



COMPENSATION OF THERMAL DEFORMATIONS OF THE MACHINE TOOLS

Jaroslav SOLDÁT*

This work aims to reduce the thermal deformations of machine tools 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, since 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 machine tools. 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 compare two different methods for solution of deflection in the end point of the tool. My aim was to reduce thermal deflection by 2/3 and this aim has been reached.

Použitá označení:

A – matice hodnot ($m \times n$)

X – vektor kompenzačních koeficientů (n)

B – vektor naměřených teplotních deformací pro zvolený kompenzační směr (m)

m – počet měření pro zvolený kompenzační směr

n – počet čidel k měření teploty resp. počet kompenzačních součinitelů

1. Úvod

S rozvojem vysokorychlostního obrábění (HSC - High Speed Cutting) neustále nabývá na významu přesnost finálního obrobku tvarově složitých ploch. Nástup produktivnější technologie HSC je největší měrou ovlivňován vývojem a aplikacemi nových rezných nástrojů a materiálů např. na bázi kubického nitridu bóru a povlakovaných slinutých karbidů. Neustále se zvyšuje počet různorodých aplikací produktivnější technologie HSC na obráběcích strojích (OS).

Snahou každého konstruktéra OS je návrh a realizace co nejkvalitnějšího a na okolních podmínkách nezávislého stroje. Bohužel však fyzikální zákonitosti nelze dosud v běžných pracovních podmínkách OS eliminovat, proto je snahou tyto nepříznivé vlivy alespoň omezit na míru nezbytně nutnou. Při návrhu OS je prioritou jeho statická a dynamická tuhost a v neposlední také tepelná stabilita. Tepelné pochody které probíhají v OS, během jeho provozu, značně ovlivňují výslednou polohu nástroje vůči

* Ing. Jaroslav Soldát, Nám.T.Bati 419, CZ-39102 Sezimovo Ústí II, E-mail: soldat@kovosvit.cz

obrobku a v konečném důsledku, průběh těchto deformací, určuje přesnost obrobku. Při dokončovacím obrábění forem pro tlakové lití, výrobků spotřebního průmyslu, technologií HSC jsou síly od obrábění velmi malé a nezpůsobují nikterak velké deformace nosné soustavy OS, ale o to větší je podíl deformací vyvolaný tepelnými jevy v OS. Tyto tepelné deformace mohou dosahovat během obrábění, dle našich zkušeností, až přes 70% celkových deformací v místě nástroje.

V konstrukci OS se nachází celá řada aktivních tepelných zdrojů ve kterých dochází k přeměně elektrické energie v mechanickou. Tato přeměna se neodehrává beze ztrát, ale část dodané elektrické energie se přemění v teplo ovlivňující tepelnou bilanci OS. Mezi aktivní prvky ve kterých vzniká ztrátové teplo patří motory hlavních vřeten, motory posuvových os a ostatní motory např. chladicího, mazacího a hydraulického okruhu. Dominantním prvkem s největším elektrickým příkonem a tedy i velkými tepelnými ztrátami je hlavní vřeteno OS. Příkon hlavního motoru vřetene představuje 50-75% příkonu OS.

Pasivními prvky jsou takové ve kterých resp. působením kterých se přeměňují ostatní druhy energií opět v teplo. Ve většině případů se jedná o přeměnu pohybové energie při účasti mechanického tření. Mezi hlavní pasivní prvky generující ztrátové teplo patří kluzná nebo valivá vedení, kuličkové šrouby, valivá ložiska, převodové mechanismy a těsnění.

Nejnepříznivějším dějem na OS není ustálený stav maximálního výkonu či maximálních otáček vřetene, ale přechodové režimy resp. výrazné změny otáček vřetene nebo výkonu vřetene v čase.

Kompenzaci tepelných deformací lze provádět přímo či nepřímo resp. s dodávkou energie a bez další dodávky energie. Mezi přímé metody teplotní kompenzace patří použití nezávislého zařízení, které podává průběžně informace o aktuální poloze nástroje. Do této skupiny patří odměřovací pravítka, laserové odměřování. Nepřímá metoda teplotní kompenzace polohy určuje polohu nástroje z jiných přímo nebo nepřímo souvisejících veličin vyskytujících se a měřitelných na OS a mající určitý vliv na polohu nástroje. Při použití metody kdy je do systému dodávána další energie se jedná o chlazení resp. ohřev ve vhodných místech konstrukce. [1] V případě kdy se do systému nedodává další energie se řeší měřením teplot a deformací a následným výpočtem posunutí nástroje vůči obrobku či ideálnímu stavu.

2. Cíl.

Celá řada výrobců řídicích systémů OS nabízí jako opci moduly pro kompenzaci tepelných deformací v různých cenových úrovních a samozřejmě kvalitách. Mojí snahou je najít a aplikovat nepřímou kompenzační metodu kdy je možno při malých nákladech docílit snížení vlivu tepelných deformací na rozměrovou přesnost vyráběných dílců o cca 2/3.

3. Analýza tepelných pochodů / závislostí/ na obráběcím stoji.

Změna polohy nástroje vůči obrobku vyvolaná tepelnými procesy ve struktuře OS určuje výslednou přesnost obrábění. Přenos tepelné energie na OS se děje třemi známými principy – vedením, prouděním a sáláním. Obecně nelze označit ani jeden z nich za převažující v celé nosné struktuře OS. Jak již bylo zmíněno hlavní pohon vřetene OS je největším zdrojem ztrátového tepla. Dnes se aplikují v hlavních pohonech vřeten dva typy motorů a to asynchronní s frekvenčním měničem a průvlekové motory.

V případě nasazení asynchronních motorů se hlavní podíl tepelné energie šíří ve struktuře OS prouděním. Průvlekové motory jsou používány s vodním chlazením statoru a více jak 60% ztrátové tepelné energie se odvede chladicím médiem. Tyto motory jsou zabudovány přímo v konstrukci vřeteníku OS a hlavní podíl tepelné energie se šíří do struktury OS vedením. Vliv sálání se projevuje při hrubovacích operacích kdy se v pracovním prostoru OS nachází značné množství horkých třísek neboť se při nasazení technologie HSC zpravidla nechladí.

Velký význam má vliv okolí a prostředí ve kterém je OS nasazen. Velmi nevhodné je umístění OS v blízkosti topení, výustek klimatizace, vrat hal, oken, kterými proniká sluneční záření atd.

4. Vytvoření výpočtového modelu.

K nepřímé kompenzaci tepelné roztažnosti struktury OS je nezbytné přesné měření tepelného chování OS. Deformace jednotlivých komponent struktury OS jsou přímo závislé na teplotě resp. teplotní změně. Pro predikci a následnou kompenzaci tepelných deformací jsem aplikoval dvě následující metody:

4.1. Metoda lineárních kombinací jednotlivých teplot.

Výběr 3 až 4 teplot a jedné referenční ze změřeného souboru teplot ve významných a přístupných místech konstrukce OS. Aplikována metoda pro řešení pře určených soustav lineárních rovnic.[2] Z experimentálně zjištěných hodnot teplot v jednotlivých měřicích bodech rozmístněných v dostupných místech OS je sestavena pře určená soustava lineárních rovnic. Matice **A** je sestavena ze změřených hodnot n-tice měřicích čidel teploty. Vektor **B** tvoří hodnoty příslušné deformace pro jednotlivou souřadnou osu OS, která odpovídá měřenému a zároveň kompenzovanému směru. Vektor **X** představuje kompenzační součinitele jednotlivých teplotních čidel.

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{X} = \mathbf{B} \quad (1)$$

$$\mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{B} \quad (2)$$

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}^+ \cdot \mathbf{B} \quad (3)$$

\mathbf{A}^+ - pseudoinverzní matice

4.2. Váhové funkce.

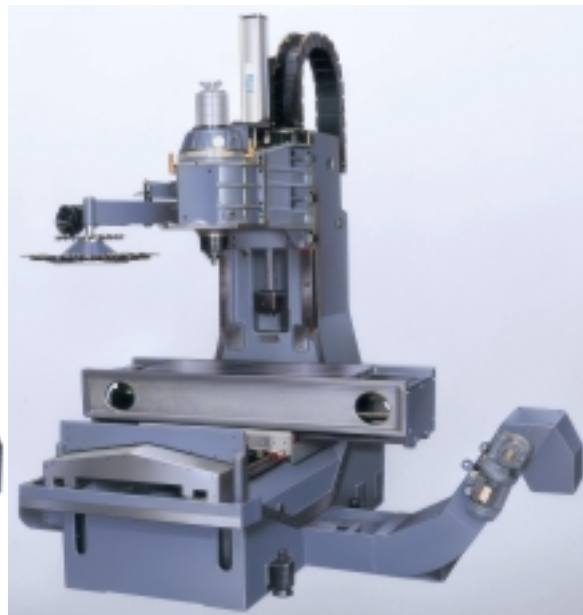
Váhová funkce rozhoduje o aplikaci kompenzační křivky pro režim ohřevu nebo chladnutí. Průběhy křivek druhého stupně pro ohřev a chladnutí OS jsou stanoveny metodou nejmenších čtverců (MNC). [3]

Vytvoření váhové funkce je záležitostí experimentálního měření chování stroje v různých režimech provozu. Mezi snadno měřitelné trvale sledované veličiny, které poskytuje přímo řídicí systém OS patří otáčky hlavního pohonu včetně a aktuální hodnota proudu v motoru hlavního včetně. Tyto hodnoty mají dominantní podíl na vývinu tepla ve včetně OS a ovlivňují tepelné chování ostatních komponent OS. Výpočtový model vychází ze zjištění teplotních závislostí při různých režimech provozu OS.

5. Experimentální ověření výpočtového modelu

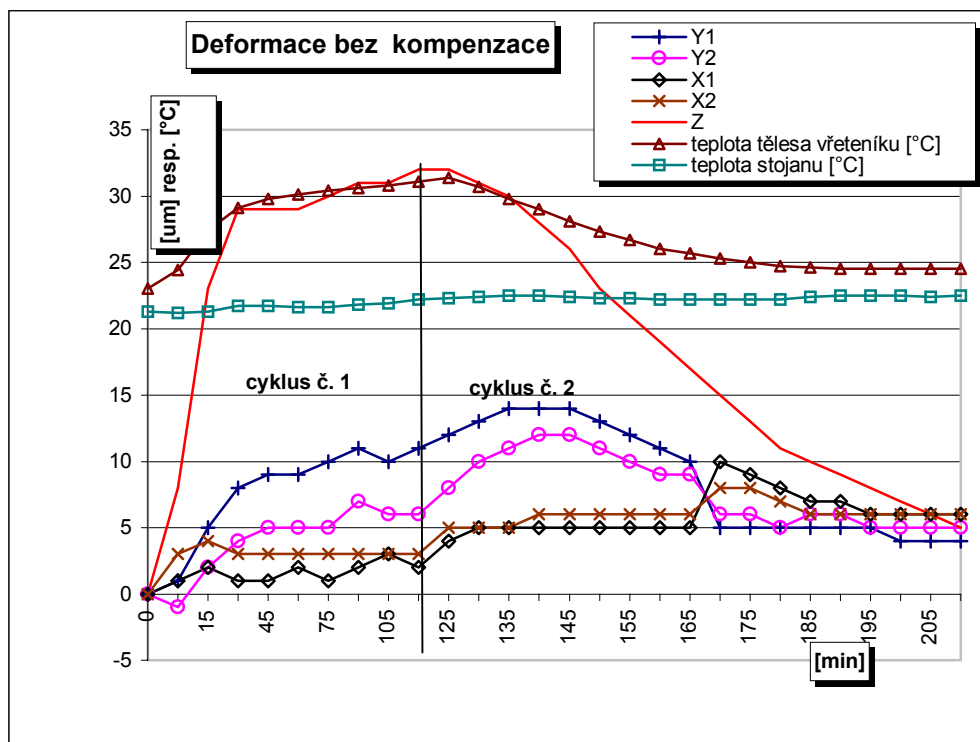
Ověření výpočetního modelu kompenzačních závislostí je provedeno pro vertikální obráběcí centrum MCV 750 HSC z produkce Kovosvit, a.s. Sezimovo Ústí. Pozornost je zaměřena na osu Z tj. vertikální pojezd včetně po stojanu stroje. Při měření se včetně nacházel ve 2/3 zdvihu nad plochou stolu. Na obr.1 je celkový pohled na obráběcí centrum MCV 750 HSC. Obr.2. představuje pohled na skelet stroje, tvořený hlavními nosnými prvky konstrukce a to lože stojan, včetně, saně, suport.

Měřicí aparatura je sestavena z měřicí ústředny, devíti snímačů teploty a notebooku pro uložení a zpracování výsledků.



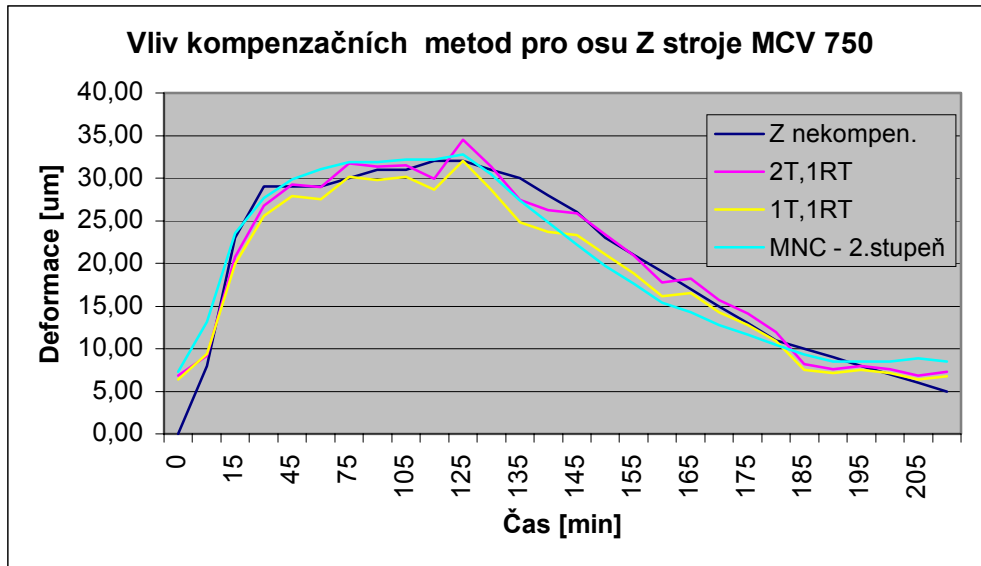
Obr.1. Celkový pohled na stroj MCV 750 HSC Obr.2. Pohled na skelet stroje

Na obr.3. jsou zobrazeny výsledky měření tepelných deformací při běhu vřeteníku stroje MCV 750 HSC. Při cyklu č.1 běží vřetení na 13.000 otáček za minutu. Během cyklu č.2 probíhá chlazení tzn., že otáčky vřetení jsou nulové. Deformace v osách X a Y jsou měřeny ve dvou místech z důvodu vyhodnocení sklonu osy vřetení. Na obr.3. jsou vyneseny také průběhy dvou teplot. Teplota z místa tělesa vřeteníku ve kterém je umístěna měřící sonda a je velmi důležitá pro stanovení kompenzačních závislostí a teplota stojanu, která je ve výpočtovém modelu brána jako referenční.



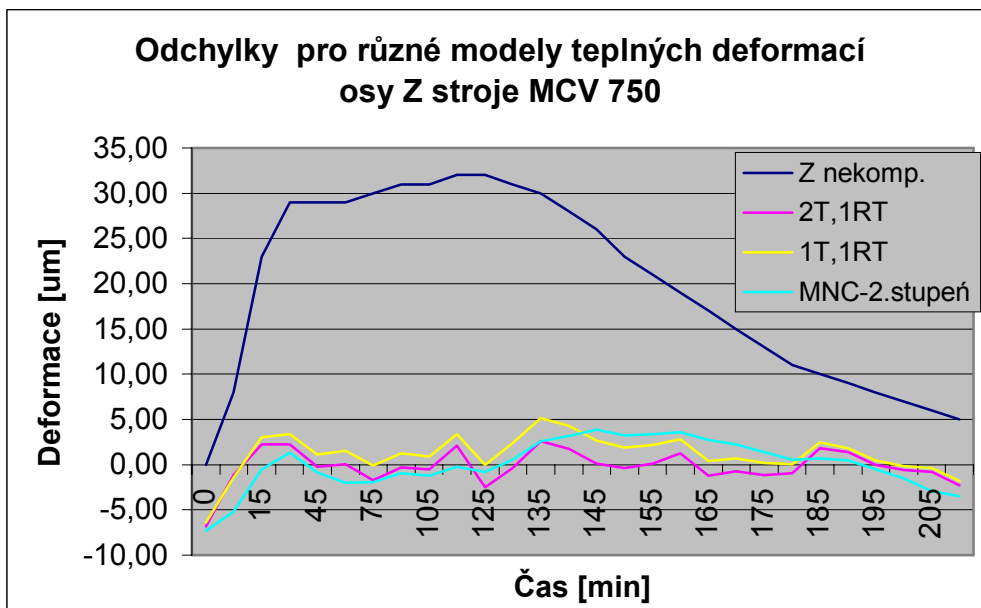
Obr.3. Průběh naměřených deformací a teplot na stroji

Na obr.4 jsou zobrazeny teoretické průběhy deformací osy Z, které jsou generovány z jednotlivých výpočtových modelů. Průběh označený 2T, 1RT přísluší výpočtovému modelu ve kterém jsou uvažovány dvě měřící sondy teploty a jedna teplotní sonda jako referenční. Průběh označený 1T, 1RT přísluší výpočtovému modelu ve kterém je uvažována jedna měřící sonda teploty a jedna teplotní sonda jako referenční. Průběh označený MNC – 2.stupeň přísluší výpočtovému modelu vytvořenému metodou nejmenších čtverců se dvěma závislostmi, jedna pro ohřev a druhá pro chlazení s uvažováním jedné měřící sondy teploty a jednou teplotní sondou jako referenční. Tyto hodnoty zpracovává PLC řídicího systému OS a následně upravuje polohu nástroje vůči obrobku akčním zásahem v příslušné ose stroje.



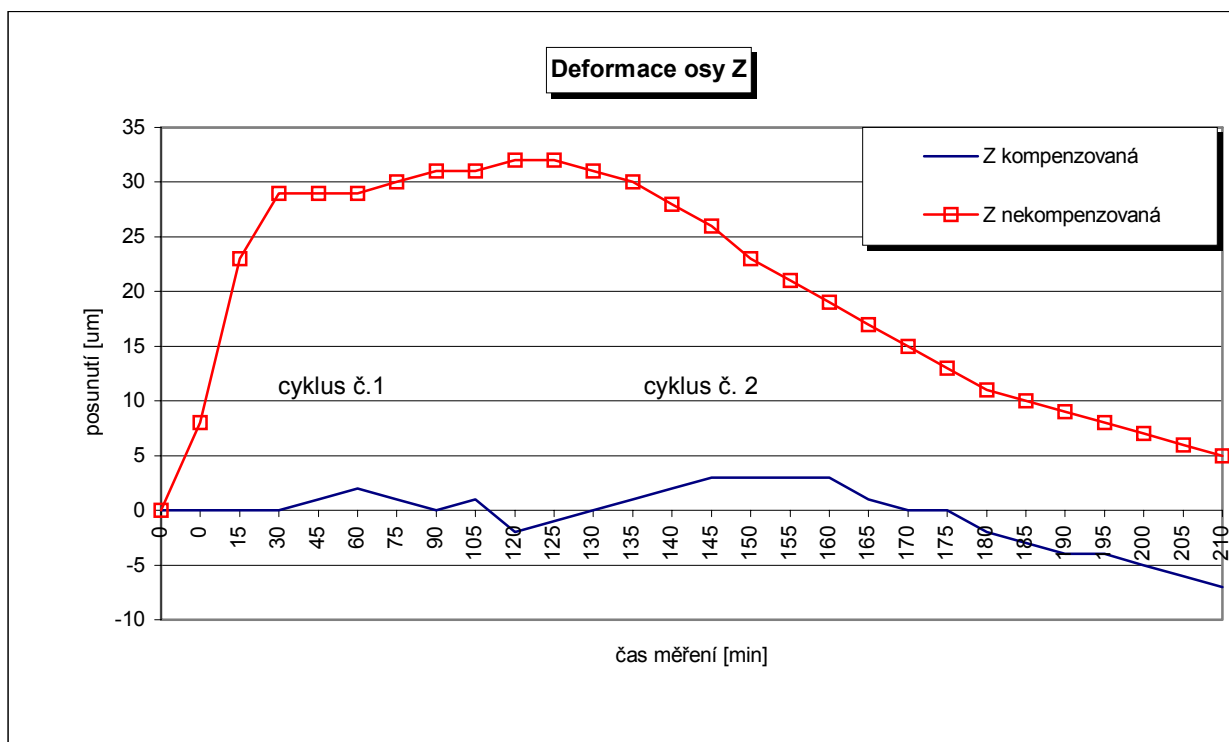
Obr.4. Teoretické průběhy deformace z jednotlivých výpočtových modelů

Na obr.5. jsou zobrazeny vypočtené hodnoty odchylek od vzorové tj. naměřené křivky tepelných deformací pro různé výpočtové modely kompenzace.



Obr.5. Vypočtené hodnoty odchylek pro různé výpočtové modely kompenzace

Obr.6. představuje výsledky skutečného měření na vertikálním obráběcím stroji MCV 750 HSC kde jsou zakresleny hodnoty tepelných deformací osy Z jak nekompenzované, tak kompenzované. Během měření byl uplatněn v řídicím systému stroje algoritmus výpočtového modelu získaný MNC.



Obr.6. Výsledná deformace osy Z po tepelné kompenzaci.

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 vyvolaných teplotními deformacemi o 2/3 s využitím kompenzačního algoritmu byl splněn. Důkazem jsou deformace naměřené při verifikaci výpočtového modelu na obr.6.

V praxi se kompenzuje na uvedeném stroji ještě osa Y. Osu X není nutno, díky tepelně symetrické konstrukci stroje, kompenzovat vůbec.

Literatura:

[1] – <http://erc.engin.umich.edu/ALB/gtec.html>

[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