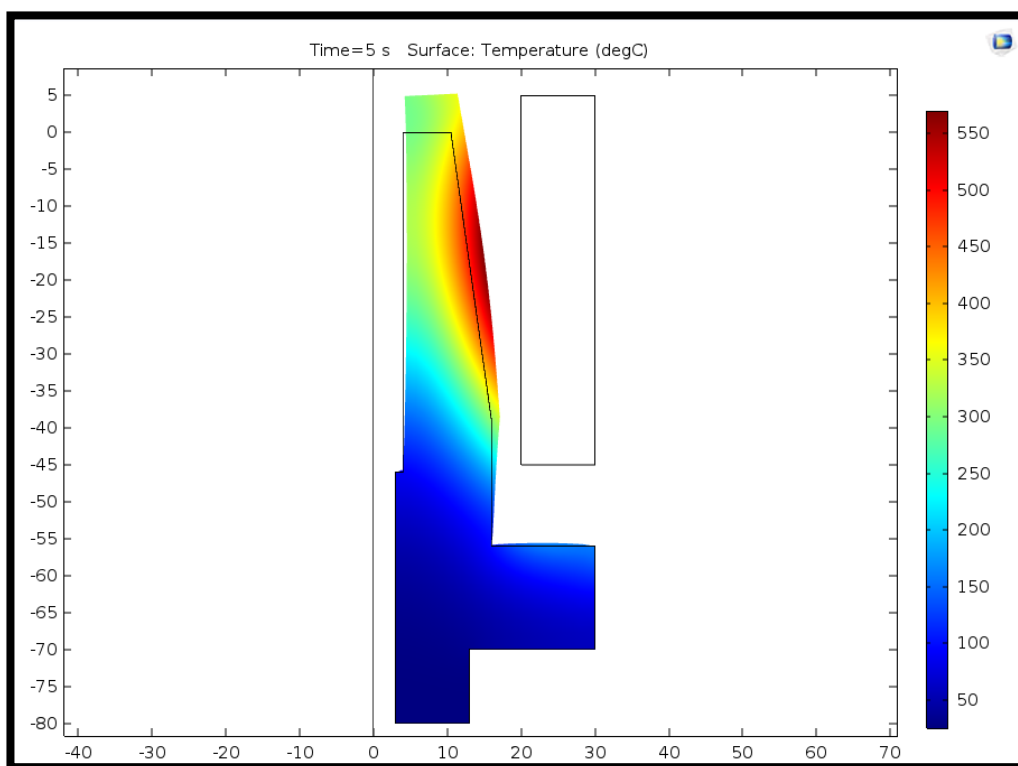
9 Seznam patentů

- [14] IRION, Ingo a Michael VOSS. US6991411 B2. Zapsáno 31. leden 2006.
- [15] STEUDTE, Ruediger. US 7157676 B2. Zapsáno 2. leden 2007.
- [16] KELCH, Matthias. US 6755228 B2. Zapsáno 29. červen 2004.
- [17] GRUBER, Jochen. US7390153 B2. Zapsáno 31. leden 2006.

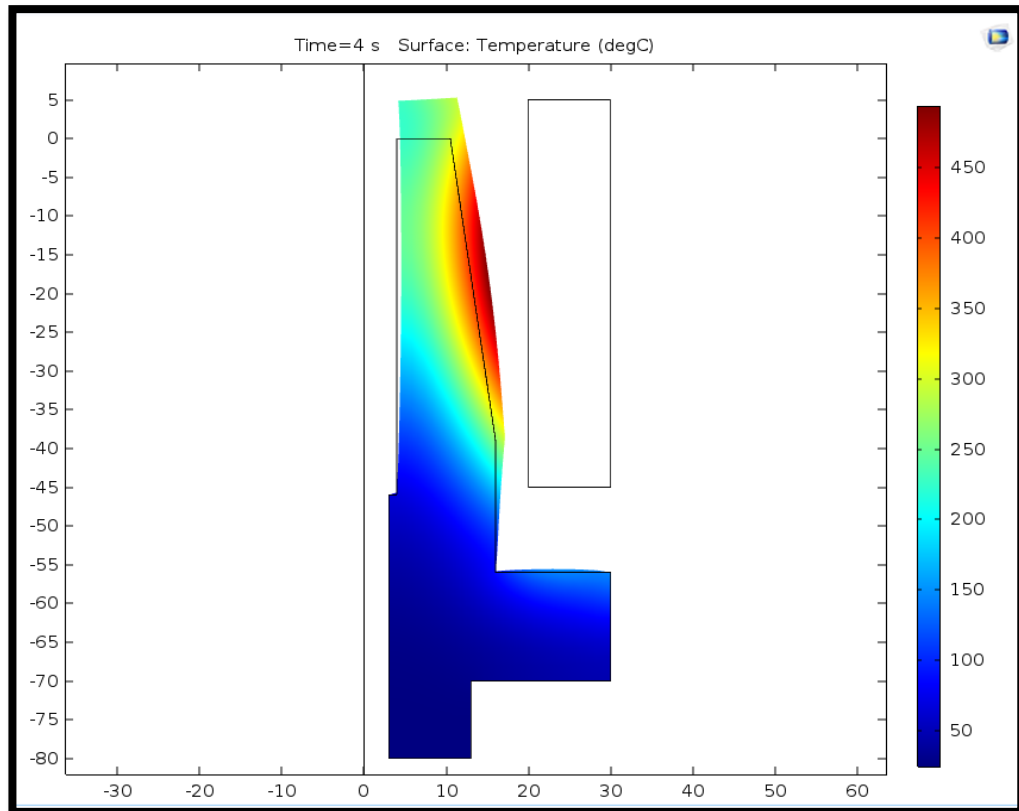
Část II.
Přílohy

A. Výsledky bez použití koncentrátoru

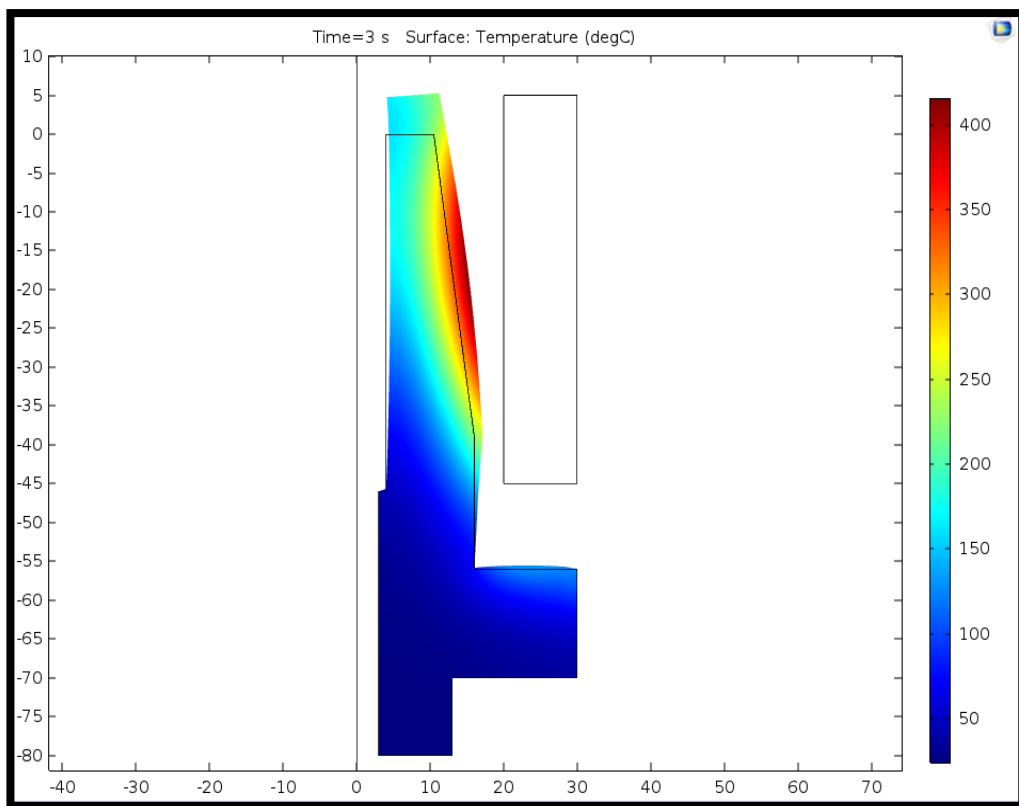
V následující části si ukážeme, jaký vliv má doba ohřevu na upínací hlavu. Při porovnání simulovaných ohřevů můžeme vidět, že nejvyšší teplota na okraji upínací hlavy se nám s každou sekundou zvyšuje o zhruba 70 °C. Pro požadované ohřátí hlavy je tedy zapotřebí pro zvolené parametry volit dobu 4 – 5s.



Doba ohřevu 5s



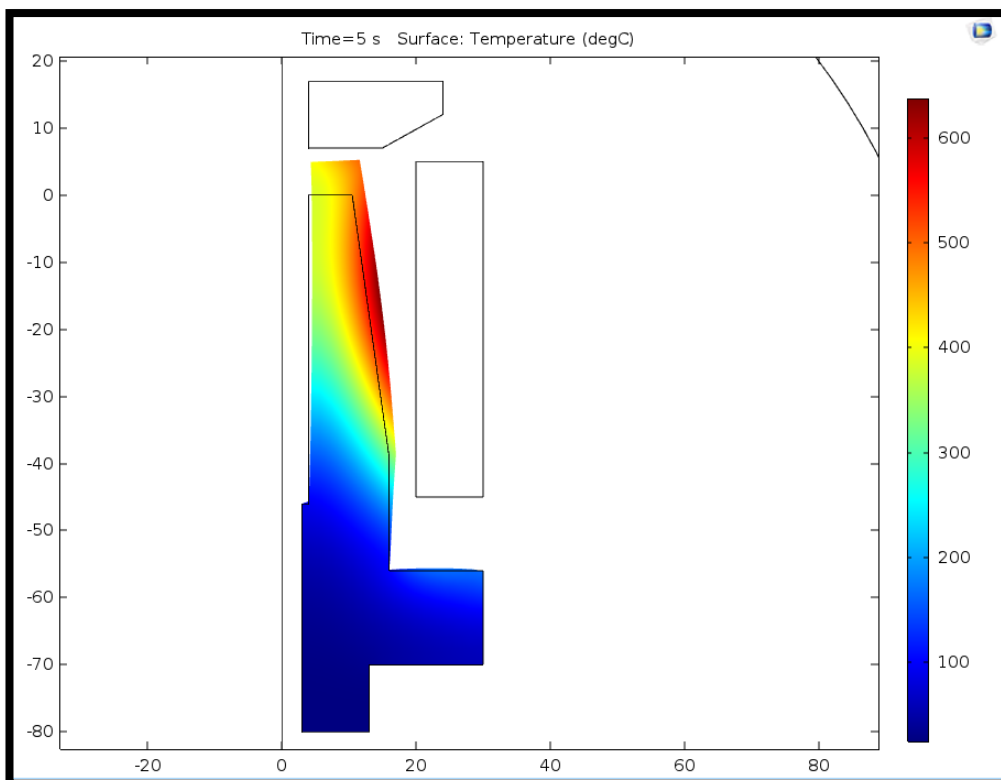
Doba ohřevu 4s



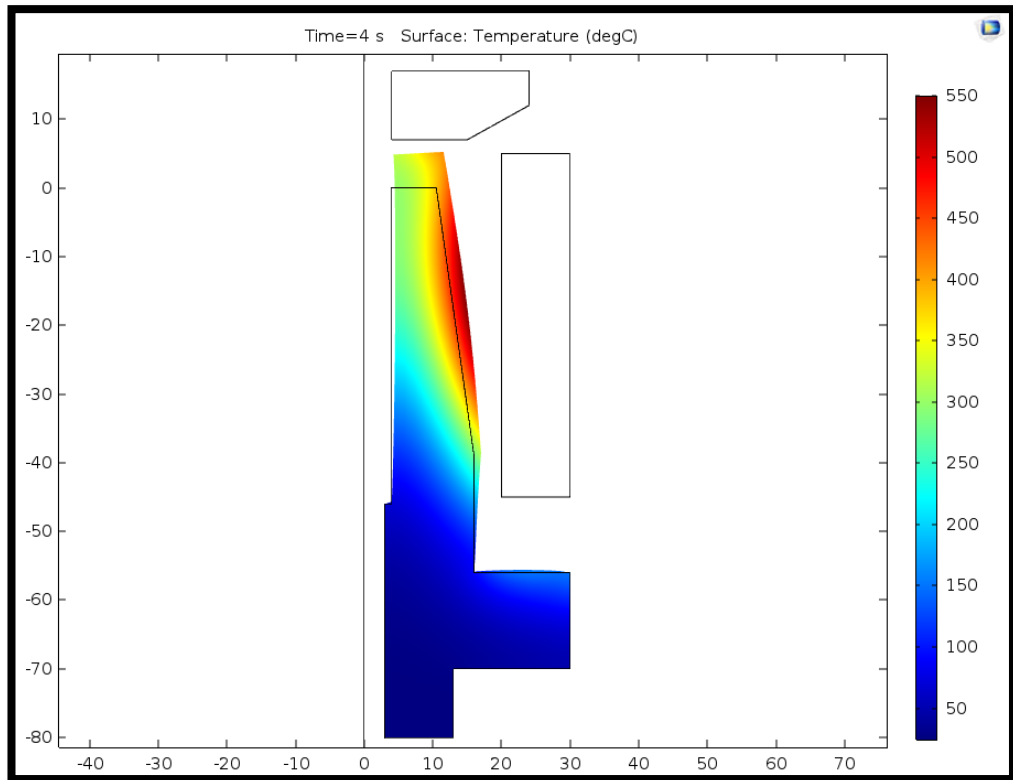
Doba ohřevu 3s

B. Výsledky s použitím koncentrátoru

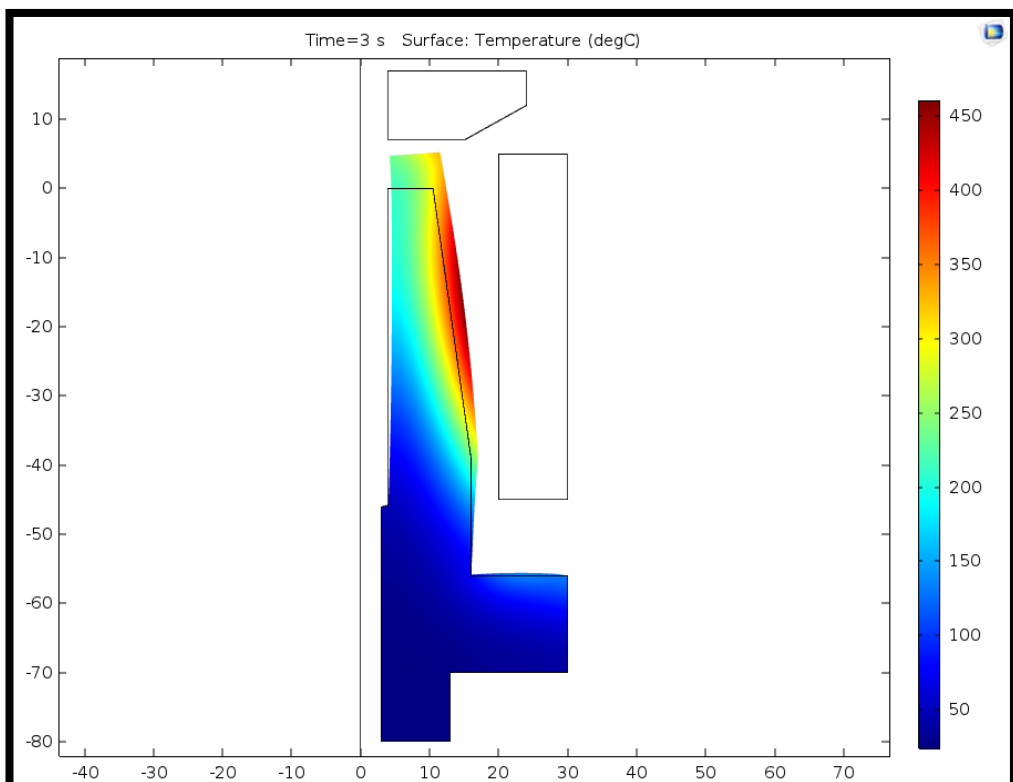
Při ohřevu po dobu 5s docílíme mnohem vyšších teplot, než tomu bylo u hlavy bez koncentrátoru. Upínací hlava je ovšem omezena svými vlastnostmi a není teda možné ji ohřívat po dobu 5s, neboť optimální teplota je mezi 500 – 600 °C. Při využití koncentrátoru tedy docílíme mnohem rychlejšího ohřevu na požadovanou teplotu a tím i menší energetickou náročnost zařízení.



Doba ohřevu 5s



Doba ohřevu 4s



Doba ohřevu 3s

C. Porovnání různých tvarů koncentrátoru

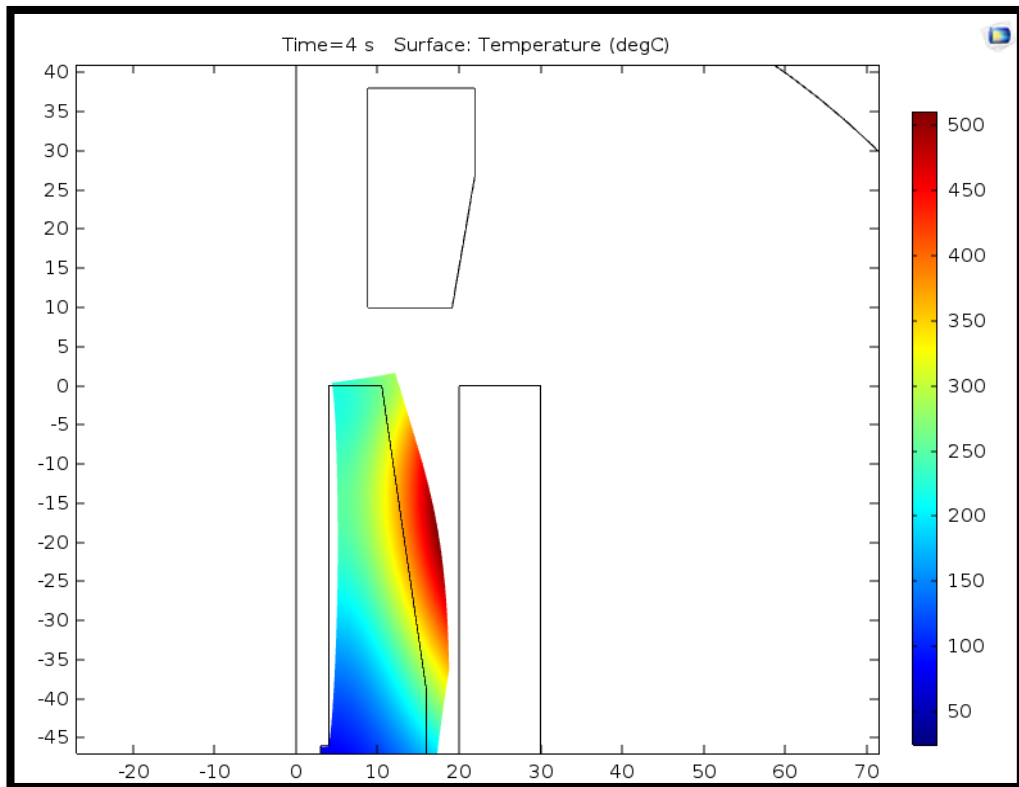


Schéma nevhodného řešení

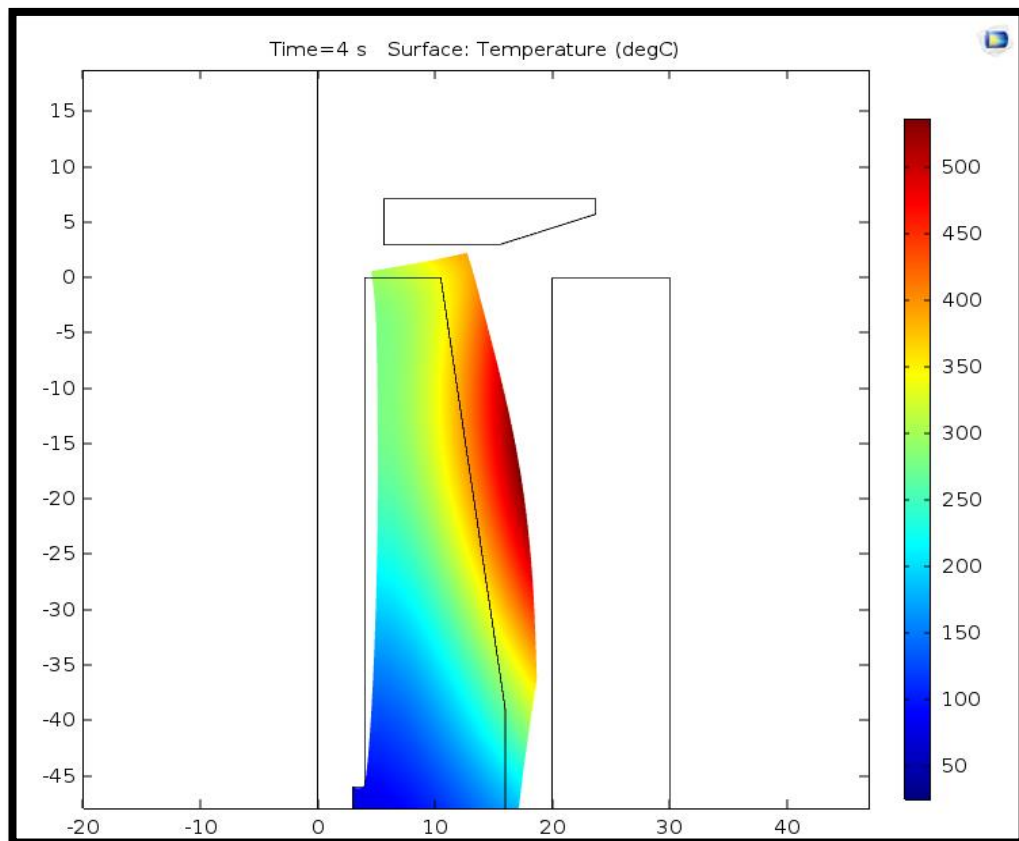


Schéma vhodného řešení

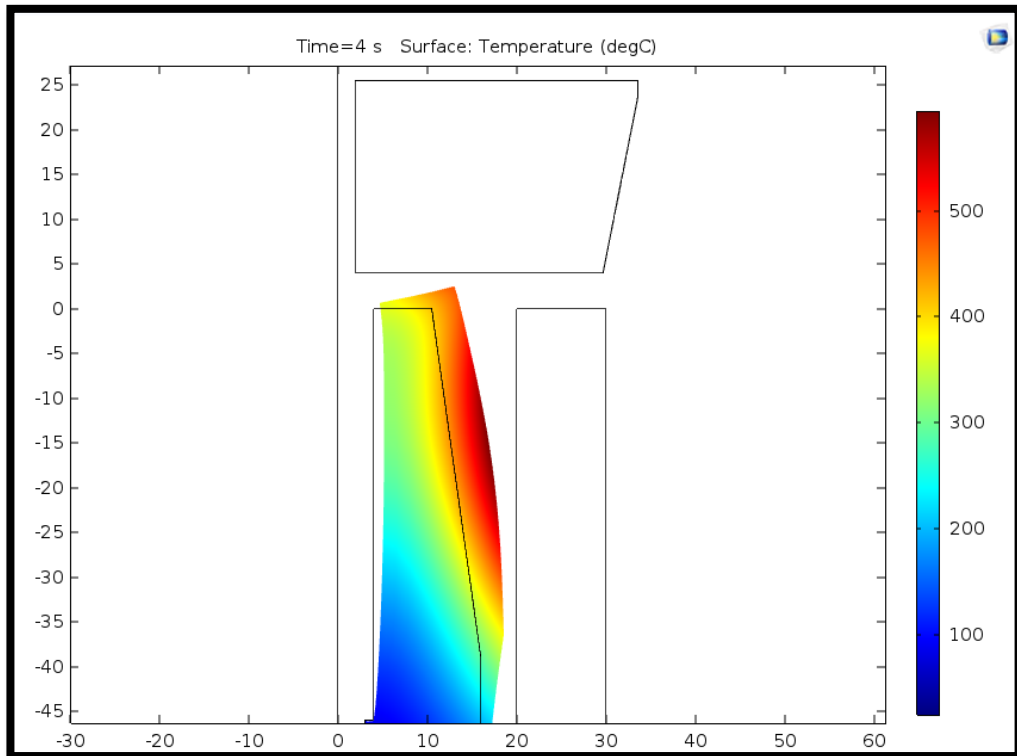
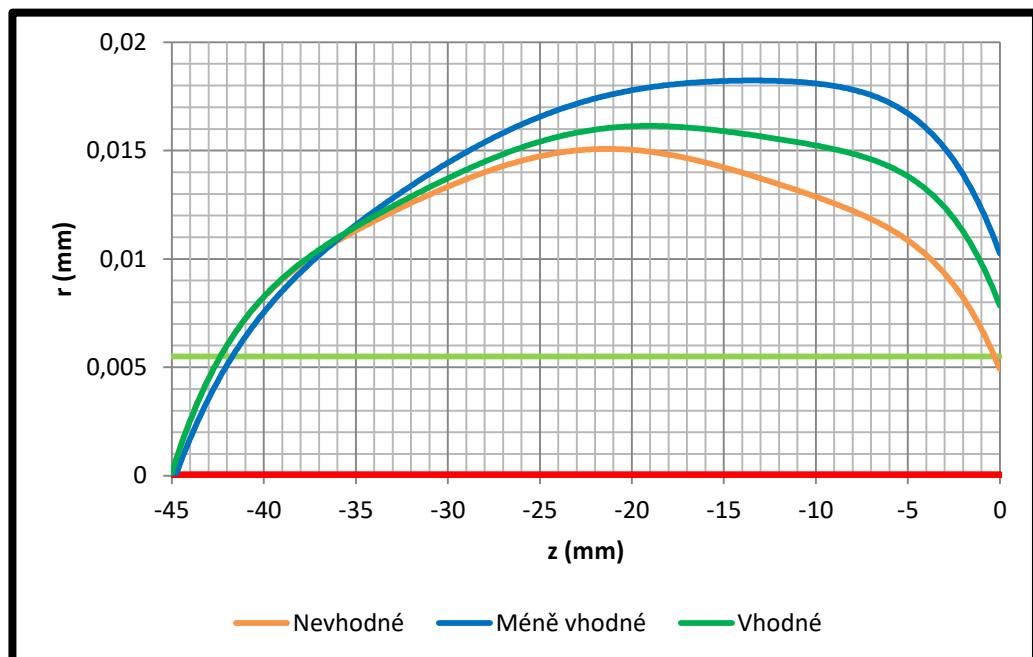


Schéma méně vhodného řešení



Porovnání roztažností řešených koncentrátorů