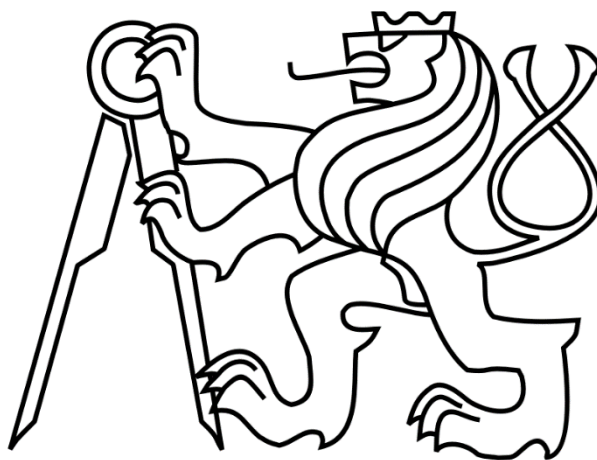


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Diplomová práce

Validace kompenzačního modelu teplotních chyb pomocí testovacího obrobku

Bc. Marek Valenta

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Valenta** Jméno: **Marek** Osobní číslo: **488494**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav výrobních strojů a zařízení**
Studijní program: **Robotika a výrobní technika**
Specializace: **Výrobní technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Validace kompenzačního modelu teplotních chyb pomocí testovacího obrobku

Název diplomové práce anglicky:

Validation of a thermal error compensation model using a test piece

Pokyny pro vypracování:

Popis tématu: Bude navržen testovací obrobek pro posouzení zvýšení přesnosti frézovacího centra MCU 700 aplikací existujícího kompenzačního modelu teplotních chyb. Realizace obrábění testovacího obrobku bez a s aktivním kompenzačním modelem teplotních chyb (teplotní kompenzací). Vyhodnocení přínosu teplotní kompenzace na základě získaných dat z obrobeného testovacího obrobku.; Osnova práce: 1. Rešerše testovacích obrobků pro zjišťování teplotních chyb obráběcích strojů a validaci teplotních kompenzačních modelů. 2. Návrh testovacího obrobku pro posouzení zvýšení přesnosti frézovacího centra MCU 700 pomocí kompenzačního modelu teplotních chyb. 3. Příprava experimentu a obrábění testovacího kusu. 4. Vyhodnocení přínosu teplotní kompenzace na základě naměřených dat z obrobeného testovacího kusu.; Rozsah grafické části: Návrh testovacího obrobku. Grafické znázornění naměřených dat z obrobku a jejich vzájemné porovnání. Grafy popisující zhodnocení přínosu kompenzačního modelu teplotních chyb.; Rozsah textové části: 60-80 stran;

Seznam doporučené literatury:

Wiessner, M. et al. Thermal test piece for 5-axis machine tools. Precision Engineering. 2018, 52 (2018), 407–417, ISSN 0141-6359; Mayr, J. et al. Thermal issues in machine tools. CIRP Ann.Manuf. Technol. 2012, 61 (2), 771–791. ISSN 0007-8506; Ibaraki, S., Ota, Y. A machining test to calibrate rotary axis error motions of five-axis machine tools and its application to thermal deformation test. International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2014, 86 (2014), 81–88.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

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

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

Platnost zadání diplomové 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

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou 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

Tímto bych chtěl poděkovat mému vedoucímu práce panu doc. Ing. Otakaru Horejšovi, Ph.D. za věcné rady, čas, odbornost a zájem, který diplomové práci věnoval. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Martinu Marešovi, Ph.D. za připomínky, co se týče praktické části, panu Ing. Michalovi Stejskalovi za konzultace ohledně konstrukční a technologické části a v neposlední řadě paní Mgr. Barboře Hauptfleischové za rady zabývající se simulační částí. Poslední poděkování patří mé rodině a mým blízkým, kteří mě ve studiu neustále podporovali a dali mi možnost dokončit studium.

Anotace

Jméno autora:	Marek Valenta
Název diplomové práce:	Validace kompenzačního modelu teplotních chyb pomocí testovacího obrobku
Rozsah práce:	105 str., 55 obr., 20 tab.
Školní rok vyhotovení:	2023
Škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	Ú12135 – Ústav výrobních strojů a zařízení
Vedoucí diplomové práce:	doc. Ing. Otakar Horejš, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Martin Mareš, Ph.D.
Zadavatel:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Využití:	Validace kompenzačních modelů teplotních chyb.
Klíčová slova:	Teplotní kompenzace, obrábění, frézování, testovací obrobek, teplotní deformace
Anotace:	Diplomová práce je zaměřená na konstrukci testovacího obrobku vhodného k validaci kompenzačního modelu teplotních chyb na obráběcím stroji. Testovací obrobek byl navržen, obroben a následně byl vyhodnocen přínos kompenzačního modelu teplotních chyb na základě obrobeného testovacího obrobku.

Annotation

Author:	Marek Valenta
Title of master thesis:	Validation of a thermal error compensation model using a test piece.
Extent:	105 p., 55 fig, 20 tab.
Academic year:	2023
University:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Ú12135 – Department of Production Machines and Equipment
Supervisor:	doc. Ing. Otakar Horejš, Ph.D.
Consultant:	Ing. Martin Mareš, Ph.D.
Submitter of the Theme:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Application:	Validation of thermal compensation models.
Key words:	Thermal compensation, cutting process, milling, test piece, thermal deformation
Annotation:	The diploma thesis is focused on construction of the test piece suitable for validation of thermal error compensation model on a machine tool. The test piece was proposed, milled during the diploma thesis. The contribution of the thermal error compensation model is evaluated based on the machined test workpiece.



Obsah

Seznam použitých zkratk	9
Seznam použitých veličin a symbolů	9
1 Úvod	13
2 Cíle práce	14
3 Úvod do problematiky teplotního chování OS	15
3.1 Volumetrická chyba	15
3.2 Úvod do sdílení tepla	16
3.2.1 Kondukce	16
3.2.2 Konvekce	16
3.2.3 Radiace	17
3.3 Faktory ovlivňující teplotně zatížený OS	18
3.3.1 Vnitřní zdroje tepla	19
3.3.2 Vnější zdroje tepla	20
3.4 Shrnutí problematiky teplotního chování	20
4 Kompenzační modely teplotních chyb	21
4.1 Přímé metody kompenzace	23
4.2 Nepřímé metody kompenzace	24
4.2.1 Frekvenční přenosová funkce	25
5 Rešerše testovacích obrobků k zjištění teplotních chyb OS	27
5.1 Požadavky pro evaluaci	27
5.2 Testovací obrobek ve tvaru pyramidy	28
5.3 Kruhový testovací obrobek	30
5.4 Příklady testovacích obrobků z ČVUT v Praze	32
5.4.1 Testovací obrobek obdélníkového tvaru pro osu Z	32
5.4.2 Testovací obrobek ve tvaru kvádra	33
5.4.3 Kruhový testovací obrobek pro karuselový OS	34
5.5 Stav OS před obrobením testovacího obrobku	35
5.6 Řezný proces	35
5.7 Konečné zhodnocení testovacích obrobků	37
6 Návrh testovacího obrobku	40
6.1 Polotovár testovacího obrobku	40
6.2 Frézka MCU 700	42
6.3 Dokončovací fréza	42
6.4 Obecný popis konstrukce testovacího obrobku	43
6.4.1 Testovací obrobek č.1. „zuby zaoblené zkosené“	46
6.4.2 Testovací obrobek č.2 „zuby s vnitřním vybráním“	47
6.4.3 Testovací obrobek č.3. „schody“	48
6.4.4 Testovací obrobek č.4. „symetrické schody“	49
6.4.5 Testovací obrobek č.5. „zuby“	50
6.4.6 Testovací obrobek č.6. „zaoblené zuby“	51
6.4.7 Testovací obrobek č.7. „úkopy“	52



6.4.8	Testovací obrobek č.8. „všeobecný“	53
7	Výběr testovacího obrobku	55
7.1	Parametry hodnocení	55
7.1.1	Čas obrábění	55
7.1.2	Možnost budoucího použití obrobku	59
7.1.3	Počet evaluačních ploch	59
7.1.4	Řzná rychlost	60
7.1.5	Plocha třísky	62
7.1.6	Síly v obráběcím procesu	64
7.2	Výsledné zhodnocení výběru testovacího obrobku	67
7.3	Obráběcí experiment	68
7.3.1	Měřicí aparatura	70
7.3.2	Průběh měření	71
7.3.3	Měření deformací	73
7.3.4	Závěr obrábění testovacího obrobku	74
8	Vyhodnocení naměřených dat na testovacím obrobku	75
8.1.1	Úprava naměřených dat	76
8.2	Porovnání měření na SMS s měřením přímo na stroji.....	77
8.3	Vyhodnocení kompenzačního modelu teplotních chyb stroje MCU 700.....	79
8.3.1	Kompenzační model při použité emulzi	79
8.3.2	Kompenzační model bez použité emulze	82
8.3.3	Shrnutí vyhodnocení kompenzačního modelu	84
8.3.4	Zlepšovací návrhy.....	85
8.4	Opakovatelnost měření	85
8.5	Použití emulze.....	87
8.5.1	Srovnání bez použití kompenzačního modelu	88
8.6	Opotřebení nástroje	89
8.7	Statistické vyhodnocení experimentů	90
9	Závěr	93
	Seznamy	95
	Seznam obrázků	95
	Seznam tabulek.....	98
	Seznam použité literatury	103
	Seznam použitého softwaru	104
	Seznam příloh	105



Seznam použitých zkratk

Zkratka	Význam
CNC	Computer numerical numerical control
MKP	Metoda konečných konečných prvků
OS	Obráběcí stroj
PF	Přenosová funkce
SMS	Souřadnicový měřící stroj
TPC	Tool center point

Seznam použitých veličin a symbolů

Symbol	Jednotka	Název
a	$[-]$	absorbce
a_n	$[\mu m \cdot s^n \cdot K^{-1}]$	váhový koeficient vstupu do systému přenosové funkce
a_p	$[mm]$	hloubka třísky
b_m	$[s^m]$	váhový koeficient výstupu ze systému přenosové funkce
C_{Fc}	$[-]$	empirická konstanta pro řeznou sílu
C_{Ff}	$[-]$	empirická konstanta pro posuvovou sílu



C_{Fp}	$[-]$	empirická konstanta pro pasivní sílu
f	$[mm \cdot min^{-1}]$	posuv
F_c	$[N]$	řezná síla
F_f	$[N]$	posuvová síla
F_p	$[N]$	pasivní síla
k	$[-]$	k-té časové zpoždění vzorkovací frekvence
m	$[-]$	konstanta pro Gaussovo rozdělení
m	$[-]$	m-té časové zpoždění vzorkovací frekvence výstupu přenosové funkce
n	$[-]$	n-té časové zpoždění vzorkovací frekvence vstupu přenosové funkce
p	$[-]$	diatermie
\dot{q}	$[W \cdot m^{-2}]$	plošná hustota tepelného toku
r	$[-]$	reflexe
T	$[K]$	teplota
T_1	$[^{\circ}C]$	teplota ozářeného tělesa
T_2	$[^{\circ}C]$	teplota „zářiče“
T_{ok}	$[^{\circ}C]$	teplota vzduchu



$T_{\dot{\gamma}}$	$[^{\circ}\text{C}]$	teplota řezání
T_s	$[^{\circ}\text{C}]$	teplota vzduchu
U	$[\mu\text{m}]$	celková nejistota měření
u_b	$[\mu\text{m}]$	celková nejistota typu B
u_z	$[\mu\text{m}]$	jednotlivá nejistota typu B
v_c	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	řezná rychlost
x_{Fc}	$[-]$	empirický exponent pro řeznou Xovou sílu v ose X
x_{Ff}	$[-]$	empirický exponent pro posuvovou Xovou sílu v ose Y
x_{Fp}	$[-]$	empirický exponent pro pasivní Xovou sílu v ose X
x_{θ}	$[-]$	empirický exponent pro osu X
$y(k)$	$[-]$	přenosová funkce
y_{Fc}	$[-]$	empirický exponent pro řeznou Yovou sílu v ose Y
y_{Fc}	$[-]$	empirický exponent pro řeznou Yovou sílu v ose Y
y_{Ff}	$[-]$	empirický exponent pro posuvovou Yovou sílu v ose Y



y_{Fp}	$[-]$	empirický exponent pro pasivní Yovou sílu v ose Y
y_{θ}	$[-]$	empirický exponent pro osu Y
z_{θ}	$[-]$	empirický exponent pro osu Z
α	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	součinitel přestupu tepla
α_r	$[K^{-1}]$	teplotní koeficient roztažnosti
Δ	$[\mu m]$	rozdíl průběhů
Δ_1	$[\mu m]$	průběh vyznačující se většími hodnotami
Δ_2	$[\mu m]$	průběh vyznačující se menšími hodnotami
ΔZ_{max}	$[\mu m]$	odhad rozsahu odchylek
ε	$[-]$	emisivita
λ	$[W \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}]$	součinitel teplené vodivosti
σ	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}]$	Stefan- Boltzmannova konstanta
σ_x	$[\mu m]$	standartní chyba



1 Úvod

S moderním nástupem CNC řízení je v posledních letech veliký zájem o neustále zlepšování přesnosti obráběcích strojů (dále jen OS) v mnoha aspektech, které OS při řezném procesu ovlivňují. Tento fakt je způsoben také nutností a rozvinutostí automatizace. Celosvětově je mnoho vyčleněných vědeckých týmů, kteří se touto tematikou zabývají. Jedním z těchto aspektů je i působení tzv. teplotních chyb, které stroj neustále ovlivňují.

Téma teplotních chyb obráběcích strojů je komplexní téma, které je tak obsáhlé, že je zde možnost velikého výběru spektra problematik. Jednou z těchto problematik je vytvoření testovacích obrobků, pomocí kterých by se výše zmíněné chyby hodnotily. Toto téma je úzce provázané s kompenzačními modely teplotních chyb, které dnes výrobci obráběcích strojů hojně používají.



2 Cíle práce

Cílem diplomové práce je vyhledání odborné literatury a zpracování rešeršní části týkající se testovacích obrobků pro posouzení kompenzačních modelů teplotních chyb, následnou konstrukcí testovacích obrobků dle rešeršní části a jejich vyhodnocení s finálním výběrem vhodného obrobku na obrábění. V neposlední řadě přípravou experimentu a realizací, po kterém je vyhodnocen přínos kompenzačního modelu teplotních chyb implementovaného v OS.



3 Úvod do problematiky teplotního chování OS

V důsledku pracovní vytíženosti OS, se projevují tepelné procesy, které mají přímý vliv na změnu geometrie jednotlivých částí stroje a s tím související výskyt nepřesností na výsledném produktu. Chyby, související s tepelným faktorem zatěžování, se podílí v rámci celého spektra geometrických chyb 40-70 % [1].

3.1 Volumetrická chyba

Volumetrická tzv. prostorová chyba, je soubor řady chyb, které ovlivňují výslednou přesnost obrobku CNC stroje a nástroje. Popis chyby je uvedena v normě ISO 230-1 [2] a lze jí popsat jako relativní odchylku mezi ideálním rozměrem a reálným rozměrem součásti. Jedná se především o [3], [4]:

- Chyby elektromotorů (servomotorů).
- Teplotní chyby.
- Opotřebení nástroje.
- Chyby způsobené řeznými silami.
- Geometrické chyby.
- Chyby způsobené zatěžováním- hmotnost obrobku, pohyby os OS, statické chyby atd.
- Upínání nástrojů a obrobků.

Tato ovlivnění lze eliminovat dvěma způsoby. Buďto volbou materiálu a přesností konstrukce jednotlivých dílů výrobního stroje nebo kompenzací projevující se chyby [5].

Důležitou skupinou chyb jsou geometrické chyby. Platí, že čím více má stroj použitelných os, tím více lze vnést do samotného procesu obrábění chyb, jelikož každá osa má 6 stupňů volnosti (3 rotační a 3 translační pohyby). K těmto chybám je nutné dále brát v potaz pravoúhle chyby. Pro každou osu se vyskytuje jedna chyba. Tříosý obráběcí stroj je tedy charakteristický 21 geometrickými chybami [3].

Hlavní příčinou nepřesného obrobku jsou teplotní chyby, vyskytující se v místě řezného procesu (nástroje). Snaha o její eliminaci, či spíše redukci (nelze ji zcela



eliminovat), spočívá v použití kompenzačních modelů, které jsou volené hlavně z důvodu nízké ceny a snadnosti implementace [6].

3.2 Úvod do sdílení tepla

Základním principem sdílení tepla je interakce jednoho systému s druhým. Podmínkou pro tuto interakci je teplotní gradient. Realizuje se přenosem tepla ze systému s vyšší teplotou, do místa s nižší teplotou. Existují tři základní mechanismy přenosu [7]:

- Kondukce (vedení tepla).
- Konvekce (proudění).
- Radiace (teplotní záření/sálání).

3.2.1 Kondukce

Vedení tepla lze popsat empirickým Fourierovým zákonem pro plošnou hustotu tepelného toku \dot{q} , který je charakteristický svým gradientem:

$$\dot{q} = -\lambda \text{grad}T = \frac{dq}{d\tau}, \quad (1)$$

veličina plošné hustoty \dot{q} je rovna součiniteli tepelné vodivosti λ . Gradient $\text{grad}T$ popisuje mechanismus šíření tepla. Částice s větší energií se přenáší k méně energetickým částicím. Tento mechanismus šíření se vyskytuje u pevného a nehybného tekutinového kontinua [8].

3.2.2 Konvekce

Samotný název konvekce se skládá ze dvou důležitých slov, které popisují samotný děj. Kondukce, již zmíněná v kapitole 3.2.1 a advekce, která popisuje skutečnost, že se molekuly pohybují kolektivně v jakémkoliv časovém úseku [7].

Realizace přenosu v tomto případě je u pohyblivých tekutin, do kterého je přenos uskutečněn přes povrch tělesa. Rozdělujeme konvekci nucenou, přirozenou a kombinovanou. Příkladem pro nucenou konvekci může být např. proudění chladiwa či jakékoliv nucené chlazení. Druhý případ je charakteristický svým vznikem, který je



způsoben samotným sdílením navazující na princip kondukce a to principem energetických rozdílů jednotlivých částic. Konvekci lze opět vyjádřit vzorcem pro plošnou hustotu, ale vycházející z Newtonova vztahu:

$$\dot{q}_1 = \alpha \cdot (T_{ok} - T_s), \quad (2)$$

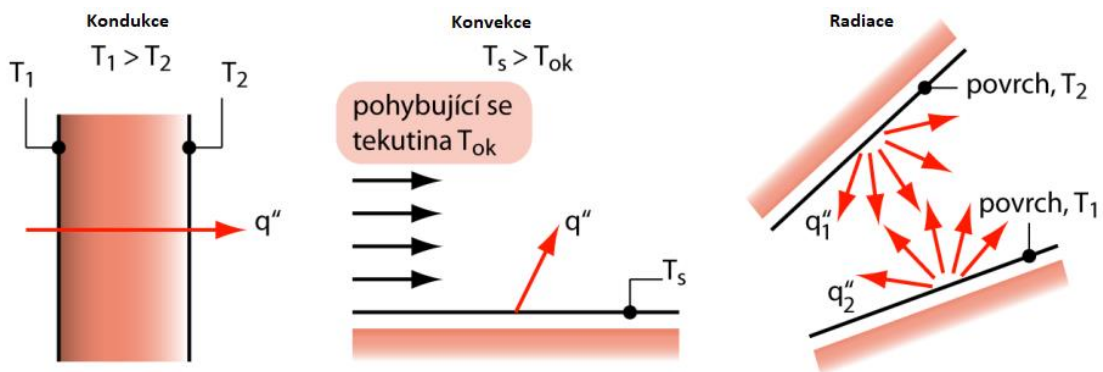
kde T_{ok} je teplota vzduchu, T_s je teplota povrchu tělesa a α je součinitel přestupu tepla [8].

3.2.3 Radiace

Posledním principem sdílení tepla je radiace. Liší se od proudění a vedení především tím, že vyzářené částice mohou putovat vakuem a nepotřebují pevnou látku. Radiace se projevuje u všech objektů, které mají teplotu vyšší než absolutní nula (0 K). Tímto je splněna podmínka a objekt část své vnitřní energie přemění na výše zmíněné teplotní záření. Plošnou hustotu radiace lze popsat dle vztahu [8]:

$$\dot{q}_2 = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_2^4 - T_1^4), \quad (3)$$

kde T_1 vyjadřuje teplotu ozářeného tělesa a T_2 teplotu tělesa tzv. zářiče. Veličina σ vyjadřuje Stefan – Boltzmannovu konstantu. Důležitou veličinou u teplotního záření je tzv. emisivita ε , vlastnost povrchu, která určuje, zda vyzářený výkon se odrazí (reflexe), prostoupí (diatermie) anebo pohltí (absorbce) zasažený objekt. Rozlišují se čtyři modely typu látek teplotního záření popsané pomocí veličin r , a a p . Těleso bílé ($r= 1$, maximální reflexe), těleso šedé ($a + r= 1$), těleso černé ($a= 1$, maximální absorbce) a těleso průteplivé ($p = 1$, maximální diatermie). Grafické znázornění jednotlivých druhů sdílení tepla je uvedena na Obr. 1 [9].



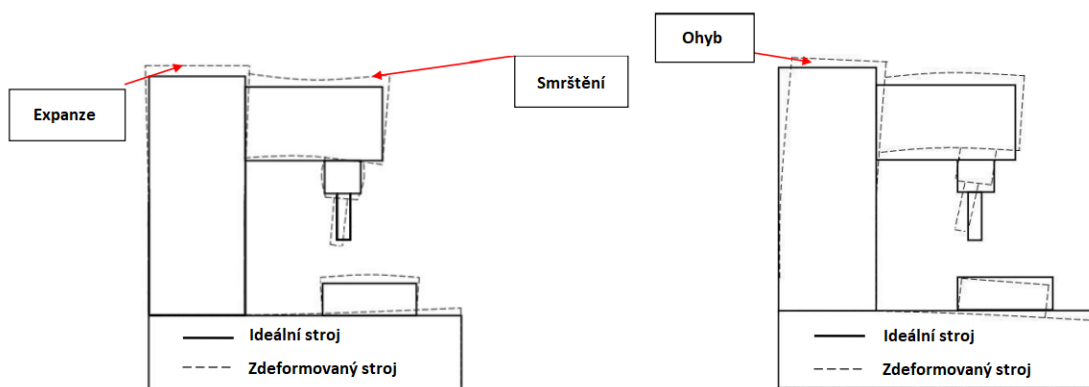
Obr. 1- Druhy sdílení tepla (upraveno [8]).

3.3 Faktory ovlivňující teplotně zatížený OS

OS jsou v průběhu své existence zatěžovány mnoha proměnnými, a to i z hlediska tepla. Jelikož se jedná o komplexní téma, je nutné stanovit a rozdělit o jaké zdroje tepla se jedná. Lze je dělit do dvou skupin [8]:

- Vnitřní zdroje tepla.
- Vnější zdroje tepla.

Výsledek působení tepla je uveden na Obr. 2. na kterém lze pozorovat expanzi, smrštění a ohyb konstrukce OS. Je nutné podotknout, že tyto vlivy působí na OS neustále [3].



Obr. 2- Vliv tepla na OS, vlevo- expanze a smrštění struktury OS, vpravo- ohyb struktury OS (upraveno [3]).



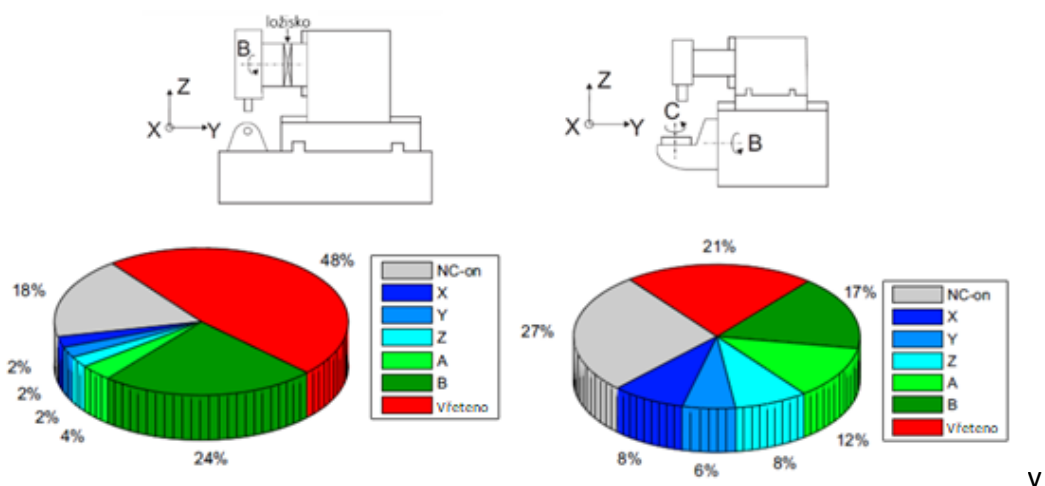
3.3.1 Vnitřní zdroje tepla

Výzkumem a praxí se ukázalo, že největším podílem na vzniku teplotních chyb OS se projevuje díky vřetenu a pohybovým osám. Významné zdroje tepla jsou zde např. ložiska či kuličkové šrouby. Mezi významné zdroje tepla se neřadí jen mechanické části, ale i elektrické, které se projevují v elektromotorech jednotlivých os a ztráty způsobené elektromagnetickou indukcí (vířivé proudy). Hlavní činitele vzniku tepla lze rozdělit na [1]:

- Řezný proces
 - teplo vzniklé nástrojem (plastická, elastická deformace a tření)
- Ztráty v el. zařízeních
 - ztráty v železe (vířivými proudy, hysterezí)
 - Joulovo teplo
- Ztráty v mech. odporech
 - valivé odpory
 - smykové tření
 - viskózní třecí odpory

V OS nedochází pouze ke vzniku tepla, ale také k propadům tepla. Jedná se o chlazení stroje, které je dáno rozvržením okruhů chlazení v konstrukci a chladicí kapalinou určenou k chlazení místa řezu nástroje. Všeobecně vzato, správným chlazením OS lze docílit markantní snížení rozměrových chyb [8].

Na Obr. 3. je pozorovatelný vliv jednotlivých os na teplotní chyby OS. Je nutné poznamenat, že každá konstrukce OS bude mít tento graf zcela odlišný a to i v závislosti na realizaci samotného testu. V tomto případě se stroj zatěžoval v jedné ose bez přítomnosti řezného procesu, poté chladl do ustáleného stavu a následně se provedl test s pohybem v odlišné strojní ose stroje [10].



Obr. 3- Teplotní chyby jednotlivých os, vlevo- stroj s naklápěcím vřetenem (rotace B), vpravo- stroj se sklopným stolem (rotace C) (upraveno [10]).

3.3.2 Vnější zdroje tepla

Vnějšími zdroji tepla se rozumí vše, co ovlivňuje OS v jeho okolí nikoliv uvnitř. Mezi ně řadíme např. slunce (důležité umístění stroje v rámci haly), okolní tělesa, která jsou schopna produkovat teplo, stálost prostředí, ale i ostatní OS v okolí [8].

3.4 Shrnutí problematiky teplotního chování

Při používání OS v průmyslu je stroj zatěžován mnoha proměnnými a teplo je jedním z hlavních činitelů, které ovlivňují finální výrobek. Zmiňovaná problematika je velice komplexní téma, jelikož není zcela normována a v praxi se vždy setkáváme s tím, že stroj je zatěžován vnitřními i vnějšími zdroji tepla zároveň. To v důsledku komplikuje vědeckou práci z pohledu možnosti vytvoření kompenzačních modelů teplotních chyb a minimalizaci teplotních chyb OS [8].



4 Kompenzační modely teplotních chyb

Mnoho OS svým charakterem a konstrukcí obsahuje chyby, které by při prvotní analýze bylo možné řešit různorodým mechanickým zásahem či osazením dodatečného chlazení. Jelikož se jedná o složité téma, existuje mnoho řešení, které lze použít na danou problematiku. Prvotně je nutné určit o jaký typ teplotní chyby se jedná [8]:

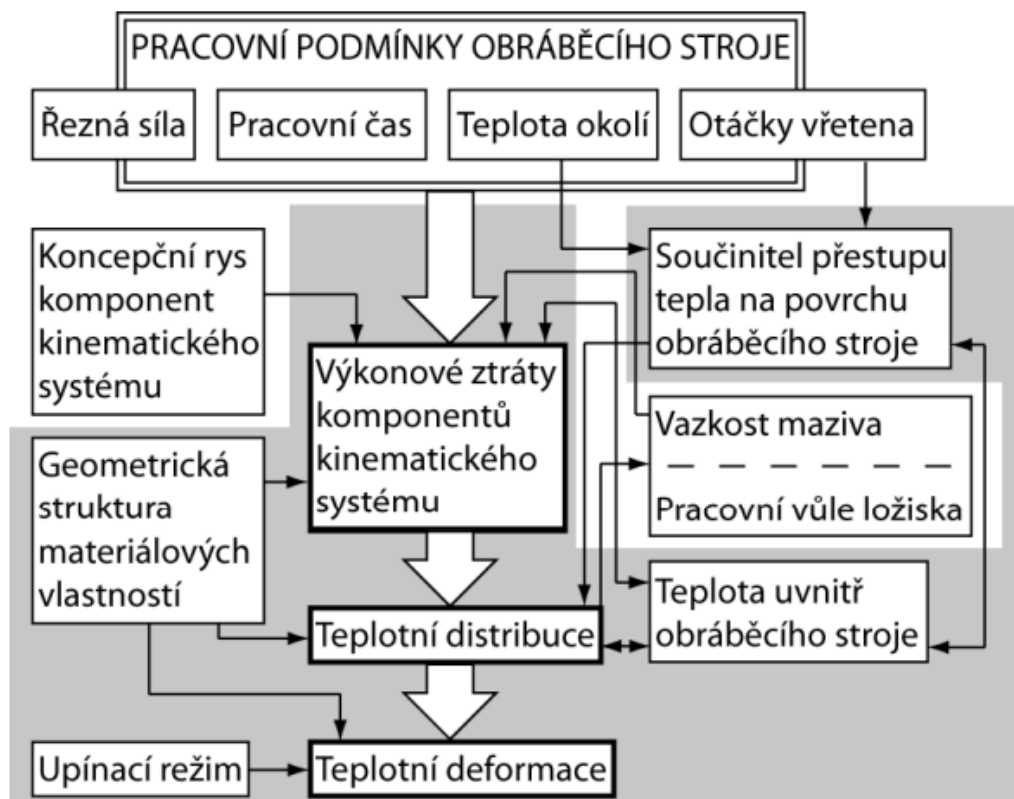
- Teplotní chyby závislé na pozici OS;
- Teplotní chyby nezávislé na pozici OS;

Po určení podstaty chyby existují čtyři možnosti, jak tuto chybu snížit [5]:

- Změnou konstrukce;
- Řízením tepelného toku;
- Predikcí teplotního chování OS;
- Kompenzací v reálném čase;

Změna konstrukce a řízení tepelného toku je bohužel drahé. V mnoha případech se vyplatí analyzovat stroj z pohledu matematiky, kinematiky nebo měřicí techniky, následně vytvořit kompenzační model, který se nahraje do SW stroje [8].

Kompenzace predikcí může být chápáno jako druh kompenzace v reálném čase, který je v reálném modelování nemožné vytvořit, jelikož do modelu vstupuje mnoho proměnných. Proměnné není možné odhadnout a zadat v požadovanou přesností, a tudíž by výsledky byly nevěrohodné. Modelování probíhá většinou v SW na bázi metody konečných prvků (MKP). Obr. 4. poukazuje na celkovou komplexnost tématu a vstupních proměnných do modelu. Výsledkem je samotná deformace způsobená všemi parazitními veličinami. Konečný model je časově náročný a může být i v mnoha směrech nepřesný, proto se volí kompenzační modely v reálném čase [8]. Predikce pomocí MKP lze použít jako nástroj vhodný pro posouzení různých konstrukčních variant z pohledu teplotního chování [1].



Obr. 4- Podmínky pro predikční model [8].

Ostatní modely se zaměřují na určení, zmapování geometrických chyb a následně jejich eliminací. K tomu je nutné analyzovat potřebné vstupní aspekty (včetně vnějších a vnitřních zdrojů tepla), které stroj ovlivňují. Pouze tato skutečnost zaručí korektnost a bezchybnost výsledného modelu. Následně je potřeba určit správnost postupu řešení problematiky samotnou analýzou, modelováním, testováním a implementací. Postup pro určení a eliminaci teplotních chyb je následující [6]:

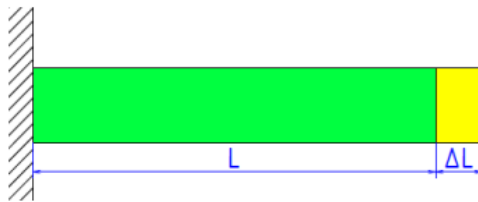
- **Analýza** - analyzovat OS z pohledu distribuce tepla vně konstrukce;
- **Modelování** - vytvoření modelu, který popisuje teplotně - fyzikální skutečnosti OS;
- **Predikce** - odhadovat teplotní chyby dle výše zmíněného modelu a v návaznosti na to vytvoření kompenzačního modelu;



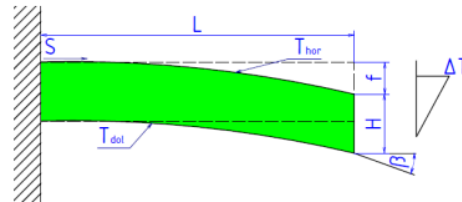
Ve většině případů se používá pro analýzu a měření teploty jednotlivých komponent termočlánky nebo teplotní odporová čidla, které jsou upevněny na jednotlivých částí stroje. Pro lepší určení přesnosti modelu je nevhodnější veliký počet těchto termočlánků, které zaručí získání širšího spektra dat [11].

Princip tohoto modelu je podstatně méně časově náročný než u prediktivního modelu, jelikož se zabývá pouze nastavením nástroje vůči obrobku v reálném čase pomocí os stroje, ale lze zde pouze kompenzovat buďto lineární složky nebo úhlové složky chyb, které jsou uvedené na Obr. 5. a Obr. 6. Metody kompenzace se dělí na [1]:

- **Přímé** metody kompenzace;
- **Nepřímé** metody kompenzace;



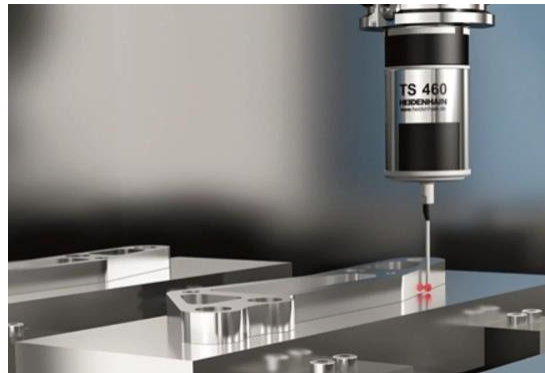
Obr. 5- Lineární teplotní chyba [12].



Obr. 6- Úhlová teplotní chyba [12].

4.1 Přímé metody kompenzace

Koncepcí méně složitá kompenzace, která funguje na bázi přičítání vzdáleností k jednotlivým osám OS. Je ovšem méně přesná, jelikož nezohledňuje úhlové chyby, které jsou důležité v rámci přesnosti výsledného obrobku. Jedná se o časově nenáročnou a dílensky jednoduše zpracovatelnou zkoušku. K měření se používají lasery, optické sledovače nebo měřící sonda, která je například uvedena na Obr. 7 [1].



Obr. 7- Dotyková sonda TS 460 [13].

4.2 Nepřímé metody kompenzace

Na rozdíl od direktivních metod kompenzace, nedirektivní metody využívají matematického aparátu, který je následně nahrán do SW OS v podobě kódu. Pro vytvoření modelu jsou potřebné tzv. pomocné proměnné získávané nepřímým měřením, které se přímo nezaměřuje na teplotní chyby vyvolávající posunutí špičky nástroje. Tyto proměnné je možné získat pomocí externích senzorů anebo senzorů přímo implementovaných v OS od výrobce [14].

Celistvé dělení nepřímých kompenzací [12], [15]:

- Finite Difference Method (FDM) - metoda konečných rozdílů;
- MKP - metoda konečných prvků;
- Multi Linear Regression Analysis (MLRA) - vícenásobná lineární regresivní analýza;
- Finite difference element method (FDEM) kombinace MKP a FDM;
- Multivariable regression analysis - multivariabilní regresivní analýza;
- Autoregresivní modely;
- Projection Pursuit Regression (PPR) - regresivní metoda projekce;
- Neuronové sítě;
- Fuzzy logika;
- Frekvenční přenosové funkce (PF);
- Hybridní kompenzace;

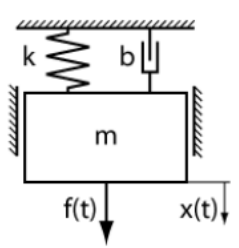
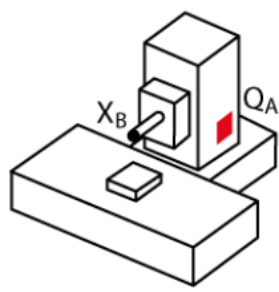


V rámci diplomové práce je použit již existující kompenzační model využívající metodu frekvenčních PF [4].

4.2.1 Frekvenční přenosová funkce

Metoda PF se řadí mezi novější metody, která je význačná zjednodušením aplikovatelností a zvýšením přehlednosti. Zjednodušení spočívá v možnosti použití méně čidel pro vstupní hodnoty do modelu, a tím pádem i snížením problematiky ohledně kalibrace. Dále lze výsledné hodnoty dosáhnout rychleji než u podobné metody MKP [8].

Nežádoucí posuv osy, který vytváří odchylky od tolerančních rozměrů, lze popsat vztahem vstupního buzení a výstupní odezvou. Celý matematický aparát je podložen teplotní analýzou, která přímo navazuje na dynamickou analýzu ve frekvenční oblasti. Konkrétní příklad a porovnání je uveden na Obr. 8. Výsledkem této rovnice je deformace způsobená teplotním zatěžováním OS [4].

	<u>Dynamická analýza</u>	<u>Teplotní analýza</u>
Buzení		
Odezva	$m \cdot \ddot{x}(t) + b \cdot \dot{x}(t) + k \cdot x(t) = f(t)$ $[m \cdot s^2 + b \cdot s + k] \cdot X(s) = F(s)$ $MPF = \frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{m \cdot s^2 + b \cdot s + k}$	$D_{AB}(s) = \frac{X_B(s)}{Q_A(s)}$ $X_B(s) = D_{AB}(s) \cdot Q_A(s)$

Obr. 8- Rozdíl teplotní analýzy oproti dynamické analýzy [16].



Závislost vstupu na výstupu lze popsat vztahem:

$$y(k) = \frac{u(k-n) \cdot a_n + \dots + u(k-1) \cdot a_1}{b_0} + \frac{u(k) \cdot a_0 - y \cdot (k-m) \cdot b_m - y \cdot (k-1) \cdot b_1}{b_0}, \quad (4)$$

kde veličina $y(k)$ je výstupní vektor, $u(k)$ vstupní vektor, parametry k a m/n jsou n -té časové zpoždění ve frekvenční oblasti, u proměnné b_m se jedná o váhový koeficient výstupu do systému a a_n o váhový koeficient vstupu do systému [17].



5 Rešerše testovacích obrobků k zjištění teplotních chyb OS

Kompenzační modely teplotních chyb jsou dnes běžně používaným nástrojem k dosažení lepší přesnosti na OS a valná většina dopomáhá k alespoň částečnému řešení problému týkajícího se teplotních chyb. Bohužel většina těchto modelů se zaměřuje pouze na teplotní zatížení OS v režimu tzv. air cutting („na prázdko“). Při tomto typu obrábění není přítomen obrobek, avšak nástroj se pohybuje běžně jako při obrábění, tudíž se pohybuje předem určenými drahami NC kódu. OS v režimu „na prázdko“ je specifický tím, že v rámci obrábění není přítomný řezný proces, který je také významným zdrojem tepla, resp. teplotních chyb v místě nástroje (TCP). Proto se v posledních letech projevila snaha o vytvoření speciálně navržených obrobků, které jsou konstruované tak, aby je bylo možné použít jako referenci [12] [18].

Testovací obrobky nemusí sloužit pouze pro evaluaci teplotních chyb, ale také např. k ověření funkčnosti kompenzačního modelu nebo k získání experimentálních dat vhodné jako vstupní veličiny pro vytvoření nového kompenzačního modelu [18].

5.1 Požadavky pro evaluaci

Jelikož testovací obrobky, používané k měření teplotních chyb, se objevují ve vědeckých kruzích převážně v posledních letech, byla pro ně vytvořena norma teprve nedávno, a to i přes to, že první obráběcí CNC centrum bylo vyvinuto firmou FANUC v 70. letech 20. století [19]. Norma ISO 230-12 [20] z roku 2022 se zabývá přesností testovacích obrobků z obecného hlediska a např. pro evaluaci rovinných ploch je pouze specifikována konstrukce ve tvaru krychle, která nezahrnuje potřebný dlouhý čas obrábění a zahřátí os v závislosti na interpolacích OS. Rozměry v normě nejsou taktéž zahrnuty. Z dostupné literatury se při realizaci měření hledí především na parametry týkajících se vnějších konstant a proměnných jako např. rychlosti/zrychlení os stroje, konstrukční realizace OS a doporučenou manipulaci s OS dané výrobcem [21].

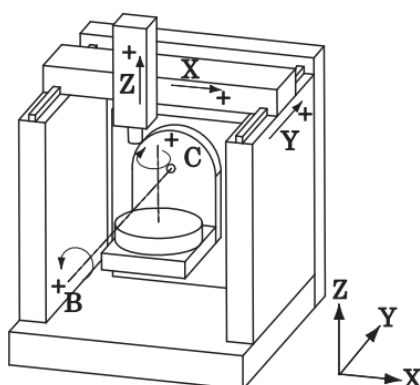


Obecnými požadavky na konstrukci obrobku jsou:

- 1) Splnění specifického tvaru obrobku v závislosti na rozvržení a konfiguraci konstrukce OS;
- 2) Schopnost do řezného procesu zakomponovat všechny dráhy nástroje - není nutností, pokud je známo, jaké osy OS jsou teplotou zatíženy nadprůměrně vůči sobě, a tudíž pracovník je schopen jednu osu zanedbat v případě, že tyto hodnoty jsou téměř mizivé;
- 3) Jednoduchá komplexnost drah nástroje pro snazší užití metrologických operací;
- 4) Dostatečný rozměr/hmotnost/tuhost - je nutné, aby nástroj byl v řezu v řádech hodin, tato skutečnost slouží pro možnost získání většího objemu dat se souvisejícím stálým zatěžováním OS;
- 5) Geometrická správnost pro osazení měřících zařízení - obrobek musí být navržen tak, aby bylo možné použít např. čidla, sondy atd.;
- 6) Materiál - každý materiál má odlišný teplotní koeficient roztažnosti α_r , který přímo ovlivňuje rozměry obrobku, a tím i místo řezu nástroje;
- 7) Možnost upnutí obrobku - způsob jakým se upne obrobek má významný vliv na výsledné rozměrové tolerance;

5.2 Testovací obrobek ve tvaru pyramidy

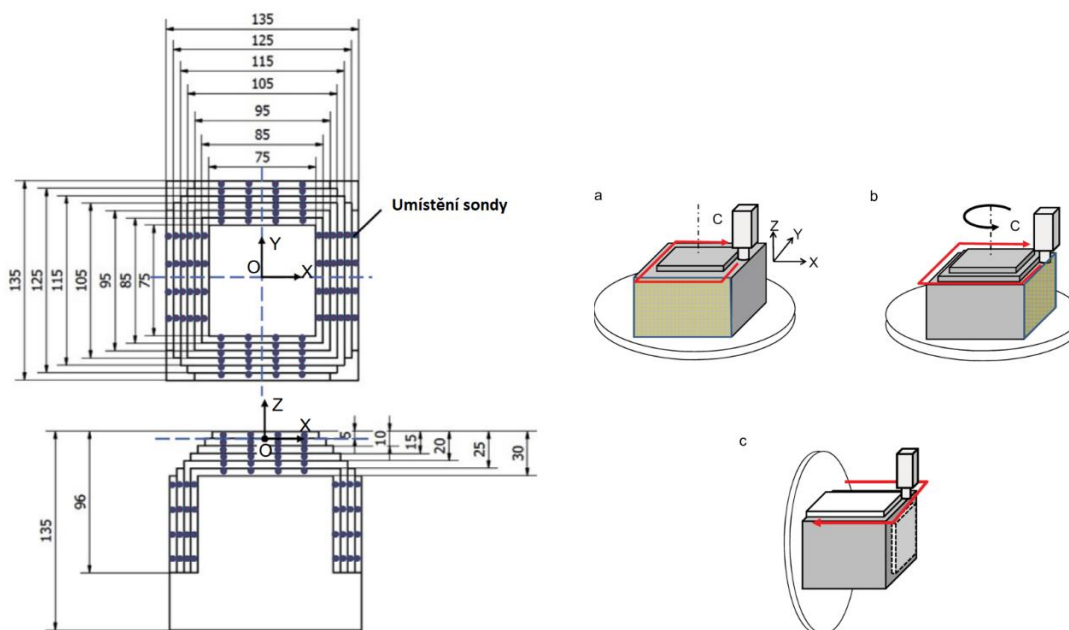
Již několik univerzit ve světě se zabývá problematikou testovacích obrobků a univerzita v Kjótu v Japonku, která je jedna z předních a inovačních zemí v oblasti CNC strojů, není výjimkou. Tvar obrobku v podobě pyramidy byl testován na pětiosém CNC stroji typu horní gantry s ustanovením čtvrté a páté osy do stolu. Přesná konstrukce stroje je uvedena na Obr. 9 [22].



Obr. 9- CNC stroj typu horní gantry s otočným stolem [22].

Obr. 10 znázorňuje konstrukční tvar použitého testovacího obrobku s jasně definovaným postupem obrábění [23]:

- Interpolace os X a Y - označeno pod písmenem **a**;
- Pokračování v interpolaci v osách X a Y s přenastavením hloubky řezu (interpolace osy Z) viz Obr. 10 **b**;
- Natočení osy B o 90° a následné obrobení viz Obr. 10 **c**;
- Následné natáčení B osy po krocích o 90° a opakování obrábění;



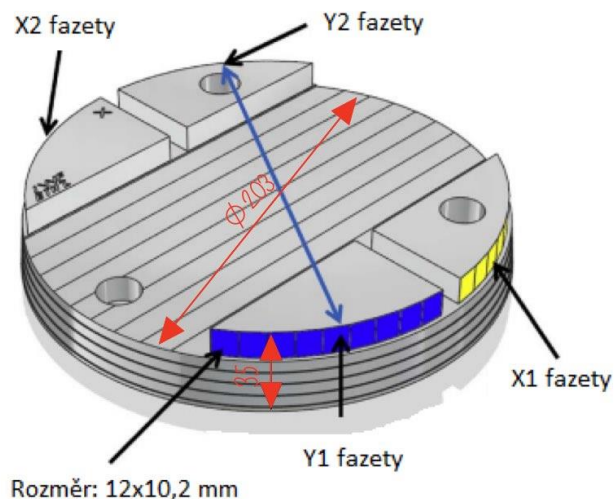
Obr. 10- Konstrukce testovacího obrobku tvaru pyramidy (upraveno [23]).



Po obrobení součásti byl obrobek změřen pomocí měřicí dotykové sondy umístěné ve vřetení. Jednotlivé body měření jsou znázorněny na Obr. 10. vlevo [22].

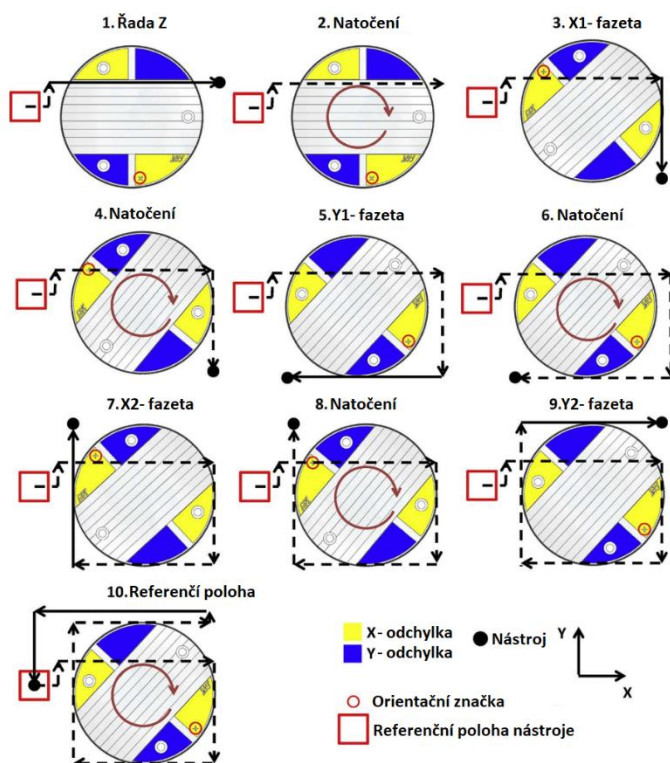
5.3 Kruhový testovací obrobek

Další výzkumná práce v oblasti testovacích obrobků byla provedena na univerzitě ETH v Curychu (Švýcarský federální technologický institut v Curychu). Principem se převratně neliší od předešlého způsobu konstrukce obrobku a testování. Do konstrukce jsou opět zahrnuty všechny použitelné osy petiosého CNC stroje s výjimkou osy B. Tento typ obrobku je jedinečný svým způsobem upnutí přes šrouby, proto byly do modelu zahrnuty otvory. Tyto otvory, rozměr a výsledné obrobení polotovaru jsou uvedeny na Obr. 11. Výše zmíněný způsob upnutí slouží k eliminaci házení, které by mohlo být ve výsledném měření zohledňováno jako chyba způsobená teplotní chybou. Proto je snaha o snížení těchto parazitních vlivů, nesouvisejících s problematikou teplotního chování OS, na co nejmenší míru tolerance [24].



Obr. 11- Polotovar testovacího obrobku kruhového tvaru (upraveno [24]).

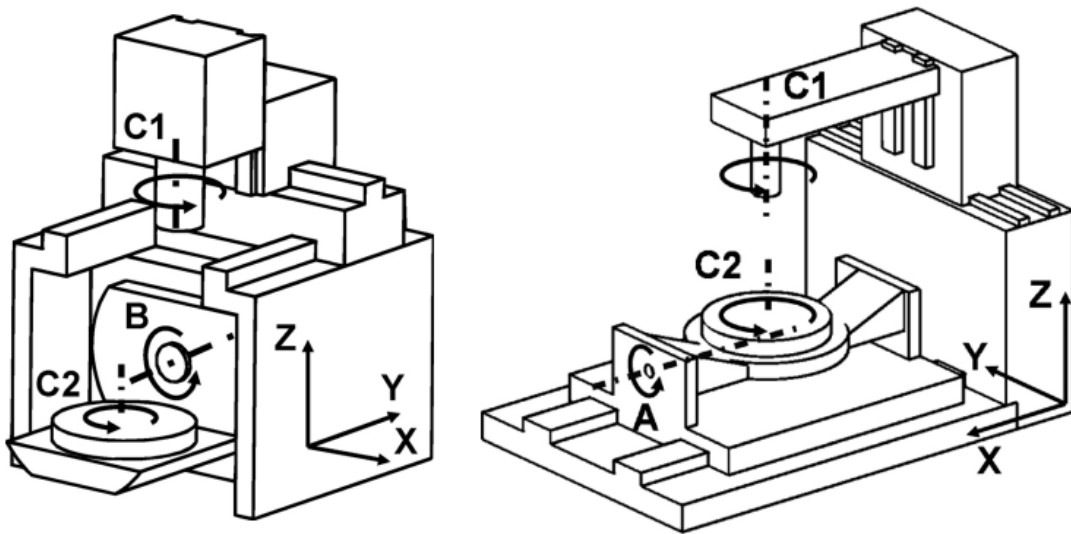
Do Obr. 12. je zahrnut postup obrábění a interpolací jednotlivých os. Na obrobek byla během kroku dva vyfrézována orientační značka znázorněná na obrázku v červeném kruhu. Tato značka je nutná pro orientaci při konečném měření rozměrů, jelikož obrobek je symetrický v ose X [24].



Obr. 12- Fáze obrábění testovacího kruhového obrobku (upraveno [24]).

Na rozdíl od obrobku ve tvaru pyramidy, zde probíhá interpolace pouze os X a Y s přidáním dvěma kroky, kdy je nástroj v řezu celou svojí plochou. Druhá odlišnost nastává v evaluaci chyb v těchto osách, které jsou měřeny na obrobených fazetách nacházejí se na vnějším diametru obrobku. Na každém z rozdělených segmentů znázorněných modrou a žlutou barvou, je devět fazet, která osa C interpolovala vůči sobě o 6° [24].

Tato konstrukce testovacího obrobku byla použita na dvou typech CNC pětiosých OS konstrukčně znázorněných na Obr. 13. Dalším markantním rozdílem obou OS spočívá v tom, že stroj uvedený vpravo na Obr. 13. je umístěn v klimatizované místnosti. Po obráběcí operaci byl obrobek změřen na souřadnicovém měřícím stroji (SMS) [24].



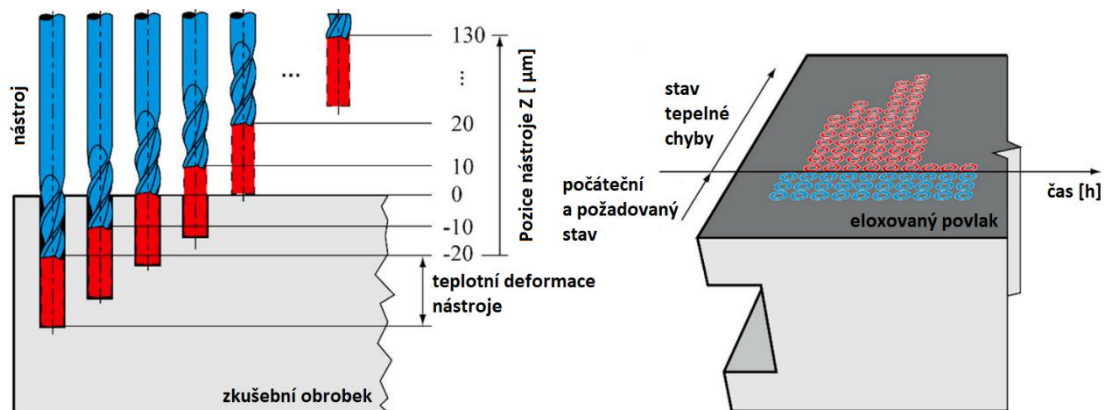
Obr. 13- Konstrukce pětiosých OS, vlevo- stroj s osami B a C, vpravo- stroj s osami A a C [24].

5.4 Příklady testovacích obrobků z ČVUT v Praze

Problematikou testovacích obrobků pro OS se zabývají odborníci univerzity ČVUT v Praze, kde bylo pracovníky vytvořeno několik obrobků, jejichž výčet bude následovat. Tento výčet se skládá ze tří testovacích obrobků odlišného tvaru určených pro různé CNC stroje.

5.4.1 Testovací obrobek obdélníkového tvaru pro osu Z

Obrobek nevyniká tvarovými deviacemi, pouze jsou obrobny postranní drážky pro použití upínek. Hlavním účelem je vizualizace teplotní deformace v ose Z a to za použití kompenzačních modelů od výrobce stroje a z ČVUT v Praze a stroje bez použití kompenzace teplotních chyb. Tvar obrobku se strategií obrábění je uveden na Obr. 14. Zde se použila válcová fréza, která interpolovala v ose Z do maximální hloubky $-20\ \mu\text{m}$ (do materiálu) a nejmenší hloubky $130\ \mu\text{m}$ (nad materiál). V osách X a Y se interpolovalo pouze pro změnu pozice frézy nad obrobek [1].

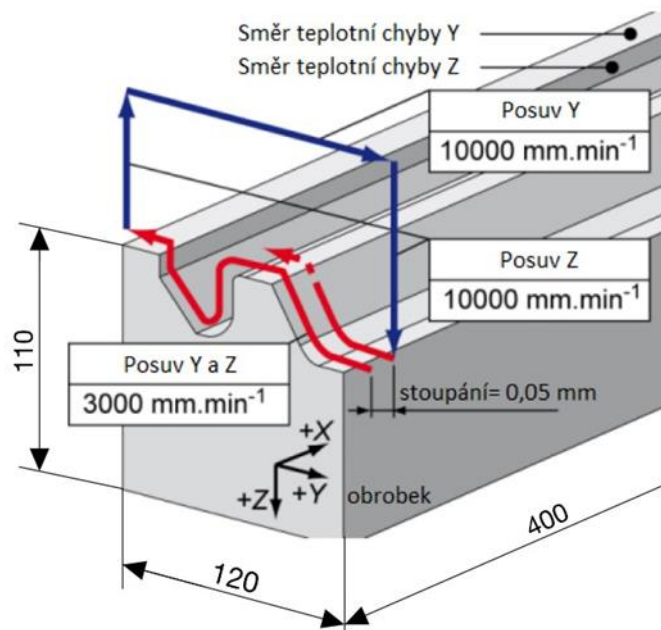


Obr. 14- Testovací obrobek pro ustanovení deformace v ose Z s průběhem obrábění (upraveno [6]).

Obrábění bylo uskutečněno na pětiosém CNC stroji typu horní gantry s rotačními osami otočného stolu A a C. Před samotným řezným procesem byl na povrch obrobku nanesen eloxovaný povlak, který je přítomen z důvodu lepší viditelnosti jednotlivých řezů. Po obrobení se vyhodnotily teplotní chyby stroje z pohledu počtu míst, které byly viditelně obráběny. Následně se vyhodnotila účinnost použitých kompenzačních modelů teplotních chyb v závislosti na referenční hodnotě, kterou byl nekompensovaný stav stroje. Z Obr. 14. vlevo lze pozorovat, že většina pozic obrábění bylo uskutečněno v již zmiňovaném běhu stroje na prázdko (air cutting) [6].

5.4.2 Testovací obrobek ve tvaru kvádrů

V tomto případě se opět použil obrobek jednoduchého geometrického tvaru s kompletně odlišným přístupem k provedení řezného procesu. Konstrukce testovacího obrobku je uvedena na . s jednotlivými posuvy, rychloposuvem a rozměry. Stoupání je zvoleno 0,05 mm. Takto malá konstanta je především volena z důvodu nutnosti dlouhodobého obrábění v řádu hodin. Ke zvýšení strojního času slouží i kolmé hrany obrobku. Po aplikaci řezného procesu byl opět výsledný obrobek změřen pomocí sond upevněných v magnetickém držáku po celé délce rovinných ploch [25].

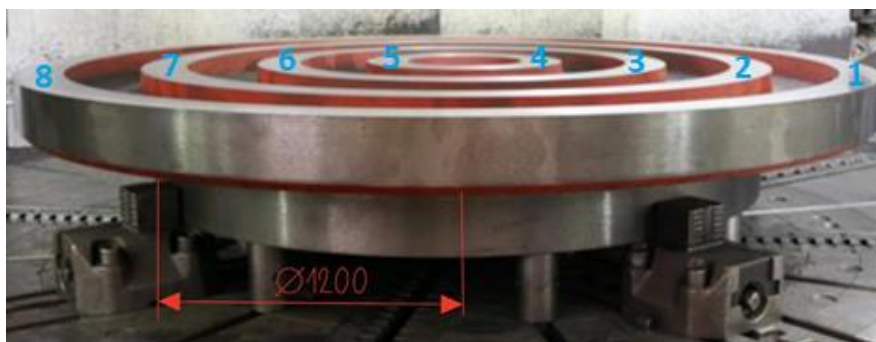


Obr. 15- Testovací obrobek kvádrového tvaru (upraveno) [25].

Výsledné obrábění bylo uskutečněno na pětiosé frézce značky VC 630/5AX. Cílem testu je zkouška poukazující na schopnost kompenzačního modelu snížit teplotní deformace v strojních osách Y a Z [25].

5.4.3 Kruhový testovací obrobek pro karuselový OS

Jelikož karuselové OS jsou samy ze své podstaty rozměrnější stroje, bylo vhodné použít i rozměrnější obrobek. Test byl realizován na karuselu s možností upnutí obrobku do 3000 mm. Řezný proces byl proveden nastavením osy Z a interpolací osy Y od bodu 1 do konečného bodu 8, které jsou znázorněny na Obr. 16. Upnutí bylo možné použít na ploše o průměru 1200 mm [26].



Obr. 16- Kruhový testovací obrobek určený pro karuselový OS (upraveno [27]).



V závěru, po dokončení řezného procesu, byly změřeny jednotlivé body. Při měření se použil stejný způsob, který je uveden v kapitole 5.4.1. na str. 32. Účelem zkoušky bylo ověřit funkčnost vytvořeného kompenzačního modelu a následné porovnání se stavem bez kompenzace teplotních chyb. Testovací obrobek se od svých předchůdců liší především svým rozměrem a tvarem (vycházející z typu OS). Zmiňované provedení konstrukce OS bylo vhodné k ustanovení a odzkoušení testovacích obrobků na rozměrnějších obráběcích strojích, které se zpravidla vyznačují vyšší nepřesností [26].

5.5 Stav OS před obrobením testovacího obrobku

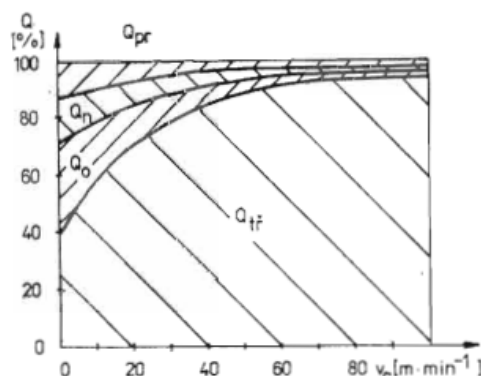
Nedílnou částí problematiky je teplotní stav OS před započítím řezného procesu. Mnoho výrobců uvádí nutnou manipulaci a zahřátí stroje před obráběním, ovšem to se zpravidla týká pouze zapnutí vřetena ve stavu na prázdno a postupné zahřívání stroje do pracovní teploty. Další možností je realizace testů dle normy ISO 230-3.

Např. v případě testu obrobku pro osu Z v kapitole 5.3, bylo před započítím obrábění nastaven cyklus 4 hodiny chladnutí a 4 hodiny zahřívání dle normy ISO 230-3. V rámci zahřívání byly otáčky vřetena nastaveny na maximální hodnotu udanou dle katalogu OS. V testu z kapitoly 5.4.3 se zvolil 20 minutový cyklus s 10 minutami zahřívání při $200 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ a následnými 10 minutami měření deformací. Takto malé otáčky jsou zvoleny z důvodu rozměrnosti stroje. Vše záleží na účelu měření, který si vytváří samotný autor testu dle svého uvážení [24], [26].

Senzory a čidla pro měření deformací a teplot, jsou nutností pro schopnost získání konečných výsledků. Nedílnou součástí je pečlivě promyslet do jakých specifických míst se osadí, aby bylo možné z testu získat nejvíce přesných dat.

5.6 Řezný proces

Při obrábění se veškerý příkon mění na teplo, proto je nutné brát v potaz i parametry řezného procesu, jelikož správnou strategií lze snížit teplotu během řezného procesu, a tím snížit teplotní chybu. Hlavní příčinou vzniku tepla jsou plastické deformace (primární a sekundární). Dle Obr. 17 je největší odvod tepla uskutečněn do třísky, avšak svůj podíl odvodu tepla do obrobku, pohybující se až do 15 %, je také markantní [28].



v závislosti na řezné rychlosti.
($Q_{tř}$ – teplo odcházející do třísky,
 Q_o – teplo odcházející do obrobku,
 Q_n – teplo odcházející do nástroje,
 Q_{pr} – teplo odcházející do prostředí)

Obr. 17- Graf závislosti tepla na řezné rychlosti v rámci řezného procesu [28].

V Tab. 1 jsou vypsané parametry řezného procesu pro jednotlivé typy testovacích obrobků jmenované v předchozích kapitolách. Po bližším prozkoumání Obr. 17 a Tab. 1 je patrné, že se použily vyšší rychlosti z důvodu menšího ovlivnění obrobku.

Dalším důležitým parametrem je průměr nástroje. Maximální průměr je 16 mm. Z celkového pohledu tyto průměry jsou malé a používají se pro dokončovací operace. Důvodem je zmiňovaná podmínka možnosti obrábění v řádech desítek hodin. S delší dobou v řezu se nutně objeví i opotřebení nástroje. Jelikož cílem testovacího obrobku je identifikovat pouze teplotní chyby stroje, představuje opotřebení nástroje zdroj nepřesnosti a je žádoucí opotřebení během testů minimalizovat. Vyšší opotřebení nástroje může negativně ovlivnit výslednou kvalitu povrch obrobku.

V drtivé většině případů byl použit materiál hliníku nebo jeho slitin. Ten se vyznačuje výbornou obrobiteľností (důvodem je nižší opotřebení nástroje a nízká cena). Jeho nevýhodou je větší teplotní koeficient ve srovnání např. s ocelí. Důležitým pravidlem pro sestavení strategie řezného procesu je zaměření na posloupnost ovlivňujících parametrů ve znění rychlost > posuv > hloubka řezu. Proto je hloubka řezu volena maximálně do 5 mm, ale v zásadě je postačující podmínka schopnost správného měření jednotlivých řezů dostupnou senzoricou [28].



Tab. 1- Parametry řezného procesu jednotlivých zkoušek [6], [22], [24], [25], [26].

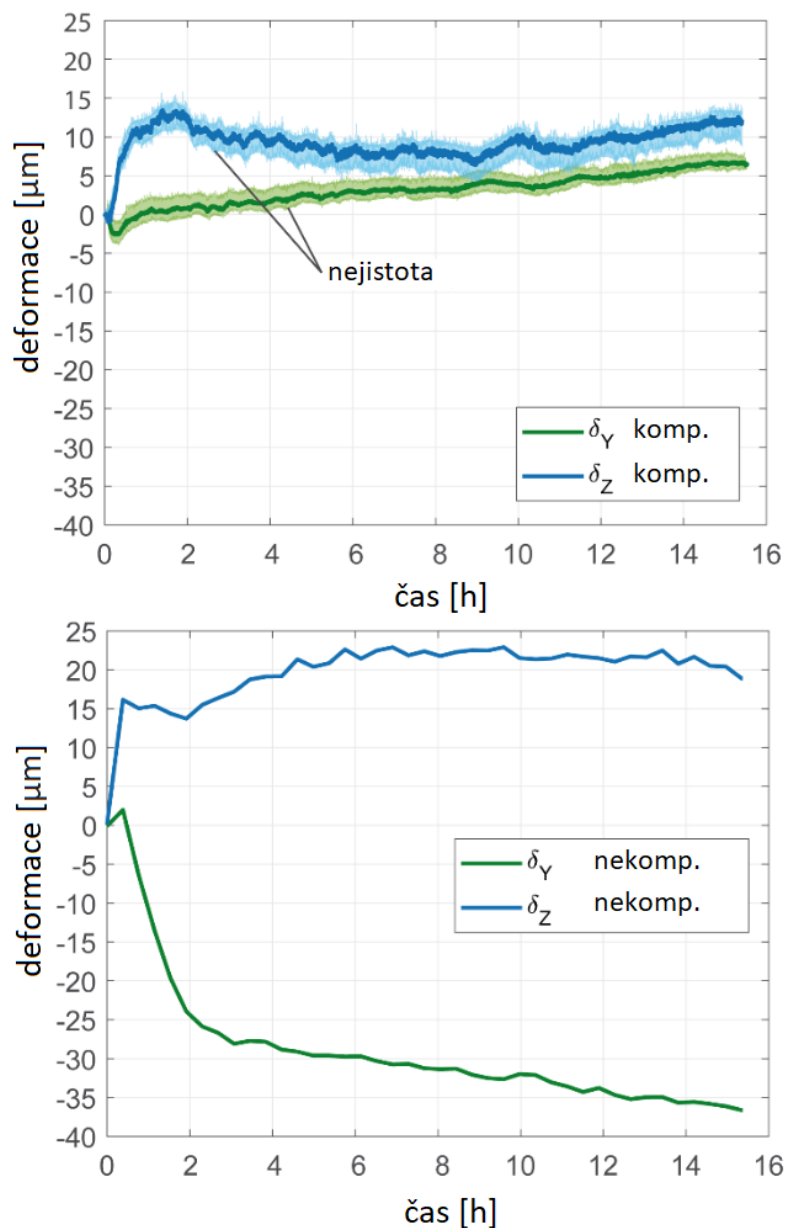
Obrobek / Parametr	Pyramida		Kruh		Ob. pro osu Z	
	Nástroj	8	[\varnothing mm]	16	[\varnothing mm]	8
Posuv	0,075	[mm/zub]	-	[mm/zub]	50-150	[mm/min]
Rychlost	10000	[mm \cdot min ⁻¹]	-	[ot \cdot min ⁻¹]	8000	[ot \cdot min ⁻¹]
Hloubka řezu	5	[mm]	0,1	[mm]	20-(-130)	[μ m]
Obrobek / Parametr	Krychle		Karusel			
	Nástroj	6	[\varnothing mm]	-	[\varnothing mm]	
Posuv	3000	[mm \cdot min ⁻¹]	0,15	[mm \cdot ot ⁻¹]		
Rychlost	12000	[ot \cdot min ⁻¹]	0-1200	[mm \cdot min ⁻¹]		
Hloubka řezu	0,1	[mm]	0,2	[mm]		

5.7 Konečné zhodnocení testovacích obrobků

U výše zmíněných testů je zřejmé, že se prováděly za odlišných podmínek a za jiným účelem výstupu. Všeobecně lze konstatovat, že existují 3 druhy výstupů dělicí se na:

- Zjištění teplotní chyby stroje a její vizualizace – týká se především testu v kapitole 5.2;
- Změření teplotní deformace v závislosti na čase – účelem testů v kapitole 5.3. a v kapitole 5.4.;
- Změření geometrických chyb obrobku způsobené teplotní chybou – je součástí všech uvedených testů;

Teplotní deformace v závislosti na čase bude hlavním výstupem této diplomové práce. Uvedený Obr. 18. je příkladem, který poukazuje na využití kompenzačního modelu v praxi z kapitoly 5.4.2. Lze pozorovat, že rozdíl mezi kompenzovaným a nekompenzovaným obráběním je markantní, a to především na ose Y, kde se chyba zmenšila téměř na nulu. Zmenšení deformace na ose Z není znatelné z důvodu dobrého chlazení včetně zvoleného OS. Osa X nebyla měřena, jelikož z předchozích měření bylo dokázáno, že dominantní teplotní chyby se objevují u tohoto stroje v osách Y a Z. Tento způsob nebo jemu podobný byl použit u ostatních měření uskutečněných v kapitolách 5.4. odborníky z ČVUT [25].



Obr. 18- Graf závislosti deformace na čase kompenzovaného a nekompenzovaného obrábění testovacího obdélníkového obrobku (upraveno [25]).

V předešlých kapitolách byly vyjmenovány testovací obrobky, které se používaly napříč světovými vědeckými pracovišti. Z dostupné teorie lze vydedukovat, že obrobky se v mnoha ohledech nepodobají svojí konstrukcí a jejich výsledný tvar je odvozen dle autorova uvážení či realizován dle představy firmy nebo zákazníka. Tato skutečnost je způsobena neexistující normou. V rámci návrhu obrobku je nutné hledět na mnoho faktorů, které jsou shrnuty v kapitole 5.1.



V uvedených kapitolách byly rozebrány pouze testovací obrobky z hlediska konstrukce. Tento fakt je pouze jedna z částí k úplné možnosti evaluace teplotních chyb, které závisí na mnoha proměnných. Důležitými parametry v testech je cyklické zahřívání/ochlazování OS použité buďto výrobcem anebo určené autorem testu před začátkem obrábění. Další důležitou částí je řezný proces.



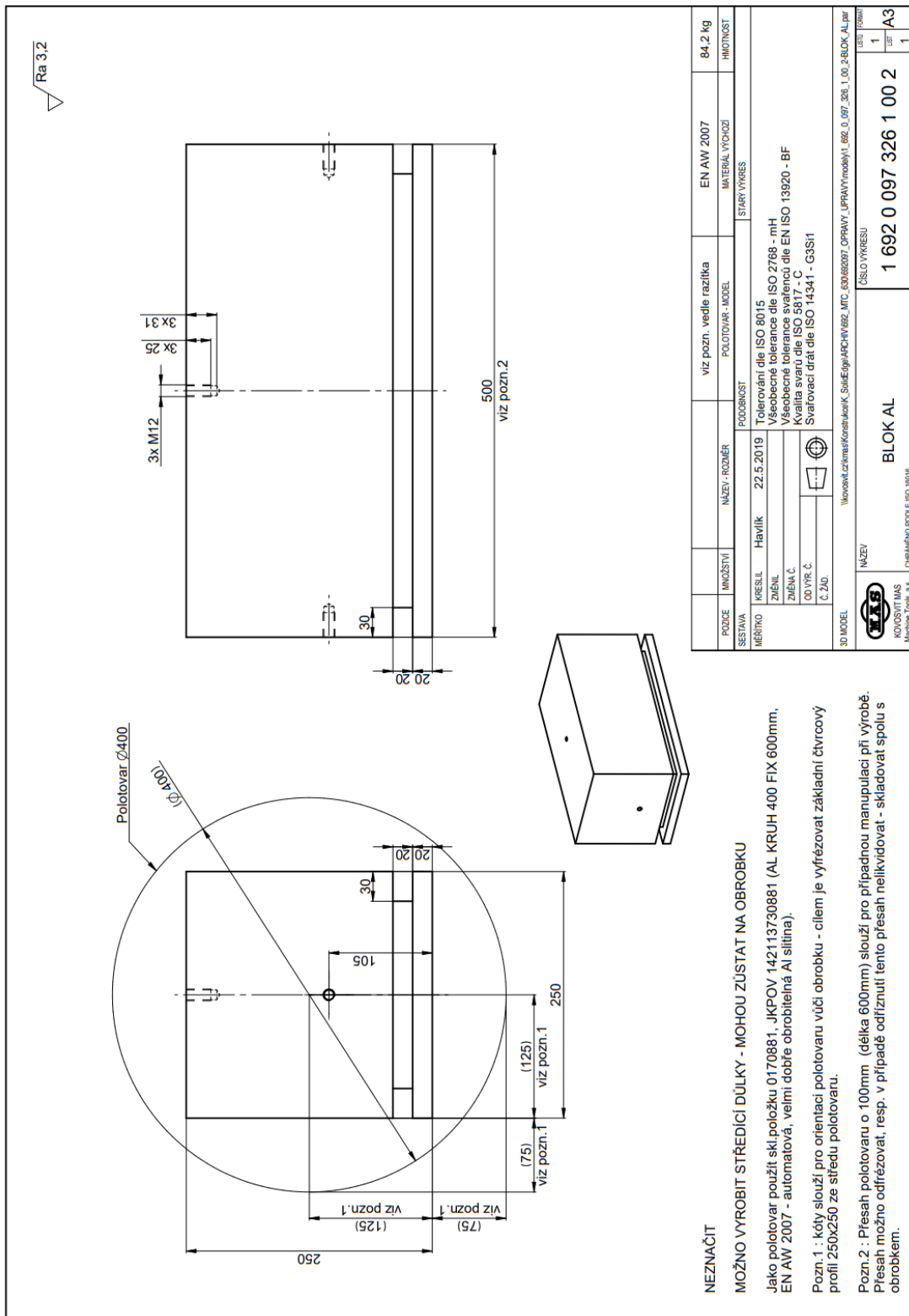
6 Návrh testovacího obrobku

Počátečním úkolem praktické části je realizace konstrukce testovacího obrobku dle zavedené teorie a s ohledem na pravidla konstruování testovacích obrobků shrnutých v kapitole 5.1. Pro vytvoření modelu byl použit CAD software od firmy Autodesk, Inc. s názvem Inventor. Použita byla nejnovější verze z roku 2023.

6.1 Polotovar testovacího obrobku

Jedním ze vstupních parametrů, které bylo nutné zvážit v realizaci výsledné konstrukce testovacího obrobku, byl dodaný polotovar od firmy KOVOSVIT MAS Machine Tools, a.s. Výkres je uveden na Obr. 19. Polotovar pro testovací obrobek byl vyfrézován z polotovaru o průměru 400 mm ve tvaru válce. Výsledkem je polotovar obdélníkového tvaru o rozměrech 500 x 250 x 250 mm.

Dalším důležitým parametrem je materiál pod označením EN AW 2007. Jedná se o slitinu mědi a hliníku (AlCu4MgMn/Dural), která je známa svojí výbornou obrábělností. V konstrukci jsou zahrnuté provedení závitů pro umístění oka za účelem schopnosti uchycení a manipulací pomocí jeřábu. Významným specifikem je postranní vybrání o rozměrech 30 x 20 mm sloužící k realizaci upnutí pomocí upínek.



Obr. 19- Výkres polotovaru testovacího obrobku (dodáno firmou KOVOSVIT MAS Machine Tools, a.s.).



6.2 Frézka MCU 700

Určeným strojem pro provedení výsledného obrábění byla vybrána frézka MCU 700 (Obr. 20.), která se nachází na ústavu Ú12135. Ústav úzce spolupracuje s výrobcem frézky KOVOSVIT MAS Machine Tools, a.s.



Obr. 20- Frézka MCU 700 na ústavu Ú12135T.

Jedná se o pětiosou frézku s rotačními osami A a C. Přesné parametry stroje jsou uvedeny v Příloha 1- Tabulka parametrů frézky MCU 700. Přes to, že se jedná o pětiosou frézku, hlavním cílem obrábění vybraného testovacího obrobku je určeno pro tříosou frézku. Důvodem je, že testovaný kompenzační model teplotních chyb na tomto stroji zatím neuvažuje zdroje tepla od rotačních os A a C, proto je zatěžovací cyklus stroje během testů bez pohybu rotačních strojních os A a C viz 7.3.

Pojezdy jednotlivých os jsou X/Y/Z-700/820/55 mm s možností upnutí obrobků o průměrech až 630 mm. Parametry rozměru vyhovují s ohledem na rozměry polotovaru viz Obr. 19. V parametrech v příloze je uvedeno, že elektrovřeteno dokáže dosáhnout pouhých $10\,000\text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$, elektrovřeteno umístěné ve frézce MCU 700 je však schopné dosáhnout až $24\,000\text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$.

6.3 Dokončovací fréza

Z pohledu technologie je významným parametrem pro konstrukci testovacího obrobku samotný nástroj. Nástroj, který byl zvolen, byl již předurčen a zakoupen před



zadáním diplomové práce. Jedná se o další vstupní parametr, z kterého lze vyvodit konstrukční závěry pro návrhy obrobků. Přesné parametry kulové frézy od firmy Rotana a.s. s označením R-13026-0 jsou uvedeny v Tab. 2. Ač byl nástroj předem zvolen, jedná se o vhodnou komponentu, která je dostačující pro tento typ operace, jelikož kulové frézy se používají pro přesné aplikace vyznačující se nízkou drsností povrchu. Správná drsnost povrchu při této operaci je žádoucí z hlediska zahrnutí menších deformačních vlivů, které nesouvisí s teplotními chybami, ovšem není blíže specifikována.

Významným parametrem z Tab. 2. je průměr nástroje, který i svojí délkou (hmotností) zaručuje dostatečnou tuhost při dokončovacích obráběcích operacích s ohledem na síly v obráběcím procesu. V rámci konstrukce testovacího obrobku nastával problém s rádiusy. Po analýze a konzultacích bylo určeno, že vnitřní rádiusy budou mít průměr minimálně 10 mm a vnější průměr 8 mm. Důvodem je správná generace interpolačních drah nástroje, které nekolidují s navrženou konturou. Fotografie nástroje je uvedena na , který je osazen v upínání od firmy HAIMER. Jedná se o tepelný upínač s označením HAIMER G 2.5 25000 A63.022.32 Ø16x160. Z označení lze zjistit, že upínač je konstruován pro rozhraní HSK-A63 do maximálně 25000 ot·min⁻¹ pro nástroj o průměru 16 mm. Termo upínače se vyznačují svojí výbornou tuhostí a jednoduchým principem uchycení nástroje vně konstrukce.



Obr. 21- Fréza od firmy Rotana v upínači.

Tab. 2- Parametry dokončovací frézy.

Název	Označení	Rozeř	Jednotka
Délka	Lc	120	[mm]
Průměr	D	16	[mm]
Zuby	z	4	[-]

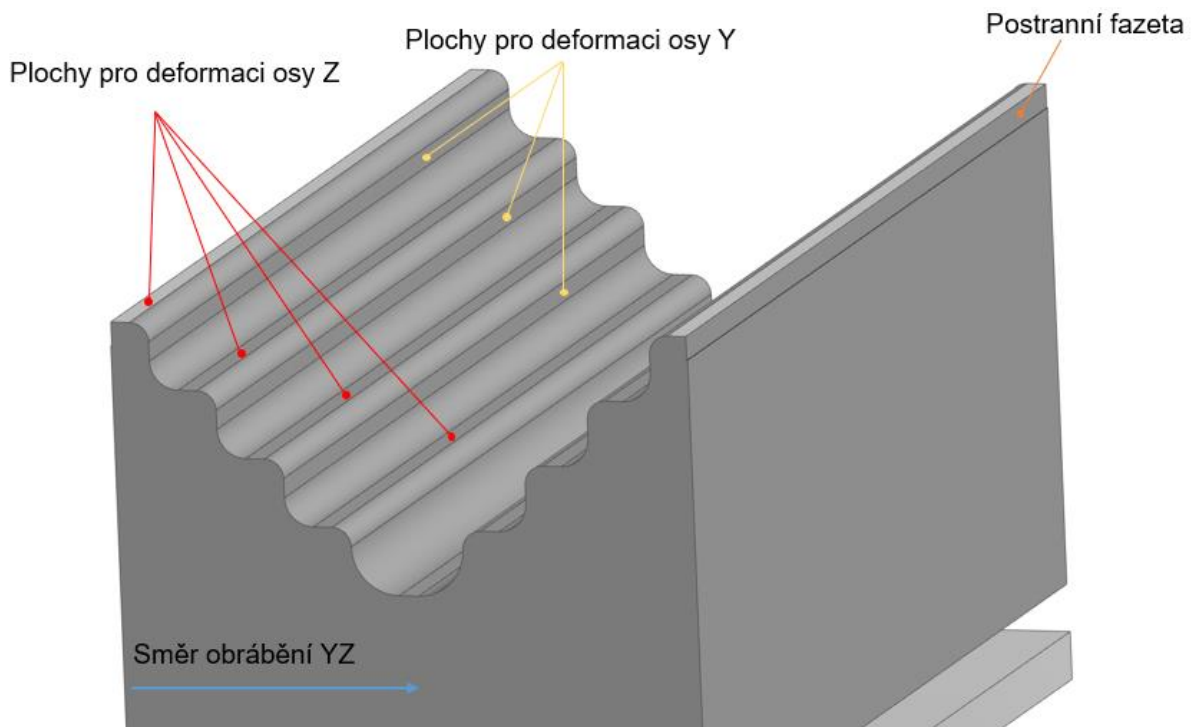
6.4 Obecný popis konstrukce testovacího obrobku

V rámci této práce bylo navrzeno několik konstrukčních variant testovacích obrobků. Důvodem návržení většího spektra testovacích obrobků je nemožnost ověření jednotného návrhu v závislosti na existující normě, která by se zabývala konstrukcí



testovací obrobků pro evaluaci teplotních chyb strojů či zhodnocení přínosu kompenzačních modelů teplotních chyb. Bylo zkonstruováno celkem osm variant testovacích obrobků, které se odlišují především svým tvarem. Zpočátku byly navrhovány varianty testovacího obrobku, které mnohdy obsahovaly složité geometrické tvary. Ty jsou však dle požadavků v kapitole 5.1 přebytné a nesouvisící s konečnými výsledky. Dalším konstrukčním návrhem byla úvaha otočení obrobku a navrhování modelu střednicí obdélníkového tvaru základního obrobku. Tento návrh po delší úvaze byl shledán jako nevyhovující hlavně z pohledu nerovnoměrného rozložení jednotlivých ploch. Po nesčetných konzultacích s odborníky z oboru technologie a s ohledem na převzatou inspiraci z již existujících testovacích obrobků, bylo vybráno modelování se zakomponováním konstrukčně jednoduchých drah po obvodě obdélníka. V rámci návrhu konstrukce testovacích obrobků bylo třeba zvážit i množství obrobených ploch, které budou na obrobku měřeny za účelem vyhodnocení přínosu kompenzačního modelu teplotních chyb. Tyto aspekty jsou popsány na symetrickém obrobku s názvem Testovací obrobek č. 4. „oboustranné schody“, který bude blíže specifikován v kapitole 6.4.4. a jehož model je uveden na Obr. 22.

Obecně každý z obrobků je obroben z každé strany o 1 mm z důvodu srovnání ploch obrobku a stolu vůči sobě. Dále obrobky obsahují rovinné plochy, které mají šířku nejméně 8 mm a délku celého obrobku (499 mm), uvedené taktéž na Obr. 22. Tyto plochy byly zkonstruovány s ohledem na kapitolu 5.1. pravidlo č. 3), za účelem výsledného měření rovinnosti ploch (deformací). Rozměr byl zvolen dle průměru nástroje a dostupné měřicí techniky (viz 7.3.1), která dokáže tuto šířku s jistotou zaznamenat. Postranní fazety jsou modelovány jako reference případnému měření na souřadnicovém měřicím stroji (nebudou součástí vyhodnocení deformací).



Obr. 22- Příklad testovacího obrobku.

V prvotní úvaze byly plochy konstruovány pro dvojí typ směrů obrábění (interpolace). Cílem bylo zařazení interpolací os X a Z a poté pootočení stolu a následné obrobení v osách Y a Z. Z této úvahy se v průběhu diplomové práce upustilo, jelikož jak bylo zmíněno v teoretické části (kap. 3.3.1., Obr. 3), hlavní příčinou teplotní chyby je pohyb v lineární ose Z a dalším markantnější osou vyznačující se teplotní chybou je lineární osa Y. Z tohoto důvodu a také proto, že frézka MCU 700 je konstrukčně symetrická (osa X má minimální vliv na výsledné teplotní chybě), bylo rozhodnuto, že konečné obrábění proběhne pouze v osách Y a Z. Z toho vyplývá, že výsledkem bude teplotní deformace způsobená pohybem v osách Y a Z. Do konstrukce, která je patrná na Obr. 22., byly zahrnuty rádiusy (u dalších modelů taktéž zkosení), které zatěžuje výše zmíněné osy zároveň. Eliminací osy X se test a vyhodnocení zjednodušilo, jelikož nebude nutné používat otočný stůl (osa C). Konkrétnější strategie obrábění bude specifikována v kap. 7.3.

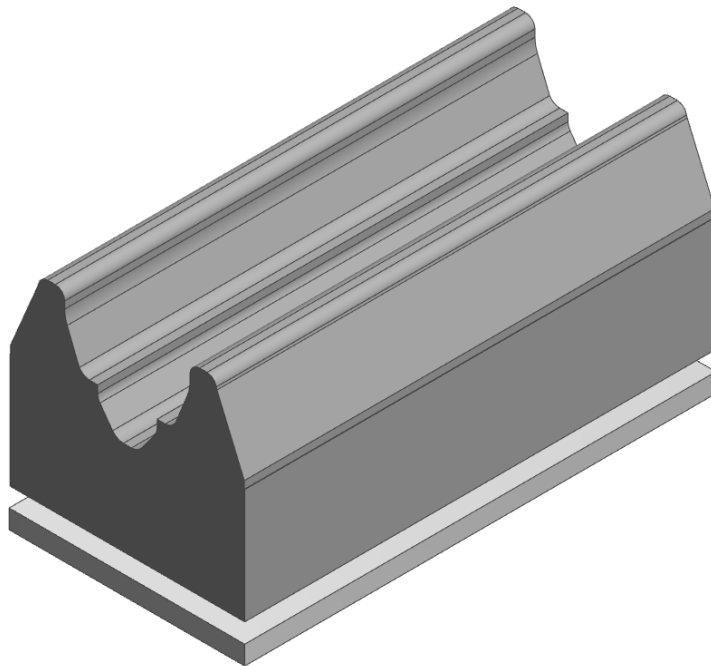


6.4.1 Testovací obrobek č.1. „zuby zaoblené zkosené“

U konstrukce testovacích obrobků se hledělo na zavedenou teorii, a především na inspiraci již provedených konstrukcí a testů uvedených v kap. 5.2. až kap. 5.4.

Tvary výsledných modelů nemají zásadní pravidla s výjimkou vyjmenovaných výše zmíněných kap. 6.3. a 6.4., tudíž konstruktér má volnou ruku a je schopen navrhovat různorodější tvarové plochy. U tohoto obrobku bylo hleděno na symetrii obrobku, která bude použita u více následujících modelů. Pozitivní vliv symetrie se projeví na samotném konečném grafickém vyhodnocení. Zaručuje konstantní rozložení ploch a stejnou interpolaci os na začátku a na konci obrábění.

Obrábění na Obr. 23. začíná postranní fazetou zmíněnou v kap. 6.4, poté následuje markantní zkosení. U zkosení, či interpolace kombinací os, je snaha o co nejdelší dráhy nástroje. Důvodem je prodloužení času obrábění, které je nutné pro markantnější projevení teplotní chyby stroje MCU 700. Obecně je obrábění rovinných ploch časově kratší než u tvarově náročnějších drah. Kontura dále pokračuje v rádiu, který navazuje na první plochu pro vyhodnocení teplotních deformací stroje v osách X nebo Y. Po obrobení rovinné plochy následuje opět rádiu spojující plochu pro evaluaci osy Z. Dalším modelovaným útvarem je zavedení zkosení s rádiusy, kde nástroj obrobí zub, který je modelován pro evaluaci všech os (Y a následně Z). Poslední rovinná plocha je konstruována uprostřed testovacího obrobku.

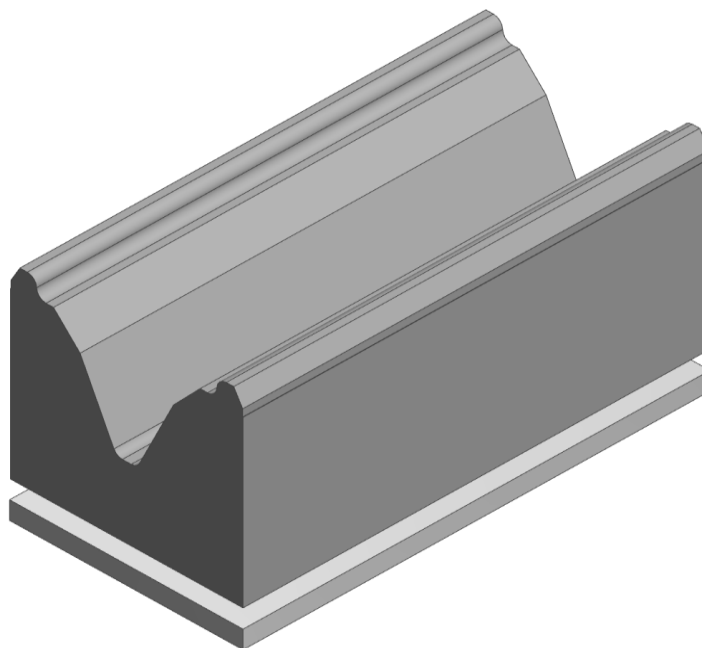


Obr. 23- Model testovacího obrobku č.1. "zuby zaoblené zkosené".

6.4.2 Testovací obrobek č.2. „zuby s vnitřním vybráním“

U modelu obrobku, zobrazeném na Obr. 24, byla snaha o co největší úběr materiálu uprostřed konstrukce hrubováním tak, aby byly rádiusy a zkosení nejdelší. Jedná se opět o symetrický obrobek.

Po počáteční fazetě obrobí nástroj zkosení, které přímo navazuje na první evaluační plochu. Následně plynule přejede na dva navazující rádiusy, které se spojí s již výše zmíněnou vyhrubovanou konturou, která má hloubku 110 mm. Tímto způsobem konstruování lze docílit delších drah nástroje, a tím prodloužením času, který je důležitý pro evaluaci teplotních chyb stroje. Uprostřed se nachází opět plocha pro evaluaci deformace v ose Z. Ač bylo zmíněno, že většina evaluačních ploch mají rozměr ve své šíři 8 mm, není nutné se na toto pravidlo ohlížet, pokud konstrukční šířka plochy nebude menší než již zmíněných 8 mm.

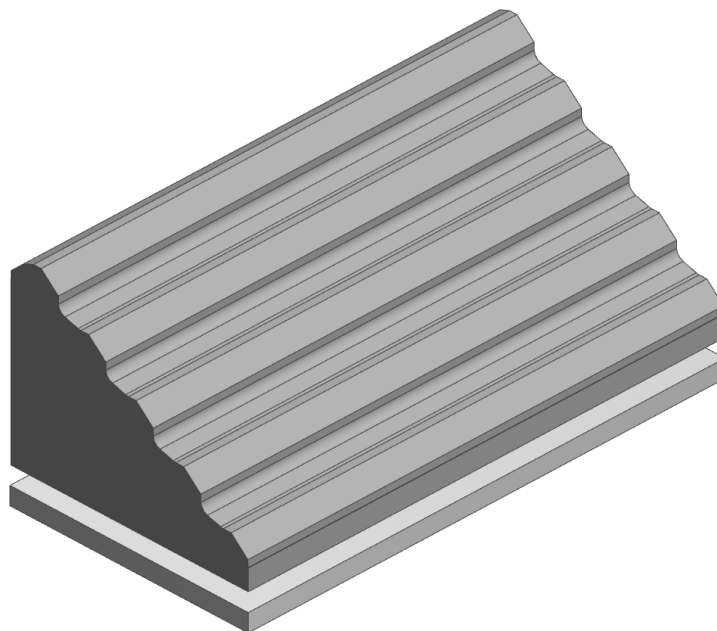


Obr. 24- Model testovacího obrobku č.3. "schody".

6.4.3 Testovací obrobek č.3. „schody“

U návrhu třetího modelu testovacího obrobku byl pojat zcela jiný pohled na celkovou konstrukci, kde vymizela symetrie v osách Y a Z. Z Obr. 25. si lze povšimnout, že hrubovací proces před samotným dokončovacím procesem je markantní, a proto je pravděpodobné, že obrobek nebude moci být po řezném procesu opětovně použit k dalším výzkumným či technologickým operacím, ale tato skutečnost může dopomoci k vytvoření většího časového zatížení stroje.

Jak již název napovídá, tak model představuje strmé schody, které mají sklon 45° . Prvotní dráhy nástroje se budou skládat z horního zkosení nejprve po 45° a následně $22,5^\circ$. Po obrobení horní 8 mm plochy se opakuje stejný tvar počínaje opakujícím se sklonem schodů navazující na plochu pro evaluaci teplotních deformací v ose Y. Toto zkosení navazuje na rádius, který přechází dalšímu zkosení navazující na plochu pro evaluaci osy Z. Tato podobnost se opakuje 4x.

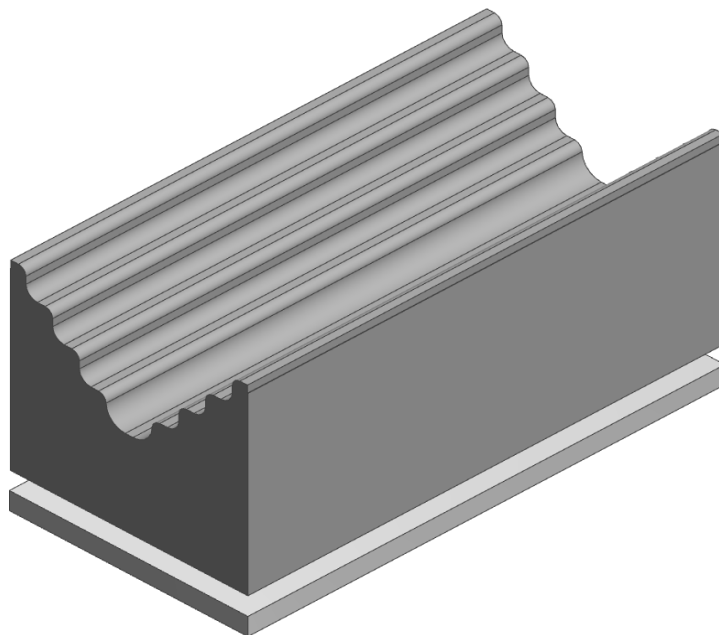


Obr. 25- Model testovacího obrobku č.3. "schody".

6.4.4 Testovací obrobek č.4. „symetrické schody“

Tento model je inspirován testovacím obrobkem z kap. 5.2. Obrobek je navrhován podobně, avšak z rozdílného pohledu aplikovaného na tříosé obrábění a obráceným postupem směřování „schodů“. Schody jsou koncipovány vně obrobku s jasně viditelnou symetrií.

Na rozdíl od předešlých modelů, počátkem obrábění dráhy nástroje, zobrazeného na Obr. 26., je evaluační plocha pro osu Z. Poté se opět konstrukčně uplatňují rádiusy tak, aby se splnily možnosti co nejdelších drah nástroje. Po vyjetí nástroje z rádiusu se uplatňuje nová plocha pro evaluaci osy Y navazující na rádius. Tato skutečnost se následně opakuje až k poslednímu vnitřnímu rádiusu o průměru 20 mm. Tento průměr je opět uplatněn z důvodu prodloužení dráhy nástroje.

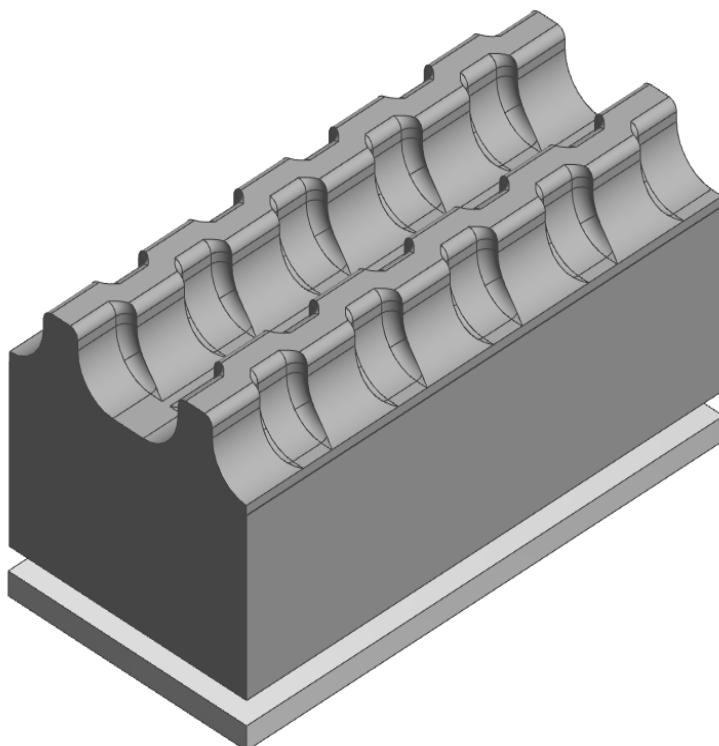


Obr. 26- Model testovacího obrobku č.4. „symetrické schody“.

6.4.5 Testovací obrobek č.5. „zuby“

Na Obr. 27., kde je uveden testovací obrobek č. 5., je možné pozorovat zcela jiný pohled na konstrukci. Úvahou v prvotním návrhu byla skutečnost, že ač dle kapitoly 5.1. je lepší testovací obrobky modelovat tak, aby nástroj projížděl jednoduché dráhy, je pravděpodobné, že složitější tvary mohou teplotně zatížit osy OS více než u jednodušších drah.

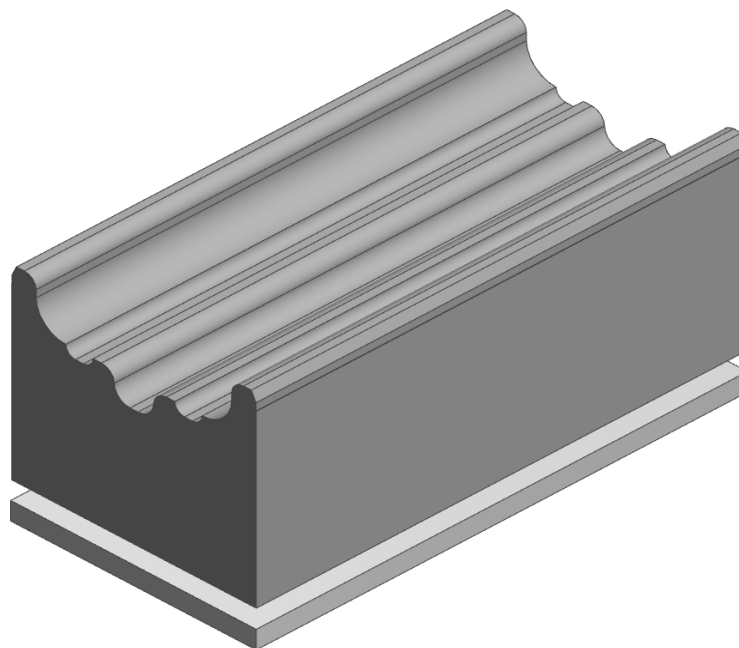
Obrobek se skládá ze tří evaluačních ploch pro osu Z. Dále jsou modelovány evaluační plochy pro osu Y z každé strany zubů. Po delší úvaze byl nakonec tento model zrušen a nebude použit k dalšímu hodnocení v průběhu diplomové práce. Důvodem je, jak již bylo zmíněno, složitější dráhy nástroje, ale především krátké dráhy nástroje, které zkracují výsledný čas obrábění. Složitější tvary konstrukce mohou dopomoci ke zvýšenému teplotnímu zatížení os, ale tento pozitivní přínos by se vykompenzoval tím, že čas obrábění by byl nižší.



Obr. 27- Model testovacího obrobek č.5. "zuby".

6.4.6 Testovací obrobek č.6. „zaoblené zuby“

Výše zmíněný obrobek je kombinací obrobků č. 2. a č. 4. Z testovacího obrobku č. 2. model přebírá prvotní zkosení v konstrukci a z testovacího obrobku č. 4. rádiusy, které navazují na evaluační plochy. Dále se zde nepoužívá hluboké vnitřní hrubování jako u obrobku č. 2. Samotná konstrukce nemá klesající trend jako předešlé modely, ale je opatřen dvěma prostředními vystouplými zuby. Další hlavní odlišnost spočívá v použití rádiusu 30 mm, který je umístěn hned za prvním zubem v řezném procesu zobrazen na modelu obrobku na Obr. 28. Další větší rádius je umístěn přímo uprostřed obrobku. Jak lze z obrázku pozorovat, jedná se opět o symetrický model.



Obr. 28- Model testovacího obrobku č.6. "zaoblené zuby".

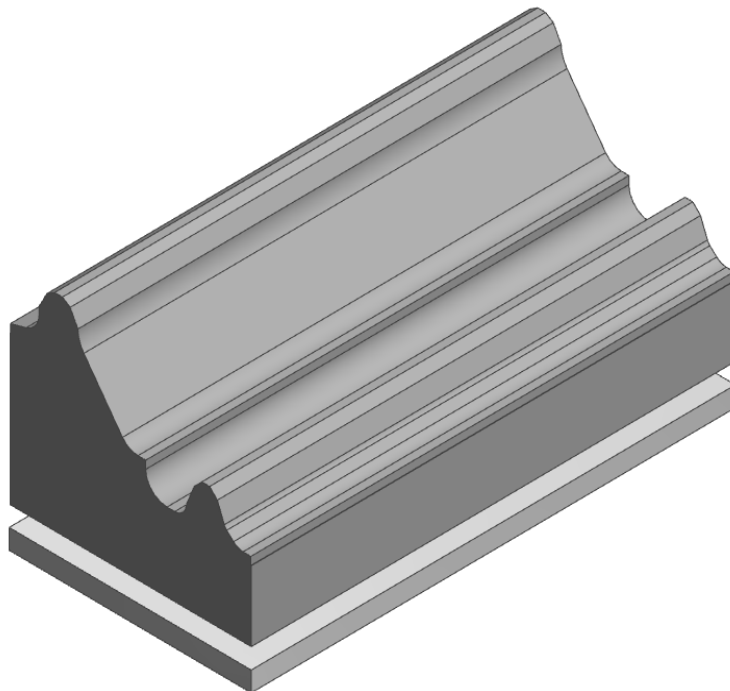
6.4.7 Testovací obrobek č.7. „úkosy“

Předešlé modely jsou podobné v aspektech symetrie nebo podobnosti/opakovatelnosti konstrukčních tvarů. Na obrobek č. 7. bylo pohlíženo z odlišného konstrukčního pohledu. Model byl vymodelován pouze z jednoduchých zkoseních v oblasti vystouplých zubů. Prvotní návrh počítal pouze s modelem složeným ze zkosení, ale bohužel technologie tuto skutečnost nedovoluje a musely být použity rádiusy tak, aby nástroj na své dráze neuskutečňoval řezný proces do kontury povrchu obrobku. Tímto by se do procesu zahrnuly rozměrové nepřesnosti vůči výkresové dokumentaci.

Jak je z Obr. 29. patrné, zkosení se nachází po celé kontuře obrobku. Je nutné podotknout, že u tohoto obrobku prvotní hrubování bude markantní a může nastat problém jako u obrobku č. 3. Ovšem tento negativní parametr může mít za následek pozitivní vliv v podobě zvýšení času obrábění. Obrobek není symetrický, proto rozvržení evaluačních ploch není konstantní. Počátkem obrobku je zkosení, které se projevuje na zubech místo kontinuální návaznosti v rádius. Tento konstrukční prvek se následně opakuje taktéž u druhého zubu (výstupku) na konci obrobku. Rozměry zkosení jsou čistě náhodné a neřídí se přesným záměrem. Jediným nežádoucím vlivem, který může nastat, je veliký úhel zkosení mezi plochami. To může zapříčinit i možnost kolize upínání, jež se



vyznačuje větším průměrem než samotný nástroj. Výše zmíněná chyba nastane při kontuře, která má vysokou hloubku a krátkou šířku.

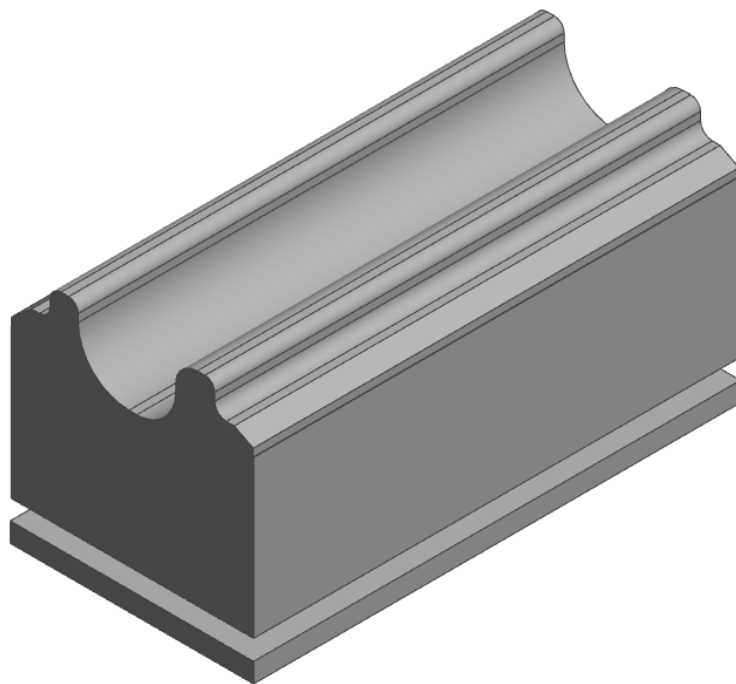


Obr. 29- Model testovacího obrobku č.7. „úkosy“.

6.4.8 Testovací obrobek č.8. „všeobecný“

Úhel pohledu modelování posledního návrhu obrobku se neřídil žádnými pravidly a byl konstruován zcela náhodně. Jedná se o další vnesení rozmanitosti do spektra testovacích obrobků, který se bude blíže hodnotit. Prvotní analýzou Obr. 30. není zcela patrné, že obrobek je nesymetrický, ale toto je jedním z parametrů, na které bylo modelování zaměřeno.

Dráha nástroje při řezném procesu začíná po stranách zkosením, který byl podobný použit u testovacího obrobku č. 7. Zkosení plynule navazuje na evaluační plochy pro osu Z. Následují zuby a prostřední vybrání, které je excentricky posunuto od středu o 0,5 mm. Tvarově se obrobek podobá testovacímu obrobku č. 2., s tím rozdílem, že vnitřní kontura je realizována rádiusy o rozměrech R52 mm a R40 mm.



Obr. 30- Model testovacího obrobku č.8. „všeobecný“.



7 Výběr testovacího obrobku

Výsledný testovací obrobek bude bodově ohodnocen v rozmezí hodnot 1 až 5, kde 1 je nejmenší možné číslo, které lze získat. Obrobek s největším počtem bodů bude vybrán jako hlavní kandidát pro konečné obrábění. Hodnocení se bude určovat u níže zmíněných parametrů, které určí vhodnost použití dle vyjmenovaného odůvodnění.

7.1 Parametry hodnocení

V kapitole 3. je zmíněná problematika teplotně zatíženého OS, z které je patrné, že konkrétní simulace dostupnými metodami nebo SW je obtížná a v mnoha případech nemožná (např. pomocí MKP modelů), z důvodu mnoha ovlivňujících parametrů. Z tohoto důvodu, budou použity hodnotící parametry, které jsou schopné určit testovací obrobek vhodný pro obrábění. Do hodnocení jsou zahrnuty parametry, které nesouvisí s tématem teplotního chování OS, ale i s hodnocením konstrukce obrobku.

7.1.1 Čas obrábění

Konkrétně tento parametr je jedním z nejdůležitějších. Určuje, jak dlouho bude teplotně namáhán použitý OS. Jak již bylo mnohokrát zmíněno, je snaha o dosažení největšího možného času obrábění. Realita v průmyslové praxi se může lišit, jelikož vytíženost OS např. i několik dní na operaci, která nemá výsledné zhodnocení, je zavádějící, ale je schopna být prospěšná z pohledu zvýšené přesnosti a s tím související zvyšující se marže výsledných obrobků. Z vědeckého hlediska, kde se nenahlíží na ekonomické zhodnocení a krátkou dobu obrábění, dlouhý čas obrábění naráží pouze na zábrany vytíženosti vybraného OS a dostupnosti školeného personálu.

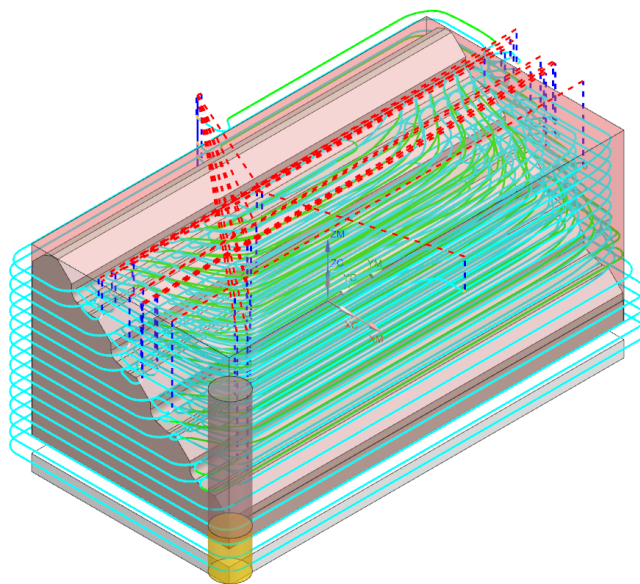
Vyhodnocení času obrábění je uskutečněno pomocí simulace v CAM SW od firmy Siemens v programu NX Siemens. Jedná se o konstrukční SW na stejné bázi jako Autodesk Inventor, který byl použit pro modelování testovacích obrobků. Další důležitou součástí je schopnost propojení týmu vývoje konstrukčních kanceláří, kteří mohou reagovat na konstrukci sestavy v reálném čase. Pro modelování obrábění byl použit podprogram s názvem „Manufacturing“, kde lze vytvořit digitální dvojče CNC OS, ale také simulovat obrábění [29].



Prvotní obráběcí operací základního obrobku je hrubování. Simulace jednoho z obrobků (Testovací obrobek č. 3. „schody“) je uvedena na Obr. 31. s červeně vyznačeným modelem polotovaru. Čas hrubování nebude do celkového hodnocení zahrnut z důvodu nízké časové náročnosti (do 60 minut) a vůči dokončovací operaci (10+ hodin) je zanedbatelný. Dalším důvodem je myšlenka, že z testu je nutné separovat pouze samotný obráběcí proces dokončovací (kompenzační modely teplotních chyb totiž standardně nezahrnují vliv samotného řezného procesu, tj. ovlivnění os, třísek atd.). Předpokládá se, že testovací obrobek bude mít vždy před každým validačním testem teplotu blízkou teplotě okolí. Je vhodné podotknout, že tento proces bude prováděn s odlišným nástrojem než uvedeným v kapitole 6.3. V tomto případě byla použita válcová fréza. Parametry nástroje jsou vyjmenovány v Tab. 3.

Tab. 3- Parametry hrubovací frézy.

Název	Označení	Rozměr	Jednotka
Délka	Lc	120	[mm]
Průměr	D	20	[mm]
Zuby	z	3	[-]

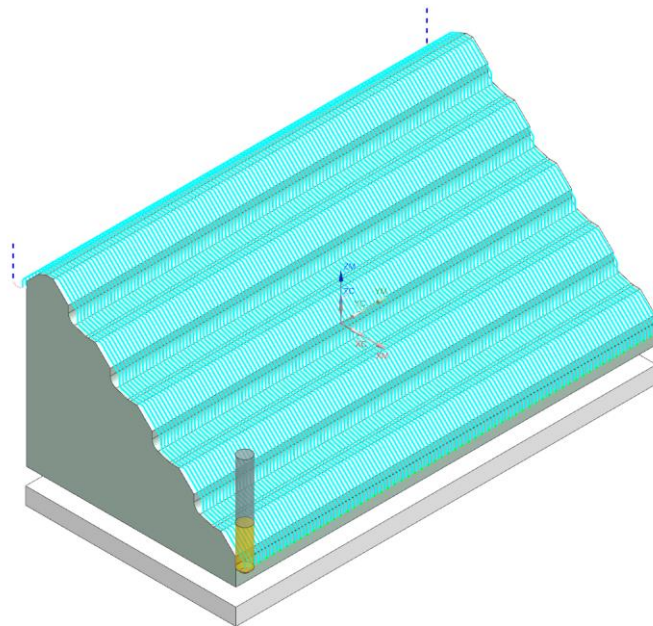


Obr. 31- Simulace hrubovací operace.

Po hrubovací operaci následuje mezidokončovací operace. Dráhy nástroje budou stejné jako u dokončovací operace s rozdílem dvou setin milimetru nad výslednou



konturou. Tato operace je v procesu zahrnuta z důvodu přípravy povrchu na poslední dokončovací operaci. U mezidokončovací a dokončovací operace se použije nástroj jmenovaný v kapitole 6.3. Na Obr. 32. jsou modře znázorněny dráhy nástroje s nastaveným podélným krokem (stepover) 4 mm. Tento krok je vybrán pouze pro účel obrazového znázornění. V realitě bude krok nastaven na 0,08 mm tak, aby bylo docíleno největšího času obrábění, kterého lze dosáhnout. Hodnota byla vybrána po konzultaci s obsluhou OS MCU 700. Ti, dle zkušeností se strojem, zjistili, že je to nejmenší hodnota s jakou dokážou osy stroje pracovat v závislosti na efektivnosti a kvalitě povrchu obrobku.



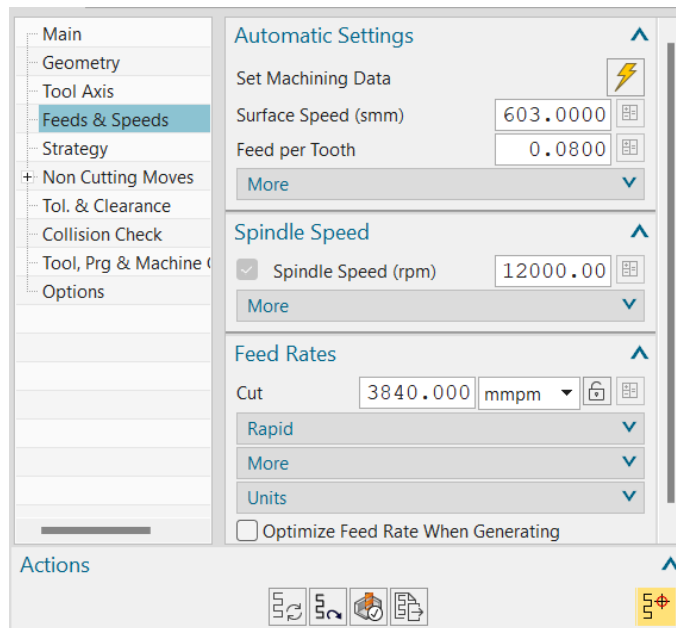
Obr. 32- Simulace dokončovací operace.

Dalšími parametry, jejímž manipulováním lze zvýšit obráběcí čas, jsou uvedeny na Obr. 33. Posuv na zub (angl. Feed per Tooth) byl zvolen podle tabulky hodnot řezné rychlosti a podávací rychlosti pro tvářené slitiny hliníku. Rychlost otáčení vřetena (angl. Spindle Speed) je $12\,000\text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$. Konkrétní číslo bylo zvoleno jako kompromis mezi skutečností snižování času obrábění a tím, že vřeteno je člen s největším dopadem na teplotní ovlivnění OS. Menší rychlostí lze docílit delšího času obrábění, ale dojde ke snížení teplotních deformací na špičce nástroje (osa Z). Ostatní hodnoty přepočítává SW



automaticky. Posuv po přepočítání vyšel $3\,840\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Níže je uvedený vzorec pro kontrolní výpočet, kde f_z je posuv na zub, n otáčky, f posuv a z počet zubů nástroje.

$$f = f_z \cdot z \cdot n = 0,08 \cdot 4 \cdot 12\,000 = 3\,840\text{ [mm/min]}. \quad (5)$$



Obr. 33- Parametry obrábění v simulaci (posuv a rychlost).

Po vygenerování drah nástroje, je možné se v informacích o obráběcím procesu dostat k hodnotě přibližného vypočítaného času frézování, která je pro jednotlivé testovací obrobky uvedena v Tab. 4 Největší rozměr času je u testovacího obrobku č. 1. „zuby zaoblené zkosené“ v řádu 14. hodin a 25. minut.

Tab. 4- Vyhodnocení časů obrábění v SW NX Siemens.

Číslování obrobků	1	2	3	4	6	7	8
Čas [hod:min]	14:25	12:07	10:22	11:39	11:14	11:39	11:21
Hodnocení	5	3	1	2	2	2	2

Čas [hod]	Hodnocení
14+	5
14-13	4
13-12	3
12-11	2
11-	1



7.1.2 Možnost budoucího použití obrobku

Jelikož dural, který se používá na obrábění, je drahý, nastala otázka opětovného použití daného obrobku na více testů k validaci kompenzačních modelů teplotních chyb. Hodnocení se zakládá na procentuálním úbytku objemu materiálu s rozdílem vůči základnímu obrobku. Výpočet hmotnosti byl proveden v konstrukčním programu Autocad Inventor. Pro materiál obrobku EN AW 2007 byla zadána hustota $2850 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Výkres na Obr. 19 ukazuje, že základní obrobek váží 84,2 kg, ovšem pro přesnější porovnání bude použita hmotnost uvedená v programu (86,1 kg) s vypočítaným objemem $30,26 \text{ m}^3$. Výsledné procentuální rozdíly jsou uvedeny v Tab. 5, kde je patrné, že největším úběrem materiálu dojde u obrobku s označením testovací obrobek č. 3. „schody“. Ač je objemový úbytek znatelný, nekoresponduje s myšlenkou, že tím lze dosáhnout delšího času obrábění viz Tab. 4.

Tab. 5- Vyhodnocení objemů jednotlivých obrobků.

Číslování obrobku	1	2	3	4	6	7	8
Objem [m^3]	23,57	23,76	19,87	22,86	24,50	20,42	25,69
Procentuální rozdíl [%]	22	21	34	24	19	32	15
Hodnocení	3	3	2	3	4	2	4

Rozdíl [%]	Hodnocení
0-10	5
10-20	4
20-30	3
30-40	2
40+	1

7.1.3 Počet evaluačních ploch

Evaluační plochy na obrobku, jak již bylo zmíněno, slouží k měření teplotních deformací stroje, které se promítnou do testovacího obrobku. Počet ploch je uveden v Tab. 6. V tomto případě hodnocení platí, že čím více ploch, tím lze získat více dat k evaluaci ve více místech obrobku. Lze tedy posoudit, zda dochází ke změně teplotní chyby stroje v širším pracovním prostoru stroje (závislost teplotní chyby na volumetrii).



V tomto ohledu je testovací obrobek č. 4. „oboustranné schody“ obrobkem s největším počtem ploch.

Tab. 6- Vyhodnocení počtu evaluačních ploch.

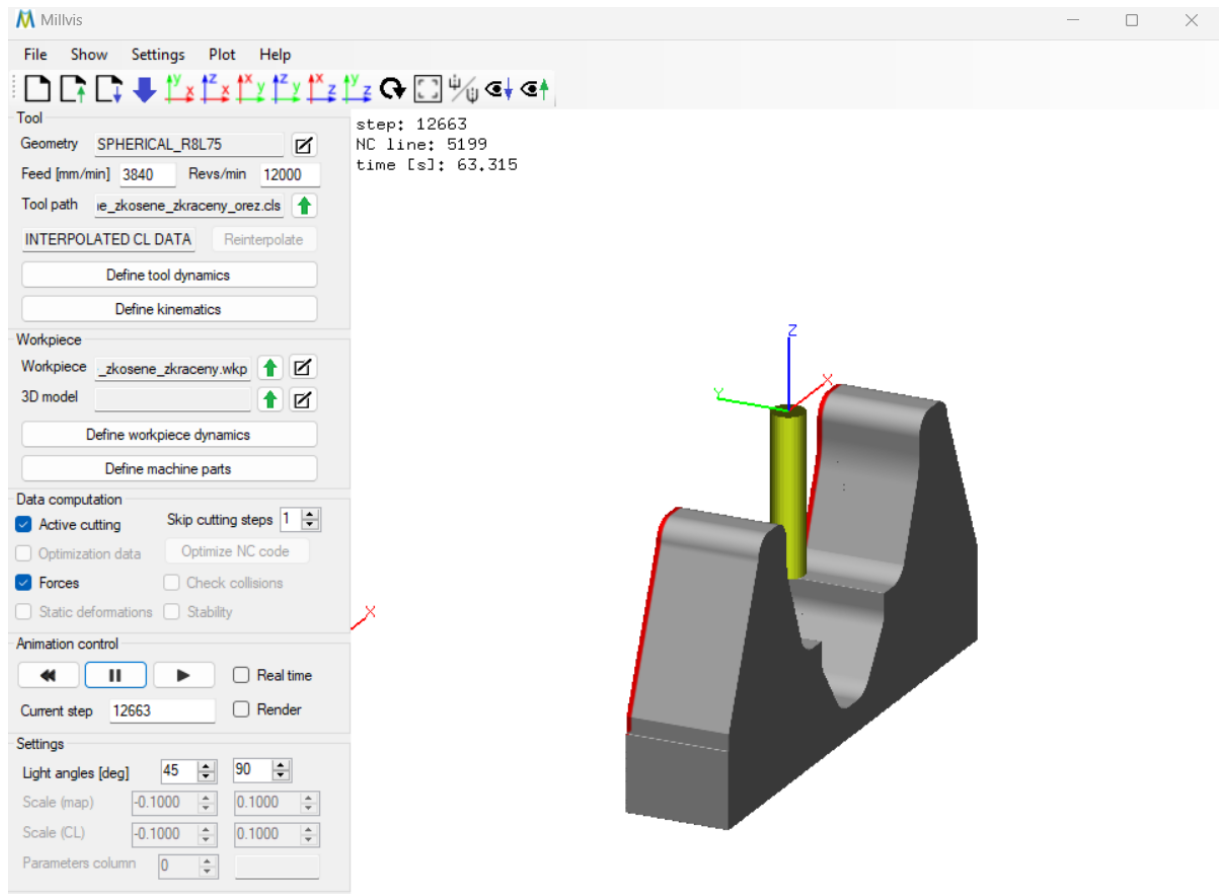
Číslování obrobku	1	2	3	4	6	7	8
Počet ploch [-]	11	7	11	17	11	9	10
Hodnocení	3	2	2	4	3	2	2

Počet ploch [-]	Hodnocení
20+	5
15-20	4
15-10	3
10-5	2
5-	1

7.1.4 Řezná rychlost

Řezná rychlost má přímý vliv na teplo vytvořené v řezném procesu. Platí, že čím větší řezná rychlost, tím větší teplo se vytváří. U hodnocení bylo především hleděno na možnost poklesu řezné rychlosti pod $300 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Časté vyskytování této hodnoty by zapříčinilo nerovnoměrné rozložení teploty v řezném procesu a možnosti vytvoření rozměrové odchylky. Vyhodnocení bylo prováděno v SW s názvem MillVis, který je vyvíjen na Ústavu výrobních strojů a zařízení. SW slouží k simulaci obráběcích veličin, které se objevují v řezném procesu. Následně je možné tyto veličiny (moment, posuv, síly atd.) exportovat a vyhodnocovat.

Prostředí SW MillVis, s exportovaným testovacím obrobkem č. 1. „zaoblené zuby zkosené“, je uveden na Obr. 34. Obrobek byl exportován v menší velikosti z důvodu rozměrového rozhraní, které SW zvládá zpracovat. Vstupní hodnoty posuvu a otáček vřetene se použily stejné jako na Obr. 33. Taktéž bylo použito pouze 20 přejezdů, jelikož samotné vyhodnocení je simulačně náročné. Ve vyhodnocení nejsou uvažovány první 2 přejezdy (tam a zpět), jelikož vnášely do grafů nesrovnalosti. Tyto nesrovnalosti jsou způsobeny simulováním najetí a začátkem řezného procesu, který se liší od následného iteračně se opakujícího obrábění.



Obr. 34- Rozhraní SW MillVis s exportovaným obrobkem č. 1.

K vyhodnocení byl použit SW Matlab 2021b od firmy MathWorks. Program slouží k analýze a simulování procesů pomocí matic a matematických formulí. Programování se provádí ve skriptech obsahující kódy, které se následně spouštějí pro zobrazení kódu [30].

Řezná rychlost byla ze SW MillVis exportována v podobě souboru s obsaženými průměrnými hodnotami a kroky řezného procesu. Pro každý obrobek je odlišné rozpětí kroků.

Po simulaci a vykreslení grafu, byl použit Matlab skript, který automaticky separuje z exportované matice řezné rychlosti hodnoty pod $300 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Jak již bylo zmíněno, tak první dva přejezdy nebyly uvažovány. Pro přesnější zhodnocení a vytvoření průměru, bylo použito celkově 12 přejezdů.



Výsledné zhodnocení je uvedeno v Tab. 7. Rozhodující hodnotou je průměr hodnot v závislosti na kroku dvou průjezdů. Z tabulky je patrné, že nejmenší průměrné hodnoty se vyskytují u obrobků č. 1. a č. 2., na druhé straně nejhorší hodnoty vykazují obrobky č. 4., č. 6. a č. 8. Je nutné podotknout, že rozdíl průměrů mezi jednotlivými obrobky není markantní, a tudíž celkové hodnocení je nastaveno tak, aby bylo co nejpřísnější. Průběh řezné rychlosti pro obrobky je uveden v Příloha 2- Graf průběhů řezné rychlosti.

Tab. 7- Vyhodnocení řezné rychlosti.

	Počet přejezdů						Č. obrobku
	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	
Počet hodnot pod 300 mm/min	642	637	638	640	636	640	1
	492	491	491	490	490	491	2
	830	829	830	830	830	828	3
	1093	1003	1199	1176	1148	1154	4
	1045	1043	1041	1042	1049	1045	6
	665	665	665	661	662	663	7
	999	992	992	994	990	996	8
Počet kroků tam a zpět	Průměr	Průměr na krok	Hodnocení	Č. obrobku			
3342	638	0,19	5	1			
2810	490	0,17	5	2			
2405	829	0,34	2	3			
2895	1128	0,39	1	4			
2606	1044	0,40	1	6			
2702	663	0,25	3	7			
2629	993	0,38	1	8			

Průměr na krok	Hodnocení
<0,2	5
0,2-0,25	4
0,25-0,3	3
0,3-0,35	2
0,35-0,4	1

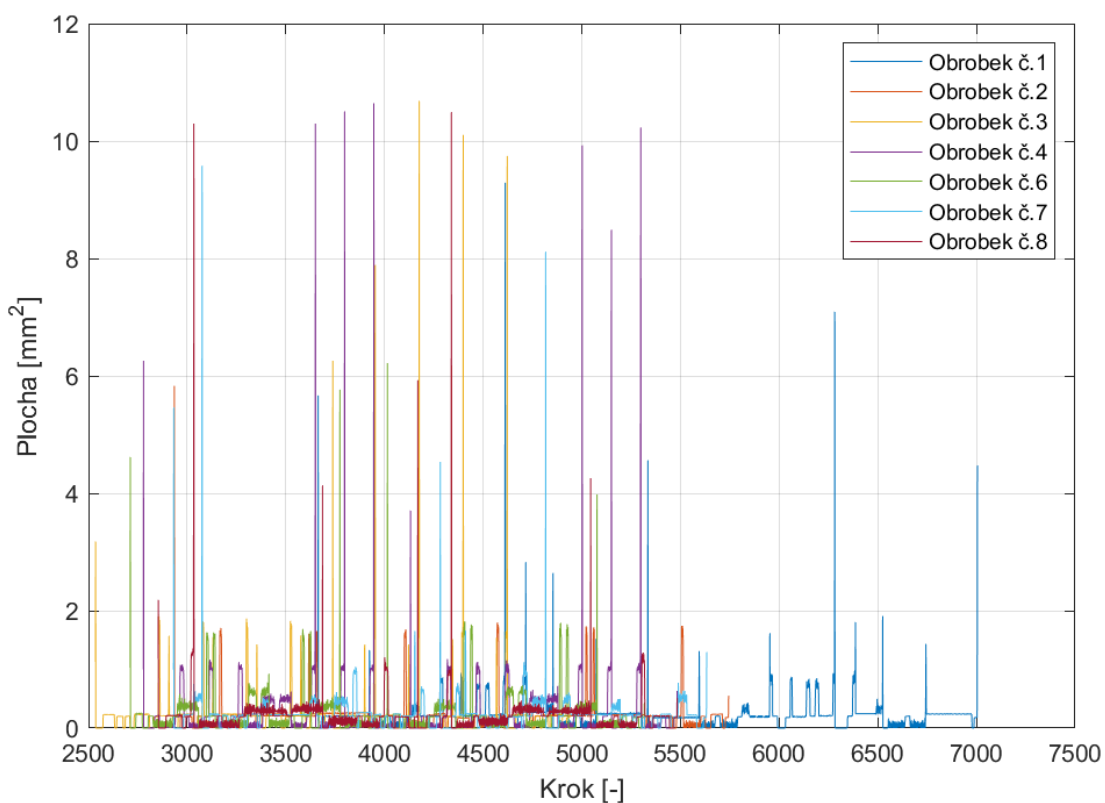
7.1.5 Plocha třísky

Hodnoty plochy třísky byly opět exportovány ze SW MillVis. Tento parametr je důležitý z pohledu vytváření tepla, které se objevuje na nástroji a může mít vliv na



výsledném opotřebení. Z teorie v kapitole 5.6 na Obr. 17 je zřejmé, že většina tepla, které se vytváří, odchází v třísece.

Simulované obráběcí procesy jsou časově náročné, a tudíž je nutné, aby plocha třísky byla v průběhu obrábění konstantní tak, aby bylo zaručeno, že dojde k minimálnímu opotřebení, které je sice v rámci dokončovacích operací minimální, ale je schopno zanést do řezného procesu deformace, které přímo nesouvisí s teplotními chybami. Graf průběhu plochy třísky pro hodnocené obrobky je uveden na Obr. 35.



Obr. 35- Graf průběhu plochy třísky v závislosti na kroku.

Oproti vyhodnocení řezné rychlosti se zde vyhodnocoval rozptýl hodnot, který by měl zaručit představu o již zmíněné konstantnosti průběhu. Konečné vyhodnocení je vypracováno v Tab. 8. Hodnotícím parametrem bylo určit průměrnou hodnotu, ta je zpracována v rozměru třech desetinných míst. Tato hodnota by se při prvotním pohledu mohla zdát jako zavádějící a zbytečně přesná, ale jelikož se jedná o dokončovací operaci (vyskytují se malé hodnoty) a cílem je vyhodnotit obrobky nejpřesnějším způsobem se zanesením větší rozmanitosti v porovnávání, je tento způsob dostačující.



Tab. 8- Vyhodnocení plochy třísky.

		Počet přejezdů						Číslo obrobku	Průměr	Hodnocení
		2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14			
Rozptyl	0,102	0,116	0,127	0,120	0,119	0,120	1	0,118	4	
	0,079	0,081	0,083	0,085	0,085	0,084	2	0,083	5	
	0,241	0,249	0,249	0,262	0,266	0,269	3	0,342	1	
	0,337	0,344	0,350	0,343	0,340	0,340	4	0,141	3	
	0,126	0,134	0,143	0,147	0,147	0,148	6	0,144	3	
	0,114	0,112	0,118	0,121	0,119	0,116	7	0,117	4	
	0,147	0,159	0,162	0,161	0,160	0,161	8	0,158	2	

Průměr	Hodnocení
<0,1	5
0,1-0,125	4
0,125-0,15	3
0,15-0,175	2
0,175+	1

7.1.6 Síly v obráběcím procesu

Teplota řezání (střední teplota stykových míst) řezného procesu je vyjádřena vztahem:

$$T_{\check{r}} = C_{\theta} \cdot a_p^{x_{\theta}} \cdot f^{y_{\theta}} \cdot v_c^{z_{\theta}}, \quad (6)$$

kde $T_{\check{r}}$ je teplota řezání, C_{θ} empirická konstanta a x_{θ} , y_{θ} a z_{θ} jsou empirické exponenty.

Po vyjádření jednotlivých složek sil (řezná, posuvová a pasivní):

$$F_c = C_{F_c} \cdot a_p^{x_{F_c}} \cdot f^{y_{F_c}}, \quad (7)$$

$$F_f = C_{F_f} \cdot a_p^{x_{F_f}} \cdot f^{y_{F_f}}, \quad (8)$$

$$F_p = C_{F_p} \cdot a_p^{x_{F_p}} \cdot f^{y_{F_p}}, \quad (9)$$



kde C_{Fc} , C_{Ff} , C_{Fp} jsou empirické konstanty a x_{Fc} , x_{Ff} , x_{Fp} , y_{Fc} , y_{Ff} , a y_{Fp} jsou empirické exponenty. Tímto je dokázáno, že řezné síly mají přímý vliv na výslednou teplotu řezání, proto byly řezné síly uvažovány do konečného hodnocení [28].

Vyhodnocení probíhalo totožně jako u vyhodnocení plochy třísky. V níže uvedených Tab. 9, Tab. 10, Tab. 11 jsou uvedené hodnoty rozptylu pro jednotlivé osy. Tyto hodnoty byly získány pomocí funkce *var* použité v programu Matlab 2021b. Simulace obráběcího procesu probíhala interpolací v osách X a Z. Průběhy, ze kterých se vyhodnocovaly rozptyly jsou uvedeny v Příloha 3- Grafy průběhů sil.

Tab. 9- Vyhodnocení řezných sil pro osu X.

Počet přejezdů pro osu X							
	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	Č. obrobku
Rozptyl	0,85	0,87	0,90	0,89	0,89	0,88	1
	1,11	1,09	1,10	1,11	1,11	1,12	2
	1,62	1,64	1,64	1,65	1,65	1,65	3
	1,96	1,94	1,94	1,94	1,93	1,93	4
	1,54	1,59	1,63	1,61	1,62	1,61	6
	0,87	0,91	0,92	0,93	0,93	0,92	7
	1,03	1,08	1,09	1,08	1,08	1,08	8
	Počet kroků tam a zpět	Průměr		Hodnocení		Č. obrobku	
	3342	0,88		5		1	
	2810	1,11		4		2	
	2405	1,64		1		3	
	2895	1,94		1		4	
	2606	1,60		1		6	
	2702	0,91		4		7	
	2629	1,07		3		8	

Průměr	Hodnocení
<0,9	5
0,9-1,0	4
1,0-1,1	3
1,1-1,2	2
1,2+	1



Tab. 10- Vyhodnocení řezných sil pro osu Y.

		Počet přejezdů pro osu Y						Č. obrobku
		2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	
Rozptyl	0,58	0,63	0,65	0,65	0,65	0,65	1	
	1,09	1,08	1,13	1,14	1,15	1,16	2	
	1,20	1,25	1,28	1,29	1,30	1,30	3	
	1,58	1,57	1,59	1,61	1,59	1,60	4	
	1,51	1,64	1,68	1,67	1,69	1,68	6	
	0,63	0,69	0,71	0,72	0,72	0,71	7	
	0,77	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	8	
	Počet kroků tam a zpět		Průměr		Hodnocení		Č. obrobku	
3342		0,63		5		1		
2810		1,13		1		2		
2405		1,27		1		3		
2895		1,59		1		4		
2606		1,65		1		6		
2702		0,70		5		7		
2629		0,83		3		8		

Průměr	Hodnocení
<0,7	5
0,7-0,8	4
0,8-0,9	3
0,9-1,0	2
1,0+	1



Tab. 11- Vyhodnocení řezných sil pro osu Z.

		Počet přejezdů pro osu Z					Č. obrobku	
		2-4	4-6	6-8	8-10	10-12		12-14
Rozptyl		2,11	2,05	2,04	2,10	2,04	2,08	1
		2,79	3,03	3,02	3,08	3,08	3,09	2
		2,90	3,07	3,22	3,21	3,22	3,22	3
		3,94	3,98	4,11	4,14	4,12	4,18	4
		3,98	4,43	4,47	4,46	4,44	4,43	6
		1,90	2,04	2,11	2,11	2,13	2,13	7
		1,94	2,10	2,17	2,16	2,19	2,21	8
		Počet kroků tam a zpět	Průměr		Hodnocení		Č. obrobku	
		3342	2,07		5		1	
		2810	3,01		2		2	
		2405	3,14		2		3	
		2895	4,08		1		4	
		2606	4,37		1		6	
		2702	2,07		5		7	
		2629	2,13		5		8	

Průměr	Hodnocení
<2,5	5
2,5-3,0	4
3,0-3,5	3
3,5-4	2
4+	1

7.2 Výsledné zhodnocení výběru testovacího obrobku

Ve výše zmíněných kapitolách byly popsány vyhodnocovací parametry a jejich následné zhodnocení. V Tab. 12 jsou shrnuty všechna vyhodnocovací kritéria s bodovým ohodnocením. Sečtením bodů byl dosažen výběr modelu obrobku, který bude použit při konečném obrábění.

Do hodnocení byla zahrnuta vlastnost obrobku "Symetrie/asymetrie", z pohledu konstantního rozložení ploch. Dále parametry "Síly osa Y" a "Možnost dalšího obrobení" byly vynásobeny koeficientem 0,5, jelikož se jedná o parametry s menší důležitostí (simulace probíhala interpolací os X a Z oproti reálnému obrábění). Výsledkem hodnocení je Testovací obrobek č. 1., který je uveden na Obr. 23 v kapitole 6.4.1.



Tab. 12- Výsledné bodové ohodnocení testovacích obrobků.

Parametry hodnocení	Číslo obrobku						
	1	2	3	4	6	7	8
Čas obrábění	5	3	1	2	2	2	2
Plocha třísky	4	5	1	3	3	4	2
Síly osa X	5	3	1	1	1	4	3
Síly osa Y	2,5	0,5	0,5	0,5	0,5	2,5	1,5
Síly osa Z	5	3	3	1	1	5	5
Možnost dalšího obrábění	1,5	1,5	1	1,5	2	2	2
Počet ploch	3	2	2	4	3	2	2
Symetrie/asymetrie	2,5	2,5	1,25	2,5	2,5	1,25	1,25
Řezná rychlost	5	5	2	1	1	3	1
Celkové hodnocení	33	25,5	12,7	16,5	16	25,75	19,75

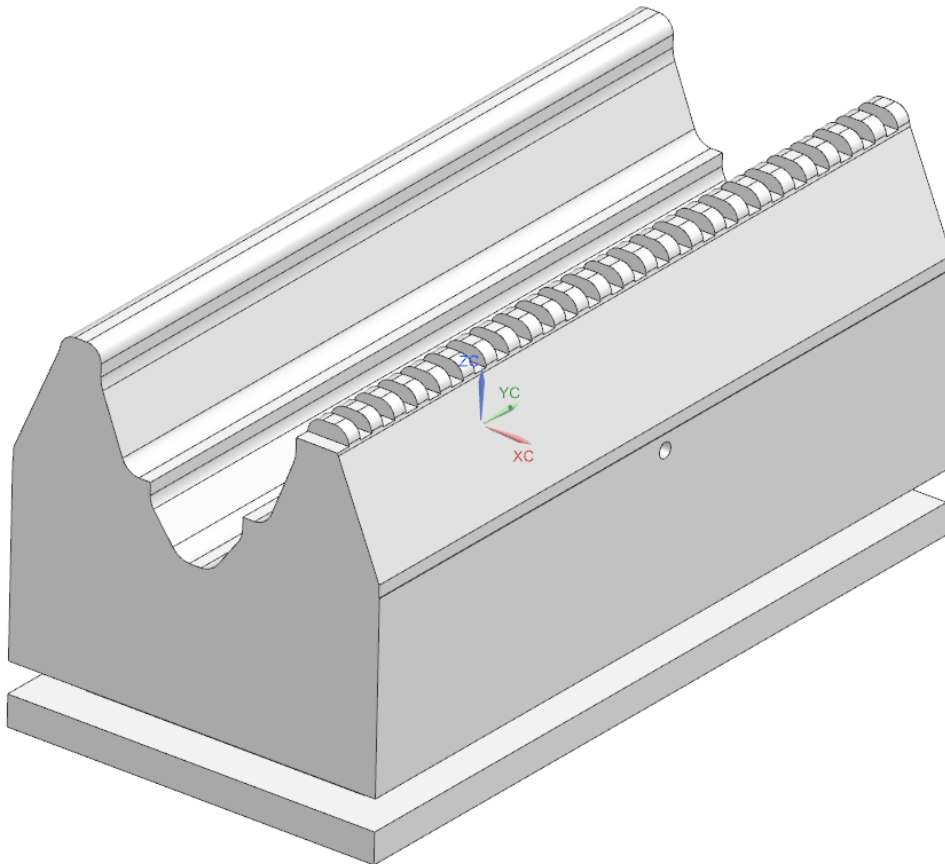
7.3 Obráběcí experiment

Před samotným řezným procesem bylo ještě nutné provést úpravy modelu. Prvotní úpravou bylo samotné sražení o 1 mm. Určilo se, že stačí pouhých 0,2 mm hrubování a 0,1 mm mezidokončovací operace tak, aby bylo zaručeno vystředění nástroje vůči obrobku (stolu).

Významnou změnou je zavedení dodatečných zubových vybrání o rozměrech 10 x 10 mm po obvodě jednoho zubu. Tyto zuby se nebudou v řezném procesu obrábět a dráha nástroje bude kopírovat předešlou konturu obrobku. Důvodem zakomponování zubů je vytvoření referenční roviny pro souřadnicový měřicí stroj pro osu Z. Pro osazení senzoru pro měření teploty uvnitř obrobku byl ještě vyvrtán pomocí ruční vrtačky otvor

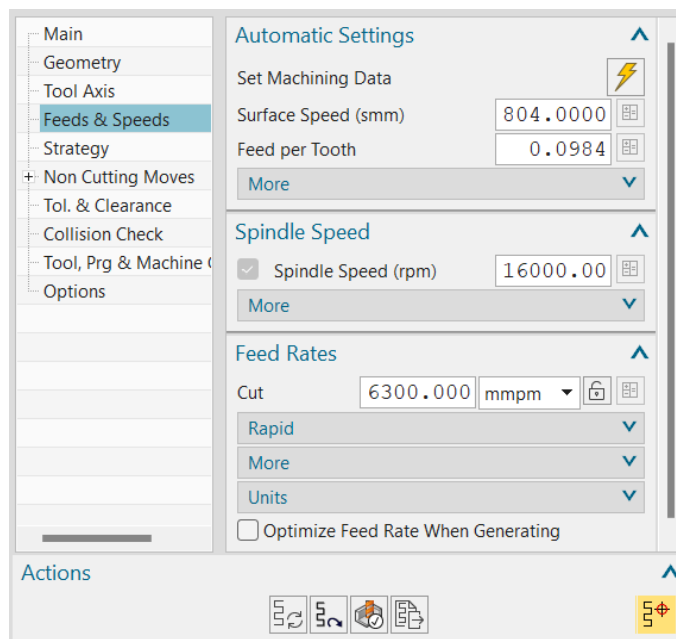


o průměru 10 mm uprostřed obrobku (viz Obr. 38). Úplné umístění vně obrobku bylo realizováno pomocí naneseného lepidla. Model obrobku je uveden na Obr. 36.



Obr. 36- Model konečného testovacího obrobku č. 1. "zuby zaoblené zkosené".

Poslední změnou je změna otáček z $12\,000\text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$ na $16\,000\text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$ a zvýšení posuvu na $6\,300\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Hodnoty byly vybrány obsluhou stroje, která má zkušenosti s frézou MCU 700 a dokáže odhadnout chování stroje při výše zmíněných podmínkách. Tento způsob výběru se liší od doporučených nebo vypočítaných hodnot, ale používá se v praxi v průmyslu z důvodu neprediktivního chování obráběcí operace. Změnou je snaha docílit většího zahřátí vřetene/zatížení stroje, a tím výraznější možnost projevu teplotní chyby. Parametry jsou uvedeny na Obr. 37. Simulovaný čas obrábění se zkrátil na 8 hodin a 40 minut. Výše zmíněné změny jsou minimální, a tudíž nemají žádný vliv na předchozí vyhodnocení výběru obrobku v kapitole 7.



Obr. 37- Konečné parametry dokončovací operace.

7.3.1 Měřící aparatura

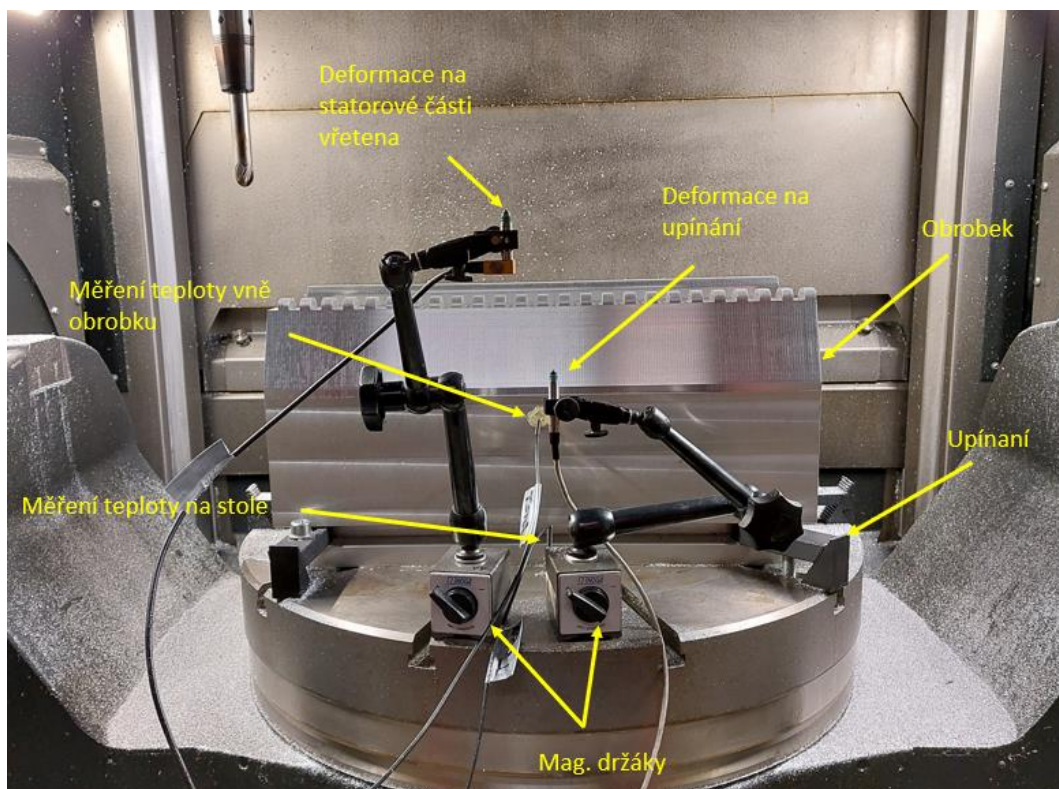
Přístroje použité k měření jsou uvedeny v Tab. 13. Byly použity senzory, které jsou předem instalované do stroje od výrobce při ustavení stroje. Jedná se o teplotní čidla typu Pt100 třídy A, které jsou umístěny např. u ložisek, motorů či vřetena (v místech propadů tepla) [12]. Hodnoty z teplotních čidel jsou zaznamenávány pomocí měřící ústředny cRIO-9014 [31] umístěné přímo v rozvodové skříni OS. K této ústředně jsou připojeny moduly analogových vstupů NI. Konkrétně modul NI 9219 [32] měří hodnoty dalších odporových teplotních čidel Pt 100 třídy A (viz dále) a z kontaktního indukčního snímače posunutí od firmy Mesing (T201F, T202FS viz [33], kap. 7.3.3, Obr. 40).

Experiment byl doplněn o další měřící prvky, které jsou zobrazeny na Obr. 38. Vnitřek OS byl osazen snímači, které nejsou určeny k vyhodnocení do diplomové práce, ale slouží k získání dat pro případné odlišné vyhodnocení (deformace na vřeteni, deformace na satorové části vřetena). Vyhodnocení dat bylo provedeno pomocí předem připraveného programu v LabVIEW. Schéma zapojení je uvedené v Příloha 4- Schéma zapojení měřící aparatury.



Tab. 13- Použitá aparatura.

Název	Firma	Označení	Počet	Poznámka
Indukční čidlo horizontální	Mesing	T201F	1	[33]
Indukční čidlo vertikální	Mesing	T202FS	1	[33]
Mag. držáky	Noga	x	2	x
Kontaktní odporové čidlo	ČVUT v Praze	x	2	vyrobeno interně, Pt 100, tř. A
Měřicí ústředna	National instruments	NI USB-9162	1	Hi-Speed USB Carrier
Měřicí ústředna MCU 700	National instruments	Crio-9014	1	Hi-Speed USB Carrier
Modul analogového vstupu	National instruments	NI 9219	1	[32]



Obr. 38- Měřicí aparatura před dokončovací operací (1. sekvence).

7.3.2 Průběh měření

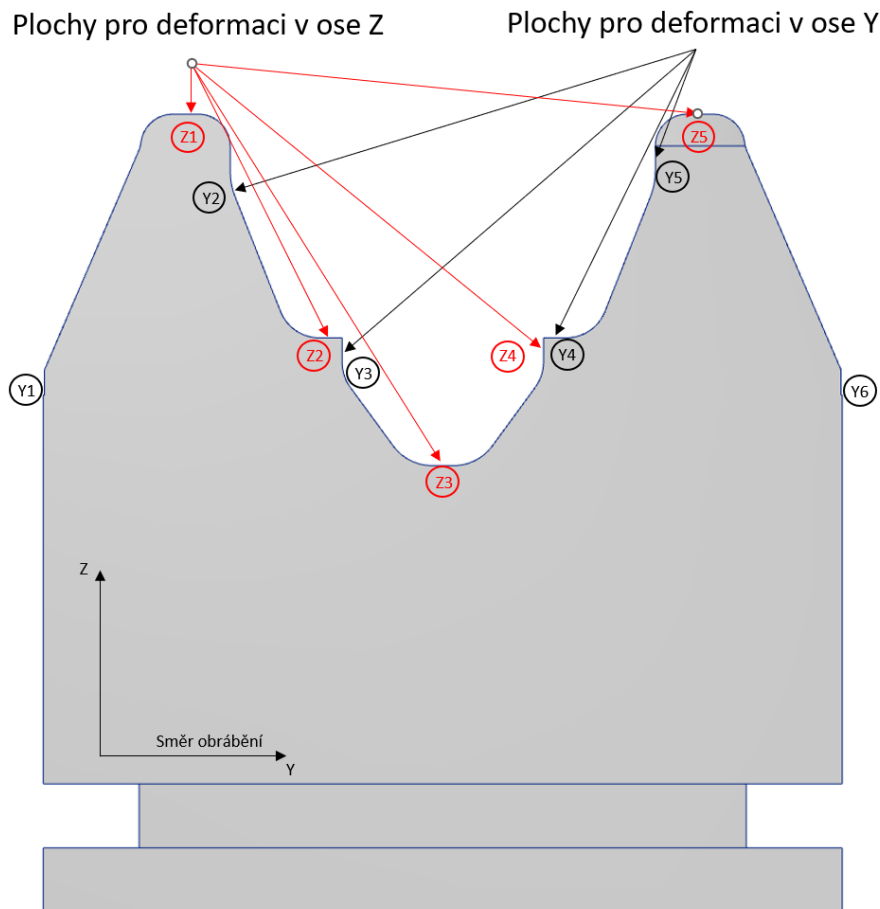
Průběh samotného řezného procesu a následného měření bylo rozplánováno do více dnů, jelikož tento typ testu je časově náročný. Před testem se předběžně určilo označení ploch, které jsou pojmenovány na Obr. 39. Aby bylo měření nejpřesnější, byl zahrnut do



vyhodnocení SMS od firmy CORDE (BRIDGE TYPE CNC COORDINATE MEASURING MACHINE viz [34]) s použitou sondou SP25M od firmy RENISHAW viz [35].

Sekvence obrábění byla rozvrhnutá na pět částí. Bude probíhat s použitím a bez použití chladicí emulze s kombinací s použitím a bez použití kompenzačního modelu teplotních chyb OS. Posledním obráběním bude dodatečně vybrána jedna z výše zmíněných sekvencí, které se mezi sebou budou porovnávat z pohledu opakovatelnosti (5 obráběcích sekvencí). Každý z realizovaných experimentu byl rozdělen do úseků:

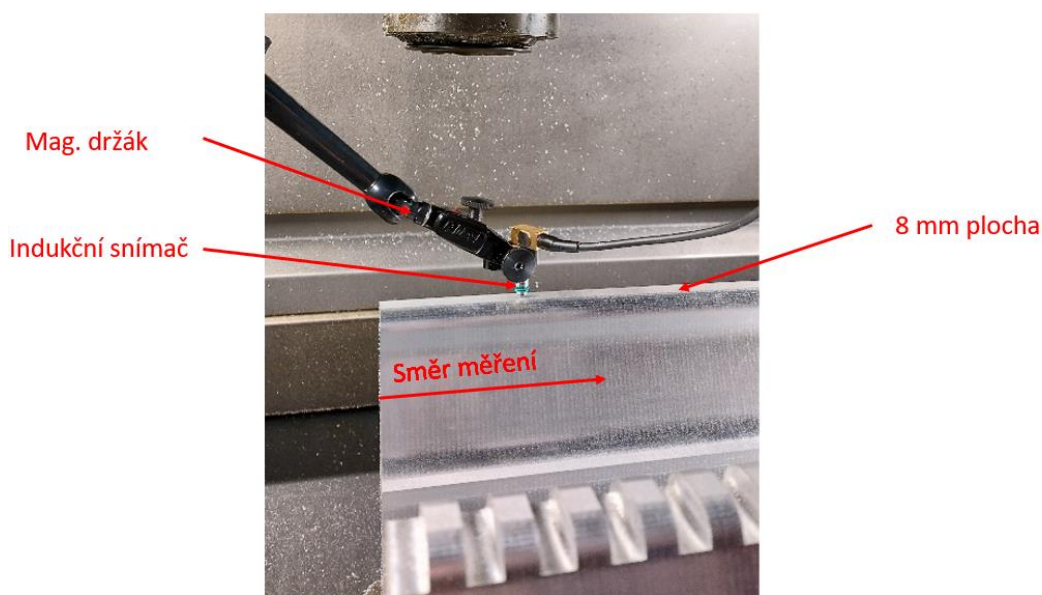
- 1) Upnutí obrobku a osazení sensoriky
- 2) Zahřívací fáze vřetena (předem udělán doporučený program od výrobce)-
sekvence 8 minut s proměnnými otáčkami vřetene (opakuje se před každým
obráběním)
- 3) Zahájení hrubovací operace ($a_p= 0,3$ mm)
- 4) Zahájení mezidokončovací operace ($a_p= 0,1$ mm)
- 5) Vyfrézování drážek válcovou frézou ($d= 10$ mm, $a_p= 10$ mm)
- 6) Zahájení dokončovací operace ($a_p= 0,1$ mm)
- 7) Změření teplotních deformací stroje promítnutých do evaluačních ploch
obrobku na stroji po dokončovací operaci
- 8) Převoz a měření ploch na obrobku na SMS
- 9) Iterační postup bodů 1), 2), 5), 6) a 7)



Obr. 39- Označení 8 mm ploch na obrobku pro zjištění teplotních deformací.

7.3.3 Měření deformací

Deformace na povrchu obrobku byly měřeny pomocí kontaktního indukčního snímače s označením T202F viz Tab. 13. Byl připnut magnetický držák na vřeteno frézky a snímač byl v průběhu nastavován do poloh tak, aby strojem bylo možné projíždět kontinuálně jednotlivé evaluační plochy (viz Obr. 40). Posuv byl nastaven na $500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, aby bylo docíleno zkrácení doby měření přibližně na 1 min/plocha. V programu LabVIEW, pomocí kterého se hodnoty ze snímače zapisovaly, byla nastavena frekvence 100 Hz (ve vazbě na posuv během měření tak, aby bylo snímáno přibližně 100 hodnot na 1 mm povrchu testovacího obrobku). Příklad měření evaluační plochy Z1 je uveden na Obr. 40. Snímač T202F se vyznačuje citlivostí $73,75 \pm 0,15 \text{ Mv}/(\text{V} \cdot \text{mm})$ při $R = 2 \text{ k}\Omega \pm 0,1\%$ a opakovatelností $0,02 \text{ }\mu\text{m}$ [31].



Obr. 40- Měření ploch pomocí kontaktního indukčního snímače posunutí.

7.3.4 Závěr obrábění testovacího obrobku

Bohužel v průběhu měření došlo k chybě v elektrické síti a první měřicí sekvence z čidel, které zaznamenává měřicí ústředna Crio-9014 na MCU 700 nebyla zaznamenána (bez kompenzačního modelu a chladicí emulze). Tato chyba nemá na výsledné vyhodnocení vliv, jelikož sensorika na MCU 700 je druhotného charakteru v tomto experimentu a použitelná v případech např. bližšího přezkoumání teplot jednotlivých částí nebo otáček vřetena.

Část experimentu s měřením deformací na površích testovacího obrobku proběhla bez problémů. Všechny testy na stroji MCU 700 včetně měření na SMS trvaly přibližně 2 týdny.

Dokončovací operace probíhala ve všech případech přibližně 10 hodin a 20 minut. Důvodem zvýšení času bylo přidání NC kódu, který po odbavení navede nástroj nad snímače deformací vřetene a nástroje uvedené na Obr. 38. Tento NC kód se opakuje ze začátku po 15 minutách (první hodina obrábění) a následně po 30 minutách.



8 Vyhodnocení naměřených dat na testovacím obrobku

Závěrečnou částí je vyhodnocení naměřených dat na testovacím obrobku. K vyhodnocení byly dodány naměřené hodnoty v podobě *.mat* složek pro jednotlivé evaluační plochy obrobku z programu LabVIEW, které obsahují hodnoty z kontaktního indukčního snímače (viz kap. 7.3.3). Tyto hodnoty je nutné upravit v programu MATLAB.

Hodnotit se bude tzv. relativní deformace. Hodnota z kontaktního senzoru posunutí je vždy vynulována na hraně aktuálně měřené plochy testovacího obrobku (předpokládá se, že teplotní stav stroje je přibližně v rovnováze s okolím). Grafy, které nebudou uvedeny v samotném vyhodnocení, jsou uvedeny v Příloha 5- Samostatné grafy z měření.

Výsledky budou vyhodnocovány dle rozdílu mezi jednotlivými maticemi, které obsahují data deformací. Z rozdílu se extrahují maximální a minimální hodnoty deformací, které se budou mezi sebou porovnávat dle aritmetických průměrů. Tento rozdíl by měl poukázat na to, jaké zlepšení či zhoršení, nastalo při použití jednotlivých parametrů při řezném procesu. Vzorec (10) pro výpočet rozdílu deformací se skládá z naměřené matice deformací, kde se očekávají horší výsledky Δ_1 vůči matici, kde se očekávají lepší výsledky (menší deformace) Δ_2 .

$$\Delta = \Delta_1 - \Delta_2 \quad (10)$$

Pomocí výše zmíněného rozdílu budou vyhodnocovány tyto parametry:

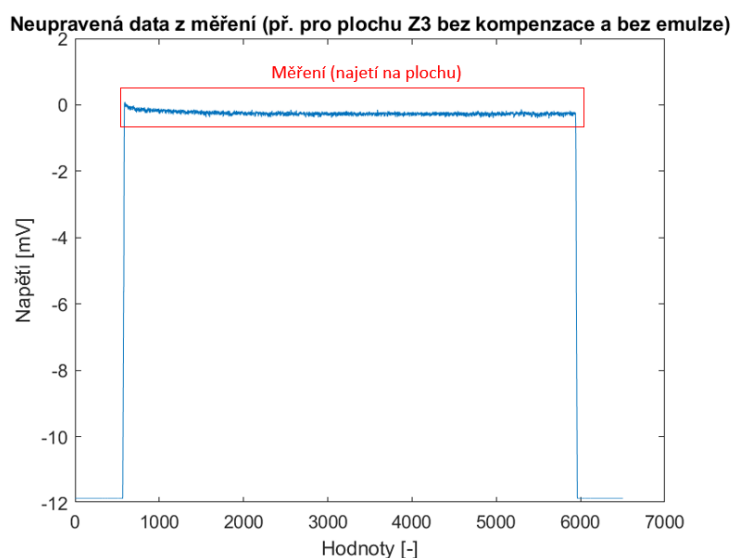
- Porovnání měření na SMS s měřením přímo na stroji pomocí indukčního snímače (tzv. on-machine measurement);
- Srovnání kompenzačního modelu teplotních chyb stroje;
- Opakovatelnost měření;
- Použití emulze;



8.1.1 Úprava naměřených dat

Na Obr. 38 je uveden způsob měření evaluačních ploch testovacího obrobku. Aby bylo možné změřit celý úsek, je nutné provést najíždění kontaktního indukčního snímače na plochu z určité vzdálenosti od obrobku. Následně se snímač dotkne plochy a začne zaznamenávat hodnoty viz Obr. 41. Pokud indukční snímač zapisuje hodnoty přibližně $\pm 11,8$ mV, v realitě měří nulové hodnoty. Je nutné hodnoty rozdílné od nuly ($\pm 11,8$ mV) separovat a vybrat pouze měřený úsek (kontakt s plochou) viz Obr. 41.

Výstupem indukčního snímače (resp. z měřicí karty NI 9219) není přímo deformace, ale hodnota v napětí. Tudíž je potřeba tyto hodnoty převést (tj. vynásobením všech hodnot koeficientem = 100).



Obr. 41- Příklad neupravených dat z kontaktního senzoru posunutí.

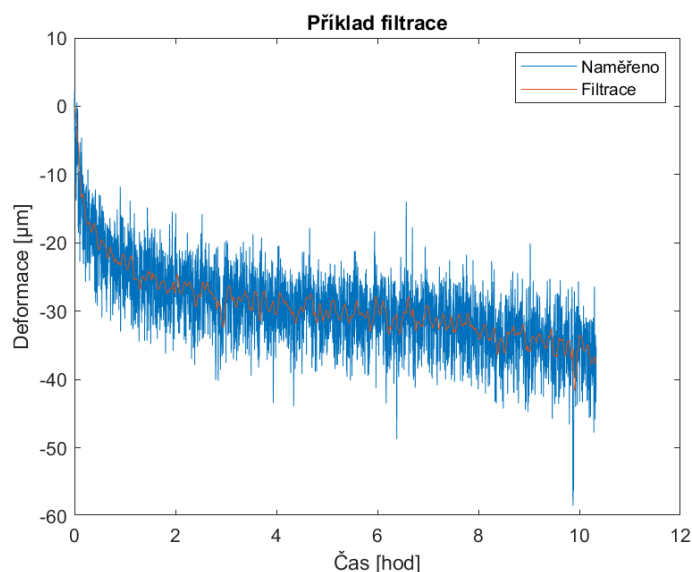
Další nutnou operací je vynulování deformací (viz Obr. 42). Tato operace je potřebná, jelikož kontaktní senzor posunutí byl pro každou plochu nastavován manuálně a bude vždy vyhodnocena relativní teplotní deformace stroje promítnutá do testovacího obrobku. Vynulování je realizováno pomocí odečtu první naměřené hodnoty posunutí od všech zbývajících na dané ploše. Tato operace zaručuje, že všechny grafy mají počátek v nule.

Poslední úpravou je filtrace dat. Z Obr. 42 je patrné, že naměřené hodnoty jsou zašumělé a k výslednému vyhodnocení a ukázce dat nevhodné. Filtrace byla provedena



pomocí funkce *lsim*. Po zadání času, vybraných hodnot a modelu dynamického systému obsahující vzorkovací frekvenci 0,08 Hz, je výstupem filtrace označená červenou barvou.

Je-li deformace záporná, jedná se o úbytek materiálu na obrobku. V případě kladné deformace se jedná o přebytek materiálu oproti referenční hodnotě. Obr. 42 je příkladem, kdy plocha byla pod hodnotou referenční hodnoty.



Obr. 42- Příklad filtrace, nulování a separace hodnot (plocha Z3 bez kompenzace a bez emulze).

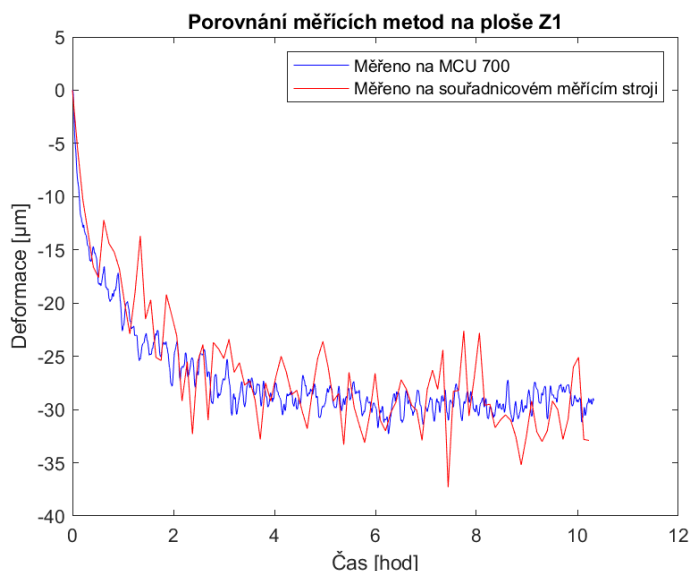
8.2 Porovnání měření na SMS s měřením přímo na stroji

Dostupný SMS je umístěn v jiných laboratořích než stroj MCU 700. Proto bylo vždy nutné testovací obrobek pro měření převést. Převoz obrobku včetně samotné měření na SMS je však zdoluhavý proces. Proto bude dále posouzeno, zda přesnost měření pomocí indukčního snímače přímo na stroji po obrobení je dostatečné pro následné vyhodnocení.

Samotné měření na SMS neprobíhalo standartně jako na frézce MCU 700, ale počátek měření sondou byl zahájen již najetím na plochu obrobku. Při vyhodnocení bylo nutné vzít v potaz tuto vzdálenost tak, aby byly hodnoty porovnatelné s měřícími daty na stroji MCU 700 pomocí kontaktního indukčního snímače. Proto se určil počet hodnot na milimetr povrchu obrobku měřeného na MCU 700 a tato hodnota se přičetla k danému rozsahu vybraných hodnot.



Po prvním měření bylo dokázáno (viz Obr. 43), že rozdíl mezi měřeními na SMS vůči senzorice použité po obrábění přímo na stroji je minimální. Z tohoto důvodu nebyl SMS použit při vyhodnocení dalších testů.



Obr. 43- Srovnání měření na stroji po obrábění a na souřadnicovém měřicím stroji pro plochu Z1.

V Tab. 14 jsou uvedeny rozdíly vypočtené dle vzorce (10) pro jednotlivé evaluační plochy obrobku. Matematický aparát byl proveden rozdílem dat z MCU 700 od dat ze SMS. Rozptyl byl vypočítán pomocí funkce VAR [36].

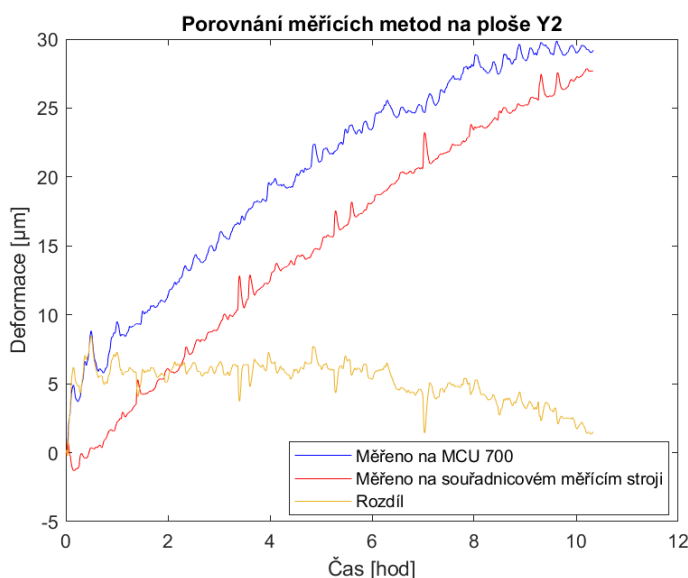
V tomto případě se porovnávaly hodnoty naměřené na frézce vůči hodnotám naměřených na SMS. Z výsledků průměrů pro osu Z je možné konstatovat, že se hodnoty pohybují v intervalu $\langle -10, 11 \rangle$ µm. Aritmetickým průměrem by tedy byla přibližná hodnota rozdílu 1 µm oproti hodnotám naměřené na frézce.

Tab. 14- Rozdíly pro srovnání měřícího stroje a indukčního snímače.

Osa Z						
Označení plochy	Z1	Z2	Z3	Z4	Rozptyl	Průměr
Rozdíl max. [µm]	11	19	6	7	28	11
Rozdíl min. [µm]	-8	-11	-12	-9	3	-10
Osa Y						
Označení plochy	Y2	Y3	Y4	Y5	Rozptyl	Průměr
Rozdíl max. [µm]	8	10	0	0	22	5
Rozdíl min. [µm]	0	0	-24	-30	189	-14



Naměřené hodnoty pro osu Y dosahují větších rozdílů. Tyto rozdíly lze pozorovat na Obr. 44. Zde je uveden průběh vyššího řádu, ale bohužel bez překrytí jednotlivých křivek. Tvar vyššího řádu měření je patrný i u ostatních ploch. Důsledkem tohoto tvaru je kontinuální zahřívání OS v průběhu řezného procesu s postupným ustálením. Možným důsledkem těchto rozdílů může být způsob měření na SMS.



Obr. 44- Srovnání měření na stroji po obrobení a na souřadnicovém měřicím stroji pro plochu Y2.

8.3 Vyhodnocení kompenzačního modelu teplotních chyb stroje MCU 700

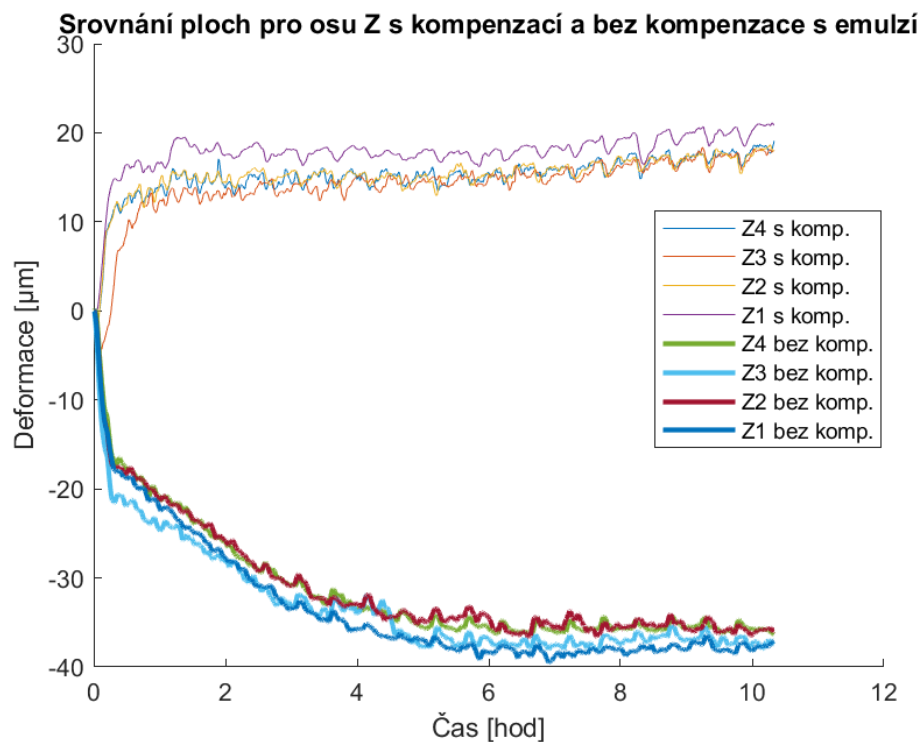
Kompenzační model teplotních chyb (viz [6]) byl vyhodnocován ze dvou pohledů. Jelikož obrábění probíhalo v sekvencích s použitou a bez použité emulze, bude samotné vyhodnocení uskutečněno taktéž v tomto srovnání vůči použitému kompenzačnímu modelu teplotních chyb stroje pro osy Y a Z.

8.3.1 Kompenzační model při použité emulzi

Nejprve budou vyhodnoceny teplotní deformace v ose Z. Teplotní deformace v ose Z by měly být dle teorie největší (viz Obr. 3) v podobě např. zahřívání ložisek atd. Na Obr. 45 jsou uvedeny průběhy teplotních deformací, které jsou změřené na všech plochách testovacího obrobku při aktivním nebo neaktivním kompenzačním modelu teplotních chyb. Z vyhodnocení plyne:



- Bez použití kompenzačního modelu teplotních chyb je v ose Z tendence obrábět s úbytkem materiálu.
- Při zapnutí kompenzačního modelu má model tendenci vyrovnávat výše zmíněný úbytek, který ovšem předdimenzuje a výsledná plocha je obrobena s přebytkem materiálu.
- Kompenzační model snížil deformaci průměrně cca o 20 μm .
- Bez použitého kompenzačního modelu je prvotní nárůst deformace ztelněji strmější než s použitým kompenzačním modelem.
- Při použití kompenzačního modelu se průběhy dříve ustálí a další průběh je pak téměř konstantní.



Obr. 45- Srovnání Z ploch při zapnutí/vypnutí komp. modelu s emulzí.

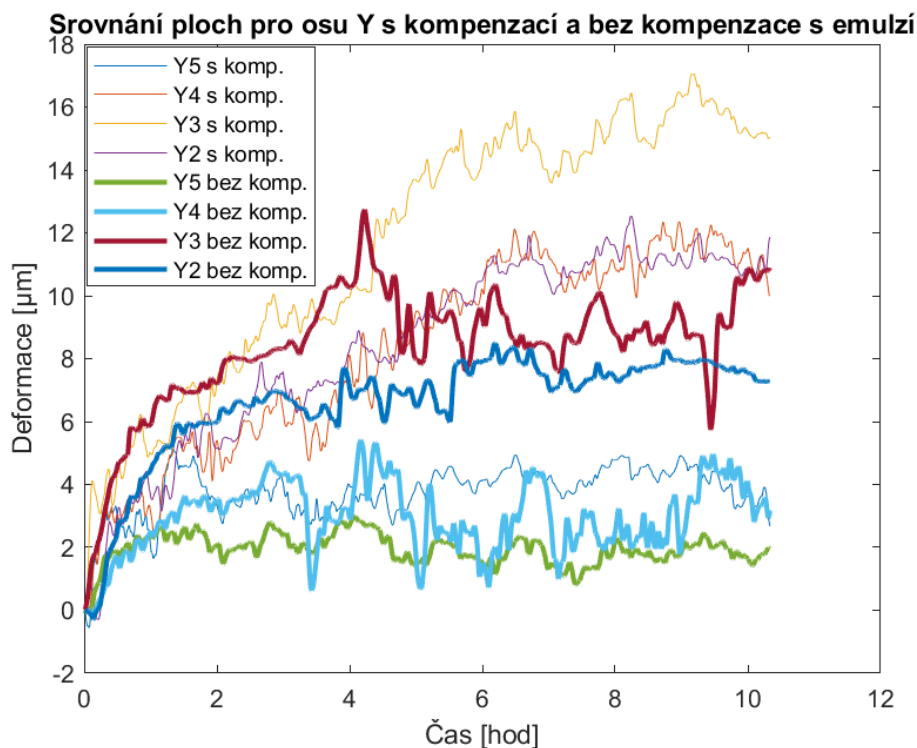
Přínos kompenzačního modelu na výslednou přesnost stroje (resp. výsledných obrobků) je uveden v Tab. 15. Průměrně teplotní deformace v ose Z vykazuje zlepšení o 22 μm oproti testu s vypnutým kompenzačním modelem. Výsledek je uspokojivý a určitě lze konstatovat, že kompenzační model pro tuto osu přinesl zlepšení.



Tab. 15- Rozdíly pro osu Z při zapnuté/vypnuté komp. modelu s emulzí.

Osa Z s emulzí komp./nekomp.						
Označení plochy	Z1	Z2	Z3	Z4	Rozptyl	Průměr
Rozdíl max. [μm]	23	22	24	21	1	22
Rozdíl min. [μm]	0	0	0	0	0	0

Co se týče použití kompenzačního modelu pro osu Y, zde nevyšly výsledky uspokojivě. Dle Obr. 46 je zřejmé, že osa Y vykazuje menší deformace. Při konkrétním přezkoumání je bohužel nutné konstatovat, že kompenzační model na osu Y nemá pozitivní vliv a dokonce ve všech případech při použité emulzi vyšel hůře než při vypnutém kompenzačním modelu. Zde je však nutno dodat, že kompenzační model nebyl kalibrován na testech s emulzí. Při srovnání ploch pro osu Y a Z lze konstatovat, že průběhy u ploch pro osu Y jsou rozdílné a nejsou podobné jako u ploch pro osu Z. Jediným shodným faktem je, že lze stále pozorovat postupné ustálení deformace s ohledem na zahřátí frézky. V Tab. 16 je shrnutí, z něž je patrné, že průměrné zhoršení v případě teplotních deformací v ose Y je $7 \mu\text{m}$.



Obr. 46- Srovnání Y ploch při zapnutí/vypnutí komp. modelu s emulzí (mokrý obrábění).

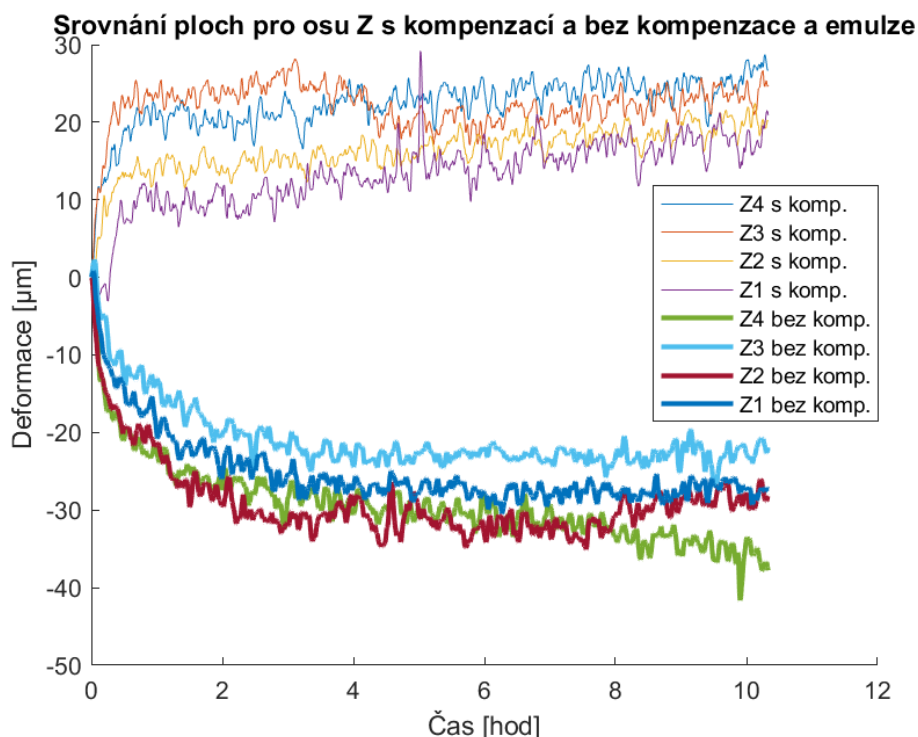


Tab. 16- Rozdíly pro osu Y při zapnuté/vypnuté komp. modelu s emulzí.

Osa Y s emulzí komp./nekomp.						
Označení plochy	Y2	Y3	Y4	Y5	Rozptyl	Průměr
Rozdíl max. [μm]	2	3	0	1	1	1
Rozdíl min. [μm]	-5	-11	-11	-3	11	-7

8.3.2 Kompenzační model bez použité emulze

Dále budou vyhodnoceny experimenty bez použité emulze. Zde lze předpokládat, že obrobené povrchy bez použité emulze (obrábění na sucho) by měly vykazovat větší deformace. V případě osy Z tento fakt platí pouze při použití teplotní kompenzace (viz Obr. 47), kdy průběhy oproti grafu s použitou emulzí (viz Obr. 45) přesahují deformaci 30 μm . Průběhy bez kompenzačního modelu a emulze jsou téměř totožné v porovnání s průběhy s emulzí (viz Obr. 45). Při dalším prozkoumání je taktéž znatelný rozptyl hodnot. Tento fakt bude dále rozebrán v kap. 8.5.



Obr. 47- Srovnání Z ploch při zapnutí/vypnutí komp. modelu bez emulze (obrábění na sucho).

V Tab. 17 jsou opět uvedeny průměrné hodnoty rozdílů jednotlivých křivek. Oproti použité emulzi je průměrné zlepšení o 16 μm .



Tab. 17- Rozdíly pro osu Z při zapnuté/vypnuté komp. modelu bez emulze.

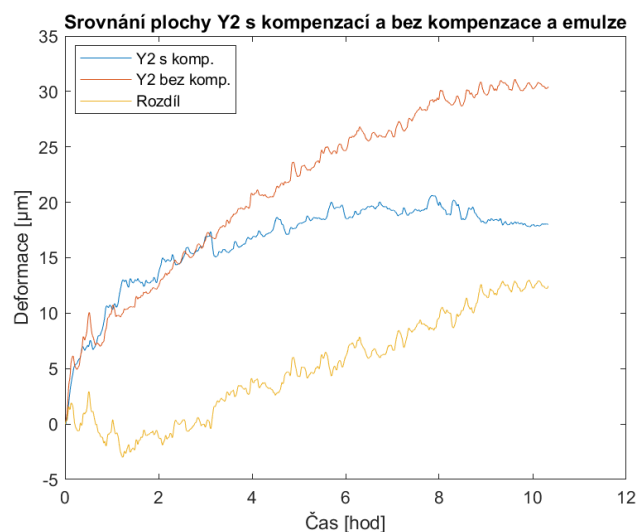
Osa Z bez emulze komp./nekomp.						
Označení plochy	Z1	Z2	Z3	Z4	Rozptyl	Průměr
Rozdíl max. [μm]	21	21	6	16	35	16
Rozdíl min. [μm]	-2	0	-13	-3	27	-5

Osa Y se v tomto případě chovala podobně jako při použité emulzi. Průměrně došlo ke zhoršení dle Tab. 18 o 11 μm . Ovšem i část, kde je rozdíl maximální je v porovnání s 11 μm vysoký a u některých ploch došlo ke zlepšení.

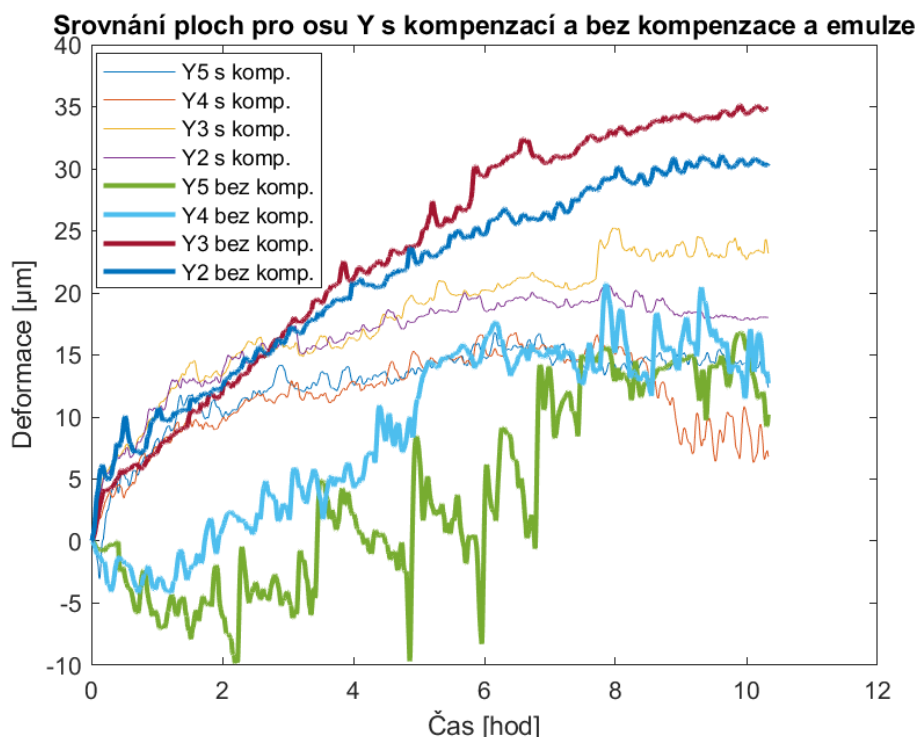
Tab. 18- Rozdíly pro osu Y při zapnuté/vypnuté komp. modelu bez emulze.

Osa Y bez emulze komp./nekomp.						
Označení plochy	Y2	Y3	Y4	Y5	Rozptyl	Průměr
Rozdíl max. [μm]	13	12	13	3	19	10
Rozdíl min. [μm]	-3	-5	-13	-23	65	-11

Příklad zlepšení je uveden na Obr. 48. V počátku jsou průběhy velmi podobné a dochází k nárůstu deformace na začátku obráběcího procesu zhruba do dvou hodin. Dále se však teplotní deformace v ose Y při aktivním kompenzačním modelu ustaluje a model má pozitivní vliv na výslednou přesnost stroje (resp. obrobku). Pokud porovnáme Obr. 47 (s emulzí) a Obr. 48 (bez emulze), lze konstatovat, že se u průběhů bez emulze rapidně zvýšila teplotní deformace v ose Y. Ke zlepšení a podobnému průběhu jako na Obr. 48 došlo též u plochy Y3. Souhrn průběhů deformací pro osu Y jsou uvedeny na Obr. 49.



Obr. 48- Použití komp. modelu bez emulze u plochy Y2.



Obr. 49- Srovnání Y ploch při zapnutí/vypnutí komp. modelu bez emulze.

8.3.3 Shrnutí vyhodnocení kompenzačního modelu

Použití kompenzačního modelu mělo pozitivní vliv u osy Z, kde došlo k výraznému zlepšení přesnosti. Minimální zlepšení bylo 16 μm a kompenzační model zde fungoval dle očekávání a je schopen kompenzovat teplotní chyby v ose Z a zvýšit přesnost frézky MCU 700.

Na druhé straně osa Y vykazovala u všech měření zhoršení při použití kompenzačního modelu. Tento fakt je zřejmě způsoben větší komplexností a složitostí odhadu teplotního chování osy Y oproti ose Z, a tudíž osa Z je lépe predikována. V ose Y je také patrný větší rozptyl měřených teplotních deformací, a to jak bez emulze (viz Obr. 49) tak s emulzí (viz Obr. 46). V případě teplotních deformací v ose Y je také určitou nejistotou rozdíl mezi měřeními na SMS a měřeními přímo na stroji, kdy rozdíl činí až 5 μm (viz př. Obr. 44). Při měření kontaktním senzorem přímo na stroji mohlo dojít k chybě díky posunutí senzoru během přejezdu. Avšak hlavním účelem kompenzačního modelu je kompenzovat nejvíce namáhanou osu Z.



8.3.4 Zlepšovací návrhy

Dále budou uvedeny zlepšovací návrhy s ohledem na fakt, že toto téma je ve vědecké sféře nové a tato práce by mohla sloužit jako dobrý základ k vyvarování se některých chyb. Návrhy jsou:

- Při menší časové vytíženosti změřit jednotlivé plochy testovacího obrobku např. desetkrát a následně vyhodnocovat pomocí průměru a snížit tak nejistotu měření.
- Brát ohled na měřicí techniku. V některých případech nevycházely zejména plochy pro deformaci v ose Y s očekáváním. Mohl nastat fakt, že při přeměřování jednotlivých ploch došlo k pohybu senzoru nebo „zaseknutí“ kabelu o zuby plochy Z5. Tyto skutečnosti následně mohly zkreslit výsledné průběhy v případě teplotních deformací v osách Y a Z.
- Začátek měření pomocí indukčního snímače přímo na ploše. Při pozvolném kontinuálním najetí na plochy mohlo dojít k pohybu magnetického držáku a opět ke zkreslení dat. V průběhu vyhodnocení bylo taktéž nutné brát v potaz, že pružina ve snímači má specifické ustálení (počáteční překmit), které muselo být odměřeno s menší přesností (cca prvních 15 hodnot).
- Striktní kontrola posuvu při přeměřování ploch. Posuv byl nastaven na referenčních $500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ při přejíždění ploch tak, aby výsledné měření trvalo přesně 1 minutu na 1 plochu. Obsluha stroje ovšem v některých případech tento posuv bez vědomí mohla změnit pomocí otočného tlačítka (tzv. override), které bylo hojně využíváno při najíždění nad jednotlivé plochy. Některá data, která byla poskytnuta, obsahovala rozdílný počet hodnot, který byl nastaven na cca $10 \text{ hodnot} \cdot \text{mm}^{-1}$.

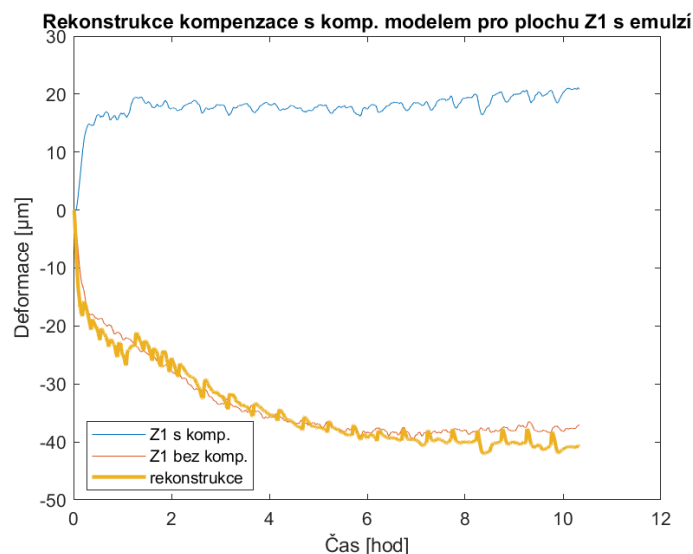
8.4 Opakovatelnost měření

Vyhodnocení spočívá v přičtení kompenzačních hodnot k naměřenému průběhu při testech se zapnutou teplotní kompenzací. Tímto lze v podstatě rekonstruovat stav stroje bez aktivní teplotní kompenzace a ten následně porovnat s jiným testem, který byl realizován bez kompenzačního modelu. Je možné získat podobné průběhy teplotních



deformací, jelikož zatěžování stroje je stejné a vnější podmínky během testů byly podobné. Tabulky jsou uvedeny v Příloha 6- Tabulky vyhodnocení opakovatelnosti.

Srovnání bylo provedeno pro dva druhy měření rozdělené dle použití emulze. U měření bez použité emulze byly, jak již bylo zmíněno, provedeny celkem tři obrábění. Příklad je uveden na Obr. 50, kde je pod názvem legendy „rekonstrukce“ zobrazeno výše zmíněné přičtení kompenzačního modelu k průběhu při použití kompenzace. Jelikož obecně plochy pro osu Z bez použití kompenzačního modelu vycházely záporně (úbytek materiálu na obrobku), je logické, že kompenzační model počítal se zápornými hodnotami. Tento příklad vyšel pozitivně. U ostatních ploch jsou průběhy podobné, ale posunuté v řádech jednotek μm . Kompenzační model, který byl pro výpočet použit je uveden na Obr. 51.

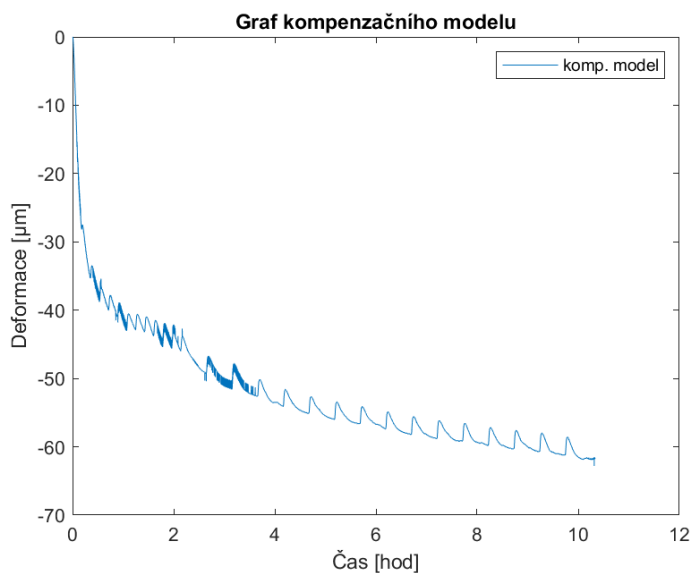


Obr. 50- Příklad rekonstrukce při použití emulze pro plochu Z1.

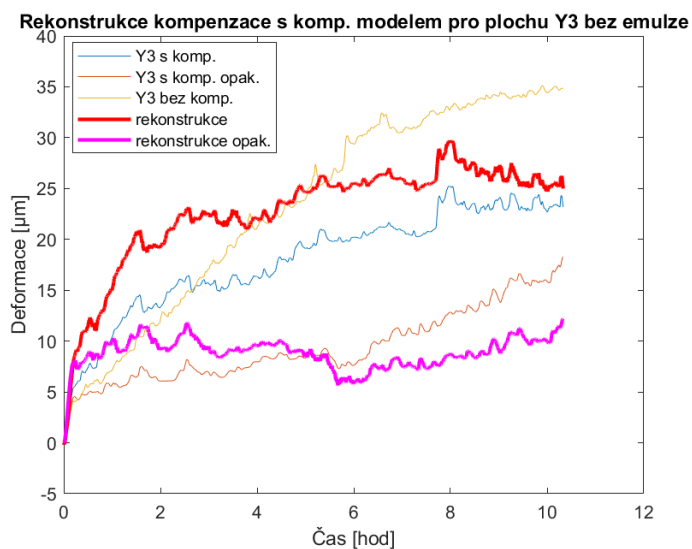
Při pohledu na , kde je uveden příklad pro rekonstrukci plochy pro osu Y, je opět patrné, že tuto úvahu nespĺňuje z pohledu smyslu a tvaru průběhů. To lze pozorovat při srovnání průběhů jednotlivých rekonstrukcí. Předpoklad je, že rekonstruované průběhy by se měly blížit (podobat) průběhům při nepoužitém kompenzačním modelu. Při prvotním pohledu srovnání jednotlivých rekonstrukcí se žlutým průběhem (Y3 bez komp.), je tento předpoklad nespĺněn. Důvody byly shrnuty v předchozí kapitole 8.3.3.



Na tento fakt poukazuje i tabulka v Příloha 6- Tabulky vyhodnocení opakovatelnosti, kde je jasně patrné, že rozdíly jsou markantnější u osy Y ve srovnání s osou Z.



Obr. 51- Vypočítaný kompenzační model pro osu Z při použití emulze.



Obr. 52- Příklad rekonstrukce pro plochu Y3 bez emulze.

8.5 Použití emulze

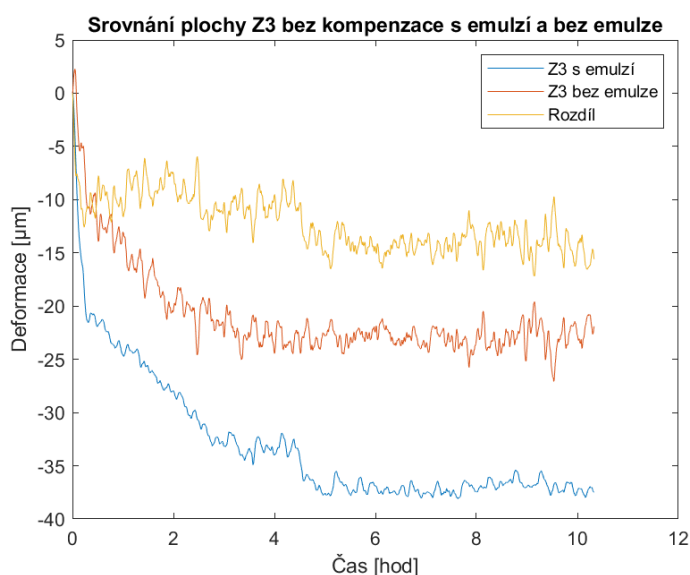
Emulze by měla mít pozitivní vliv na povrch obrobku. Dosáhneme jím snížení parametrů, které přímo neovlivňují výsledný povrch z pohledu teplotních chyb vytvořených obráběcím strojem, ale z pohledu např. technologie, teplotní roztažnosti materiálu atd. Cílem je zvýšit např. schopnost chlazení obrobku a nástroje nebo taktéž



správný odvod třísky z místa řezu. Rozdíl byl vypočítán odečtem průběhu měřených deformací přímo na stroji bez emulze od průběhu s testem s emulzí. Do vyhodnocení nebylo zahrnuto srovnání při použití kompenzačního modelu, jelikož samotný model zkresluje výsledky.

8.5.1 Srovnání bez použití kompenzačního modelu

Při vypnutí kompenzačního modelu při obrábění vyšly překvapivé výsledky, které jsou shrnuty v Tab. 19. Teoreticky by měly být výsledky bez použití emulze značně horší. To platí pro deformace v ose Y, kde je mezi jednotlivým použitím rozdíl značný. Pro teplotní deformace v ose Z ovšem vyšel průměrně nejvyšší rozdíl záporný ($-7 \mu\text{m}$). To znamená, že při vypnutí kompenzačního modelu vykazovaly teplotní deformace v ose Z lepší výsledky bez použití emulze (viz Obr. 53). To může být způsobeno mnoha faktory. Jelikož se jedná o komplexní celek nástroj-obrobek-stůl, je pravděpodobné, že došlo k teplotním roztažnostem jednoho z výše zmíněných komponentů. Po bližším přezkoumání dat ze stroje bylo zjištěno, že teplota stolu a obrobku se lišila ve srovnání se začátkem a koncem obrábění jen o 1 C° . Bohužel nebylo dostupné čidlo, které by měřilo teplotu samotného nástroje, avšak tento prvek je jedním z nejčastějších parametrů, který tyto vlivy ovlivňuje svojí teplotní roztažností.



Obr. 53- Příklad průběhu srovnání použité emulze pro plochu Z3



Tab. 19- Rozdíly pro srovnání požití emulze s kompenzačním modelem.

Osa Z bez komp.						
Označení plochy	Z1	Z2	Z3	Z4	Rozptyl	Průměr
Rozdíl max. [μm]	0	6	0	6	9	3
Rozdíl min. [μm]	-13	10	-17	-8	107	-7
Osa Y bez komp.						
Označení plochy	Y2	Y3	Y4	Y5	Rozptyl	Průměr
Rozdíl max. [μm]	23	28	19	15	25	21
Rozdíl min. [μm]	0	0	-7	-12	25	-5

8.6 Opotřebení nástroje

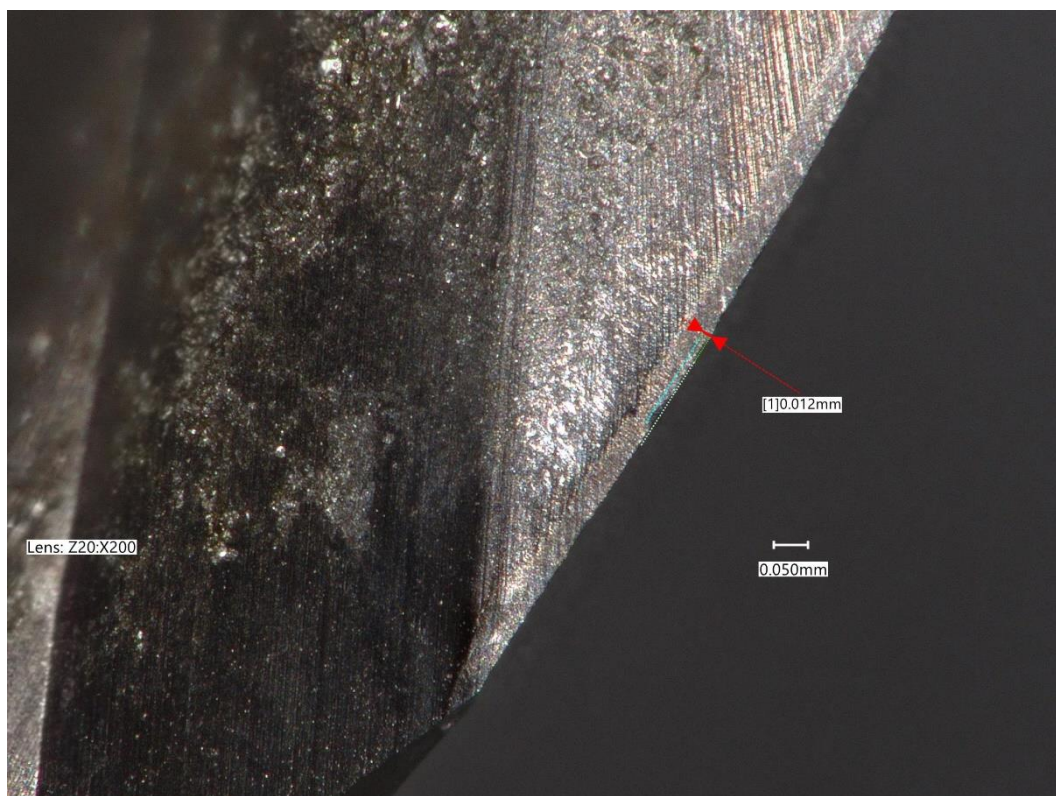
Aby bylo možné vyloučit vliv opotřebení nástroje, které by mohlo výsledky experimentů zkreslit (cílem experimentů je posoudit pouze teplotní chyby stroje), bylo dále zkoumáno opotřebení nástroje. Nástroj byl vzat na mikroskop, pomocí kterého je možné se zaměřit na deformace/praskliny na zubech nástroje. V celkovém měřítku je možné s jistotou konstatovat, že opotřebení nástroje má na výsledné deformace mizivý vliv. Pro příklad je uveden Obr. 54. Na místech v označených červených čtvercích je znatelné opotřebení odlomení kusů nástroje. Toto opotřebení je minimální s ohledem na měřítko a dle vizuální stránky je samotná hrana zubu téměř neporušena.



Obr. 54- Opotřebení nástroje s odlomenými kusy zubu.



Obr. 55 je podstatně zajímavější. Je znatelné, že došlo k odlomení hrany zubu a to by ve výsledku mohlo způsobit znatelně větší deformace než v případě na Obr. 54. Po bližším přezkoumání a vzhledem k velikosti tohoto opotřebení, je tento případ opět zanedbatelný.



Obr. 55- Opotřebení nástroje s poškozenou hranou zubu.

8.7 Statistické vyhodnocení experimentů

V poslední řadě je nutné uvést statistická data. Tyto data byly zkoumány z pohledu směrodatné odchylky měření, směrodatné chyby měření a nejistoty měření. Nejistota měření je vyvozena ze standardní nejistoty typu B. Vzorec pro výpočet pro jednotlivou nejistotu [8]:

$$u_z = \frac{\Delta z_{max}}{m} \quad (11)$$

Vzorec se skládá z odhadu rozsahu odchylek jmenovité hodnoty ΔZ_{max} a hodnoty m . Pro Gaussovo rozdělení je tato hodnota rovna 2. Jednotlivá nejistota se skládá ze dvou složek a to samotného indukčního snímače (linearita), který se použil na měření ploch



obrobku a modulového analogového vstupu měřicí karty NI 9219. Pro indukční snímač T301F je dle [33] chyba nelinearity 0,6 %. Pro analogový vstup dle [32] 0,03 %. Pro výpočet byly použity maximální hodnoty deformací pro jednotlivá měření. Výsledná nejistota typu B, výše zmiňovaných nejistot, má tvar [8]:

$$u_B = \sqrt{\sum_{j=1}^n u_{zj}^2} \quad (12)$$

Posledním vzorcem je celková nejistota měření skládající se z nejistoty měření typu B a koeficientu rozšíření $k_B = 2$. Výpočet je uveden ve vzorci (13) [8].

$$U = k_B \cdot u_B \quad (13)$$

Směrodatnou odchylku lze vypočítat přímo pomocí funkce *std* z programu Matlab. Směrodatná chyba, nebo také směrodatná odchylka výběrového průměru, byla vypočítána pomocí vzorce (14), kde parametr σ značí směrodatnou odchylku získanou výše zmíněnou funkcí a parametr n je rozsah výběru [37]. Výsledky statistických dat jsou uvedeny v Tab. 20.

$$\sigma_x = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (14)$$



Tab. 20- Tabulka statistických dat.

Osa Z s kompenzací bez emulze				
Označení plochy	Z1	Z2	Z3	Z4
Směrodatná chyba [μm]	0,1	0,0	0,0	0,0
Směrodatná odchylka [μm]	4,4	3,0	2,9	3,3
Nejistota měření [μm]	0,0	0,0	0,0	0,0
Osa Z bez kompenzace bez emulze				
Označení plochy	Z1	Z2	Z3	Z4
Směrodatná chyba [μm]	0,1	0,1	0,1	0,1
Směrodatná odchylka [μm]	4,7	4,8	4,4	5,2
Nejistota měření [μm]	0,0	0,1	0,0	0,1
Osa Y s kompenzací bez emulze				
Označení plochy	Y2	Y3	Y4	Y5
Směrodatná chyba [μm]	0,0	0,1	0,0	0,0
Směrodatná odchylka [μm]	3,9	5,1	3,6	3,4
Nejistota měření [μm]	0,0	0,0	0,0	0,0
Osa Y bez kompenzace bez emulze				
Označení plochy	Y2	Y3	Y4	Y5
Směrodatná chyba [μm]	0,1	0,1	0,1	0,1
Směrodatná odchylka [μm]	7,8	10,0	7,2	7,7
Nejistota měření [μm]	0,0	0,1	0,0	0,0
Osa Z kompenzací a emulzí				
Označení plochy	Z1	Z2	Z3	Z4
Směrodatná chyba [μm]	0,0	0,0	0,0	0,0
Směrodatná odchylka [μm]	2,4	2,4	3,5	2,4
Nejistota měření [μm]	0,0	0,0	0,0	0,0
Osa Z bez kompenzace a s emulzí				
Označení plochy	Z1	Z2	Z3	Z4
Směrodatná chyba [μm]	0,1	0,1	0,1	0,1
Směrodatná odchylka [μm]	7,1	6,5	6,0	6,7
Nejistota měření [μm]	0,1	0,1	0,1	0,1
Osa Y s kompenzací a s emulzí				
Označení plochy	Y2	Y3	Y4	Y5
Směrodatná chyba [μm]	0,0	0,1	0,0	0,0
Směrodatná odchylka [μm]	3,0	4,1	3,1	0,8
Nejistota měření [μm]	0,0	0,0	0,0	0,0
Osa Y bez kompenzace a s emulzí				
Označení plochy	Y2	Y3	Y4	Y5
Směrodatná chyba [μm]	0,0	0,0	0,0	0,0
Směrodatná odchylka [μm]	1,7	1,9	1,1	0,5
Nejistota měření [μm]	0,0	0,0	0,0	0,0



9 Závěr

V počátku se diplomová práce věnovala popisu teplotně zatíženého OS, kde byly rozebrány obecné chyby, které stroj ovlivňují včetně druhů přenosů tepla (viz kap. 3). Následně byla okrajově probrána tematika kompenzačních modelů teplotních chyb OS (viz kap. 4). V poslední části literární rešerše byla probrána problematika testovacích obrobků pro zjištění teplotních chyb OS a validaci kompenzačních modelů. Toto téma je ve vědeckých kruzích poměrně nové, tudíž není zcela specifikována norma, která by určovala výsledný testovací obrobek. Existuje Norma ISO 230-12 [38], která obecně specifikuje testovací obrobky pro teplotní chování. Bohužel se norma nezabývá problematikou konkrétně a není zde uvedena zmínka o kompenzačních modelech teplotních chyb, pro jejichž vyhodnocení byla tato diplomová práce vytvořena. Zde byla převzata literatura z vědeckých článků.

V praktické části nejdříve nastala otázka samotné podoby konstrukce testovacího obrobku. Bylo zkonstruováno celkem 8 modelů testovacích obrobků viz kap. 6.4.1 až kap. 6.4.8. Inspirace pro výslednou podobu konstrukce byla převzata z provedené rešerše a následně byly vymodelovány finální obrobky.

V následující kap. 7 byl výsledný obrobek pro frézku MCU 700 vybrán dle uvedených parametrů, jejichž výběr je odůvodněn a popsán v kap. 7.1.1 až kap.7.1.6. Na základě analýzy byl vybrán Testovací obrobek č. 1. “zuby zaoblené zkosené”.

Po výběru testovacího obrobku následovalo samotné obrobení na frézce MCU 700. Toto obrábění bylo rozděleno do 5 sekvencí, které kombinovalo použití kompenzačního modelu teplotních chyb OS nebo emulze. Po každém obrobení testovacího obrobku byly kontaktním indukčním snímačem změřeny plochy na testovacím obrobku, které byly zkonstruovány pro identifikaci teplotních chyb ve strojních osách Y a Z.

Následně došlo ke zpracování naměřených dat z každého testu s obráběním (zpracování souborů *.mat*). Nejdříve se vyhodnocovaly hodnoty ze SMS. Při konkrétním přezkoumání vycházely výsledné průběhy teplotních chyb ze SMS a indukčního snímače v osách Y a Z téměř totožně. Zmíněné teplotní chyby v ose Y vykazovaly oproti teplotním chybám v ose Z větší deviace. Možný důvod je uveden v kap. 8.2. Všeobecně lze



poznámenat, že kompenzační model teplotních chyb má pozitivní vliv na výslednou přesnost stroje pouze u osy Z. V případě teplotní chyby v ose Z při použité emulzi bylo průměrné zlepšení o 22 μm a bez použité emulze 16 μm (viz kap. 8.3.1. a kap. 8.3.2). Osa Y naopak nevycházela dle očekávání a došlo ke zhoršení. Zhoršení při použité emulzi bylo průměrně 11 μm a bez použité emulze 7 μm . Výsledkem je, že v případě teplotních deformací u osy Y, nepredikuje kompenzační model teplotních chyb tyto chyby zcela korektně.

Poslední částí bylo vyhodnocení dílčích požadavků z kap. 8. Co se týče otázky použité emulze, zde vyšly ve většině případů neočekávané výsledky. Použitá emulze by měla v konečném důsledku mít pozitivní vliv na výslednou přesnost bez použití kompenzačního modelu teplotních chyb, ale v rámci vyhodnocení došlo k odhalení deviace u osy Z při použité emulzi, kde je patrné, že v tomto případě má na výslednou přesnost emulze negativní vliv (kap. 8.5).

Diplomová práce splnila všechny stanovené cíle a v některých případech i převyšovala zadání. Byla probrána teorie testovacích obrobků, zkonstruován testovací obrobek, který byl následně obroben a vyhodnocen z pohledu použití kompenzačního modelu teplotních chyb OS.



Seznamy

Seznam obrázků

Obr. 1- Druhy sdílení tepla (upraveno [8]).....	18
Obr. 2- Vliv tepla na OS, vlevo- expanze a smrštění struktury OS, vpravo- ohyb struktury OS (upraveno [3]).....	18
Obr. 3- Teplotní chyby jednotlivých os, vlevo- stroj s naklápěcím vřetenem (rotace B), vpravo- stroj se sklopným stolem (rotace C) (upraveno [10]).....	20
Obr. 4- Podmínky pro predikční model [8].....	22
Obr. 5- Lineární teplotní chyba [12].....	23
Obr. 6- Úhlová teplotní chyba [12].....	23
Obr. 7- Dotyková sonda TS 460 [13].....	24
Obr. 8- Rozdíl teplotní analýzy oproti dynamické analýzy [16].....	25
Obr. 9- CNC stroj typu horní gantry s otočným stolem [22].....	29
Obr. 10- Konstrukce testovacího obrobku tvaru pyramidy (upraveno [23]).....	29
Obr. 11- Polotovar testovacího obrobku kruhového tvaru (upraveno [24]).....	30
Obr. 12- Fáze obrábění testovacího kruhového obrobku (upraveno [24]).....	31
Obr. 13- Konstrukce pětiosých OS, vlevo- stroj s osami B a C, vpravo- stroj s osami A a C [24].....	32
Obr. 14- Testovací obrobek pro ustanovení deformace v ose Z s průběhem obrábění (upraveno [6]).....	33
Obr. 15- Testovací obrobek kvádrového tvaru (upraveno) [25].....	34
Obr. 16- Kruhový testovací obrobek určený pro karuselový OS (upraveno [27]).....	34
Obr. 17- Graf závislosti tepla na řezné rychlosti v rámci řezného procesu [28].....	36
Obr. 18- Graf závislosti deformace na čase kompenzovaného a nekompenzovaného obrábění testovacího obdélkového obrobku (upraveno [25]).....	38
Obr. 19- Výkres polotovaru testovacího obrobku (dodáno firmou KOVOSVIT MAS Machine Tools, a.s.).....	41
Obr. 20- Frézka MCU 700 na ústavu Ú12135T.....	42



Obr. 21- Fréza od firmy Rotana v upínači.	43
Obr. 22- Příklad testovacího obrobku.....	45
Obr. 23- Model testovacího obrobku č.1. "zuby zaoblené zkosené".	47
Obr. 24- Model testovacího obrobku č.3. "schody".	48
Obr. 25- Model testovacího obrobku č.3. "schody".	49
Obr. 26- Model testovacího obrobku č.4. „symetrické schody“.	50
Obr. 27- Model testovacího obrobek č.5. "zuby".	51
Obr. 28- Model testovacího obrobku č.6. "zaoblené zuby".	52
Obr. 29- Model testovacího obrobku č.7. „úkosy“.	53
Obr. 30- Model testovacího obrobku č.8. „všeobecný“.	54
Obr. 31- Simulace hrubovací operace.	56
Obr. 32- Simulace dokončovací operace.	57
Obr. 33- Parametry obrábění v simulaci (posuv a rychlost).	58
Obr. 34- Rozhraní SW MillVis s exportovaným obrobkem č. 1.....	61
Obr. 35- Graf průběhu plochy třísky v závislosti na kroku.....	63
Obr. 36- Model konečného testovacího obrobku č. 1. "zuby zaoblené zkosené".	69
Obr. 37- Konečné parametry dokončovací operace.....	70
Obr. 38- Měřicí aparatura před dokončovací operací (1. sekvence).....	71
Obr. 39- Označení 8 mm ploch na obrobku pro zjištění teplotních deformací.....	73
Obr. 40- Měření ploch pomocí kontaktního indukčního snímače posunutí.....	74
Obr. 41- Příklad neupravených dat z kontaktního senzoru posunutí.....	76
Obr. 42- Příklad filtrace, nulování a separace hodnot (plocha Z3 bez kompenzace a bez emulze).	77
Obr. 43- Srovnání měření na stroji po obrobení a na souřadnicovém měřícím stroji pro plochu Z1.....	78
Obr. 44- Srovnání měření na stroji po obrobení a na souřadnicovém měřícím stroji pro plochu Y2.....	79
Obr. 45- Srovnání Z ploch při zapnutí/vypnutí komp. modelu s emulzí.....	80



Obr. 46- Srovnání Y ploch při zapnutí/vypnutí komp. modelu s emulzí (mokrý obrábění).....	81
Obr. 47- Srovnání Z ploch při zapnutí/vypnutí komp. modelu bez emulze (obrábění na sucho).....	82
Obr. 48- Použití komp. modelu bez emulze u plochy Y2.	83
Obr. 49- Srovnání Y ploch při zapnutí/vypnutí komp. modelu bez emulze.....	84
Obr. 50- Příklad rekonstrukce při použití emulze pro plochu Z1.....	86
Obr. 51- Vypočítaný kompenzační model pro osu Z při použití emulze.....	87
Obr. 52- Příklad rekonstrukce pro plochu Y3 bez emulze.	87
Obr. 53- Příklad průběhu srovnání použité emulze pro plochu Z3	88
Obr. 54- Opotřebenění nástroje s odlomenými kusy zubu.	89
Obr. 55- Opotřebenění nástroje s poškozenou hranou zubu.....	90



Seznam tabulek

Tab. 1- Parametry řezného procesu jednotlivých zkoušek [6], [22], [24], [25], [26].....	37
Tab. 2- Parametry dokončovací frézy.	43
Tab. 3- Parametry hrubovací frézy.	56
Tab. 4- Vyhodnocení časů obrábění v SW NX Siemens.	58
Tab. 5- Vyhodnocení objemů jednotlivých obrobků.	59
Tab. 6- Vyhodnocení počtu evaluačních ploch.	60
Tab. 7- Vyhodnocení řezné rychlosti.	62
Tab. 8- Vyhodnocení plochy třísky.	64
Tab. 9- Vyhodnocení řezných sil pro osu X.	65
Tab. 10- Vyhodnocení řezných sil pro osu Y.	66
Tab. 11- Vyhodnocení řezných sil pro osu Z.	67
Tab. 12- Výsledné bodové ohodnocení testovacích obrobků.	68
Tab. 13- Použitá aparatura.	71
Tab. 14- Rozdíly pro srovnání měřicího stroje a indukčního snímače.	78
Tab. 15- Rozdíly pro osu Z při zapnuté/vypnuté komp. modelu s emulzí.	81
Tab. 16- Rozdíly pro osu Y při zapnuté/vypnuté komp. modelu s emulzí.	82
Tab. 17- Rozdíly pro osu Z při zapnuté/vypnuté komp. modelu bez emulze.	83
Tab. 18- Rozdíly pro osu Y při zapnuté/vypnuté komp. modelu bez emulze.	83
Tab. 19- Rozdíly pro srovnání požití emulze s kompenzačním modelem.	89
Tab. 20- Tabulka statistických dat.	92



Seznam použité literatury

- [1] HOREJŠ, O. Minimalizace teplotních chyb obráběcích strojů pomocí softwarových kompenzačních algoritmů. Praha: Habilitační práce, ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení, 2020, 166 s.
- [2] Norma ČSN ISO 230-1. Zásady zkoušek obráběcích strojů: Část 1: Geometrická přesnost strojů pracujících bez zatížení nebo za kvazistatických podmínek. Praha, 2014.
- [3] MIAN, N. S. *Efficient machine tool thermal error modelling strategy for accurate offline assessment*. Huddersfield: Doctoral thesis, University of Huddersfield, 2010 [cit. 2022-10-13]. 217 s.. Dostupné z: http://eprints.hud.ac.uk/id/eprint/11054/1/Naeem_Mian_Final_Thesis.pdf
- [4] MAREK, Jiří, Michal HOLUB, Tomas MAREK a Petr BLECHA, 2020 [cit. 2022-10-15]. Geometric Accuracy, Volumetric Accuracy and Compensation of CNC Machine Tools. In: *Machine Tools [Working Title]* [online]. B.m.: IntechOpen. Dostupné z: 10.5772/intechopen.9208510
- [5] TIAN, Wenjie, Weiguo GAO, Dawei ZHANG a Tian HUANG, 2014 [cit. 2022-10-13]. A general approach for error modeling of machine tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. **79**, 17-23. ISSN 08906955. Dostupné z: 10.1016/j.ijmachtools.2014.01.003
- [6] MAREŠ, Martin, Otakar HOREJŠ a Lukáš HAVLÍK, 2020 [cit. 2022-10-13]. Thermal error compensation of a 5-axis machine tool using indigenous temperature sensors and CNC integrated Python code validated with a machined test piece. *Precision Engineering* [online]. **66**, 21-30.
- [7] PAVELEK, Milan, 2011. *Termomechanika*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM. ISBN 978-80-214-4300-6.
- [8] MAREŠ, Martin. Modelování teplotně mechanických systémů frekvenčními přenosovými funkcemi. Praha: Disertační práce, ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky, 147.



- [9] NOŽIČKA, Jiří, 2001. *Základy termomechaniky*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT. ISBN 978-80-01-02409-6.
- [10] ESS, M. Simulation and compensation of thermal errors of machine tools. Zürich: Doctoral Thesis, ETH Zürich, 2012, 131 s.
- [11] RAMESH, R, M A MANNAN a A N POO, [b.r.]. Error compensation in machine tools – a review Part II: thermal errors. 28.
- [12] DIVÍŠEK, D. *Model teplotních deformací stroje a frézovacího nástroje zohledňující vliv řezného procesu*. Praha: Diplomová práce, ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení, 2021 [cit. 2022-10-14]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/96729>
- [13] ŠTĚDRÝ, J. Přesné obrábění s CNC a dotykovými sondami, 2019 [cit. 2022-10-15]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/presne-obrabeni-s-cnc-a-dotykovymi-sondami>
- [14] LI, Yang, Wanhua ZHAO, Shuhuai LAN, Jun NI, Wenwu WU a Bingheng LU, 2015 [cit. 2022-10-15]. A review on spindle thermal error compensation in machine tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. **95**, 20– 38. ISSN 08906955. Dostupné z: 10.1016/j.ijmachtools.2015.04.008
- [15] HANZAL, Jiří. Metody kompenzace teplotní chyby obráběcího stroje [online]. Brno, 2017 [cit. 2022-10-21]. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Petr Minář.
- [16] BÁRTA, P. Frekvenční přenosové funkce v termomechanice. Praha: Disertační práce, ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav mechaniky tekutin a energetiky, 2008, 83 s.
- [17] MAREŠ, M. O. HOREJŠ a J. HORNYCH. Modelling of Cutting Process Impact on Machine Tool Thermal Behaviour Based on Experimental Data. *Procedia CIRP*. 2017, **58** (2017), 152– 157. ISSN 2212-8271.



- [18] HOREJŠ, O. M. MAREŠ a J. HORNYCH. Cutting process impact on machine tool thermal errors. In: *EUSPEN Special Interest Group: Thermal Issues*. Prague: euspen, 2016.
- [19] Historie CNC obráběcích strojů [online]. [cit. 2022-11-05]. Dostupné z: <http://factoryautomation.cz/10-dat-z-historie-obrabeni-na-cncstrojich-kam-saha-historie-cnc-obrabeni/>
- [20] Norma ČSN ISO 230-12. Zásady zkoušek obráběcích strojů: Část 12: Přesnost dokončovaných zkušebních výrobků. Praha, 2023.
- [21] HÖFER, H. a H. WIEMER. Generation of motion sequences for thermal load of machine tools. 2017, **11** (1), 75–83.
- [22] IBARAKI, Soichi a Yusuke OTA, 2014 [cit. 2022-11-5]. A Machining Test to Evaluate Geometric Errors of Five-axis Machine Tools with its Application to Thermal Deformation Test. *Procedia CIRP* [online]. **14**, 323–328.
- [23] IBARAKI, Soichi a Yusuke OTA, 2014 [cit. 2022-11-6]. A machining test to calibrate rotary axis error motions of five-axis machine tools and its application to thermal deformation test. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. **86**, 81–88. ISSN 08906955. Dostupné z: 10.1016/j.ijmachtools.2014.07.005
- [24] WIESSNER, Moritz, Philip BLASER, Sebastian BÖHL, Josef MAYR, Wolfgang KNAPP a Konrad WEGENER, 2018 [cit. 2022-11-9]. Thermal test piece for 5-axis machine tools. *Precision Engineering* [online]. **52**, 407–417. ISSN 01416359. Dostupné z: 10.1016/j.precisioneng.2018.01.017
- [25] MAREŠ, M. et al. Strategy of Milling Center Thermal Error Compensation using a Transfer Function Model and its Validation outside of Calibration Range. *MM Science Journal*. 2019, **2019** (4) [cit. 2022-11-9], 3156–3163. ISSN 1803-1269. Dostupné z: 10.17973/MMSJ.2019_11_2019065
- [26] MAREŠ, M. a O. HOREJŠ. Enhancement of vertical turning lathe accuracy by minimising thermal errors depending on rotary table activity and workpiece clamping diameter. In: *Special Interest Group Meeting on Thermal Issues*



Laboratory for Machine Tools and Production Engineering (WZL) of RWTH Aachen. Aachen, Germany: euspen, 2020, s. 120-- 123. ISBN 978-0-9957751-6-9

- [27] HOREJŠ, O. M. MAREŠ a L. HAVLÍK. Validation of thermal errors compensation models for different machine tool structures via test pieces. In: Proceedings of the euspen's 21st International Conference & Exhibition. Copenhagen: euspen, 2021, 503-506. ISBN: 978-0-9957751-9-0
- [28] Mádl, J. (2007) *Technologie obrábění*. Vyd. 2., přeprac. V Praze: Nakladatelství ČVUT.
- [29] Přehled programu NX Siemens [cit. 2023-03-03]. Dostupné z: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/nx/>
- [30] Přehled programu Matlab [cit. 2023- 04- 04]. Dostupné z: [w.mathworks.com/products/matlab.html](http://www.mathworks.com/products/matlab.html)
- [31] Měřicí ústředna Crio-9014 [cit. 2023-6-07]. Dostupné z: <https://www.ni.com/cs-cz/support/model.crio-9014.html>
- [32] Analogový vstupní modul NI-9219 [cit. 2023-26-06]. Dostupné z: <https://www.ni.com/cs-cz/support/model.ni-9219.html>
- [33] Katalog dálkové měřicí techniky od firmy MESING, spol. s.r.o., Brno
- [34] Katalog souřadnicového měřicího stroje BRIDGE TYPE CNC COORDINATE MEASURING MACHINE od firmy COORD3 (UNIVERSAL) Dostupné z: <https://www.coord3.com/en/cmm-universal/>
- [35] Katalog měřicí sondy SP25M od firmy Renishaw [cit. 2023-30-06]. Dostupné z: <https://www.renishaw.com/resourcecentre/en/details/technical-note-sp25m--3873>
- [36] Přehled funkce var v programu Matlab [cit. 2023-06-07]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/var.html>
- [37] HINDLS, Richard, Stanislava HRONOVÁ, Jan SEGER a Jakub FISCHER, 2007. *Statistika pro ekonomy*. 8. vyd. Praha: Professional Publishing. ISBN 978-80-86946-43-6.



- [38] Norma ČSN ISO 230-12. Zásady zkoušek obráběcích strojů: Část 12: Přesnost dokončovacích zkušebních obrobků. Praha, 2023.



Seznam použitého softwaru

Microsoft Word 2016

Microsoft Excel 2016

MATLAB R2021a

MillVis

NX Siemens

Autodesk Inventor

LabVIEW2012



Seznam příloh

Textové přílohy

Příloha 1 – Tabulka parametrů frézky MCU 700

Příloha 2 – Graf průběhů rezné rychlosti

Příloha 3 – Grafy průběhů sil

Příloha 4 – Schéma zapojení měřící aparatury

Příloha 5 – Samostatné grafy z měření

Příloha 6 – Tabulky vyhodnocení opakovatelnosti

Výkresová dokumentace

Testovací obrobek č.1. „zuby zaoblené zkosené“.pdf

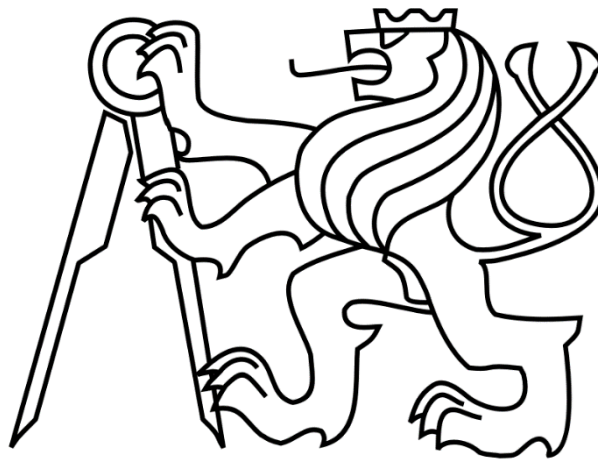
Elektronické přílohy

Diplomova_prace_Valenta_Marek.pdf

Model_testovaci_obrobek_c_1.stp

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Diplomová práce

Validace kompenzačního modelu teplotních chyb pomocí testovacího obrobku

Textové přílohy

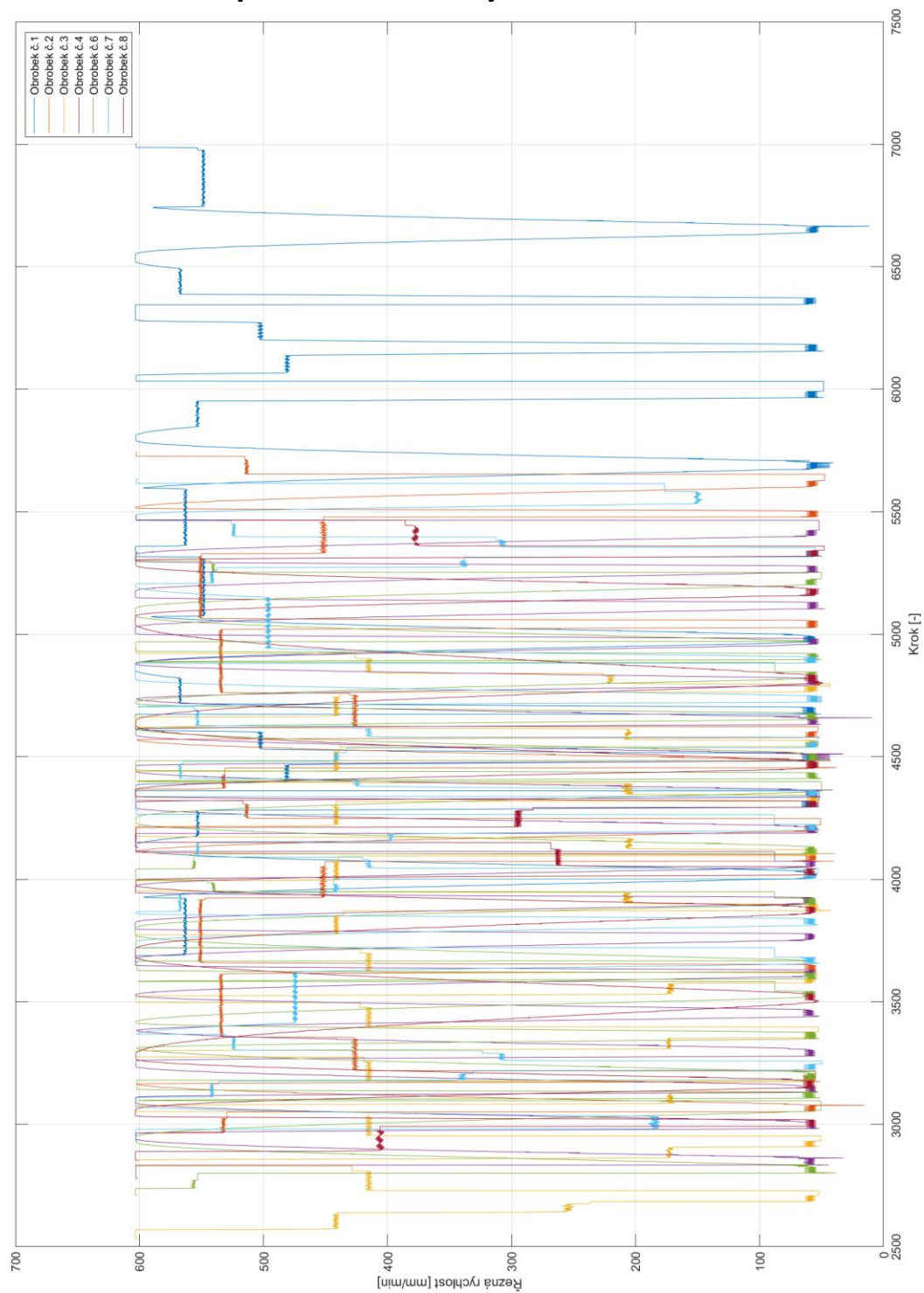


Příloha 1- Tabulka parametrů frézky MCU 700

Pojezd v ose X	mm	700	
Pojezd v ose Y	mm	820	
Pojezd v ose Z	mm	550	
Upínací plocha stolu	mm	Ø630	
Maximální zatížení stolu	kg	1300	
Otočná osa C	°	360	
Sklopná osa A	°	±120	
Přesnost dělení	°	0,001	
Maximální otáčky stolu	osa A	min ⁻¹	80
	osa C	min ⁻¹	100
Přesnost stavění souřadnic X, Y, Z	mm	0,01	
Přesnost opakovaného najetí	mm	0,005	
Rozsah posuvů v osách X, Y, Z	mm.min ⁻¹	60 000	
Rychloposuv v osách X, Y, Z	mm.min ⁻¹	60 000	
Rozsah plynule měnitelných otáček vřetene	min ⁻¹	20 – 10 000	
Kužel vřetene		ISO 50	
Výkon pohonu vřetene (40%ED)	kW	20 / 26	
Maximální krouticí moment S1 / S6	Nm	262 / 340	
Maximální počet nástrojů v zásobníku		24	
Maximální průměr nástroje v zásobníku	mm	130	
Maximální délka nástroje v zásobníku	mm	265	
Max. hmotnost nástroje při automatické výměně	kg	10	
Rozměry půdorysu stroje	mm	4 200 × 2 500	
Výška stroje	mm	3 600	
Hmotnost stroje	kg	18 450	
Celkový příkon stroje	kVA	55	
Pracovní tlak pneumatického zařízení	MPa	0,6	
T drážky (počet × šířka × rozteč)	mm	10 × 14 × 36°	



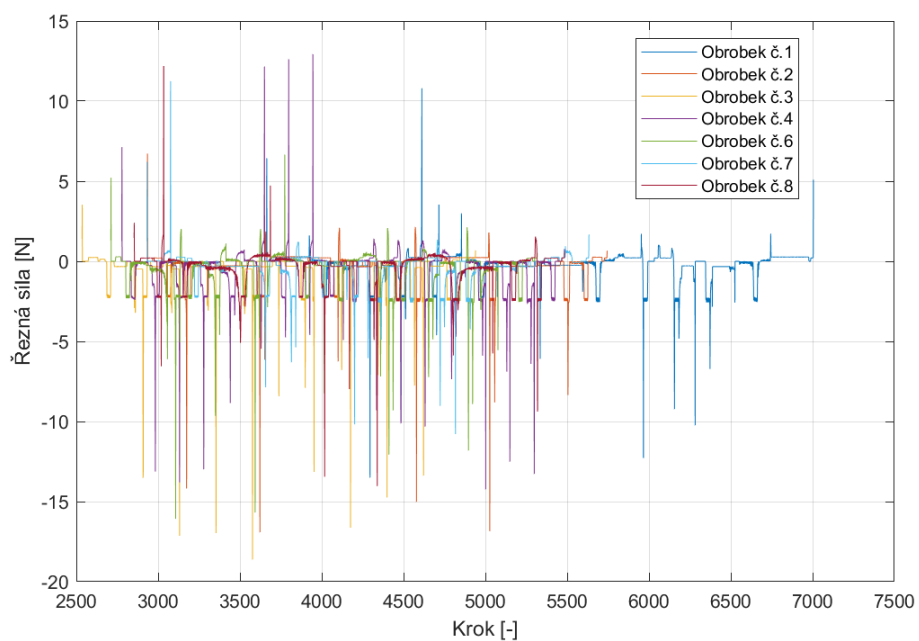
Příloha 2- Graf průběhů řezné rychlosti



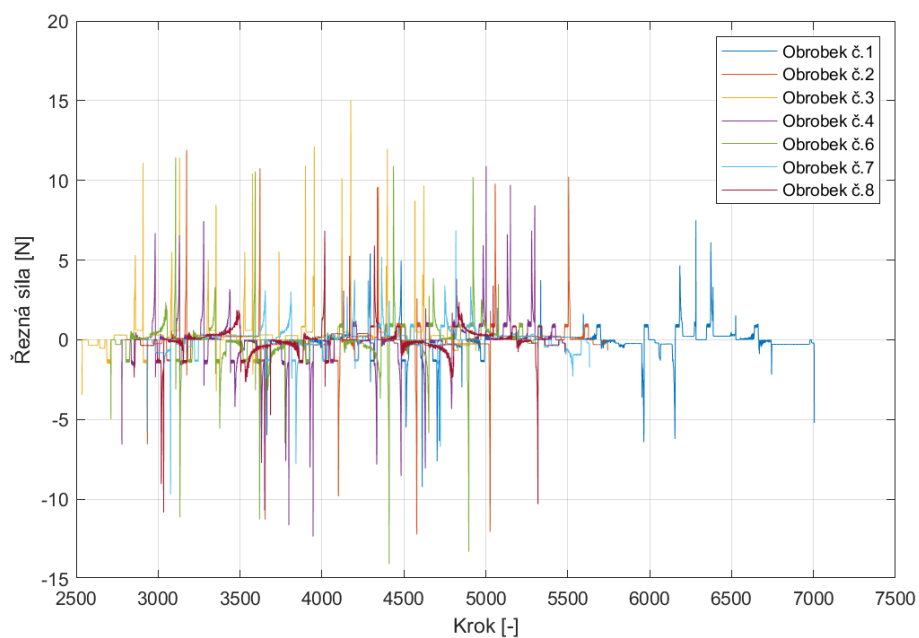


Příloha 3- Grafy průběhů sil

Síla osa X

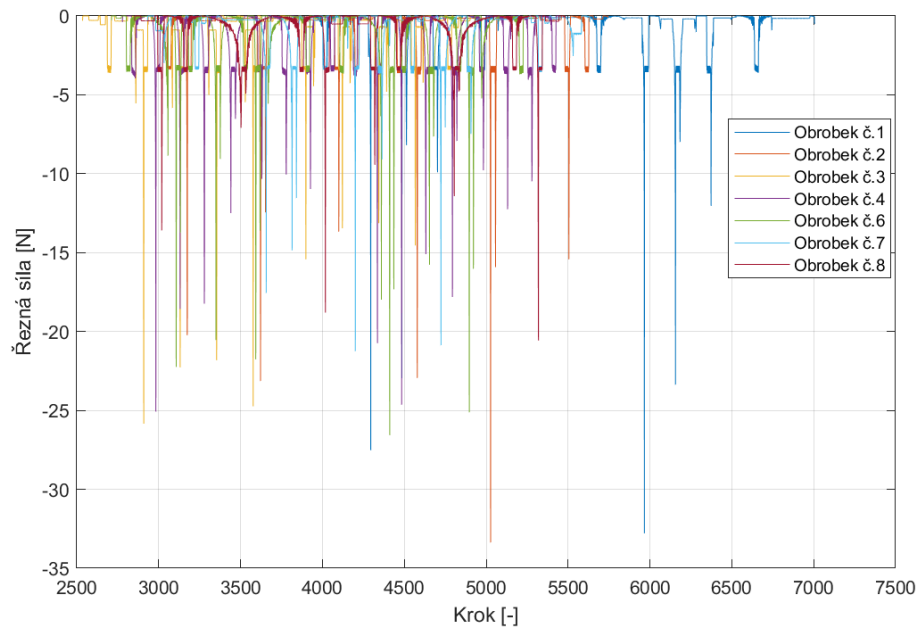


Síla osa Y



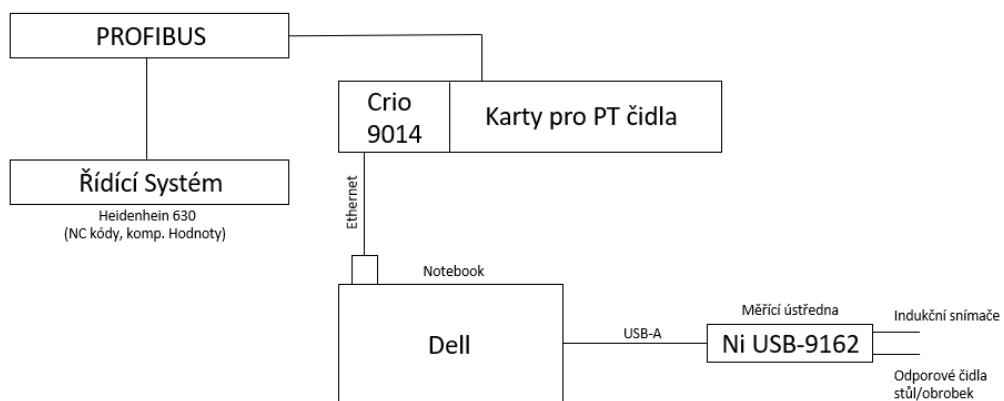


Síla osa Z





Příloha 4- Schéma zapojení měřící aparatury

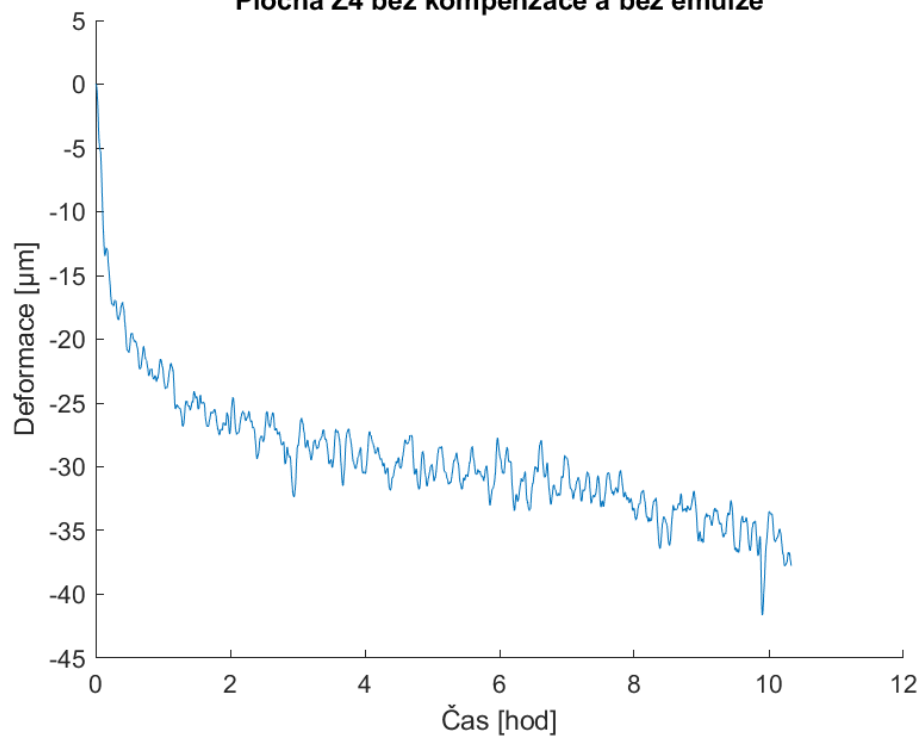




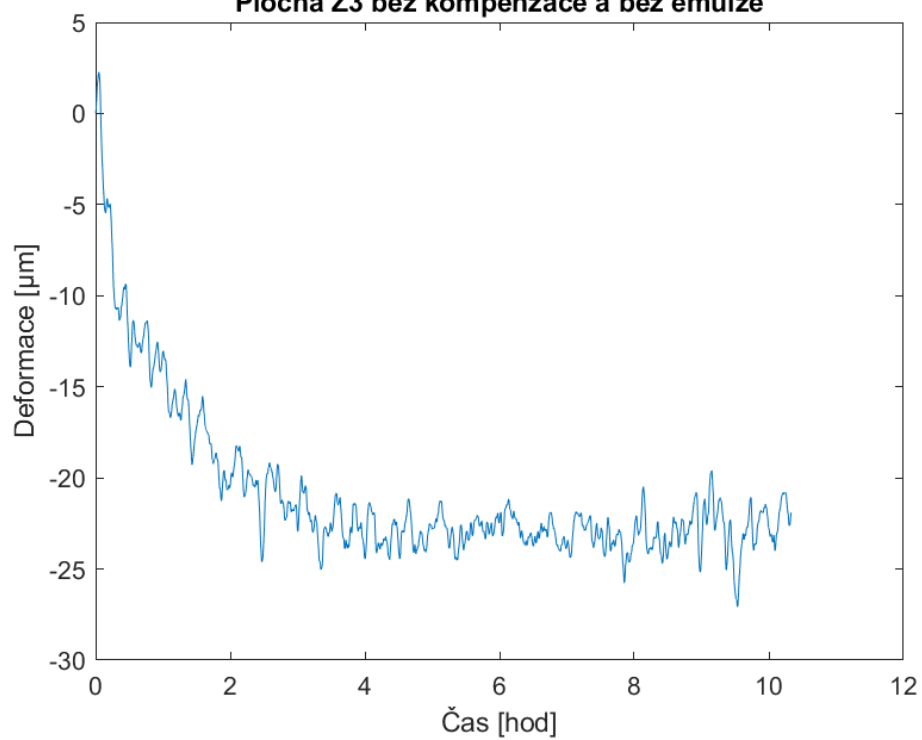
Příloha 5- Samostatné grafy z měření

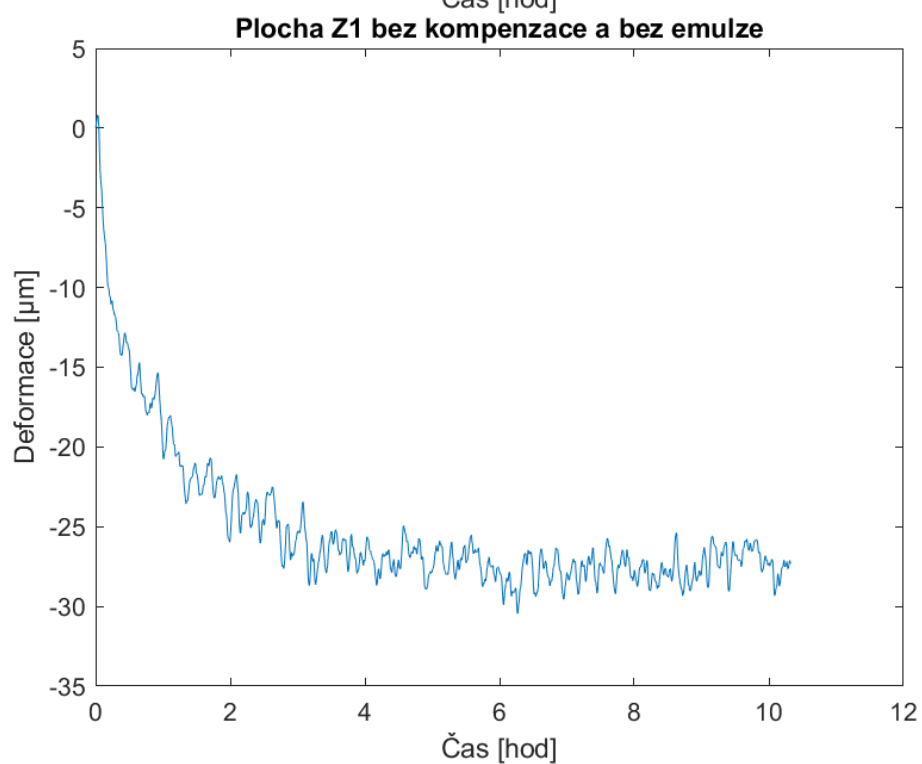
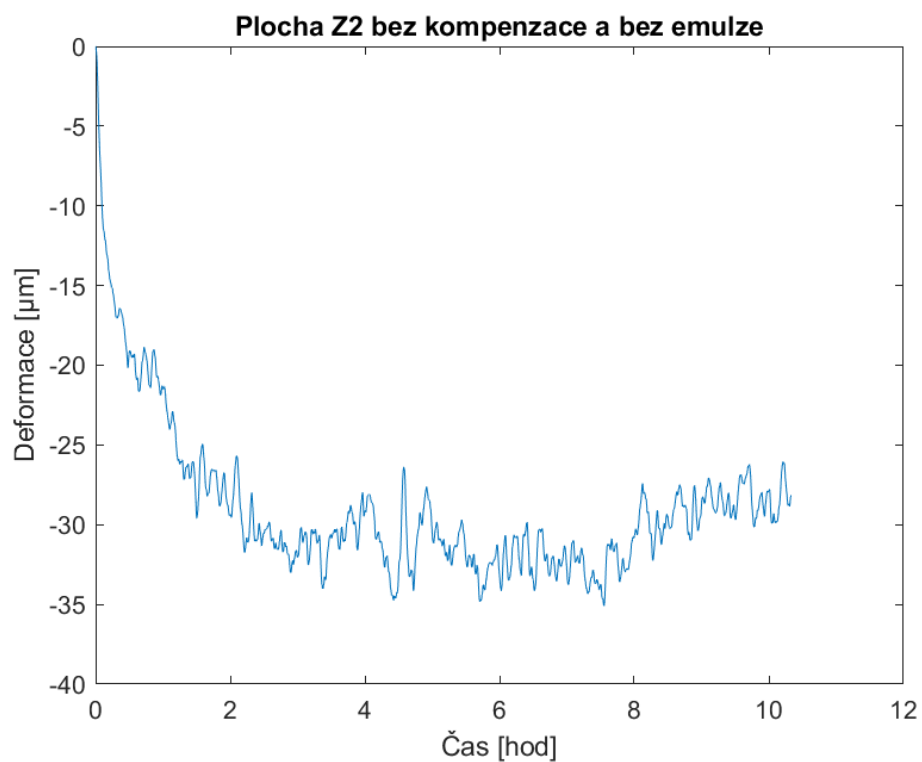
Bez kompenzace a bez emulze

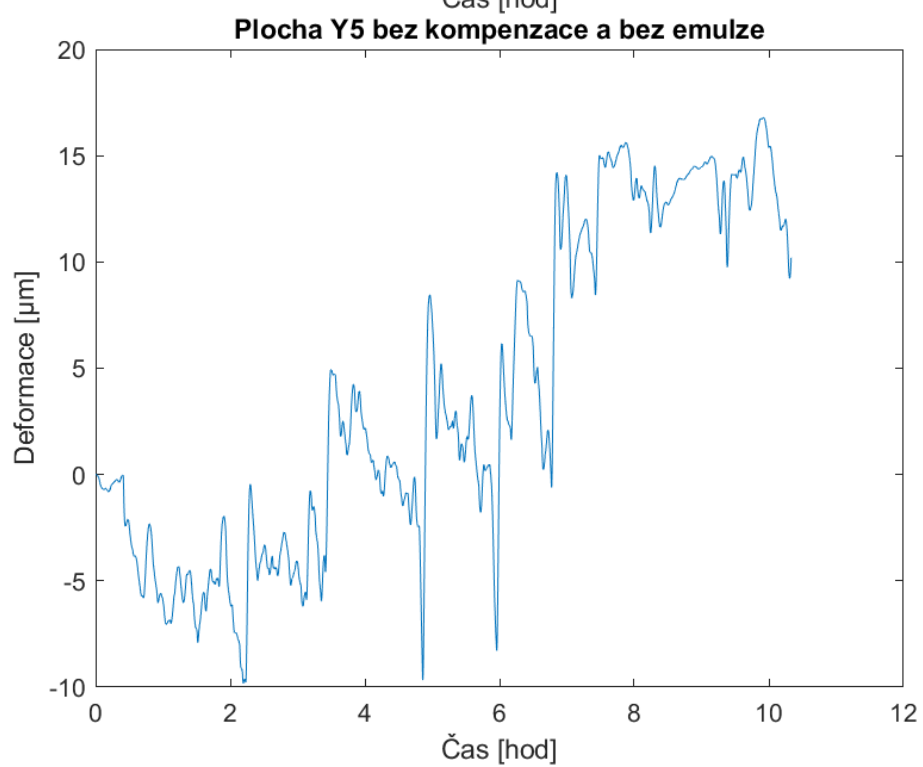
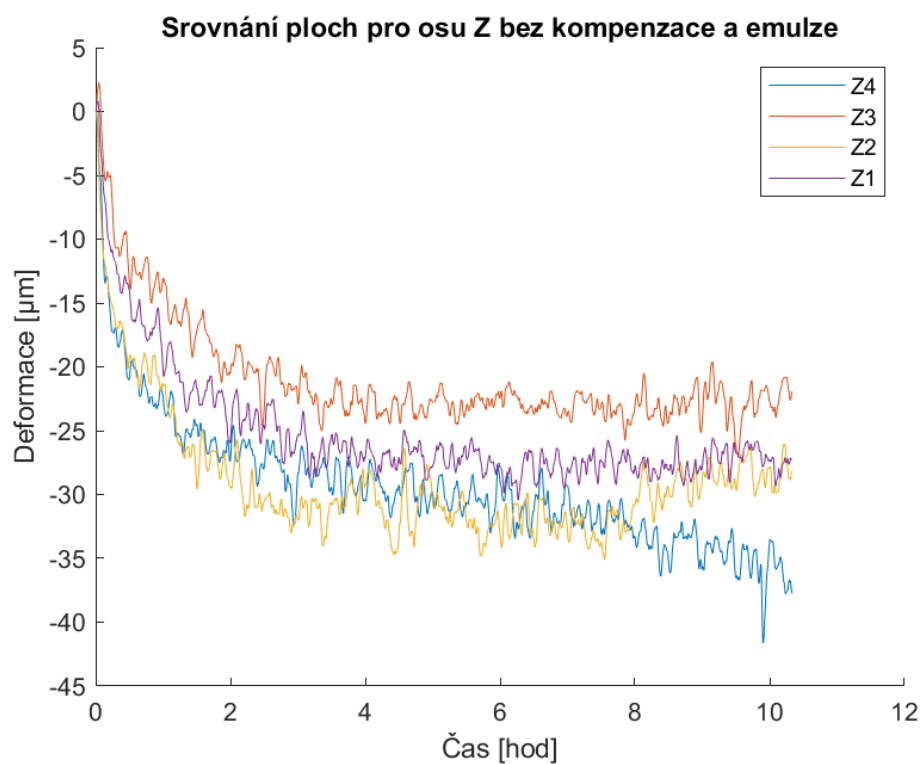
Plocha Z4 bez kompenzace a bez emulze

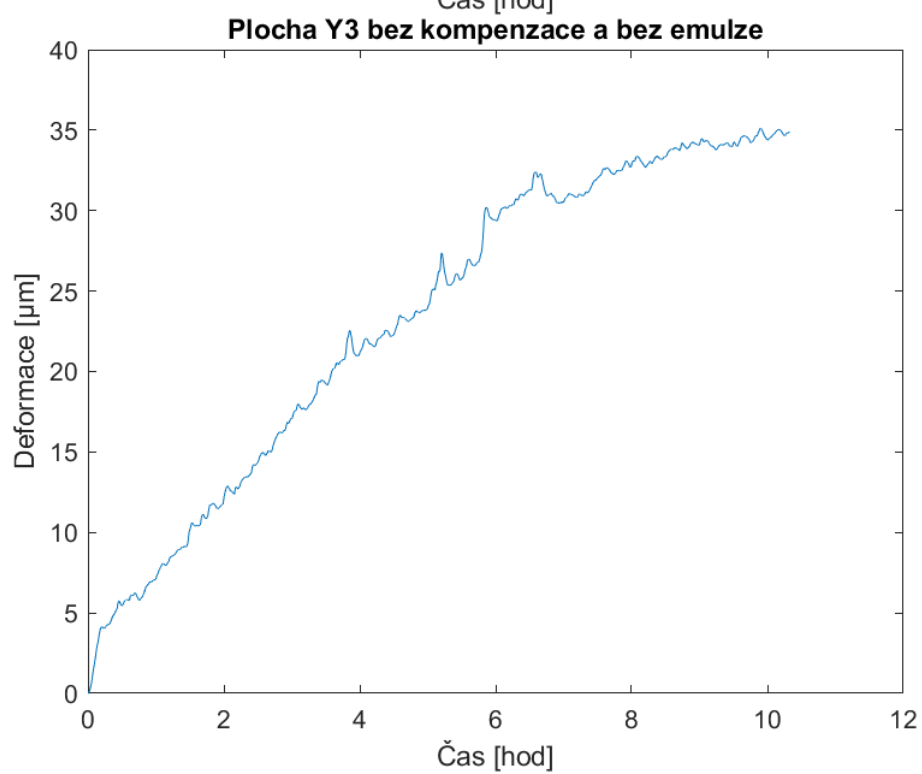
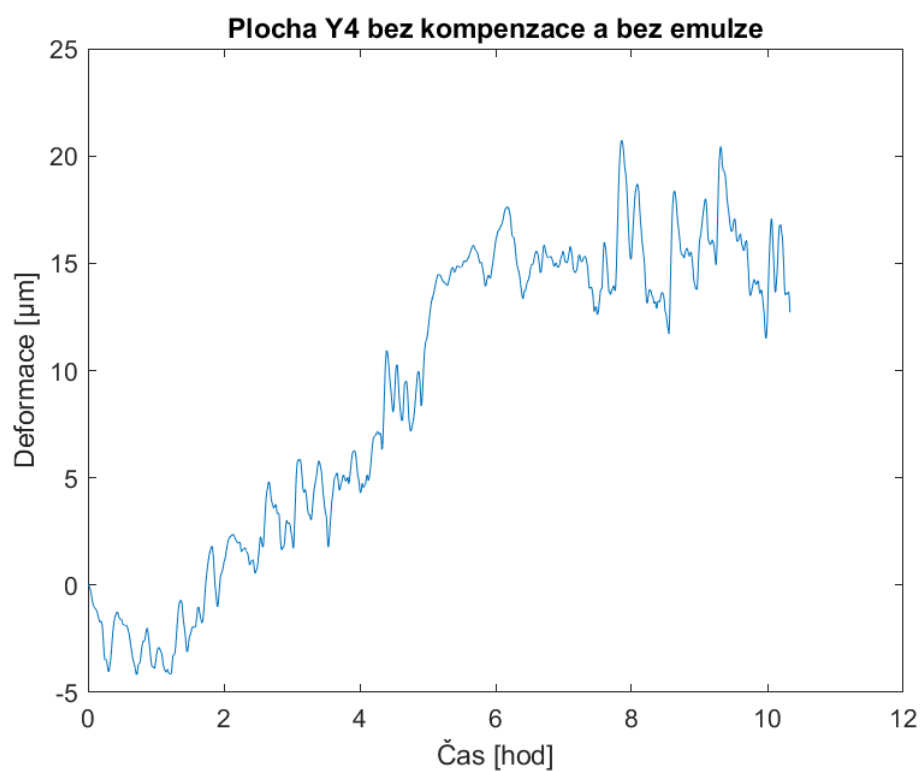


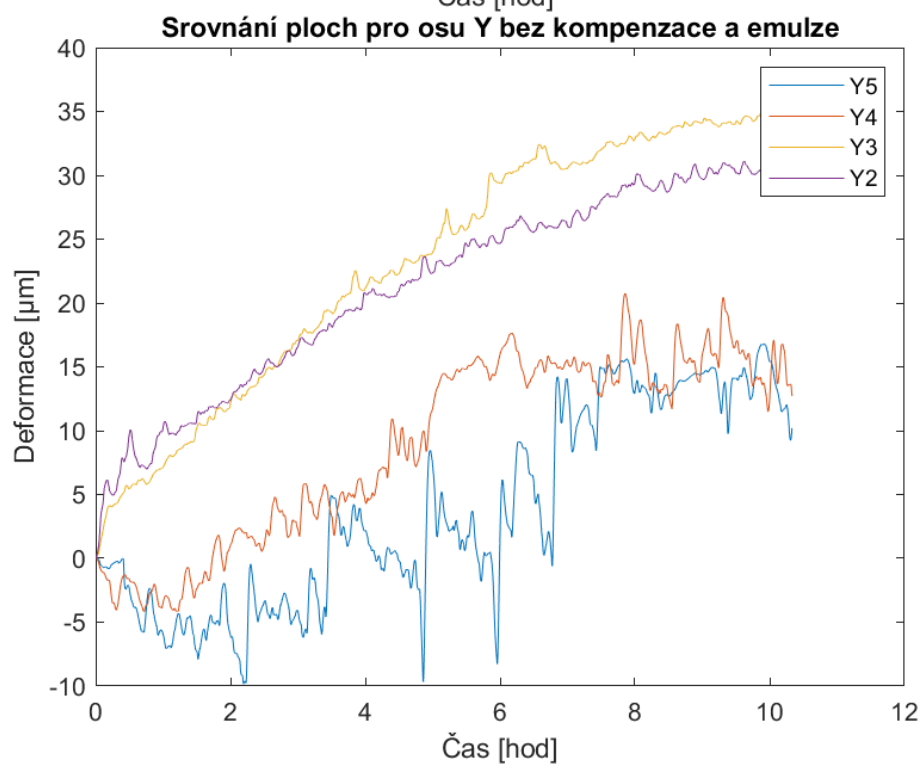
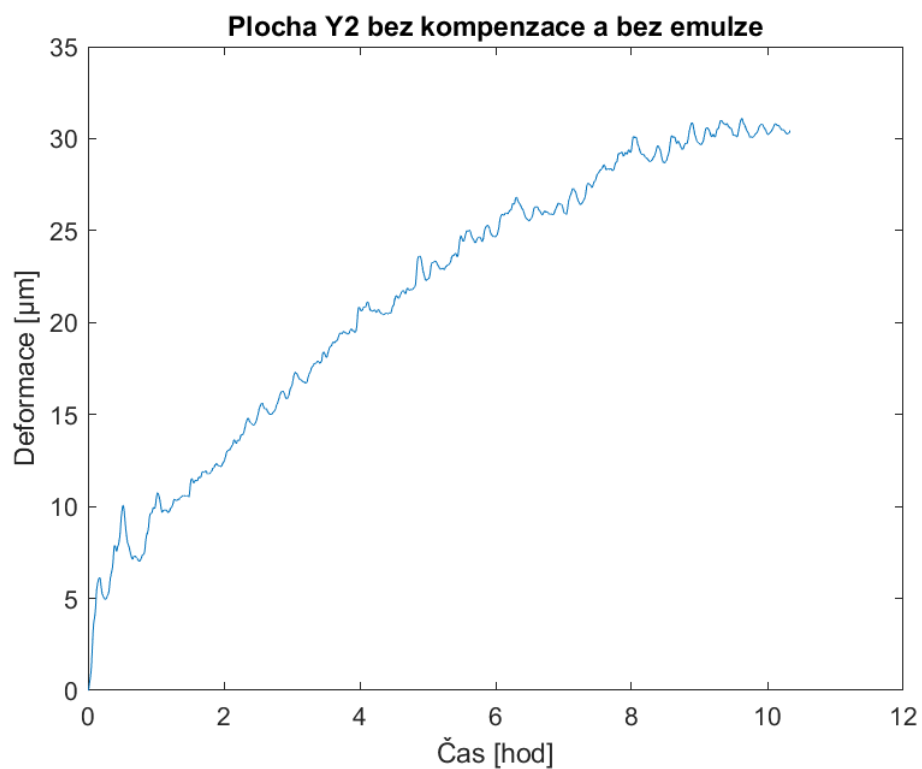
Plocha Z3 bez kompenzace a bez emulze







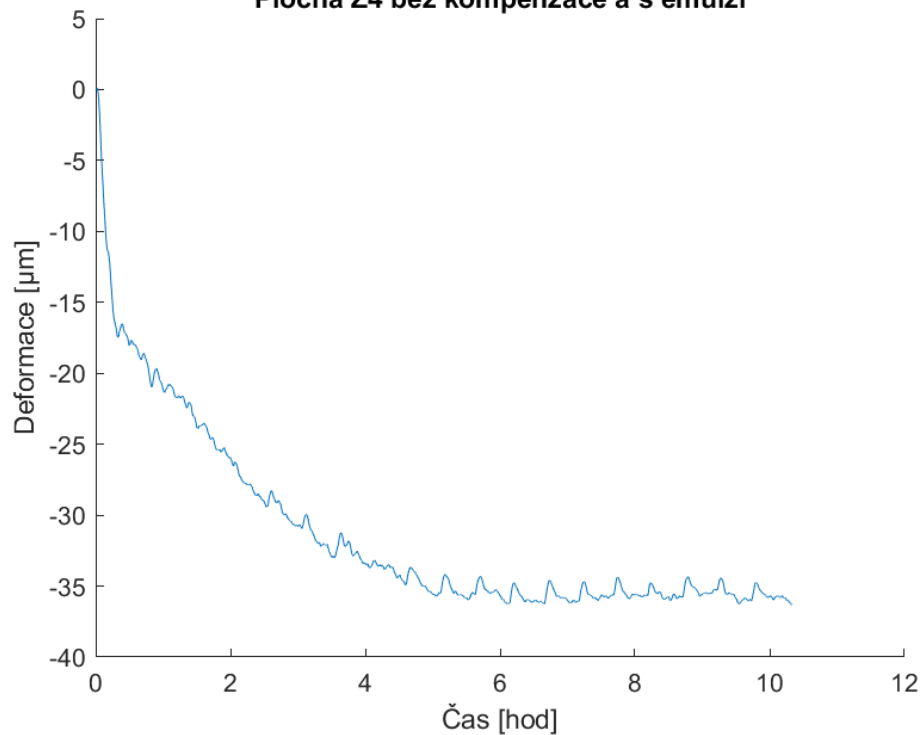




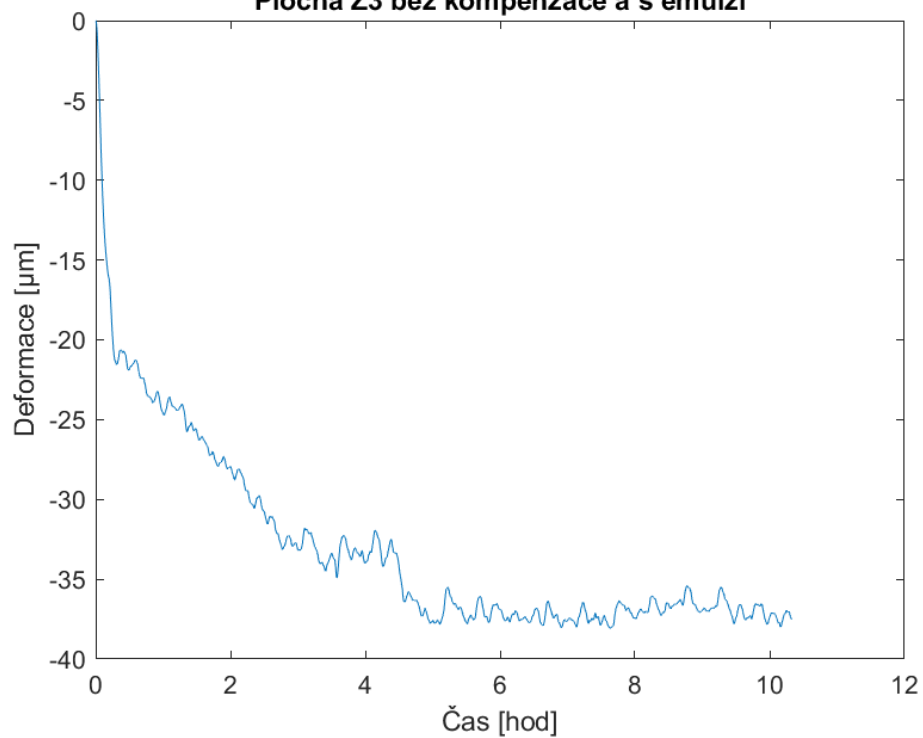


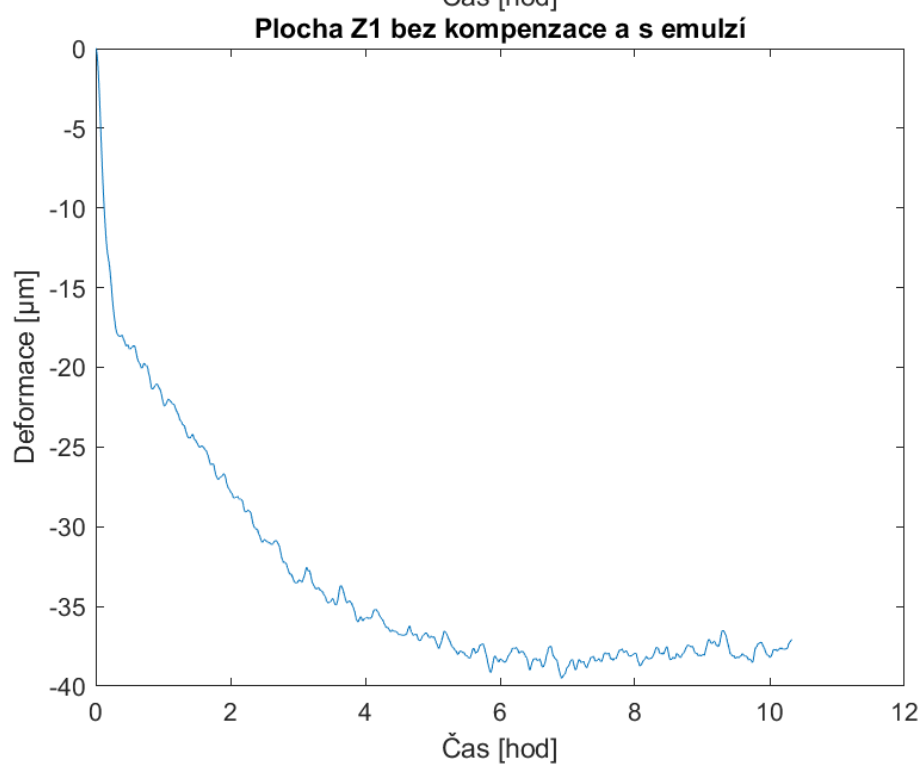
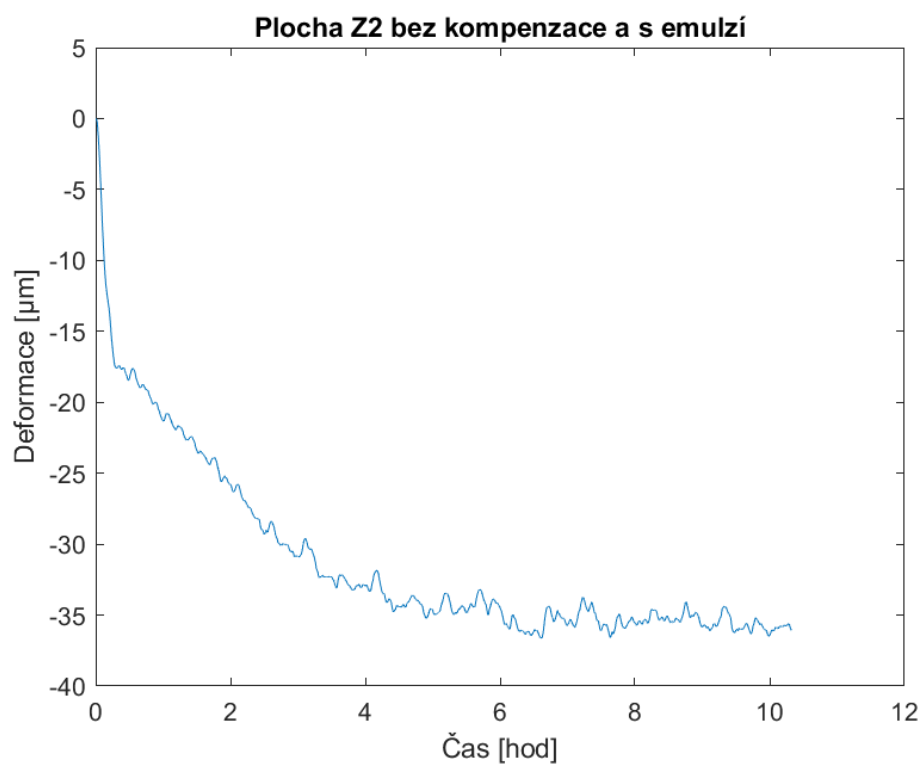
Bez kompenzace a s emulzí

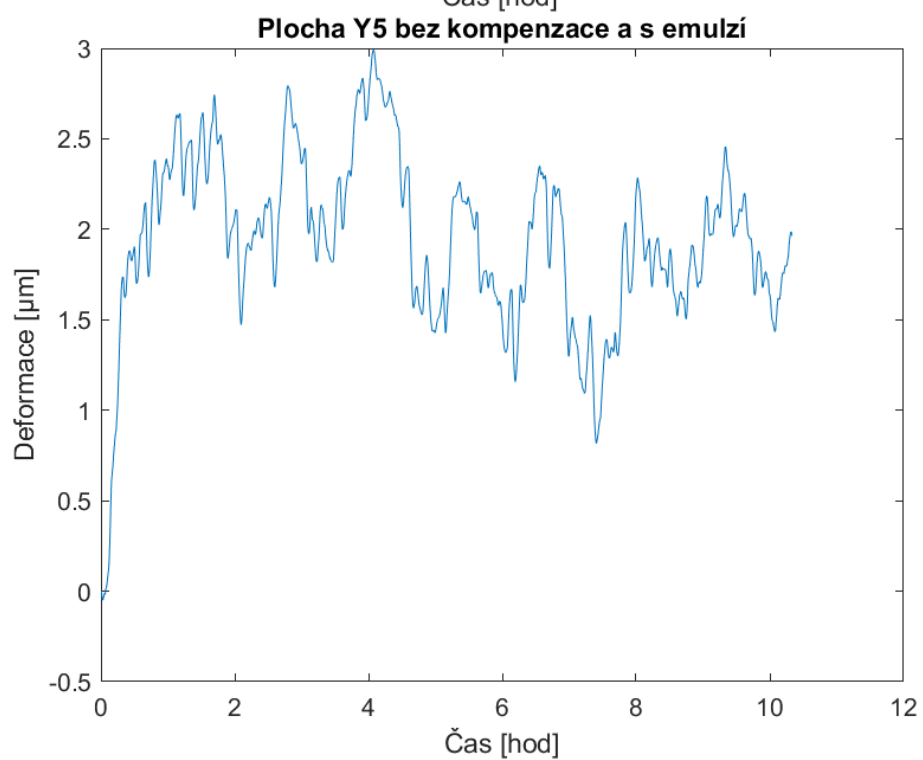
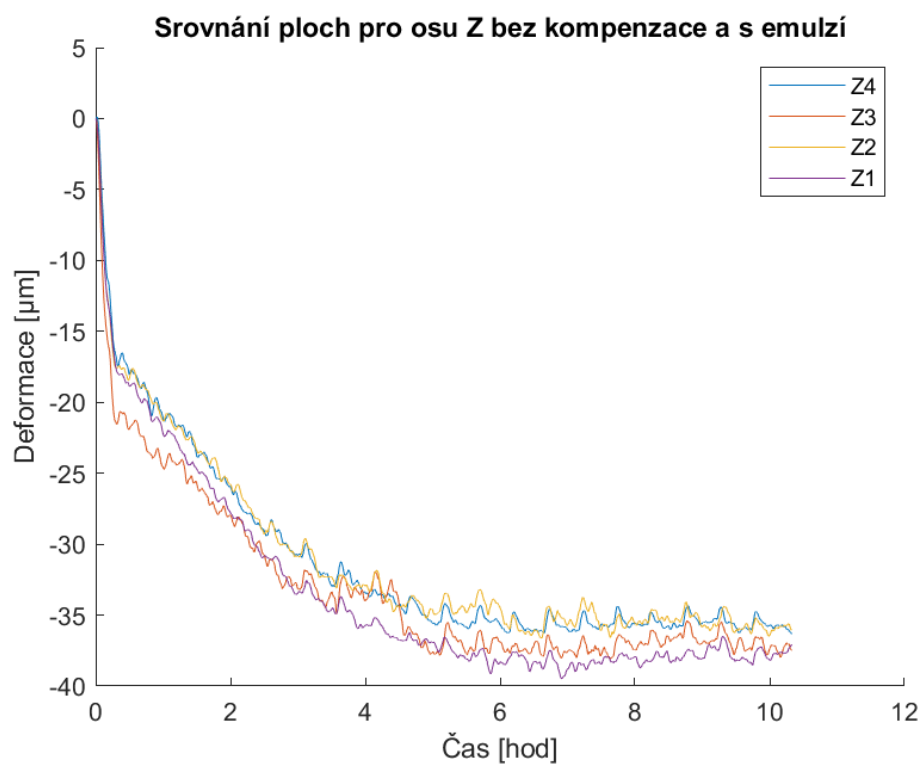
Plocha Z4 bez kompenzace a s emulzí

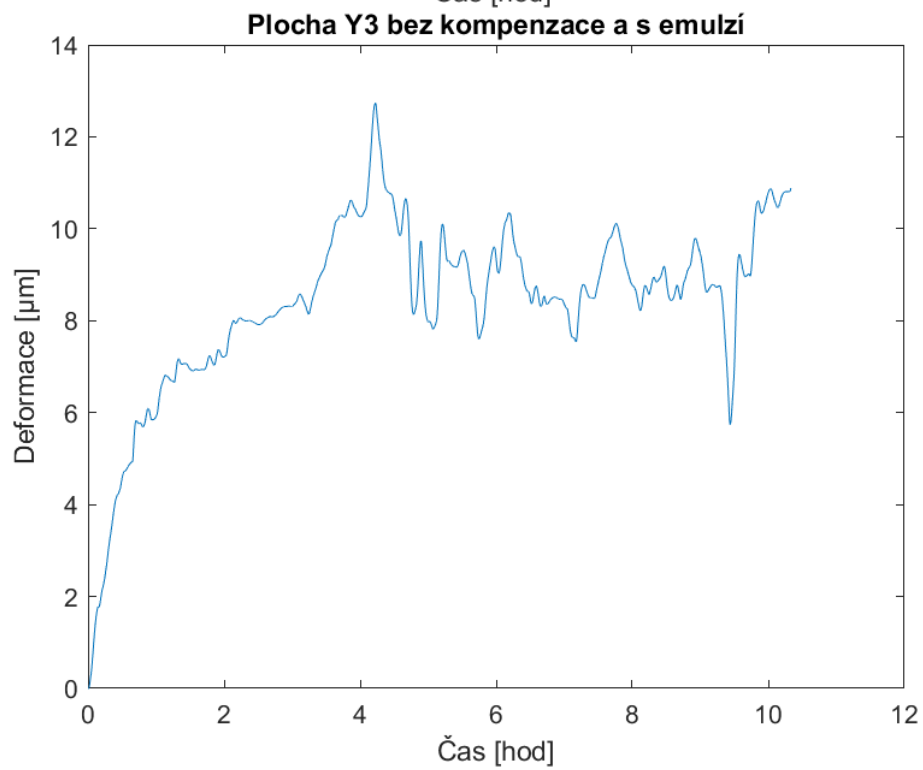
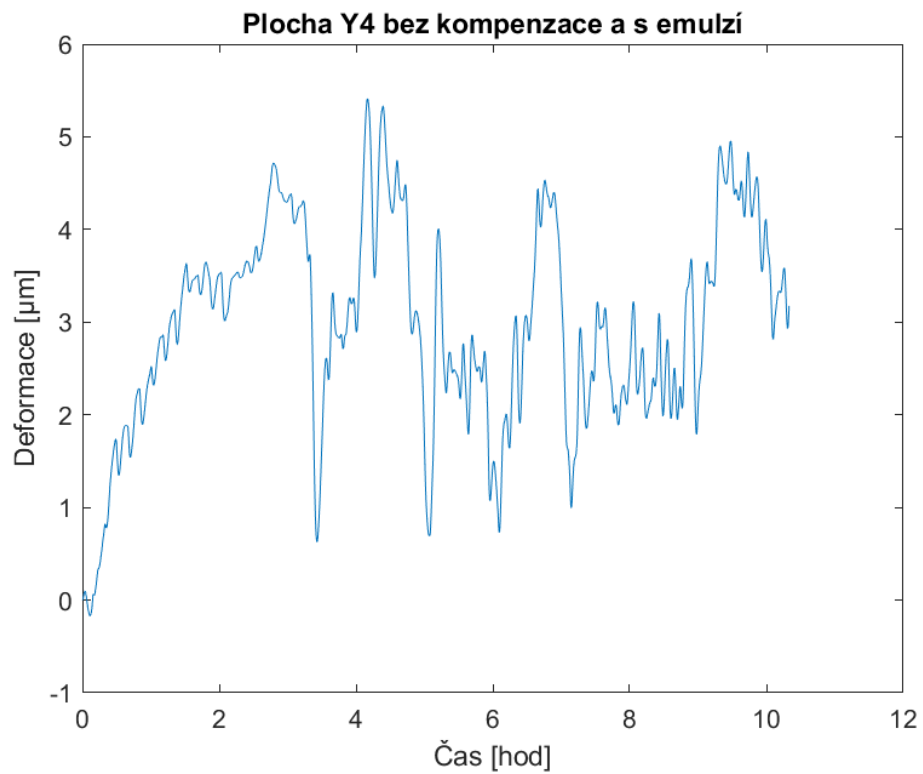


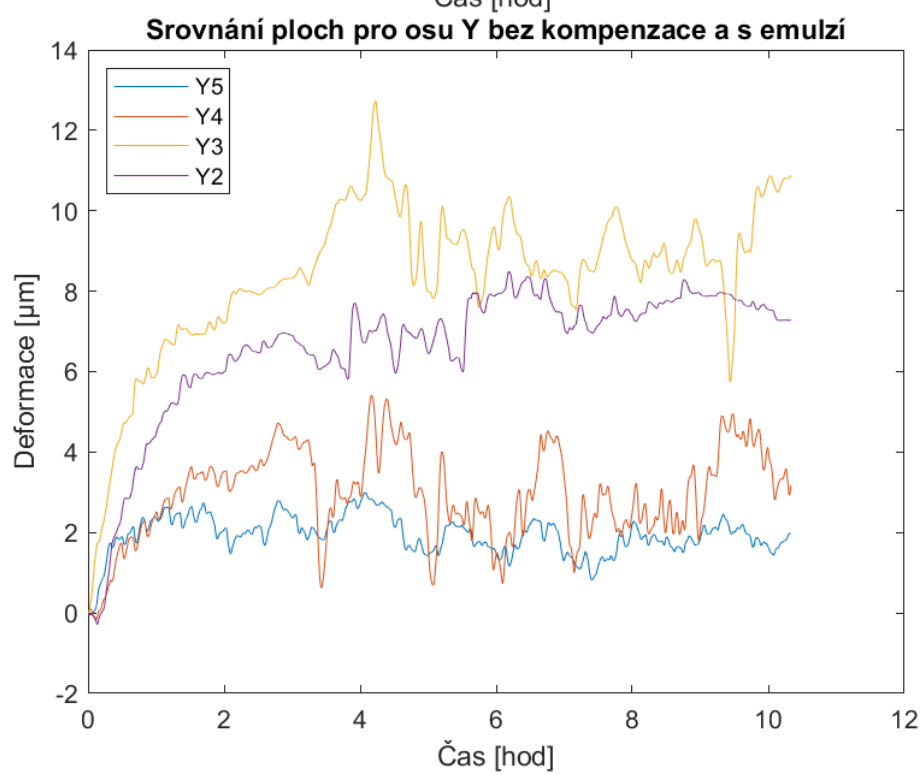
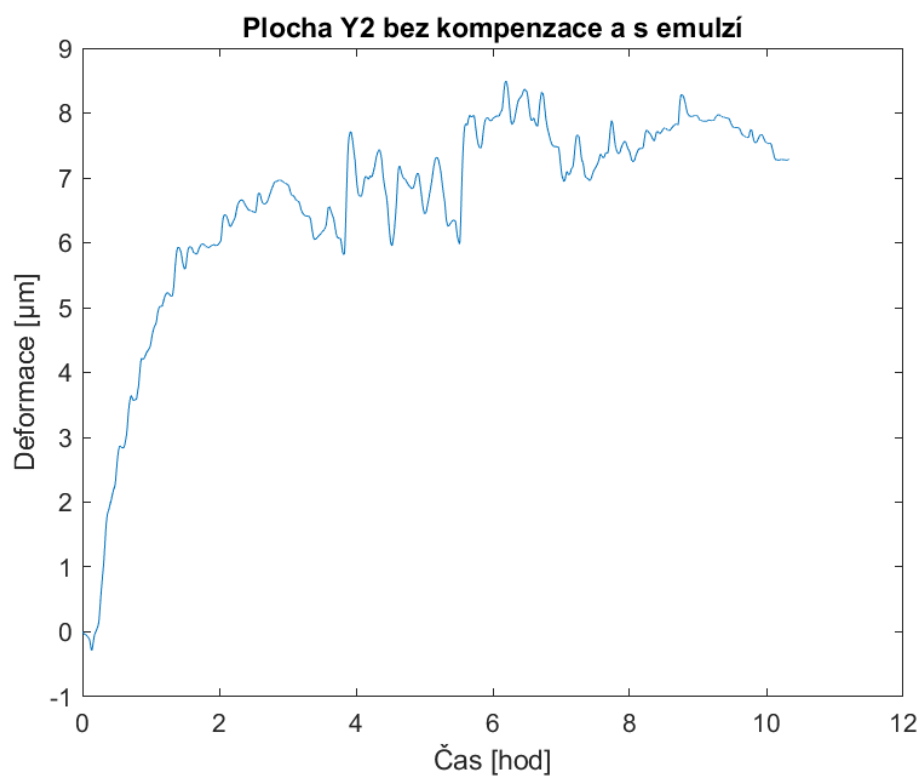
Plocha Z3 bez kompenzace a s emulzí







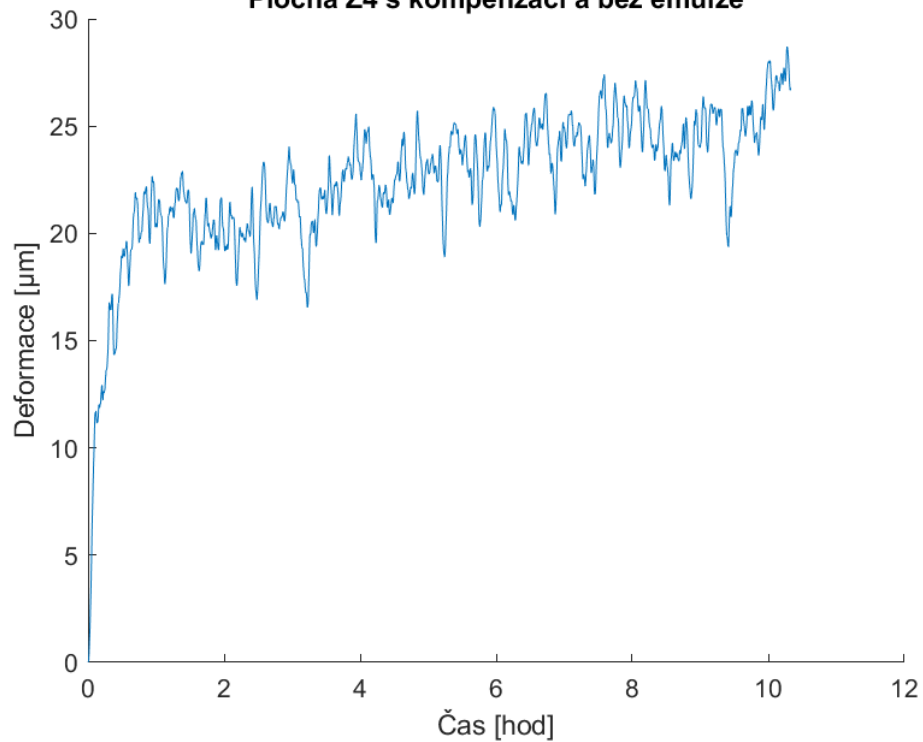




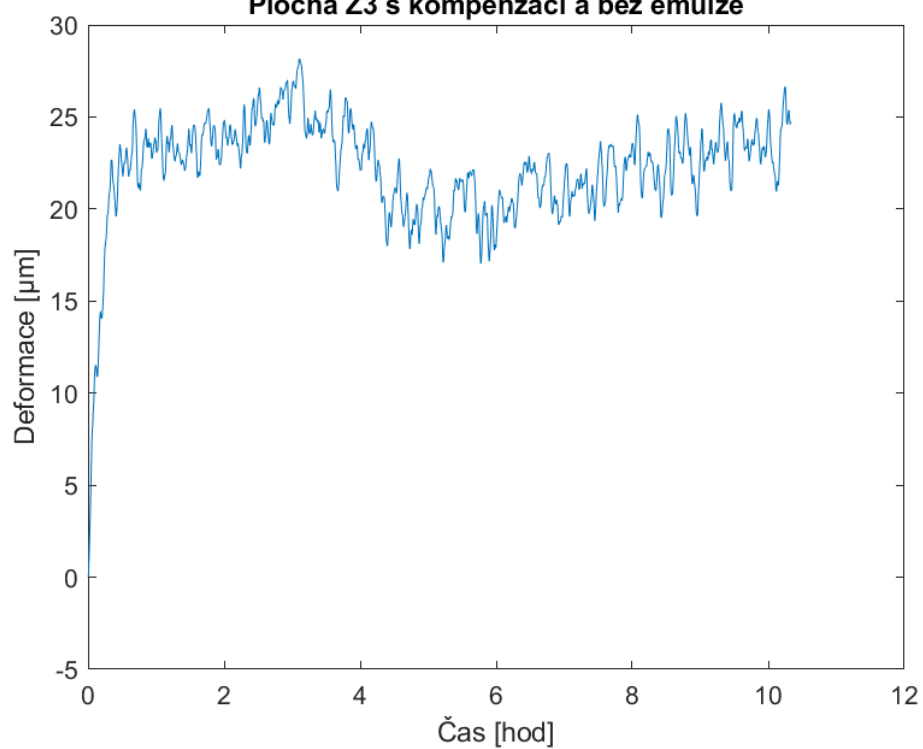


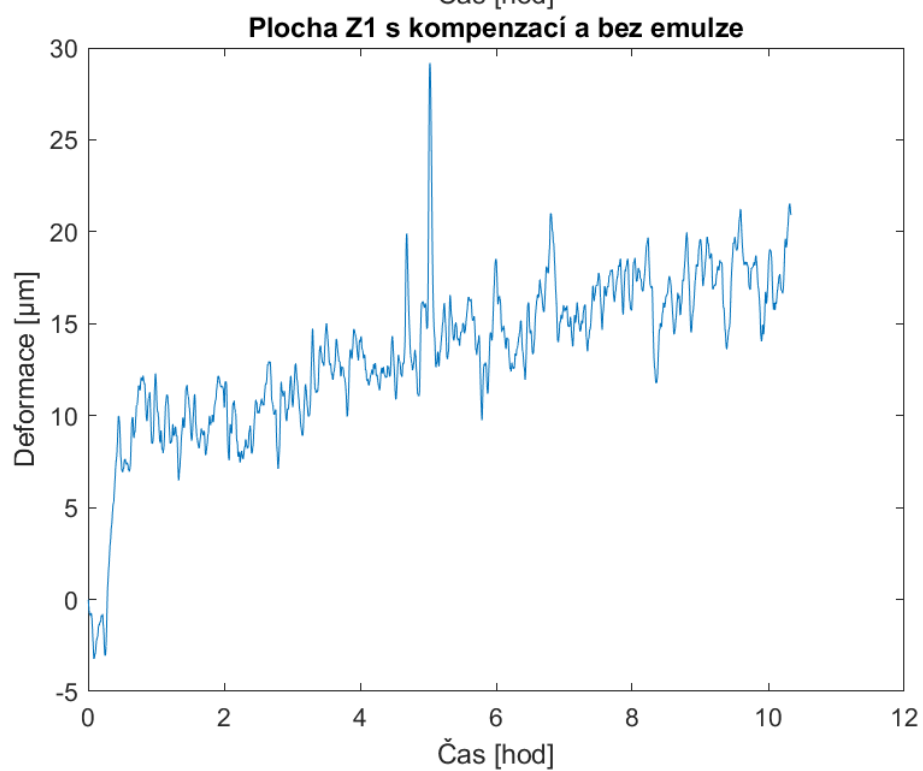
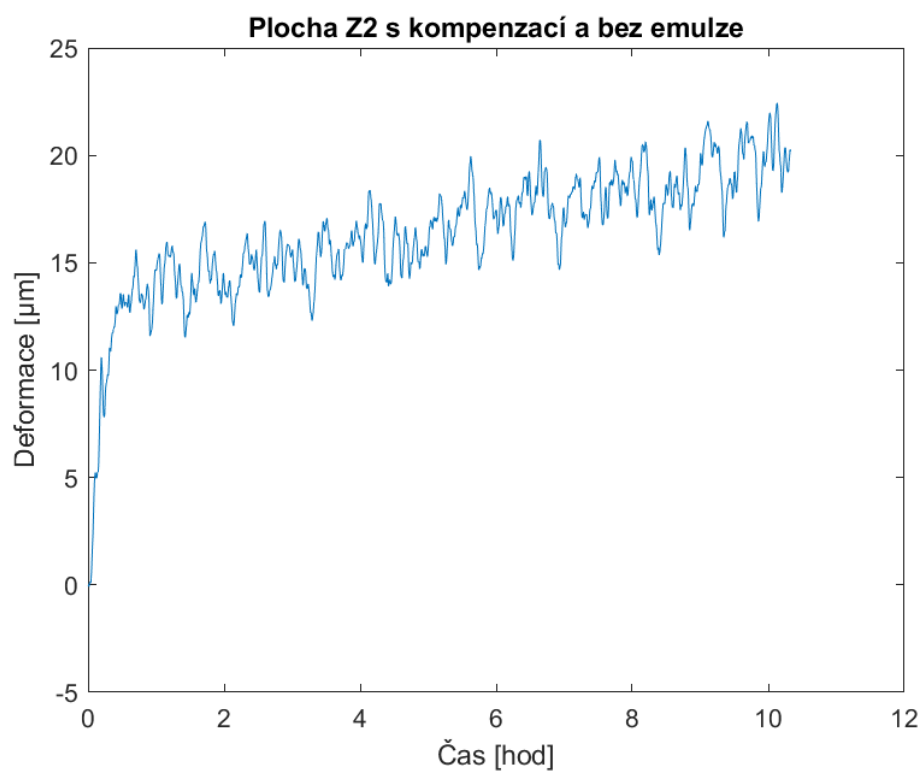
S kompenzací a bez emulze

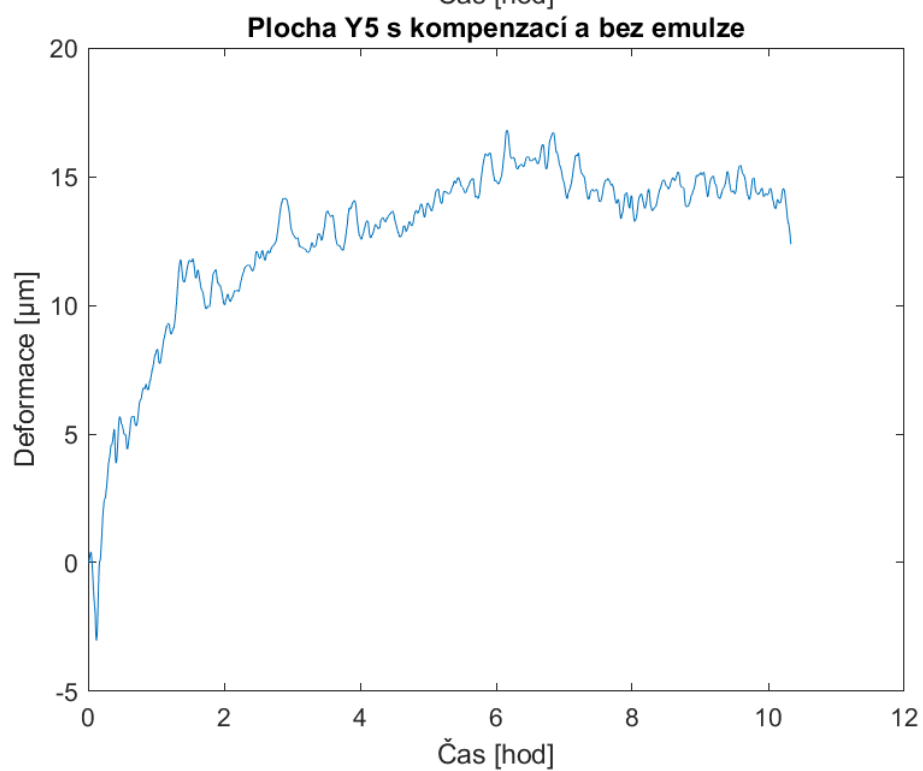
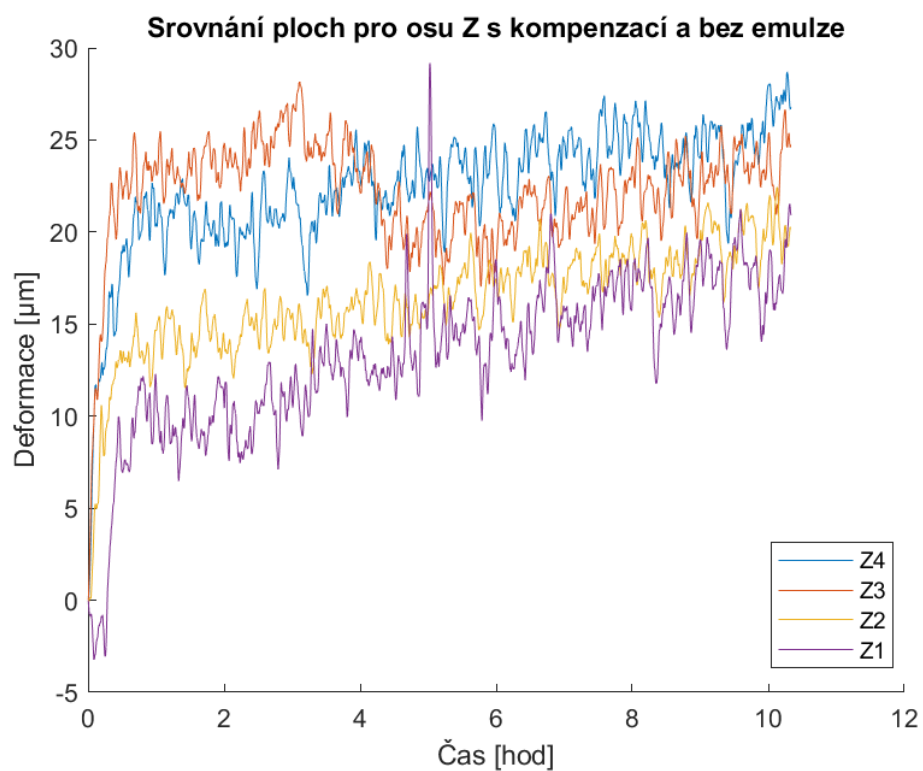
Plocha Z4 s kompenzací a bez emulze

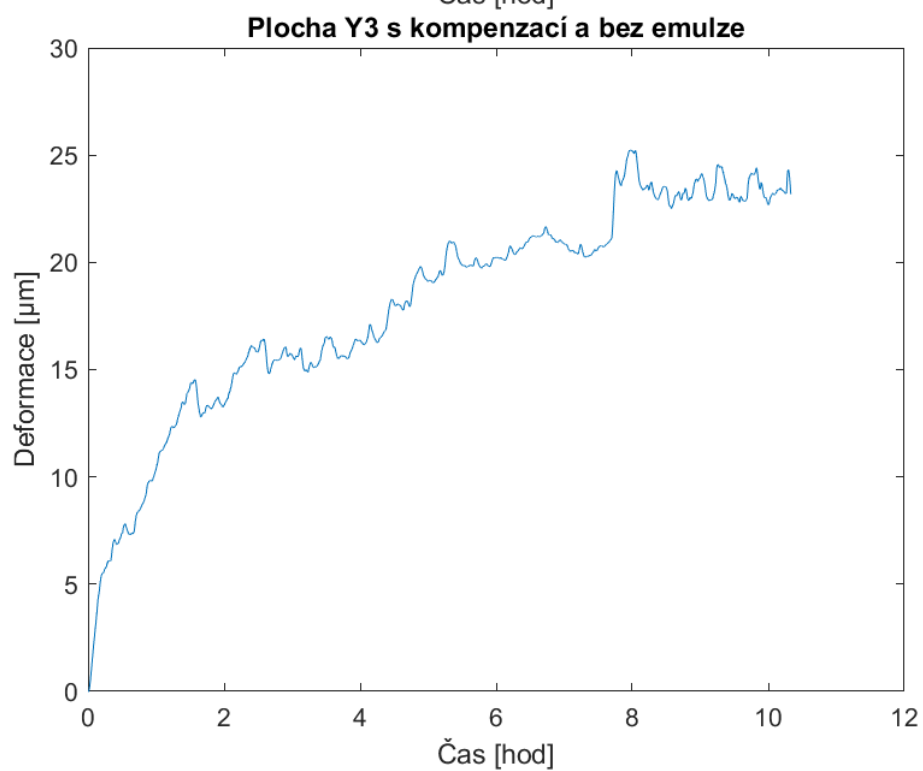
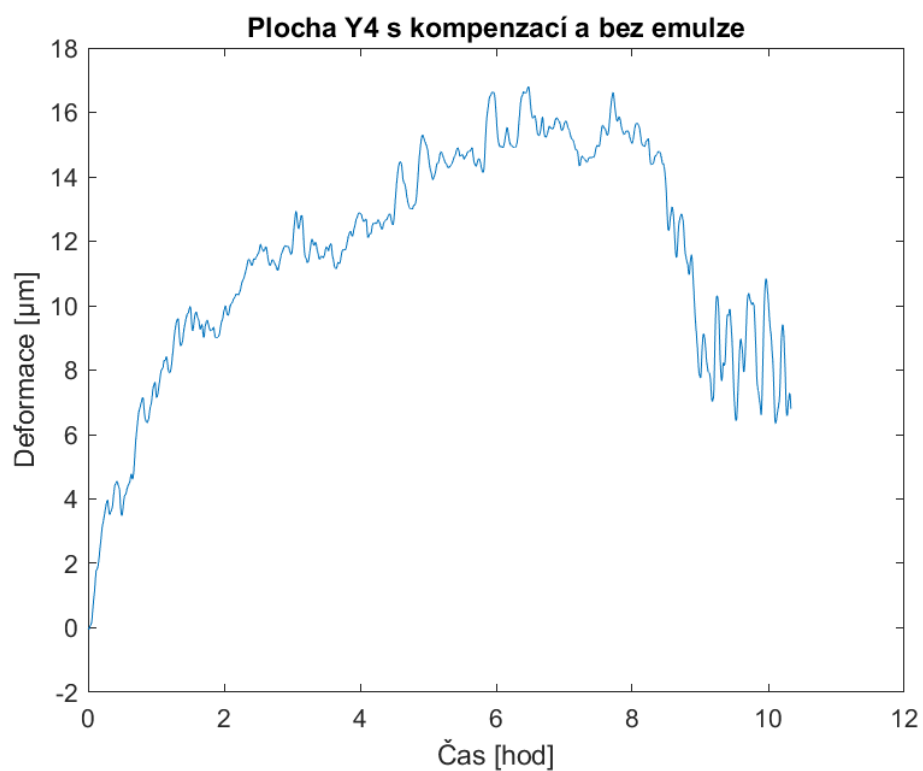


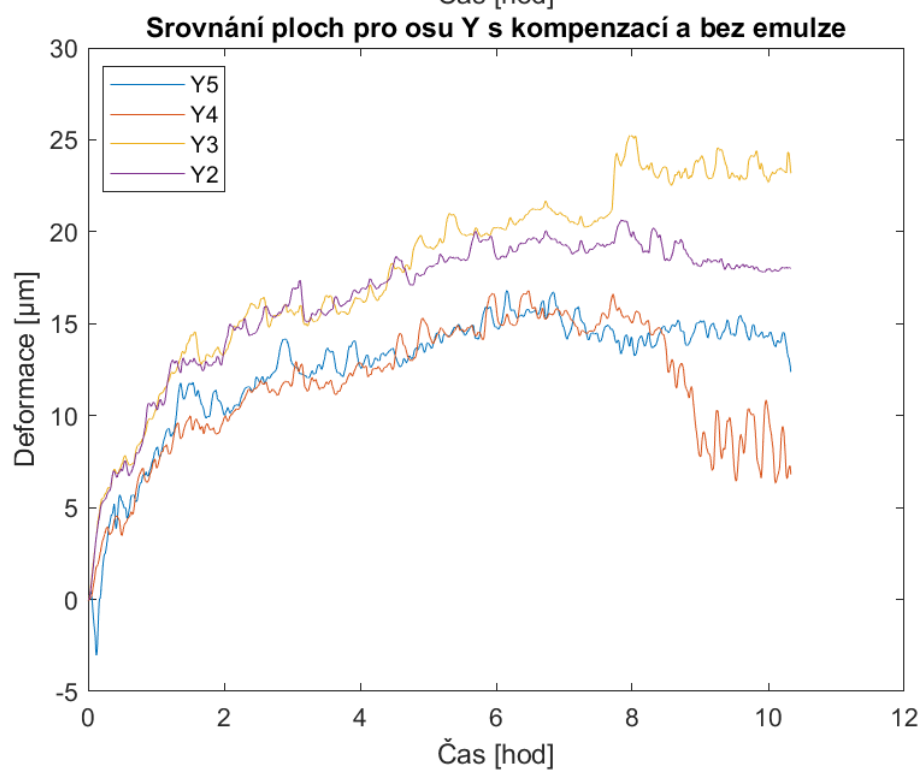
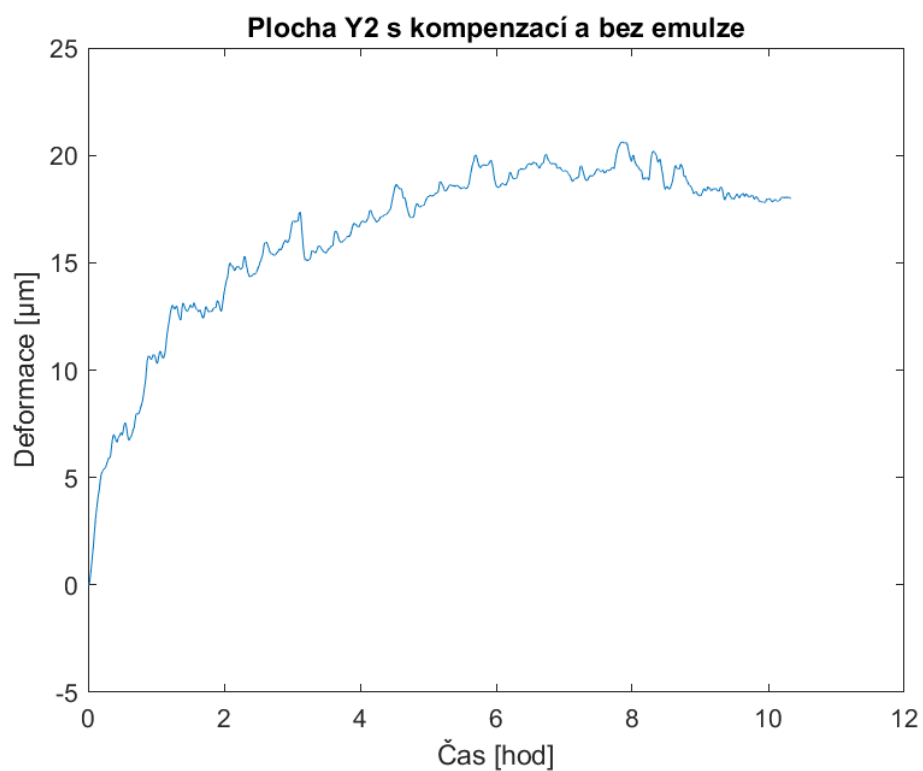
Plocha Z3 s kompenzací a bez emulze







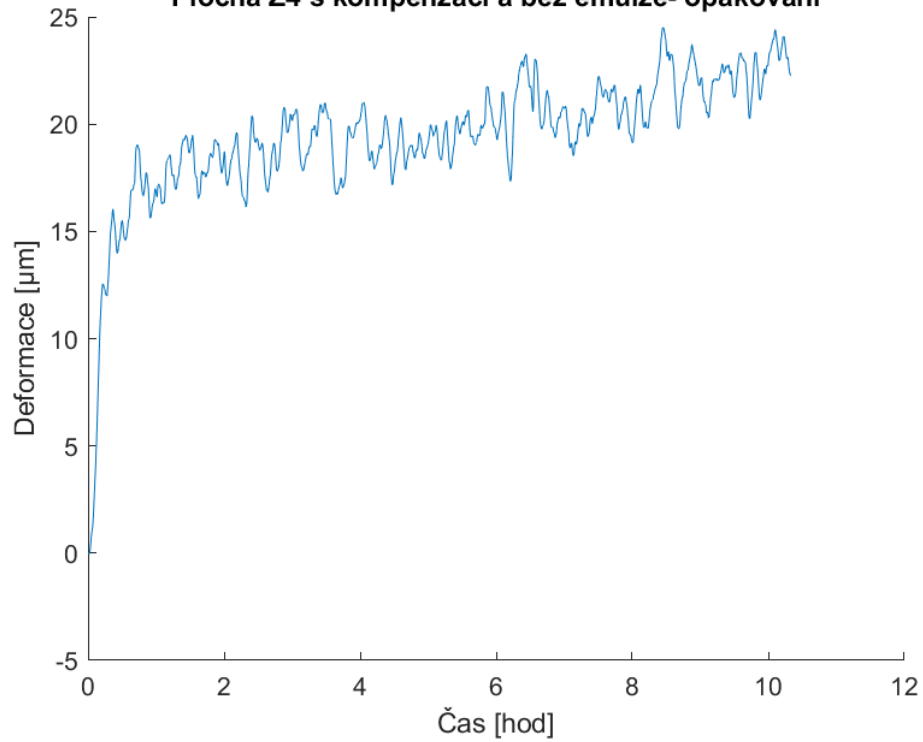




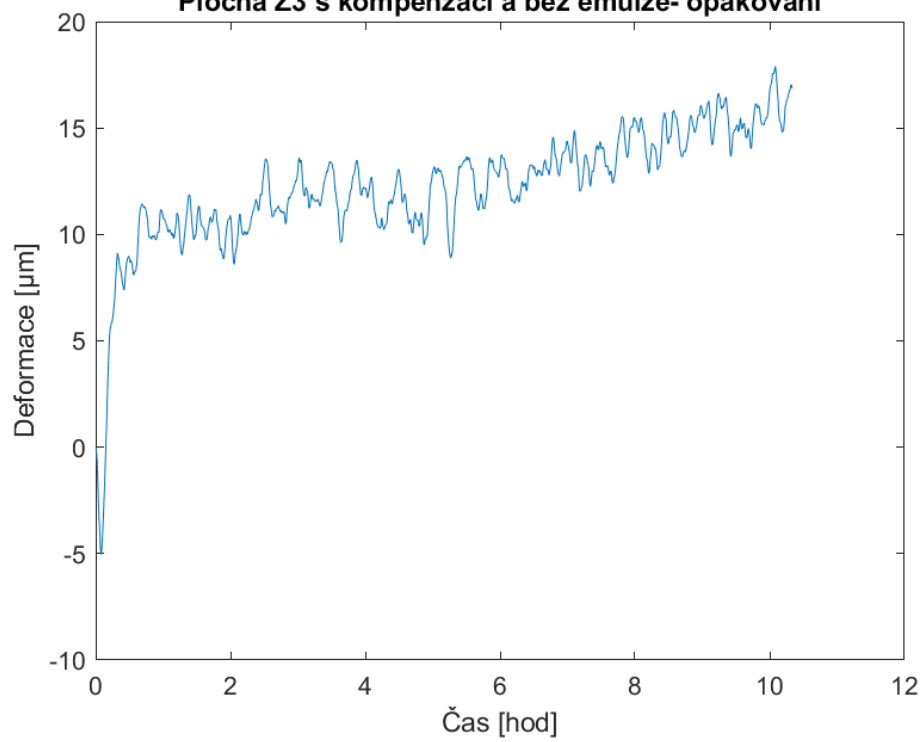


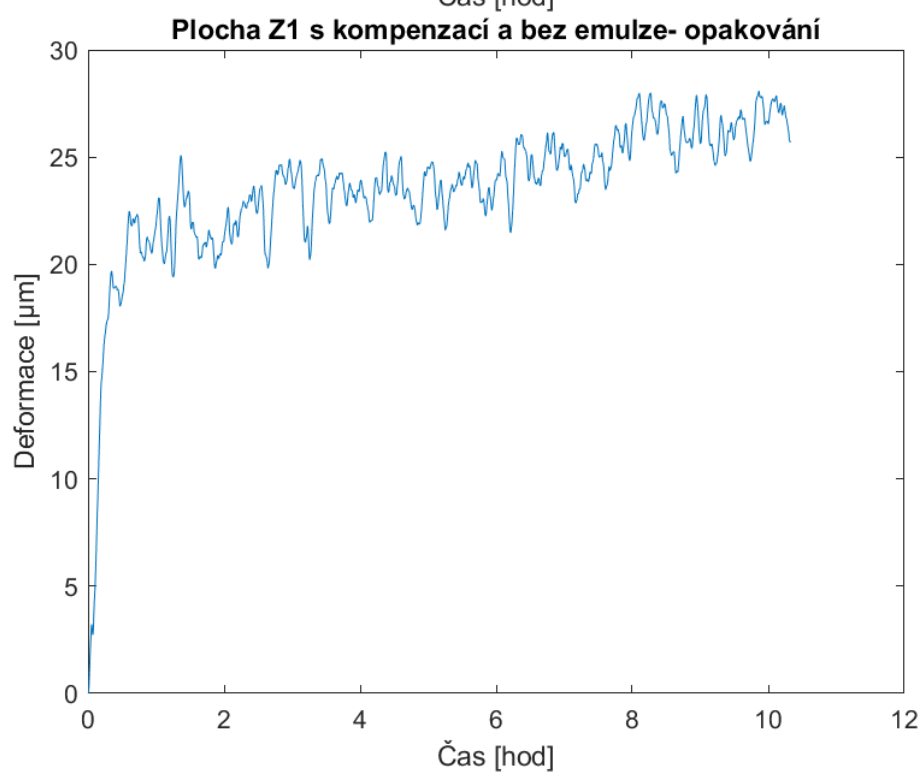
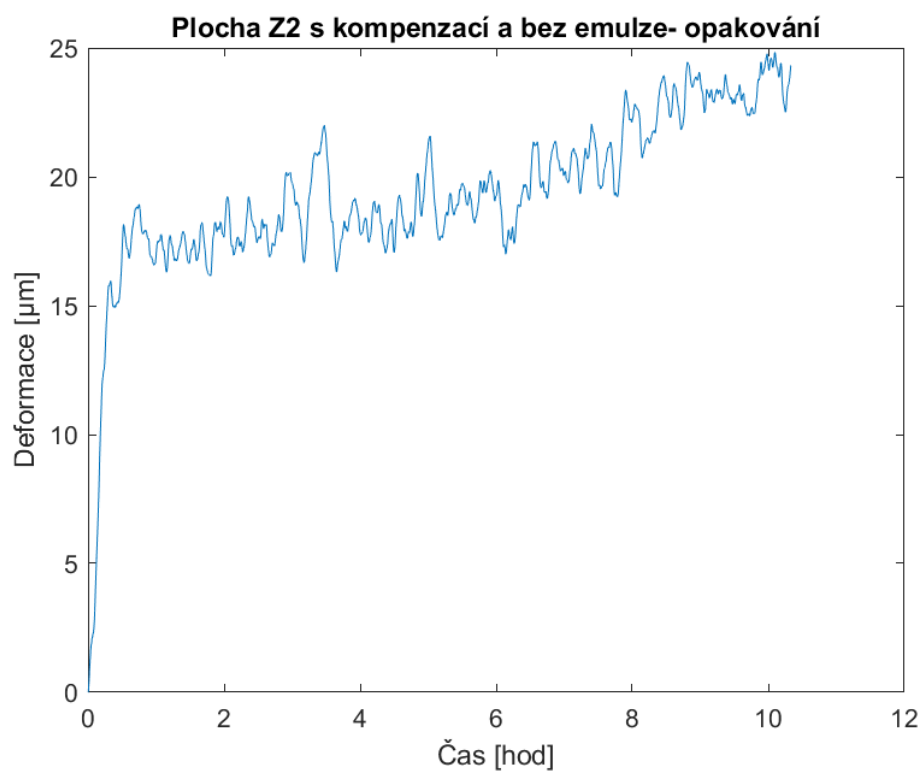
S kompenzací a bez emulze- opakování

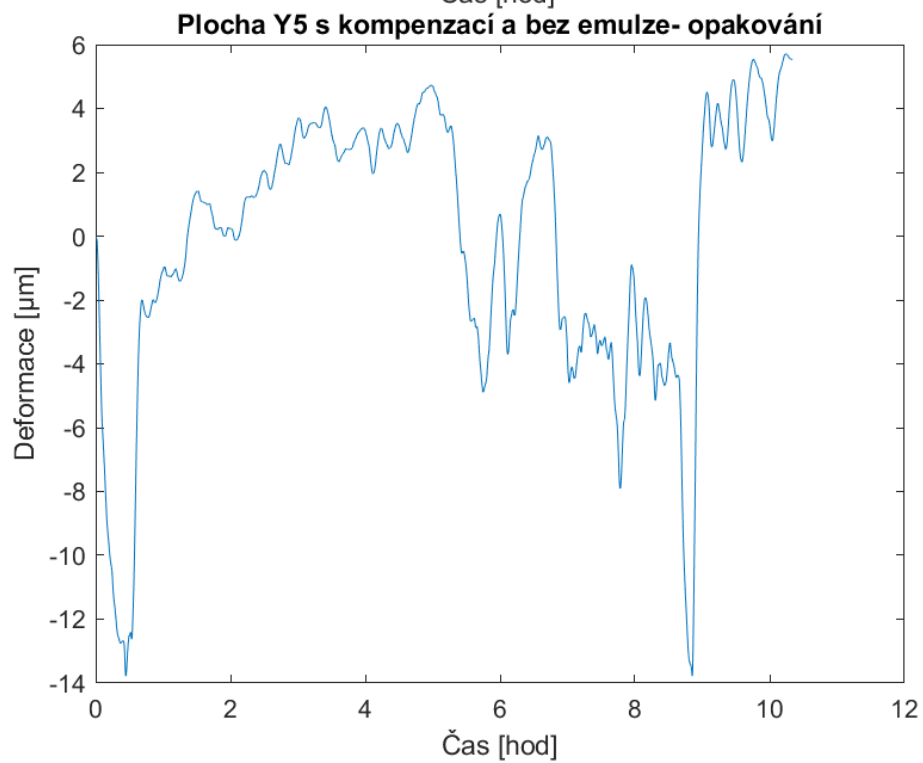
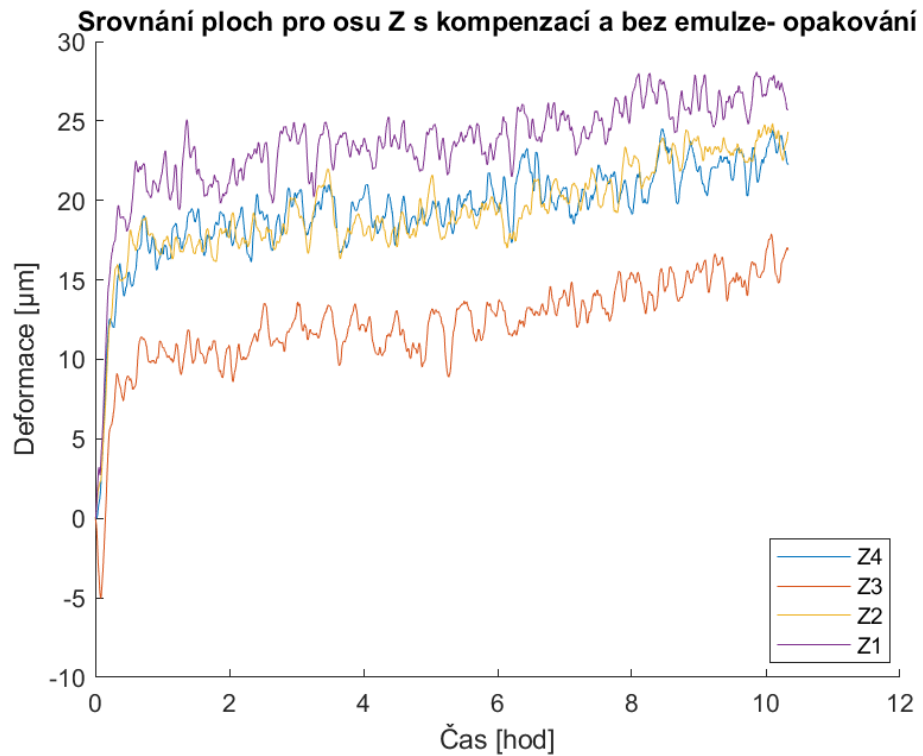
Plocha Z4 s kompenzací a bez emulze- opakování

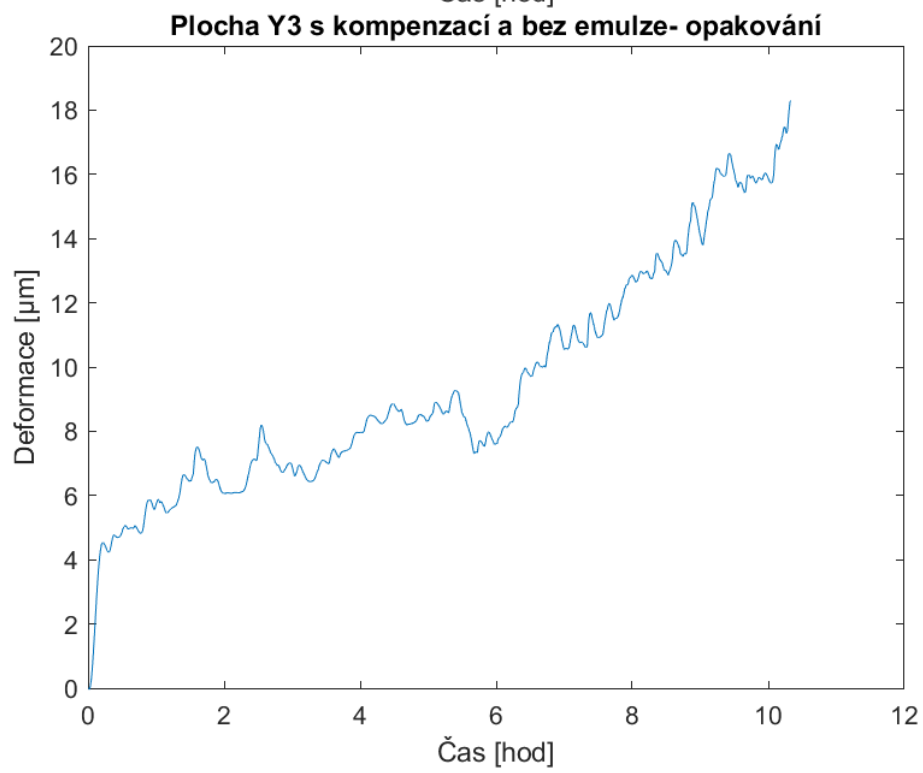
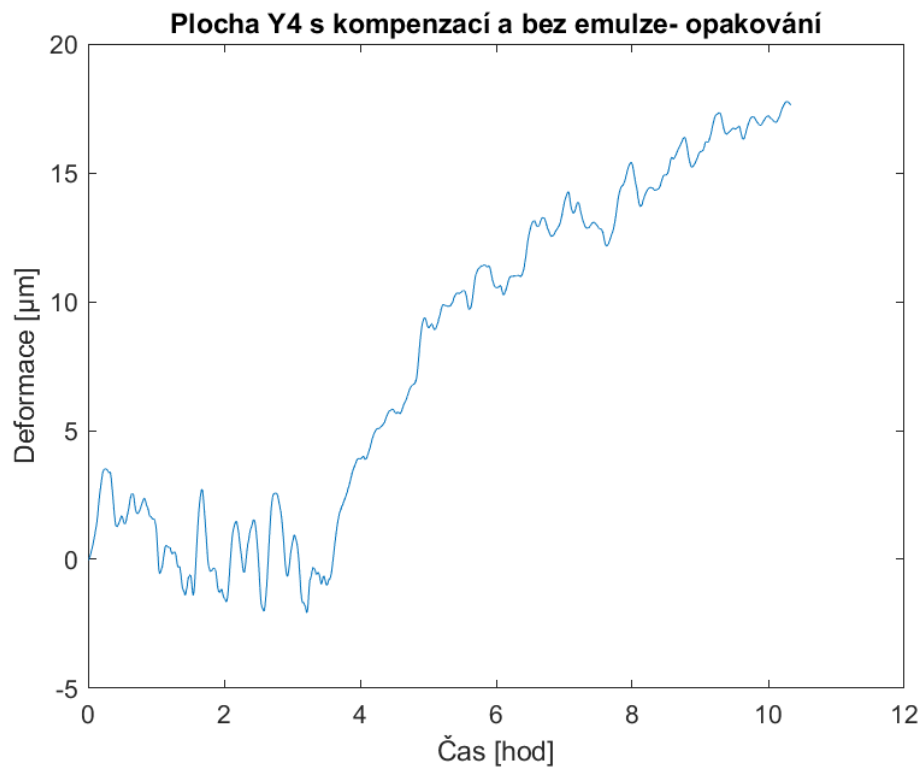


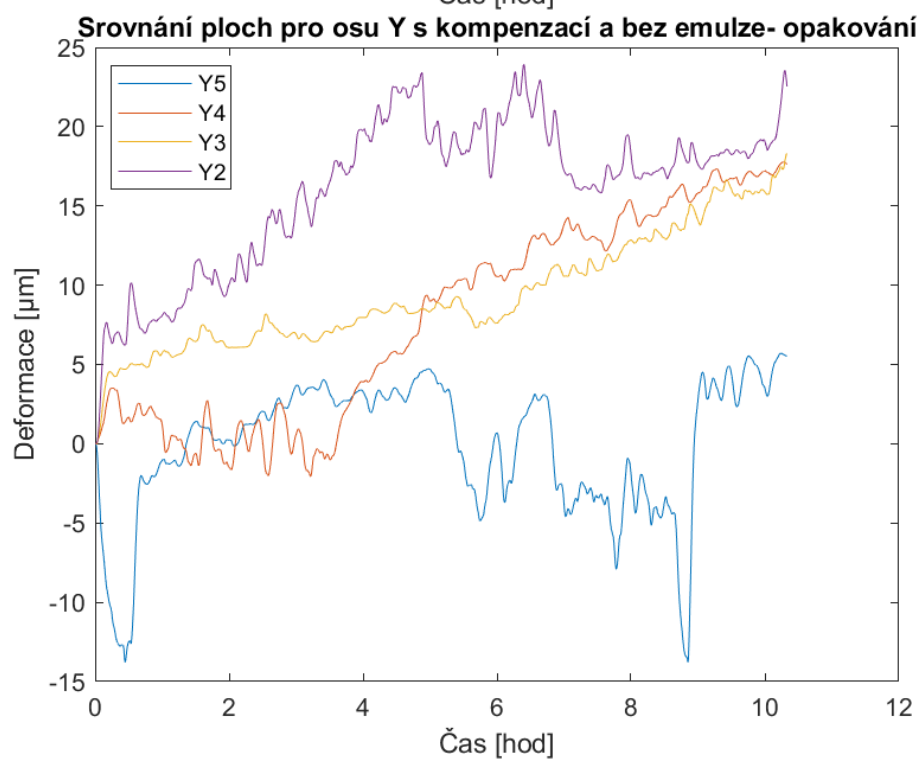
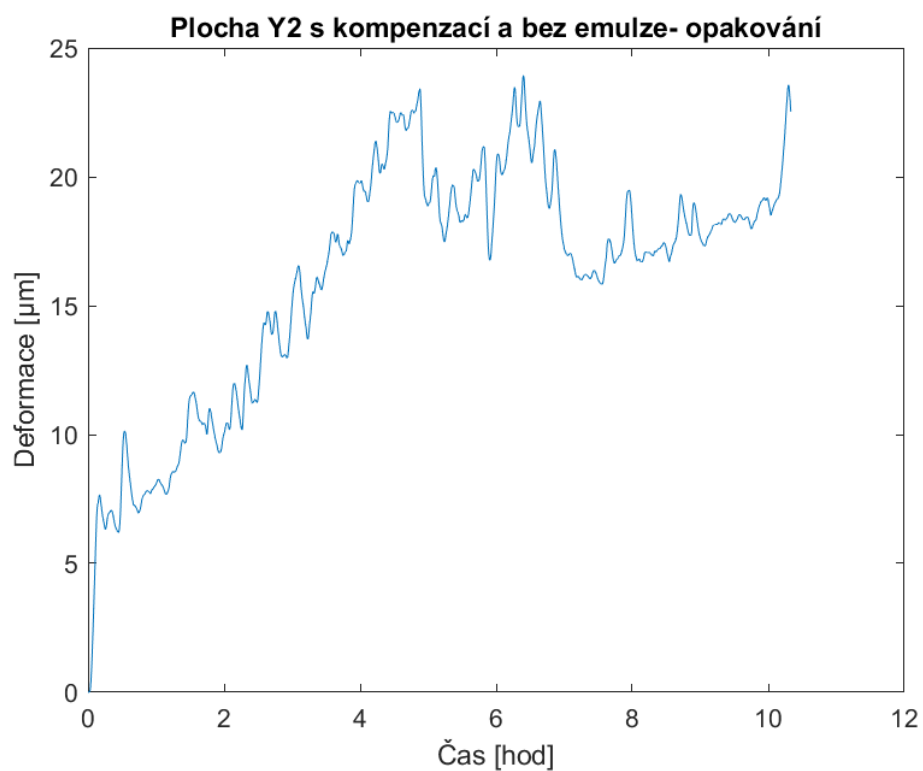
Plocha Z3 s kompenzací a bez emulze- opakování







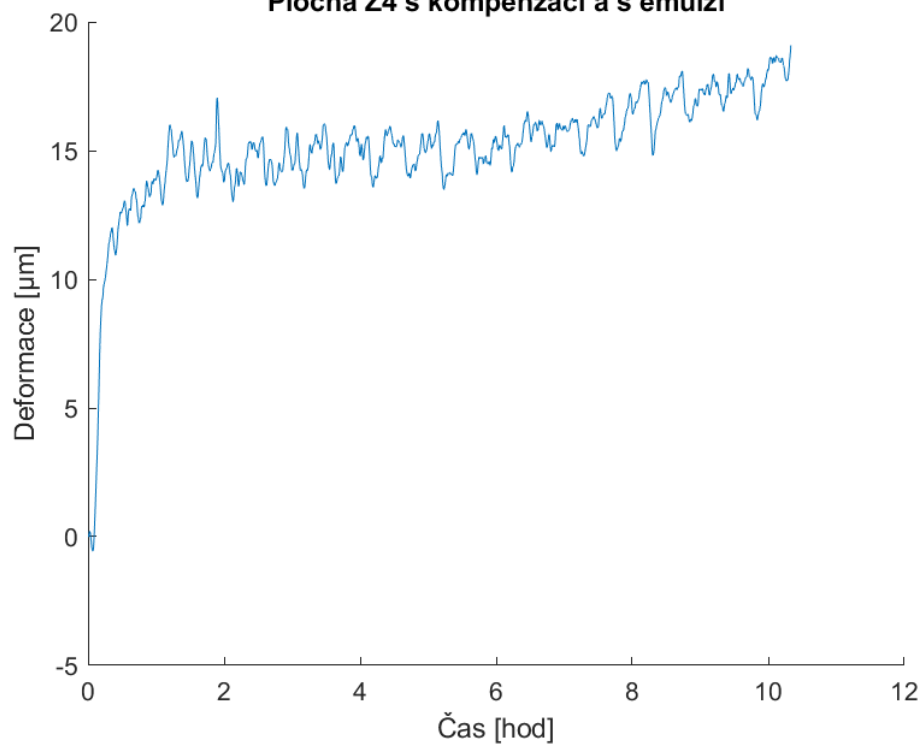




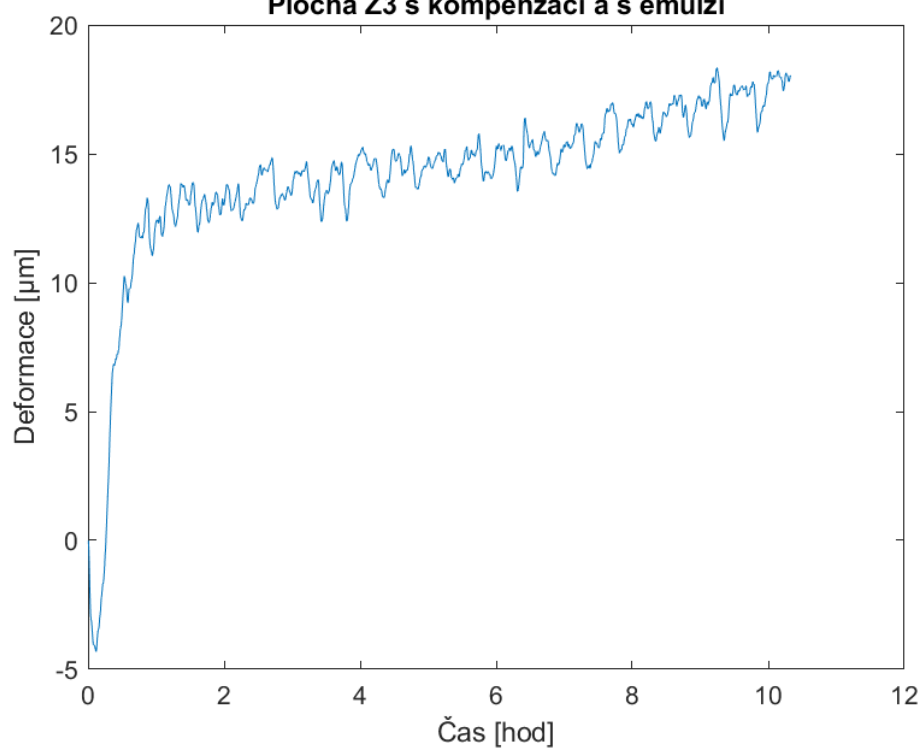


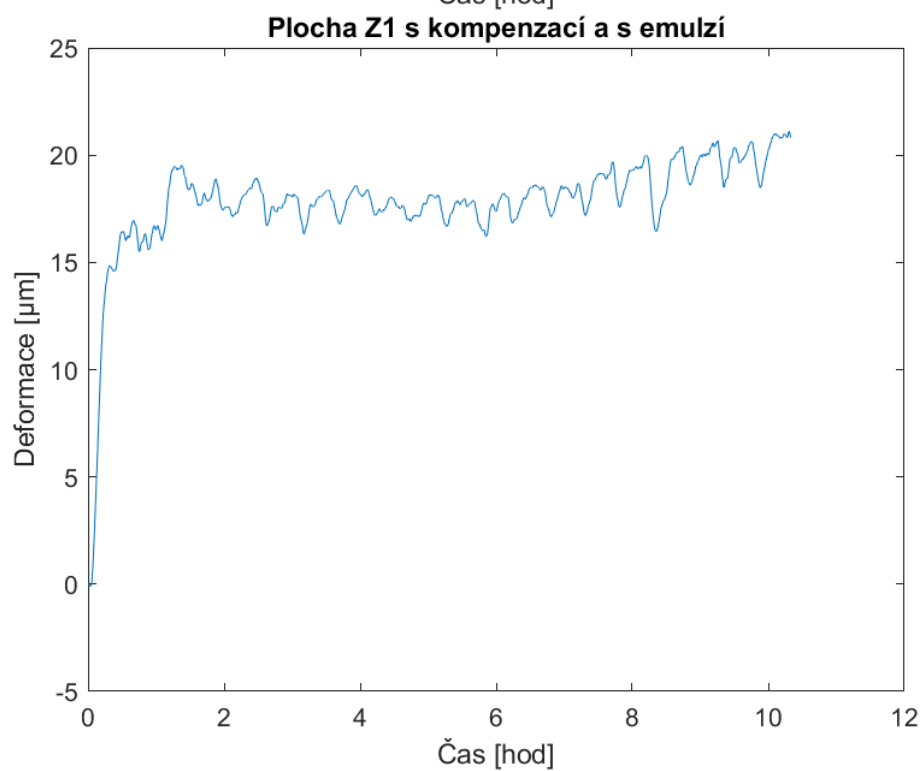
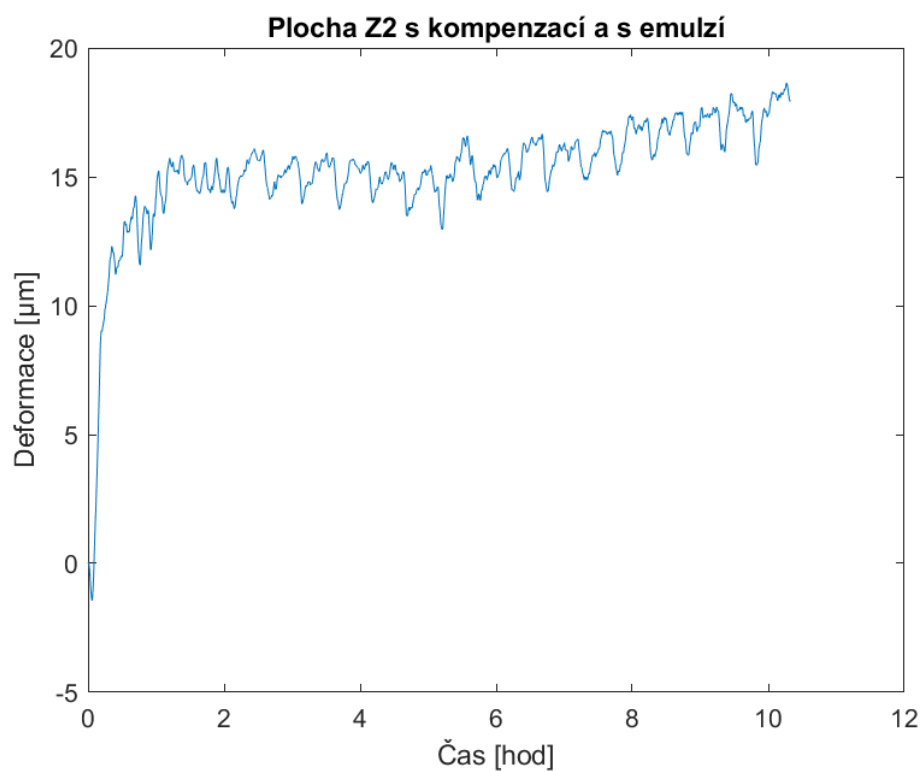
S kompenzací a s emulzí

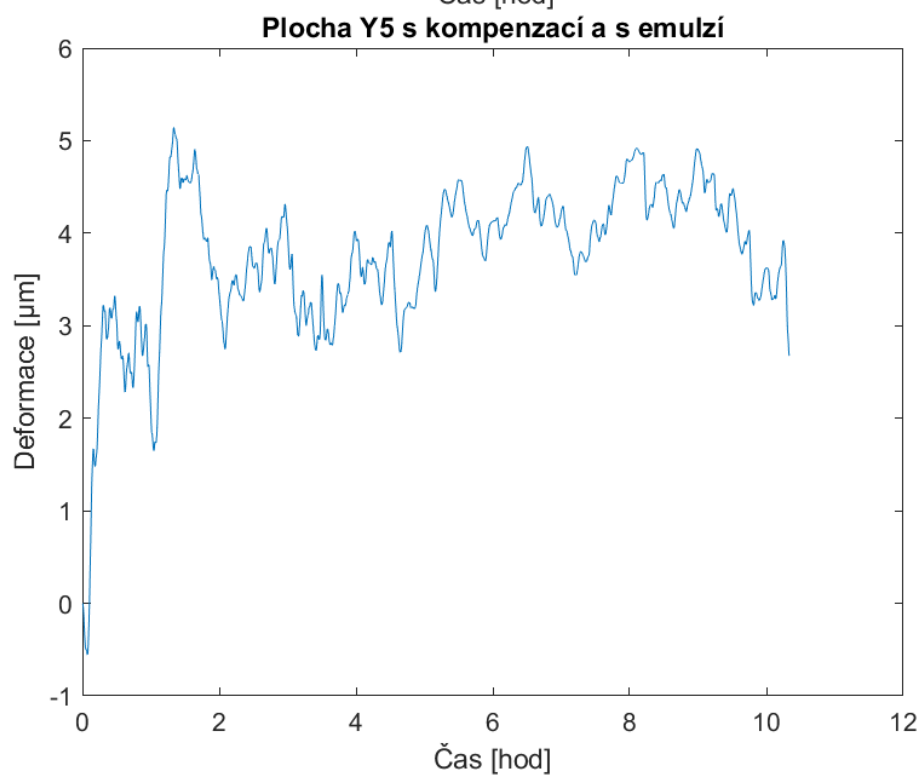
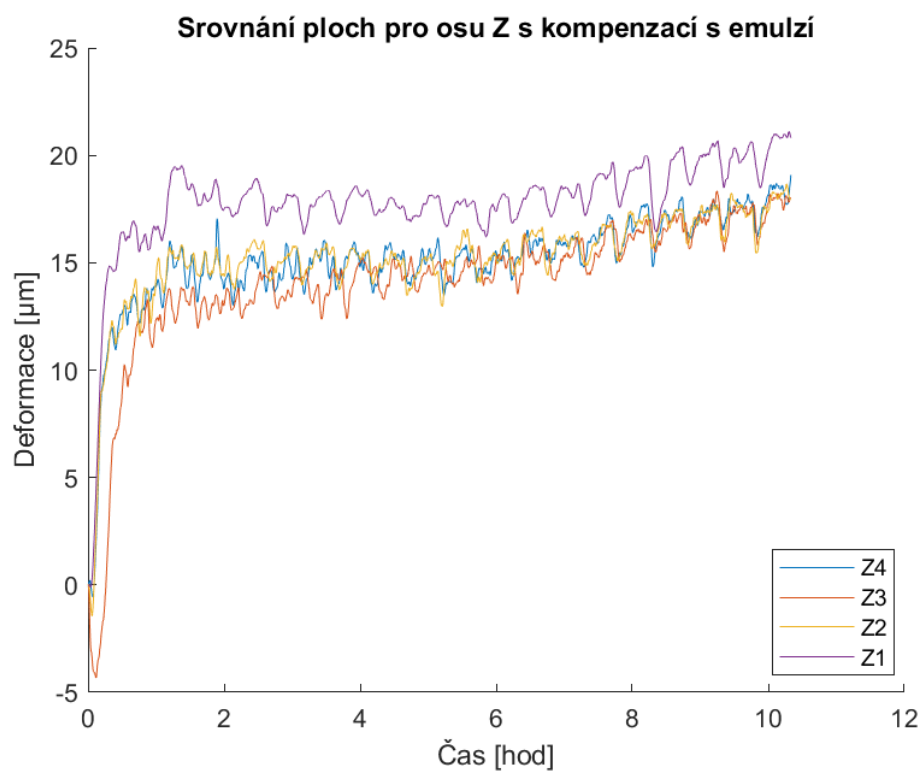
Plocha Z4 s kompenzací a s emulzí

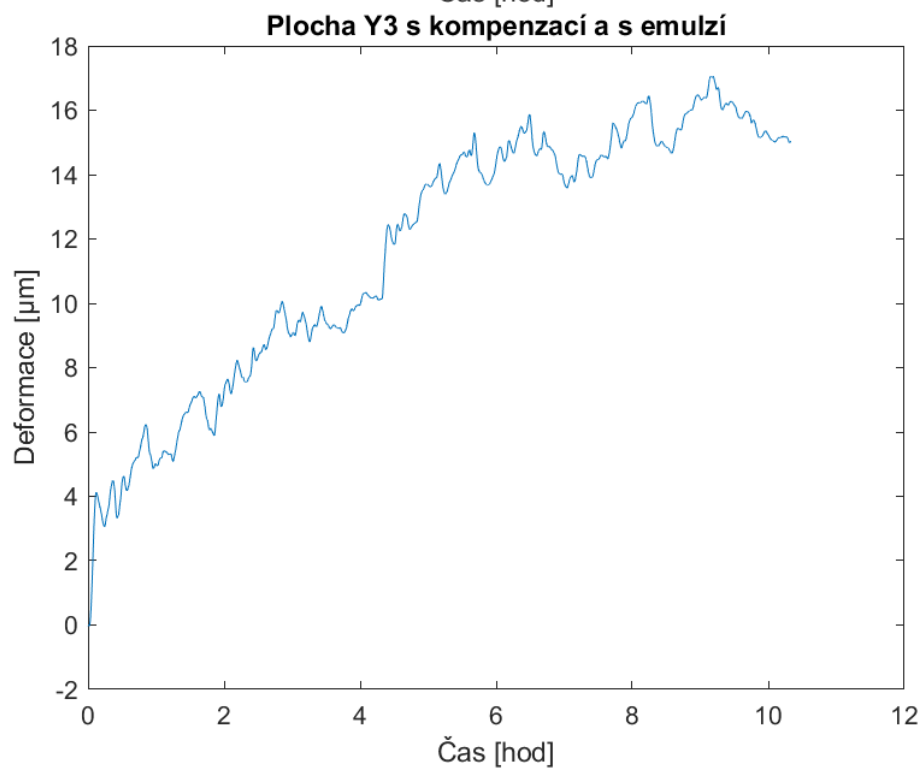
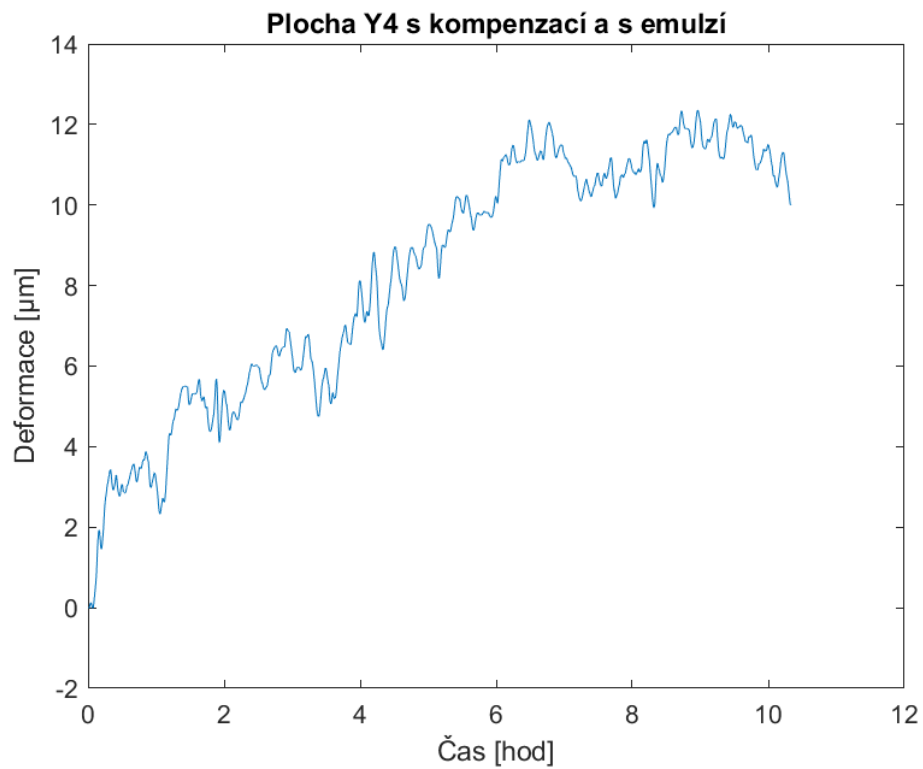


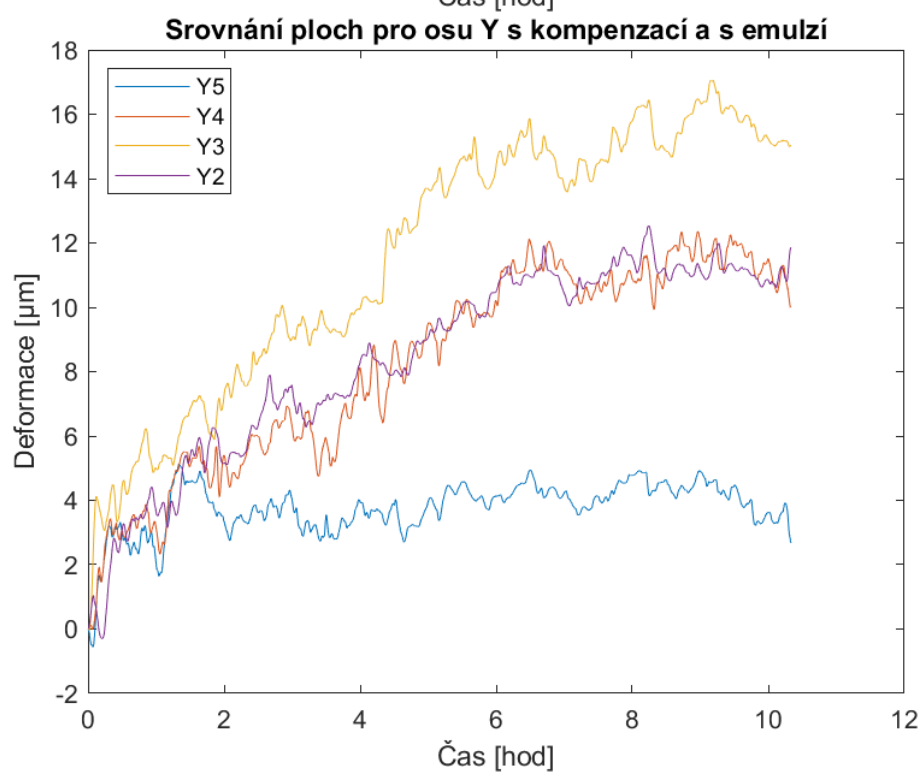
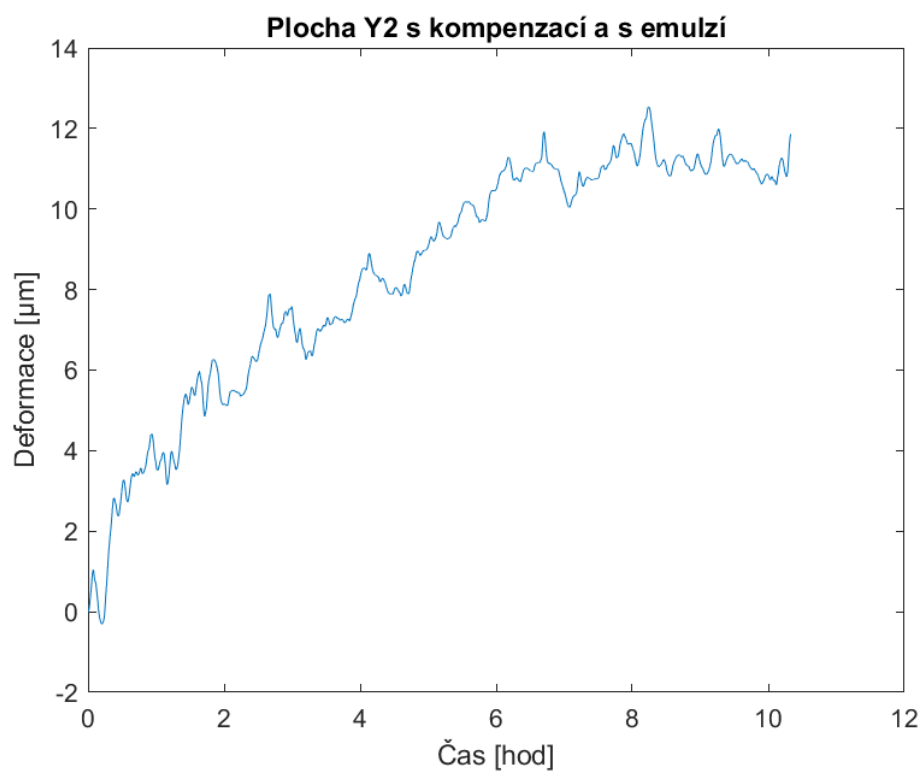
Plocha Z3 s kompenzací a s emulzí







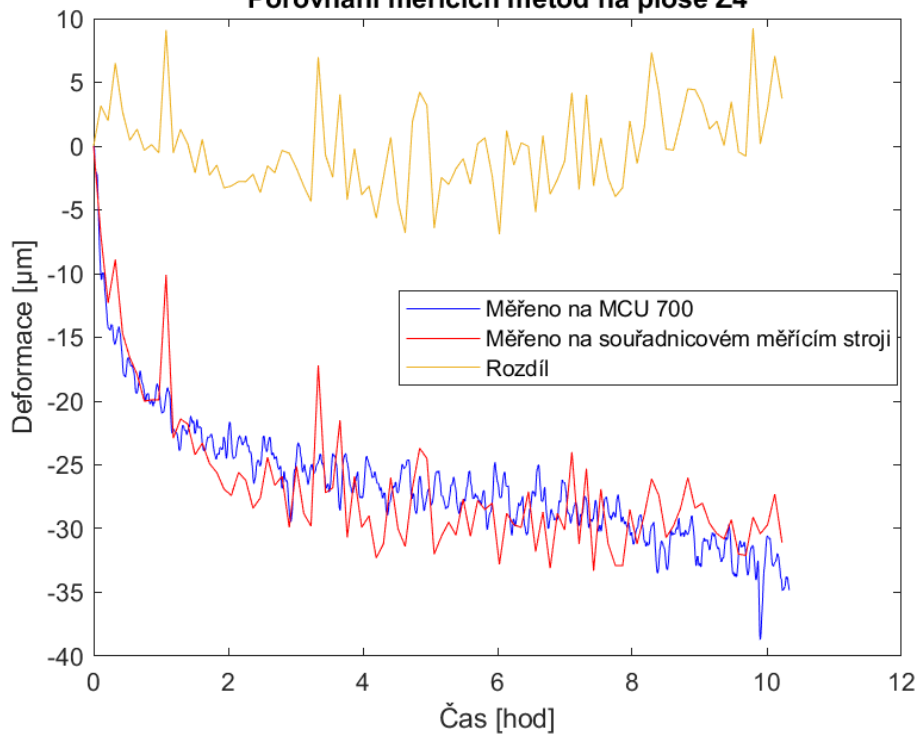




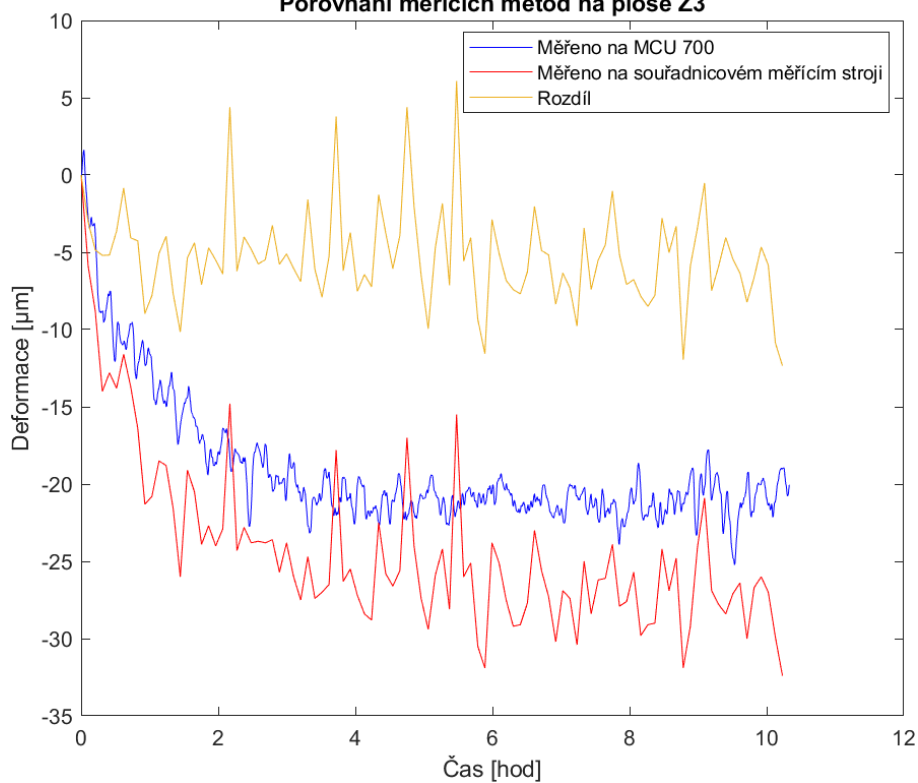


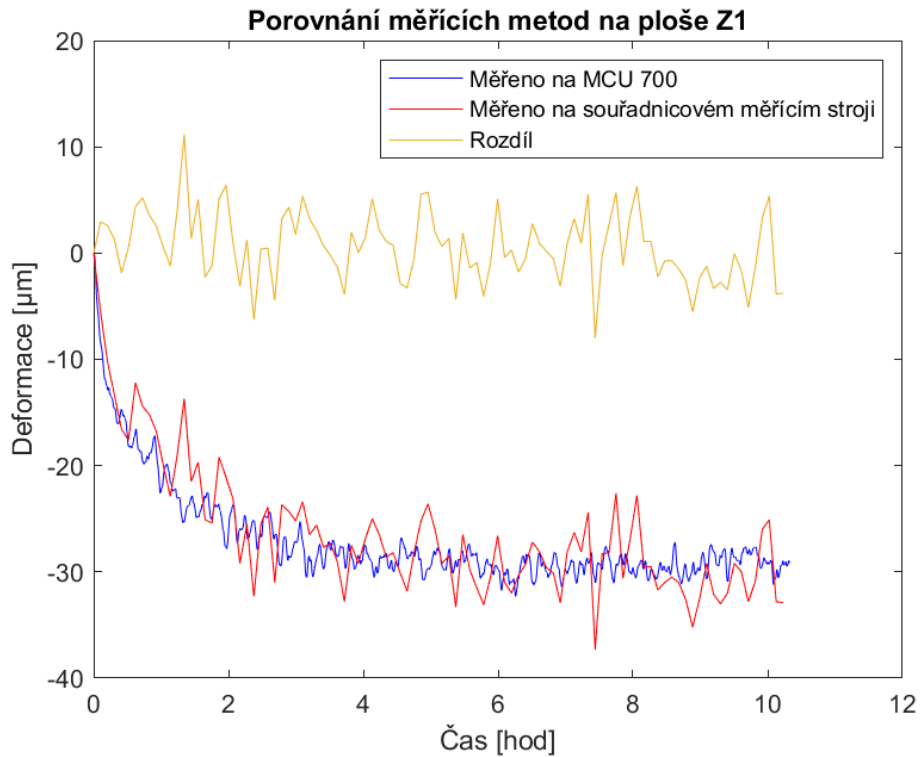
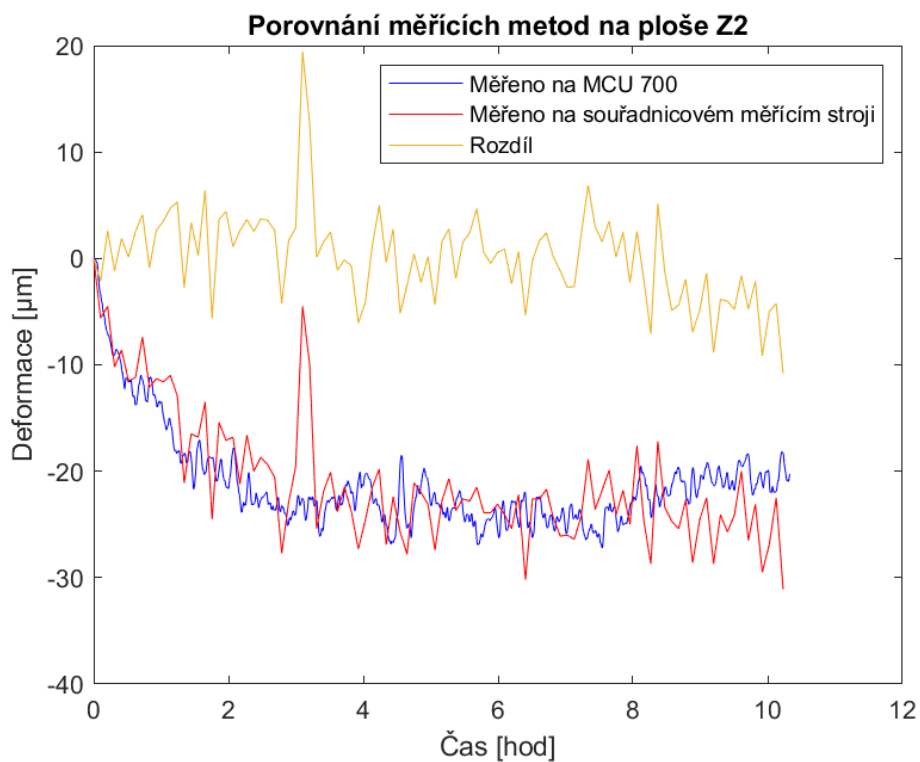
Srovnání souřadnicového měřicího stroje

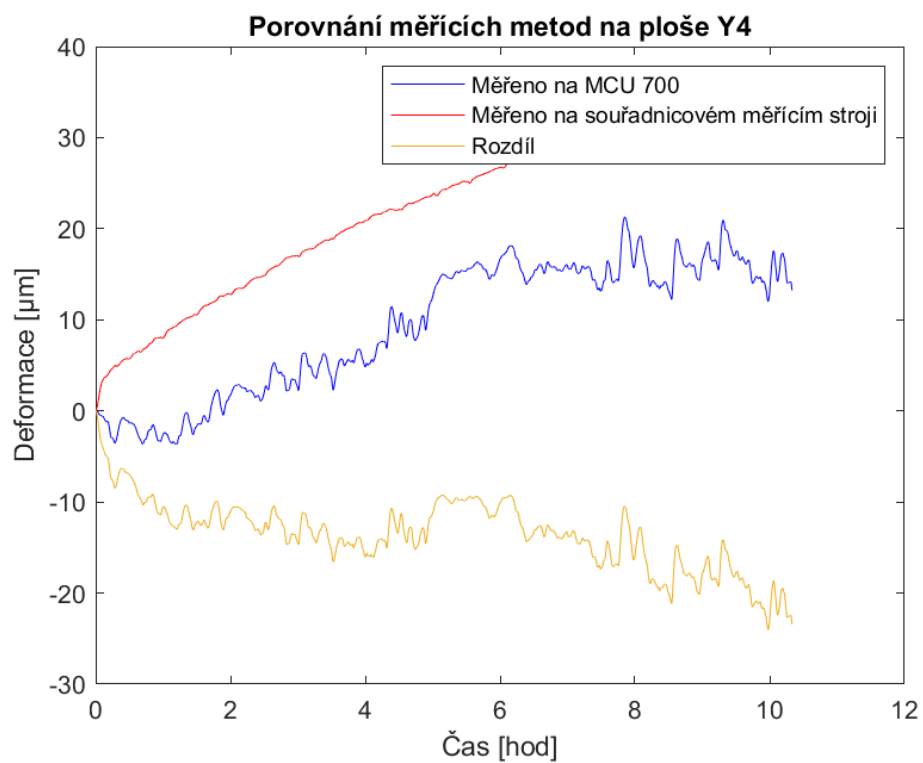
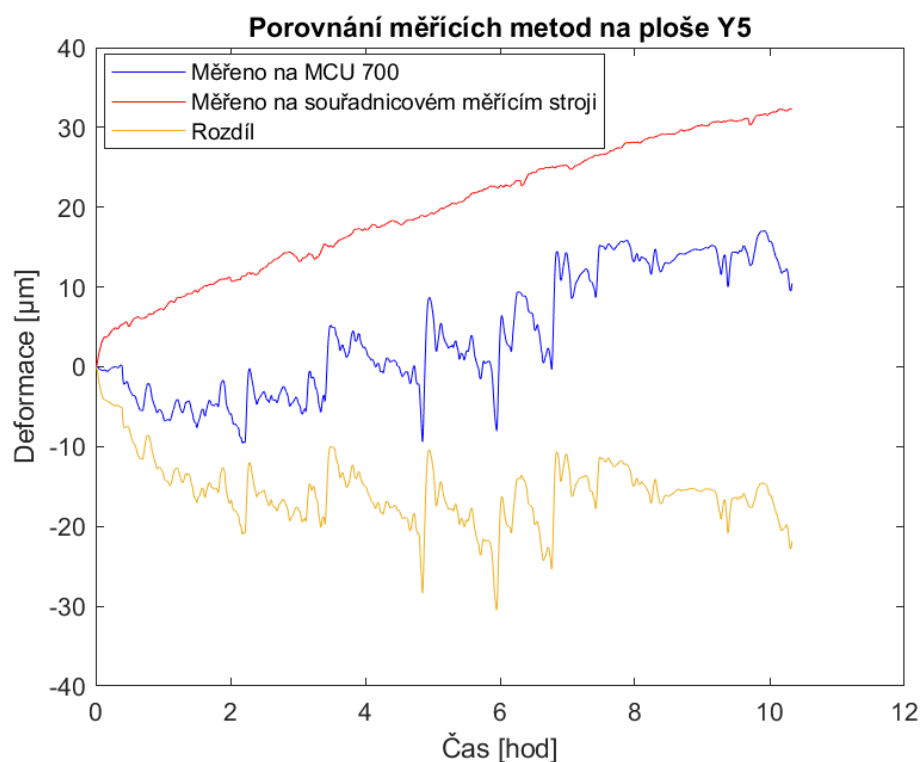
Porovnání měřících metod na ploše Z4

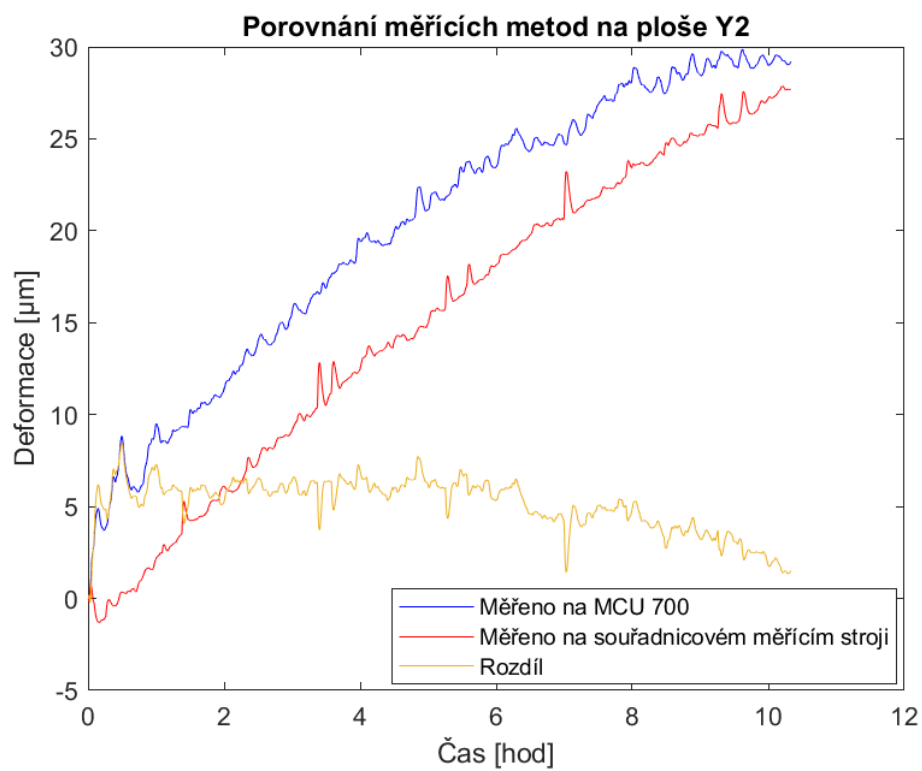
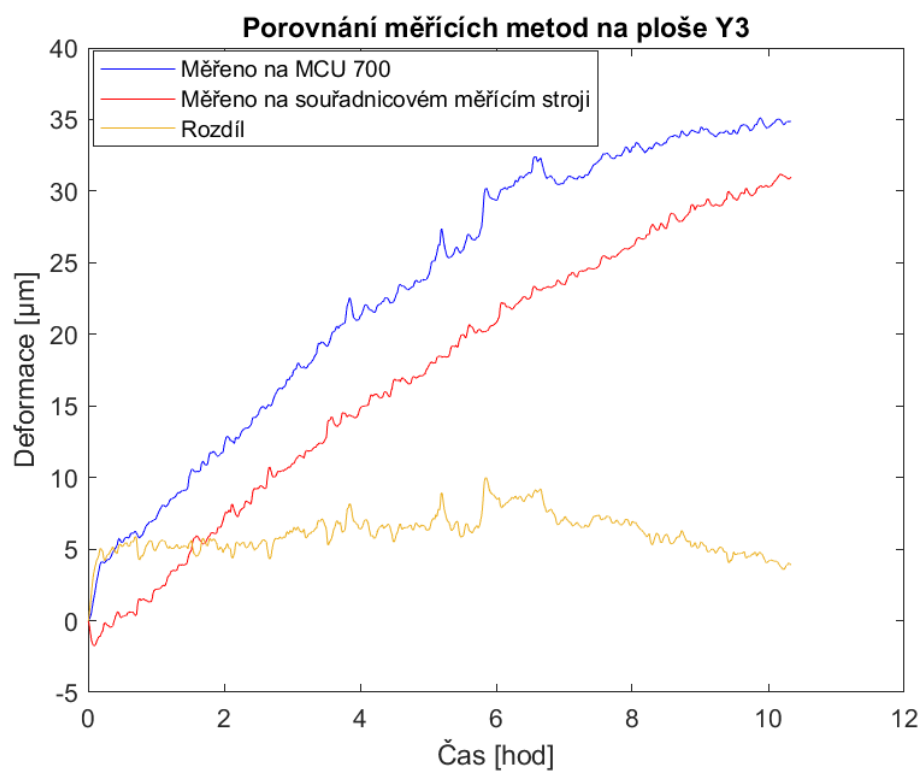


Porovnání měřících metod na ploše Z3



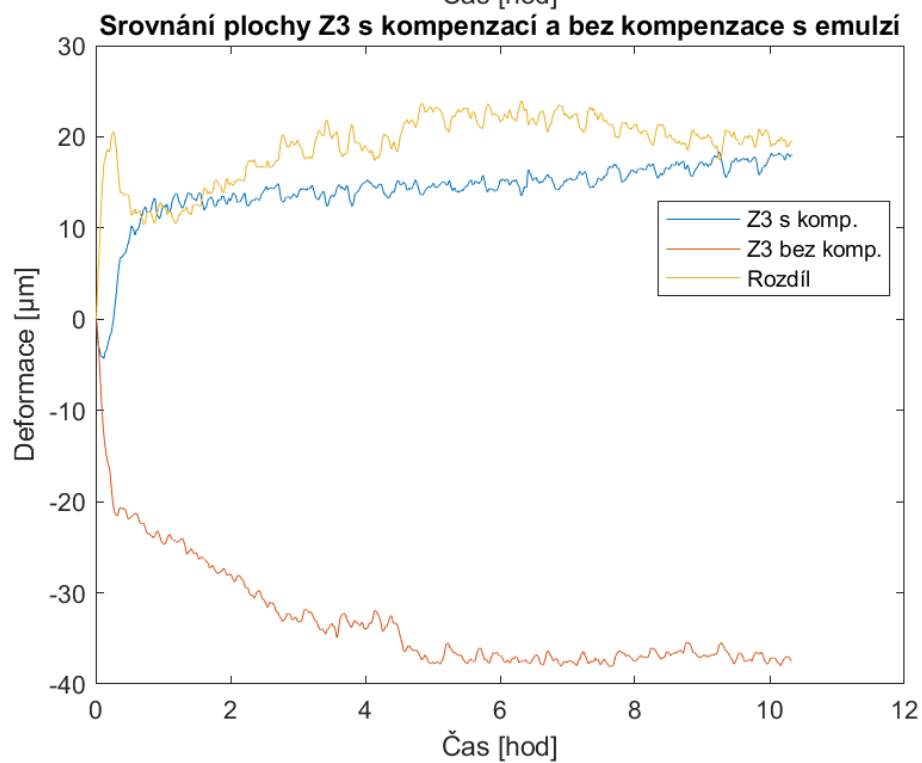
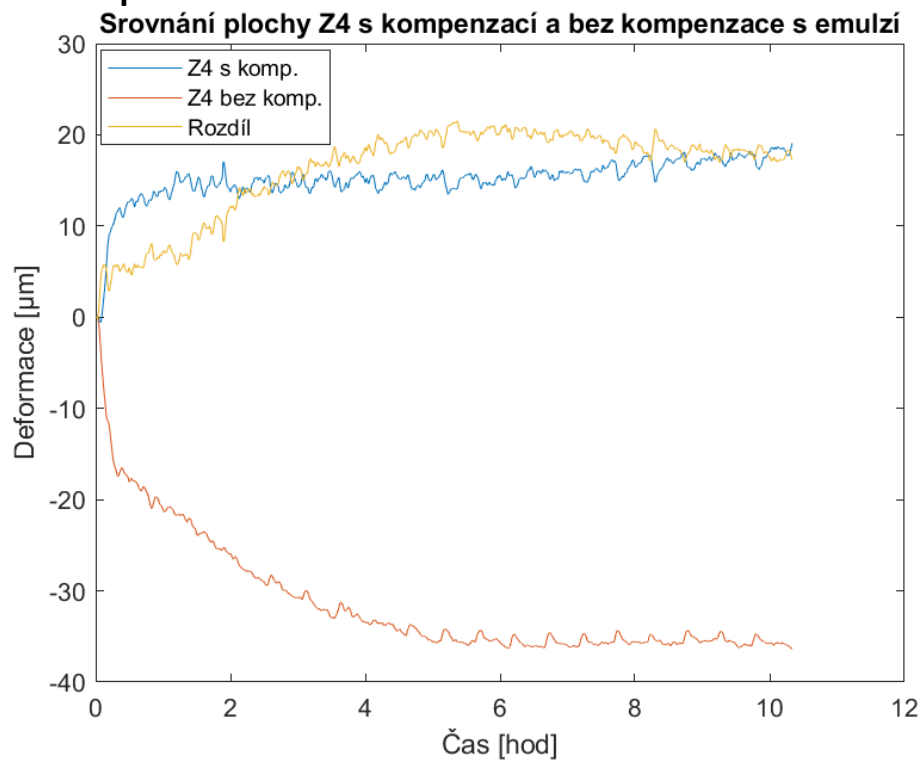


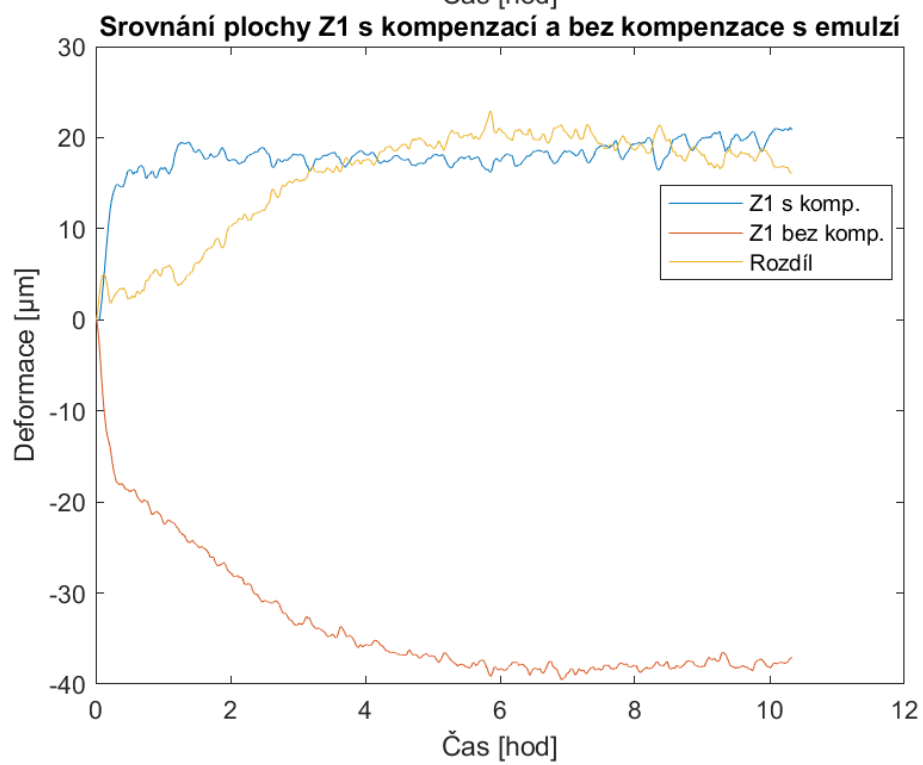
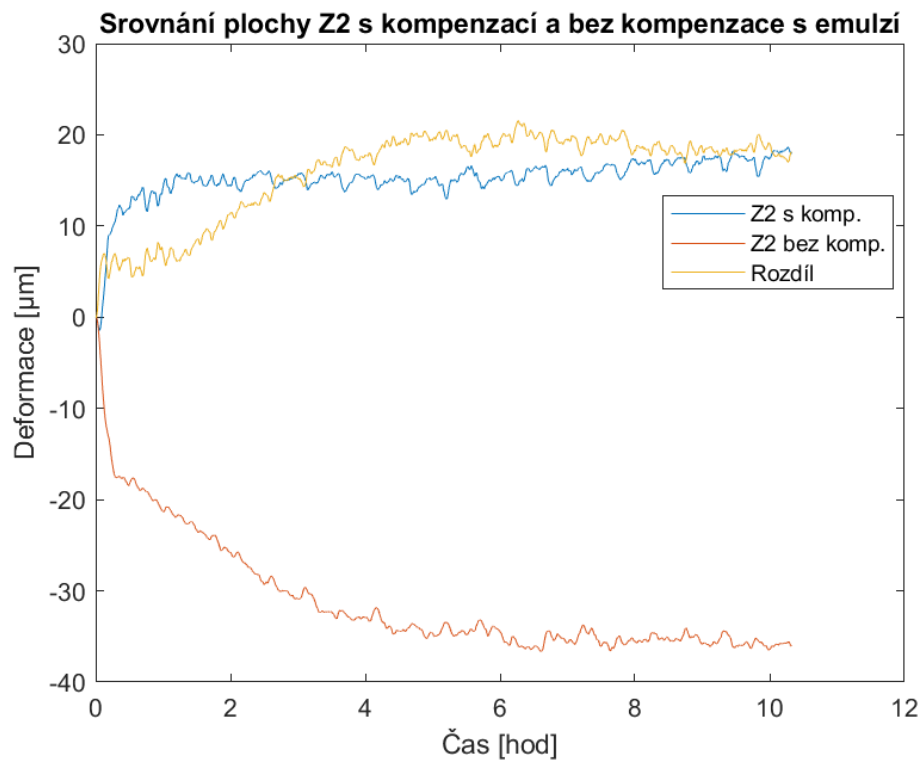


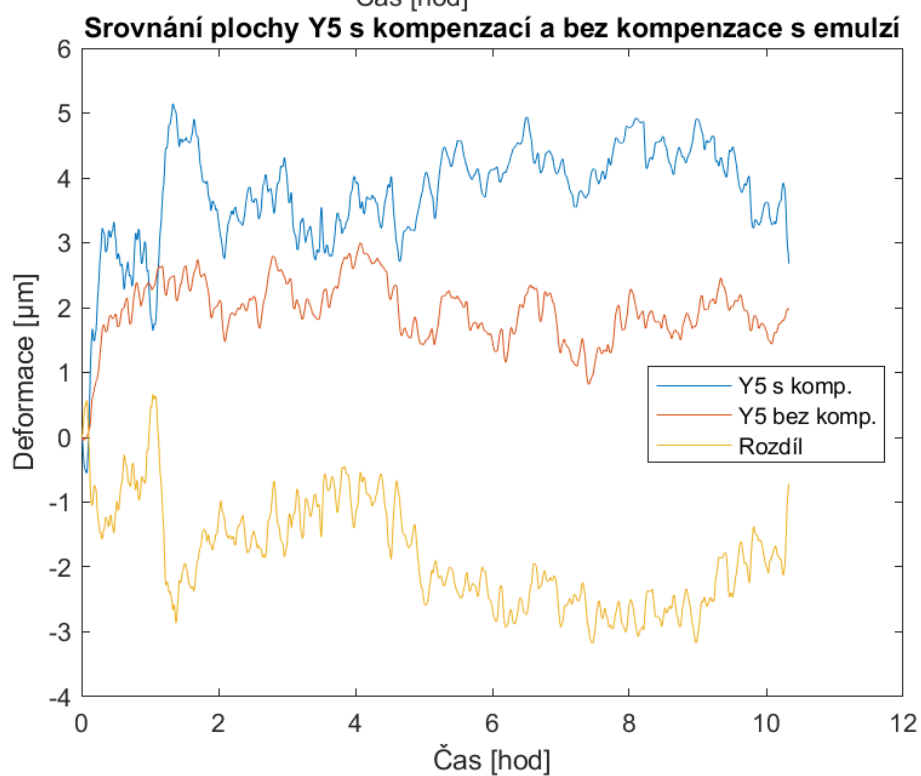
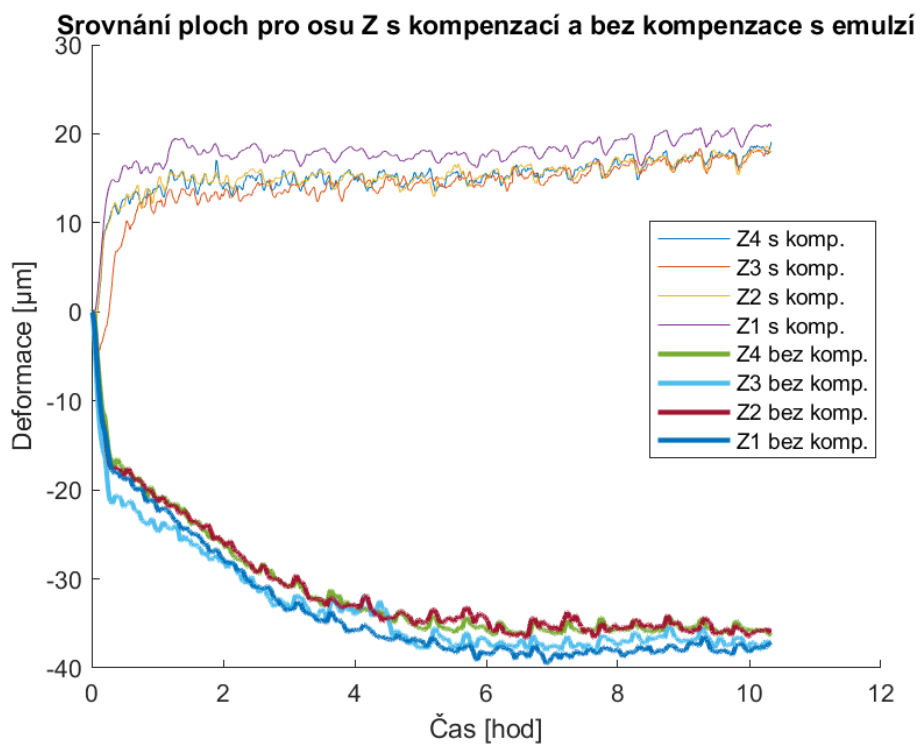


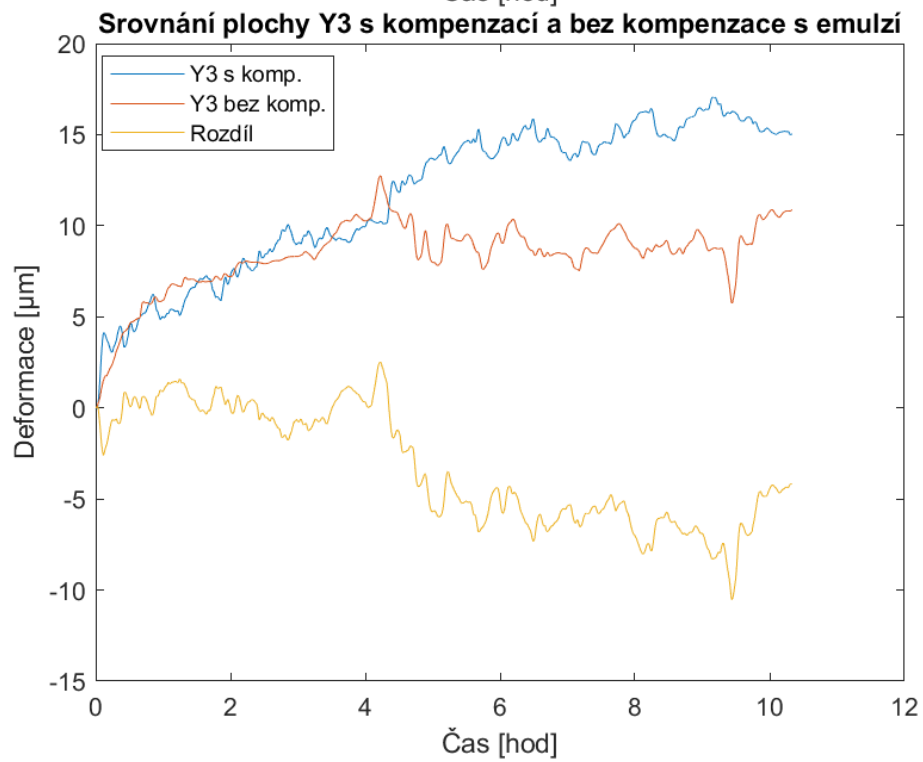
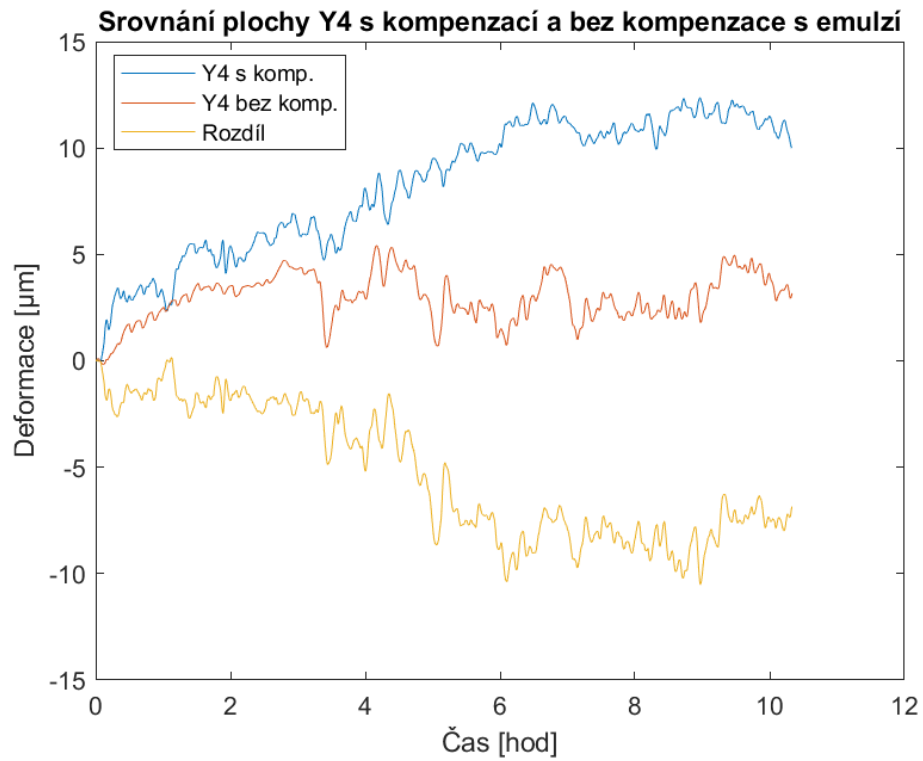


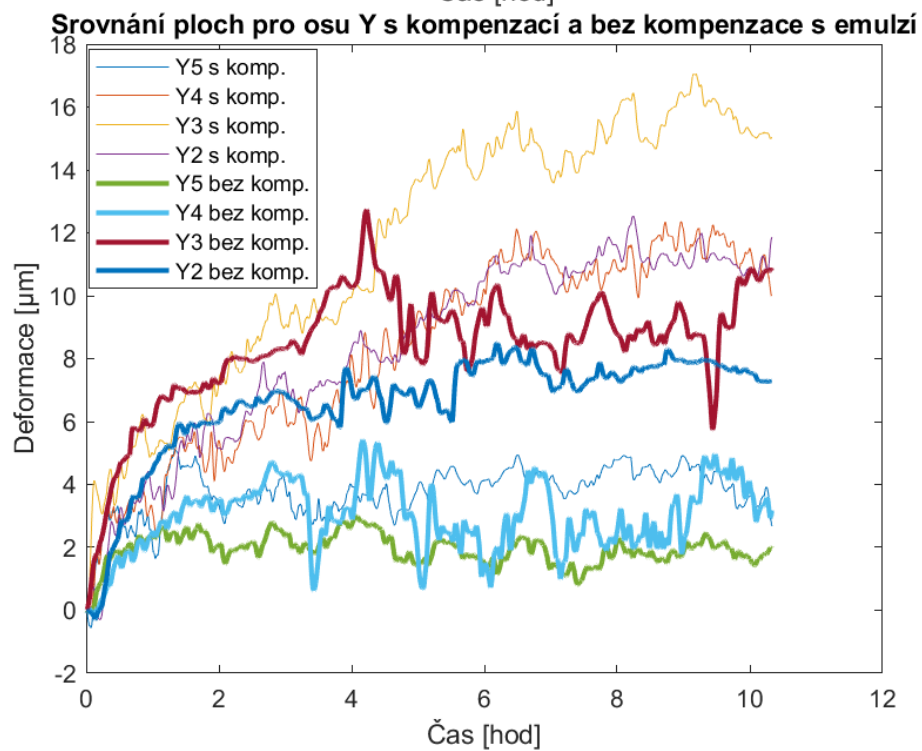
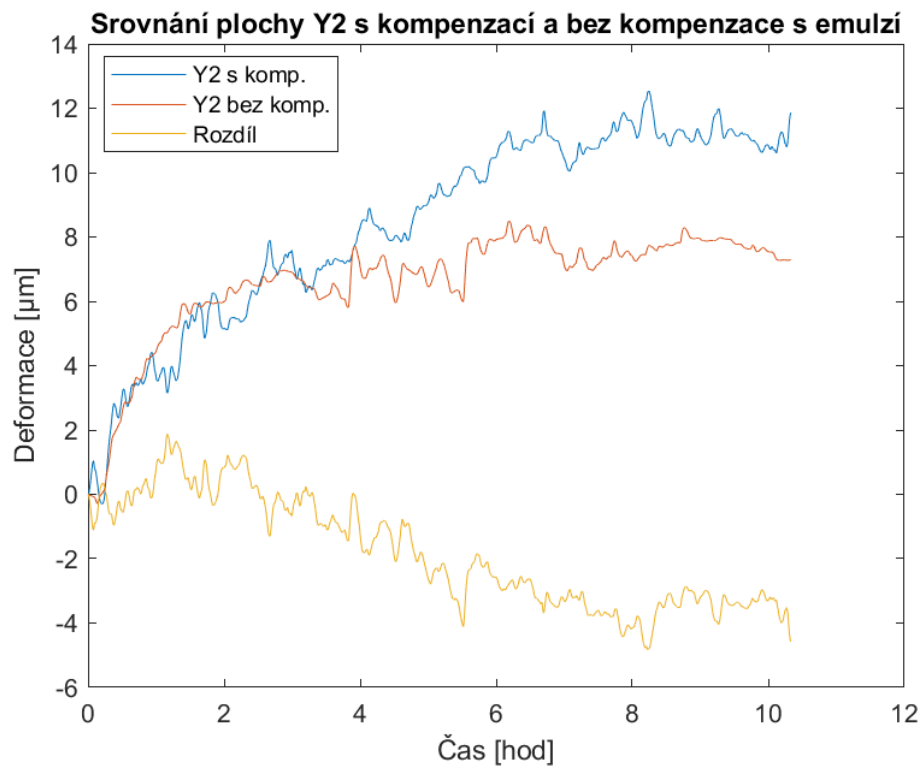
Použití komp. modelu







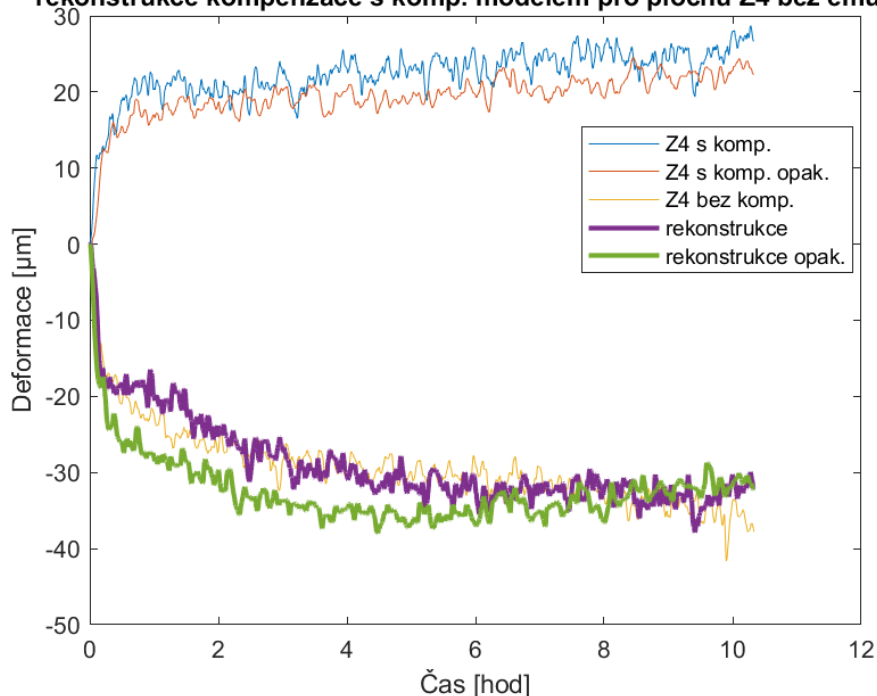




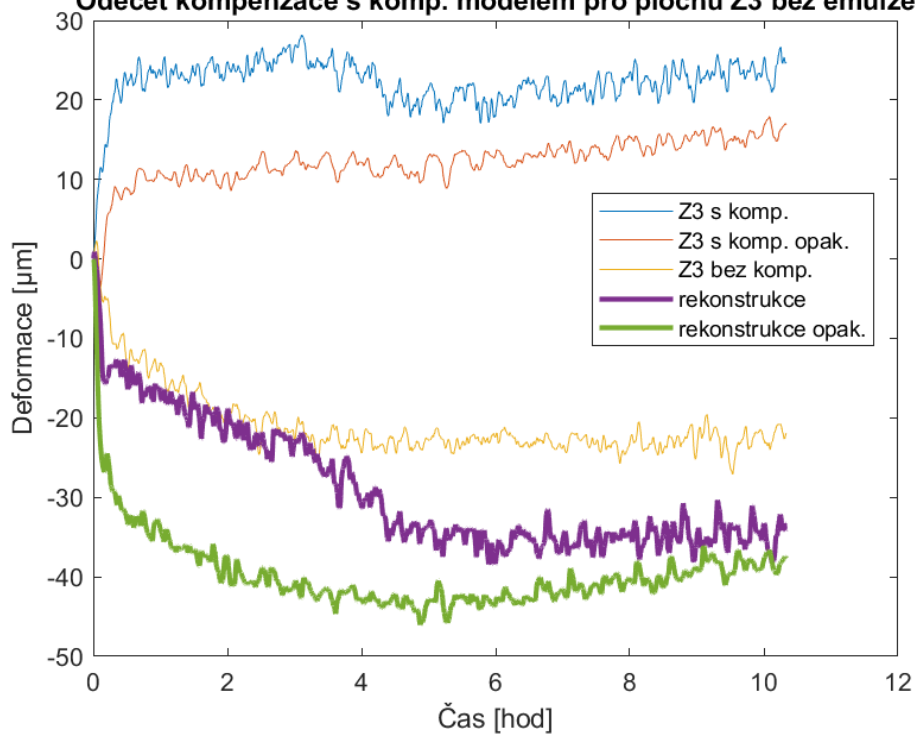


Opakovatelnost měření

rekonstrukce kompenzace s komp. modelem pro plochu Z4 bez emulze

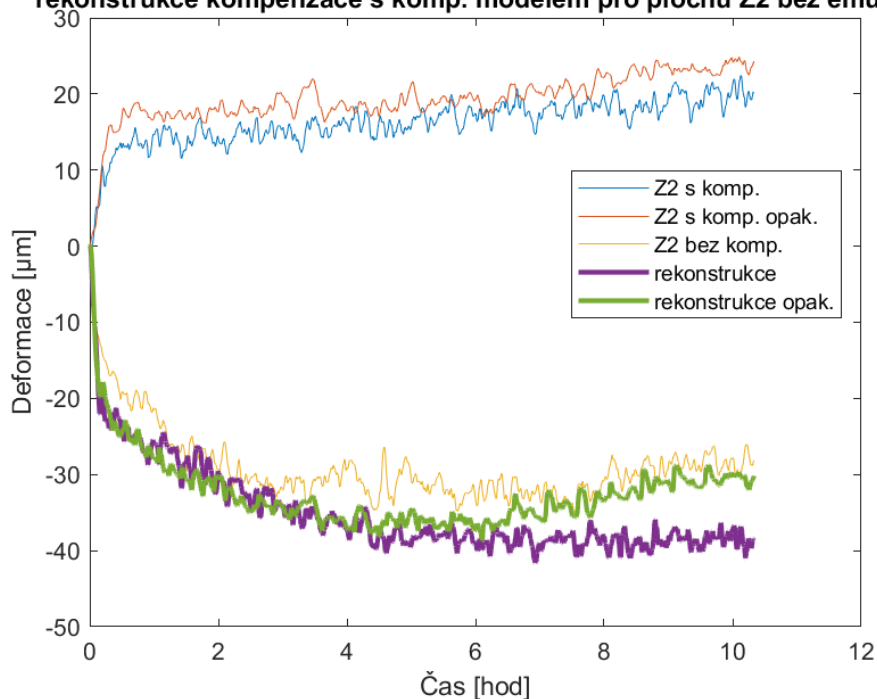


Odečet kompenzace s komp. modelem pro plochu Z3 bez emulze

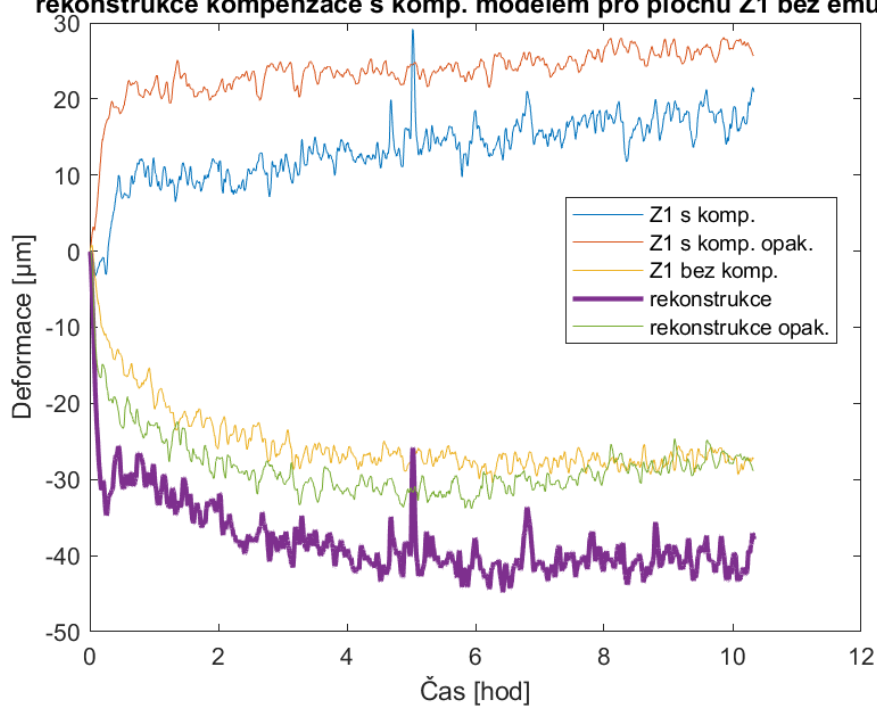


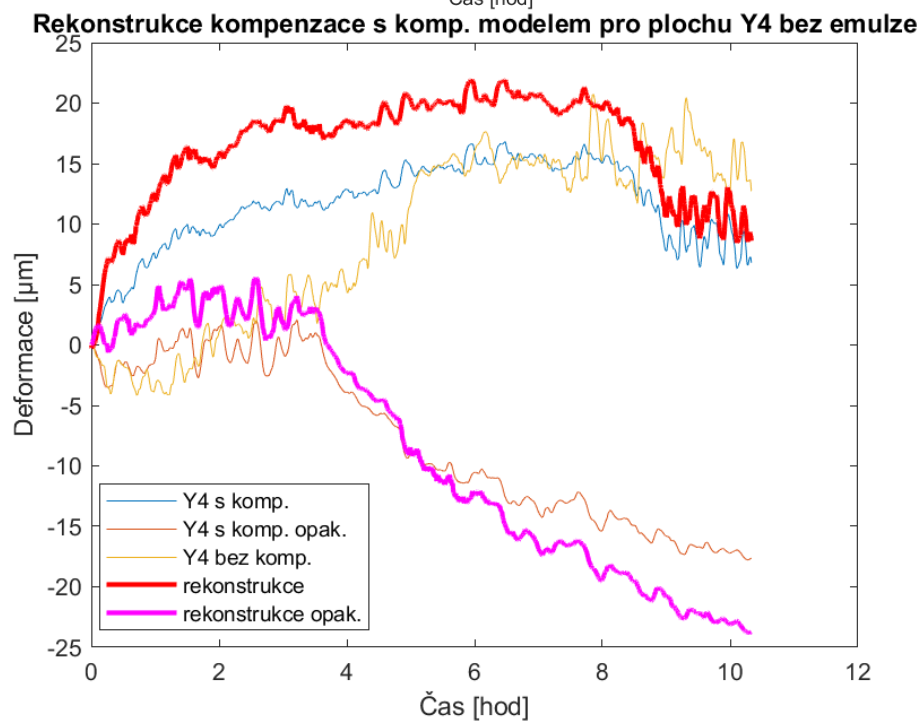
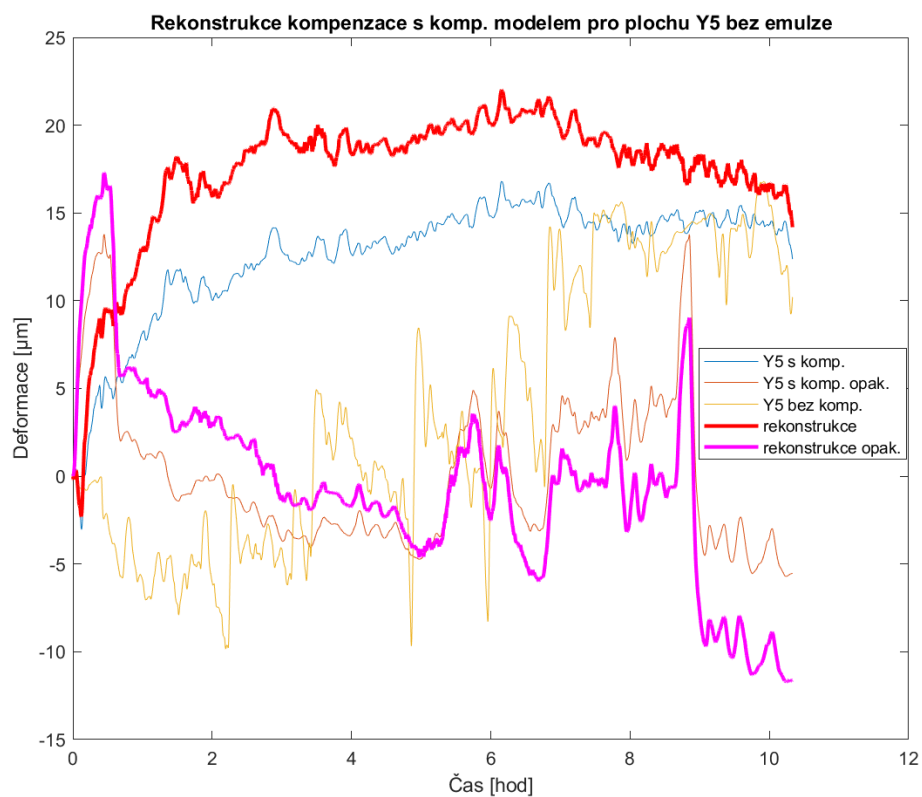


rekonstrukce kompenzace s komp. modelem pro plochu Z2 bez emulze



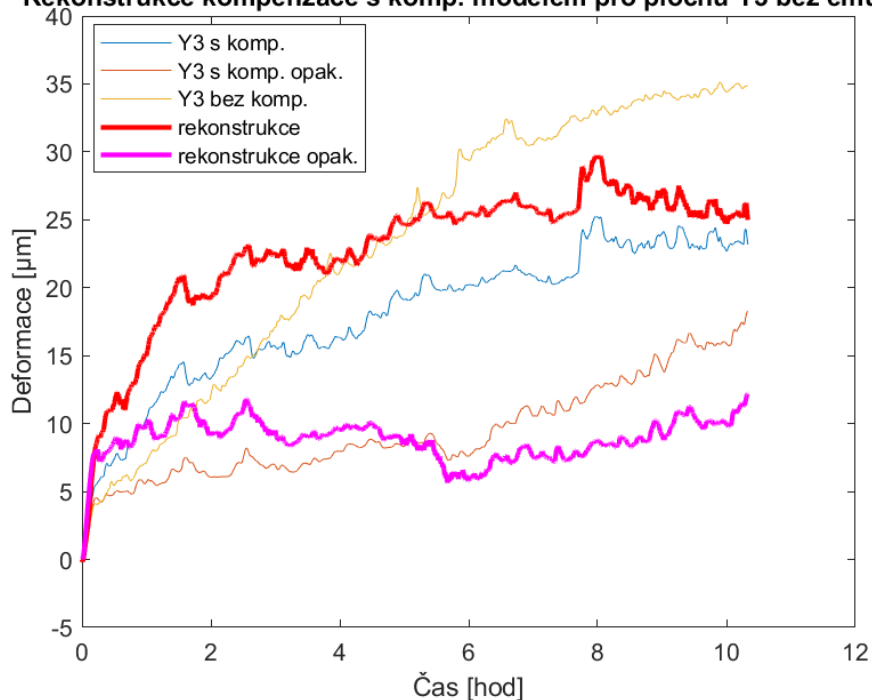
rekonstrukce kompenzace s komp. modelem pro plochu Z1 bez emulze



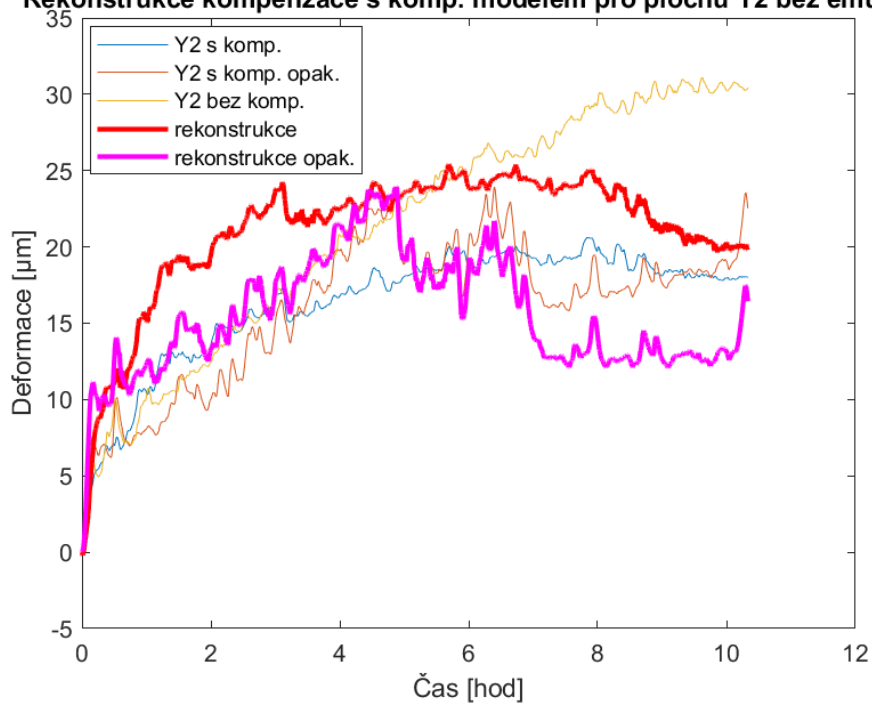




Rekonstrukce kompenzace s komp. modelem pro plochu Y3 bez emulze

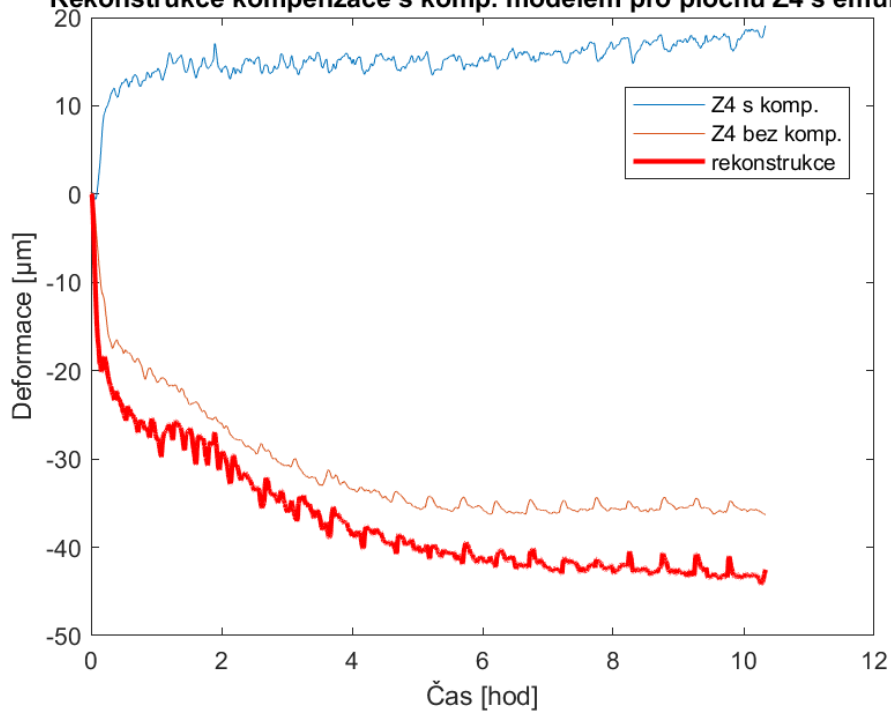


Rekonstrukce kompenzace s komp. modelem pro plochu Y2 bez emulze

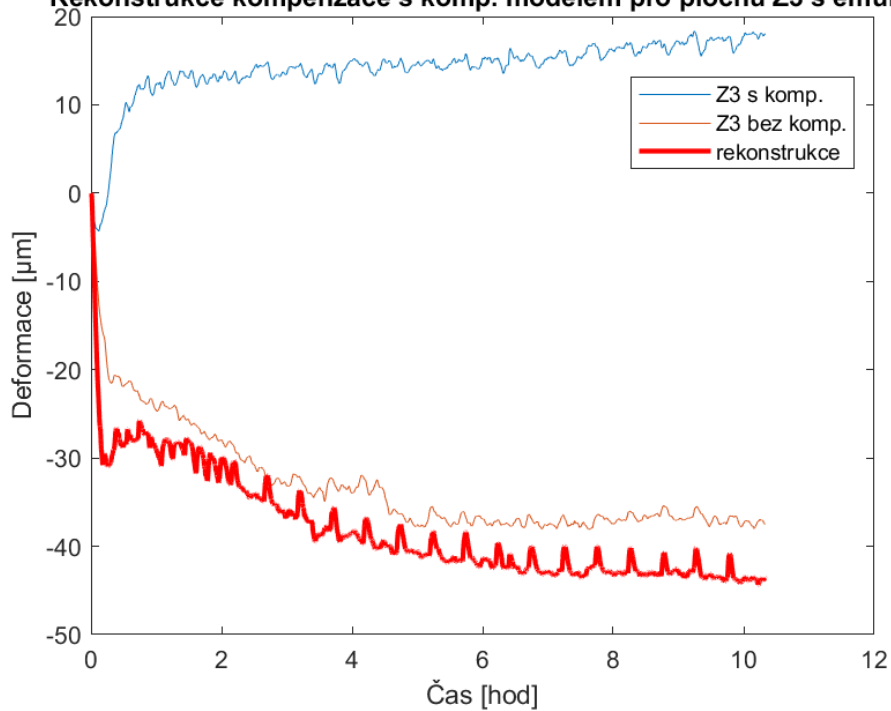




Rekonstrukce kompenzace s komp. modelem pro plochu Z4 s emulzí

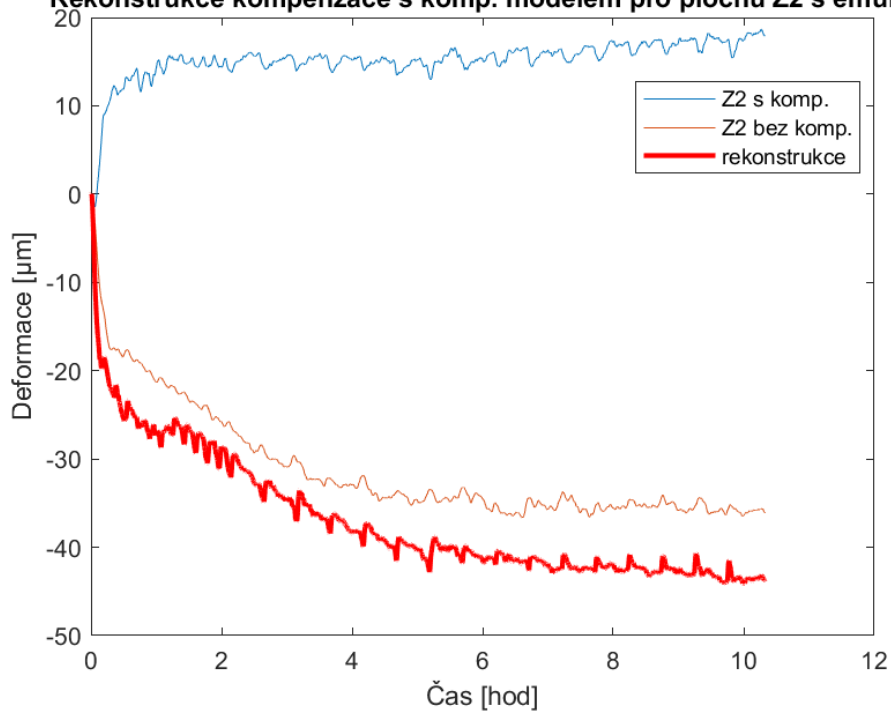


Rekonstrukce kompenzace s komp. modelem pro plochu Z3 s emulzí

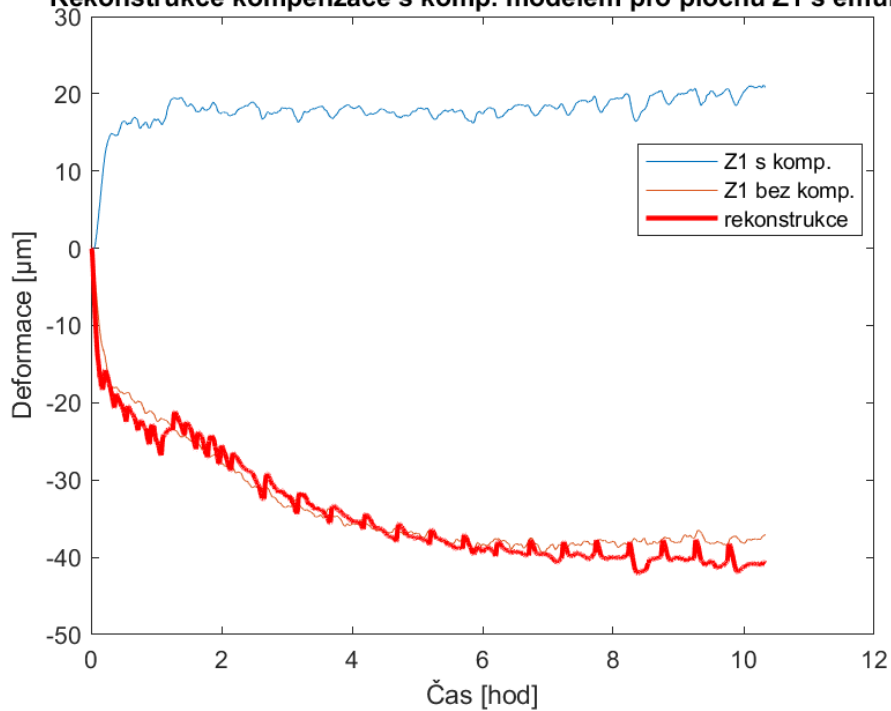




Rekonstrukce kompenzace s komp. modelem pro plochu Z2 s emulzí

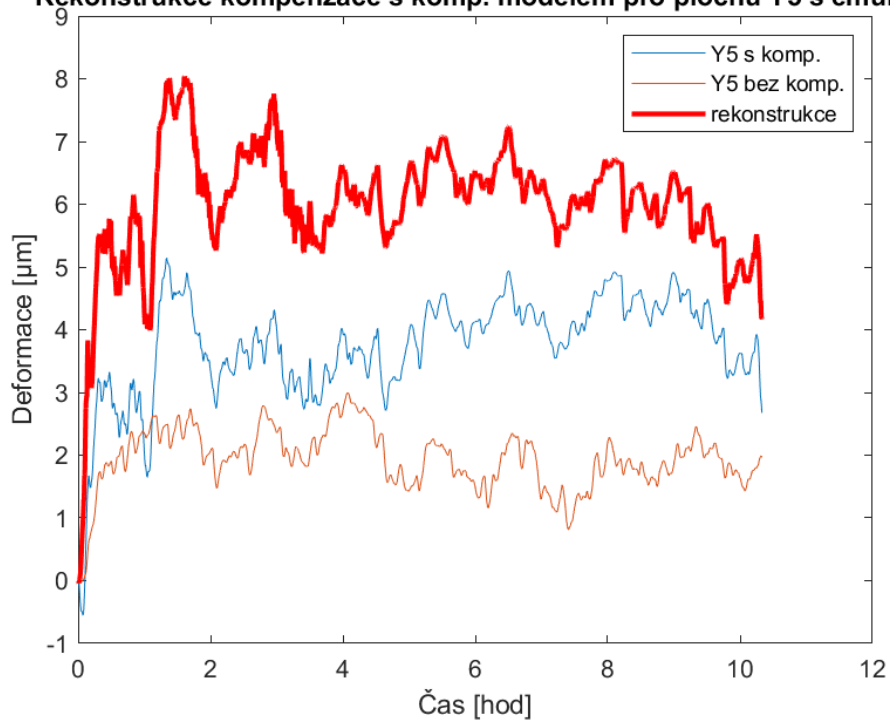


Rekonstrukce kompenzace s komp. modelem pro plochu Z1 s emulzí

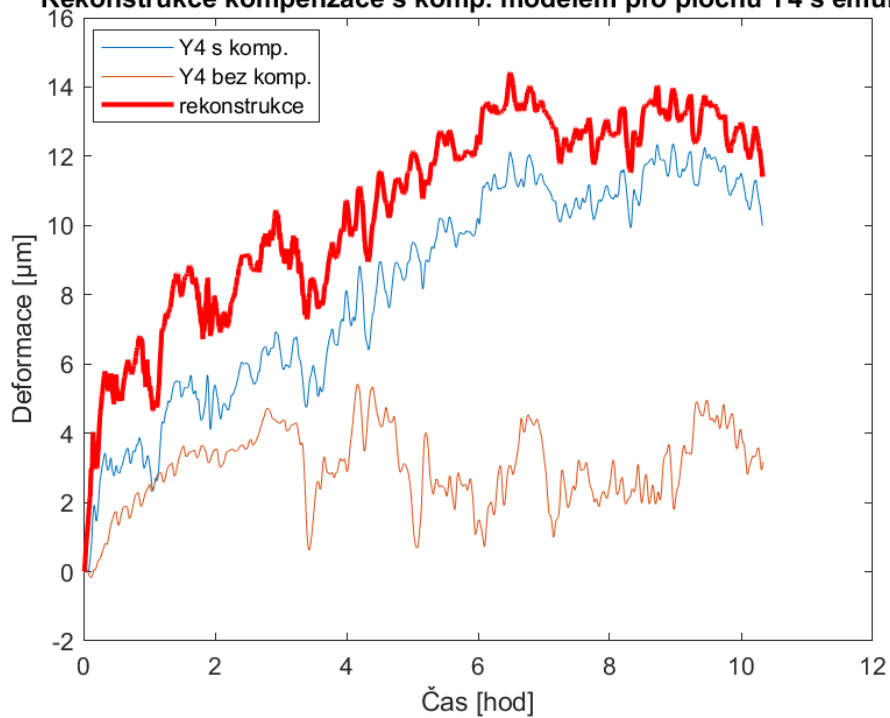




Rekonstrukce kompenzace s komp. modelem pro plochu Y5 s emulzí

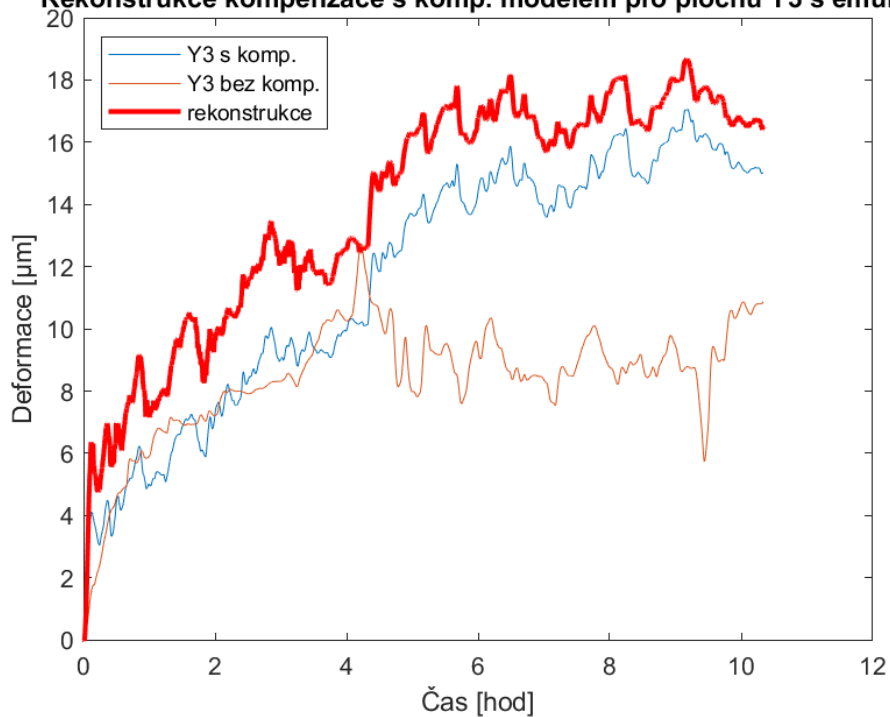


Rekonstrukce kompenzace s komp. modelem pro plochu Y4 s emulzí

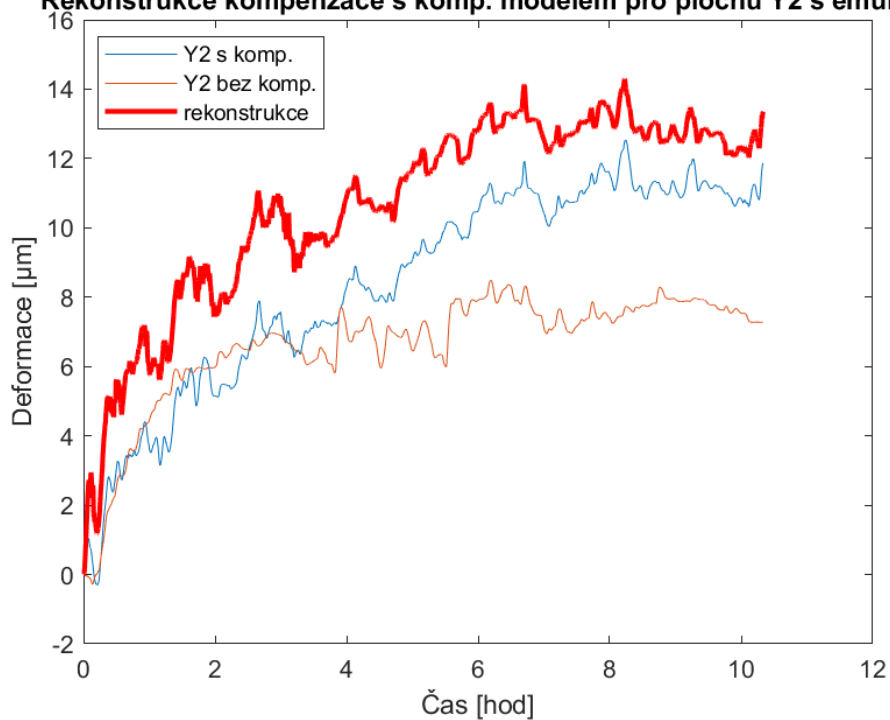




Rekonstrukce kompenzace s komp. modelem pro plochu Y3 s emulzí

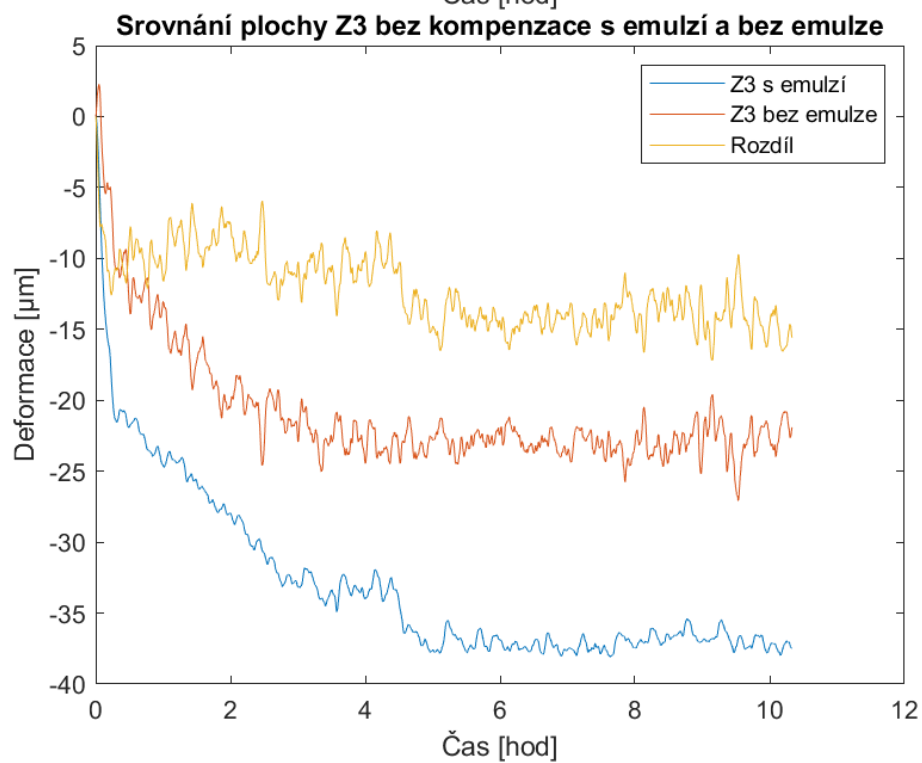
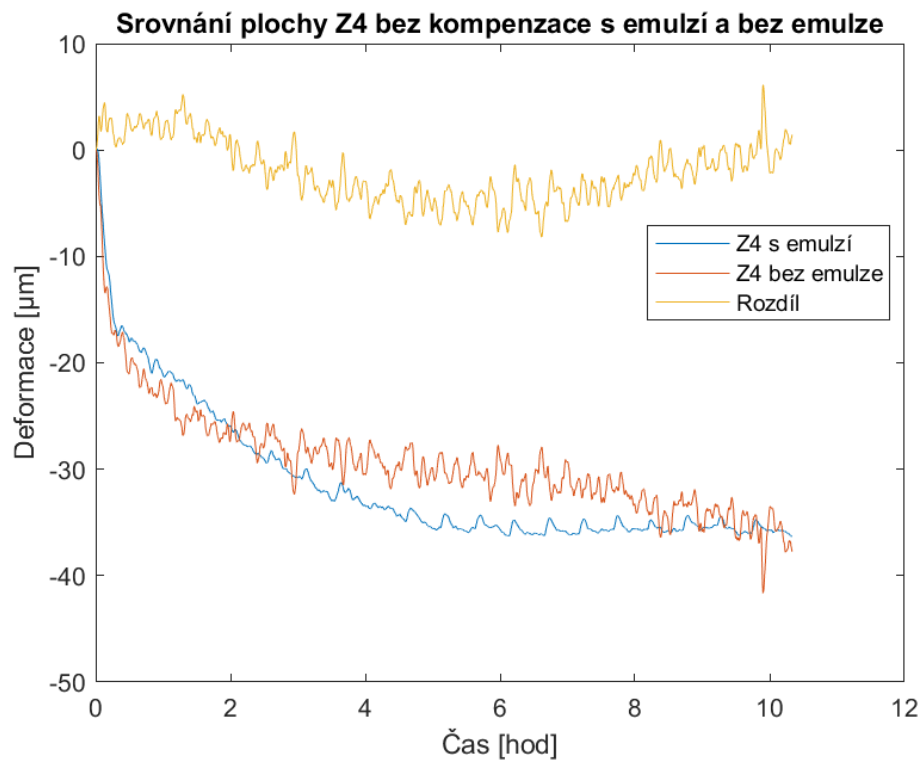


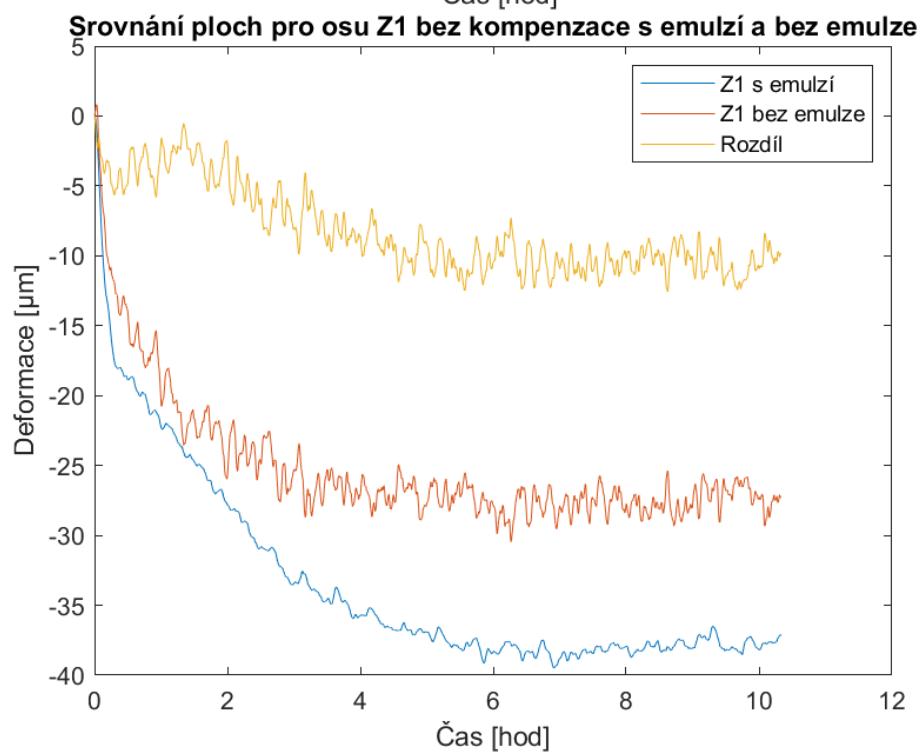
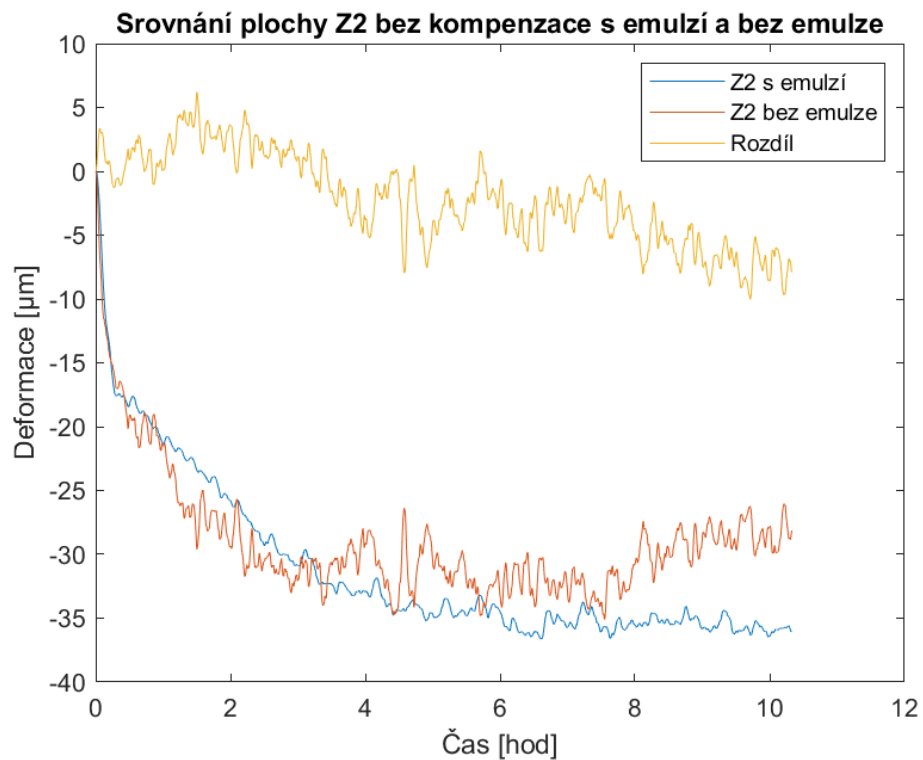
Rekonstrukce kompenzace s komp. modelem pro plochu Y2 s emulzí

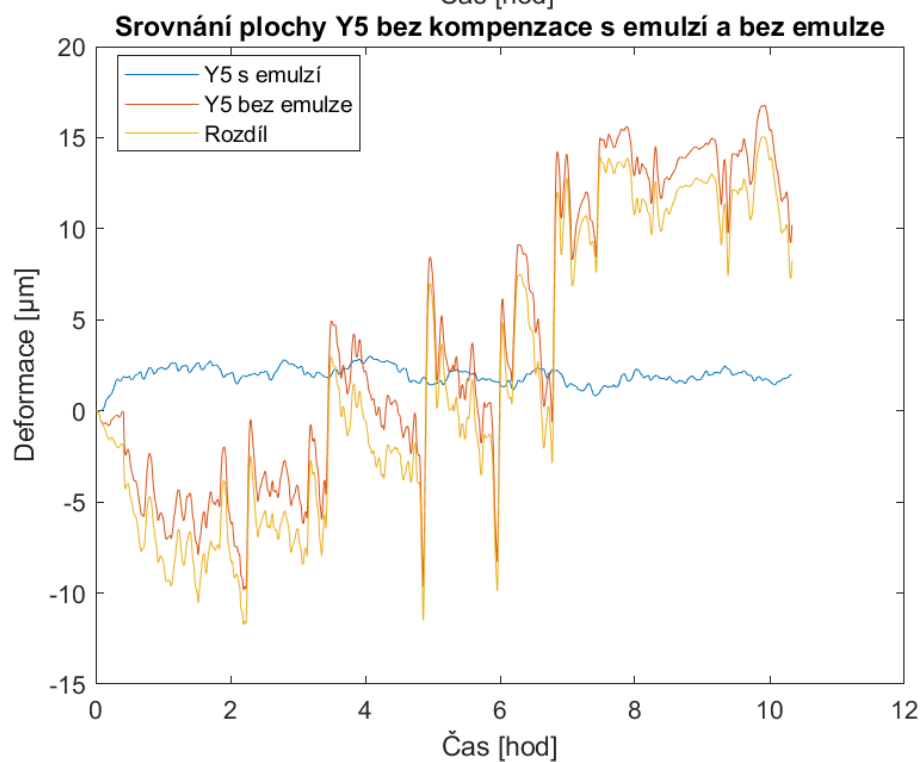
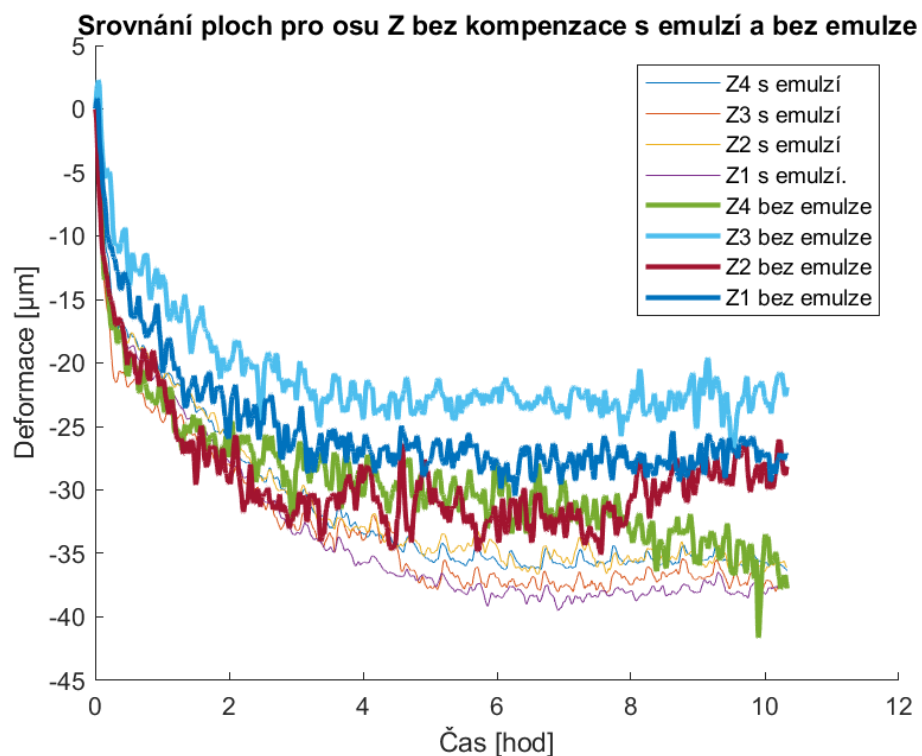


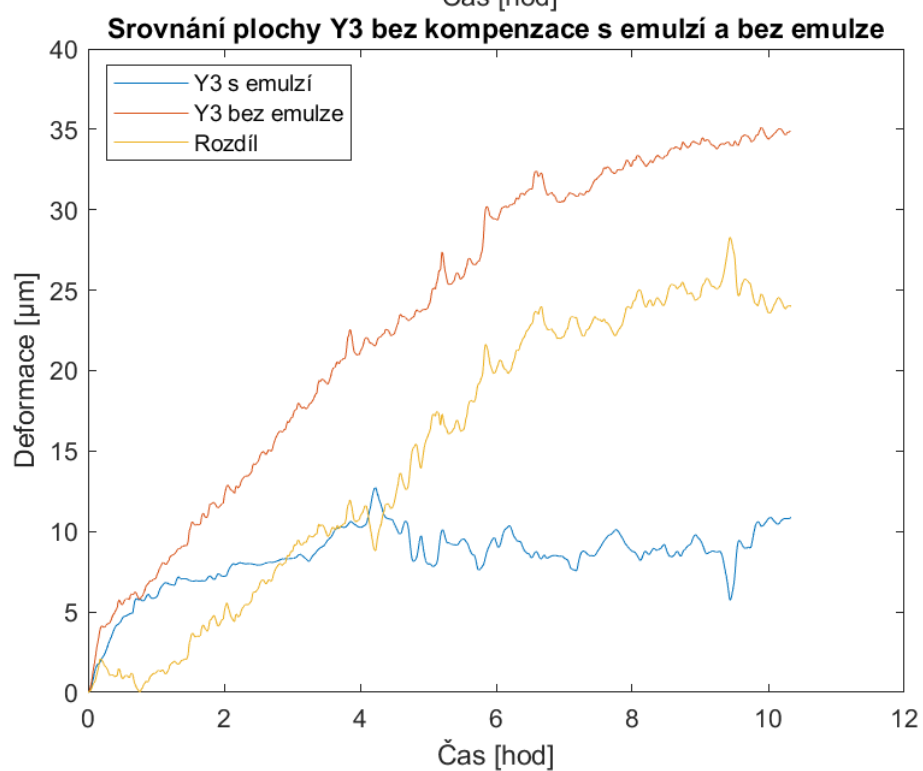
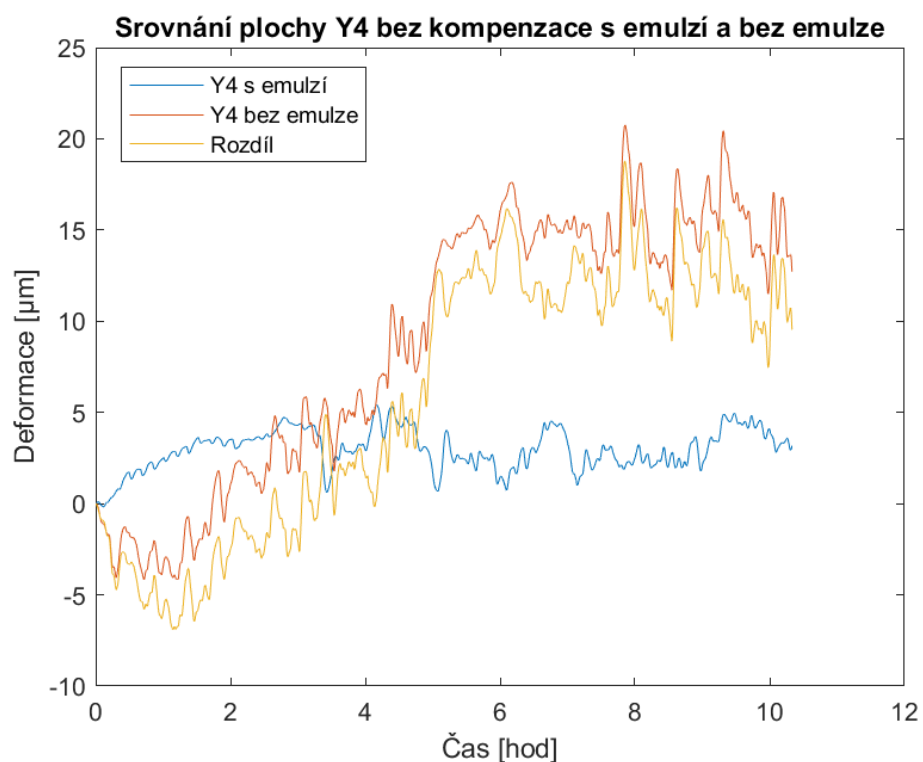


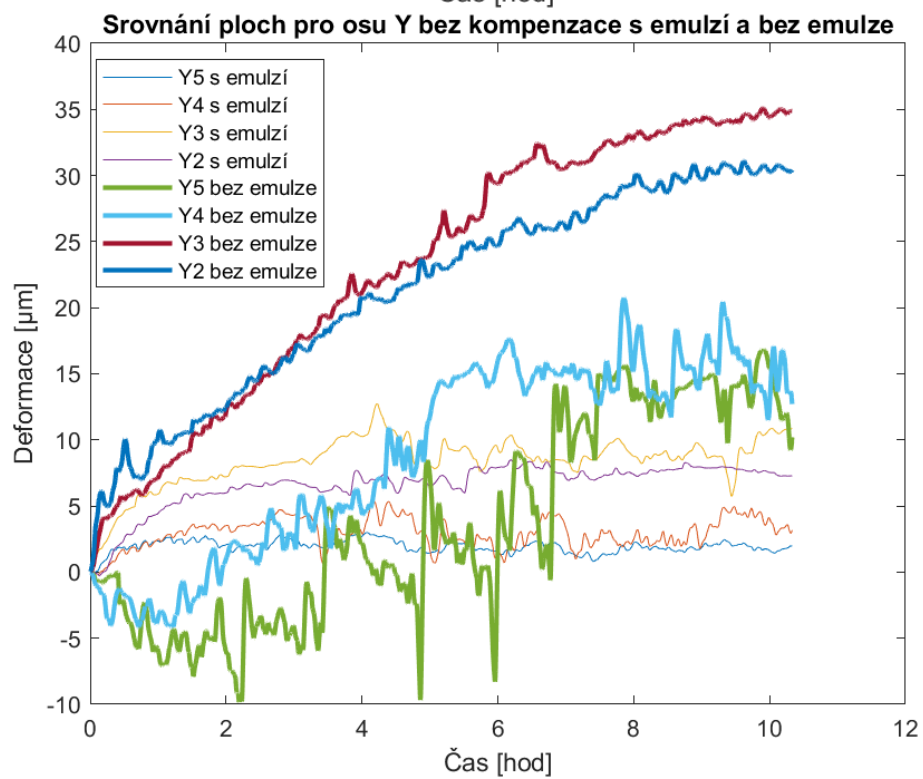
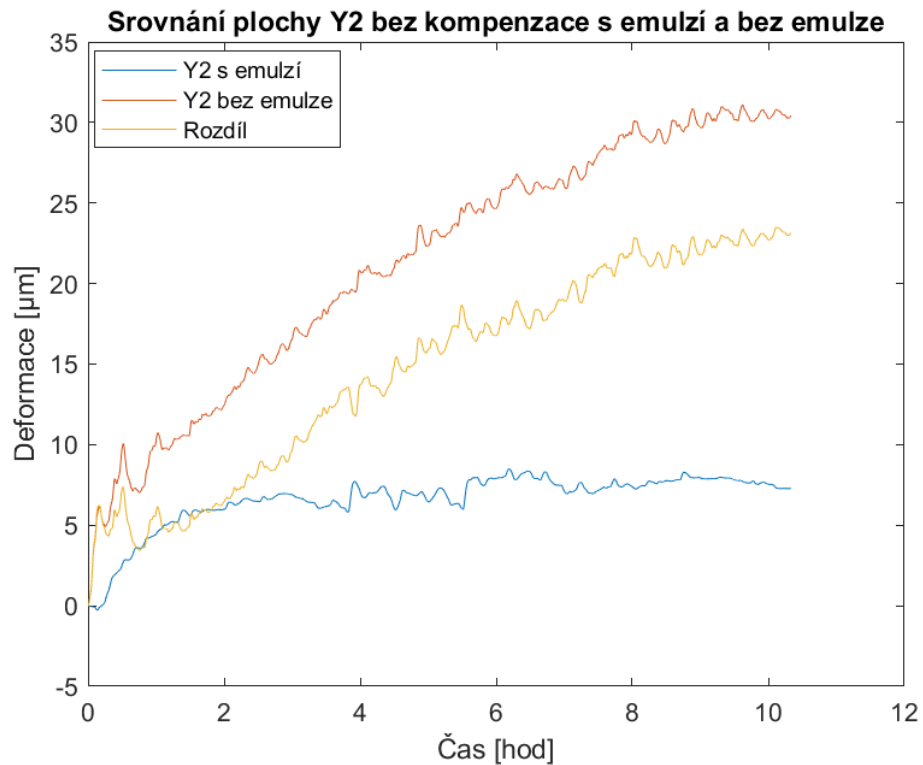
Použití emulze













Příloha 6- Tabulky vyhodnocení opakovatelnosti

Osa Z- bez emulze							
Označení plochy	Z1	Z2	Z3	Z4	Rozptyl	Průměr	
Rozdíl max. [μm]	23	15	17	5	42	15	rekonstrukce
Rozdíl min. [μm]	-2	-2	-2	-10	12	-4	
Rozdíl max. [μm]	9	10	23	10	35	13	rekonstrukce opak.
Rozdíl min. [μm]	-4	-1	0	-9	12	-3	
Osa Y- bez emulze							
Označení plochy	Y2	Y3	Y4	Y5	Rozptyl	Průměr	
Rozdíl max. [μm]	25	30	22	22	10	25	rekonstrukce
Rozdíl min. [μm]	0	0	0	-2	1	-1	
Rozdíl max. [μm]	24	12	6	17	46	15	rekonstrukce opak.
Rozdíl min. [μm]	0	0	-24	-12	97	-9	
Osa Z- s emulzí							
Označení plochy	Z1	Z2	Z3	Z4	Rozptyl	Průměr	
Rozdíl max. [μm]	6	9	15	10	10	10	
Rozdíl min. [μm]	-3	0	0	0	1	-1	
Osa Y- s emulzí							
Označení plochy	Y2	Y3	Y4	Y5	Rozptyl	Průměr	
Rozdíl max. [μm]	0	0	0	0	0	0	
Rozdíl min. [μm]	-7	-12	-13	-6	9	-9	