



Národní konference s mezinárodní účastí
INŽENÝRSKÁ MECHANIKA 2002

13. – 16. 5. 2002, Svratka, Česká republika

KOMPENZACE TEPELNÝCH DEFORMACÍ OBRÁBĚCÍHO CENTRA

Jaroslav Soldát

Abstract: This work aims to reduce the thermal errors of the machining centres by indirect compensation methods. Thermal effects can form more than 70% to the overall displacement error by using HSC technology. To compensate thermal expansion, exact measurements of machine thermal behaviour, as a function of temperature, are necessary. The thermal expansion of the axes is largely proportional to the temperature. The temperatures, measured by the Pt 100 thermistor, are saved in the PLC of machining centre. Thermo-elastic deformations are calculated from the representative temperature-measuring points in the machine tools structure. The number of measuring points is optimised. We can directly determine the amount of expansion by multiplying the temperature value by a certain factor. The calculated deflections are compensated by means of the CNC of machine tools. I apply two different methods to solution of deflection in the end point of the tool. My aim was to reduce thermal deflection by 3/4 and this aim has been reached.

Key words: machine tools, thermal behaviour, thermal error, compensation.

1. Úvod

V současné době jsou kladeny na obráběcí stroj (OS) stále vyšší požadavky a to především v souvislosti s rozvojem technologie HSC (High Speed Cutting). Vedle požadavku na tuhost a dynamickou stabilitu OS je jedním z hlavních požadavků také snaha o minimalizování tepelných deformací, vznikajících během procesu obrábění, resp. tento důsledek vhodným způsobem eliminovat. Tepelné deformace nosné soustavy OS ovlivňují polohu řezného břitu nástroje vůči obrobku, což má přímý vliv na jeho geometrický rozměr. V konstrukci OS se nachází celá řada různých významných zdrojů tepla. K nejvýznamnějším patří pohon hlavního vřetene, kde se dnes setkáváme převážně s průvlekovými motory. Dalším důležitým zdrojem tepla, ovlivňujícím nosnou soustavu OS, jsou pohony posuvových a rotačních os stroje. Hlavní příčinou tepelných deformací u posuvových a rotačních os nejsou vlastní motory, ale vývin tepla v důsledku tření při kontaktu valivých těles v matici kuličkového šroubu nebo v ložiscích. Dalším místem vývinu tepla je tření v těsnících prvcích matice kuličkového šroubu nebo ložiska.

Jednou z obvyklých možností snížení vlivu tepelných deformací při výrobním procesu je realizace pasivní kompenzace polohy nástroje. Tohoto lze docílit prostřednictvím sledování teplot, v optimálně zvolených a dostupných místech konstrukce, a jejich přenesením do řídicího systému OS. Následuje zpracování v odladěném výpočtovém

modelu tepelného chování OS. Na základě výpočtu v řídicím systému OS je následně prováděna prostorová korekce polohy nástroje v jednotlivých posuvových resp. rotačních osách OS. Praxí jsme si několikrát potvrdili, že univerzální model tepelného chování OS neexistuje. Konkrétní chování OS je do značné míry ovlivněno prostředím v kterém je stroj provozován a také provozním režimem. V případě, že se jedná o ustálený nebo opakující se krátkodobý provozní režim, jsou výsledky dosahované metodou nepřímé kompenzace velmi uspokojivé. Tento způsob snižování tepelných deformací nachází uplatnění především při dokončovacím obrábění tvarově složitých forem na vertikálních obráběcích centrech.

2. Cíl

Mojí snahou bylo zlepšení dosahovaných výsledků, při aplikaci metody nepřímé tepelné kompenzace, zahrnutím více vlivů a kvalifikovanější volbou polohy snímačů teploty. Spolu se snahou docílit zároveň nižší citlivost výpočtového modelu na okolní prostředí. Po aplikaci těchto nových výpočtových modelů do řídicího systému OS provést jejich verifikaci v různých pracovních režimech.

3. Analýza tepelných vlivů na OS

V nosné struktuře se nachází celá řada tepelných zdrojů mající významný podíl na výslednou polohu nástroje vůči obrobku. Zde si je nutno uvědomit, že při dokončovacích frézovacích operacích na ocelových formách, při obrábění hliníku, mědi, plastických hmot a grafitu, se obrábí vysokými řeznými rychlostmi a zároveň i vysokými posuvovými rychlostmi. Průvlekový motor vřetene s příkonem v řádu desítek kilowat má i hlavní podíl na tepelném ovlivnění vřeteníku. K šíření tepla ve vřeteníku OS dochází především vedením. Tepelnou roztažností se mění geometrie vřeteníku, která mění polohu nástroje vůči obrobku. Na druhém místě jsou posuvové mechanismy OS a to především vlivem tření valivých a těsnících prvků mezi maticí a kuličkovým šroubem. Podíl ztrátového tepla se progresivně zvyšuje se vzrůstající rychlostí pohybu. U kuličkového šroubu se opět jedná o šíření tepla vedením a tepelná roztažnost materiálu má za následek změnu polohy stolu, saní a vřeteníku. Dalším vlivem, který nelze při sestavování výpočtového modelu tepelného chování OS pominout, je vývin tepla v ložiscích a to především vřetenových. Vřetenová ložiska se při trvalém běhu ohřejí až na teplotu okolo 60°C. Tato se šíří vedením ve vlastním vřetenu a společně s teplotou rotoru průvlekového motoru způsobuje vysouvání vřetene ze vřeteníku. Tento jev je také závislý na délce nástroje. Stanovení ohřevu vlastního nástroje a následně jeho deformací je značně náročné. Většina přivedené energie se spotřebuje na odříznutí třísky a také v třísce opouští rovinu řezu. Podle našich zkušeností pouze asi 5% přivedené energie přestupuje do nástroje a tento ohřívá. Z monolitního nástroje resp. držáku břitových destiček je tepelná energie velmi úspěšně odváděna chladícím médiem nebo prouděním okolního vzduchu v pracovním prostoru OS.

Vliv na výrobní úchyly mají i tepelné deformace obrobku. Součinitel teplotní roztažnosti obráběných materiálů se pohybuje v širokých mezích. Velmi nepříznivý je vliv tepelné roztažnosti obrobku při komplexním obrábění včetně vrtání otvorů s přesnou roztečí. V těchto případech může dojít k odchylkám, které jsou vyvolány tepelnými jevy, v řádu několika setin až desetin milimetru. Nepříznivě se projevuje též ponechání třísek vytvořených při řezném procesu na obrobku resp. na nosných částech OS a to zvláště ve větších vrstvách.

Chlazení nástroje chladicí kapalinou nebo tlakovým vzduchem příznivě ovlivňuje řezný proces a pomáhá udržet stabilizovaný stav OS. Při častém střídání provozu s chladícím médiem a bez něj, může být narušen “spojitý” průběh měřené teploty a použité kompenzační algoritmy nemusí správně fungovat. Tomuto jevu je nutno předcházet vhodným umístěním měřících sond teploty v pracovním prostoru a v konstrukci OS.

4. Vytvoření výpočtového modelu

K přesnému popisu dějů vyvolaných účinky tepelných pochodů při provozu OS popsanych v předchozí kapitole by bylo nutno několika různých typů snímačů. Řada důležitých míst je při běhu stroje skryta nebo nepřístupna, ať již z hlediska polohy nebo bezpečnosti. Není nutno vždy měřit pouze teploty, ale v celé řadě případů lze měřit přímo deformace. Toto se týká především deformací kuličkových šroubů.

Při stanovení výpočtového modelu kompenzací tepelných deformací OS byly uplatněny dvě metody. Metoda lineárních kombinací teplot [1], [2]. Tato je vhodnější pro větší soubory dat při jednom pracovním režimu stroje. Při použití této metody je nutno provést kvalifikovaný výběr měřících míst, ze kterých budou zpracována data pro vytvoření výpočetního modelu. Ve výpočtovém modelu jsou jednotlivé teplotní změny násobeny lineárními koeficienty a tudíž je většinou nutno použít větší množství snímačů pro dosažení uspokojivých výsledků.

Metoda váhových funkcí [1],[3]. Při této metodě jsou uplatněny váhové funkce u kompenzačních křivek druhého stupně. Průběhy křivek jsou stanoveny metodou nejmenších čtverců. Použití této metody je vhodnější pro menší soubory měřených dat v různých provozních režimech stroje. Váhové funkce v sobě zahrnují vlivy různých parametrů měřitelných během provozu stroje (příkon vřetene, otáčky vřetene, zapnutí chlazení a dobu klidu). Počet měřících míst, pro srovnatelné výsledky, je oproti předchozí metodě menší. Použijeme-li shodného počtu snímačů lze očekávat přesnější výpočtový model, tj. lepší popis závislostí tepelných deformací na teplotách.

5. Experimentální ověření výpočtového modelu

Ověření výpočtového modelu kompenzačních závislostí je provedeno pro vertikální obráběcí centrum MCV 750 SPRINT z produkce KOVOSVIT, a.s. Sezimovo Ústí. Na obr.1. je celkový pohled na vertikální obráběcí centrum MCV 750 SPRINT.

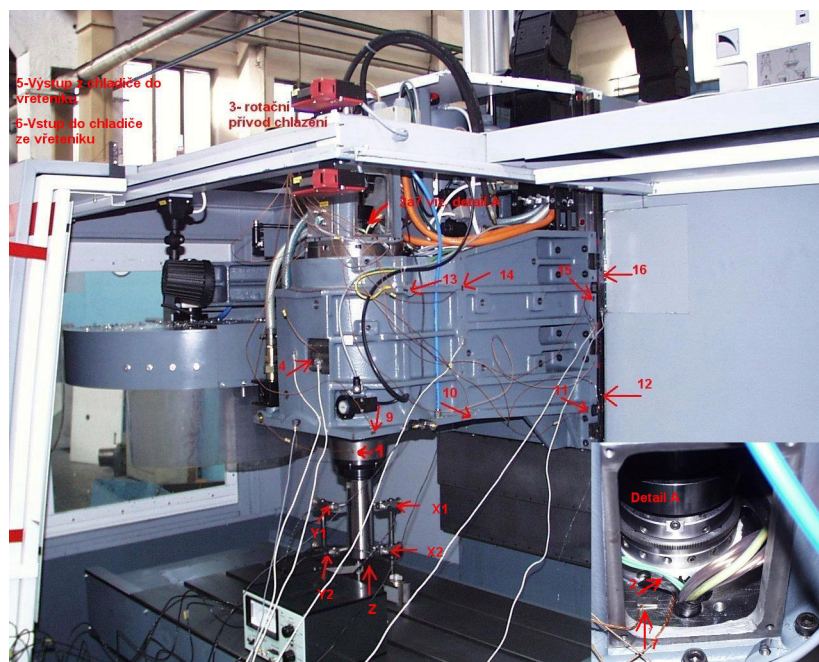
Pro naměření údajů o deformacích a teplotách jsme použili měřící ústřednu s možností současného snímání až 32 teplot. Teploty jsou měřeny prostřednictvím příložných termočlánků na povrchu konstrukce obráběcího centra. Dále může ústředna zpracovávat výstupní signál až z pěti bezkontaktních snímačů posunutí pro měření deformací. Naměřená data jsou průběžně ukládána do notebooku, kde je máme možnost dále zpracovávat. Uspořádání snímačů deformací kontrolního trnu a náhled na část snímačů, měřících teplotu ve zvolených místech konstrukce, je zobrazen na obr.2.

Na obráběcím centru byly měřeny hodnoty posunutí, po dvou v ose X a Y obráběcího stroje a jedna hodnota ve směru osy Z [4]. Na obr.3. jsou zobrazeny hodnoty deformací v konstrukci OS v závislosti na tepelných změnách. Pracovní režim byl odvozen pro technologii dokončovacího frézování ocelové formy (otáčky vřetene 13000min^{-1}). Tato naměřená data jsou podkladem při tvorbě výpočtových modelů. Průběhy kompenzačních křivek jsou také zakresleny v obr.3.

Z těchto naměřených hodnot jsem vytvořil dva výpočtové modely se shodným počtem snímačů teplot i shodným umístěním po konstrukci obráběcího centra MCV 750 SPRINT.

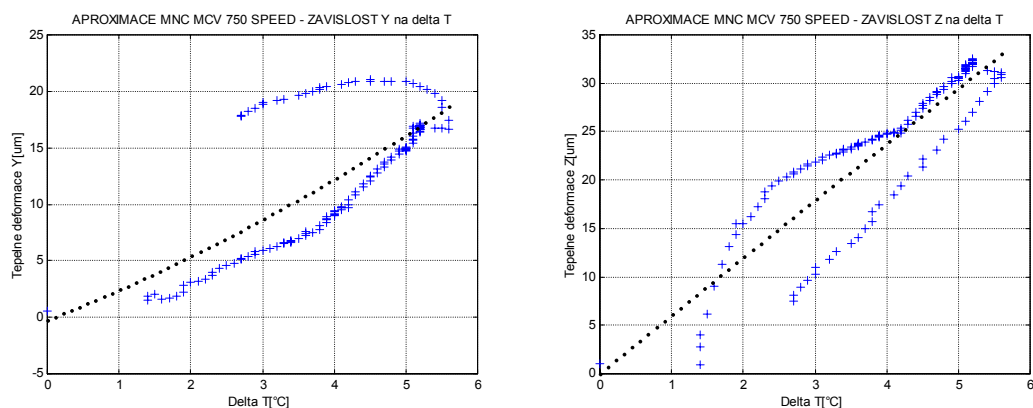


Obr.1. Celkový pohled na stroj MCV 750 SPRINT



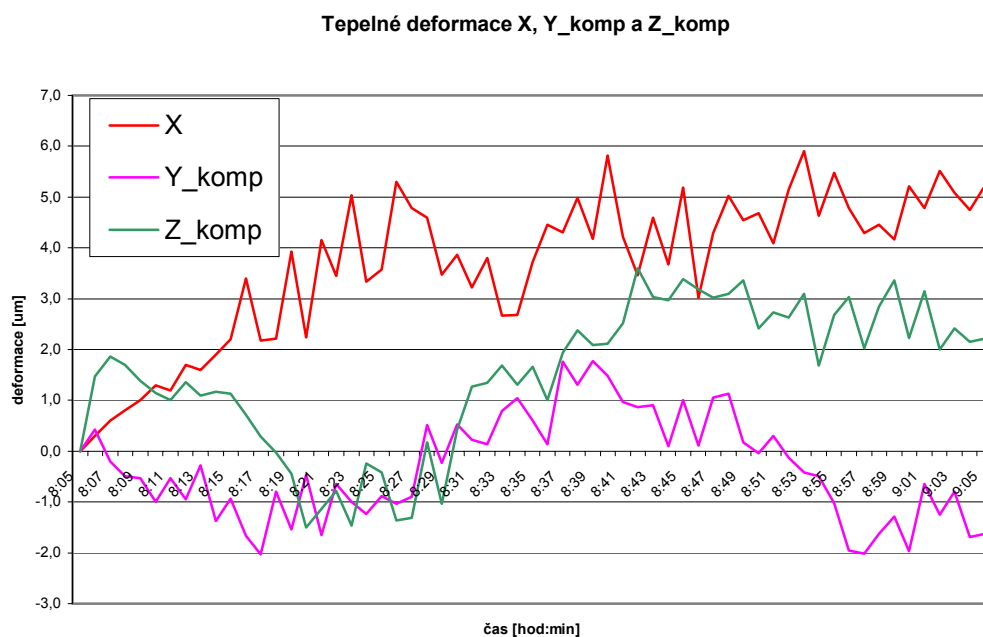
Obr.2. Rozmístnění snímačů teploty a deformací

Parametry obou výpočtových modelů jsou zadány do PLC řízení obráběcího centra. Obráběcí centrum pracuje v několika různých režimech při aktivaci prvního resp. druhého výpočtového modelu. Průběžně je prostřednictvím PLC, na základě naměřených hodnot teploty v měřících místech, upravována, pohony jednotlivých pracovních os, poloha břitu nástroje vzhledem k výchozímu stavu. Zároveň probíhá měření deformací na kontrolním trnu ve směrech X,Y a Z, které jsou shodné s osami stroje.



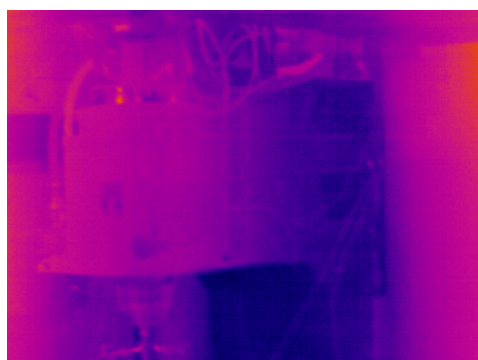
Obr.3. Hodnoty deformací osy Y a Z v závislosti na teplotní diferenci

Výsledné hodnoty deformací v závislosti na čase jsou zobrazeny na obr.4.. Hodnoty tepelných deformací v ose Y se pohybují během hodinové zkoušky se zapnutou kompenzací v rozsahu $4\mu\text{m}$ oproti cca. $22\mu\text{m}$ bez kompenzace. Hodnoty tepelných deformací v ose Z se pohybují v rozsahu $5\mu\text{m}$ s kompenzací oproti $23\mu\text{m}$ bez kompenzace. Z obr.4. je zcela zřejmé, že požadovaného cíle, snížení deformací vlivem teplotních vlivů o 3/4, bylo dosaženo. Nutno však poznamenat, že těchto výsledků bylo dosaženo při stabilizované teplotě okolí a minimalizaci vnějších vlivů působících na stroj během procesu měření.

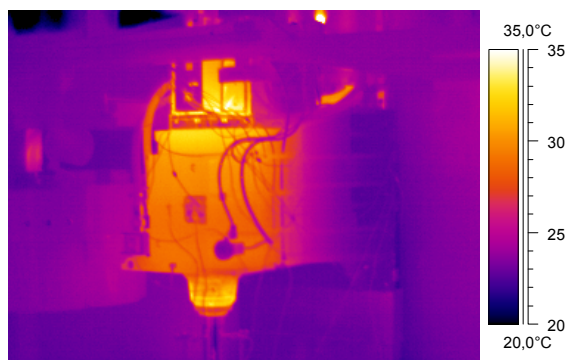


Obr.4. Průběh deformací v osách X, Y a Z v závislosti na čase

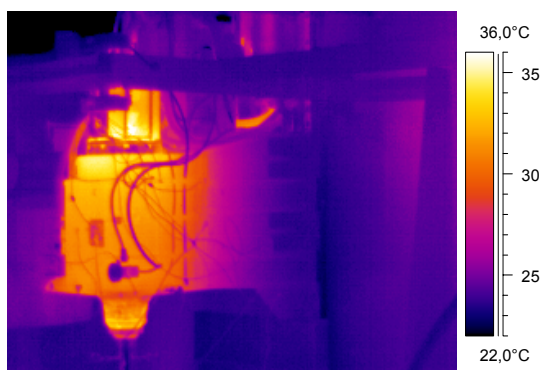
Během zkoušek obráběcího centra MCV 750 SPRINT bylo provedeno snímání teplotních polí pomocí termovizní kamery [4]. Při tomto měření bylo využito maximálních otáček vřetene obráběcího centra tj. 18000 min^{-1} . Z následujících obrázků 5a) až 5d) je zřejmé, že dochází celkem k rovnoměrnému prostupu tepla konstrukcí vřeteníku. Teplotní difference, mezi referenčním snímačem a měřícím snímačem teploty, dosahovala maximální hodnoty cca. 14°C .



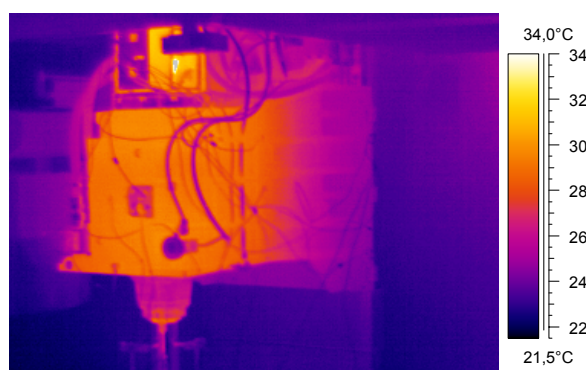
a) začátek měření



b) po 45 minutách běhu



c) po 90 minutách běhu



d) po 30 minutách chladnutí

Obr.5. Termovizní snímky během provozu při 18000min^{-1}

6. Závěr

Výpočtový model lze aplikovat na konkrétním typovém stroji pro který byl vytvořen. Z důvodu tolerancí ve výrobě a kvalitě použitých čidel je vhodné provést verifikaci pro vzorový zatěžující cyklus a případné odchylky doladit úpravou v parametrech tepelné kompenzace v řídicím systému OS. Závěrem lze konstatovat, že cíl práce tj. snížení výrobních úchylek v osách Y a Z, vyvolaných teplotními deformacemi, o 3/4 použitím kompenzačního algoritmu byl splněn. Důkazem jsou deformace naměřené při verifikaci výpočtového modelu na obr.4. Osu X, obráběcího centra MCV 750 SPRINT, není nutno, díky tepelně symetrické konstrukci stroje, kompenzovat vůbec.

Poděkování Výzkumnému centru pro strojírenskou výrobní techniku a technologii (VCSVTT) při Českém vysokém učení technickém v Praze, fakulta strojní, za pořízení termovizních snímků obráběcího centra.

Literatura:

- [1] - Soldát J.: Compensation of Thermal Deformations of the Machine Tools, Inženýrská mechanika 2001, Svratka
- [2] - Černá R.: Technická matematika – numerické metody, přednášky doktorandského studia 96-97
- [3] - Černá R., Machalický M., Šánová L.: Základy numerické matematiky a programování II., ČVUT v Praze, Ediční středisko ČVUT, 1982, 144
- [4] - Interní výpočtové zprávy KOVOSVIT, a.s. Sezimovo Ústí