

I. IDENTIFIKAČNÍ ÚDAJE

Název práce:	Tepelné ovlivnění multifunkčního frézovacího stroje od pohonů rotačního stolu
Jméno autora:	Pavel Šach
Typ práce:	diplomová
Fakulta/ústav:	Fakulta strojní (FS)
Katedra/ústav:	Ústav výrobních strojů a zařízení
Oponent práce:	Michal Holub
Pracoviště oponenta práce:	Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

II. HODNOCENÍ JEDNOTLIVÝCH KRITÉRIÍ

Zadání	Zvolte položku.
<i>Hodnocení náročnosti zadání závěrečné práce.</i>	
<p>Popis teplotního chování CNC obráběcích strojů patří v oboru mezi stěžejní dlouhodobá témata. Vliv teplotního chování stroje na jeho výslednou výrobní přesnost je velmi zásadní a v současné době tyto chyby vyvolané teplotní nestabilitou indukují hlavní rozměrové a tvarové chyby na obrobku. Snahou všech výrobců CNC obráběcích strojů je tyto chyby eliminovat, a to buď zásahem do konstrukce, integrací chladicího agregátu a nastavení způsobu chlazení / temperování, nebo nasazením softwarových kompenzací. Aby bylo možné tyto zásahy do strojů provádět, tak je zapotřebí mít dostatečnou znalost teplotně-deformačního chování stroje. Toto chování potom vychází na základě definovaných provozních zkoušek, které jsou navrhovány z pohledu popisu dílčích částí stroje ne nebo celku.</p> <p>Předložená diplomová práce je zaměřena na popis tepelného ovlivnění multifunkčního frézovacího stroje od pohonů rotačního stolu. Dle zadání mají být realizovány experimenty s pohyby strojních os „A“ a „C“ a jejich vzájemnou kombinací. Práce má mimo jiné obsahovat rešeršní část vlivu rotačních os na teplotních deformacích, realizaci experimentů, analýzu výsledků a vyhodnocení teplotně-deformačního chování.</p> <p>Z pohledu zadání řadím závěrečnou práci do skupiny velmi aktuálních tematicky řešených prací s vyšší náročností na zpracování.</p>	

Splnění zadání	Zvolte položku.
<i>Posuďte, zda předložená závěrečná práce splňuje zadání. V komentáři případně uveďte body zadání, které nebyly zcela splněny, nebo zda je práce oproti zadání rozšířena. Nebylo-li zadání zcela splněno, pokuste se posoudit závažnost, dopady a případně i příčiny jednotlivých nedostatků.</i>	
<p>Všechny body diplomové práce byly splněny, ale mám k nim výhrady. K jednotlivým bodům zadání DP níže přikládám komentář.</p> <ol style="list-style-type: none"> Rešerše vlivu rotačních os na teplotní deformace v místě nástroje pětiosých frézovacích strojů a možných relevantních experimentálních přístupů <p>Při zadání dvou klíčových slov „rotary axes; thermal“ v databázi ScienceDirect obdržíte okolo 8.000 odkazů na vědecké práce k dané problematice. Zde jsou řešeny jednotlivé přístupy k řešení, ale i nastíněna problematika z pohledu kinematiky stroje, měřených veličin, postupů měření, volby měřicí aparatury apod. V práci postrádám komplexnější popis problematiky. Jak jsou definovány geometrické chyby rotačních os, kolik chyb lze na jedné rotační ose popsat, kolik chyb je možné popsat v kombinaci dvou rotačních os, kolik geometrických chyb lze popsat v kombinaci tří lineárních os a dvou rotačních os. Co vše vstupuje a může ovlivnit vaše měření, případně jak nastavit experiment, aby byl co nejméně ovlivněn okolím. Z provedené rešerše měl vzejít například souhrn postupů, doporučených měřících zařízení, zahřívacích cyklů, posuzovaných závislostí apod., které již byly ve vědeckých pracích publikovány nebo jsou popsány normami.</p> <ol style="list-style-type: none"> Návrh a realizace teplotně-deformačních experimentů od zátěží rotačního stolu <p>V práci postrádám systémový přístup, který by popisoval, z čeho vychází nastavený zátěžný cyklus. Zda vychází z postupů zavedených na pracovišti, cyklů převzatých od výrobce stroje, popsanych v normách, nebo jsou navrženy diplomantem. Opět mohlo být podloženo rešeršní částí.</p> <p>Realizace obsahuje velké množství realizovaných měření. Musím vyzdvihnout úsilí a práci diplomanta v oblasti návrhu skriptu pro zpracování dat.</p>	

3. Analýza výsledků a vyhodnocení teplotně-deformačních chování

Tato kapitola obsahuje velké množství dat, které vzešly z realizovaného experimentu. Jsou zde vidět odchylky poloh x , y a z na TCP při různých testovacích režimech. Bohužel jsme v práci nenašel žádné informace o teplotním chování stroje, které by popisoval stav stroje. O teplotách jsem ve vazbě na stroj našel pouze informaci tabulce 11 na straně 43. Výsledky tedy popisují posunutí bodu TCP vůči měřenému artefaktu a nastavení zkušebnímu cyklu.

4. Rozsah grafické části

Tento bod je naplněn velkým množstvím zpracovaných dat ve formě grafů, které mají ne vždy vhodně zvolené měřítko osy.

5. Rozsah textové části

I když diplomová práce má celkově 136 stran, tak vlastní část bez příloh a seznamů má 68 stran, přičemž toto číslo obsahuje i titulní stranu, obsah a poděkování. Vlastní část textu začíná tedy na straně 5 a končí na straně 68. Rozsah textové části dle zadání má obsahovat 60 – 80 stran. Zde bych poukázal na fakt, že práce není vhodně naformátovaná, což může vést k významné redukci počtu stran. K tomuto se dále vyjadřuji v bodě „Formální a jazyková úroveň, rozsah práce“ předloženého oponentního posudku.

Předložená diplomová práce splňuje zadání s celou řadou diskutabilních bodů, které měli být součástí řešení, případně by je měl diplomant objasnit u obhajoby diplomové práce.

Zvolený postup řešení

Zvolte položku.

Posuďte, zda student zvolil správný postup nebo metody řešení.

Zvolený postup řešení musím hodnotit kriticky. Ty se týkají provedené rešeršní části, odkazy na odbornou literaturu, ale také nulovou práci s normami. Chybí popis geometrických chyb a jejich vazeb na řešenou problematiku. Dále při posuzování chyb stroje, které se pohybují v rozsahu mikrometrů až desítek mikrometrů, bych předpokládal podrobnější analýzu metodice měření. V rámci návrhu experimentu, jak bylo uvedeno výše, není zřejmé, z čeho diplomant vycházel při sestavování cyklů. Volba měřících zařízení, rešeršní část neuvádí nic vzhledem k nejistotám měření, vhodnosti posouzení měřicí aparatury, případně eliminace nejistoty měření. Zvolená metoda kombinuje měření obrobkovou sondou a měřicí artefakt. Práce obsahuje pouze obrázky, ale žádné další technické údaje. Nemůže ovlivnit například pohyb lineárních sond odečítané hodnoty o polohách artefaktů? Byl proveden test opakovatelnosti při pohybu pouze lineárních os apod.? Z tohoto pohledu musím zvolený postup hodnotit kriticky, protože chyby obrobkové sondy a lineárních os stroje mohou ovlivnit výsledky experimentu. Při řešení teplotně-deformačních analýz bych předpokládal posouzení závislosti teploty na deformaci/posunutí. Bohužel práce neobsahuje žádné tyto informace, přičemž v kapitole 4.2.3 se píše, že se jedná o klíčové informace. Kapitola 4.2.4 obsahuje navržený skript pro zpracování dat, který je podrobně popsán. Kapitola 5 popisuje vyhodnocení teplotně-deformačních experimentů. Zde jsou uvedeny pouze deformace v závislosti na čase. Grafy jsou velice problematicky čitelné vzhledem k volbě měřítka osy Y .

Odborná úroveň

Zvolte položku.

Posuďte úroveň odbornosti závěrečné práce, využití znalostí získaných studiem a z odborné literatury, využití podkladů a dat získaných z praxe.

Předložená diplomová práce obsahuje celou řadu nedostatků, které snižují její odbornost a další využitelnost. Tento fakt je dán právě přístupem k rešeršní části a nepodchycení všech podstatných veličin, které mohou ovlivnit výsledky měření. Postrádám v práci více informací o měřících postupech a měřicí technice. V kapitole 2.6 jsou srovnávány současně přístroje a metody měření bez dalšího bližšího vyhodnocení. Například Ballbar je měřicí přístroj založený na metodě měření kruhové interpolace lineárních os. Další bod je popisován „Chase the ball“, jako metoda, a ne jako přístroj. V této části je práce tedy velmi chaotická a diskutabilní. Diplomant píše v kapitole 5.2.1 například o opakovatelnosti měření. Jak byla vyhodnocena opakovatelnost měření? Z kolika běhů, za jakých podmínek? To vše snižuje odbornou úroveň předložené práce. V závěru práce diplomant píše, že pro minimalizaci teplotních chyb je potřeba se zaměřit především na osu C . S tím lze souhlasit vzhledem k realizovanému spektru zatížení, které bylo realizované. V práci ale postrádám informaci, jaké bylo teplotní zatížení jednotlivých os.

Formální a jazyková úroveň, rozsah práce

Zvolte položku.

Posudte správnost používání formálních zápisů obsažených v práci. Posudte typografickou a jazykovou stránku.

Rozsah předložené práce je diskutabilní, (zadáním DP je dán rozsah textové části v rozmezí 60 – 80 stran) a to z důvodu nedodržení formátování závěrečné práce. Odstavce jsou vždy odskočené minimálně o 2 řádky, řádkování možná 2, číslování vzorečků jsou posunuty o řádek, obrázky jsou zbytečně veliké (např. obr. 8 a obr. 9, obr. 13 a obr. 14, zejména potom obr. v kapitole 4, apod.), podkapitoly jsou nelogicky odskočeny na novou stránku (např. kapitola 2.3; 2.4.3), apod. Vlastní tabulky jsou psány v anglickém jazyce (tab. 2, 3). Obrázky uvedené v diplomové práci až na ojedinělé případy nejsou nikde odkazovány v textu a nejsou tam většinou popsány ani jejich významy. U grafů nejsou popsány osy (obr. 1, 2 a 37). U grafů nejsou vhodně zvolena měřítka, které by výrazně usnadnili jejich čtení (obr. 33, 35, 36, 40, 41, 43, 44, 45, 47, 48 a 49). V práci se nachází nevhodně zvolené číslování obrázků, např. obrázek 35 předchází obrázek 34. Práce dále obsahuje značné množství formálních překlepů jako například str. 10 (*vztahu místo vztahuje, kolmě místo kolmé*), str. 15 (opakující se *přímo lze* v jedné větě, *neurální místo neuronové, regresivní místo regresní*), str. 16 (pod vzorcem 3 - [K] místo K), str. 17 (*se jedná dva místo se jedná o dva*) apod. V seznamu použité literatury a zdrojů není dodrženo jednotné formátování.

Výběr zdrojů, korektnost citací

Zvolte položku.

Vyjádřete se k aktivitě studenta při získávání a využívání studijních materiálů k řešení závěrečné práce. Charakterizujte výběr pramenů. Posudte, zda student využil všechny relevantní zdroje. Ověřte, zda jsou všechny převzaté prvky řádně odlišeny od vlastních výsledků a úvah, zda nedošlo k porušení citační etiky a zda jsou bibliografické citace úplné a v souladu s citačními zvyklostmi a normami.

Ze seznamu použité literatury je patrné, že diplomant vycházel ze zdrojů doporučené literatury. Vzhledem k řešené oblasti, bych očekával více vědeckých článků věnované teplotnímu chování a deformacím CNC obráběcích strojů, měření tepla nebo statistickému plánování experimentu. Odkazy na bibliografické citace jsou úplné a v souladu s citačními zvyklostmi.

Další komentáře a hodnocení

Vyjádřete se k úrovni dosažených hlavních výsledků závěrečné práce, např. k úrovni teoretických výsledků, nebo k úrovni a funkčnosti technického nebo programového vytvořeného řešení, publikačním výstupům, experimentální zručnosti apod.

Vložte komentář (nepovinné hodnocení).

III. CELKOVÉ HODNOCENÍ, OTÁZKY K OBHAJOBĚ, NÁVRH KLASIFIKACE

Shrňte aspekty závěrečné práce, které nejvíce ovlivnily Vaše celkové hodnocení. Uveďte případné otázky, které by měl student zodpovědět při obhajobě závěrečné práce před komisí.

Předloženou závěrečnou práci hodnotím klasifikačním stupněm **E - dostatečně**.

Diplomová práce zpracovaná na téma „Tepelné ovlivnění multifunkčního frézovacího stroje od pohonů rotačního stolu“ bylo realizováno na stroji MCU 700, které se nachází na pracovišti RCMT. Cílem práce bylo navržení a realizace experimentů, které by popsaly teplotně-deformační chování rotačních os pětiosého obráběcího centra a tepelné ovlivnění stroje od pohonů rotačního stolu.

V druhé kapitole diplomové práci zaměřenou na rešerši diplomant popisuje materiálové vlastnosti vzhledem k teplotnímu zatížení, dále se věnuje způsobům eliminace teplotně vyvolaných deformací, způsobům měření teploty a metody měření teplotních chyb na pětiosých frézovacích centrech. Kapitola je zakončena analýzou činnosti pracovního kolektivu Michaela Gebharta z ETH Zurich a shrnutím rešeršní části. Rešeršní část obsahuje celou řadu nedostatků popsaných výše.

V kapitole 3 popisuje testovaný stroj a jeho technické parametry. V této kapitole mohly být popsány například geometrické a kinematické chyby stroje, které odpovídají konkrétnímu typu stroje MCU 700, jeho kinematice a popisu dle ISO.

Kapitola 4 popisuje nastavení experimentu měření. V kapitole 4.1 je popsáno měřicí vybavení, ale neobsahuje žádné bližší technické údaje a jejich použití. Podrobný popis měření je popsán v kapitole 4.2, kde je provedeno definování jednotlivých testů se zatížením os A a C. Dále je v kapitole popsán návrh skriptu pro zpracování dat ze stroje. Bohužel zde postrádám informace o teplotním zatížení jednotlivých os při měřicích cyklech.

V kapitole 5 se diplomant věnuje vyhodnocení teplotně-deformačních experimentů. V textové části jsou uvedeny vybrané výsledky a zbytek je vhodně pro přehlednost součástí příloh DP. Jak je uvedeno v předchozím odstavci, postrádám zde vyhodnocení z teplotně-deformačních charakteristik. V grafech jsou uváděny pouze závislosti mezi posunutím a dobou měření dle cyklu a měřicího artefaktu. Výsledky prezentované v této kapitole nejsou příliš přehledné z pohledu volby rozsahu os grafů.

V závěru diplomant shrnuje dosažené výsledky a doporučuje se dále věnovat zejména C ose, která má hlavní podíl na posunutí vůči TCP.

I přes tyto nedostatky doporučuji práci k obhajobě a prosím o zodpovězení následující otázek:

1. Vysvětlíte pojem opakovatelnost, jaké jsou podmínky pro vyhodnocení opakovatelnosti, jak vypočítáme opakovatelnost? Uveďte příklad na vašich datech z měření.
2. Můžete vysvětlit, proč jste nikde neuváděl naměřené teploty z pohonů a okolí stroje? V kapitole 4.1 Použitá aparatura uvádíte dotykový teploměr GMH 3230. Byl při experimentech použit?
3. V závěru uvádíte, že v případě tvorby kompenzačního algoritmu je třeba se zaměřit na popis rotační osy C. Máte představu, jak byste principiálně postavil kompenzační algoritmus?

Datum: 2.2.2023

Podpis: