

Eliminace tepelných deformací od vřeten CNC strojů

Ing. Jiří Vyroubal

1. Úvod

Moderní obráběcí stroje využívají pro práci vřetena s vysokými otáčkami. I přes sofistikovaná řešení chlazení vřeten, dochází v nich stále k velkému vývinu tepla, které je přenášeno do konstrukce stroje. Konkrétní zdroje tepla na stroji rozebírá Ramesh [3] ve svém přehledu o tepelných chybách. Konstrukce stroje se vlivem tepla deformuje a zvyšuje úchylku polohy nástroje od zadané pozice. Optimalizovaná konstrukce a chladicí systém však nedokáží zcela eliminovat tento jev. Poslední možností je pak kompenzace zbylé tepelné deformace pomocí řídicího systému stroje.

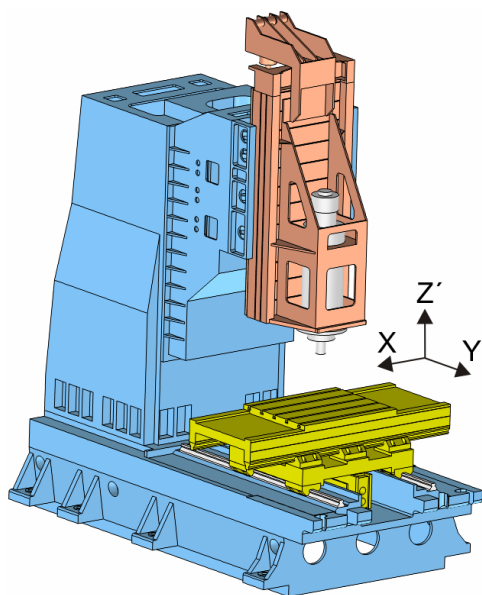
Postupem času byly vyvinuty rozličné metody kompenzací. Mezi úspěšné metody, které nejsou tak náročné na přípravu jako například využití umělé inteligence, patří kompenzační proces s využitím polynomického popisu průběhu tepelné deformace stroje. Obecné schéma metody spočívá ve snímání teploty v určených místech stroje a výpočtu potřebné korekce polohy nástroje pomocí předem stanovených polynomických rovnic, v nichž vystupuje měřená teplota jako nezávislý vstupní parametr. Výpočet polynomických kompenzací se může lišit podle počtu použitých teplotních čidel. Kvalita kompenzace také závisí na konkrétním stroji a jeho průběhu tepelné deformace.

Ko a kol. v [2] aplikovali polynomickou kompenzaci na vertikální obráběcí centrum. Vřeteno bylo s motorem spojeno hnacím pásem. Ke sledování teploty využívá čidlo na horní a dolní části vřetena a jeden referenční snímač v zadní části stroje. V práci Ko prezentuje kompenzaci svislé osy Z, jejíž průběh tepelné deformace je blízký lineárnímu průběhu. Polynom pro výpočet korekce úchylky polohy nástroje má lineární tvar. Kompenzace osy Z proběhla úspěšně, ovšem došlo k jistému překompenzování. Mnohem zajímavější problém se vyskytnul u osy Y, kde byl průběh tepelné deformace v závislosti na teplotě nelineární a byl zatížen velkou hysterezí. Ko a kol. deformaci osy Y nekompenzují z důvodu neschopnosti stanovit vhodný vztah mezi úchylkou polohy nástroje v této ose a variací teploty. Pouze poukazuje, že zjištěné chování osy Y je způsobeno procesem tepelného ohýbání konstrukce stroje.

Soldát [1] ve své disertační práci označuje také vřeteno jako majoritní zdroj tepla, spolu s pohony os. Proces kompenzace rozděluje na přímý a nepřímý. Podstatou přímé kompenzace je měření polohy břitu nástroje v pracovním prostoru. Naproti tomu nepřímá kompenzace vyvozuje polohu nástroje výpočtem z jiných veličin. Soldát vytvořil maticovou metodu, kde matice určuje optimální polohu čidel na stroji a určuje také budoucí koeficienty kompenzačních rovnic. Druhým krokem je on-line kontrola a korekce těchto rovnic. V pracovním prostoru stroje umístil dotykovou sondu, která snímá aktuální velikost tepelné deformace stroje a koriguje koeficienty kompenzačních polynomů. Experimentální ověření metody proběhlo na svislém obráběcím centru a na soustruhu. Kompenzace byla úspěšná, zbytkové deformace byla zjištěna v jednotkách mikrometrů. Optimální umístění snímačů představuje pět snímačů na vřetenu. Soldát však používá tři teploměry na vřetenu a jeden referenční na stojanu stroje. Použitím referenčního snímače je stroj relativně nezávislý na změnách teploty okolí. Zkušební režimy chodu stroje byly krátké a nedošlo ještě k tepelné stabilizaci stroje.

2. Tepelné deformace stroje MCFV 5050LN

2.1. Podmínky měření



Obr. 2.1 MCFV 5050LN

Experimentální výzkum tepelných deformací probíhal na svislém 3-osém obráběcím centru MCFV 5050LN, koncepce typu C, s nosným rámem ve tvaru L (viz Obr.2.1). Rám je tvořen ze dvou litinových odlitků, vřeteník je masivní svařenec ocelových silnostěnných odlitků. Konstrukce křížového stolu se sériovým uspořádáním je málo hmotná a tuhá. Pohon všech tří os zajišťují lineární motory. Stroj je osazen elektrovřetenem s výkonem 18kW, kroutícím momentem 70Nm a otáčkami 1-15000 ot./min. Stroj je ovládán řídicím systémem SINUMERIK 840D, který nemá zabudovanou polynomičnou tepelnou kompenzaci. Tepelné deformace byly na stroji měřeny pomocí aparatury Spindle Error Analyzer (SEA). Základem měřicí soustavy je válec s přesnou měřicí kulovou plochou na konci, upevněný do vřetená pomocí nástrojového držáku.

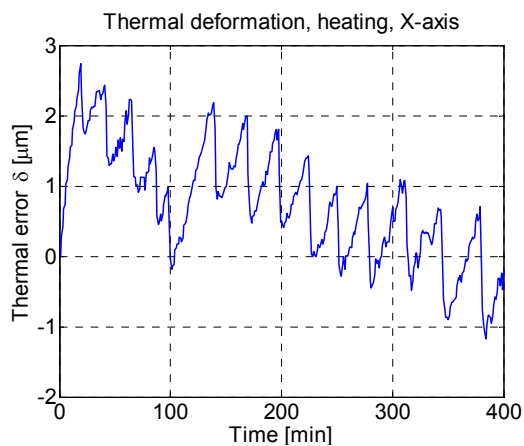
Polohu kuličky měří kapacitní bezdotykové snímače, umístěné v přípravku na obráběcím stole.

2.2. Tepelné deformace

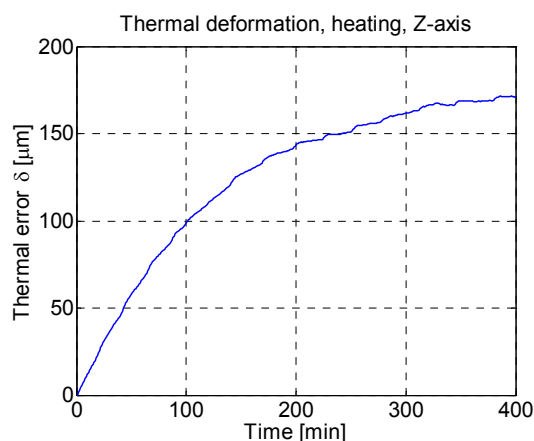
Stroj nebyl před měřením zahříván. Měření bylo započato okamžitě po inicializaci měřicí aparatury, aby byly postihnuty procesy při prohřívání konstrukce. Vřeteno bylo zkoušeno pro otáčky 7000 ot./min. Stroj byl tepelně zatěžován při chodu naprázdno, dokud nedošlo k tepelné stabilizaci konstrukce, indikované zastavením pohybu měřicí kulové plochy v prostoru. Poté byla rotace vřetená vypnuta a byl sledován proces chladnutí konstrukce a její návrat do výchozí polohy na začátku měření. Měření probíhalo ve středu pracovního prostoru. Sledovány byly osy X, Y a Z. Zaznamenávána byla relativní deformace vřetená vůči stolu, nikoliv absolutní deformace vřetená vůči zemi.

2.2.1. Ohřev konstrukce stroje

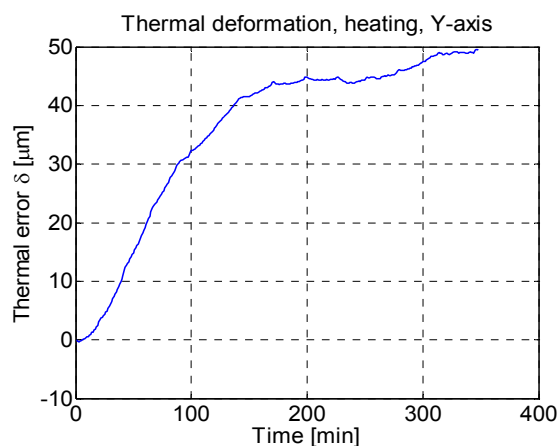
Deformace osy X na Obr.2.2 při ohřevu stroje dosáhla maximální hodnoty $3\mu\text{m}$ na počátku měření a postupně klesala až k hodnotě $-1\mu\text{m}$. Pilovitý charakter deformace je způsoben chladicím zařízením, které je založeno na bázi termostatu, pouze s funkcemi zapnuto - vypnuto. Tyto lokální tvary, i když mají zanedbatelnou velikost, ukazují na rychlou reakci konstrukce osy X na změny zdroje tepla. Osa Y (Obr.2.4) byla tepelným ohřevem deformována na maximální hodnotu $50\mu\text{m}$. Z průběhu deformace lze vypožorovat mírná tepelná setrvačnost na začátku ohřevu. Po



Obr. 2.2 Ohřev osy X.



Obr. 2.3 Ohřev osy Z.



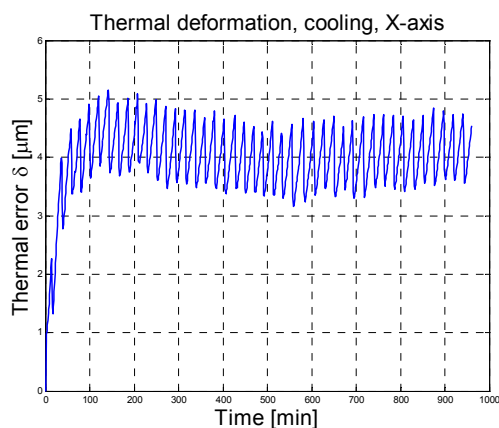
Obr. 2.4 Ohřev osy Y.

pomalé tepelné deformaci po startu ohřevu konstrukce následuje strmý nárůst deformace. Během 40 – 150 minut dochází k postupné stabilizaci deformace mezi 45-ti až 50-ti μm . Stabilizovaná deformace, dosažená přibližně v 320. minutě, však není zcela ustálená. Z grafu je vidět, že poloha nástroje se stále mění. Změna je však zanedbatelná vzhledem k celkové velikosti deformace této osy. Chování tepelné deformace již nelze aproximovat lineárním matematickým popisem, a proto je pro úspěšnou kompenzaci osy Y nutné stanovit polynom vyššího než prvního řádu.

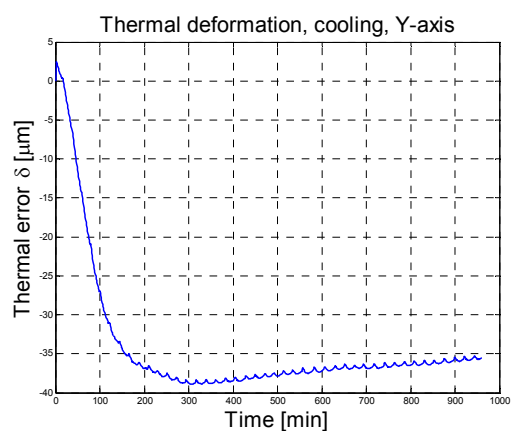
Průběh tepelné deformace osy Z při ohřevu, znázorněný na Obr.2.3 ukazuje, že svislá osa Z je deformována vlivem tepla nejvíce. Počáteční fáze deformace neobsahuje tepelnou setrvačnost, jako v případě osy Y a změna polohy nástroje je výrazná od začátku rotace vřetena. Důvodem je konstrukce vřetena, kdy rotační hřídel s nástrojem prochází přímo motorem vřetena, který představuje jeden z majoritních zdrojů tepla. Terciální okruh chlazení vřetena byl uzavřen, což se projevilo právě ve velikosti deformace, jejíž maximální hodnota je $170\mu\text{m}$. Vřeteno bylo tedy chlazeno pouze nepřímo, vlivem chladicích větví řízených os stroje. Vliv chlazení osy Z lze zaznamenat díky malým změnám, kdy dochází ke skokovému nárůstu deformace v kladném směru o $10\mu\text{m}$. Skok je větší, než u osy X a Y.

2.2.2. Chladnutí konstrukce stroje

Proces chladnutí stroje v ose X, viz Obr.2.5 ukazuje, že deformace konstrukce opět není velká. Konečná poloha nástroje po vychladnutí stroje indikuje, že došlo k překonání původní polohy. Pilovitý charakter průběhu deformace, stejně jako u ohřevu stroje, způsobuje chladicí



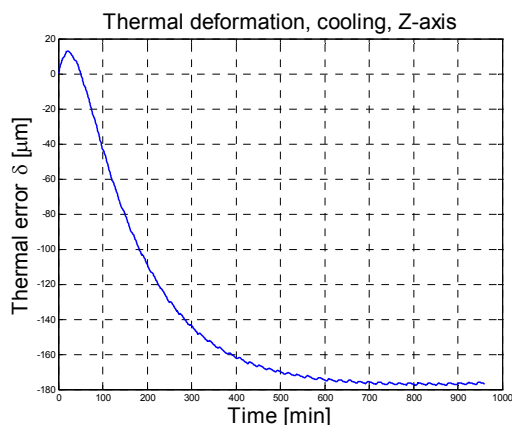
Obr. 2.5 Chladnutí osy X.



Obr. 2.6 Chladnutí osy Y.

zařízení. Výsledná deformace osy X při chladnutí stroje v rozmezí do $+5\mu\text{m}$ a při ohřevu stroje $+3\mu\text{m}$ představuje deformaci, kterou není nutné pro tento stroj kompenzovat.

Chladnutí osy Y již naproti tomu zaznamenává maximální deformaci okolo $-38\mu\text{m}$. Průběh a tvar deformace je zobrazen na Obr.2.6. Také u této osy se konstrukce po vypnutí ohřevu stroje nevrátila zcela do původní polohy. Rozdíl koncové polohy představuje $15\mu\text{m}$. Uvedený rozdíl může být způsoben deformací jiných částí konstrukce stroje, které mají vliv na osu Y.



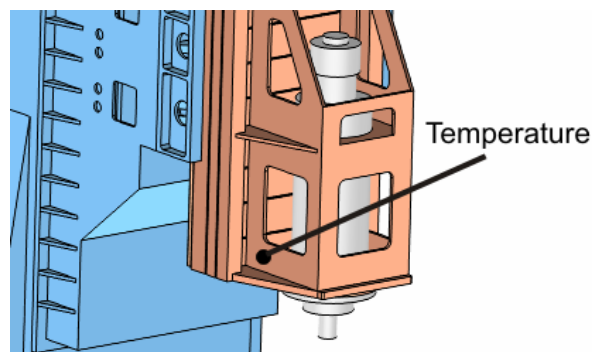
Obr. 2.7 Chladnutí osy Z.

zvýšením teploty vřetena po jeho zastavení. Vřeteno se při rotaci samovolně chladí rotací svých součástí. Po zastavení toto chlazení ustane a teplo, vzniklé rotací, ohřeje vřeteno a dojde k tepelné deformaci. Konstrukční řešení vřetena a vřeteníku je důvodem markantního projevu uvedeného procesu právě v ose Z.

Rozbor tepelných deformací při ohřevu a chladnutí stroje ukázal, že nelze s jistotou předpokládat návrat konstrukce po jejím vychladnutí do původní polohy. Jedním z důvodů může být variace okolního prostředí stroje. Stroj je umístěn v laboratoři, která není klimatizována a prostředí uvnitř není tedy tepelně stabilizované. Rozbor tepelného chování také dále ukázal, že osa X se deformuje opačným směrem než osy Y a Z.

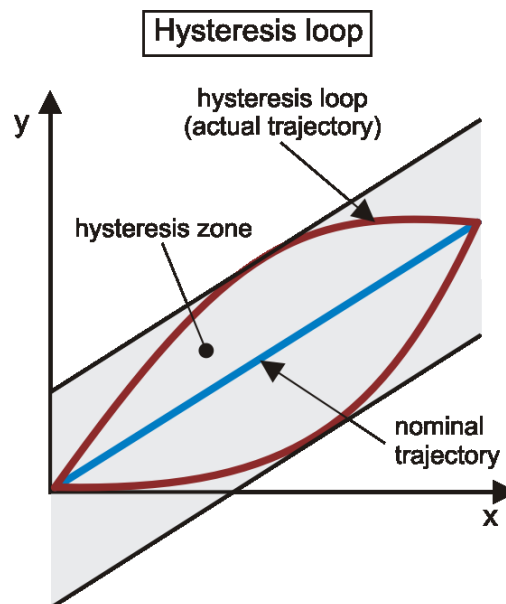
3. Vývoj kompenzačního polynomu

Pro výpočet korekce polohy nástroje bylo jako vstupní parametr použito jedno teplotní čidlo. MCFV 5050LN je osazeno 15-ti teplotními snímači typu Ni1000, instalovanými na



Obr. 3.1 Poloha teplotního snímače.

konstrukci stojanu, vřeteníku, loži a křížovém stole. Průběhu tepelné deformace pro ohřev i chladnutí konstrukce stroje nejvíce odpovídal snímač, umístěný na levé straně vřeteníku ve spodní části, viz Obr.3.1. Čidlo je umístěné v blízkosti předního ložiska vřetena, kde byl očekáván největší vývin tepla.



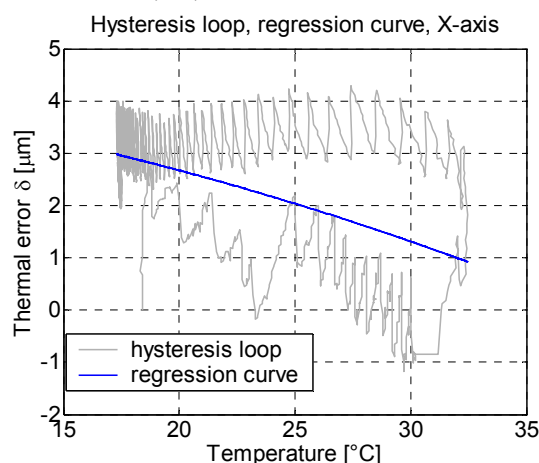
Obr. 3.2 Hysterezní smyčka.

Polynomičká kompensace využívá jako nezávislou proměnnou teplotu konstrukce v místě měření a závislou proměnnou pak představuje kompenzační hodnota, odpovídající tepelné deformaci stroje při konkrétní teplotě. Pro určení správných kompenzačních polynomů bylo nutné vytvořit hysterezní smyčky spojením křivek ohřevu a chladnutí. Schéma hysterezní smyčky ukazuje Obr.3.2. Sestavení průběhu ohřevu a chladnutí stroje bylo realizováno translací souřadného systému křivky chladnutí tak, že došlo ke ztotožnění prvního měřeného bodu křivky chladnutí s posledním bodem křivky ohřevu. Tím vznikla jedna trajektorie pro celý proces tepelné deformace stroje.

K takto sestavené trajektorii byla výpočtem určena regresní křivka, která zjednodušuje průběh celé deformace do jedné trajektorie, který je možné popsat matematicky. Kompenzační polynom lze v obecném tvaru vyjádřit takto:

$$\Delta_i = a_n t^n + a_{n-1} t^{n-1} + \dots + a_0 \quad [\mu\text{m}] \quad (1)$$

- Δ výsledná velikost deformace osy
 a koeficienty polynomičké rovnice
 t teplota referenčního čidla, $t = t_1 \dots t_2$
 n stupeň polynomu
 i osa X, Y, Z



Obr. 3.3 Regresní křivka osy X.

Průběhy hysterezních smyček jsou vidět na Obr.3.3 pro osu X, Obr.3.4 pro osu Y a Obr.3.5 pro osu Z. Šířka pásma hystereze pro tepelnou deformaci osy X nepřesahuje hranici 6mm. To je rozmezí, které lze považovat za přijatelné. Výsledná regresní rovnice, která je již upravena pro výpočet v mikrometrech má tvar $[\mu\text{m}]$:

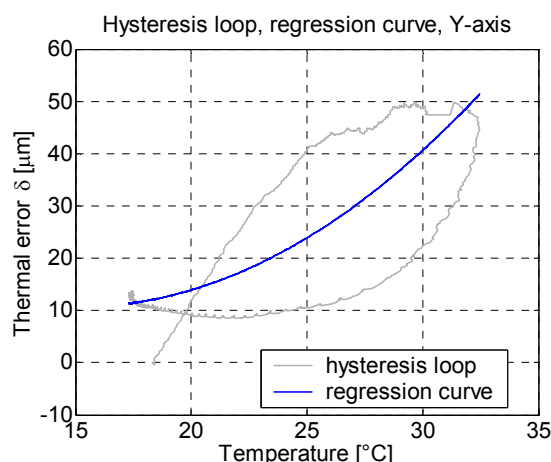
$$\Delta_X = 0,0034112t^2 - 0,4111449t + 8,6727425 \quad (2)$$

Charakter hysterezní smyčky a regresní křivky osy Y na Obr.3.4 je rostoucí a maximální deformace dosahuje hodnot kolem 50 μm , tedy výrazného zdeformování.

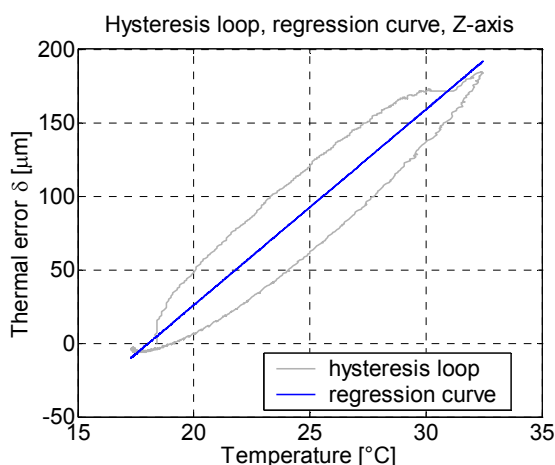
U osy Y se již zvětšilo pásmo hystereze. Tvar

obou dílčích křivek (ohřev a chladnutí) ukazuje na tepelnou setrvačnost konstrukce. Regresní rovnice, popisující celý tepelný proces osy Y má tvar:

$$\Delta_Y = 0,1612032t^2 - 5,3452199t + 36,5248829 \quad [\mu\text{m}] \quad (3)$$



Obr. 3.4 Regresní křivka osy Y.



Obr. 3.5 Regresní křivka osy Z.

Regresní křivka, popisující průběh deformace osy Z, viz Obr.3.5 je lineární. Lineární regrese se jeví v tomto případě jako optimální. Šířka pásma hystereze dosahuje hodnot 60 μ m, ale pásmo není zatíženo výraznými změnami šířky. Ze směrnice lineární regresní křivky vyplývá vysoký gradient deformace 15 μ m/°C. I přes vysoké tepelné deformace této osy lze předpokládat, že díky lineární aproximaci deformace bude možné osu Z relativně dobře kompenzovat. Kladný směr nárůstu deformace odhaluje pokles nástroje směrem do pracovního prostoru a hrozí tak kolize nástroje s obrobkem, pokud nebude osa Z kompenzována. Výsledná regresní rovnice tepelné deformace osy Z:

$$\Delta_Z = 15,8524359t - 327,1504321 \quad [\mu\text{m}] \quad (4)$$

4. Aplikace tepelných kompenzací

4.1. Kompenzační program pro SINUMERIK 840D

Řídicí systém SINUMERIK 840D nenabízí možnost polynomických kompenzací tepelných deformací stroje. Pro aplikaci kompenzací byla vytvořena samostatná softwarová část, implementovaná do řídicího systému stroje. Pro zpracování signálu z teplotních čidel do podoby vhodné pro řídicí systém bylo instalována hardwarová karta s analogovými vstupy jako součást řídicího PLC automatu Simatic S7-300. Uživatelské prostředí pro nastavení tepelných kompenzací umožňuje zapnutí a vypnutí kompenzací, nastavení periody výpočtu korekce polohy a zadání jednotlivých koeficientů kompenzačních polynomů. V reálném čase je zobrazována aktuální korekce polohy nástroje v jednotlivých osách a aktuální snímaná teplota z referenčního čidla. Program je přístupný přes tlačítko na ovládacím panelu a ovládán je pomocí panelu operátora stroje. Parametry kompenzace lze nastavit pouze v ručním režimu. V automatickém režimu není možné nastavení upravovat ani kompenzace zapnout nebo vypnout.

LM1 - teplotní kompenzace									
Aktuální teplota	T1	29.7	°C	Kompenzace				zapsána	
Kompenzace	dX	-0.0008	mm	Perioda výpočtu	Tp	10	sec		
Kompenzace	dY	0.0534	mm	Koeficient pro osu X1	A1	0.000000	-		
Kompenzace	dZ	-0.1283	mm	Koeficient pro osu X1	B1	0.000004	-		
				Koeficient pro osu X1	C1	-0.000369	-		
				Koeficient pro osu X1	D1	0.006581	-		
				Koeficient pro osu Y1	A2	0.000000	-		
				Koeficient pro osu Y1	B2	0.000182	-		
				Koeficient pro osu Y1	C2	-0.006443	-		
				Koeficient pro osu Y1	D2	0.084228	-		
				Koeficient pro osu Z1	A3	0.000000	-		
				Koeficient pro osu Z1	B3	0.000000	-		
				Koeficient pro osu Z1	C3	-0.016325	-		
				Koeficient pro osu Z1	D3	0.356521	-		

Rovnice pro výpočet teplotní kompenzace

$$dX = A_1 \cdot T1^2 + B_1 \cdot T1^2 + C_1 \cdot T1 + D_1$$

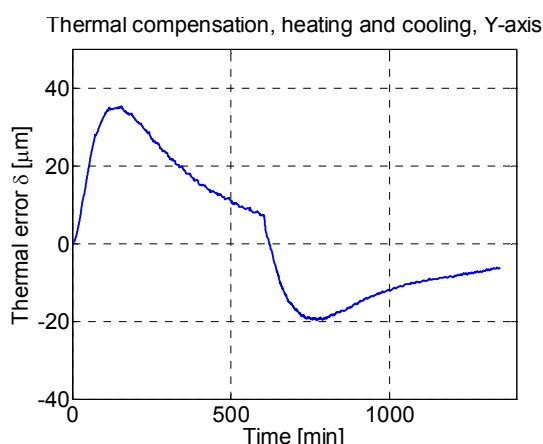
$$dY = A_2 \cdot T1^2 + B_2 \cdot T1^2 + C_2 \cdot T1 + D_2$$

$$dZ = A_3 \cdot T1^2 + B_3 \cdot T1^2 + C_3 \cdot T1 + D_3$$

T1 - teplota z čidla

Obr. 4.1 Panel kompenzačního programu.

4.2. Experimentální ověření funkce kompenzace



Obr. 4.2 Osa Y po kompenzací.

Teoretické předpoklady kompenzační metody byly experimentálně ověřeny v obdobných podmínkách, které byly použity pro měření tepelných deformací stroje MCFV 5050LN. Měření proběhlo na nezatíženém stroji při otáčkách 7000 ot./min. Perioda výpočtu byla nastavena na hodnotu

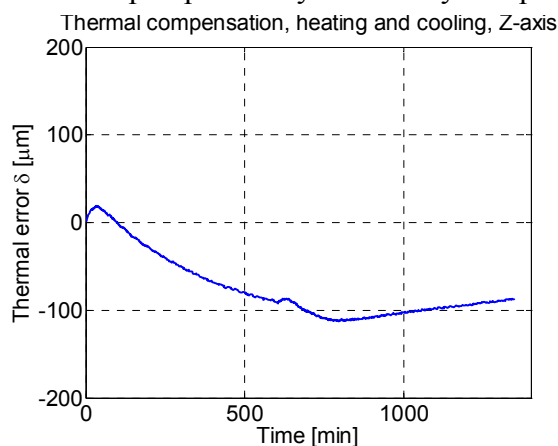
$$T = 10 \quad [\text{s}] \quad (5)$$

Zbytkové tepelné deformace byly opět sledovány pomocí měřicí aparatury Spindle Error Analyzer. Ověření správné funkce kompenzací bylo provedeno pro ohřev i chladnutí stroje. Stroj byl temperován na teplotu okolního prostředí nejméně 12 hodin

před začátkem měření. Čas nutný pro přípravu stroje před spuštěním měření byl minimalizován na dobu nezbytně nutnou. Tento čas obsahuje proces nastartování stroje, spuštění řídicího systému a najetí strojními osami do polohy nutné pro měření. Délka

přípravného procesu nepřesáhla 10 minut a nárůst teploty během přípravy stroje nebyl významný.

Na Obr.4.2 je zobrazena výsledná zbytková deformace po aplikaci výše uvedených tepelných kompenzací. Měřítka grafu je pro názornost ponechána stejná jako při měření deformací. Zbytkové deformace po tepelném zatěžování v ose Y dosahují maximální hodnoty při ohřevu konstrukce $35\mu\text{m}$ místo původních $50\mu\text{m}$ během prvních 2 hodin ohřevu a poté se hodnoty snižují, což je způsobené postupným sjednocováním změřeného průběhu deformace a vypočtené regresní křivky. Podobný tvar lze pozorovat také při procesu chladnutí stroje. Deformace při ohřevu roste s narůstající délkou chodu vřetena, naopak při aplikaci kompenzací se zbytková deformace snižuje. Podobně je tomu také při chladnutí konstrukce. Výsledek aplikace kompenzací pro osu Z je ukázán na Obr.4.3. Původní maximální velikost tepelné deformace $170\mu\text{m}$ při ohřevu konstrukce byla kompenzací snížena na úroveň $85\mu\text{m}$. Došlo k překompenzování osy Z. Na počátku tepelné zátěže stroje je patrný průběh zbytkové deformace v kladném směru. To je způsobeno vzájemným průběhem změřených hodnot deformace a vypočtené regresní křivky. Na počátku kompenzování deformace během procesu chladnutí konstrukce stroje lze vidět podobný lokální tvar průběhu zbytkové deformace. Důvodem je rapidní nárůst deformace po vypnutí rotace vřetena, jak bylo vysvětleno v kap.2.2. Taková tepelná anomálie je velmi obtížně kompenzovatelná pomocí regresního výpočtu. Pásmo zbytkové deformace při chladnutí konstrukce nepřesahuje $30\mu\text{m}$. Veliká tepelná deformace osy Z byla pozitivně zkompenzována.



Obr. 4.3 Osa Z po kompenzaci.

4.3. Závěry z aplikace regresní kompenzace

Průběhy tepelných deformací stroje MCFV 5050LN a zbytkové deformace po aplikaci prezentované regresní kompenzace v osách Y a Z ukazují vlivy tepelné kapacity konstrukce stroje. Její chování je charakterizováno zejména hysterezními smyčkami, které tvoří široké hysterezní pásmo. Příčin tvorby tak širokého hysterezního pásma je několik. Nejvíce výraznou složkou jsou tepelné toky v konstrukci stroje. Naplnění kapacity se během chodu stroje mění. Nestabilita vlivem dynamického chování tepelných toků a tepelné kapacity způsobuje rozšiřování pásma hystereze. Během měření tepelných deformací bylo zaznamenáno proudění vzduchu kolem rotující části vřetena, které při obrábění nese nástroj. Díky tvarové složitosti této sestavy je v jejím blízkém okolí zachytáván a unášen okolní vzduch. To představuje v důsledku vznik nového zdroje chlazení pracovního prostoru stroje, který nebývá v návrzích konstrukce strojů uvažován. Tento vliv je z hlediska sledování deformace při ohřevu a chladnutí konstrukce nestabilní, protože se projevuje jen při rotaci vřetena.

Průběhy zbytkových deformací také ukazují, že nebyl dodržen postup, který stanovil přechod režimu stroje z ohřevu na chladnutí až po ustálení deformace. Zbytkové deformace se mění i po 10-ti hodinách po spuštění měření. Naproti tomu tepelná deformace se ustaluje po přibližně 5-ti hodinách. Po provedení důkladné analýzy průběhu referenční teploty v místě měření na konstrukci vřeténíku. Analýza ukázala, že po ustálení deformace stroje teplota stále roste. Důvodem pro neustálený stav zbytkových deformací při aplikaci kompenzací je metodika výpočtu potřebného korekčního kroku. Výpočet je založen na přepočtu vstupní teploty na hodnotu korekce. Polynomický tvar regresní křivky způsobuje, že s rostoucí

teplotou kompenzační program neustále vypočítává korekční kroky, i když ve skutečnosti již došlo k ustálení tepelné deformace. Tím dochází k násilnému posunu kompenzované osy mimo její potřebnou polohu. Efekt nucené změny polohy se projevuje nejvíce u osy Z. Důvodem ustálení deformace a růstu teploty je pravděpodobně existence tepelných toků mezi vřeteníkem a stojanem stroje. Vznik tepla ve vřeteníku způsobuje roztažení jeho materiálu a pokles měřicího trnu. Po nasycení tepelné kapacity vřeteníků teplo teče do stojanu, která se také tepelně roztahuje, ovšem na druhou stranu. Tím dochází k určitému samokompensování stroje, což vysvětluje příčinu zjištěného chování.

5. Návrhy nových typů kompenzací

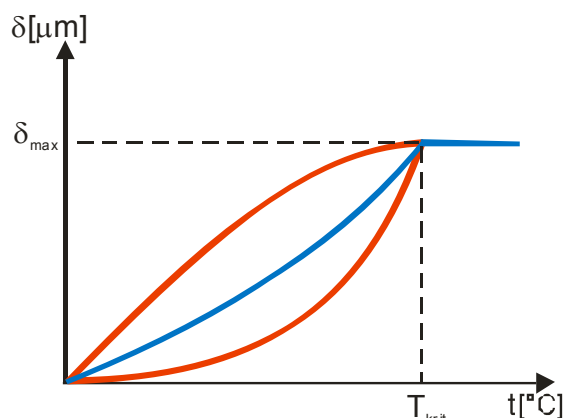
Dosavadní výsledky odhalily rozdílné chování tepelné deformace a teploty. Teplota roste i v momentu ustálení tepelné deformace, kompenzační algoritmus stále koriguje a tím posouvá nástroj mimo požadovanou polohu.

5.1. Návrh kompenzace s konečnou teplotou

Možnou variantou, jak eliminovat korekci polohy nástroje po dosažení maximální deformace je stanovení maximální teploty, na kterou bude kompenzační algoritmus reagovat. Tato teplota bude označena jako T_{krit} . Při aplikaci kompenzací pak mohou nastat dva stavy.

Případ 1. Při normálním stavu platí rovnice

$$t \leq T_{krit} \quad (6)$$



Obr. 5.1 Kompenzace s konečnou teplotou.

A aplikace kompenzací probíhá standardně dle zadaných kompenzačních polynomů.

Případ 2. Druhým stavem je situace samokompensování konstrukce podle vztahu

$$t > T_{krit} \quad (7)$$

Kdy je nutná inicializace omezení vstupní teploty pro výpočet kompenzačních polynomů.

V Případě 2 je nutné zafixovat nástroj v konstantní poloze při aktivní kompenzaci. Stávající kompenzační program nedovoluje vyřadit kompenzaci z činnosti během chodu stroje. Východiskem je zacyklení kompenzačního programu na určené hladině

teploty t . Toho je docíleno inicializací pravidla dle (7), kdy je teplota t neustále nahrazována teplotou T_{krit} . Názorně je postup ukázán na Obr.5.1. Tímto postupem je simulován stav samokompensování konstrukce stroje a nedochází tak k posunu nástroje. Pokud teplota klesne pod stanovenou hranici, reprezentovanou teplotou T_{krit} , aplikují se kompenzace běžným způsobem. Funkční závislost deformace stroje na teplotě lze popsat vztahem

$$\delta_i = f(t) \text{ [}\mu\text{m]}; \text{ pro } t \leq T_{krit} ; i=X, Y, Z \quad (8)$$

V prvním přiblížení je parametr T_{krit} společný pro všechny kompenzované osy. Použití kompenzace s konečnou teplotou neodstíňuje problémy s velkou šířkou hysterezního pásma. Eliminuje ovšem nežádoucí změny polohy nástroje po ustálení tepelné deformace stroje. Důležitým krokem je správné určení kritické teploty T_{krit} . Jeho velikost, vycházející z hysterezích smyček, byla stanovena na hodnotu

$$T_{krit} = 33^\circ\text{C} \quad (9)$$

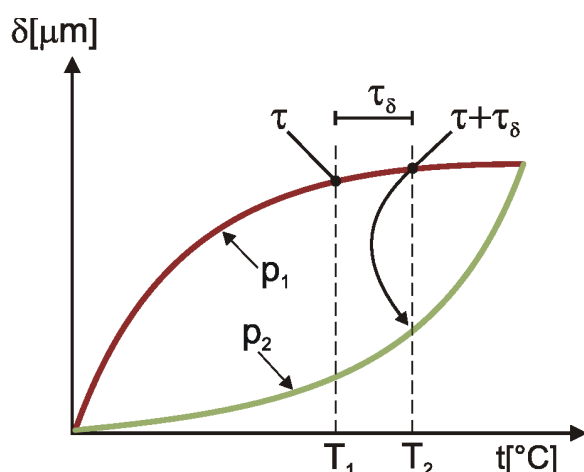
Za předpokladu shodného chování průběhu tepelné deformace stroje lze odhadnout účinnost této kompenzace. Pro osu Y je možné očekávat zbytkové tepelné deformace kolem hodnoty přibližně $25\mu\text{m}$. Pro osu Z tento typ kompenzací představuje zlepšení na hodnoty, pohybující se kolem $30\mu\text{m}$. Efekt překompensování by ale zůstal zachován. V případě dalšího

rozšiřování uvedené metody kompenzací by následovalo určení T_{krit} pro každou osu nezávisle.

5.2. Návrh kompenzace typu ohřev-chladnutí

Další variantou tepelných kompenzací, která vychází z poznatků s chováním stroje MCFV 5050LN je metoda kompenzací typu ohřev-chladnutí. Cílem metody je eliminace velké šířky hysterezního pásma. Základním principem je stanovení dvou skupin polynomů takových tvarů, které by s co nejvyšší shodou sledovaly průběh ohřevu konstrukce (skupina p_1) a průběh chladnutí (skupina p_2).

Základním prvkem kompenzací je funkční algoritmus pro aktivaci správné skupiny polynomů na základě aktuálního tepelného stavu stroje. Principem je porovnávání referenční teploty T_1 v čase t s teplotou T_2 , zjištěnou za přírůstek času τ_δ .



Obr. 5.2 Kompenzace typu ohřev-chladnutí.

Podle výsledku porovnání jsou pak aplikovány příslušné skupiny polynomů. Mechanismus rozhodování je definován rozhodovacími rovnicemi (10), (11) a (12).

$$T_2(\tau + \tau_\delta) - T_1(\tau) > 0 \Rightarrow p_1 \quad (10)$$

$$T_2(\tau + \tau_\delta) - T_1(\tau) < 0 \Rightarrow p_2 \quad (11)$$

$$T_2(\tau + \tau_\delta) - T_1(\tau) = 0 \Rightarrow \text{stávající typ} \quad (12)$$

Schéma funkce metody je zobrazeno na Obr.5.2. Určení správného stupně polynomů je závislé na mnoha okolnostech. Přihlédnutím ke tvarům tepelných deformací lze odhadnout jako optimální 3. stupeň. Počáteční tepelná setrvačnost a proces ustalování deformace

vylučuje použití 1. nebo 2. stupně. Spolu s tím také neukazuje na nutnost využití vyšších stupňů polynomů.

Regresní rovnice pro ohřev konstrukce – p_1 [μm].

$$\Delta_{Yoh} = -0,0093141t^3 + 0,3279338t^2 + 4,0647031t - 133,1736521 \quad (13)$$

$$\Delta_{Zoh} = -0,0012729t^3 - 0,6548221t^2 + 44,0675621t - 582,4725975 \quad (14)$$

Regresní rovnice pro chladnutí konstrukce – p_2 [μm].

$$\Delta_{Ychl} = -0,0050615t^3 + 3,649155t^2 + 89,4004056t - 754,2648143 \quad (15)$$

$$\Delta_{Zchl} = -0,0201452t^3 + 2,3304228t^2 - 64,0605243t - 455,0346831 \quad (16)$$

Časový úsek, po kterém dojde ke změně skupin polynomů je dobré učit s ohledem na vlastnosti konkrétního stroje. V úvahu musí být vzata rychlost prohřívání stroje a rychlost změny deformace v čase. V případě MCFV 5050LN je parametr τ_δ odhadnut v rozsahu

$$\tau_\delta = 5 \div 7 \quad [\text{min}] \quad (17)$$

Při použití uvedených postupů v metodě kompenzací typu ohřev-chladnutí je možné se domnívat, že šířka hysterezního pásma zbytkové tepelné deformace stroje bude relativně malá v porovnání se skutečnou tepelnou deformací. V ose Y při ohřívání konstrukce dle předpokladu nepřekročí šířka pásma velikost $15\mu\text{m}$, při chladnutí stroje pak nebude šířka přesahovat $30\mu\text{m}$. Kvalita kompenzace v ose Z při procesu ohřevu stanovuje šířku pásma do $40\mu\text{m}$ a při chladnutí do $70\mu\text{m}$. Vzhledem k tomu, že regresní křivka probíhá přibližně středem pásma hystereze, je možné se domnívat, že skutečné výsledné hodnoty zbytkové deformace budou menší a to přibližně o polovinu. To představuje v ose Y zbytkové deformace okolo $8\mu\text{m}$ při ohřevu a $15\mu\text{m}$ při chladnutí konstrukce. V ose Z je to pak přibližně $20\mu\text{m}$ pro ohřev a $35\mu\text{m}$ pro chladnutí stroje.

6. Závěr

Výzkum uvedený v této práci prezentuje v první části rozbor chování obráběcího stroje za nestabilních tepelných podmínek jeho okolí. Tepelné deformace stroje, které dosahují hodnot $50\mu\text{m}$ v ose Y při teplotě 33°C a $170\mu\text{m}$ v ose Z při teplotě 33°C , kompenzuje pomocí polynomických rovnic, určených ze závislosti tepelné deformace na teplotě stroje. Z dosažených výsledků analyzuje příčiny zvýšené zbytkové tepelné deformace stroje a na základě poznatků jsou navrženy dvě další kompenzační metody. Metoda kompenzací s konečnou teplotou eliminuje stav, při kterém i přes rostoucí teplotu v místě měření již nedochází k deformaci konstrukce stroje. Předpokládané hodnoty zbytkové deformace při aplikaci této metody jsou v ose Y $25\mu\text{m}$ a v ose Z $30\mu\text{m}$. Kompenzační metoda typu ohřev-chladnutí snižuje hysterezi pásma na minimum postupem, kdy jsou vytvořeny dvě skupiny polynomů. Zvlášť pro ohřev a zvlášť pro chladnutí. Při vývoji metody byl také navržen rozhodovací postup pro výběr správné skupiny polynomů. Předpokládané hodnoty zbytkových deformací v tomto případě nepřesáhnou $8\mu\text{m}$ pro ohřev a $15\mu\text{m}$ pro chladnutí v ose Y. V ose Z pak $20\mu\text{m}$ při ohřevu a $35\mu\text{m}$ pro chladnutí.

7. Poděkování

Tyto výsledky byly získány za finančního přispění Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy v rámci podpory projektu výzkumu a vývoje 1M05070003.

8. Literatura

- [1] Soldat, J., 2003, Analysis and compensation thermal errors of machine tools - thesis, in Czech, Praha, CTU Praha, p.110.
- [2] Ko, T.J., Gim T.-W., Ha, J.-Y., 2003, Particular Behaviour of Spindle Thermal Deformation by Thermal Bending, International Journal of Machine & Manufacture, 43:17-23.
- [3] Ramesh, R., Mannan, M.A., Poo, A.N., 2000, Error Compensation in Machine Tool – a Review Part II: Thermal Errors, International Journal of Machine & Manufacture, 40:1257-1284