

# Oponentní posudek na disertační práci

Doktorand: Ing. Lukáš Koudela

Oponent: doc. Dr. Ing. Jan Kyncl

Téma disertační práce: „Numerické modelování a optimalizace procesů lisování za tepla“

Disertační práce je přehledně a formálně správně zpracována, s dobrou úrovní jazyka. Grafická úroveň práce je velmi dobrá. S uvedenými závěry lze souhlasit.

K práci mám následující dotazy a připomínky:

- Jednotky vektoru elektrické indukce a tepelné vodivosti v „Seznamu důležitých veličin“ jsou chybně.
- V „Seznamu“ autor uvádí jednotku teploty pouze °C, což není v souladu např. se vzorcem pro hustotu tepelného toku emitovaného radiací na str. 23. Mimochodem, nejde o hustotu emitovaného toku, ale o výsledné sálání a to navíc pouze v uspořádání typu „těleso samo na sebe nesálající zcela obklopené podstatně větším, nebo absolutně černým tělesem“.
- Konvekce v okrajové podmínce je uvažována do okolí a v podstatě lineárně závislá na otáčkách. Jak se dospělo k této závislosti součinitele přestupu tepla konvekcí? Lineární závislost je zvláštní, při nucené konvekci jsou mocniny Reynoldsova čísla v korelaci pro Nusseltovo číslo obvykle menší než jedna. Proudění v uvažované geometrii je poměrně komplikované a je otázkou, nakolik je model uvažující sdílení jen do okolí realistický.
- Autor uvádí hodnotu relativní permeability 448.82 Jak se dospělo k této nerealisticky přesné hodnotě? Jaké oblasti hysterezní křivky se týká?
- Jaké byly přibližně hodnoty velikosti vektoru magnetické indukce v ohřívaném materiálu? Jde v případě závislosti na Obr. A.1 o efektivní permeabilitu z hlediska ohřevu?
- Označení  $E_v$  jako „vtištěná síla“ (str. 19) není úplně vhodné.
- Objemová hustota Jouleových ztrát podle grafů na str. 42 a dalších je maximálně  $600 W \cdot m^{-3}$ . Vezmu-li hustotu oceli přibližně  $7500 kg \cdot m^{-3}$  a měrnou tepelnou kapacitu  $470 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ , dostávám při adiabatickém ohřevu rychlost nárůstu teploty v čase pod  $2 \cdot 10^{-4} K \cdot s^{-1}$ . Odečtu-li rychlost ohřevu z Obr. 5.7, dostávám hodnoty o tři až čtyři řády větší. Co je důvodem tohoto nepoměru?
- Jako čtenář bych uvítal informaci, jaké bylo nastavení parametrů optimalizace pomocí genetických algoritmů (pravděpodobnost mutace, použití ruletového výběru atd.).
- V podstatě celá práce se zabývá upínáním nástrojů pomocí ohřevu materiálu, je otázka, nakolik je vhodný název práce týkající se lisování za tepla.

Závěry oponentského posudku:

Autor odvedl velké množství práce při realizaci modelů, měření na zařízení a vyhodnocení výsledků. Uvedené výtky považuji za formální nebo spíše za důležité pro další vědeckou a výzkumnou práci; práce se svým rozsahem, hloubkou analýzy problematiky, důrazem na ověření výsledků měření jistě řadí v daném oboru k pracím nadprůměrným.

Shrnutí:

- Práci považuji za přínosnou a aktuální z hlediska současného stavu vědy. Práce podle mého názoru obsahuje původní přínosné části, zejména zjištění vhodné hodnoty součinitele přestupu tepla porovnáním simulací a výsledků měření.
- Použité metody považuji za odpovídající.
- Seznam prací, kterých je Ing. Lukáš Koudela autorem nebo spoluautorem, je poměrně rozsáhlý, většina prací odpovídá oboru „Elektrotechnika“. Jádro práce považuji za dostatečně publikované. Myslím si, že schopnost publikovat výsledky své odborné práce kandidát prokázal a že jde o pracovníka s vědeckou erudicí.
- Práci ve smyslu zákona 111/1998 Sb., § 47 *doporučuji* k obhajobě.

V Praze 4. 5. 2015

doc. Dr. Ing. Jan Kyncl



Oponentní posudek na disertační práci doktoranda Ing. Lukáše Koudely :

### Numerické modelování a optimalizace procesů lisování za tepla.

Disertační práce vznikla v rámci projektů RICE a GAČR zaměřených na numerické řešení multifyzikálních problémů v elektrotechnice. Konkrétně se jedná o modelování magneto-termo-elastických procesů při fixaci rezných nástrojů ve vřetenech obráběcích strojů, tedy o upevnění válcové části nástroje „svěrem“, na principu ohřevu upínací hlavy. Obsah práce tedy ne zcela odpovídá názvu disertační práce.

V úvodní kapitole jsou přehledně popsány současné techniky upínání nástrojů, včetně jejich výhod a nevýhod. Těžištěm práce je rotační indukční ohřev upínacího pouzdra ve stacionárním magnetickém poli, tedy na principu obráceného synchronního stroje, kde „stator“ představuje pólový systém složený z permanentních magnetů NdFeB a „masivní rotor“ je upínací pouzdro, které je spojeno s obráběcím nástrojem (vrtákem nebo frézou) a následně jako celek s vřetenem obráběcího stroje.

V kapitole „Matematický model“ jsou pro řešení nelineárního a nestacionárního systému uvedeny rovnice magnetického, teplotního a deformačního pole, včetně okrajových podmínek a mechanických parametrů.

Pro vlastní řešení metodou FEM byla zvolena aplikace SW Argos2D, včetně pokročilých a optimalizačních algoritmů, citlivostní analýzy a genetického algoritmu. Obecný problém ve 3D je řešen jako 2D.

V kapitole 5. je proveden výpočet a měření na konkrétním příkladu. Jedná se o ohřev termoelastické upínací hlavice typu HSK-C pro nástroje o průměru 8 mm. Cílem mělo být ověření shody mezi výpočtem a naměřenými hodnotami. Pro řešení byly zvoleny dvě varianty uspořádání budícího systému (statoru) pro 4 a 6 pólů. Permanentní magnety na bázi NdFeB jsou bez další specifikace (je uvedena jen remanentní indukce  $B_r = 1,26$  T). Rozměry PM - šířka 5 až 15 mm, výška 5 až 20 mm, délka ani axiální poloha vůči hlavici nejsou uvedeny. Velikost vzduchové mezery je v rozsahu 2,5 až 10 mm, dále však není specifikováno ve které části upínací hlavice je mezera uvažována (není jasné, zdali jsou PM rovnoběžné s konickým povrchem hlavice nebo jsou na válcové ploše). Zapuštění magnetů do magnetického obvodu je od 0 až do výšky magnetu. Průběhy teplot jsou sledovány a vyhodnocovány v bodě „A“, tedy na vnitřním průměru a vnější hraně upínací hlavice. Zajímavý by byl i průběh teplot na celém povrchu hlavice. Optimální konfigurace pro jednotlivé varianty ( $2p = 4$  resp. 6) jsou uvedeny v Tab. 5.3 a 5.4. a byly dosaženy na základě mnoha časově náročných výpočtů. Hodnoty uváděné v tisícinách jsou v praxi nedosažitelné. V závislosti Jouleových ztrát, na Obr.5.14 až 5.19, není jasné na kterých místech jsou počítány. Rozptyl jednotlivých hodnot je velmi veliký (0 až 400 [W .m<sup>-3</sup>]). Problematika zmenšování přesahu je zdůvodňována rozdílným koeficientem teplotní roztažnosti materiálů hlavice a nástroje. V práci je však uveden pouze koeficient  $\alpha T$  pro materiál hlavice, tedy ocel ČSN 19552. V závěru práce je zmíněna varianta uspořádání s vnějším „rotorem“, kdy se magnetický obvod s PM otáčí a upínací hlava stojí.

Doktorand postupoval metodicky dle kroků, uvedených v kapitole „Motivace a cíle práce“. Lze konstatovat, že práce má význam pro použití v oboru upínání nástrojů vysokootáčkových obráběcích strojů. K závěrům se autor dostal až po propočtení mnoha variant, což je metoda časově velmi náročná. Významná je však shoda teoretických výpočtů s měřeními na konkrétní aplikaci. Důvodem pro dosažení menších přenositelných momentů, než je pro praktickou realizaci nutné, bylo zvolení menšího „svěru“ a to z důvodu možnosti realizace experimentu. Řešením by bylo zvýšení velikosti dodané energie a to zřejmě zvýšením magnetické indukce v prostoru mezi „statorem“ a „rotorem“ nebo zvýšením otáček nebo kombinací obou. Vyšší frekvence lze dosáhnout zvýšením počtu pólů.

Úvodní část práce má 11 stran (anotace, seznam důležitých veličin, obsah), vlastní práce pak má celkem 60 stran psaného textu, obrázků, tabulek a příloh. Seznam literatury obsahuje celkem 69 položek a to jak prací autora tak i použité literatura to bez rozlišení.

Práce je psána přehledně, na odpovídající jazykové úrovni, nejsou však zcela respektovány zásady technického kreslení (nárys, půdorys, bokorys a viditelnost hran), u některých obrázků chybí rozměry veličin.

Lze konstatovat, že cílů práce bylo dosaženo a práce jako celek je přínosem pro obor.

**Disertační práci doktoranda Ing. Lukáše Koudely doporučuji,  
(dle zákona č.111/1998 Sb. § 47 ), k obhajobě.**

Ing. Petr Rada, CSc

V Plzni 5.5.2015

V rámci obhajoby mám následující otázku:

Popište základními fyzikálními vztahy návrh upnutí obráběcího nástroje.

( Požadovaný kroučící moment, určení potřebného přesahu pro daný průměr nástroje a délku stopky, nutné oteplení upínací hlavy, odpovídající množství dodané energie a výkon potřebný k montáži a demontáži nástroje ).



# ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE

ELEKTROTECHNICKÁ FAKULTA  
KATEDRA TEORETICKEJ ELEKTROTECHNIKY A  
BIOMEDICÍNSKEHO INŽINIERSTVA  
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina



## POSUDOK

na doktorandskú dizertačnú prácu

Ing. Lukáša KOUDELU

s názvom

„NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ A OPTIMALIZACE PROCESŮ LISOVÁNÍ ZA TEPLA“

pre obhajobu doktorandskej dizertačnej práce v študijnom  
odbore „Elektrotechnika“

1) **Predložená dizertačná práca Ing. Lukáša Koudelu** pojednáva o zaujímavej a veľmi aktuálnej problematike modelovania magneto-termo-elastických procesov, nachádzajúcich uplatnenie najmä v oblasti ohrevu tepelnej upínacej techniky. Práca obsahuje cca 57 strán textu a prílohovú časť. Má veľmi dobrú grafickú úpravu. Pozostáva zo šiestich kapitol, s logickým členením a návaznosťou. V úvodnej časti práce motiváciu a jednotlivé ciele, z čoho zároveň vyplýva potreba riešenia danej problematiky. Obsahom druhej kapitoly je analýza súčasného stavu problematiky, so zameraním na vybrané aspekty upínania nástrojov, pričom autor sa zameriava najmä na upínanie nástrojov z vodivých materiálov, čomu zodpovedá aj ďalší obsah kapitoly. Náplňou tretej časti práce je matematický model a jeho opis z hľadiska jednotlivých fyzikálnych polí. Vo štvrtjej kapitole autor stručne približuje jednotlivé aspekty a prostriedky numerického modelovania, so zameraním na softvérový prostriedok Agros2D. Nasledujúcu časť, kapitolu 5, možno spolu s kapitolou 3, považovať za ťažisko dizertačnej práce. Obsahom tejto časti je ilustratívny príklad, ktorý uvažuje riešenie spojeného problému, z oblasti upínacej techniky. V tejto časti sú zároveň prezentované a porovnané výsledky numerického modelovania a realizovaných experimentov. V poslednej kapitole práce autor uvádza prínosy jeho činnosti a udáva nové smery a perspektívy v danej výskumnej oblasti. Jednotlivé kapitoly majú primeraný obsah, za najdôležitejšiu považujem časť 5, pretože prezentuje výsledky dosiahnuté počas doktorandského štúdia.

2) **Z hľadiska splnenia jednotlivých cieľov** možno konštatovať, že tieto boli úplne splnené. Autor bohato čerpal z odbornej literatúry, čo dokladuje počet referencií 69. Zároveň, autor práce počas doktorandského štúdia aktívne oboznamoval odbornú verejnosť s dosiahnutými výsledkami svojej činnosti, čoho dôkazom sú uvádzané publikácie.

Prácu ako celok hodnotím veľmi vysoko z odborného hľadiska, aj z hľadiska náročnosti riešenia. Domnievam sa, že jej výstupy pre technickú prax sú jasné a zrejmé. Autor jej riešením preukázal potrebnú erudíciu v danej oblasti, sklbením viacerých vedeckých aspektov.

Napriek uvedenému, ku práci mám **nasledujúce konkrétne poznámky a pripomienky**:

V práci sa na niektorých miestach vyskytujú niektoré formálne nedostatky, ktoré znižujú kvalitu práce, podstatným spôsobom však neznižujú jej odbornosť. Ide najmä o:

v zozname symbolov a skratiek je nesprávne uvedené:

- rozmery veličín magnetického vektorového potenciálu  $A$  a vektora indukcie el. poľa  $D$
- obr.5.18, str. 44 – chýbajúci rozmer veličiny a nevhodne zvolený formát čísel
- obr. 5.13, str. 41 – nesprávne uvedená jednotka konduktivity materiálu v grafe

### 3) Po obsahovej stránke sa vyjadrím k nasledujúcim aspektom:

- a) aktuálnosť zvolenej témy a jej význam pre odbor

Tému DDP a jej zameranie považujem za vysoko aktuálne, problematiku analýzy a použitých metód možno považovať taktiež za aktuálnu. Práca je pre študijný odbor „elektrotechnika“ významná z hľadiska zvoleného postupu riešenia, použitých metód a dosiahnutých výsledkov.

- b) splnenie cieľov

Ciele sú plnené v jednotlivých kapitolách postupne, k hodnoteniu ich plnenia nemám výhrady.

- c) zvolené metódy spracovania

Zvolené metódy spracovania DDP zahŕňajú jednak metódy teoretické a tiež experimentálne. Autor preukázal, že ovláda aspekty tvorivej vedeckej práce.

- d) výsledky DDP a nové poznatky, prínos pre ďalší rozvoj

Za hlavný prínos doktoranda pre vedu a prax považujem uskutočnenie uvedenej štúdie s implementáciou troch odlišných fyzikálnych polí, do jedného celku. Zároveň sú veľmi cenné výsledky numerického modelovania a meraní uvedených v práci, s ohľadom na ich vyhodnotenie a praktickú využiteľnosť.

- e) systematičnosť, prehľadnosť a úprava

Práca je spísaná jasne, logicky, s dobrou grafickou, jazykovou aj textovou úpravou.

Počas diskusie prosím autora práce o **zaujatie stanoviska** k nasledujúcim konkrétnym otázkam:

1. Bola pri numerických simuláciách /výpočet tepelných strát v materiáli/ použitá sieť s rovnomerným alebo s premenným krokom hustoty diskretizačných elementov?

2. Boli premeriavané magnetické vlastnosti upínacej hlavice pred a po uskutočnení tepelného upínania, resp. po konkrétnej dobe prevádzky?

3. Akým spôsobom boli v rámci numerických simulácií zadávané funkcie nelineárnej závislosti konduktivity materiálu a ďalšie nelineárne závislosti? /obr.5.13/

4. Z obr. 5.6 je vidieť vplyv počtu elementov diskretizačnej siete na hodnoty vypočítaných objemových tepelných strát. Aké sú priemerné hodnoty výpočtových časov pre konfiguráciu modelu s počtom elementov 5000 a 20000?

5. Je možné stanoviť počet cyklov bezpečného použitia tepelnej upínacej hlavice, s ohľadom na jej možné opotrebovanie v zmysle tepelného (a teda aj mechanického) namáhania a dynamiku teplotných zmien? Je potrebné sa z tohto dôvodu zaoberať otázkou pravidelnej nedeštruktívnej kontroly takéhoto nástroja?

#### 4) Záver

Vzhľadom na horeuvedené skutočnosti, predloženú dizertačnú prácu **odporúčam** k obhajobe. V súlade s platnými ustanoveniami **navrhujem**, aby po úspešnej obhajobe, bola **Ing. Lukášovi Koudelovi**, v študijnom odbore “elektrotechnika” udelená vedecko-akademická hodnosť

**„philosophiae doctor“ /Ph.D./**



.....

doc. Ing. Milan Smetana, PhD.

V Žiline, 23.04.2015