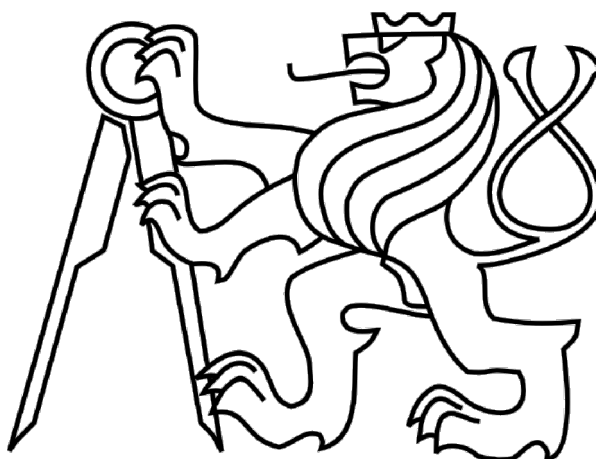


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



# Bakalářská práce

**Zpřesnění měřicí soustavy a posouzení různých metod měření teplotních  
deformací obráběcích strojů**

*František Houštěk*

2023

BP 0293

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Houštek** Jméno: **František** Osobní číslo: **501398**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav výrobních strojů a zařízení**  
Studijní program: **Teoretický základ strojího inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Zpřesnění měřicí soustavy a posouzení různých metod měření teplotních deformací obráběcích strojů**

Název bakalářské práce anglicky:

**Refinement of the measuring system and assessment of various methods of measuring thermal deformations of machine tools**

Pokyny pro vypracování:

Popis tématu: Návrh přípravku pro měření teplotních chyb obráběcích strojů, který by vykazoval sníženou citlivost na změnu teploty (konstrukce stroje, teploty okolí). Současně by měl být kladen důraz na snadné ustavení senzoru v přípravku a jeho rychlou rekonfiguraci. Přínos přípravku bude vyhodnocen na základě realizovaných experimentů při proměnné tepelné zátěži. Současně budou testovány různé měřicí metody s navrženým / standardním přípravkem. Bude posouzen přínos navrženého přípravku na přesnost a opakovatelnost měření (porovnání se standardní konfigurací experimentů se senzory posunutí upnutých v běžně používaném přípravku); Osnova práce: Rešerše v oblasti měření teplotních deformací výrobních strojů včetně normy ČSN ISO 230-3; Návrh konstrukčních variant přípravku pro měření teplotních deformací výrobních strojů za účelem zvýšení přesnosti měření; Realizace experimentů se senzory posunutí upnutých v běžně používaném přípravku a navrženém přípravku při proměnné tepelné zátěži a různých metod měření; Zhodnocení navrženého řešení (snížení citlivosti měřicí soustavy na změnu teploty); Rozsah textové části: 40–60 stran.; Rozsah grafické části: Potřebné grafy s výsledky experimentů a jejich porovnání, výkresy navržených přípravků.

Seznam doporučené literatury:

Mayr, J. et al. Thermal issues in machine tools. CIRP Ann.Manuf.Technol. 2012, 61 (2), 771–791. ISSN 0007-8506.; ISO 230-3 - Test Code for Machine Tools - Part 3: Determination of Thermal Effects. 2020, Geneva.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**doc. Ing. Otakar Horejš, Ph.D. ústav výrobních strojů a zařízení FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

**Ing. Martin Mareš, Ph.D. ústav výrobních strojů a zařízení FS**

Datum zadání bakalářské práce: **14.04.2023** Termín odevzdání bakalářské práce: **24.07.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: **24.09.2023**

\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Otakar Horejš, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Petr Kolář, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl v příloženém seznamu veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 24. 7. 2023

.....  
podpis

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Otakarovi Horejšovi, Ph.D. za konzultace, rady a pomoc při její tvorbě. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Jaroslavu Červenkovvi za konzultace během návrhu kompozitního přípravku, Ing. Viktoru Kulíškovi, Ph.D. za obstarání potřebného kompozitního materiálu, Mgr. Janu Lomičkovi za vytvoření NC programu pro jeden z experimentů a Ing. Petru Maškovi, Ph.D. za výrobu kompozitního přípravku.

## **Anotace**

Autor:	František Houštěk
Název BP:	Zpřesnění měřící soustavy a posouzení různých metod měření teplotních deformací obráběcích strojů
Rozsah práce:	74 str., 56 obr., 1 tab.
Školní rok vyhotovení:	2023
Škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	Ú12135 – Ústav výrobních strojů a zařízení
Vedoucí bakalářské práce:	doc. Ing. Otakar Horejš, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Martin Mareš, Ph.D.
Zadavatel:	ČVUT – FS
Využití:	Měření teplotních deformací obráběcích strojů s minimalizací deformace přípravku pro upnutí snímačů.
Klíčová slova:	teplotní deformace, obráběcí stroje, měření, návrh, kompozitní materiály, přípravek pro upnutí snímačů, zvýšení přesnosti
Anotace:	Bakalářská práce se zabývá návrhem přípravku pro měření teplotních deformací z kompozitního materiálu s minimální teplotní roztažností. Poté jsou provedeny experimenty pro porovnání navrženého a běžně používaného přípravku a naměřená data jsou vyhodnocena.

## Annotation

Author:	František Houštěk
Title of bachelor dissertation:	Refinement of the measuring system and assessment of various methods of measuring thermal deformations of machine tools
Extent:	74 p., 56 fig., 1 tab.
Academic year:	2023
University:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Department of production machines and equipment
Supervisor:	doc. Ing. Otakar Horejš, Ph.D.
Consultant:	Ing. Martin Mareš, Ph.D.
Submitter of Theme:	CTU – FME
Application:	Measurement of thermal deformations of machine tools with minimization of deformation of the tool for clamping sensors.
Keywords:	thermal deformation, machine tools, measurement, design, composite materials, tool for clamping sensors, increasing accuracy
Annotation:	The bachelor's thesis deals with the design of tool for measuring thermal deformations from a composite material with minimal thermal expansion. After that, experiments are carried out to compare the designed and commonly used tool and the measured data are evaluated.

## Obsah

Přehled použitých veličin a jednotek .....	10
1. Úvod.....	12
2. Cíl práce.....	13
3. Rešerše v oblasti měření teplotních deformací výrobních strojů.....	14
3.1. Sdílení tepla .....	14
3.1.1. Kondukce .....	14
3.1.2. Konvekce.....	15
3.1.3. Radiace .....	16
3.2. Teplotní roztažnost .....	17
3.2.1. Teplotní roztažnost materiálů ve strojírenství .....	18
3.3. Kompozity .....	18
3.4. Sdílení tepla v obráběcích strojích .....	19
3.4.1. Zdroje a propady tepla.....	20
3.4.2. Přenos tepla v obráběcích strojích .....	22
3.5. Zkoušky tepelných vlivů na obráběcí stroje dle ISO 230-3.....	23
3.5.1. Podmínky pro zkoušky .....	23
3.5.2. Zkouška chyby vzniklé kolísáním teploty okolního prostředí (ETVE) 24	
3.5.3. Zkouška teplotních deformací způsobených rotací vřetena.....	25
3.5.4. Zkouška teplotních deformací způsobených lineárním pohybem součástí.....	26
3.5.5. Zkouška teplotních deformací způsobených rotačním pohybem součástí.....	28
3.6. Měření deformací.....	30

---

3.6.1. Mechanické senzory .....	30
3.6.2. Kontaktní elektronické senzory .....	30
3.6.3. Bezkontaktní elektronické senzory .....	32
3.6.4. Optické senzory .....	34
3.6.5. Přípravky .....	34
4. Návrh přípravku pro měření teplotních deformací .....	37
4.1. Základní konstrukce přípravku .....	38
4.2. Přídavné desky .....	39
4.3. Vyztužení přípravku .....	42
5. Výroba přípravku pro měření teplotních deformací .....	44
6. Realizace experimentů pro porovnání běžně používaného a navrženého přípravku a jejich vyhodnocení .....	46
6.1. Samostatné měření .....	47
6.1.1. Umístění snímačů .....	48
6.1.2. Výsledky měření .....	51
6.2. Měření s přejezdy .....	57
6.2.1. Umístění snímačů .....	57
6.2.2. Výsledky měření .....	59
6.3. Nejistoty měření .....	62
6.3.1. Nejistota při měření teplot .....	63
6.3.2. Nejistota při měření deformací .....	64
7. Závěr .....	65
Seznamy .....	67
Seznam použité literatury .....	67
Seznam použitého softwaru .....	70
Seznam obrázků .....	71





Seznam tabulek.....	73
Seznam příloh .....	73
Výkresová dokumentace.....	73
Elektronické přílohy.....	74



## Přehled použitých veličin a jednotek

Veličina	Jednotka	Popis
$F_c$	[N]	Řezná síla
$F_N$	[N]	Normálová síla
$I$	[A]	Elektrický proud
$k_B$	[-]	Koeficient rozšíření
$l_o$	[m]	Původní délka
$m$	[-]	Koeficient Gaussova rozdělení
$P$	[W]	Výkon
$P_j$	[W]	Jouleovy ztráty
$Q$	[J]	Poměrné odváděné teplo
$Q_n$	[J]	Teplo odcházející do nástroje
$Q_o$	[J]	Teplo odcházející do obrobku
$Q_{pr}$	[J]	Teplo odcházející do prostředí
$Q_{tř}$	[J]	Teplo odcházející do třísky
$\dot{Q}$	[W]	Tepelný tok
$\dot{q}$	[W/m <sup>2</sup> ]	Hustota tepelného toku
$R$	[Ω]	Elektrický odpor
$r$	[m]	Poloměr průřezu valeného tělesa
$T$	[K]	Teplota
$T_1$	[K]	Teplota tělesa 1
$T_2$	[K]	Teplota tělesa 2

---

$T_{ok}$	[K]	Teplota tekutiny v dostatečné vzdálenosti od stěny
$T_s$	[K]	Teplota ohřátého tělesa
$t$	[s]	Čas
$U$	[K], [ $\mu\text{m}$ ]	Rozšířená standardní nejistota měření
$u_B$	[K], [ $\mu\text{m}$ ]	Výsledná standardní nejistota typu B
$u_Z$	[K], [ $\mu\text{m}$ ]	Standardní nejistota měření
$v$	[m/s]	Rychlost
$v_c$	[m/min]	Řezná rychlost
$\alpha$	[1/K]	Součinitel teplotní délkové roztažnosti
$\alpha_T$	[W/m <sup>2</sup> K]	Součinitel přestupu tepla
$\Delta$	[ $\mu\text{m}$ ]	Deformace
$\Delta l$	[m]	Změna délky
$\Delta T$	[K]	Změna teploty
$\Delta Z_{\max}$	[K], [ $\mu\text{m}$ ]	Rozsah odchylek
$\varepsilon$	[-]	Emisivita
$\lambda$	[W/mK]	Součinitel tepelné vodivosti
$\mu$	[-]	Součinitel smykového tření
$\xi$	[m]	Rameno valivého odporu
$\omega$	[1/s]	Úhlová rychlost valeného tělesa



# 1. Úvod

S tím, jak rostou požadavky na přesnost výrobních strojů, také nabývá na významu problematika jejich teplotního chování. Při znalosti teplotních deformací výrobních strojů je možné vliv těchto deformací na přesnost výroby snižovat pomocí různých konstrukčních prvků, chladicích okruhů a softwarových kompenzací. Pro popsání teplotního chování výrobních strojů je třeba umět ho s dostatečnou přesností změřit. Z toho důvodu je v rámci práce navržen přípravek pro upnutí snímačů pro měření teplotních deformací z kompozitního materiálu s nízkou teplotní roztažností. Účelem je minimalizace zkreslení výsledků vlastní deformací přípravku a tím zvýšení přesnosti celého měření.



## 2. Cíl práce

Cílem práce je nejprve provést rešerši v oblasti měření teplotních deformací výrobních strojů včetně pro tuto problematiku důležité normy ISO 230-3 [1] a vybavení používaného při měřeních. Kromě toho bude v rešerši základní seznámení s fyzikální podstatou teplotních deformací a krátký popis kompozitních materiálů.

Prvním bodem praktické části bude návrh přípravku pro měření teplotních deformací z dostupného kompozitu. Protože jsou kompozitní materiály většinou k dispozici v tenkých deskách, bude důležité navrhnout funkční spojení jednotlivých stěn přípravku a zajistit, aby jeho konstrukce měla dostatečnou tuhost.

Po dokončení návrhu bude provedena výroba přípravku, tu obstarává Ústav výrobních strojů a zařízení. Následně budou jednotlivé díly slepeny a přípravek sestaven.

Poté dojde na experimenty, jejichž cílem bude ověřit, jestli se podařilo snížit teplotní roztažnost kompozitního přípravku ve srovnání s běžně používaným přípravkem. Také budou porovnány výsledky naměřené na obou přípravcích za účelem vyhodnocení celkové přínosnosti navrženého řešení.

## 3. Rešerše v oblasti měření teplotních deformací výrobních strojů

### 3.1. Sdílení tepla

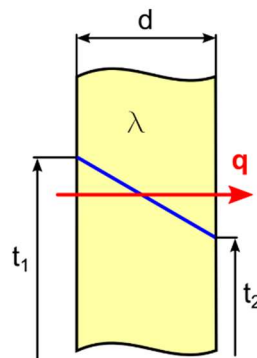
Sdílení tepla je jeden ze způsobů přenosu energie, konkrétně se jedná o přenos tepelné energie. Teplo se šíří z místa s vyšší teplotou do místa s nižší teplotou. Rozlišujeme tři způsoby sdílení tepla: kondukce (vedení), konvekce (proudění) a radiace (záření). [2]

#### 3.1.1. Kondukce

Při kondukcí, neboli vedení tepla, se tepelná energie postupně šíří v hmotě. Její šíření je popsáno Fourierovým zákonem, který říká, že hustota tepelného toku  $\dot{q}$  je úměrná záporně vzatému teplotnímu gradientu  $grad T$ . [30]

$$\dot{q} = -\lambda \cdot grad T \quad (1)$$

Vlastnosti materiálu jsou v tomto vztahu zastoupeny tepelnou vodivostí  $\lambda$ , která je obecně závislá na poloze, směru šíření tepla a teplotě. Většinou však materiály uvažujeme homogenní a izotropní, tepelná vodivost je tak závislá pouze na teplotě. Stejně jako elektrická vodivost je tepelná vodivost vysoká u kovů a nízká u nekovů. Hodnoty tepelné vodivosti u kovů s rostoucí teplotou klesají, u nekovů naopak rostou. Vedení tepla je znázorněno na obrázku 1.



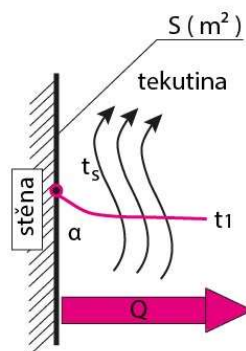
Obrázek 1 – Vedení tepla [4]

Tento způsob sdílení tepla se vyskytuje v pevných látkách a v nehybných tekutinách. V tekutinách, které jsou v pohybu, je většinou zanedbatelný v porovnání s dalšími způsoby sdílení tepla. [2]

### 3.1.2. Konvekce

V tomto případě se teplo šíří pohybem tekutiny, při kterém teplejší částice tekutiny proudí do oblastí s nižší teplotou. Teplo částic je získáváno přestupem ze zdrojů tepla. Existují dva typy konvekce, jedná se o volnou (přirozenou) konvekci a vynucenou konvekci. Sdílení tepla konvekcí je ukázáno na obrázku 2. [2]

V případě volné konvekce vzniká proudění samotným sdílením tepla. Při zvyšování teploty tekutiny se snižuje její hustota, kvůli rozdílné hustotě vznikají tlakové síly, jejichž působením dochází k pohybu tekutiny. Příkladem volné konvekce je přestup tepla z ohřátého tělesa tvořeného pevnou látkou do okolního vzduchu. Vynucená konvekce je vyvolána uměle, například čerpáním, prouděním tekutiny ve výměníku, pohybem tělesa v tekutině, nebo ofukováním. [30]



Obrázek 2 – Sdílení tepla konvekcí [5]

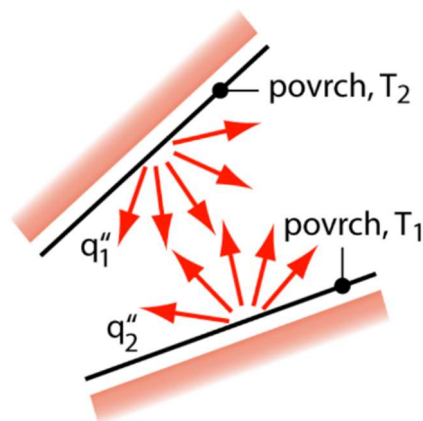
Jak již bylo zmíněno, typickým příkladem konvekce je přestup tepla mezi pevnou látkou a tekutinou. V tomto případě hustotu tepelného toku  $\dot{q}$  popisuje Newtonův ochlazovací zákon.

$$\dot{q} = \alpha_T \cdot (T_s - T_{ok}) \quad (2)$$

$T_s$  je teplota ohřátého tělesa a  $T_{ok}$  je teplota tekutiny v dostatečné vzdálenosti od stěny.  $\alpha_T$  je součinitel přestupu tepla, který je funkcí proměnných ovlivňujících proudění v okolí stěny. Správné určení tohoto součinitele bývá obtížné, protože parametrů, které ho ovlivňují, je velké množství. [6]

### 3.1.3. Radiace

Hmotný objekt o teplotě  $T$  přeměňuje část své vnitřní energie na energii elektromagnetických vln. Ty se kromě běžného prostředí mohou šířit i v prostředí, které není vyplněno hmotou. Sdílení tepla radiací může tedy na rozdíl od konvekce a kondukce probíhat i ve vakuu. Sdílení tepla zářením je znázorněno na obrázku 3. [2]



Obrázek 3 – Sdílení tepla zářením [7]

Při dopadu na jiný hmotný objekt se část energie odrazí a část je pohlcena a přeměněna zpět na vnitřní energii tohoto hmotného objektu. Hustota tepelného toku  $\dot{q}$  mezi dvěma objekty je v případě radiace popsána následujícím vztahem.

$$\dot{q} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_2^4 - T_1^4) \quad (3)$$

Emisivita  $\varepsilon$  je definována jako poměr energie vyzářené reálným povrchem a energie vyzářené povrchem černého tělesa za stejných podmínek. Její hodnota nám tedy říká, jak velká část záření je odražena a jak velká část je pohlcena.  $\sigma$  je Stefanova–Boltzmannova konstanta, s hodnotou:



$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ . Dále se ve vztahu nachází teplota zářícího tělesa  $T_2$  a teplota ozařovaného tělesa  $T_1$ . Pro zjištění celkového tepelného toku mezi dvěma tělesy je třeba brát v potaz, že sdílení tepla zářením probíhá také opačně, tedy z tělesa s teplotou  $T_1$  na těleso s teplotou  $T_2$ . [30]

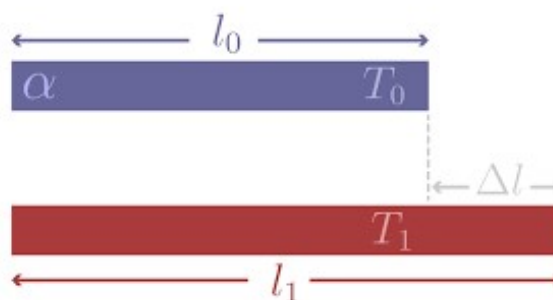
Energii vyzařují všechna tělesa, z rovnice (3) však vyplývá, že intenzita vyzařování silně roste s rostoucí teplotou. Tepelný tok vyzařený tělesy o pokojové teplotě bývá zanedbatelný.

### 3.2. Teplotní roztažnost

Teplotní roztažnost je jev, při kterém těleso mění svůj tvar, objem a hustotu, v reakci na dodání, nebo naopak odebrání tepla. Po ohřátí se molekuly více pohybují a kvůli tomu se zvětšují vzdálenosti mezi nimi, proto u většiny látek dochází s nárůstem teploty k jejich rozpínání. Závislost změny délky  $\Delta l$  na změně teploty  $\Delta T$  je obvykle uvažována lineární dle následujícího vztahu. [10]

$$\Delta l = l_o \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (4)$$

$l_o$  je původní délka a  $\alpha$  je součinitel teplotní roztažnosti, který vyjadřuje, jak moc se mění rozměry daného materiálu v reakci na změnu teploty. U některých materiálů dochází po ohřevu k výraznějším změnám rozměrů, u jiných jsou změny zanedbatelné. Lineární teplotní roztažnost je znázorněna na obrázku 4. [10]



Obrázek 4 – Znázornění lineární teplotní roztažnosti [8]

### 3.2.1. Teplotní roztažnost materiálů ve strojírenství

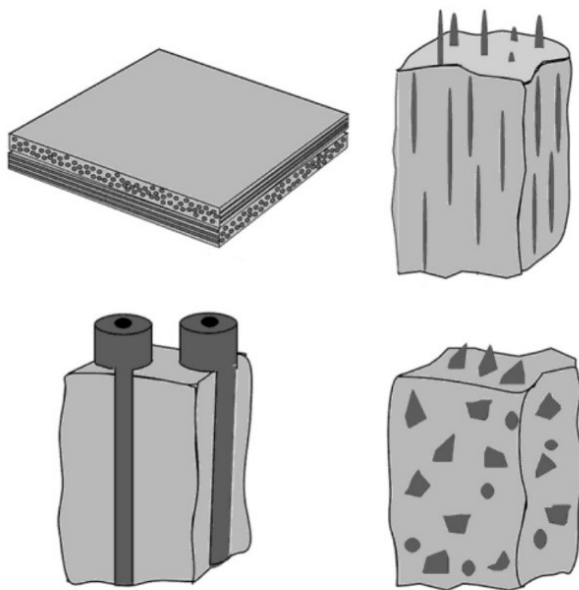
Teplotní roztažnost běžně používaných kovových materiálů může v některých strojírenských aplikacích způsobovat problémy. Materiálem známým pro svoji nízkou teplotní roztažnost je keramika, ta však v některých případech nevyhovuje kvůli svým mechanickým vlastnostem. Alternativním řešením mohou být některé kompozitní materiály, které mají velmi malou teplotní roztažnost. Kompozitům se dále věnuje kapitola 3.3. Součinitele teplotní roztažnosti běžných strojírenských materiálů a materiálů s nízkou teplotní roztažností jsou uvedeny v Tabulce 1. [7], [9], [29]

*Tabulka 1 – Součinitele teplotní roztažnosti [7], [9], [29]*

Materiál	Součinitel teplotní roztažnosti $\alpha$ [1/K]
Ocel	11-18
Litina	10-11
Hliník	22-24
Keramika	3-6
Kompozity na bázi uhlíkových vláken	~0

### 3.3. Kompozity

Kompozitní materiály se skládají ze dvou nebo více fyzikálně a chemicky odlišných složek, nazývaných též fáze. Pevnější, tvrdší a tužší složka, která není spojitá, se nazývá výztuž. Poddajnější složka, která je spojitá, a funguje jako pojivo výztuže, se nazývá matrice. Příklady struktury kompozitních materiálů jsou na obrázku 5. Základním cílem kompozitních materiálů je co nejvíce využít výhodných vlastností jednotlivých fází a co nejvíce potlačit jejich nevýhodné vlastnosti. Častým cílem ve strojírenství je dosažení vysokých hodnot mechanických vlastností u velmi lehkých materiálů. Kompozity lze dělit podle rozměrů výztuže na nanokompozity, mikrokompozity a makrokompozity. Také se dají dělit podle typu výztuže a typu matrice, které byly použity. [32]

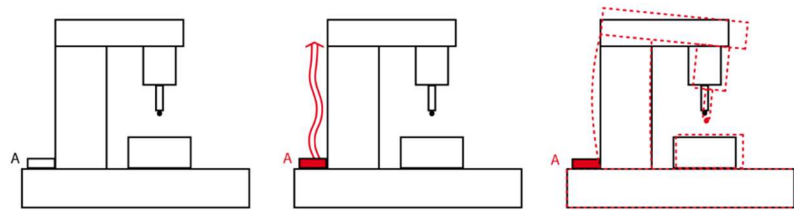


Obrázek 5 – Příklady struktury kompozitních materiálů [29]

Existuje velké množství různých kompozitních materiálů, pro účely této bakalářské práce se však nejvíce hodí kompozity na bázi uhlíkových vláken. Důvodem je, že tyto kompozity se změnou teploty téměř nemění svoje rozměry. Součinitel teplotní roztažnosti kompozitních materiálů na bázi uhlíkových vláken v porovnání s běžnými technickými materiály je uveden v Tabulce 1. Mezi další výhody těchto kompozitů patří dobré mechanické vlastnosti a odolnost proti vysokým teplotám, proto tyto kompozitní materiály často nacházejí uplatnění v letectví. [33]

### 3.4. Sdílení tepla v obráběcích strojích

Sdílení tepla v obráběcích strojích je jedním z hlavních faktorů ovlivňujících jejich přesnost. Teplo šířící se obráběcím strojem způsobuje kvůli teplotní roztažnosti materiálů deformaci jeho struktury, ta je znázorněna na obrázku 6. Uvádí se, že 40–70 % výrobní odchylky je způsobeno právě chybami způsobenými teplem. V krajních případech může teplo a teplotní deformace také ohrozit funkčnost stroje a poškodit některé jeho komponenty. [31]



Obrázek 6 – Znárodnění teplotních deformací obráběcích strojů [11]

Obráběcí stroje jsou velmi složitá zařízení, proto je problematika sdílení tepla a teplotních deformací v jejich struktuře také velice komplikovaná. Šíření tepla v jejich struktuře závisí na velkém množství faktorů, mezi ty nejvýznamnější patří: konstrukce stroje, umístění zdrojů a propadů tepla a vlastnosti použitých materiálů. [3]

### 3.4.1. Zdroje a propady tepla

Zdroje tepla jsou místa, kde vzniká teplo, které ovlivňuje chování obráběcího stroje, propady naopak teplo z obráběcího stroje odvádějí. Zdroje a propady tepla se dělí na vnitřní, které se nacházejí přímo v obráběcím stroji, a vnější, které stroj ovlivňují z venku, některé jejich příklady jsou vidět na obrázku 8. [7]

Vnitřní zdroje tepla jsou místa, kde dochází nějakým způsobem k disipaci energie. V případě vřetena a pohonů os vznikají ztráty kvůli elektrickému odporu a Joulovým ztrátám, které se dají určit dle vztahu

$$P_j = R \cdot I^2 \quad (5)$$

kde  $R$  je odpor a  $I$  je procházející proud. [12]

U lineárních vedení, kuličkových šroubů, ložisek a převodů dochází ke vzniku tepla kvůli mechanickým odporům. V tomto případě může teplo vznikat od smykových tření, určí se následujícím vztahem

$$\dot{Q} = \mu \cdot F_N \cdot v \quad (6)$$

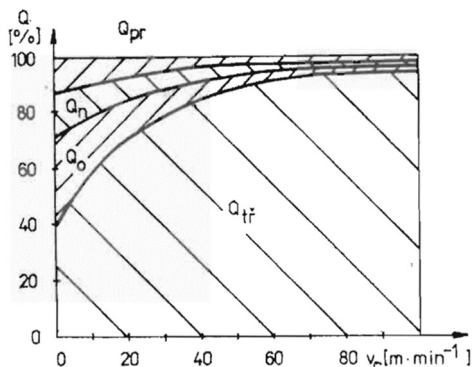
kde  $\mu$  je součinitel smykového tření,  $F_N$  je tlaková (normálová) síla a  $v$  je rychlost, kterou se vůči sobě povrchy pohybují. Dalším příkladem mechanických odporů

jsou valivé odpory, vytvářené teplo se v jejich případě určí pomocí následujícího vzorce

$$\dot{Q} = \frac{\xi \cdot F_N}{r} \cdot \omega \quad (7)$$

kde  $\xi$  je rameno valivého odporu neboli součinitel valivého tření,  $F_N$  je opět tlaková (normálová) síla,  $r$  je poloměr průřezu valeného tělesa a  $\omega$  je úhlová rychlost valeného tělesa. Mezi mechanické odpory se v případě tekutin řadí také viskózní tření. [7]

Jedním ze zdrojů tepla je také samotný řezný proces. Příkon při obrábění se transformuje na teplo, které je odváděno třískou, obrobkem, nástrojem a řezným prostředím. Kvůli tomu dochází ke zvýšení teploty těchto komponent, jejich podíl na odvodu tepla ze stroje ukazuje obrázek 7. [13]



Obrázek 7 – Rozložení odvodu tepla v závislosti na řezné rychlosti [13]

$Q$  – Poměrné odváděné teplo

$v_c$  – Řezná rychlost

$Q_{tř}$  – Teplo odcházející do třísky

$Q_o$  – Teplo odcházející do obrobku

$Q_n$  – Teplo odcházející do nástroje

$Q_{pr}$  – Teplo odcházející do prostředí

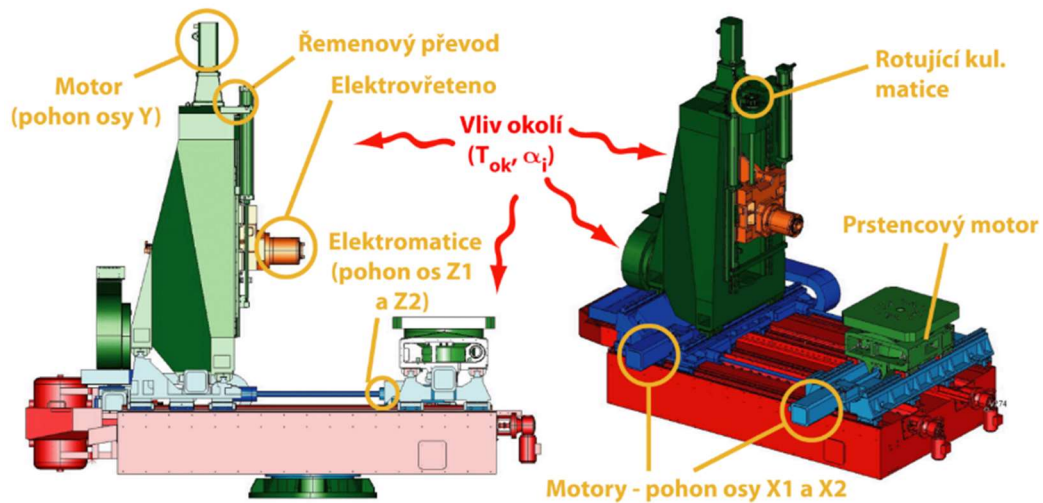
Teplo, které vzniká při obrábění, lze určit z níže uvedeného vzorce

$$Q = F_c \cdot v_c \cdot t \quad (8)$$

kde  $F_c$  je řezná síla,  $v_c$  je řezná rychlost a  $t$  je doba obrábění. [13]

Mezi vnitřní propady tepla se řadí chladicí kapalina, která se účastní řezného procesu, a různé další chladicí okruhy, které se nacházejí ve stroji.

Vnějšími zdroji a propady tepla jsou topná tělesa, sousední stroje, agregáty, slunce a okolní vzduch, ten může působit jako zdroj i propad tepla. [3]



Obrázek 8 – Příklad zdrojů a propadů tepla v obráběcím stroji a jeho okolí [14]

### 3.4.2. Přenos tepla v obráběcích strojích

Hlavním způsobem sdílení tepla v obráběcích strojích je kondukce, významněji se projevuje také konvekce, vliv radiace je pouze okrajový.

S neustálým nárůstem schopností a sofistikovanosti obráběcích strojů se také zvětšuje složitost jejich konstrukce a jejich materiálová nehomogenita. To ztěžuje odhad teplotního chování a deformací obráběcího stroje.

Příkladem prvků, které přenos tepla komplikují, jsou spoje, může se jednat o spoje svarové, šroubové, pájené, nebo o lineární vedení. Spoje vnášejí do obráběcích strojů nehomogenitu a tím dále komplikují sdílení tepla.

Teplotní deformace se týkají také odměřovacích systémů. Pokud se nacházejí blízko zdrojů tepla, dochází k zhoršení jejich přesnosti. Doporučuje se používat odměřovací systémy ze stejných materiálů, jako je rám obráběcího stroje. [3]

V rámci vývoje obráběcích strojů je snaha o snižování vlivů sdílení tepla na kvalitu obráběcího procesu, v tomto směru existují tři hlavní oblasti minimalizace teplotních chyb obráběcích strojů. Jedná se o konstrukční úpravy stroje s důrazem na symetrii a snadnější odhad teplotních chyb, chlazení komponent stroje a predikci a softwarovou kompenzaci teplotního chování stroje. [7]

## 3.5. Zkoušky tepelných vlivů na obráběcí stroje dle

### ISO 230-3

Účelem ISO 230 [1] je standardizace metod zkoušení přesnosti obráběcích strojů. ISO 230-3 se zabývá zkouškami, jejichž cílem je stanovit tepelné účinky, které jsou způsobené různými zdroji tepla. Tyto tepelné účinky způsobují deformaci konstrukce stroje a polohovacího systému, která má negativní vliv na jeho přesnost.

Jsou definovány následující zkoušky:

- Zkouška chyby vzniklé kolísáním teploty okolního prostředí.
- Zkouška teplotních deformací způsobených rotací vřetena.
- Zkouška teplotních deformací způsobených lineárním pohybem součástí.
- Zkouška teplotních deformací způsobených rotačním pohybem součástí.

To, které zkoušky a v jakém pořadí proběhnou, není předepsáno. [1]

#### 3.5.1. Podmínky pro zkoušky

Norma doporučuje zkušební vybavení a zařízení pro správné provedení zkoušek. Doporučení se týká senzorů pro měření deformací a teploty, vhodného zařízení pro sběr dat, přesného kontrolního trnu a koule a přípravku pro umístění snímačů deformací. Zkušebním vybavením, zejména senzory deformací, se dále zabývá kapitola 3.6.

Dále je předepsán stav, ve kterém by se měl nacházet stroj před prováděním zkoušek. Stroj musí být sestavený a plně funkční, ke spuštění stroje by mělo dojít v dostatečném předstihu před zkouškami, aby došlo ke stabilizování tepelných účinků. Stroj a zkušební vybavení musí být chráněny před vnějšími zdroji a propady tepla, které byly zmíněny v kapitole 3.4.1.

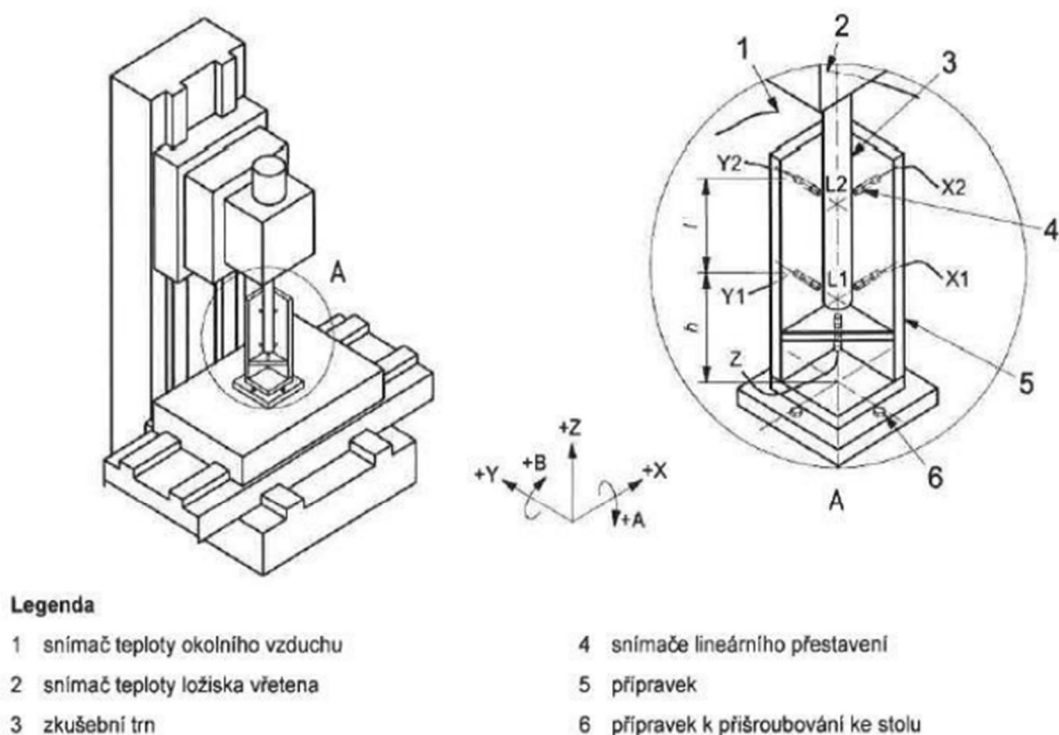
Teplota, pro provedení zkoušek je stanovena na 20 °C. Pokud je měření provedeno při jiné teplotě, musí být výsledky pro porovnatelnost přepočteny tak, aby odpovídaly 20 °C. [16]



### 3.5.2. Zkouška chyby vzniklé kolísáním teploty okolního prostředí (ETVE)

Cílem tohoto testu je zjistit, jaký vliv má změna okolní teploty na obráběcí stroj. Díky tomu může být při jiných zkouškách stanoveno, jak velkou část chyby způsobují změny teploty.

Na obrázku 9 je zobrazeno typické uspořádání pro měření na obráběcím stroji se svislou osou vřetena. Přípravek, na kterém jsou umístěny snímače deformací, musí být připevněn k nerotující části stroje. V případě uspořádání dle obrázku 9 se jedná o stůl. Měří se relativní posunutí součásti, do které se běžně upíná nástroj a součásti, která běžně drží obrobek a natočení kolem os X a Y. Dále se měří teplota stroje v blízkosti předního ložiska vřetena a teplota okolí v dostatečné vzdálenosti od stroje. Zkouška by měla trvat co nejdelší dobu a s neměnnými podmínkami. [1]



Obrázek 9 – Typické uspořádání pro zkoušku chyby vzniklé kolísáním teploty okolního prostředí (ETVE) a zkoušku teplotních deformací způsobených rotací vřetena [15]



Výsledky jsou vyneseny do grafů závislosti teplotních deformací a teploty na čase, pro každou osu se grafy sestaví zvlášť. Získané hodnoty se používají při jiných zkouškách ke stanovení teplotního vlivu na jejich výsledky, neměly by být použity k porovnávání různých strojů. Dále je potřeba zaznamenat polohu měřicích přístrojů a zařízení a jejich typ. Pokud byla použita zařízení kompenzující teplotní změny, je třeba to také zmínit. [1]

### **3.5.3. Zkouška teplotních deformací způsobených rotací vřetena**

Tato zkouška se provádí za účelem zjištění účinků vnitřního tepla generovaného rotací vřetena a účinků tím vzniklých změn teploty v konstrukci stroje na celkovou deformaci konstrukce. Deformaci určujeme mezi nástrojem a obrobkem. Tato zkouška se provádí s rotujícím vřetenem stroje, protože nás zajímají účinky tepla vyvinutého rotací vřetene. [17]

Typické uspořádání této zkoušky je stejné jako pro předchozí zkoušku. Schéma pro měření na obráběcím stroji se svislou osou vřetena je na obrázku 9, příklad z praxe pak na obrázku 10. Přípravek, na kterém jsou upnuty senzory pro měření deformací, je připevněn k části stroje, do které se upíná nástroj nebo obrobek, podle toho, která z nich nerotuje. Na obrázku 9 je přípravek připevněn ke stolu stroje. Stejně jako u předchozí zkoušky se měří relativní posunutí součástí, do které se upíná nástroj a součásti, která drží obrobek a natočení kolem os X a Y. Také se měří teplota stroje v blízkosti předního ložiska vřetena, teplota okolí v blízkosti stroje a teplota okolí dále od stroje, kde už není ovlivněna zdroji tepla ve stroji. Test se provádí buď pro konstantní hodnotu otáček vřetena, nebo pro jejich proměnné spektrum. Zkouška by měla probíhat po čtyři hodiny, dobu je však možné zkrátit nebo prodloužit. [1]



Obrázek 10 – Zkouška teplotních deformací způsobených rotací vřetena [7]

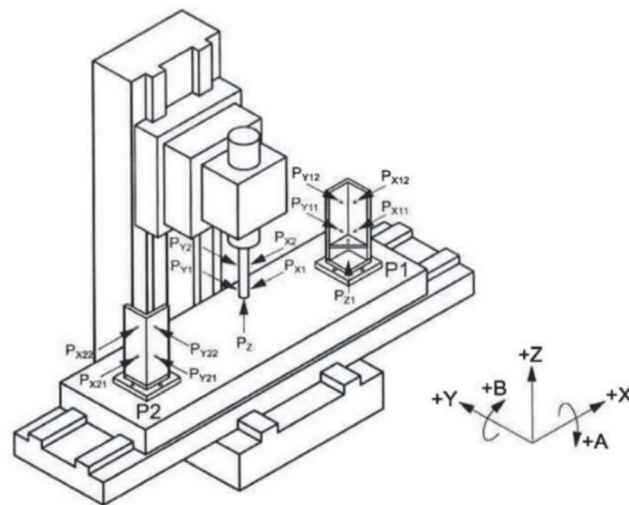
Výsledky se vynesou do grafů závislostí teploty a teplotních deformací na čase, grafy se pro každou osu sestaví samostatně. Z těchto závislostí lze určit vliv zahřívání konstrukce stroje z důvodu rotace vřetena na vzájemnou polohu obrobku a nástroje. Pro porovnatelnost výsledků je důležité zaznamenat, jakými přístroji bylo měřeno a polohu ve které se nacházely. Dále je třeba zaznamenat otáčky vřetena a zařízení kompenzující tepelné změny, pokud byla použita. [1]

#### **3.5.4. Zkouška teplotních deformací způsobených lineárním pohybem součástí**

Účelem tohoto testu je stanovení účinků vnitřního tepla generovaného lineárním polohovacím systémem stroje a třením v jeho vodicích prvcích na deformaci konstrukce stroje, která se určuje vzhledem k vzájemné poloze obrobku a nástroje. Test zjišťuje, jak moc se změní poloha a orientace pohyblivé části obráběcího stroje ve dvou polohách na dané lineární ose. Tato zkouška se provádí pouze na numericky řízených strojích. [15]

Typické uspořádání této zkoušky pro obráběcí stroj se svislou osou vřetena je zobrazeno na obrázku 11. Do vřetena je upnut kontrolní trn a v cílových polohách

posuvu jsou umístěny přípravky se snímači polohy. Cílové pozice by měly být voleny v blízkosti koncových bodů osy, ale ne dále než 2 metry od sebe. Pojezd do každé cílové pozice bude vždy proveden pouze z druhé cílové pozice. Snímače polohy musí být nastaveny tak, aby mohly měřit polohu a orientaci kontrolního trnu v každé cílové poloze. V případě druhého možného uspořádání zkoušky je ke vřetenu připevněn přípravek se snímači polohy a v koncových polohách jsou umístěny dílce s referenčními plochami. Test probíhá 4 hodiny, během tohoto času se stroj neustále pohybuje v měřené ose mezi oběma koncovými polohami danou rychlostí posuvu. V každé koncové poloze snímače odečtou hodnoty posuvů. Snímače teploty by měly být umístěny v blízkosti odměřovacího systému polohy dané osy, u spojů, kde vzniká teplo třením, na opačné straně konstrukce, na stole stroje a v blízkosti vřetena. Také by měla být měřena teplota okolí. [1]



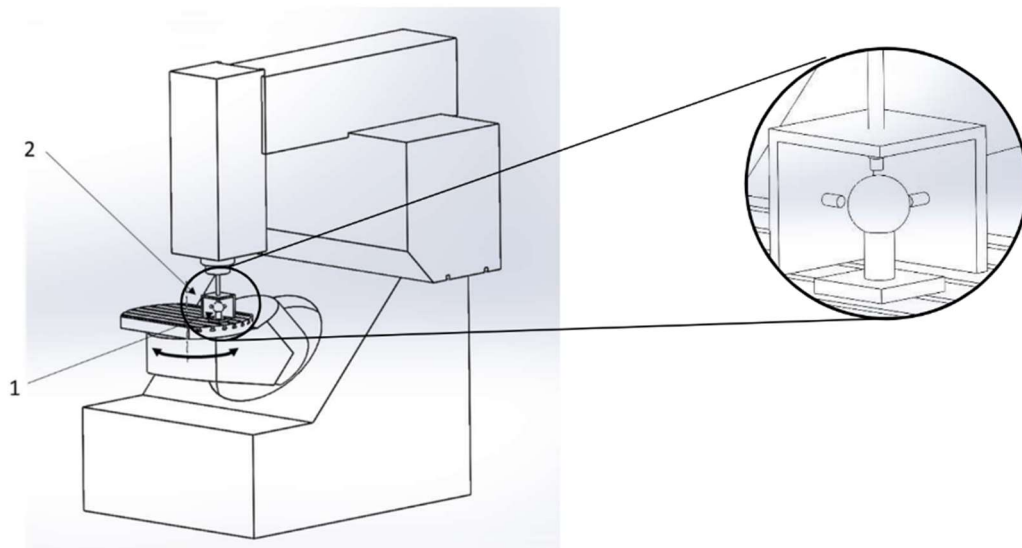
Obrázek 11 – Typické uspořádání zkoušky teplotních deformací způsobených lineárním pohybem součásti [15]

Jako výsledné hodnoty by měly být vyneseny závislosti polohy v krajních pozicích dle různých os na čas. Také by měly být stanoveny závislosti měřených teplot na čas. Dále musí dojít k zaznamenání typů a polohy použitých měřicích přístrojů, rychlosti posuvu, doby setrvání v krajních polohách a systémů kompenzujících změny teploty, pokud byly použity. [1]

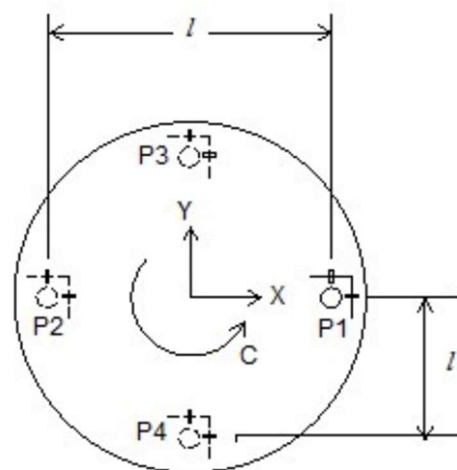
### 3.5.5. Zkouška teplotních deformací způsobených rotačním pohybem součástí

Tato zkouška se provádí s cílem stanovit teplotní deformace, které vznikají kvůli rotačnímu polohování stroje. Deformace se měří mezi obrobkem a nástrojem. Test ukazuje míru změny orientace a polohy zkušební kulového přípravku ve více úhlových pozicích v důsledku tepelných vlivů, které působí na odměřovací systém stroje a způsobují deformaci jeho struktury. Tento test je určen pouze pro numericky řízené stroje.

Uspořádání tohoto testu pro stroj se svislou osou vřetena a otočným stolem je zobrazeno na obrázku 12, na obrázku 13 je znázorněn příklad měřicích pozic při této zkoušce. V případě tohoto uspořádání se zkušební kulový přípravek připevní ke stolu, který bude vykonávat rotační pohyb a přípravek se senzory deformací se upne do vřetena. Pro otočné stoly a hlavy s rozsahem otáčení menším než  $360^\circ$  se stanoví tři rovnoměrně rozmístěné pozice pro měření, z nichž dvě budou v blízkosti koncových bodů rotace. V případě stolů a hlav, které se mohou otáčet o více než  $360^\circ$ , se měří ve čtyřech polohách, které jsou od sebe vzdáleny  $90^\circ$ . Měření probíhá po čtyři hodiny, během kterých se stroj neustále pohybuje mezi měřicími polohami. Při pohybu mezi jednotlivými polohami se do nové pozice přesune nejprve přípravek se senzory, a to pomocí lineárních os stroje. Poté se do nové polohy pomocí rotace stolu přesune zkušební kulový přípravek. Poté, co snímače polohy odečtou hodnoty posuvů, proběhne přesun do další pozice. Po projití všech poloh se rotační osa stroje po určitou dobu nepřetržitě otáčí, následně dojde znovu k měření ve všech polohách. Snímače teploty by měly být umístěné v blízkosti odměřovacího systému polohy měřené rotační osy, v místech, kde vzniká teplo třením, na opačné straně konstrukce, na stole a v blízkosti vřetena. Musí také docházet k měření teploty v dostatečné vzdálenosti od stroje. [1]



Obrázek 12 – Typické uspořádání pro zkoušku teplotních deformací způsobených rotačním pohybem součástí [1]



Obrázek 13 – Příklad měřicích pozic při zkoušce teplotních deformací způsobených rotačním pohybem součástí [1]

Výsledné hodnoty deformací v měřených pozicích se pro různé osy vynesou do grafů v závislosti na čase, dále se také stanoví závislost teplot měřených v průběhu zkoušky na čase. Také by mělo být bráno v potaz, že výsledky jsou ovlivněny pohybem lineárních os během testu. Zaznamenány musí být také typy použitých měřicích zařízení a polohy ve kterých se během zkoušky nacházely. Dále by měla být uvedena rychlost rotace měřené osy, doba setrvání v měřených pozicích, jejich poloha a použité prostředky kompenzující teplotní změny. [1]

## 3.6. Měření deformací

Pro měření deformací při zkouškách dle normy ISO 230-3 [1] se používají různé typy senzorů. Tato kapitola se zabývá jejich základním rozdělením a také popisem dalších přípravků, které se při těchto zkouškách využívají.

### 3.6.1. Mechanické senzory

Mechanické senzory se skládají z kontaktního bodu, který je ozubeným soukolím, nebo jiným mechanickým způsobem, propojen s kruhovým číselníkem. Pohyb ručičky číselníku je tak přímo iniciován pohybem kontaktního bodu. Příklad mechanického senzoru je na obrázku 14. Od využívání tohoto typu senzorů se však kvůli výhodnosti sběru a vyhodnocování dat v elektronické podobě postupně ustupuje. [1]



Obrázek 14 – Mechanický senzor deformací [18]

### 3.6.2. Kontaktní elektronické senzory

Kontaktní elektronické senzory vyžadují, aby se kontaktní hrot dotýkal povrchu, jehož poloha je měřena. Snímače tohoto typu produkují analogový nebo digitální výstupní signál, který je úměrný velikosti pohybu měřicího hrotu.

Mezi tyto senzory patří transformátorový diferenciální snímač neboli LVDT, který pracuje na principu indukčnosti. Jedná se o transformátor napájený střídavým proudem s jedním primárním a dvěma sekundárními vinutími. Měření posuv se přenáší na jádro, jehož pohybem se mění vzájemná indukčnost sekundárních vinutí a také indukované napětí, které je úměrné měřenému posuvu. Výstupní signál snímače je analogový. Senzory tohoto typu jsou zobrazeny na obrázku 15. [19]



Obrázek 15 – Příklady LVDT snímačů [20]

Dalšími zástupci kontaktních elektronických senzorů jsou spínací dotykové sondy, které se upínají přímo do vřetena stroje. Při kontaktu s měřeným povrchem vyše sonda signál do řídicího systému, který odečte polohu v osách. Měření polohy je tedy v tomto případě zajištěno samotným strojem. Tento senzor je ukázán na obrázku 16. [21]



Obrázek 16 – Dotyková sonda [22]



Mezi dotykové elektronické senzory patří také inkrementální snímače polohy, jeho příklad je na obrázku 17. V tomto případě prochází světlo ze zdroje přes pravítka, které je tvořeno soustavou světlých a tmavých polí. Na pravítku je umístěna clona s průsvitnými plochami, která se stejně jako zdroj světla a jeho snímač pohybuje spolu s měřeným povrchem. Vzájemným pohybem clony a pravítka se mění intenzita procházejícího záření, která je úměrná měřené deformaci, a tím dochází také ke změně napětí. Výstupní signál tohoto snímače je digitální. [23]



Obrázek 17 – Inkrementální snímač polohy [24]

### 3.6.3. Bezkontaktní elektronické senzory

Bezkontaktní elektronické senzory určují změnu polohy měřeného povrchu pomocí různých fyzikálních principů. Tyto snímače produkují digitální nebo analogový signál, který je úměrný vzdálenosti od měřeného objektu. [1]

Speciálním případem indukčních snímačů jsou snímače na principu vířivých proudů, jejichž příklady jsou na obrázku 18. Vířivé proudy vyvolává střídavé magnetické pole cívky, tyto proudy vyvolávají v blízkém objektu magnetické pole, které působí proti magnetickému poli cívky a snižuje jeho intenzitu. Snižování intenzity cívky snižuje její indukčnost a zvyšuje ztráty. K měření vzdálenosti lze tyto snímače využít díky tomu, že intenzita magnetického pole pronikajícího do blízkého objektu závisí na vzdálenosti mezi cívkou a tímto objektem. Pro správné



vyhodnocení výsledků měření tímto senzorem je třeba brát v potaz, že intenzita magnetického pole závisí také na magnetických a elektrických vlastnostech materiálu kontrolního trnu a na stavu jeho povrchu. [23]



Obrázek 18 – Snímače na principu vířivých proudů [25]

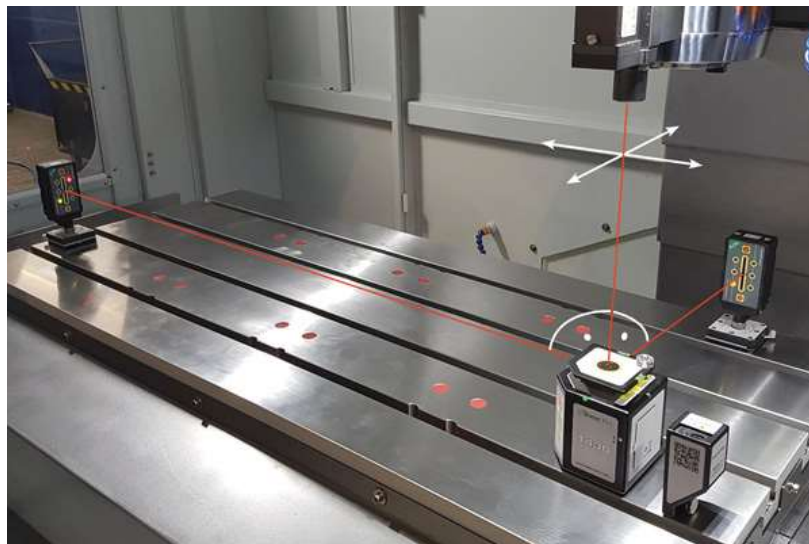
Dalším typem bezkontaktních elektronických senzorů jsou kapacitní snímače. Ty fungují na principu deskového kondenzátoru, kde jednu elektrodu tvoří snímač a druhou objekt, jehož poloha je měřena. Se změnou vzdálenosti elektrod dochází ke změně napětí na kondenzátoru. Napětí kondenzátoru závisí také na vlastnostech dielektrika mezi elektrodami, proto je důležité provádět měření tímto typem senzoru ve stabilním okolním prostředí. Příklady kapacitních snímačů ukazuje obrázek 19. [23]



Obrázek 19 – Kapacitní snímače [26]

### 3.6.4. Optické senzory

Zástupcem optických senzorů je laser-interferometr. Svazek paprsků vytvořený laserem dopadá na polopropustnou plochu pod úhlem  $45^\circ$ . Od této plochy se část paprsků odráží na pevné referenční zrcadlo a část prostupuje na měřicí zrcadlo, které se pohybuje spolu s měřeným objektem. Odražené paprsky se na polopropustné ploše znovu skládají a jsou odraženy na měřicí zařízení. Změna amplitudy složených paprsků je úměrná změně polohy pohyblivého zrcadla. Výsledky měření mohou být narušeny měnícími se podmínkami v okolním prostředí, kterým paprsky prostupují, a jsou také závislé na stavu povrchu měřeného objektu, od kterého se paprsky odrážejí. Měření polohy laser-interferometrem je na obrázku 20. [23]

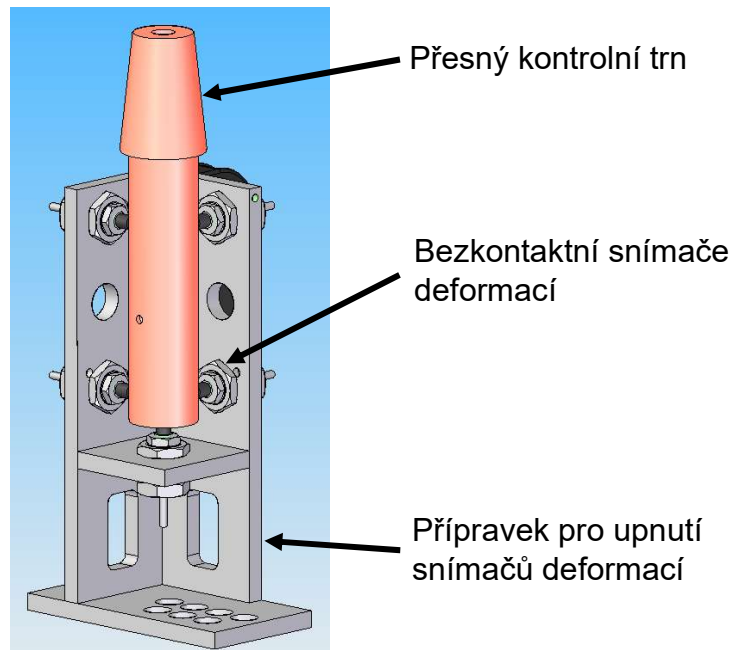


Obrázek 20 – Měření polohy laser-interferometrem [27]

### 3.6.5. Přípravky

Pro zkoušky dle normy ISO 230-3 [1] jsou používány také různé typy přípravků. Ty můžeme rozdělit do dvou základních skupin, na přípravky pro upnutí senzorů a přípravky s referenčními plochami, od kterých se odměřují deformace. Norma definuje pouze jejich základní parametry, další vlastnosti nejsou předepsány.

Přípravky pro upnutí senzorů zajišťují jejich upnutí v přesně definovaných polohách a tím i opakovatelnost měření. Nejčastěji se jedná o přípravek pro měření změny polohy přesného kontrolního trnu upnutého ve vřetení stroje, který je na obrázku 21, můžou však být použity i další typy těchto přípravků. Norma ISO 230-3 [1] v tomto případě předepisuje počet bodů ve kterých mají být měřeny deformace, konstrukce ani další vlastnosti nejsou předepsány. V případě použití kontaktních senzorů musí být zajištěna dostatečná tuhost přípravku, jinak by mohlo docházet ke vzniku chyb způsobených deformací konstrukce. Přípravky bývají většinou vyrobeny z běžně používaných kovových materiálů, proto mohou být výsledky měření ovlivněny také jejich teplotní deformací. [1]



Obrázek 21 – Přípravek s upnutými snímači a kontrolním trnem [7]

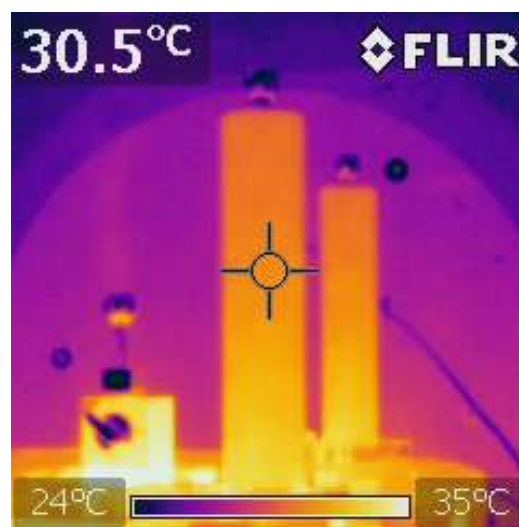
Přípravky s referenčními plochami, jako je přesný kontrolní trn na obrázku 22 a přesné kontrolní koule na obrázku 23, popisuje norma ISO/TR 230-11 [34]. Kontrolní trny se upínají do vřetene stroje, zkušební kulové přípravky se dají připevnit ke stolu stroje. V případě měření bezkontaktními senzory může ovlivnit výsledky materiál a stav povrchu těchto přípravků. Stejně jako přípravky pro upnutí senzorů bývají přesné kontrolní trny a koule vyrobeny z kovových materiálů, proto můžou být jejich rozměry také ovlivněny teplotními deformacemi. Tepelné ovlivnění těchto přípravků je na obrázku 24. [1]



Obrázek 22 – Přesný kontrolní trn [28]



Obrázek 23 – Zkušební kulové přípravky při měření teplotních deformací [7]



Obrázek 24 – Tepelné ovlivnění přípravků při měření teplotních deformací [7]

## 4. Návrh přípravku pro měření teplotních deformací

Z důvodu tepelného ovlivnění přípravků, které bylo zmíněno v kapitole 3.6.5., je v rámci bakalářské navržen přípravek z kompozitního materiálu, který má v porovnání s běžnými strojírenskými materiály zanedbatelnou teplotní roztažnost. Jedná se o přípravek pro upnutí snímačů podobné konstrukce jako na obrázku 21. Motivací pro návrh je tedy minimalizace chyby vnesené do měření deformací přípravku. K dispozici je kompozitní materiál kvazi-izotropní skladby (0/90, +45/-45) z vysokopevnostního uhlíku a matrice PPS, jenž splňuje požadavek na nízkou teplotní roztažnost. Tento kompozit je k dispozici v podobě desek 350x350 mm o tloušťce 5 mm, které jsou na obrázku 25. Malá tloušťka desek je problém, se kterým je třeba se při návrhu vypořádat. Bude důležité zajistit dostatečnou tuhost přípravku a vyřešit spojení na sebe kolmých desek. Problémem naopak není silové zatížení přípravku, protože hmotnost snímačů je velmi malá. Rozměry byly navrženy podle používaného kovového přípravku, protože přípravek v praxi vyhovuje, a tak není důvod ke změnám. Dalším argumentem pro co nejpodobnější rozměry obou přípravků je porovnatelnost výsledků měření. Modely a výkresová dokumentace jsou vytvořeny v programu Autodesk Inventor Professional 2021.



Obrázek 25 – Kompozitní desky

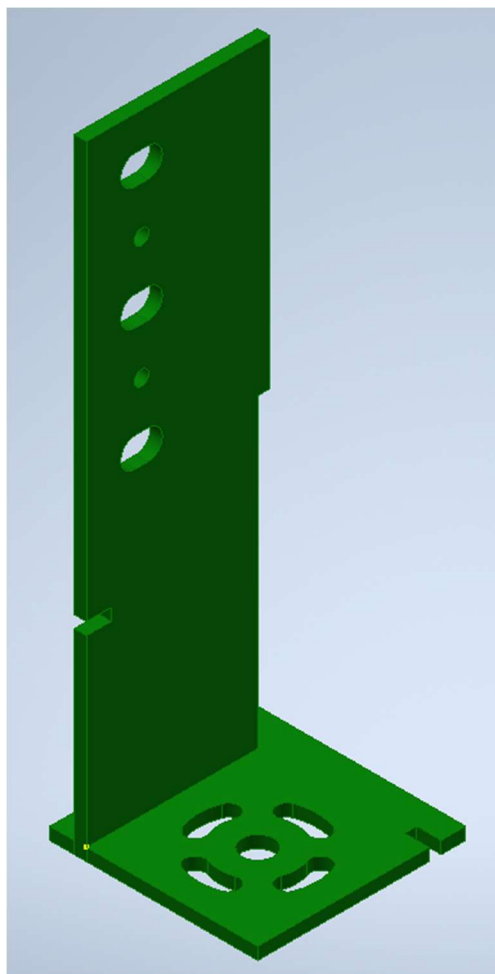


## 4.1. Základní konstrukce přípravku

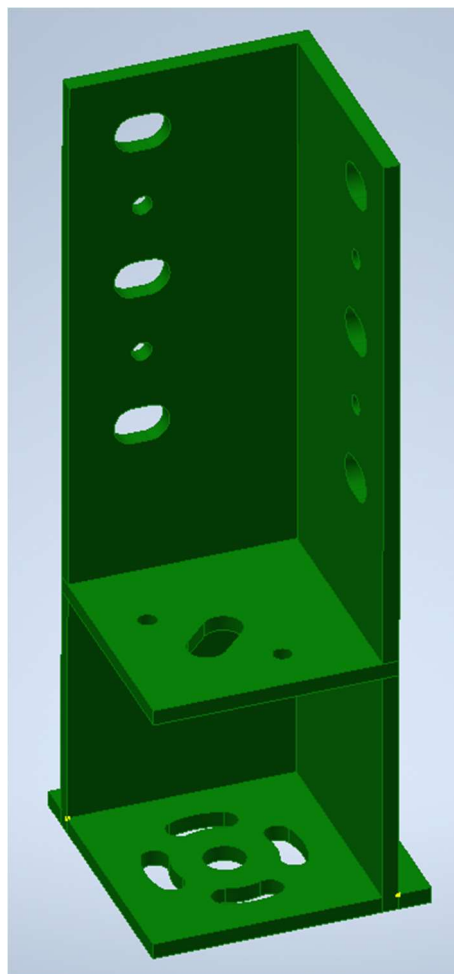
Základní konstrukci přípravku tvoří čtyři na sebe kolmé desky, ty jsou spojeny pomocí zámků, jak je vidět na obrázku 27, a kontaktní plochy jsou lepeny. Základní konstrukce je znázorněna na obrázku 28. Pro lepení jsou použita epoxidová lepidla zobrazená na obrázku 26. Jde o dva druhy, první je Z-POXY, tuhnoucí do 5 minut, od výrobce ZAP [35]. Druhým je EPOXY, tuhnoucí do 30 minut, od výrobce Kavan [36]. Druhou variantou bylo spojení desek pomocí šroubů jako u kovového přípravku, to se však kvůli malé tloušťce desek ukázalo jako nepoužitelné. Otvory v jednotlivých deskách a jejich význam jsou dále popsány v kapitole 4.2.



Obrázek 26 – Použité epoxidové lepidlo



Obrázek 27 – Spojení desek pomocí zámků

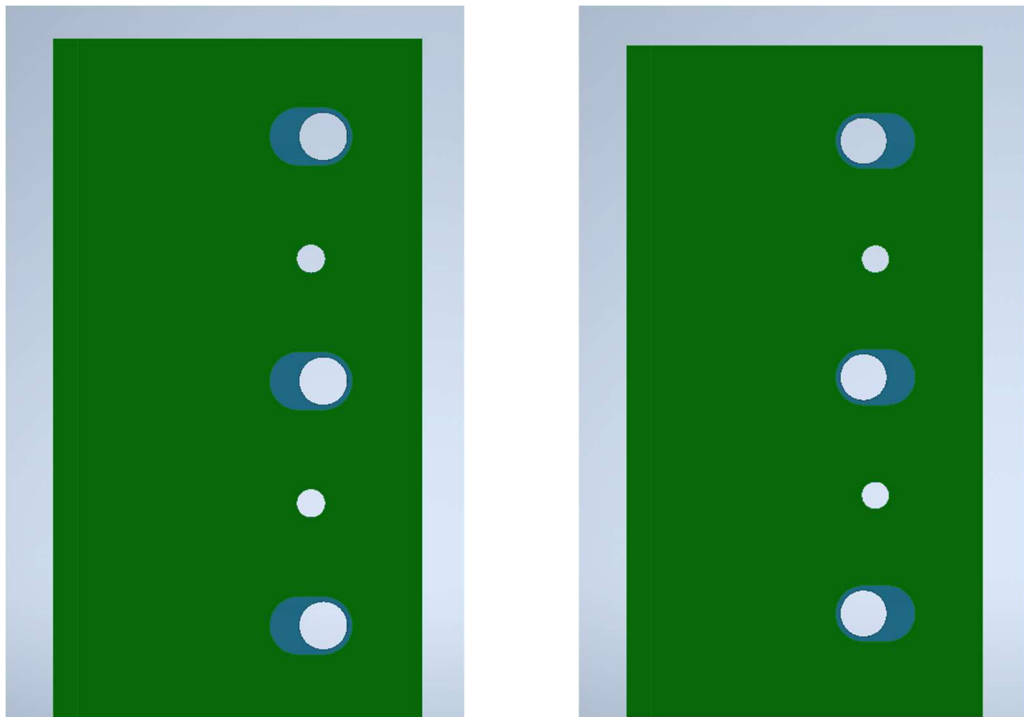


Obrázek 28 – Základní konstrukce přípravku

## 4.2. Přídavné desky

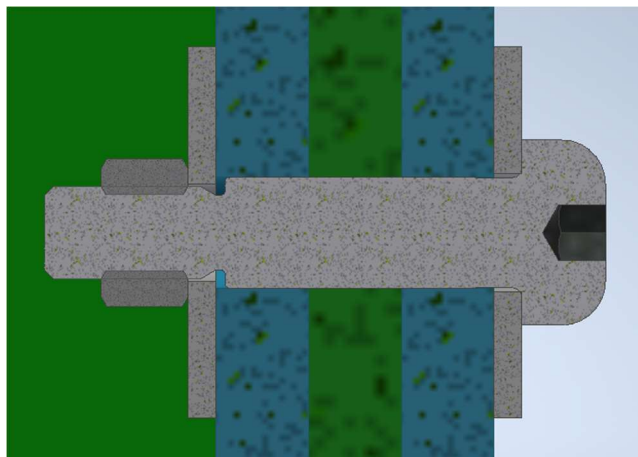
V základní konstrukci přípravku jsou vytvořeny otvory pro upnutí snímačů deformací, které mají oválný tvar. To umožňuje ustavit snímače ve více polohách s ohledem na různé průměry zkušebních trnů. Relativně velké otvory v tenkých deskách by však zhoršily tuhost přípravku. Z toho důvodu jsou navrženy přídavné desky, které vyztuží základní konstrukci. Přesná poloha těchto desek na základní konstrukci je zajištěna pomocí lícovaných šroubů. Otvory pro snímače v deskách mají válcový tvar kvůli vyšší tuhosti a možnosti přesnější výroby válcových děr. Možnost upnutí snímačů ve více polohách je však stále zachována, desky se dají otočit kolem svislé osy v místě děr pro šrouby a připevnit opačnou stranou, jak je

znázorněno na obrázcích 29 a 30. Kvůli požadavku na upnutí dvou průměrů snímačů jsou navrženy dva typy desek s různými průměry děr.



Obrázek 29 – První poloha pro upnutí snímačů Obrázek 30 – Druhá poloha pro upnutí snímačů

Šroubové spoje, kterými jsou připevněny desky, tvoří již zmíněné lícované šrouby a běžné šestihřanné matice. Po dotažení spoje by však hrozilo otláčení a poškození kompozitních desek, z toho důvodu jsou jak na straně hlavy šroubu, tak na straně matice karosářské podložky, které zvětšují kontaktní plochu. Šroubový spoj je zobrazen na obrázku 31.

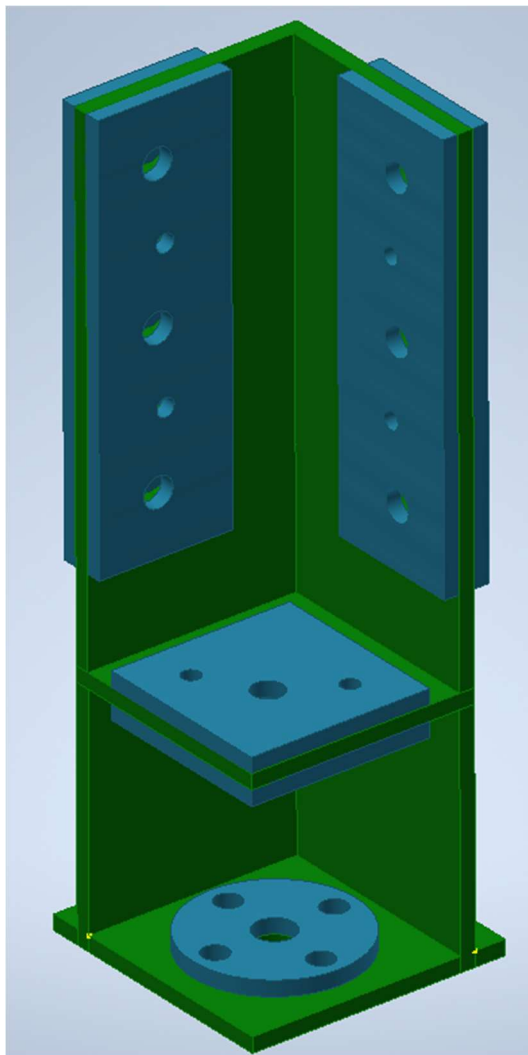


Obrázek 31 – Šroubový spoj

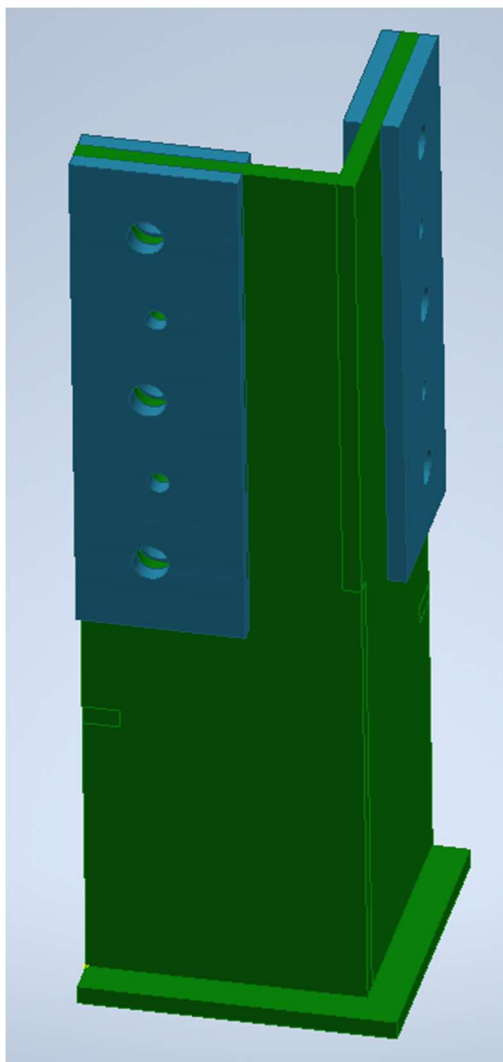


Ve spodní desce základní konstrukce jsou otvory pro upnutí přípravku ke stolu. Uprostřed se nachází díra pro šroub, kterým je přípravek ustaven v určené poloze. Okolo této díry jsou čtyři drážky, jejichž střed je na roztečné kružnici. Zašroubováním šroubu do těchto drážek je přípravek zabezpečen proti otáčení. Kvůli vyztužení desky, narušené těmito otvory, jsou šrouby připnuty přes přídatnou desku s pěti dírami. Čtyři krajní díry jsou na stejné roztečné kružnici jako drážky v desce a fungují s nimi na podobném principu jako již popsané otvory pro upnutí snímačů.

Všechny přídatné desky popsané v této kapitole lze vidět na obrázcích 32 a 33 a jsou rovněž vyrobeny z použitého kompozitního materiálu. Na obrázcích jsou pro přehlednost znázorněny modře.



Obrázek 32 – Základní konstrukce přípravku s přídatnými deskami zepředu

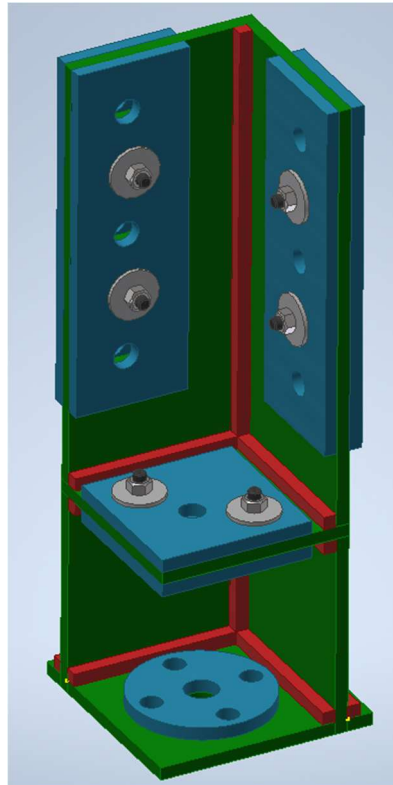


Obrázek 33 – Základní konstrukce přípravku s přidavnými deskami zezadu

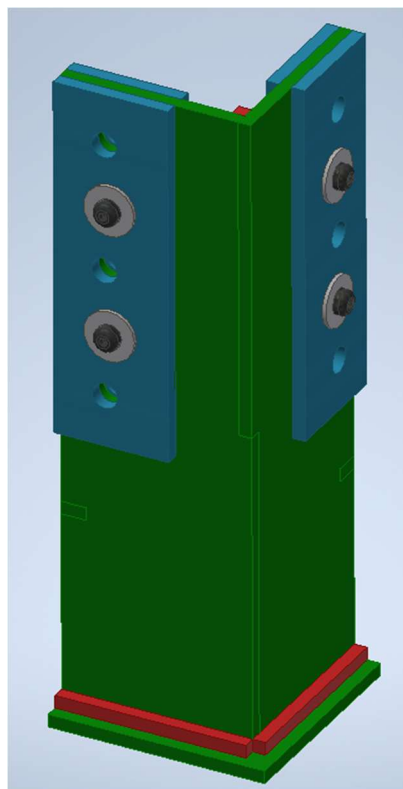
### 4.3. Vyztužení přípravku

Z důvodu zvýšení tuhosti je přípravek v rozích, kde dochází ke kontaktu jednotlivých desek základní konstrukce, vyztužen pomocí profilů čtvercového průřezu. Profily jsou také vyrobeny z kompozitu a k hlavní konstrukci přilepeny již zmíněným epoxidovým lepidlem.

Na obrázcích 34 a 35 jsou lepené profily znázorněny červenou barvou. Používané barevné odlišení jednotlivých částí konstrukce slouží pouze pro přehlednost a nereprezentuje skutečnou barvu přípravku.



Obrázek 34 – Kompletní model přípravku zepředu



Obrázek 35 – Kompletní model přípravku zezadu

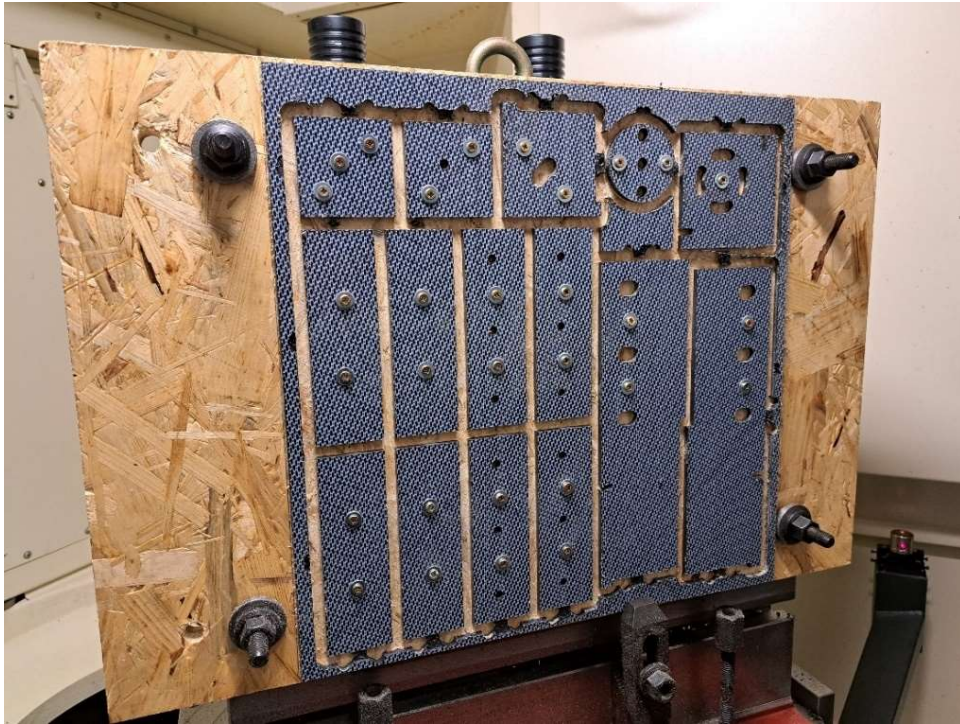
## 5. Výroba přípravku pro měření teplotních deformací

Výrobu kompozitního přípravku zajistil Ústav výrobních strojů a zařízení, proběhla na tříosém horizontálním frézovacím centru Tajmac H630. Kompozitní deska byla přilepena oboustrannou lepicí páskou na dřevoštěpkovou desku a ta byla přišroubována k upínací věži stroje. Nejprve proběhlo vrtání otvorů průměru 6 mm, kterými byl poté obrobek pomocí vrutů s podložkami připnut k dřevoštěpkové desce. Dále následovalo vrtání otvorů ostatních průměrů a poté byly požadované tvary vyřezány frézováním. Dráhy nástrojů byly generovány v software Siemens NX. Po vyrobení všech dílů proběhlo slepení desek základní konstrukce a výztuh epoxidovým lepidlem zmíněným v kapitole 4.1. Průběh výroby je vidět na obrázcích 36 a 37, hotový a smontovaný přípravek je na obrázku 38.



Obrázek 36 – Výroba dílů





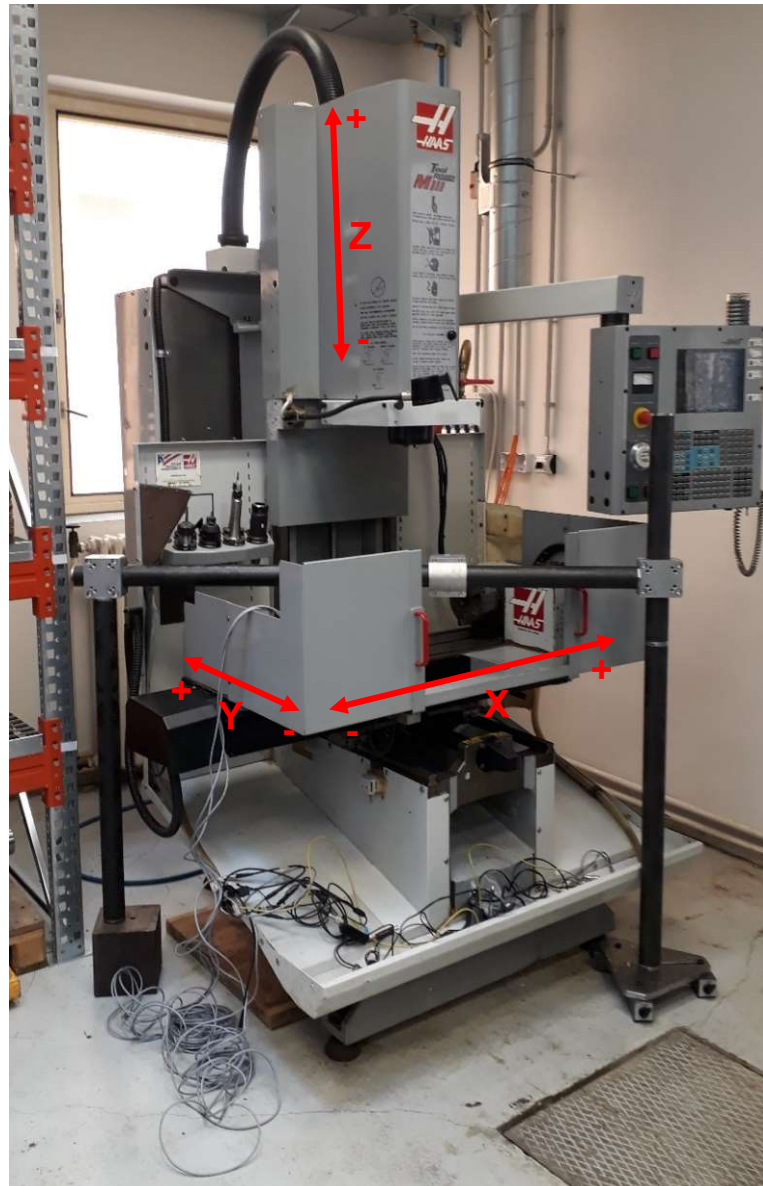
Obrázek 37 – Díly po dokončení výroby



Obrázek 38 – Vyrobený a sestavený přípravek

## 6. Realizace experimentů pro porovnání běžně používaného a navrženého přípravku a jejich vyhodnocení

Měření proběhla na stroji Haas Toolroom Mill TM-1HE na Ústavu výrobních strojů a zařízení. Cílem bylo porovnat teplotní roztažnost používaného kovového a nově navrženého kompozitního přípravku, vliv této roztažnosti na data naměřená s přípravky a celkovou kvalitu a přesnost těchto dat. Při experimentech byla změna teploty stolu stroje ovlivňující přípravky simulována pomocí topných manžet, které byly ke stolu připevněny lepicí páskou a magnety. Jedná se o 2 topné manžety HR6852A s odporem  $143 \Omega$  [37]. Regulace výkonu topných manžet proběhla pomocí regulačního transformátoru o vstupním napětí 230 V AC, výstupním napětí v rozsahu 0-250 V AC, frekvenci 50/60 Hz a maximálním výkonu 2000 VA [38]. Teploty byly měřeny kovovými odporovými snímači Pt 100 třídy A, které jsou k měřenému povrchu připevněny magneticky. Absolutní deformace měřily kontaktní indukční snímače T101F a T102F od výrobce PETER HIRT [39], ty byly upnuty v kompozitních stojáncích, které byly přišroubovány k vnější konstrukci sestavené z kompozitních tyčí, jak je vidět na obrázku 40. Relativní deformace mezi stolem (přípravkem) a vřetenem stroje (zkušebním trnem zasunutým ve vřetení) byla měřena bezkontaktními snímači na principu vířivých proudů PPT-280 [40]. Všechny snímače byly připojeny pomocí PLC NI cRIO-9014 [41] se zásuvnými moduly, sběr dat na počítači probíhal v LabVIEW 2018 a následné zpracování dat a vytvoření grafů v programu MATLAB R2021b. Znaménko deformace ve výsledných grafech respektuje směry strojních os, které jsou vyznačené na obrázku 39.



Obrázek 39 – Použitý stroj během přípravy měření s vyznačenými strojními osami

## 6.1. Samostatné měření

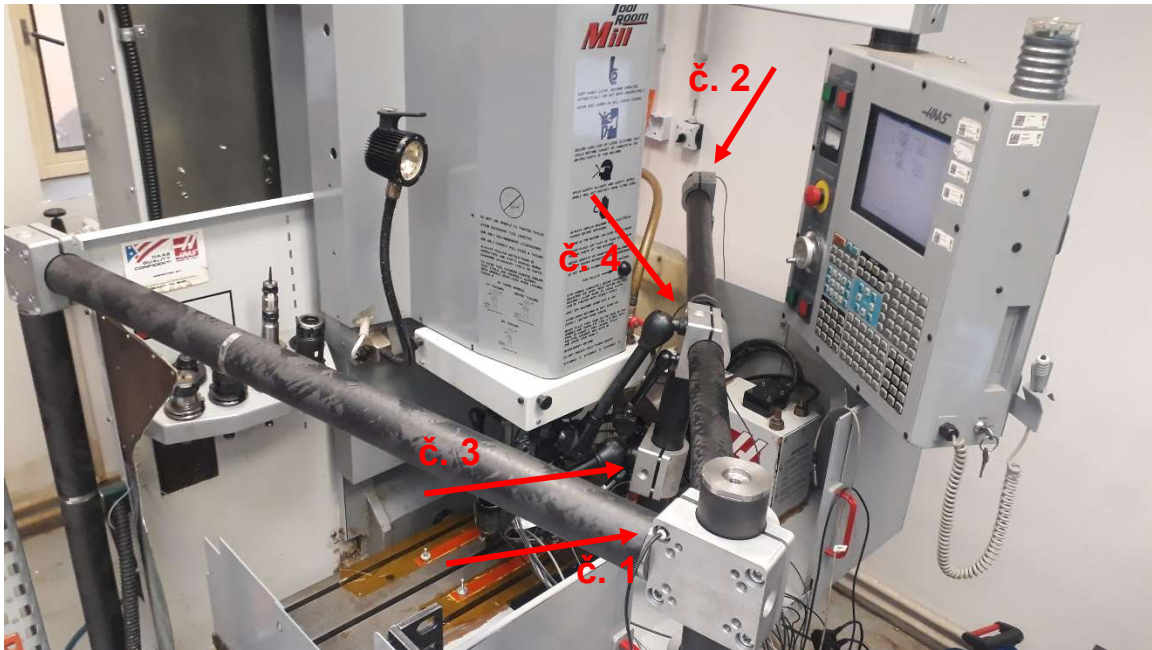
Při prvním experimentu se postupně měřilo s každým přípravkem samostatně. S každým z přípravků proběhla dvě měření, nejprve pro výkon topných manžet 85 W a poté pro 100 W, výsledky pro oba výkony byly velmi podobné. Zpočátku probíhala po dobu čtyř až pěti hodin fáze ohřevu topnými manžetami a následně chladnutí, což lze zřetelně rozeznat na grafech z měření. Experiment probíhal vždy přibližně 24 hodin.

### 6.1.1. Umístění snímačů

Na obrázcích 40 a 41 je znázorněno uspořádání experimentu a umístění snímačů při měření s kompozitním přípravkem, pro měření s kovovým přípravkem bylo vše stejné.

Teploty byly měřeny na dvanácti místech na přípravku, na stroji a v jeho okolí. Polohy většiny snímačů jsou zobrazeny na obrázcích 40 a 41 červenou barvou. Snímač č. 1 měřil teplotu okolí na zadní stojně konstrukce, č. 2 teplotu okolí na přední stojně konstrukce. Teplota vnější konstrukce v místě připevnění stojanů pro kontaktní snímače byla měřena senzorem č. 3 a teplota pracovního prostoru stroje senzorem č. 4. Snímač č. 5 měřil teplotu stolu vlevo od přípravku, teplota stolu na opačné straně přípravku byla měřena dalším snímačem. Probíhalo také měření teploty topné manžety senzorem č. 6. Teplota přípravků byla měřena na dvou místech, u stolu snímačem č. 7 a v místě upnutí senzorů deformací snímačem č. 8. Poloha obou snímačů v ose Z je pro oba přípravky přibližně stejná, č. 7 byl těsně nad stolem a č. 8 přibližně 185 mm nad stolem, takže výsledky z obou přípravků jsou porovnatelné. Jediným rozdílem bylo připevnění snímačů na kompozitní přípravek pomocí tavné pistole, protože tento přípravek není magnetický. Senzor č. 9 byl umístěn na stojan stroje, nacházel se těsně za okrajem obrázku, šipka ukazuje směr. Snímačem č. 10 byla měřena teplota stroje u vřeten v místě upnutí měřicího trnu. Šipka ukazuje část stroje, na které byla teplota měřena, snímač se však nalézal na opačné straně, takže není na obrázku 41 vidět. Poslední senzor měřil teplotu lože stroje pod stolem.



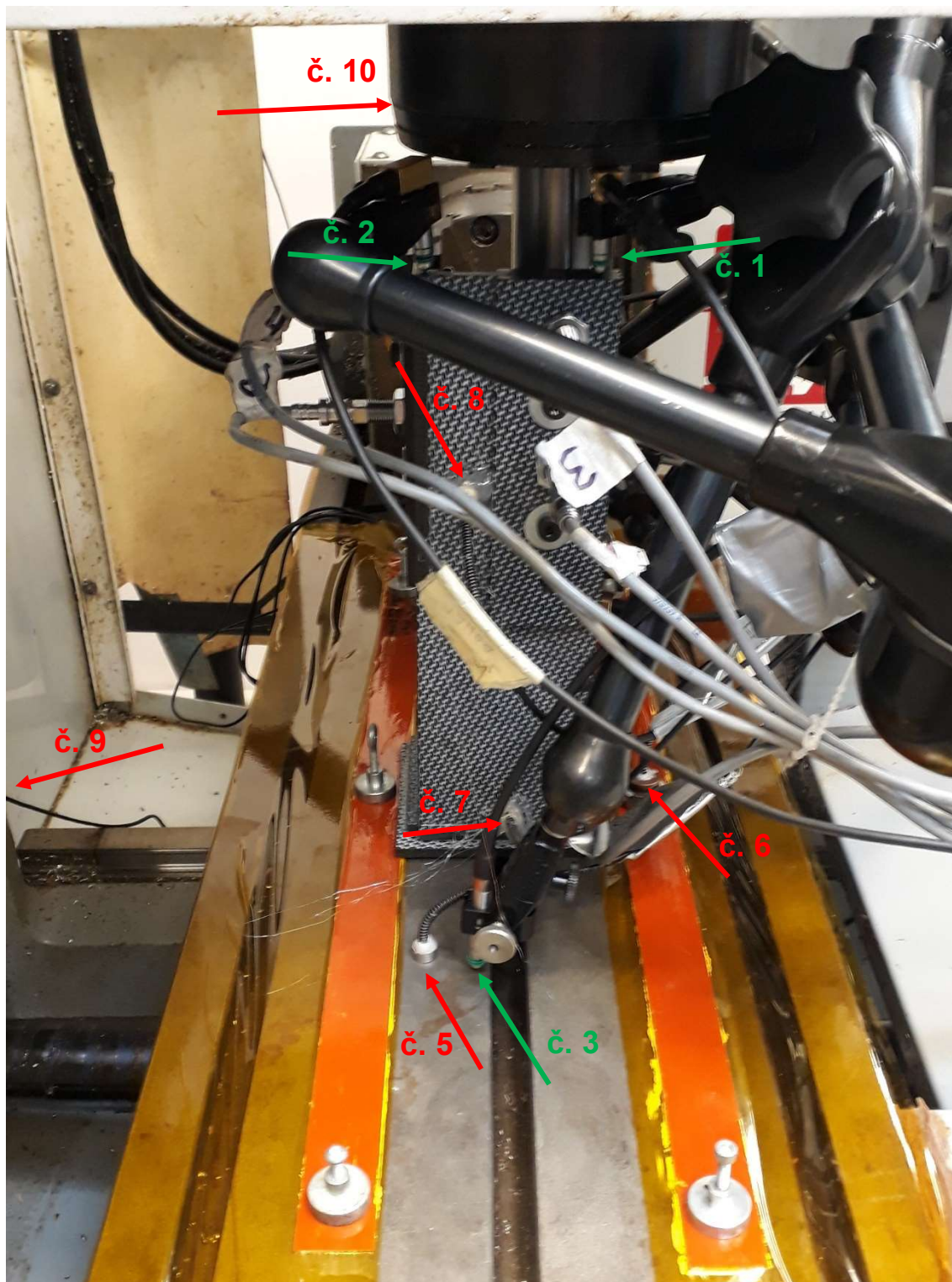


Obrázek 40 – Pohled z dálky na uspořádání pracoviště pro samostatné měření

Kontaktní senzory byly upnuty na magnetických stojácích přišroubovaných na kompozitním rámu nezávislém na struktuře stroje a byly jimi tedy měřeny absolutní deformace. Umístění kontaktních snímačů je na obrázku 41 znázorněno zeleně. Snímače č. 1 a č. 2 měřily deformaci na vrcholu přípravku v ose Z. Oba přípravky jsou skoro stejně vysoké, kovový měří 257 mm a kompozitní 255 mm, deformace naměřená na obou přípravcích je tudíž porovnatelná. Senzor č. 3 měřil deformaci stolu v ose Z. Při prvním měření s kovovým přípravkem byl místo stolu v ose Z měřen přípravek v ose Y, poté však bylo rozhodnuto, že stůl v ose Z je potřebnější a snímač byl přestaven. Data z měření přípravku v ose Y tak nemohou být s ničím porovnána, a proto zde nejsou uváděna. Další tři kontaktní snímače měřily zkušební trn z vnější konstrukce v osách X, Y a Z. Osu X měřily v záporném směru, Y v kladném směru a Z také v kladném směru.

Bezkontaktními snímači umístěnými v přípravku byl měřen zkušební trn z přípravků, byla tedy měřena relativní deformace mezi stolem a zkušebním trnem představujícím nástroj. V případě kovového přípravku byl v každé ose jeden snímač, v případě kompozitního přípravku byly v osách X a Y snímače dva. Ve výsledcích měření je spodní ze snímačů označen číslem 1 a horní číslem 2.

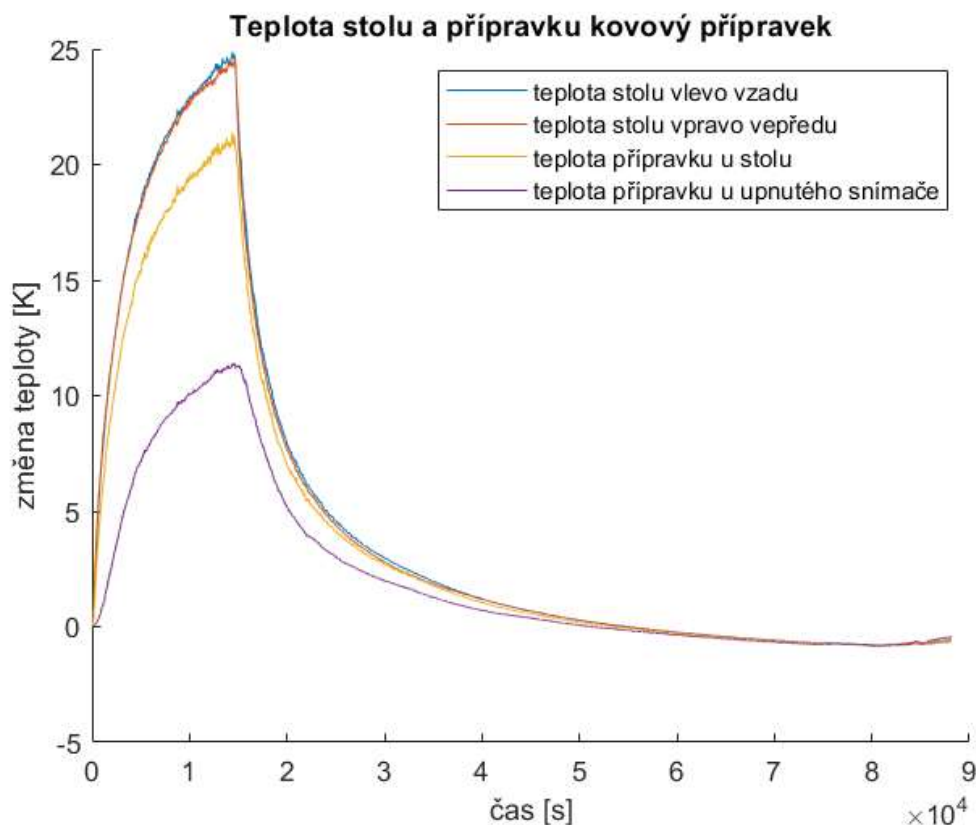
Osy X a Z byly měřeny v kladném směru, osa Y v záporném směru. Porovnatelnost výsledků z obou přípravků je zajištěna podobnou polohou snímačů v ose Z v kovovém i kompozitním přípravku.



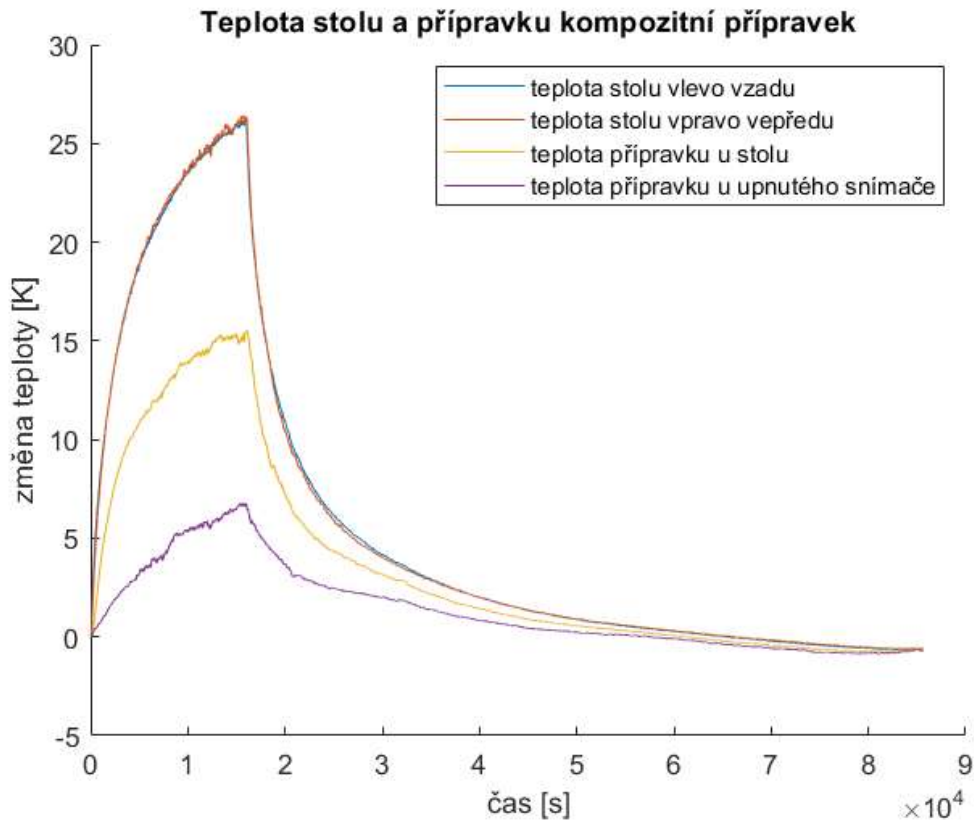
Obrázek 41 – Detail upnutého přípravku při samostatném měření

### 6.1.2. Výsledky měření

Z výsledků získaných ze snímačů teplot lze konstatovat, že mimo manžety, stůl stroje a přípravky byly změny teploty zanedbatelné a na výsledky měření měly pouze minimální vliv. Teplota topných manžet se během měření zvýšila vždy o 35 až 45 K. Výsledky z měření teplot stolu a přípravku jsou na obrázcích 42 a 43. Z těchto obrázků je patrné, že stůl v okolí přípravku byl prohřátý rovnoměrně a při obou měřeních přibližně o stejnou teplotu. Dále je vidět, že kompozitní přípravek vede hůře teplo, u stolu je v něm teplota menší přibližně o čtvrtinu a v místě upnutí snímačů dokonce o polovinu. Mimo přípravek byly získané změny teplot pro měření s kovovým a kompozitním přípravkem téměř totožné.



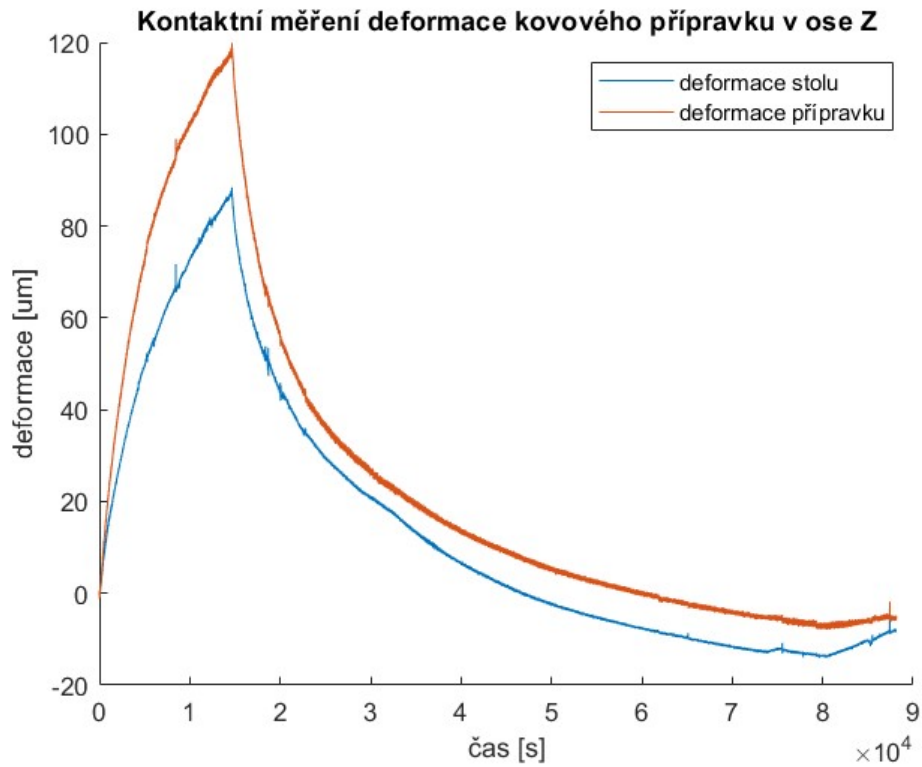
Obrázek 42 – Časový průběh teploty ve stolu a kovovém přípravku



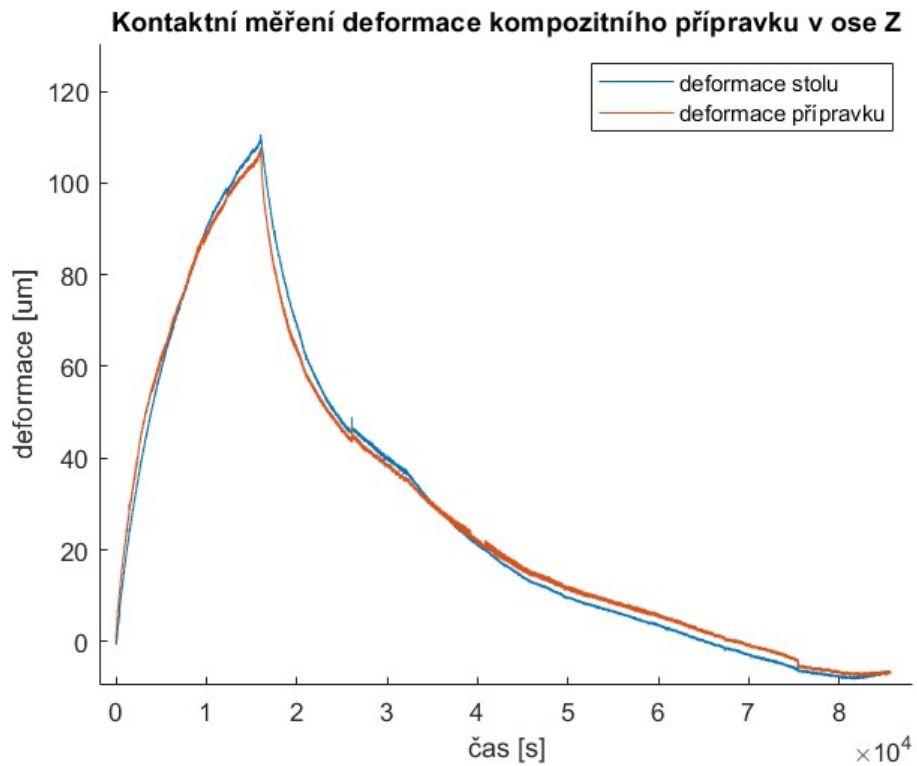
Obrázek 43 – Časový průběh teploty ve stolu a kompozitním přípravku

Z rozdílu deformací naměřených kontaktními snímači v ose Z na stole a na vrcholu přípravku lze vyčíst celkovou deformaci samotného přípravku v ose Z. Z obrázků 44 a 45 je vidět, že deformace kovového přípravku je v maximu 31  $\mu\text{m}$  a deformace kompozitního přípravku 3  $\mu\text{m}$ . Dá se tedy konstatovat, že celkovou roztažnost přípravku v ose Z se podařilo minimalizovat.



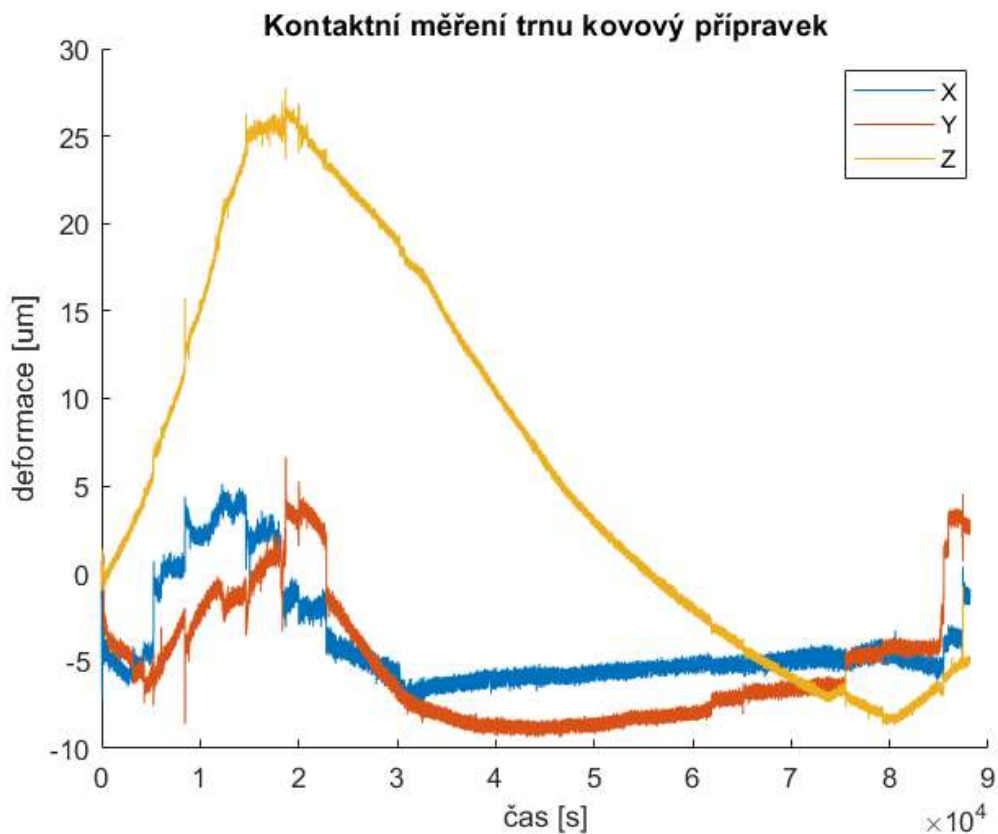


Obrázek 44 – Kontaktní měření deformace kovového přípravku v ose Z

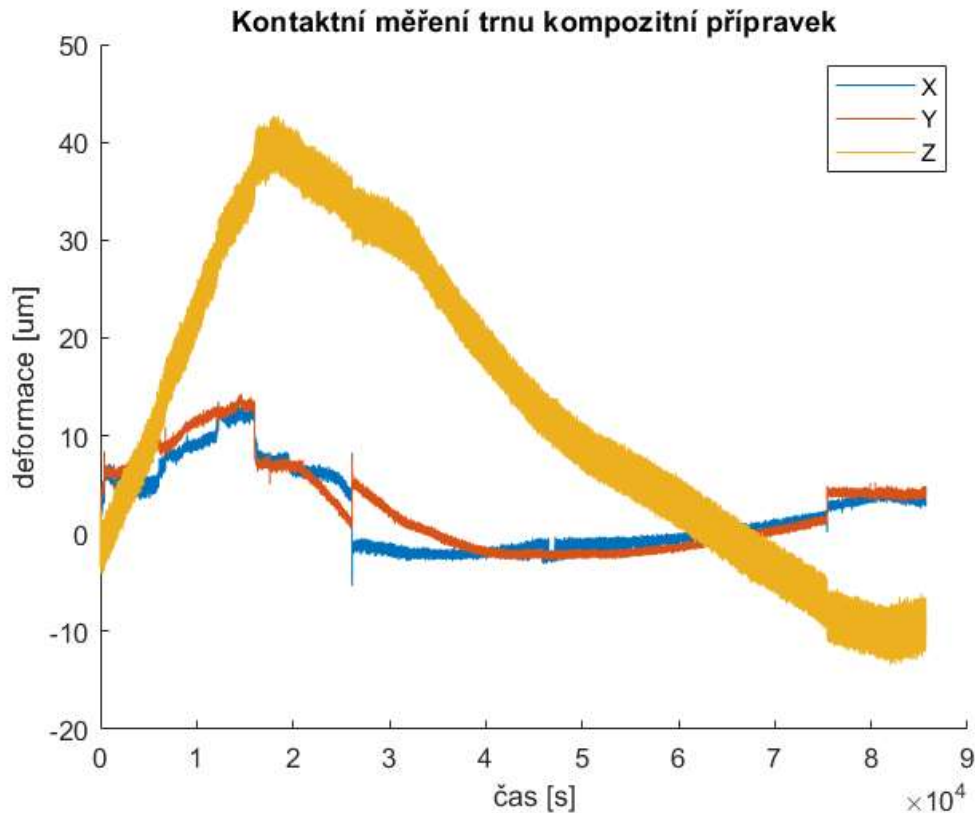


Obrázek 45 – Kontaktní měření deformace kompozitního přípravku v ose Z

Na obrázcích 46 a 47 jsou výstupy z kontaktního měření absolutních teplotních deformací na zkušebním trnu, tedy deformací měřených mezi kompozitním rámem a zkušebním trnem. V osách X a Y nejsou patrné žádné zásadní rozdíly, a tudíž lze říci, že případné rozdíly v těchto osách na výsledcích z bezkontaktních snímačů musí být způsobeny deformací přípravku. Výsledky v ose Z nejsou použitelné, protože u kompozitního přípravku se z prostorových důvodů nepodařilo kontaktní snímač posunout nastavit tak, aby nebyl v kontaktu s přípravkem.

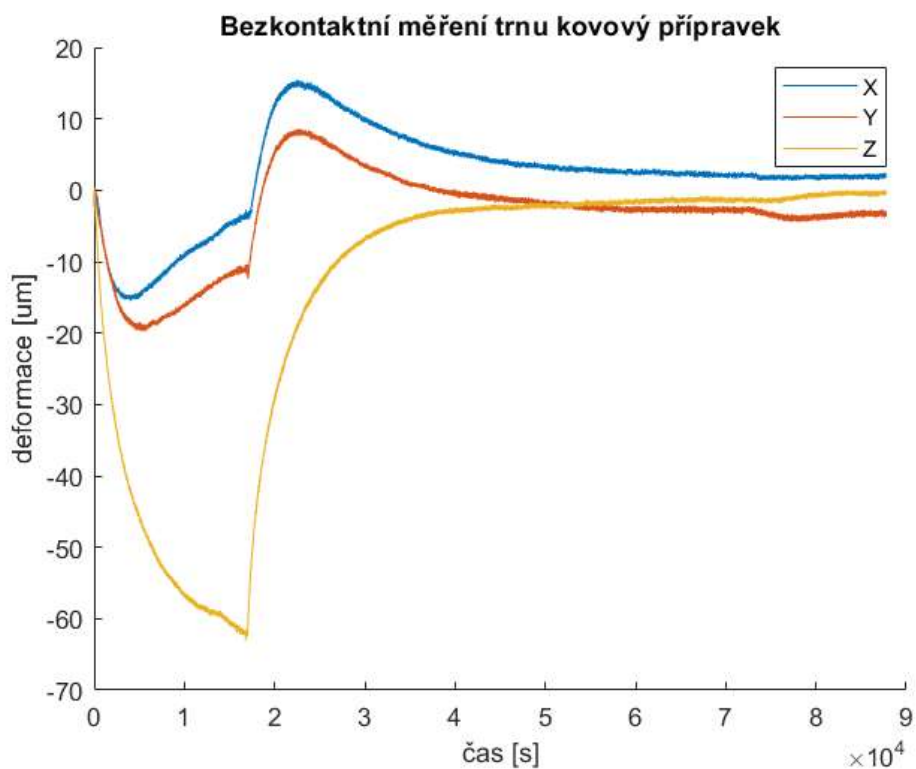


Obrázek 46 – Kontaktní měření deformace trnu s kovovým přípravkem

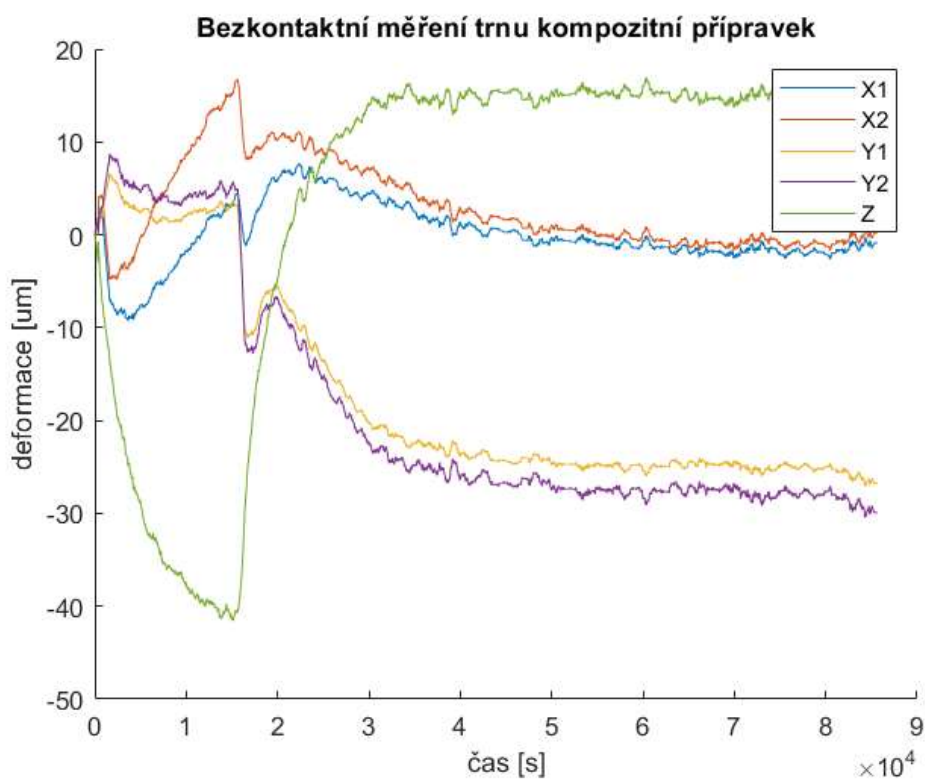


Obrázek 47 – Kontaktní měření deformace trnu s kompozitním přípravkem

Obrázky 48 a 49 ukazují výsledky bezkontaktního měření deformací zkušebního trnu. V případě snímačů na kompozitním přípravku byl použit vadný zdroj, který způsobil zašumění dat. Data byla vyhlazena filtrem, ale celkové vyhlazení nebylo možné, protože by došlo k jejich zkreslení v místech prudkých změn. Z tohoto důvodu se data naměřená na kompozitním přípravku jeví méně stabilní než data naměřená na kovovém přípravku, neodpovídá to však skutečnosti. Deformace v ose X je u obou přípravků podobná. V ose Y jsou hodnoty v první části také podobné pro oba přípravky, v druhé části však u kompozitního přípravku dochází k nárůstu měřené deformace. V této části již docházelo pouze k malým změnám teploty, deformace byly pravděpodobněji způsobeny tím, že kompozitní přípravek kvůli své větší šířce při měření částečně stál na topné manžetě, jak je vidět například na obrázku 41, a při měření docházelo k postupné silové deformaci manžety. V ose Z je deformace v případě kompozitního přípravku nižší přibližně o 20  $\mu\text{m}$ , to způsobuje právě minimalizace deformace samotného přípravku.



Obrázek 48 – Bezkontaktní měření deformace trnu s kovovým přípravkem



Obrázek 49 – Bezkontaktní měření deformace trnu s kompozitním přípravkem

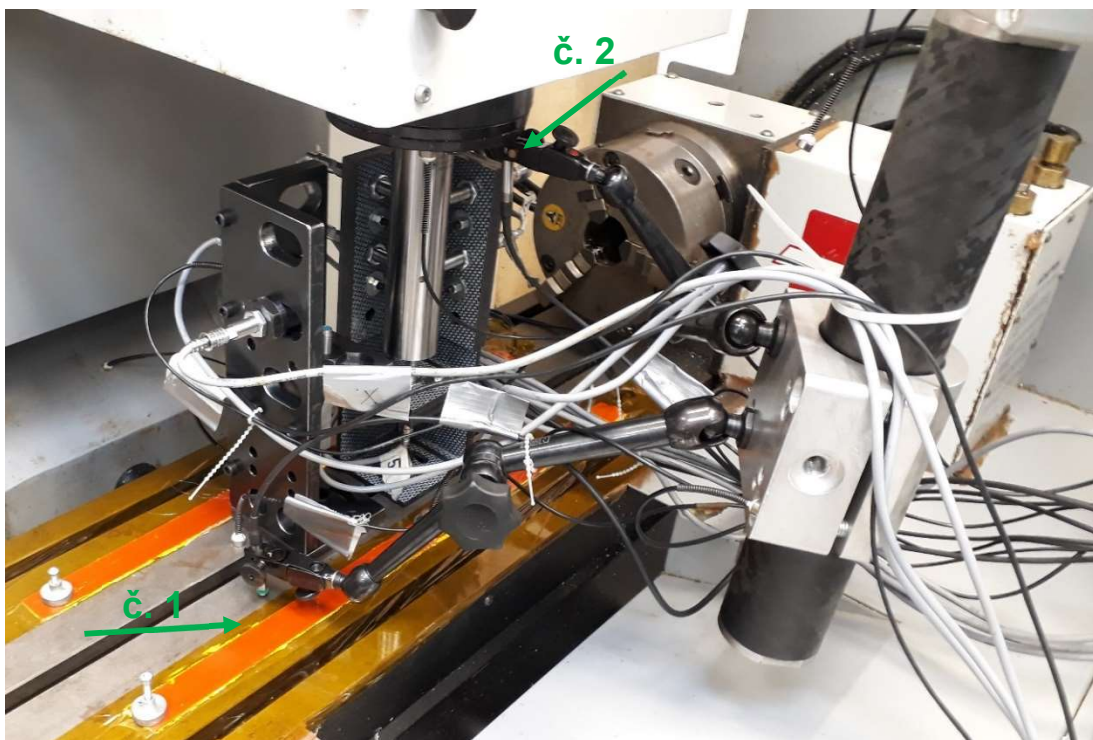


## 6.2. Měření s přejezdy

Při druhém měření byly oba přípravky upnuty najednou a zkušební trn mezi nimi po 10 minutách automaticky přejížděl pomocí NC programu. Proběhl jeden experiment pro výkon topných manžet 100 W. Nejprve bylo zapnuto měření, po dvou hodinách došlo ke spuštění NC programu a po prvním přejetí, které proběhlo po 10 minutách, byly spuštěny topné manžety. Za necelé čtyři hodiny byly topné manžety vypnuty a následovala fáze chladnutí. Během ní nejprve běžel NC program, který po 1,5 hodině skončil. Celý experiment včetně chladnutí trval přibližně 45 hodin. Ohřev a chladnutí jsou patrné na výsledných grafech, dále jsou tam patrné přejezdy trnu, protože pro čas, kdy byl zkušební trn v druhé poloze, jsou data vynechána.

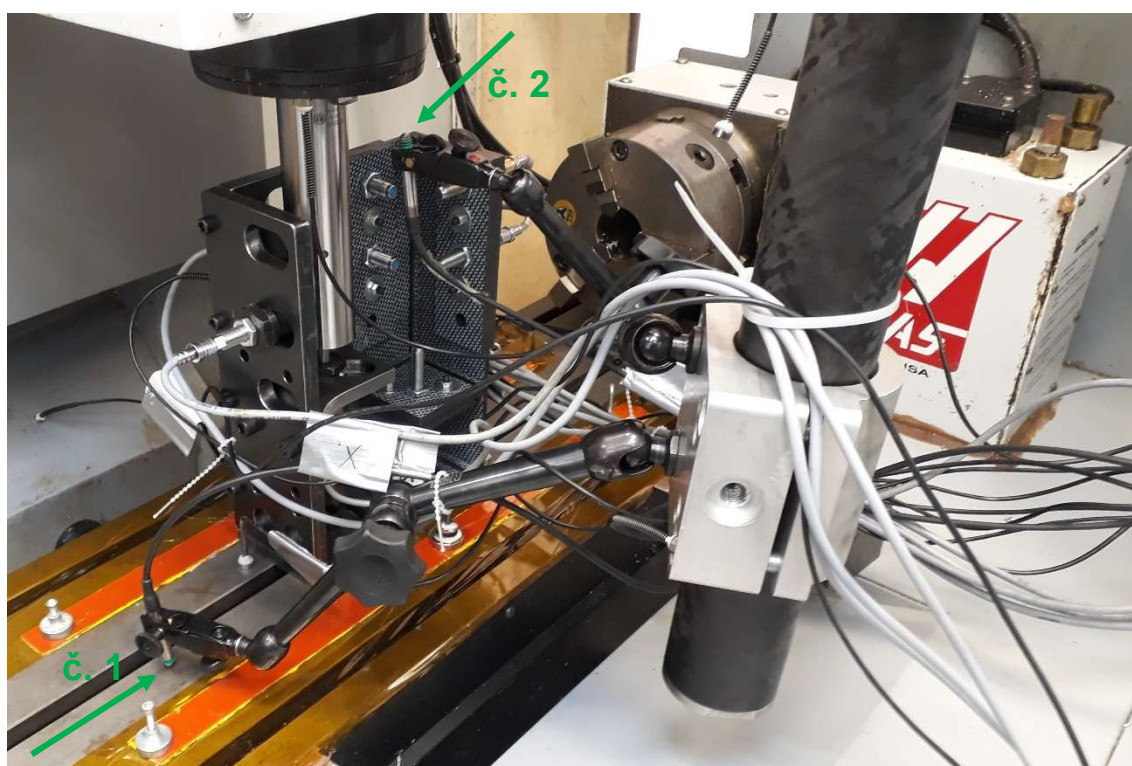
### 6.2.1. Umístění snímačů

Uspořádání experimentu a umístění snímačů je vidět na obrázcích 50 a 51. Na prvním z obrázků je trn v poloze v kompozitním přípravku a na druhém v kovovém přípravku.



Obrázek 50 – Uspořádání pracoviště pro měření přejezdů s trnem v kompozitním přípravku

Umístění snímačů teploty bylo téměř stejné jako u předchozího měření. První změnou je použití senzorů, které u prvního experimentu byly na přední a zadní stojně konstrukce, na měření teploty přípravků. Tato změna byla provedena, aby mohly být měřeny teploty na obou přípravných zároveň. Druhou změnou je měření teploty na zadní stěně přípravku místo na boční stěně, jako tomu bylo při prvním experimentu. Pozice snímačů na přípravných je stejná jako při prvním měření. Umístění ostatních teplotních senzorů je totožné s prvním měřením a bylo popsáno v kapitole 6.1.1.



Obrázek 51 – Uspořádání pracoviště pro měření přejezdů s trnem v kovovém přípravku

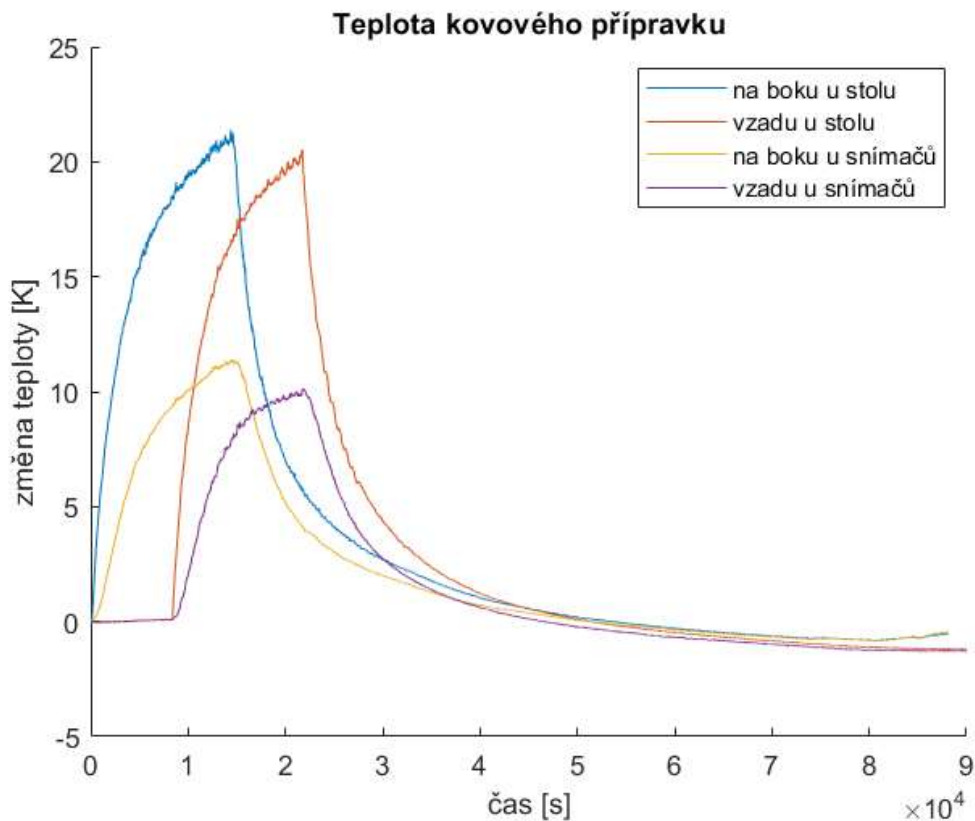
Pozice kontaktních senzorů deformací jsou na obrázcích 50 a 51 zobrazeny zeleně. Snímač č.1 měřil deformaci stolu stroje v ose Z a snímač č. 2 deformaci stroje u vřetene v ose Z, což je vlastně deformace trnu v ose Z, protože samotný trn se díky malým změnám teploty deformuje minimálně.

Umístění bezkontaktních snímačů v přípravných je stejné jako při prvním experimentu, které už bylo popsáno v kapitole 6.1.1. Jediným rozdílem je jiné natočení kompozitního přípravku. Kvůli tomu je trn v ose X měřen v záporném

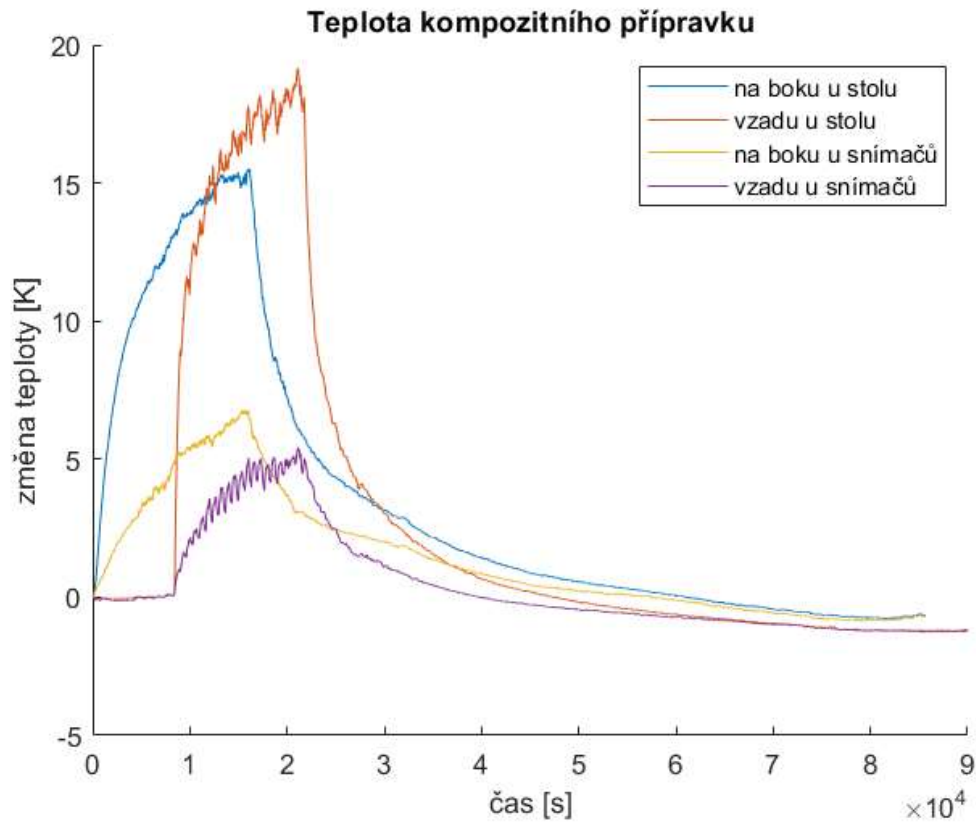
směru, na rozdíl od prvního měření, kde byl měřen v kladném směru. V ose Y byl trn měřen v obou případech v záporném směru.

### 6.2.2. Výsledky měření

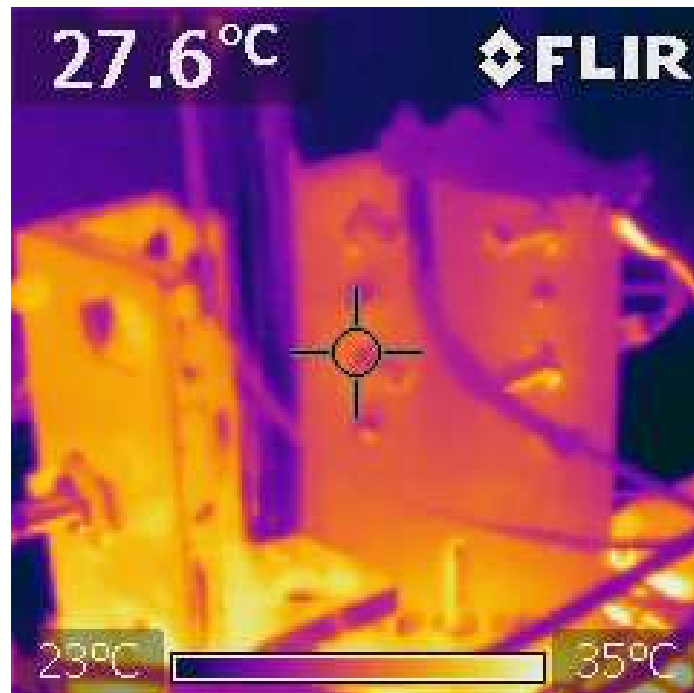
Výsledky získané ze snímačů teplot se od těch z prvního měření liší jen minimálně. Díky tomu, že při prvním experimentu byla teplota měřena na boční stěně přípravku a při druhém na zadní stěně, můžou být tyto teploty porovnány. Na obrázcích 52 a 53 je vidět, že rozdíl v teplotách na boční a zadní stěně je minimální. Přípravky se tedy prohřívají víceméně rovnoměrně a tím pádem se také rovnoměrně deformují. To, že kompozitní přípravek hůř vede teplo, jak bylo popsáno v kapitole 6.1.2., je vidět i na obrázku 54. Jedná se o snímek z termokamery pořízený během měření přejezdů. Je ho však nutné brát pouze ilustračně, protože kov a kompozit mají rozdílnou emisivitu a odčítání přesných teplot z termokamery tak není možné.



Obrázek 52 – Porovnání teplot kovového přípravku na boční a zadní stěně



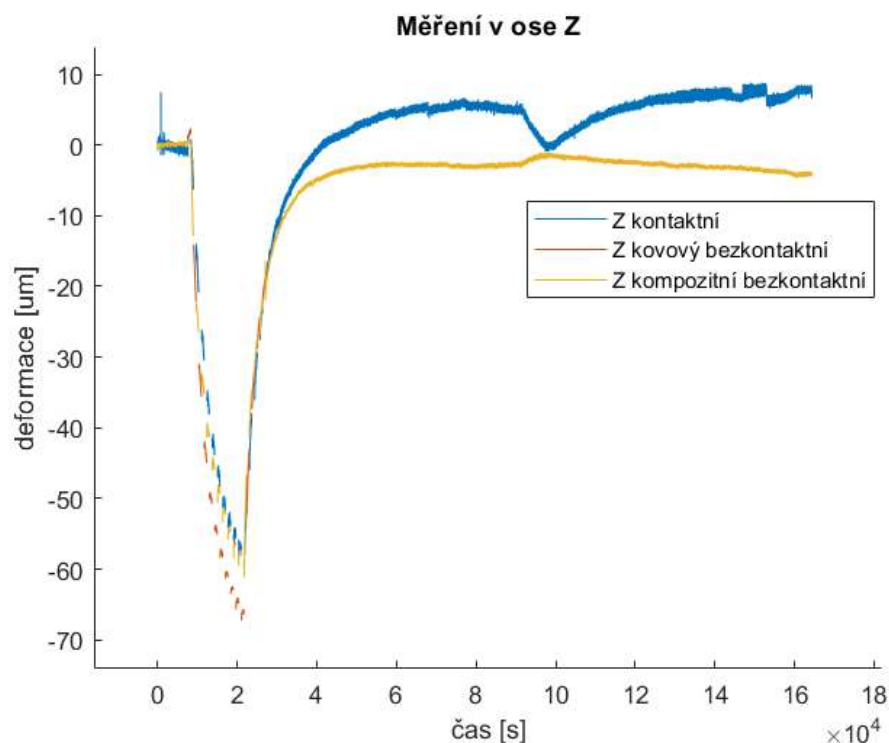
Obrázek 53 – Porovnání teplot kompozitního přípravku na boční a zadní stěně



Obrázek 54 – Snímek kovového přípravku (vlevo) a kompozitního přípravku (vpravo) z termokamery

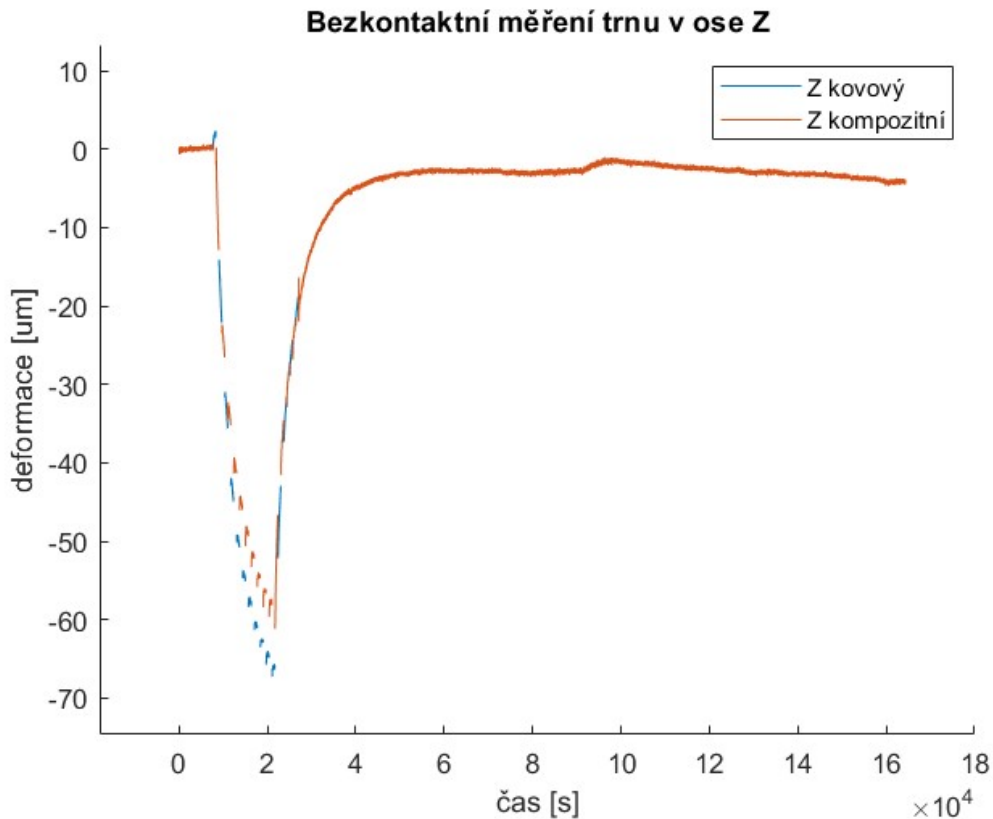


Rozdíl deformací stolu a trnu v ose Z naměřených kontaktními snímači z vnější konstrukce dává relativní změnu polohy těchto komponent. Při porovnání s hodnotami ze snímačů v přípravcích v ose Z lze určit, jak jsou tyto hodnoty zkresleny deformací přípravků. Pro druhé měření byl vyměněn elektrický zdroj na bezkontaktních snímačích v kompozitním přípravku za nový z důvodu velkého zašumění výstupního signálu ze senzorů. A nebylo tedy nutné na výsledná naměřená data použít filtr. Výsledky na obrázku 55 ukazují, že hodnoty naměřené na kompozitním přípravku se od teoreticky přesných hodnot z kontaktních snímačů liší pouze minimálně, v maximu o 1  $\mu\text{m}$ . Hodnoty z kovového přípravku se od přesných hodnot liší v maximu přibližně o 6 až 7  $\mu\text{m}$ . Z těchto výsledků tak také vyplývá, že se deformaci v ose Z v případě kompozitního přípravku podařilo minimalizovat.



Obrázek 55 – Měření trnu v ose Z při přejezdech

Na obrázku 56 jsou samostatně zobrazeny výsledky z bezkontaktních snímačů umístěných na přípravku v ose Z. V případě dat z kompozitního přípravku je naměřená deformace nižší, v maximu o 5 až 6  $\mu\text{m}$ . Snížení deformace je dáno nižší deformací samotného přípravku.



Obrázek 56 – Bezkontaktní měření trnu v ose Z při přejezdech

Data naměřená v osách X a Y jsou z důvodu nestabilního upnutí kompozitního přípravku na topné manžetě, které bylo zmíněno v kapitole 6.1.2., neprůkazná, a proto zde nejsou vyhodnocována.

### 6.3. Nejistoty měření

Obecný postup vyhodnocování nejistot i údaje o snímačích teplot a kontaktních a bezkontaktních snímačích deformací jsou převzaty z [3]. Vyhodnocovány jsou nejistoty typu B.

Jednotlivé standardní nejistoty se vypočítají podle vzorce (9), kam se dosadí rozsah odchylek  $\pm\Delta Z_{max}$  daného měření a  $m$  závisí na použitém druhu rozdělení. V této bakalářské práci je uvažováno Gaussovo rozdělení, pro které platí  $m = 2$ .

$$u_z = \frac{\Delta Z_{max}}{m} \quad (9)$$

Po určení všech jednotlivých nejistot  $u_{zi}$  se podle vzorce (10) vypočítá výsledná standardní nejistota typu B.

$$u_B = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_{zi}^2} \quad (10)$$

Celková nejistota měření se určí rozšířením standardní nejistoty dle rovnice (11). Koeficient rozšíření  $k_B = 2$  pro Gaussovo rozdělení pokrývá 95 % odchylek.

$$U = k_B \cdot u_B \quad (11)$$

### 6.3.1. Nejistota při měření teplot

Výpočty jsou prováděny pro rozsah měřených teplot 27 °C. První uvažovaná je nejistota v důsledku odchylek dle platného kalibračního listu čidla, pro kterou se  $\Delta Z_{max}$  vypočte podle následující rovnice, kde T je rozsah teplot při daném měření.

$$\Delta Z_{max} = 0,15 + 0,002 \cdot |T| \quad (12)$$

Pro měření v rámci této bakalářské práce tedy:

$$\Delta Z_{max} = 0,15 + 0,002 \cdot |27| = 0,2 \text{ K} \quad (13)$$

Nejistota se poté vypočte podle rovnice (9).

$$u_{z1}(T) = \frac{0,2}{2} = 0,1 \text{ K} \quad (14)$$

Druhá vyhodnocovaná je nejistota související s nedokonalostí měřicího zařízení, kde je nepřesnost uvažována jako 0,1 % z měřené hodnoty. Pro uvedený rozsah měřených teplot je tedy  $\Delta Z_{max} = 0,027 \text{ °C}$  a nejistota se vypočítá opět podle rovnice (9).

$$u_{z2}(T) = \frac{0,027}{2} = 0,014 \text{ K} \quad (15)$$

Výsledná standardní nejistota je poté určena na základě obou vyhodnocovaných nejistot pomocí rovnice (10). Při výpočtu je zanedbána chyba

čtení (nejmenší hodnota zaznamenané teploty), protože její velikost je v porovnání se dvěma výše vypočtenými nejistotami zanedbatelná.

$$u_B(T) = \sqrt{(u_{z1}(T))^2 + (u_{z2}(T))^2} = \sqrt{0,1^2 + 0,014^2} = 0,1 \text{ K} \quad (16)$$

A celková nejistota měření teploty se stanoví podle (11).

$$U(T) = 2 \cdot 0,1 = 0,2 \text{ K} \quad (17)$$

### 6.3.2. Nejistota při měření deformací

Výpočty jsou prováděny pro rozsah měřených deformací 120  $\mu\text{m}$ . První uvažovaná nejistota je nejistota v důsledku odchylek použitých snímačů dle platného kalibračního listu. Chyba linearit je pro kontaktní i bezkontaktní snímače polohy  $\leq 1 \%$  z měřené hodnoty, proto tedy  $\Delta Z_{max} = 1,2 \mu\text{m}$ . Nejistotu lze poté určit pomocí rovnice (9).

$$u_{z1}(\Delta) = \frac{1,2}{2} = 0,6 \mu\text{m} \quad (18)$$

Druhá vyhodnocovaná je nejistota související s nedokonalostí měřicího zařízení. Nepřesnost je 0,3 % z měřené hodnoty pro použité kontaktní i bezkontaktní snímače. Odchylka je proto pro oba druhy snímačů stejná  $\Delta Z_{max} = 0,36 \mu\text{m}$ . Nejistota se opět určí za použití rovnice (9).

$$u_{z2}(\Delta) = \frac{0,36}{2} = 0,18 \mu\text{m} \quad (19)$$

Výsledná standardní nejistota se znovu určí pomocí rovnice (10). Při výpočtu je zanedbána nejistota v důsledku tepelných vlivů.

$$u_B(\Delta) = \sqrt{(u_{z1}(\Delta))^2 + (u_{z2}(\Delta))^2} = \sqrt{0,6^2 + 0,18^2} = 0,63 \mu\text{m} \quad (20)$$

A celková nejistota měření deformací pro oba typy snímačů se určí podle rovnice (11).

$$U(\Delta) = 2 \cdot 0,63 = 1,3 \mu\text{m} \quad (21)$$



## 7. Závěr

Cílem této bakalářské práce byl návrh přípravku pro upnutí snímačů deformací z kompozitního materiálu na bázi uhlíkových vláken s velmi malou teplotní roztažností za účelem zvýšení přesnosti měření teplotních deformací obráběcích strojů.

V rámci rešerše proběhlo základní seznámení s problematikou sdílení tepla, teplotní roztažnosti materiálů a kompozitních materiálů. Dále bylo popsáno sdílení tepla v obráběcích strojích a zkoušky tepelných vlivů na obráběcí stroje podle normy ISO 230-3 [1]. Byly zde uvedeny také snímače a přípravky používané pro měření teplotních deformací obráběcích strojů.

V praktické části došlo nejprve k návrhu přípravku z kompozitního materiálu. Jako hlavní konstrukční omezení se projevil fakt, že k dispozici byly pro návrh pouze tenké desky tloušťky 5 milimetrů. Velký důraz při návrhu musel být tedy kladen na zajištění dostatečné tuhosti přípravku. Základ konstrukce tvořily čtyři na sebe kolmé desky spojené pomocí zámků a lepených spojů. Vyztužení konstrukce dále proběhlo pomocí desek pro upnutí snímačů a desky pro přišroubování přípravku ke stolu stroje. V místě spojení jednotlivých desek byly umístěny lepené profily vyrobené rovněž z kompozitního materiálu.

Přípravek byl vyroben Ústavem výrobních strojů a zařízení na třiosém horizontálním frézovacím centru Tajmac H630. Po zhotovení jednotlivých dílů byl přípravek sestaven a slepen.

Následně proběhly dva experimenty pro porovnání běžného kovového a navrženého kompozitního přípravku. Měření byla realizována na stroji Haas Toolroom Mill TM-1HE na Ústavu výrobních strojů a zařízení. Při prvním experimentu se měřilo s každým přípravkem samostatně, během druhého měření byly na stole stroje oba přípravky najednou a trn mezi nimi přejížděl. Při obou experimentech byly měřeny teploty, absolutní deformace kontaktními snímači z vnější konstrukce a relativní deformace bezkontaktními snímači v přípravku.



Výsledky měření teplot byly pro oba experimenty stejné, vyplývá z nich, že kompozitní přípravek vede hůře teplo, což je důležitý předpoklad pro nižší teplotní deformaci tohoto přípravku. Dále bylo zjištěno, že průběh teplot v čase je v obou bočnicích přípravků téměř stejný. Díky tomu lze říci, že deformace přípravku je pro obě bočnice také stejná.

Během prvního experimentu bylo kontaktním měřením z vnější konstrukce zjištěno, že deformaci kompozitního přípravku v ose Z se v porovnání s kovovým přípravkem podařilo minimalizovat. Snížení deformace přípravku se projevuje také na výsledcích z bezkontaktních snímačů v ose Z, kde je deformace v případě kompozitního přípravku nižší. V osách X a Y jsou výsledky pro oba přípravky podobné.

Při druhém měření byly v ose Z porovnány přesné hodnoty relativní deformace mezi stolem stroje a trnem z kontaktních snímačů a hodnoty z bezkontaktních snímačů v přípravcích. Výsledkem je, že hodnoty z kompozitního přípravku jsou mnohem bližší přesným hodnotám než hodnoty z kovového přípravku.

V rámci bakalářské práce se tedy podařilo navrhnout a vyrobit kompozitní přípravek, který má v porovnání s běžnými přípravky minimální teplotní roztažnost. Pro statická měření se ukázal jako vhodný. Při měření s pohybem stroje jsou výsledky z kompozitního přípravku lepší v ose Z díky jeho minimální teplotní roztažnosti, v osách X a Y jsou výsledky neprůkazné kvůli nestabilnímu upnutí přípravku.

## Seznamy

### Seznam použité literatury

- [1] ISO 230-3. *Test code for machine tools – Part 3: Determination of thermal effects*. Geneva: International Organisation for Standardisation, 2018. 48 s.
- [2] NOŽIČKA, Jiří. *Základy termomechaniky*. 1. vydání. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2001. 187 s. ISBN 80-01-02409-1.
- [3] MAREŠ, Martin. *Modelování teplotně mechanických systémů frekvenčními přenosovými funkcemi : disertační práce*. Praha: ČVUT Fakulta strojní, 2014. 131 s.
- [4] KOVAŘÍK, Petr. *Sdílení tepla* [online]. Plzeň: ZČU Fakulta strojní [cit. 2022-10-23]. Dostupné z WWW: <http://home.zcu.cz/~kovarikp/TM/cviceni/sdileni.pdf>
- [5] LUPTÁK, Ladislav; ŠMARDA, Lubomír. *Vytápění* [online]. Brno: Střední škola polytechnická, 2016 [cit. 2022-10-30]. Dostupné z WWW: <https://publi.cz/books/170/04.html>
- [6] INCROPERA, Frank P.; DEWITT David P.; BERGMAN, Theodore L.; LAVINE, Adrienne S. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 6. vydání. New York: John Wiley & Son, 2002. 981 s. ISBN 04-7138-650-2.
- [7] HOREJŠ, Otakar. *Teplotně-mechanické chování výrobních strojů z pohledu konstrukce, modelování a měření*. Praha: ČVUT Fakulta strojní, 2022.
- [8] FUFÁEV, Alexander. *Formulary of Physics* [online]. [cit. 2022-11-06]. Dostupné z WWW: <https://en.universaldenker.org/formulas/831>
- [9] KRATINA, Jakub. *Lineární teplotní roztažnost materiálů* [online]. [cit. 2022-12-11]. Dostupné z WWW: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/linearni-teplotni-roztaznost-mateialu>
- [10] SERWAY, Raymond A.; JEWETT, John W. *Physics for Scientists and Engineers*. 6. vydání. Monterey: Thomson Brooks/Cole, 2004. 1296 s. ISBN 0534408427.

- [11] BÁRTA, P. *Frekvenční přenosové funkce v termomechanice (Frequency Transfer Function in Thermomechanics)*. Praha: Disertační práce, ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav mechaniky tekutin a energetiky, 2008, 83 s.
- [12] UHLÍŘ, Ivan; NOVÁK, Jaroslav; ŠŤASTNÝ, Jiří; NOVÁK, Lukáš; VLČEK, Josef. *Elektrické stroje a pohony*. 2. vydání. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2002. 137 s. ISBN 978-80-01-03730-0.
- [13] MÁDL, Jan; KAFKA, Jindřich; VRABEC, Martin; DVOŘÁK, Rudolf. *Technologie obrábění*. 2. vydání. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2007. 245 s. ISBN 978-80-01-03752-2.
- [14] HOREJŠ, Otakar; MAREŠ, Martin. *Měření teplot a deformací stroje za provozu II*. Praha: ČVUT Fakulta strojní, 2021.
- [15] KULICHOVÁ, Jana. *Metody pro stanovení výrobní přesnosti CNC frézky a aplikace vybrané metody : bakalářská práce*. Praha: ČVUT Fakulta strojní, 2021. 85 s.
- [16] DIVÍŠEK, Daniel. *Model teplotních deformací stroje a frézovacího nástroje zohledňující vliv řezného procesu : diplomová práce*. Praha: ČVUT Fakulta strojní, 2021. 99 s.
- [17] PÍCHA, Petr. *Zahrnutí vlivu různých vřetenových jednotek do teplotně-mechanického modelu frézovacího centra : bakalářská práce*. Praha: ČVUT Fakulta strojní, 2019. 73 s.
- [18] *Stools* [online]. [cit. 2022-12-10]. Dostupné z WWW: [https://www.stools-shop.cz/3d-taster-haimer-analogovy-univerzalni/?gclid=CjwKCAiA-dCcBhBQEiwAeWidtcn\\_pl-tmzPI0SITQkiWuYiMGZzzYkpCBwOmTaF\\_AVUTwStNuillrBoCSzEQAvD\\_BwE](https://www.stools-shop.cz/3d-taster-haimer-analogovy-univerzalni/?gclid=CjwKCAiA-dCcBhBQEiwAeWidtcn_pl-tmzPI0SITQkiWuYiMGZzzYkpCBwOmTaF_AVUTwStNuillrBoCSzEQAvD_BwE)
- [19] NOVÁK, Martin. *Technická měření*. 1. vydání. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2018. 234 s. ISBN 978-80-01-06388-0
- [20] *RDP* [online]. [cit. 2022-12-10]. Dostupné z WWW: <https://www.rdpe.com/ex/men-disp.htm>
- [21] FÚSEK, Jakub. *Měřicí stanice v automatické obráběcí lince : diplomová práce*. Brno: VUT Fakulta strojního inženýrství, 2018. 71 s.

- [22] *Wiktori* [online]. [cit. 2022-12-10]. Dostupné z WWW:  
<https://www.wiktori.cz/merici-sondy.html>
- [23] JENČÍK, Josef; VOLF, Jaromír. *Technická měření*. 2. vydání. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2003. 212 s. ISBN 80-01-02138-6
- [24] *Heidenhain* [online]. [cit. 2022-12-10]. Dostupné z WWW:  
<https://www.heidenhain.com/products/length-gauges/metro>
- [25] *WayCon* [online]. [cit. 2022-12-10]. Dostupné z WWW:  
<https://www.waycon.biz/products/eddy-current-probe/>
- [26] NOVÁK, Martin. *Snímače polohy, rozměrů otáček*. Praha: ČVUT Fakulta strojní.
- [27] *StatusPro* [online]. [cit. 2022-12-11]. Dostupné z WWW: <https://www.laser-interferometers.com>
- [28] *Itax* [online]. [cit. 2022-12-11]. Dostupné z WWW:  
<https://www.itax.cz/eshop/kontrolni-trny/kontrolni-trn-sk-30-32-x-300-mm-presnost-0-003-mm>
- [29] CLYNE, Trevor William; HULL, Derek. *An Introduction to Composite Materials*. 3. vydání. Cambridge: Cambridge University Press, 2019. 345 s. ISBN 978-0-521-86095-6.
- [30] NOŽIČKA, Jiří. *Sdílení tepla*. 1. vydání. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 1998. 238 s. ISBN 80-01-01599-8.
- [31] MAYR, Josef; JEDRZEJEWSKI, Jerzy; UHLMANN, Eckart; DONMEZ, M. Alkan; KNAPP, Wolfgang; HÄRTIG, Frank; WENDT, Klaus; MORIWAKI, Toshimichi; SHORE, Paul; SHMITT, Robert; BRECHER, Christian; WÜRZ, Timo; WEGENER, Konrad. *Thermal issues in machine tools* [online]. CIRP Annals – Manufacturing technology, 2012, sv. 61, č. 2, s. 771-791, [cit. 2023-01-02]. Dostupné z WWW:  
[https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850612002077?casa\\_token=v7mlpzaHAIAAAAAA:SPu5u3KQECpavISBTOkzEkKM066goYkZaJSFbquNeBZr22aTJbXtZbxYCZ81LcR53uh4emcL7w](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850612002077?casa_token=v7mlpzaHAIAAAAAA:SPu5u3KQECpavISBTOkzEkKM066goYkZaJSFbquNeBZr22aTJbXtZbxYCZ81LcR53uh4emcL7w)
- [32] ZÍTEK, Adam. *Kompozity s uhlíkovými vlákny : bakalářská práce*. Praha: ČVUT Fakulta strojní, 2018. 38 s.

- [33] MIKULA, Martin. *Kompozitní materiály na bázi uhlíkových vláken* :  
*Bakalářská práce*. Brno: VUT Fakulta strojního inženýrství, 2012. 61 s.
- [34] ISO/TR 230-11. *Test code for machine tools – Part 11: Measuring  
instruments suitable for machine tool geometry tests*. Geneva:  
International Organisation for Standardisation, 2018. 127 s.
- [35] Z-POXY – 5minutové epoxidové lepidlo (118 ml) [online]. [cit. 2023-07-11].  
Dostupné z WWW: <https://www.peckamodel.cz/5mb61pt-37-z-poxy-5min-118ml-4fl-oz-5min-epoxy>
- [36] KAVAN Epoxy – 30minutové epoxidové lepidlo (25 ml) [online]. [cit. 2023-07-11]. Dostupné z WWW: <https://www.peckamodel.cz/kav9965-cz-kavan-epoxy-30min-25ml-davkovac>
- [37] MINCO [online]. [cit. 2023-07-11]. Dostupné z WWW:  
<https://www.minco.com/catalog/?catalogpage=product&cid=root&id=HR6852A>
- [38] PS electronic [online]. [cit. 2023-07-11]. Dostupné z WWW:  
<https://www.pselectronic.cz/k5501-0323-autotrafo-regulacni-2000va.html>
- [39] MESING [online]. [cit. 2023-07-11]. Dostupné z WWW:  
[https://www.mesing.cz/download/mesing/katalog\\_snimacu.pdf](https://www.mesing.cz/download/mesing/katalog_snimacu.pdf)
- [40] MC-monitoring [online]. [cit. 2023-07-11]. Dostupné z WWW: <https://mc-monitoring.com/products-service/sensors-2/smart-proximity-probes/>
- [41] National Instruments [online]. [cit. 2023-07-11]. Dostupné z WWW:  
<https://www.ni.com/cs-cz/support/model.crio-9014.html>

## Seznam použitého softwaru

Microsoft Word 365

Autodesk Inventor Professional 2021

MATLAB R2021b

LabVIEW 2018

## Seznam obrázků

Obrázek 1 – Vedení tepla [4].....	14
Obrázek 2 – Sdílení tepla konvekcí [5].....	15
Obrázek 3 – Sdílení tepla zářením [7].....	16
Obrázek 4 – Znázornění lineární teplotní roztažnosti [8].....	17
Obrázek 5 – Příklady struktury kompozitních materiálů [29] .....	19
Obrázek 6 – Znázornění teplotních deformací obráběcích strojů [11].....	20
Obrázek 7 – Rozložení odvodu tepla v závislosti na řezné rychlosti [13].....	21
Obrázek 8 – Příklady zdrojů a propadů tepla v obráběcím stroji a jeho okolí [14] .....	22
Obrázek 9 – Typické uspořádání pro zkoušku chyby vzniklé kolísáním teploty okolního prostředí (ETVE) a zkoušku teplotních deformací způsobených rotací vřetena [15] .....	24
Obrázek 10 – Zkouška teplotních deformací způsobených rotací vřetena [7]..	26
Obrázek 11 – Typické uspořádání zkoušky teplotních deformací způsobených lineárním pohybem součásti [15].....	27
Obrázek 12 – Typické uspořádání pro zkoušku teplotních deformací způsobených rotačním pohybem součástí [1] .....	29
Obrázek 13 – Příklad měřicích pozic při zkoušce teplotních deformací způsobených rotačním pohybem součástí [1] .....	29
Obrázek 14 – Mechanický senzor deformací [18] .....	30
Obrázek 15 – Příklady LVDT snímačů [20] .....	31
Obrázek 16 – Dotyková sonda [22].....	31
Obrázek 17 – Inkrementální snímač polohy [24].....	32
Obrázek 18 – Snímače na principu vířivých proudů [25].....	33
Obrázek 19 – Kapacitní snímače [26] .....	33
Obrázek 20 – Měření polohy laser-interferometrem [27].....	34
Obrázek 21 – Přípravek s upnutými snímači a kontrolním trnem [7].....	35
Obrázek 22 – Přesný kontrolní trn [28].....	36
Obrázek 23 – Zkušební kulové přípravky při měření teplotních deformací [7] .	36
Obrázek 24 – Tepelné ovlivnění přípravků při měření teplotních deformací [7]	36



Obrázek 25 – Kompozitní desky .....	37
Obrázek 26 – Použité epoxidové lepidlo .....	38
Obrázek 27 – Spojení desek pomocí zámků      Obrázek 28 – Základní konstrukce přípravku .....	39
Obrázek 29 – První poloha pro upnutí snímačů      Obrázek 30 – Druhá poloha pro upnutí snímačů .....	40
Obrázek 31 – Šroubový spoj .....	40
Obrázek 32 – Základní konstrukce přípravku s přídavnými deskami zepředu .	41
Obrázek 33 – Základní konstrukce přípravku s přídavnými deskami zezadu...	42
Obrázek 34 – Kompletní model přípravku zepředu .....	43
Obrázek 35 – Kompletní model přípravku zezadu .....	43
Obrázek 36 – Výroba dílů .....	44
Obrázek 37 – Díly po dokončení výroby .....	45
Obrázek 38 – Vyrobený a sestavený přípravek.....	45
Obrázek 39 – Použitý stroj během přípravy měření s vyznačenými strojními osami .....	47
Obrázek 40 – Pohled z dálky na uspořádání pracoviště pro samostatné měření .....	49
Obrázek 41 – Detail upnutého přípravku při samostatném měření .....	50
Obrázek 42 – Časový průběh teploty ve stolu a kovovém přípravku.....	51
Obrázek 43 – Časový průběh teploty ve stolu a kompozitním přípravku.....	52
Obrázek 44 – Kontaktní měření deformace kovového přípravku v ose Z.....	53
Obrázek 45 – Kontaktní měření deformace kompozitního přípravku v ose Z... 53	
Obrázek 46 – Kontaktní měření deformace trnu s kovovým přípravkem.....	54
Obrázek 47 – Kontaktní měření deformace trnu s kompozitním přípravkem ...	55
Obrázek 48 – Bezkontaktní měření deformace trnu s kovovým přípravkem ....	56
Obrázek 49 – Bezkontaktní měření deformace trnu s kompozitním přípravkem .....	56
Obrázek 50 – Uspořádání pracoviště pro měření přejezdů s trnem v kompozitním přípravku .....	57
Obrázek 51 – Uspořádání pracoviště pro měření přejezdů s trnem v kovovém přípravku .....	58





---

Obrázek 52 – Porovnání teplot kovového přípravku na boční a zadní stěně ...	59
Obrázek 53 – Porovnání teplot kompozitního přípravku na boční a zadní stěně .....	60
Obrázek 54 – Snímek kovového přípravku (vlevo) a kompozitního přípravku (vpravo) z termokamery .....	60
Obrázek 55 – Měření trnu v ose Z při přejezdech .....	61
Obrázek 56 – Bezkontaktní měření trnu v ose Z při přejezdech .....	62

## Seznam tabulek

Tabulka 1 – Součinitele teplotní roztažnosti [6], [8], [29] .....	18
---	----

## Seznam příloh

### Výkresová dokumentace

BP0293-01

BP0293-01-01

BP0293-01-02

BP0293-01-03

BP0293-01-04

BP0293-01-05

BP0293-01-06

BP0293-01-07

BP0293-01-08

BP0293-01-09

BP0293-01-10

BP0293-02



BP0293-02-01

BP0293-02-02

### **Elektronické přílohy**

Složka Modely – obsahuje modely v programu Autodesk Inventor Professional 2021, jednotlivé komponenty přípravku ve formátu .ipt a sestavy obou dvou verzí přípravku ve formátu .iam

Složka Výkresy – obsahuje kompletní výkresovou dokumentaci ve formátu .pdf a v programu Autodesk Inventor Professional 2021 ve formátu .idw

Textová část bakalářské práce ve formátu .pdf a .docx

Prezentace bakalářské práce ve formátu .pdf a .docx