

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice PhD Thesis, sv. 376

ISSN 1213-4198

thesis IS

Ing. Zdenka Obšnajdrová

**Kvantifikace tepelných deformací
při výrobě a měření
u dokončovacích operací**

**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

Ing. Zdenka Obšnajdrová

**KVANTIFIKACE TEPELNÝCH DEFORMACÍ PŘI VÝROBĚ
A MĚŘENÍ U DOKONČOVACÍCH OPERACÍ**

**QUANTIFICATION OF HEAT DEFORMATIONS IN PRODUCTION
AT FINISHING MACHINING AND ITS MEASUREMENT**

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

Obor: Metrologie a státní zkušebnictví
Školitel: Doc. Ing. Jiří Pernikář, CSc., ÚST FSI VUT v Brně
Oponenti: Prof. Ing. Vlastimil Boček, CSc., Úvoz 116, Brno
Doc. Ing. Rudolf Dvořák, CSc., ÚST FS VUT v Praze
Doc. Ing. Imrich Lukovics, CSc., Ústav výrobních technologií,
ÚTB ve Zlíně
Datum obhajoby: 25. 4. 2006, ÚST FSI VUT v Brně

Klíčová slova: přesnost měření, chyba měření, nejistota měření, korekce, teplo, tepelná deformace, řezná rychlost, šířka záběru ostří.

Key words: accuracy of measurement, error of measurement, uncertainty of measurement, correction, heat, heat deformation, cutting speed, width for engagement of cutting edge.

Disertační práce je uložena v knihovně Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně, Technická 2, 616 69 Brno.

OBSAH

1 ÚVOD.....	5
2 VÝCHOZÍ ÚVAHY A CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE.....	7
2.1 Problematika stanovování chyb a nejistot měření závislých na teplotě.....	8
3 NÁVRH METODIKY ZKOUŠEK A VOLBA MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ.....	9
4 REALIZACE EXPERIMENTU A NÁVRH METODIKY VÝPOČTŮ.....	11
4.1 Výpočet celkového tepla řezného procesu během obrábění.....	12
4.2 Stanovení tepelných deformací a nejistot při měření průměru součásti po obrábění.....	14
4.2.1 Výpočet (střední) reprezentativní teploty součásti.....	16
4.2.2 Stanovení tepelných deformací při měření průměru součásti.....	17
4.2.3 Vyhodnocování standardních nejistot při měření průměru součásti.....	20
4.2.3.1 Standardní nejistota typu A při měření průměru součásti.....	20
4.2.3.2 Standardní nejistota typu B při měření průměru součásti.....	21
4.2.3.3 Výpočet celkové kombinované a rozšířené nejistoty.....	22
5 ZÁVĚR.....	23
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	24
AUTOROVY PUBLIKACE SOUVISEJÍCÍ S DISERTAČNÍ PRACÍ.....	25
ABSTRAKT.....	27
ABSTRACT.....	27

1 ÚVOD

Vlivu teploty na přesnost délkových měření byla věnována již před druhou světovou válkou a ve čtyřicátých letech velká pozornost. Bylo již tehdy zřejmé, že má-li se popsat měřený předmět z geometrického hlediska přesně, nestačí jej pouze přesně změřit, ale je třeba sledovat průběh průvodních veličin, které výsledek měření ovlivňují. A mezi těmito veličinami má teplota přední místo.

Úroveň strojírenské výroby a metrologie od té doby podstatně vzrostla, jak ukazuje například zavádění nových NC, CNC obráběcích strojů a souřadnicové měřicí techniky apod.

Měřicí technika se v tomto sledovaném období vyvíjí od konvenčních měřidel k digitální měřicí technice až ke komplexním měřicím systémům. Moderní technologie jsou charakterizovány zlepšováním výrobních i měřicích podmínek, což vede ke zvyšování pracovních rychlostí a také k růstu teploty a tyto vývojové tendence vyvolávají nutnost omezovat vliv teploty na přesnost výrobního procesu. Měření prováděná vlastní měřicí technikou nebo běžnými dílenskými měřidly ve vyspělých průmyslových podnicích se dostává do oblastí, kdy je třeba uvažovat s těmito teplotními chybami, kde vliv teploty negativně ovlivňuje nejen kvalitu, ale i hospodárnost výrobních operací.

Výrobní procesy, například obrábění, vyvolávají svými tepelnými a silovými účinky výrazné změny vlastností a stavu součásti. Vzniklé teplo během obrábění způsobuje, že se rozměr obráběné součásti zvětší, i když si dělník uvědomuje tento negativní vliv teploty na přesnost rozměru součásti, ponechá raději větší přídavek na obrábění z obavy, aby nevyrobil součást zmetkovou, která by již nebyla opravitelná. Proto je třeba vzít v úvahu tyto aspekty i z ekonomického a hospodárného hlediska a snažit se o to, aby se polotovar svým tvarem a rozměrem co nejvíce blížil k hotové součásti a přídavky na obrábění tak byly co nejmenší.

Při záběru třísky dochází k vysokému ohřevu povrchu obrobku, kde se postupně část tepla odvádí řezným nástrojem nebo chladicí kapalinou ven do okolí a zbytek tepla přechází dovnitř obrobku. Proto se v měřicí technice vyskytuje často úloha měřit délkové rozměry a povrchovou teplotu na rotujících částech strojů nebo součástí (například zjišťování délkových změn tepelných stavů u obrobků či obráběcích strojů během obrábění). Pro tato měření se používají různá speciální měřicí zařízení, jako jsou bezdotykové (bezkontaktní) metody měření, například moderní metody s laserovým odměřováním pro bezkontaktní měření teploty a délky apod. (podrobné seznámení s různými typy měřidel uvádí mnoho literatur, jako uvedené například v literaturách [1, 2, 3, 4, 5]). I když jsou bezkontaktní metody měření v praxi úspěšně ověřeny a dají se využívat i na pohybujících se součástech během obrábění, nepovažuje se návrh tohoto správně fungujícího systému za samozřejmost, protože ve skutečnosti může být měření zkreslené. Hlavním důvodem je bezdotykové měření v určité vzdálenosti od měřeného objektu a to způsobuje větší náchylnost přístroje na rušivé vlivy okolních předmětů, atmosféry apod. Tyto rušivé zdroje negativně ovlivňují výsledek měření, proto na základě různých kritérií o dosažení

přesnosti měření se řada konstruktérů, vývojových pracovníků a průmyslových inženýrů spoléhá na tradiční (kontaktní) měřicí metody, které jsou v tomto mnohem spolehlivější.

Délková měření jsou ovlivněna řadou činitelů, které způsobují chyby měření a mohou mít různé příčiny (např. nepřesnost měřidla, měřicí metody apod.). Teplotní chyba je způsobena rozdílem teploty měřené součásti a měřidla, popřípadě rozdílem jejich teploty a teploty referenční.

Úchyly a výkyvy teploty, které jsou příčinou teplotní chyby a vznikají ohřevem součástí během obrábění, nerovnoměrností teploty při tepelné stabilizaci obrobků i měřidel, jejich zahříváním nebo ochlazováním okolní teplotou apod.

Aby se vliv teploty pro přesné měření délek minimalizoval, používají se metrologické klimatizované laboratoře, kde teplota okolního prostředí kolísá v úzkém intervalu kolem referenční hodnoty 20 °C a tato okolní teplota s určitou přesností ovlivňuje i teplotu měřeného předmětu v místnosti. Při změně teploty vzduchu nastává změna teploty předmětů s určitým zpožděním (může trvat i několik hodin), která závisí na hmotnosti a rozměrech předmětů, tepelném spádu, materiálu, koeficientu přestupu tepla apod. Přesnost měření tedy závisí na mnoha faktorech a je nutné ji zabezpečit v takových podmínkách při měření, aby se snížily negativní vlivy všech jednotlivých faktorů.

Teplotní chyby se projevují systematicky nebo nahodile. Úchylka teploty měřidla nebo měřené součásti od referenční (základní) teploty se projevuje obvykle systematicky, zatímco kolísání teploty během měření je zdrojem chyb, které mají nahodilý charakter. Teplotní chyba roste s měřenou délkou a hodnoty teplotních chyb určujeme se značnými obtížemi. Jejich velikost závisí na velikosti měřeného rozměru, na délkové roztažnosti materiálu, z něhož jsou měřené součást a měřidlo zhotoveny a na teplotě součásti a měřidla.

Zatímco délkový rozměr dokážeme změřit v běžných dílenských podmínkách s rozlišitelností řádu 10^{-4} mm, v laboratoři 10^{-5} mm a při použití interferenčních metod až 10^{-6} mm, neposkytuje měření povrchové teploty dostatečně přesnou informaci o skutečné teplotě součásti, zejména má-li součást složitý tvar a není-li teplota prostředí konstantní. Ještě větším problémem je stanovení délkové roztažnosti materiálu. Její kvantitativní určování je obtížné a velmi zdlouhavé, vyžaduje také speciální měřicí techniku.

Proto se v praxi spokojujeme s tabulkovými hodnotami součinitele teplotní délkové roztažnosti, které se však mohou značně lišit od skutečných hodnot, například u součinitele teplotní délkové roztažnosti pro mikrometrická a posuvná měřidla se používá interval $\alpha = (11,5 \pm 1,5) \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ dle literatury [6, 7, 8].

S ohledem na to, že získat v praxi skutečné hodnoty průvodních veličin (teploty a délkové roztažnosti) důležitých pro výpočet teplotní chyby s potřebnou přesností je značně obtížné, je nutné těmto chybám předcházet, než je korigovat výpočtem. Proto je nutno znát příčiny vzniku teplotních chyb, aby se jim dalo zabránit nebo je alespoň omezit na minimum.

2 VÝCHOZÍ ÚVAHY A CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Význam uvedené problematiky spočívá v tom, že tepelné deformace tvoří důležitou složku nejistot měření délek, kde se v případě dokončovacích operací jedná o tolerance v tisícinách až desetitisícinách milimetrů. Během obrábění dochází na základě daných řezných podmínek ke zvyšování teploty, která způsobuje délkové změny součásti. Vzniklé teplo při obrábění obrobku ovlivňuje velikost tepelných deformací, které mají nepříznivý vliv na přesnost dokončovacích operací a snahou je tyto negativní účinky co nejvíce minimalizovat, například v optimálním posouzení vhodnosti dokončení součásti na její požadovanou jakost obrobenej plochy, vysokou přesnost rozměrů a dodržení geometrického tvaru.

Vyloučení vlivu tepelných deformací pomocí nějakého opatření je možné jen částečně (například precizní klimatizací výrobních a měřicích prostor). V praktických výrobních provozech klimatizace často chybí a i v případě dostatečné stability okolního prostředí je třeba počítat s tepelnými deformacemi, které vznikají například přímo v technologickém procesu.

Zajistit tepelné podmínky okolního prostředí při výrobě a měření na 20 °C bez kolísání není reálné. Jde o to specifikovat podmínky pro časový gradient teploty tak, aby teplotní změna v daném časovém období byla v požadovaných mezích. Je třeba přesně definovat, jakou teplotu vlastně vyhodnocujeme. Zda se jedná o teplotu okolního prostředí, povrchovou, nebo střední, případně reprezentativní teplotu vzorku, která odpovídá dané deformaci atd. Postupy pro stanovování těchto hodnot neexistují, proto se při měření pro určování nejistot většinou vychází pouze z dovolených chyb měřidla, což je nedostatečné.

Délková měření jsou ovlivněna řadou činitelů, které způsobují chyby měření, které se mohou projevovat různým způsobem (chyby systematické i nahodilé) a mohou mít různé příčiny (nepřesnost měřidla, etalonu, měřicí metody apod.).

Teplotní chyba je způsobena rozdílem výkyvů teploty v různých prostředích měření. Známými metodami můžeme s určitou přesností (0,1 °C) změřit teplotu na povrchu součásti, ale teplotu na různých úrovních průřezu uvnitř lze jen stěží odhadovat. Pro určení tepelné deformace je třeba určit tzv. střední teplotu, která odpovídá hodnotě tepelné deformace.

Celková deformace se skládá z části systematické a náhodné. Nedá se zjistit přesná teplota součásti, etalonu, měřidla atd., ale pouze interval, ve kterém se s danou pravděpodobností nacházejí. Stejně tak je to i s hodnotou součinitele teplotní délkové roztažnosti, koeficientu přestupu tepla a koeficientu měrného tepla (měrné tepelné kapacity) atd.

Při výpočtu tepelných deformací je možné vyloučit pouze určitou část systematických chyb pomocí korekce, kde je třeba znát hodnotu součinitele teplotní délkové roztažnosti α měřeného předmětu i měřidla. K tomuto účelu se zpravidla používají tabulkové hodnoty pro dané materiály. Skutečné hodnoty se v důsledku různého složení a tepelného zpracování materiálu často dosti liší.

Například pro konstrukční materiály z oceli se součinitel teplotní délkové roztažnosti α pohybuje v rozmezí $(11 \div 18) \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ dle [6, 7, 8]. Nejistotu této hodnoty je proto třeba zahrnout do celkové nejistoty měření. Z tohoto důvodu výrobci měřidel, zvláště etalonů, udávají hodnotu součinitele teplotní délkové roztažnosti α s úzkou tolerancí. Ve speciálních případech se hodnota tohoto součinitele stanovuje při kalibraci daného etalonu.

Podstatou disertační práce je vypracování návrhu metodiky vyhodnocení a kompenzace tepelných deformací. Na základě přesných podkladů bude možné stanovit optimální postup pro určení deformací a nejistot měření s přihlédnutím ke všem možným skutečnostem, ověřit vše výpočtem i experimentálně, včetně porovnání zjištěných nejistot k daným výrobním (měřicím) podmínkám. Statistickým zpracováním výsledků měření bude možné s dostatečnou pravděpodobností určit váhu jednotlivých vlivů a přispět tak k sestavení objektivní metodiky pro stanovování nejistot a zpřesňování výrobních (měřicích) operací.

Disertační práce je rozdělena na několik částí, z nichž jedna teoretická oblast se zabývá různými řešeními k dosažení cílů a v dalších částech se jedná o navržení a provedení experimentálního měření s vyhodnocováním nejistot a tepelných deformací včetně správného rozhodnutí, které směřuje k optimalizaci stanoveného cíle na základě porovnání všech vypočtených výsledků.

Návrh metodiky zkoušek a volba měřicího zařízení jsou provedeny v rámci možností Vysokého učení technického, Fakulty strojní v Brně a byla zvolena metoda (kontaktního) měření povrchové teploty a průměru tvarové součásti po skončení vybrané dokončovací operace (jemného soustružení na čisto). Experiment se zaměřuje na stanovování tepla, tepelných deformací, které vycházejí z výpočtů tzv. reprezentativní (střední) teploty součásti a předpokládá se, že aplikace těchto výpočtů se dá uplatnit k různým metodám měření včetně bezkontaktního měření na rotující součásti během obrábění apod.

2.1 Problematika stanovování chyb a nejistot měření závislých na teplotě

Teplotní chyby náhodného charakteru není možné odstranit korekcí jako u chyb systematických. Je možné jen odhadovat jejich pravděpodobnostní charakteristiky.

Teplotní chyby systematického charakteru se na rozdíl od náhodných teplotních chyb dají charakterizovat na základě opakovaných měření a můžou mít složku zjistitelnou a nezjistitelnou. Zjistitelná složka může být vyloučena korekcí výsledku měření a nezjistitelná složka, tedy nevyloučená teplotní systematická chyba tvoří spolu s náhodnými teplotními chybami tzv. *nejistotu měření*.

U *nejistot měření typu A* se příčiny těchto nejistot považují za neznámé (neznámý zdroj, vliv, váha apod.), proto se v praxi tato nejistota typu A vyhodnocuje statisticky z přímo naměřených hodnot za stejných opakovatelných podmínek.

Na rozdíl od nejistot typu A se *nejistoty typu B* vyznačují tím, že mohou mít teplotní systematický i náhodný charakter, přičemž jsou známé identifikovatelné a kvantifikovatelné zdroje nejistot, které vycházejí ze všech možných dostupných informací o měřené veličině a jejich změnách. Nejistoty typu B nejsou závislé na počtu měření (na rozdíl od nejistot typu A, kde jejich hodnoty klesají s rostoucím počtem měření).

3 NÁVRH METODIKY ZKOUŠEK A VOLBA MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ

Cílem disertační práce je vyhodnocení a kompenzace tepelných deformací při výrobě a měření u dokončovacích operací, kde na základě znalostí a literárních podkladů (v rámci možností FSI–VUT v Brně) je navrženo experimentální měření, které odpovídá optimálnímu postupu k určení tepelných deformací.

Disertační práce se zaměřuje na stanovování tzv. (střední) reprezentativní teploty pro výpočet tepelných deformací systematického a náhodného charakteru, kde je definován vztah této teploty k referenční hodnotě 20 °C za uvažovaném předpokladu známých parametrů, jako jsou: délkové rozměry (nebo délkové změny) součásti (měřidla), včetně jejich součinitele teplotní délkové roztažnosti podle daného materiálu. Po stanovení těchto tepelných deformací při uvažované teplotní korekci bude následovat výpočet nejistot s příslušnými zdroji při měření průměru součásti po obrábění.

Principem k uskutečnění experimentu je nutné přesně zjistit přímou metodou měření skutečnou povrchovou teplotu kontrolované součásti a teplotu okolí s odpovídajícími délkovými rozměry součásti v daném časovém okamžiku. Naměřená data povrchové teploty součásti slouží pouze k porovnání s okolní teplotou a s vypočtenou reprezentativní teplotou součásti, přičemž je důležité sledovat, kdy se v určitém čase tato povrchová a reprezentativní teplota součásti nejvíce asymptoticky blíží teplotě okolí (tzn. kdy je součást nejvíce teplotně vyrovnaná s okolním prostředím)?

Z výše uvedeného zároveň vychází sestavení vhodné metodiky provedení experimentu, která řeší problematiku disertační práce (viz. úvod a cíl v kapitole 1, 2) a předpokládá se dodržení těchto následujících činností:

- podle volby metody obrábění a výběru místa realizace experimentu zajistit vhodnou tvarovou součást (dva kusy);
- výběr jednoho obráběcího stroje se dvěma typy rezných nástrojů;
- výběr měřicího zařízení pro měření teploty okolí, povrchové teploty a rozměrů součásti;
- před každým obráběním počkat (asi dvě hodiny), aby se teplota součásti vyrovnala co nejvíce s teplotou okolí a následně se provede měření daných rozměrů součásti;
- při každém odběru třísky součásti dodržet stanovené rezné podmínky;

- posuv f [mm/ot] a šířka záběru ostří a_p [mm],
- řezná rychlost v_c [m/min] a otáčky n [min^{-1}],
- experiment se provede s použitím dvou různých nástrojů;
- po každém skončení obrábění zahájit měření (teploty okolí, povrchové teploty součásti a jejich daných rozměrů) v co nejkratší době (asi v první minutě po obrábění) a pokračovat v měření až do vychladnutí obrobku;
- na závěr v daném dni (po úplném skončení měření) vždy látkou očistit součást a nakonzervovat její povrch vazelínou.

Z navržené metodiky uvedených činností a uskutečněného měření dále vychází sestavení optimální metodiky výpočtů „Kvantifikace tepelných deformací při výrobě a měření u dokončovacích operací“, kde výsledkem bude *výpočet celkového tepla řezného procesu během obrábění*. Pak u ohřátého obrobku asi v první minutě po obrábění se provede měření teploty okolí, povrchové teploty daného obrobku a jeho velikostí průměrů, kde bude následovat:

- 1) *výpočet střední (reprezentativní) teploty součásti;*
- 2) *stanovení tepelných deformací (teplotních chyb) při měření průměru součásti;*
- 3) *určení napětí a tepla součásti při její uvažované reprezentativní teplotě;*
- 4) *vyhodnocování nejistot při měření průměru součásti včetně uvážení všech možných zdrojů;*
- 5) *grafické ověření a závěrečné zhodnocení celé problematiky navrženého experimentu.*

Dokončovacích operací pro dosažení vyšší kvality výroby součásti existuje celá řada a tak z hlediska obrábění byla zvolena jedna z nejčastěji používaných nejjednodušších metod a to je **jemné podélné soustružení na čisto**.

Hlavním záměrem experimentu je zjišťování vzniklých tepelných deformací součásti s určitou přesností a to v první minutě po skončení obrábění až do doby vychladnutí obrobku s okolní teplotou.

Jako prostředek pro obrábění a měření byla zvolena **tvarová hřídel** (dva kusy). Tyto hřídele byly vyrobeny na požadované finální rozměry na poloautomatickém soustruhu SPN 12 CNC s řídicím systémem Sinumerik 810D v dílnách VUT–FSI v Brně.

Bylo navrženo, že experiment bude realizován na **univerzálním (regulačním) hrotovém soustruhu SV 18 RD** v dílenském pracovišti ústavu strojírenské technologie VUT–FSI Brno. Tento soustruh se hodí především na obrábění hřídelů, ale i kotoučů.

V průběhu obráběcího procesu byly zvoleny dva různé typy řezných nástrojů s vyměnitelnými břitovými destičkami ze slinutých karbidů, nebylo potřeba žádného chlazení. Jeden z nich byl použit pro obrábění jedné součásti a druhý nástroj pro obrábění druhé součásti. Břítové destičky jsou u obou nástrojů z materiálů

tzv. nepovlakovaných slinutých karbidů typu (M–WC, TiC, TaC, Co) dle předpisu ČSN 22 0801 (označené žlutou barvou).

Konečné nastavení úhlů řezu bylo u obou nástrojů stejné 93°, které byly nastaveny pomocí upínacího mechanismu na soustruhu.

Použití měřicích zařízení a měřidel pro experimentální měření před a po skončení obrábění:

Pro měření teploty vzduchu dílenského pracoviště a povrchové teploty součásti byl použit **digitální teploměr TZ5K s termočlánekem typu K (Ni Cr–Ni)** značky COMET Systém, s.r.o., kde rozlišitelnost přístroje se sondou je 0,1 °C.

Pro měření velikosti délky součásti bylo zvoleno **posuvné měřidlo** značky SOMET INOX, s rozlišitelností 0,05 mm a rozsahem měření od (0–150) mm.

K měření velikosti jednotlivých průměrů hřídele byl zvolen **digitální třmenový mikrometr typu MDC 25–50 M** značky MITUTOYO, s rozlišitelností 0,001 mm a rozsahem měření 25–50 mm. Úchylka rovinnosti měřicích dotyků mikrometru činí 0,3 μm a úchylka jejich rovnoběžnosti je 1 μm.

4 REALIZACE EXPERIMENTU A NÁVRH METODIKY VÝPOČTŮ

Experimentální měření vychází z kapitoly 3 (návrhu metodiky zkoušek a volby měřicího zařízení) a realizovalo se v následujících bodech:

- 6) Před zahájením obrábění se provedlo:
 - upnutí součásti (hřídele) mezi hroty soustruhu minimálně na dvě hodiny, aby se teplota součásti co nejvíce vyrovnala s teplotou okolí;
 - v pěti minutách měření: (počáteční) délky daného průměru součásti $l_{X(O)}$ a daných (počátečních) průměrů součásti v i-tém bodě $dx_{O(i)}$ [mm].
- 7) Součást byla na soustruhu unášena čelním unašečem, kde při daných řezných podmínkách a stanoveném typu řezného nástroje se v jednotlivých etapách provádělo obrábění daného (obráběného) průměru součásti dx_O [mm].
- 8) Od jedné minuty po každém skončení obrábění se na soustruhu v určité časové etapě až do vychladnutí obrobku provedlo měření:
 - povrchové teploty daného průměru součásti v i-tém bodě $tx_{P(i)}$ [°C];
 - teploty vzduchu dílenského pracoviště v blízkosti součásti (přibližně 1 cm od obrobeného průměru) t_{DB} [°C];
 - teploty vzduchu dílenského pracoviště dál od součásti (asi 1 m) t_{DD} [°C];
 - daných průměrů součásti v i-tém bodě $dx_{(i)}$ v určitém časovém intervalu až do konce doby měření.

Poznámka: Při měření se vychladnutí obrobku projevilo tak, že : povrchová teplota součásti byla dostatečně vyrovnaná s průměrnou (střední) teplotou vzduchu

dílenského pracoviště. Při dvou hodinové aklimatizaci součásti s okolní teplotou se neprojeví žádná změna průměru součásti a taktéž poslední změřené hodnoty jednotlivých průměrů součásti po obrábění $dx_{(i)}$ zároveň odpovídaly stejným hodnotám (počátečních) průměrů $dx_{O(i)}$ v i-tém bodě měření, které byly změřené asi v pěti minutách před obráběním.

Po obrobení a změření obou součástí byla podle teoretické části navržena *metodika výpočtů tepelných deformací disertační práce*. Následující výpočty (celkového tepla řezného procesu během obrábění – kapitola 4.1 včetně tepelných deformací a nejistot při měření průměru součásti po obrábění – kapitola 4.2) vycházejí z označení hodnot u obou měřených součástí.

4.1 Výpočet celkového tepla řezného procesu během obrábění

Daný (obráběný) průměr součásti:

$$dx_O = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n dx_{O(i)} \quad [\text{mm}] \quad (1)$$

$dx_{O(i)}$ – daný (počáteční) průměr součásti v i-tém bodě měření [mm],
 n – počet měření [1].

Řezná rychlost:

$$v_C = \pi \cdot dx_O \cdot n \cdot 10^{-3} \quad [\text{m/min}] \quad (2)$$

n – otáčky obrobku [min^{-1}].

Řezná síla:

$$F_C = C_{FC} \cdot a_p^{X_{FC}} \cdot f^{Y_{FC}} \quad [\text{N}] \quad (3)$$

Pasivní síla:

$$F_P = C_{FP} \cdot a_p^{X_{FP}} \cdot f^{Y_{FP}} \quad [\text{N}] \quad (4)$$

Posuvová síla:

$$F_F = C_{FF} \cdot a_p^{X_{FF}} \cdot f^{Y_{FF}} \quad [\text{N}] \quad (5)$$

a_p – šířka záběru ostří (hloubka řezu třísky) [mm],
 f – posuv [mm/ot],
konstanty C_{FC}, C_{FP}, C_{FF} [1] a exponenty $X_{FC}, X_{FP}, X_{FF}, Y_{FC}, Y_{FP}, Y_{FF}$ [1] jsou určeny dle tabulkového přiřazení dle literatury [17, 28] pro daný materiál součásti.

Celková řezná síla:

$$F = \sqrt{F_C^2 + F_P^2 + F_F^2} \quad [\text{N}] \quad (6)$$

Dimensionální síla:

$$F_D = \sqrt{F_P^2 + F_F^2} \quad [\text{N}] \quad (7)$$

Pracovní síla:

$$F_E = \sqrt{F^2 - F_D^2} \cong F_C \quad [\text{N}] \quad (8)$$

Čas řezného procesu (doba obrábění součásti):

$$T_P = \frac{l_{X(O)}}{n \cdot f} \quad [\text{min}] \quad (9)$$

$l_{X(O)}$ – (počáteční) délka daného (obrábeného) průměru součásti [mm].

Posuvová rychlost:

$$v_F = f \cdot n \cdot 10^{-3} \quad [\text{m/min}] \quad (10)$$

Rychlost řezného pohybu:

$$v_E = \sqrt{v_C^2 + v_F^2} \cong v_C \quad [\text{m/min}] \quad (11)$$

Práce posuvu:

$$E_F = F_F \cdot v_F \cdot T_P \quad [\text{J}] \quad (12)$$

Práce řezání:

$$E_C = F_C \cdot v_C \cdot T_P \cong F_E \cdot v_E \cdot T_P \quad [\text{J}] \quad (13)$$

Celková práce řezného procesu E_E [J] odpovídá **celkovému teplu řezného procesu** Q_E [J] a vypočítá se:

$$E_E = E_C + E_F \cong Q_E \quad [J] \quad (14)$$

4.2 Stanovení tepelných deformací a nejistot při měření průměru součásti po obrábění

Definice výpočtu tzv. (střední) reprezentativní teploty součásti (či měřidla) \bar{t} [°C] vychází z výpočtových vztahů tepelných deformací, jejíž definovaný tvar je vyjádřený vzhledem k referenční teplotě 20 °C a lze jej obecně stanovit pouze za předpokladu těchto známých parametrů: délkového rozměru L, l_0 [mm] nebo odchylky délky součásti (či měřidla) ΔL [mm] při daném (středním) součiniteli teplotní délkové roztažnosti součásti (či měřidla) $\bar{\alpha}$ [°C⁻¹] podle příslušného materiálu:

$$\Delta L = l_0 \cdot \bar{\alpha} \cdot \Delta t = l_0 \cdot \bar{\alpha} \cdot (\bar{t} - 20^\circ\text{C}) \quad [\text{mm}] \quad (15)$$

$$\Delta L = L - l_0 \quad [\text{mm}] \quad (16)$$

$$\Rightarrow \bar{t} = 20^\circ\text{C} + \frac{1}{l_0} \cdot \frac{\Delta L}{\bar{\alpha}} \quad [^\circ\text{C}] \quad (17)$$

L – (výsledek měření) délka součásti (měřidla) v určitém čase měření [mm],

l_0 – posuzovaná délka (jmenovitá délka nebo měřená délka součásti (či měřidla) při počáteční teplotě) [mm], kde je obvykle tato počáteční teplota považována za referenční teplotu 20 °C,

ΔL – odchylka délky součásti (měřidla) v určitém čase měření od její posuzované délky l_0 [mm],

Δt – odchylka (střední) reprezentativní teploty součásti (měřidla) v určitém čase měření \bar{t} [°C] od teploty referenční 20 °C.

Z hlediska provedení disertační práce při experimentálním měření po obrábění součásti je známý (střední) součinitel teplotní délkové roztažnosti materiálu součásti $\bar{\alpha}$ [°C⁻¹] a taktéž odchylka průměru součásti $\Delta x_{(i)}$ [mm]. Výpočet (střední) reprezentativní teploty daného průměru součásti v i -tém bodě měření po obrábění $\bar{t}_{x(i)}$ [°C] je v tomto případě měření dána:

$$\bar{t}_{x(i)} = 20^\circ\text{C} + \Delta t_{x(i)} \quad [^\circ\text{C}] \quad (18)$$

$$\Delta t_{x_{(i)}} = \frac{1}{dx_{O(i)}} \cdot \frac{\Delta dx_{(i)}}{\bar{\alpha}} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (19)$$

$\Delta t_{x_{(i)}}$ – odchylka (střední) reprezentativní teploty daného průměru součásti v i-tém bodě měření po obrábění $\bar{t}_{x_{(i)}}$ [$^{\circ}\text{C}$] od teploty referenční 20°C ,

$dx_{O(i)}$ – daný (počáteční) průměr součásti v i-tém bodě měření na konci doby po obrábění [mm],

$\Delta dx_{(i)}$ – odchylka daného průměru součásti v i-tém bodě měření po obrábění $dx_{(i)}$ od jeho počáteční hodnoty $dx_{O(i)}$ [mm].

Teplotní odchylka $\Delta t_{x_{(i)}}$ bude zařazena do výpočtu tepelných deformací.

Tzv. (střední) reprezentativní teplota zastupuje celkovou (střední) teplotu součásti, přičemž zahrnuje povrchovou a vnitřní teplotu součásti, avšak není známa její vnitřní teplota, i když se provedlo měření povrchové teploty součásti. Během měření v dílenském pracovišti nedosáhla povrchová teplota součásti, ani okolí, referenční hodnoty 20°C , jak předepisuje norma ČSN EN ISO 1 dle literatury [29].

Z naměřených dat obecně ve skutečnosti vyplývá, že první odchylka průměru součásti ($\Delta dx_{(i)} \cong 0,001 \text{ mm}$) se začala projevovat až při nejmenším rozdílu povrchové teploty součásti $\Delta t_{x_{P(i)min}}$, kde platí:

$$\Delta t_{x_{P(i)min}} = t_{x_{P(i)}} - t_{x_{P(i)O}} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (20)$$

$\Delta t_{x_{P(i)min}}$ – minimální odchylka povrchové teploty daného průměru součásti v i-tém bodě měření po obrábění $t_{x_{P(i)}}$ od její počáteční hodnoty $t_{x_{P(i)O}}$ [$^{\circ}\text{C}$],

$t_{x_{P(i)}}$ – povrchová teplota daného průměru součásti v i-tém bodě měření po obrábění [$^{\circ}\text{C}$],

$t_{x_{P(i)O}}$ – povrchová (počáteční) teplota daného průměru součásti v i-tém bodě měření na konci doby po obrábění [$^{\circ}\text{C}$].

Dá se tedy u obou součástí předpokládat, že by tyto (počáteční) průměry součásti v i-tém bodě měření na konci doby po obrábění $dx_{O(i)}$ [mm] při jejich povrchových (počátečních) teplotách $t_{x_{P(i)O}} \approx (t_{x_{P(i)Omin}} \div t_{x_{P(i)Omax}})^{\circ}\text{C}$ měly odpovídat i stejným hodnotám průměrů součásti při referenční teplotě 20°C , takže $dx_{O(i)} \cong dx_{20(i)}$ [mm], kde počáteční odchylka povrchové teploty $\Delta t_{x_{P(i)O}}$ [$^{\circ}\text{C}$] je vyjádřena:

$$\Delta t_{x_{P(i)O}} = t_{x_{P(i)O}} - 20^{\circ}\text{C} = (1,1 \div 1,4)^{\circ}\text{C} < \Delta t_{x_{P(i)min}} \Rightarrow \Delta dx_{(i)} = 0 \text{ mm} \wedge \Delta t_{x_{(i)}} = 0^{\circ}\text{C} \quad (21)$$

$tx_{P(i)Omin}$, $tx_{P(i)Omax}$ – minimální, maximální povrchová (počáteční) teplota daného průměru součásti v i-tém bodě měření na konci doby po obrábění [°C],

$\Delta tx_{P(i)O}$ – odchylka povrchové (počáteční) teploty daného průměru součásti v i-tém bodě měření na konci doby po obrábění $tx_{P(i)O}$ [°C] od teploty referenční 20 °C,

$dx_{20(i)}$ – daný průměr součásti v i-tém bodě měření při referenční teplotě [mm], kde pro měření na konci doby po obrábění platí vztah, že $dx_{20(i)} \cong dx_{O(i)}$.

Ve shrnutí tedy při průměrech $dx_{O(i)} \cong dx_{20(i)}$ [mm] u obou součástí platí, že v daném počátečním teplotním intervalu se tepelné deformace po obrábění projeví až při první změně průměru součásti $\Delta dx_{(i)}$ [mm]:

$$tx_{P(i)} = tx_{P(i)O} + \Delta tx_{P(i)min} = t28_{P(i)O} + \Delta t28_{P(i)min} \text{ °C} \quad (22)$$

Výpočty tepelných deformací se tedy budou vztahovat k tomuto počátečnímu průměru součásti $dx_{O(i)}$ [mm] a k referenční teplotě 20 °C.

4.2.1 Výpočet (střední) reprezentativní teploty součásti

Odchylka daného průměru součásti v i-tém bodě měření od jeho počáteční hodnoty:

$$\Delta dx_{(i)} = dx_{(i)} - dx_{O(i)} \quad [\text{mm}] \quad (23)$$

$dx_{(i)}$ – daný průměr součásti v i-tém bodě měření [mm],

$dx_{O(i)}$ – daný (počáteční) průměr součásti v i-tém bodě měření [mm].

Odchylka (střední) reprezentativní teploty daného průměru součásti v i-tém bodě měření od teploty referenční $\Delta tx_{(i)}$ [°C] se stanoví ze známého vztahu tepelných deformací, přičemž se výpočet vztahuje k počátečnímu průměru součásti $dx_{O(i)}$ [mm] a k referenční teplotě 20 °C:

$$\Delta tx_{(i)} = \frac{1}{dx_{O(i)}} \cdot \frac{\Delta dx_{(i)}}{\bar{\alpha}} \quad [\text{°C}] \quad (24)$$

$\bar{\alpha}$ – střední součinitel teplotní délkové roztažnosti materiálu součásti [°C⁻¹] a platí:

$$\bar{\alpha} = \frac{\alpha_{\min} + \alpha_{\max}}{2} = \alpha_{\min} + \delta\alpha = \alpha_{\max} - \delta\alpha \quad [^{\circ}\text{C}^{-1}] \quad (25)$$

$\alpha_{\min}, \alpha_{\max}$ – minimální (maximální) hodnota intervalu součinitele teplotní délkové roztažnosti materiálu součásti $\alpha = (\alpha_{\min} \div \alpha_{\max}) [^{\circ}\text{C}^{-1}]$,

$\delta\alpha$ – náhodná úchylka součinitele teplotní délkové roztažnosti materiálu součásti α od její střední hodnoty $\bar{\alpha} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$.

Dle literatury dle tabulkového přiřazení [8, 9, 10, 23, 25] pro materiál 11600.0 je $\alpha = (12,3 \pm 1) \cdot 10^{-6} = (11,3 \div 13,3) \cdot 10^{-6} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ a střední součinitel $\bar{\alpha} = 12,3 \cdot 10^{-6} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$, náhodná chyba $\delta\alpha = \pm 1 \cdot 10^{-6} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$.

(Střední) reprezentativní teplota daného průměru součásti v i-tém bodě měření:

$$\bar{t}_{x(i)} = \Delta t_{x(i)} + 20^{\circ}\text{C} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (26)$$

Například: v první minutě měření po obrábění $\phi 29$ mm se *(střední) reprezentativní teplota součásti číslo 1 ze všech bodů měření v určitém čase po obrábění* $\bar{t} [^{\circ}\text{C}]$ a pohybuje v rozmezí od $43,1^{\circ}\text{C}$ do $43,2^{\circ}\text{C}$:

$$\bar{t} = \frac{\bar{t}_{\min} + \bar{t}_{\max}}{2} \pm \delta t = \frac{43,1 + 43,2}{2} \pm 0,05 = 43,15 \pm 0,05 \text{ } ^{\circ}\text{C} \quad (27)$$

$\bar{t}_{\min}, \bar{t}_{\max}$ – minimální (maximální) hodnota intervalu (střední) reprezentativní teploty součásti v určitém čase měření po obrábění $[^{\circ}\text{C}]$,

δt – náhodná úchylka (střední) reprezentativní teploty součásti ze všech bodů měření v určitém čase po obrábění $[^{\circ}\text{C}]$, kde náhodná chyba reprezentativní teploty součásti číslo 1 (v první minutě měření po obrábění $\phi 29$ mm) je $\delta t = \pm 0,05^{\circ}\text{C}$.

Odchylka (střední) reprezentativní teploty součásti ze všech bodů měření v určitém čase po obrábění od teploty referenční $\Delta t [^{\circ}\text{C}]$ je dána pro tento příklad:

$$\Delta t = \bar{t} - 20^{\circ}\text{C} = 43,15 - 20^{\circ}\text{C} = 23,15 \text{ } ^{\circ}\text{C} \quad (28)$$

4.2.2 Stanovení tepelných deformací při měření průměru součásti

Střední (počáteční) průměr součásti ze všech bodů měření na konci doby po obrábění:

$$\bar{d}_o = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n dx_{o(i)} \quad [\text{mm}] \quad (29)$$

n – počet měření [1],

$dx_{o(i)}$ – daný (počáteční) průměr součásti v i -tém bodě měření na konci doby po obrábění [mm].

Střední průměr součásti ze všech bodů měření v určitém čase po obrábění:

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n dx_{(i)} \quad [\text{mm}] \quad (30)$$

n – počet měření [1],

$dx_{(i)}$ – daný průměr součásti v i -tém bodě měření po obrábění (v určitém časovém intervalu až do konce doby měření) [mm].

Odchylka středního průměru součásti ze všech bodů měření v určitém čase po obrábění od jeho počáteční hodnoty:

$$\Delta d = \bar{d} - \bar{d}_o \quad [\text{mm}] \quad (31)$$

Teplota dílenského prostředí v určitém čase měření po obrábění – t_D [°C] se skládá z naměřených teplot t_{DD} a t_{DB} [°C].

t_{DD} – teplota vzduchu dílenského pracoviště dál od součásti (asi 1 m) v určitém čase měření po obrábění [°C], například v první minutě měření po obrábění $\phi 29$ mm u součásti číslo 1 je $t_{DD} = (21,2; 21,3; 21,3)$ °C,

t_{DB} – teplota vzduchu dílenského pracoviště v blízkosti součásti (přibližně 1 cm od obrobeného průměru) v určitém čase měření po obrábění [°C], například v první minutě měření po obrábění $\phi 29$ mm součásti číslo 1: $t_{DB} = 43,6$ °C.

Teplota dílenského prostředí t_D [°C] se v tomto příkladě (v první minutě měření po obrábění $\phi 29$ mm součásti číslo 1) pohybuje v rozmezí od 21,2 °C do 43,6 °C :

$$t_D = \bar{t}_D \pm \delta t_D = \frac{t_{D\min} + t_{D\max}}{2} \pm \delta t_D = \frac{21,2 + 43,6}{2} \pm 11,2 = 32,4 \pm 11,2 \text{ °C} \quad (32)$$

$$\Delta t_D = \bar{t}_D - 20^\circ\text{C} = 32,4 - 20^\circ\text{C} = 12,4^\circ\text{C} \quad (33)$$

\bar{t}_D – střední teplota dílenského prostředí v určitém čase měření po obrábění [°C],
 $\bar{t}_D = 32,4^\circ\text{C}$,

$t_{D_{\min}}, t_{D_{\max}}$ – minimální, maximální hodnota intervalu teploty dílenského prostředí v určitém čase měření po obrábění [$^{\circ}\text{C}$], přičemž $t_{D_{\min}} = 21,2^{\circ}\text{C}$,
 $t_{D_{\max}} = 43,6^{\circ}\text{C}$,

δt_D – náhodná úchylka teploty dílenského prostředí v určitém čase po obrábění t_D od její střední hodnoty \bar{t}_D [$^{\circ}\text{C}$], $\delta t_D = \pm 11,2^{\circ}\text{C}$,

Δt_D – odchylka střední teploty dílenského prostředí v určitém čase měření po obrábění \bar{t}_D od teploty referenční 20°C , kde $\Delta t_D = 12,4^{\circ}\text{C}$.

Při známém materiálu součásti (tvarové hřídele) není problémem určit součinitele teplotní délkové roztažnosti z tabulkového přiřazení.

V tomto případě měření však není známý materiál měřidla (digitálního třmenového mikrometru) a předpokládá se, že naměřená teplota dílenského prostředí by měla odpovídat i **teplotě měřidla v určitém čase měření po obrábění** t_M , kde platí $t_D \cong t_M$ [$^{\circ}\text{C}$].

Součinitel teplotní délkové roztažnosti použitého měřidla (digitálního třmenového mikrometru) dle manuálu [27] se pohybuje v rozmezí $\alpha_M = (11,5 \pm 1,5) \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, náhodná odchylka $\delta\alpha_M = \pm 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, střední součinitel $\bar{\alpha}_M = 11,5 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$.

Teplné deformace (teplotní chyby) systematického charakteru při měření průměru součásti v určitém čase po obrábění – Δd_t [μm] vznikají u této přímé metody měření mezi součástí a měřidlem vzhledem ke (střednímu (počátečnímu) průměru součásti ze všech bodů měření na konci doby po obrábění \bar{d}_0 [mm]) a to při uvažovaných odchylkách (reprezentativní teploty součásti Δt [$^{\circ}\text{C}$], teploty měřidla $\Delta t_D = \Delta t_M$ [$^{\circ}\text{C}$]) a různých středních součinitelích teplotní délkové roztažnosti (součásti $\bar{\alpha}$ [$^{\circ}\text{C}^{-1}$], měřidla $\bar{\alpha}_M$ [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]), kde platí:

$$\Delta d_t = \bar{d}_0 \cdot (\bar{\alpha} \cdot \Delta t - \bar{\alpha}_M \cdot \Delta t_M) \quad [\mu\text{m}] \quad (34)$$

Korigovaný střední průměr součásti (teplotní korekce středního průměru součásti) ze všech bodů měření v určitém čase po obrábění jako opravený výsledek měření:

$$d_{\text{KOR}} = \bar{d} - \Delta d_t \quad [\text{mm}] \quad (35)$$

Teplné deformace náhodného charakteru nemohou být z výsledku měření odstraněny korekcí jako u systematických teplotních chyb. Lze určit pouze intervalový odhad jejich výskytu a budou zahrnuty do výpočtu nejistot měření (viz. kapitola 4.2.3).

Z hlediska experimentálního měření disertační práce se předpokládá, že celý měřicí přístroj (digitální třmenový mikrometr) je považován za kompaktní. Pak **teplné**

deformace (teplotní chyby) náhodného charakteru při měření průměru součásti v určitém čase po obrábění:

$$\delta d_t = \pm 3 \cdot \bar{d}_0 \cdot \sqrt{\frac{1}{3} \cdot (\delta \alpha^2 \cdot \Delta t^2 + \delta \alpha_M^2 \cdot \Delta t_M^2) + \frac{1}{9} \cdot (\bar{\alpha}^2 \cdot \delta t^2 + \bar{\alpha}_M^2 \cdot \delta t_M^2)} \quad [\mu\text{m}] \quad (36)$$

Celková teplotní chyba při měření průměru součásti v určitém čase po obrábění:

$$\Delta D_t = \Delta d_t \pm \delta d_t \quad [\mu\text{m}] \quad (37)$$

4.2.3 Vyhodnocování standardních nejistot při měření průměru součásti

Výpočty tepelných deformací u přímé metody měření byly uváděny k referenční teplotě 20°C a střednímu (počátečnímu) průměru součásti na konci doby měření po obrábění \bar{d}_0 [mm], který zároveň odpovídá referenční teplotě 20 °C, kde $\bar{d}_0 \cong \bar{d}_{20}$ [mm].

Určitá část z teplotních chyb tzv. systematická teplotní chyba byla odstraněna korekcí a jejich nevyhloučená složka v podobě náhodné chyby (se znaménkem \pm) bude přiřazena k jednotlivým zdrojům do nejistoty typu B (kapitola 4.2.3.2).

Na základě opakovaných (i-tých bodů) měření (v určitém časovém intervalu až do konce doby po obrábění) součásti budou do výpočtů nejistoty typu A (kapitola 4.2.3.1) zahrnuty jednotlivé průměry součásti $dx_{(i)}$ [mm].

4.2.3.1 Standardní nejistota typu A při měření průměru součásti

Jedná se o přímou metodu měření daného průměru součásti v i-tém bodě (v určitém časovém intervalu až do konce doby po obrábění) $dx_{(i)}$ [mm], přičemž za výběrový průměr této vstupní veličiny je považován *střední průměr součásti ze všech bodů měření v určitém čase po obrábění* \bar{d} [mm].

Například pro případ, že počet opakovaných měření $n = 3 < 10$, pak **standardní nejistota typu A při měření průměru součásti po obrábění** o normálním rozdělení pravděpodobnosti:

$$u_{A(d)} = k_s \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (dx_{(i)} - \bar{d})^2}{n \cdot (n - 1)}} \quad [\mu\text{m}] \quad (38)$$

k_s – koeficient [1], jehož hodnota pro $n = 3$ je $k_s = 2,3$.

$$u_{A(d)} = k_s \cdot \sqrt{\frac{(dx_{(1)} - \bar{d})^2 + (dx_{(2)} - \bar{d})^2 + (dx_{(3)} - \bar{d})^2}{n \cdot (n - 1)}} \quad [\mu\text{m}] \quad (39)$$

4.2.3.2 Standardní nejistota typu B při měření průměru součásti

Celkem byly stanoveny čtyři zdroje nejistot pro určení celkové standardní nejistoty typu B při přímém měření průměru u obou součástí číslo 1 a 2:

1. *Úchylka rovinnosti měřicích dotyků (digitálního třmenového mikrometru)* pro uvažovaný proces nastavení nuly dle certifikátu [27] je $0,3 \mu\text{m}$. Předpokládá se normální rozdělení pravděpodobnosti při hodnotě koeficientu rozšíření $k = 2$ a standardní nejistota typu B:

$$u_{B(RO)} = \frac{0,3}{k} = \frac{0,3}{2} \cong 0,2 \quad [\mu\text{m}] \quad (40)$$

2. *Úchylka rovnoběžnosti měřicích dotyků (digitálního třmenového mikrometru)* je $1 \mu\text{m}$ dle certifikátu [27]. Předpokládá se opět normální rozdělení pravděpodobnosti při koeficientu $k = 2$ a pak standardní nejistota typu B je:

$$u_{B(RV)} = \frac{1}{k} = \frac{1}{2} = 0,5 \quad [\mu\text{m}] \quad (41)$$

3. *Rozlišitelnost měřidla (digitálního třmenového mikrometru)* je $1 \mu\text{m}$. Předpokládá se rovnoměrné rozdělení pravděpodobnosti při koeficientu rozšíření $k = \sqrt{3}$, kde standardní nejistota typu B z tohoto zdroje:

$$u_{B(R)} = \frac{1}{k} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cong 0,6 \quad [\mu\text{m}] \quad (42)$$

4. *Největší očekávaná nevyločená teplotní chyba (vypočtená náhodná chyba)* je δd_t [μm], která zahrnuje vliv rozdílných teplotních délkových roztažností součásti a měřidla včetně jejich různých teplotních odchylek od referenční teploty $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Předpokládá se normální rozdělení pravděpodobnosti při koeficientu rozšíření $k = 2$, kde standardní nejistota typu B tohoto zdroje:

$$u_{B(\delta)} = \frac{\delta d_t}{k} \quad [\mu\text{m}] \quad (43)$$

Celková standardní nejistota typu B při měření průměru součásti po obrábění:

$$u_{B(d)} = \sqrt{u_{B(RO)}^2 + u_{B(RV)}^2 + u_{B(R)}^2 + u_{B(\delta)}^2} \quad [\mu\text{m}] \quad (44)$$

4.2.3.3 Výpočet celkové kombinované a rozšířené nejistoty

Předpokládá se, že mezi složkami nejistot typu A a B neexistuje korelace. To znamená, že experiment nebyl prováděn za konstantních podmínek a veškeré funkční závislosti mají kolísavý charakter (korelační koeficient $R = 0$ a citlivostní koeficient $C = 1$) pro všechny složky jednotlivě ($u_{A(d)}$; $u_{B(RO)}$; $u_{B(RV)}$; $u_{B(R)}$; $u_{B(\delta)}$).

Potom se stanoví tzv. **celková standardní kombinovaná nejistota při měření průměru součásti po obrábění:**

$$u_{C(d)} = \sqrt{u_{A(d)}^2 + u_{B(d)}^2} \quad [\mu\text{m}] \quad (45)$$

Vzhledem k malému počtu měření n pro získání hodnoty nejistoty, která by vytvářela interval s větší pravděpodobností pokrytí skutečné hodnoty, se zavádí tzv. **rozšířená standardní nejistota při měření průměru součásti po obrábění:**

$$U_{(d)} = u_{C(d)} \cdot k \quad [\mu\text{m}] \quad (46)$$

k – standardní hodnota koeficientu rozšíření [1], pro normální rozdělení, které odpovídá pravděpodobnosti pokrytí asi 95 % je $k = 2$.

Teplotní korekce měřeného průměru součásti v určitém čase po obrábění:

$$d_{\text{KOR}} = \bar{d} - \Delta d_t = \bar{d}_0 + \delta d_t = \bar{d}_0 + \Delta d - \Delta d_t \quad [\text{mm}] \quad (47)$$

Střední průměr součásti ze všech bodů měření v určitém čase po obrábění při uvažované teplotní korekci systematické chyby je $d' = \bar{d}$ [mm].

Výsledek měřeného průměru součásti v určitém čase po obrábění:

$$D' = d' \pm U_{(d)} \quad [\text{mm}] \quad (48)$$

Uvedená *rozšířená nejistota pro normální rozdělení* odpovídá intervalu pravděpodobnosti přibližně 95 %, pak platí :

$$D' \in \langle d' - U_{(d)}; d' - U_{(d)} \rangle \quad [\text{mm}] \quad (49)$$

5 ZÁVĚR

Přesnost výroby tolerovaných rozměrů při dokončovacích operacích závisí významným způsobem mimo jiné na tepelných deformacích. Teplo vznikající ve výrobním procesu proniká z určité části do obrobku a tím ovlivňuje jeho teplotu a taktéž rozměry. Teplotní pole v řezu obrobku se mění v závislosti na čase a jeho průběh se dá odhadnout jen velmi přibližně. Teplota povrchu, kterou jako jedinou lze spolehlivě měřit, není pro výpočet tepelných deformací dostatečná. Proto byla v práci zavedena tzv. „(střední) reprezentativní“ teplota tělesa, která odpovídá teplotě daného tělesa v ustáleném stavu (teplota je v celém průřezu konstantní) se stejnou hodnotou tepelné deformace.

Kvantifikace přesnosti výroby závisí na přesnosti měření, která je také značnou měrou závislá na tepelných deformacích.

Disertační práce řeší kvantifikaci množství tepla vznikajícího při obrábění a následných tepelných deformací pomocí teoretických výpočtů a následně vyhodnocení množství laboratorních experimentů při procesu obrábění i měření.

Závěry získané při řešení předložené disertační práce je možno shrnout do následujících bodů:

- Množství tepla, které vznikne při obrábění do obrobku, zvýší jeho teplotu a tím se zvětší jeho objem a sledované rozměry. Práce řeší způsob výpočtu tohoto tepla na základě technologických parametrů výrobního procesu a rozměrů součásti.
- V práci je uveden teoretický výpočet tepelných deformací ze systematických i náhodných vlivů. Systematická část deformace se přidává s opačným znaménkem k výsledku měření jako korekce, náhodná složka rozšiřuje nejistotu měření.
- Teplota součásti na povrchu i uvnitř se po obrobení plynule mění. Při experimentálním obrábění vzorového obrobku byla měřena teplota povrchu v určitých časových intervalech a vyhodnocována „reprezentativní“ hodnota teploty odpovídající změřené deformaci. Výsledky byly dokumentovány grafickým vyjádřením (viz. literatura [12]).

Otázka tepelných deformací při výrobě a měření je velmi složitá zejména proto, že jejich hodnota závisí na mnoha faktorech, které se často ve sledovaném čase mění a nelze je přímo vyhodnocovat. Snahou předkládané disertační práce bylo tyto příčiny analyzovat a přispět k jejich lepšímu poznání za účelem jejich maximální eliminace. Práce by mohla sloužit jako podklad dalšího řešení formou matematického modelování informačních toků pro rozhodování v těžko předvídatelných situacích.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] NENÁHLO, Č. - KŮR, J. - ZEMÁNEK, J.: Aspekty měření ve strojírenské výrobě. MM Průmyslové spektrum. Trendy měření. Praha: INDUSTRIA Press, s.r.o., červen 2003, 12-13 s; 20-21 s ; 26-27 s., ISSN 1212-2572.
- [2] ČECH, J. - PERNIKÁŘ, J. - JANÍČEK, L.: Strojírenská metrologie. 2. vydání, Brno: VUT, listopad 2002, 180 s., ISBN 80-214-2252-1.
- [3] CHILES, V. - JENKINSON, D.: Laser Metrology, Machine Performance IV. Southamphon, Boston: The University of Northumbria, UK, 1999, 532 s., ISBN 1-85312-469-9.
- [4] BREBBIA, C. A.: Surface Treatment IV. Computer Methods and Experiments Measurements. Southampon: Wessex Institute of Technology, UK, 1998, 328 s., ISBN 1-85312-698-8.
- [5] CHUDÝ, V. - PALENČÁR, R. - KUREKOVÁ, E. - HALAJ, M.: Meranie technických veličín. Bratislava: STU,1999, 489 s., ISBN 80-227-1275-2.
- [6] MOHYLA, M.: Strojírenské materiály. 2. vydání, Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2003, 146 s., ISBN 80-248-0270-8.
- [7] GRÖBER, E. - GRIGULL, U.: Die Grundgesetzeder Wärmeübertragung. Springer-Verlag. Berlin: 1995, 126 s.
- [8] FOJTEK, A. - FOUKAL, J.: Tabulky vybraných fyzikálních a technických veličín. 1. vydání, Ostrava: VŠB, 1994, 115 s., ISBN 80-7078-149-1.
- [9] OBŠNAJDROVÁ, Z.: Kvantifikace nejistot při měření délek v závislosti na tepelných deformacích. Grant fondu vědy FS číslo FP 310040. Brno: VUT-FSI, listopad 2001, 80 s.
- [10] OBŠNAJDROVÁ, Z.: Kompenzace teplotních chyb při měření délek. Grant fondu vědy FS číslo FP 320041. Brno: VUT-FSI, listopad 2002, 67 s.
- [11] OBŠNAJDROVÁ, Z.: Kvantifikace tepelných deformací při výrobě a měření u dokončovacích operací. Pojednání ke státní doktorské zkoušce. Brno: VUT-FSI, leden 2003, 21 s.
- [12] OBŠNAJDROVÁ, Z.: Kvantifikace tepelných deformací při výrobě a měření u dokončovacích operací. Disertační práce. Brno: VUT-FSI, listopad 2005, 225 s.
- [13] KRSEK, A. - OSANNA, P. H. - KUKIC, I. - PROSTREDNÍK, D.: Strojárska metrológia a riadenie kvality. 1.vydání, Bratislava: STU, 1998, 290 s., ISBN 80-227-1025-3.
- [14] PERNIKÁŘ, J. - VAČKÁŘ, J. - HUMÁR, A. - SKOPAL, M. - BUMBÁLEK, L. - PATA, V. - SUCHÁNEK, R.: Kvalitativní a kvantitativní hodnocení jakosti měřicích prostředků. Grant fondu vědy FS číslo FP 359568. Brno: VUT-FS, prosinec 1995, 81 s.
- [15] SOUKUP, K. - VDOLEČEK, F. a kolektiv.: Chyby a nejistoty v měření. 1. vydání, Brno: VUT-FSI, říjen 1999, 54 s., ISBN 80-214-1427-8.

- [16] AB SANDVIK COROMANT-SANDVIK CZ, s. r.o.: Příručka pro obrábění. Kniha pro praktiky. 1. vydání, Praha: Scientia, s.r.o., 1997, 857 s., ISBN 91-97 22 99-4-6.
- [17] KOČMAN, K. - PROKOP, J.: Technologie obrábění. 1. vydání, Brno: CERM, s.r.o., prosinec 2001, 270 s., ISBN 80-214-1996-2.
- [18] MÁDL, J. - KAFKA, J. - VRABEC, M. - DVOŘÁK, R.: Technologie obrábění. 1., 2. a 3. díl, Praha: ČVUT, leden 2000, 246 s.
- [19] AB SANDVIK COROMANT-SANDVIK CZ, s.r.o.: Produktivní obrábění kovů. 1. vydání, Švédsko: CMSE, 1997, 300 s.
- [20] HEJZLAR, R.: Sdílení tepla. 3. vydání, Praha: ČVUT, 1999, 186 s., ISBN 80-01-01982-9.
- [21] LEINVEBER, J. - VÁVRA, P. a kolektiv.: Strojnické tabulky. 3. vydání, Praha: SCIENTIA, s.r.o., 1999, 985 s., ISBN 80-7183-164-6.
- [22] SAAD MICHEL, A.: Thermomechanics. Principles and Practice. California: Santa Clara University and Simon & Viacom Company, 1997, 298 s., ISBN 0-13-632258-1.
- [23] MANUÁL. Univerzálny hrotový sústruh SV-18-RA. Trenčín: TOS, a.s., 1989, 35 s.
- [24] BERNÁT, J.: Začiatky, rozvoj výroby kovoobrábacích sústruhov Slovenska. V hospodárstve a priemysle. Strojárstvo. Stroje a technológie. Bratislava: MEDIA/ST, s.r.o., Júl-August 1999, 72-74 s.
- [25] MANUÁL. Soustružení. (Sústruženie). Šumperk: PRAMET TOOLS, s.r.o., 2002, 204 s.
- [26] NÁVOD K POUŽITÍ DIGITÁLNÍHO TEPLoměRU: město Rožnov pod Radhoštěm: COMET Systém, s.r.o., leden 1997, 7 s.
- [27] MITUTOYO: Präzisions-Messtechnik. Mechanik. Optik. Elektronik. D-6001. Deutschland: Deutscher Kalibrierdienst (DKD) Neuss., 02/1995, 240 s.
- [28] DEGARMO, E. - BLACK, T. - KOSHER, R.: Materials and Processes in Manufacturing. London: Horton Marcia, 1997, 1259 s.
- [29] ČSN EN ISO 1: Geometrické požadavky na výrobky (GPS)-Referenční teplota pro geometrické požadavky na výrobky a jejich ověřování. Praha: Český normalizační institut, březen 2003, 7 s., ICS 17.040.01.

AUTOROVY PUBLIKACE SOUVISEJÍCÍ S DISERTAČNÍ PRACÍ

- [30] OBŠNAJDROVÁ, Z.: Kvantifikace nejistot při měření délek v závislosti na tepelných deformacích. Sborník FSI. Junior konference. 1. vydání, Brno: VUT-FSI, 2001, 155-158 s., ISBN 80-214-2071-5.
- [31] OBŠNAJDROVÁ, Z.: Kompenzace teplotních chyb při měření délek. Sborník FSI. Junior konference. 2. vydání, Brno: VUT-FSI, 2002, 161-165 s., ISBN 80-214-2290-4.

- [32] OBŠNAJDROVÁ, Z.: Kvantifikace tepelných deformací při výrobě a měření u dokončovacích operací. V hospodárstve a priemysle. Strojárstvo. Stroje a technológie. Bratislava: MEDIA/ST, s.r.o., Jún 2002, 49-52 s.

ABSTRAKT

V disertační práci je řešena problematika tepelných deformací ve výrobě u dokončovacích operací a při měření. Teoretická část práce rozebírá vlivy na vznik tepla při obrábění a kvantifikaci teploty obrobku. Experimenty prováděné při jemném dokončovacím soustružení etalonového obrobku vyhodnocují teplotu na povrchu dotykovým teploměrem a hodnotu sledovaného rozměru v daném okamžiku. Výpočtem se stanovuje tzv. „střední teplota“, která odpovídá tepelné deformaci. Práce řeší metodiku stanovování tepelných deformací a jejich následnou eliminaci korekčními činiteli. Jako doplněk je uveden aktuální problém z praxe, který nastává při měření duralových pístů ocelovým měřidlem v provozních podmínkách. Analýza vzniku tepla u dokončovacích operací je zaměřena na maximální eliminaci tepelných deformací za účelem zvyšování přesnosti výrobního procesu a přesnosti měření.

ABSTRACT

The dissertation resolves the problem of heat deformations in production at finishing machining and its measurement. The theoretical part parses influences to the heat generation at machining and the temperature quantification of a workpiece. The experiments were pursued on a etaloned workpiece at fine finishing turning. Experiments evaluate data about the surface temperature, measured by a tactile thermometer and the monitored dimension in a given time. The calculation determines the middle temperature, where the mean temperature is agree with a heat deformation. The work resolves a method of the heat deformation determination and its following ellimination by the correction coefficients. The actual problem is from the practice and it is mentioned as an addendum-duralumin pistons measurement by a steel check gauge in operational conditions. The aim of the heat generation analysis at finishing machining is the maximal elimination of the heat deformations to escalate accuracy of manufacturing process and accuracy of measurement.