

# KOMPENZACE TEPLOTNÍCH ÚHLOVÝCH CHYB STROJŮ

www.mmspektrum.com/140420

VCSVTT, FS ČVUT v Praze

*Teplotní chování obráběcích strojů je jen jedním z mnoha faktorů, ovlivňujících celkovou výrobní přesnost stroje. Ta je navíc dána také statickým a dynamickým chováním stroje, geometrickou přesností, řídicím systémem stroje, odměřováním, zvoleným výrobním postupem atd. Nicméně právě teplotní chyby (resp. teplotní deformace na špičce nástroje) způsobují v dnešní době převážnou část výrobních odchylek a jejich dopad na výrobní přesnost strojů v posledních letech neustále vzrůstá.*

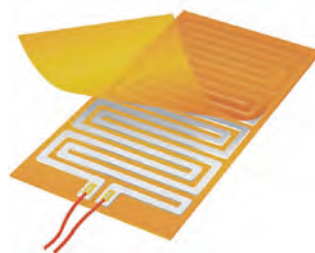
Obecně můžeme teplotní chybu na špičce nástroje rozdělit na její lineární a úhlové složky. Lineární složky teplotní chyby jsou ty, které se vyskytují v lineárních pohybových osách stroje. Tyto lineární složky je možné minimalizovat pomocí vhodné softwarové (elektronické) teplotní kompenzace. Softwarová teplotní kompenzace funguje tak, že jsou určitým matematickým modelem predikovány hodnoty korekcí v příslušných lineárních osách v reálném čase a ty jsou superponovány k požadovaným polohám daných lineárních os (změna do správné pozice je realizována pohybem pohonu příslušné osy dle vypočtené

korekce). Jedná se o velmi levný způsob, jak minimalizovat lineární složky teplotní chyby stroje, protože není nutné stroj vybavovat speciálními přídavnými prvky. Nutnou podmínkou pro sestavení modelu softwarové teplotní kompenzace jsou experimentální testy na stroji, které mohou být provedeny v souladu s normou ISO 230-3 pro určení teplotních vlivů na obráběcí stroj. Klíčové u softwarové teplotní kompenzace je však zejména použití vhodného a dostatečně robustního kompenzačního algoritmu tak, aby algoritmus popisoval široké spektrum pracovních režimů (dlouhodobě poskytoval stabil-

ní výsledky, tedy zaručoval požadovanou přesnost stroje). Vývojem pokročilých modelů softwarových teplotních kompenzací na principu přenosových funkcí se již řadu let zabývá Výzkumné centrum pro strojírenskou výrobní techniku a technologii (VCSVTT) při Fakultě strojní ČVUT v Praze.

Oproti tomu úhlové složky teplotní deformace na špičce nástroje jsou obecně problematickým jevem, protože se na strojích ne-

ké konstrukce strojů, správně navrhnout chladicí systém, používat tepelné izolace problematických vnitřních zdrojů tepla na stroji atd. Kromě snížení absolutních velikostí teplotních deformací by mělo být cílem těchto konstrukčních opatření také to, aby teplotní deformace probíhaly v lineárních pohybových osách stroje, tj. vyskytovaly se převážně lineární složky teplotních chyb (jenž je možné kompenzovat softwarově) a došlo k zamezení vzniku úhlových složek teplotních chyb, které jsou následně komplikovaněji odstranitelné. Dobrým nástrojem pro takovýto návrh nového prototypu stroje je topologická optimalizace konstrukce z pohledu jeho teplotně-elastického chování. Vhodným konstrukčním návrhem by tak mělo být možné úhlové deformace výrazně eliminovat.



Obr. 1. Topná fólie

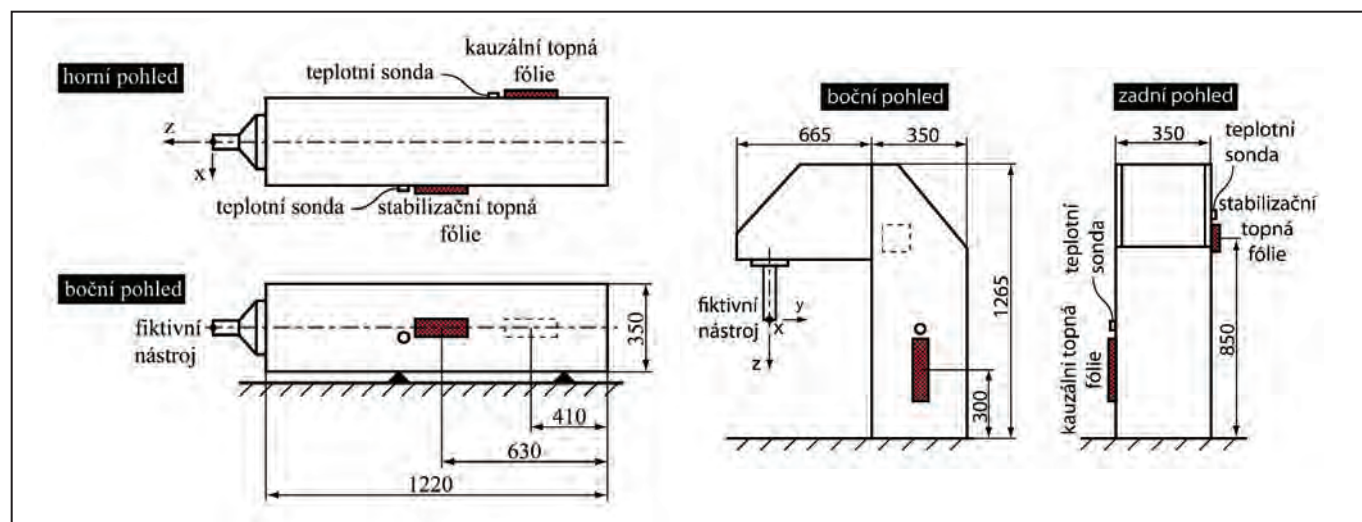
dají jednoduše softwarově kompenzovat, tak jako lineární složky teplotní deformace. V případě tříosých strojů je to dokonce výše popsaným způsobem nemožné a případná kompenzace úhlových chyb se neobejde bez přídavných zařízení na stroji (např. zdrojů a propadů tepla, mechatronických prvků atd.) spolu v kombinaci s vhodnou kompenzační metodou (řízením) těchto akčních členů.

## Topologická optimalizace konstrukce

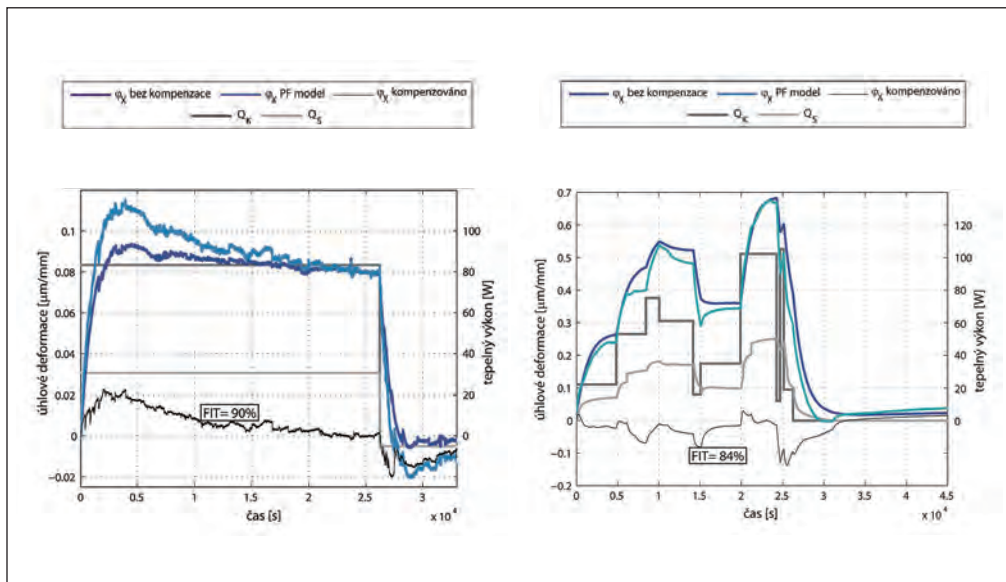
Obecně by mělo být snahou konstruktérů obráběcích strojů navrhovat teplotně symetric-

## Kompenzační postupy

V případě, že se úhlové složky teplotních chyb na stroji i přesto vyskytují (tento problém nastává zejména u velkých obráběcích strojů či strojů s nevhodnou, teplotně nesymetrickou konstrukcí), je možné je poměrně efektivně dodatečně kompenzovat, např. pomocí řízení přídavných zdrojů a propadů tepla. Aplikováním těchto přídavných zdrojů a propadů tepla na strukturu stroje je dosaženo jeho rovnoměrnějšího teplotního pole, čímž jsou právě eliminovány úhlové složky teplotních chyb. Jako ideální přídavný zdroj tepla se jeví použití topných fólií, které mohou velmi



Obr. 2. Testování eliminace úhlových deformací na izolované pinole (vlevo) a zjednodušené konstrukci stroje s nosným rámem ve tvaru C (vpravo).



Obr. 3. Porovnání úhlových deformací v ose x (vlevo) a zjednodušené konstrukce stroje s nosným rámem ve tvaru C (vpravo) bez a s kompenzací na principu přenosových funkcí.

snadno vyvolat úhlové deformace potřebné ke kompenzaci teplotních deformací způsobených za chodu stroje. Naopak v případě řízených propadů tepla je možné použít např. vzduchový výměník, průmyslový chladicí agregát atd. nebo je možné obě metody kombinovat.

Tyto metody lze navíc použít i v kombinaci s vhodnou pokročilou softwarovou teplotní kompenzací tak, aby bylo možné kompenzovat jak lineární, tak úhlové složky teplotních chyb současně. S výhodou lze využít již výše zmiňované kompenzační modely, které používají principu přenosových funkcí. Tyto modely mohou být aplikovány vedle softwarové teplotní kompenzace lineárních složek teplotních chyb i pro řízení akčních členů (zdrojů/propadů tepla) s cílem minimalizovat úhlové složky teplotních chyb. V minulosti byla ve VCSVTT testována zejména možnost eliminace úhlových složek teplotních chyb pomocí řízení napájecího napětí (resp. topného výkonu) topné fólie pomocí kompenzačních modelů s využitím principu přenosových funkcí.

Nejprve proběhlo testování na velmi jednoduchém experimentálním zařízení, představujícím izolovanou pinolu (viz obr. 2 vlevo). Poté se přistoupilo k laboratorním testům řízení topné fólie kompenzačním modelem využívajícím PF za účelem eliminace úhlových deformací na zjednodušené kon-

strukci obráběcího stroje s nosným rámem ve tvaru C (viz obr. 2 vpravo). Tento tvar nosné struktury stroje patří z pohledu teplotně-elastického chování k jednomu z nejkomplicovanějších.

V obou testovaných případech byly na konstrukci nalepeny dvě topné fólie. První má představovat reálný vnitřní zdroj tepla na konstrukci stroje (např. motor, převodovka atd.), který způsobuje úhlové deformace (tzv. kauzální topná fólie, viz obr. 2). Druhá topná fólie (tzv. stabilizační topná fólie, viz obr. 2) je přídatný akční člen. Pomocí řízení jejího topného výkonu je minimalizována vzniklá úhlová deformace.

Řízením topného výkonu tzv. stabilizační topné manžety výrazně klesly za pomoci kompenzačních modelů na principu přenosových funkcí úhlové deformace, a to jak v případě pinoly (viz obr. 3 vlevo, pokles z původních zhruba 0,09 mrad na maximálně 0,02 mrad představuje celkové zlepšení až o 90%), tak zjednodušené konstrukce stroje s nosným rámem ve tvaru C (viz obr. 3 vpravo, zlepšení o 84%). V grafech na obr. 3 je zobrazen časový průběh teplotního výkonu kauzální topné manžety  $Q_K$  (tmavě šedá čára), stabilizační topné manžety  $Q_S$  (světle šedá čára), průběhy úhlových deformací v ose x bez kompenzace (tmavě modrá čára) a po kompenzaci (tenká černá čára) a také odhadnutý prů-

běh úhlové deformace z přenosového modelu za působení stabilizačního zdroje tepla (bledě modrá čára).

#### Placená inzerce

## TECNOTRADE OBRÁBĚCÍ STROJE

SVĚT ŠPIČKOVÝCH OBRÁBĚCÍCH STROJŮ  
Současně nabízíme i prodej 3D tiskáren značky Stratasys.



DOOSAN PUMA MX 2600ST  
Soustružnicko-frézovací centrum



3D tiskárna  
Objet 500 CONNEX 3

Vážení obchodní přátelé,  
srdečně Vás zveme na MSV Nitra,  
který se uskuteční ve dnech  
20.-23. 5. 2014.

Najdete nás v pavilonu M2, stánek č. 33.  
Těšíme se na Vaši návštěvu!

TECNOTRADE OBRÁBĚCÍ STROJE s. r. o.  
Blanenská 1965, 664 34 KUŘIM  
tel.: 541 263 636, fax: 541 263 637

e-mail: info@tecnotrade.cz, www.tecnotrade.cz