

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ

Studijní program:

N0715A270011 Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality

Studijní specializace:

Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Vliv teplotních kompenzací na získané hodnoty rozměrů
testovaných vzorků**

Autor: Bc. Štěpán FRANC

Vedoucí práce: Ing. Dana KUBÁTOVÁ, Ph.D.

Akademický rok 2020/2021

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Štěpán FRANC**
Osobní číslo: **S19N0080P**
Studijní program: **N0715A270011 Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality**
Studijní obor: **Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality**
Téma práce: **Vliv teplotních kompenzací na získané hodnoty rozměrů testovaných vzorků**
Zadávající katedra: **Katedra technologie obrábění**

Zásady pro vypracování

1. Úvod do problematiky teplotních kompenzací a tepelné roztažnosti
2. Návrh experimentu
3. Zhodnocení provedených experimentů
4. Závěr

Rozsah diplomové práce: **50 – 70 stran**
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- HOCKEN, Robert J. a Paulo H. PEREIRA, ed. Coordinate Measuring Machine and System. 2. Boca Rotan: CRC Press, 2012. ISBN 978-1-4200-1753-3. – https://books.google.cz/books?id=TGzLBQAAQBAJ&pg=PA268&dq=thermal+compensation+form+CMM&hl=cs&sa=X&ved=2ahUKEwjEi470mP_rAhVQTsAKHRpxBBUQ6AEwAXoECAYQAg#v=onepage&q=thermal%20compensation%20form%20CMM&f=false
- KREIDL, Marcel. Měření teploty: senzory a měřící obvody. Praha: BEN – technická literatura, 2005. Senzory neelektrických veličin. ISBN 8073001454.
- TICHÁ, Šárka. Strojírenská metrologie. Ostrava: VŠB – Technická univerzita, 2006. ISBN 80-248-1209-6.
- PERNIKÁŘ, Jiří a TYKAL, Miroslav. Strojírenská metrologie II. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-3338-8.
- Vhodnost kontrolních procesů: vhodnost měřících systémů, vhodnost procesů měření a kontroly, rozšířená nejistota, posuzování shody. Praha: Česká společnost pro jakost, 2011. Management jakosti v automobilovém průmyslu. ISBN 978-80-02-02307-4.
- Staněk J., Němejč J.: Metodika zpracování a úprava diplomových (bakalářských) prací ZČU, Plzeň: 2005.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Dana Kubátová, Ph.D.**
Katedra technologie obrábění

Konzultant diplomové práce: **Doc. Ing. Martin Melichar, Ph.D.**
Regionální technologický institut

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2020**
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2021**

L.S.

Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan

Doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucí diplomové práce Ing. Daně Kubátové, Ph.D. za ochotnou a vstřícnou spolupráci při vypracování této diplomové práce. Také bych chtěl poděkovat všem členům mého rodinného kolektivu za velkou podporu v době celého mého studia, i mimo něj.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Franc	Jméno Štěpán	
STUDIJNÍ PROGRAM	N0715A270011 Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Kubátová, Ph.D.	Jméno Dana	
PRACOVISŤE	ZČU - FST - KTO		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Vliv teplotních kompenzací na získané hodnoty rozměrů testovaných vzorků		

FAKULTA	strojí	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2021
----------------	--------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	61	TEXTOVÁ ČÁST	42	GRAFICKÁ ČÁST	19
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Diplomová práce obsahuje analýzu vlivu využití funkce teplotních kompenzací na souřadnicovém měřicím stroji Zeiss. Za pomoci teplotního ovlivnění měřených součástí a měření za použití funkce teplotních kompenzací na CMM je analyzována správnost teplotních kompenzací a je určen rozsah a druh měření, pro který mohou být teplotní kompenzace spolehlivě využity.
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	teplotní kompenzace, teplotní délková roztažnost, koeficient délkové teplotní roztažnosti, metrologie, ocel, hliník, plast, CMM

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Franc	Name Štěpán	
STUDY PROGRAMME	N0715A270011 Machining, additive technology and quality assurance		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Kubátová, Ph.D	Name Dana	
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Influence of temperature compensations to the dimension values obtained on the tested samples		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machining technology	SUBMITTED IN	2021
----------------	------------------------	-------------------	----------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	61	TEXT PART	42	GRAPHICAL PART	19
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The thesis contains analysis of influence of thermal compensation function usage on the CMM Zeiss. By measurements of thermally affected parts with the thermal compensation function set is controlled the correct functionality of the thermal compensations and determined the range and type of measurements suitable for future safe usage of the thermal compensation function
KEY WORDS	thermal compensations, thermal expansion, the coefficient of thermal expansion, metrology, steel, aluminium, plastics, CMM

OBSAH

Seznam tabulek.....	10
Seznam obrázků.....	11
Seznam grafů.....	13
Seznam zkratk.....	14
1 Úvod do problematiky teplotních kompenzací a tepelné roztažnosti.....	15
1.1 Obecný úvod	16
1.2 Cíle práce.....	16
1.3 Obecný úvod do metrologie a měření.....	16
1.3.1 Základní informace o metrologii.....	16
1.3.2 Základní pravidla pro správné měření.....	17
1.3.3 Souřadnicové měřicí stroje.....	18
1.4 Úvod do problematiky teplotní roztažnosti.....	21
1.4.1 Co je teplotní roztažnost.....	21
1.4.2 Pozitivní využití teplotní roztažnosti ve strojírenství.....	23
1.5 Materiály využívané ve strojírenství a dopravním průmyslu.....	24
1.6 Úvod do problematiky teplotních kompenzací.....	26
1.6.1 Teplotní kompenzace na CMM zařízeních.....	26
2 Návrh experimentu.....	29
2.1 Teoretický návrh experimentu.....	29
2.2 Průběh experimentu.....	32
3 Zhodnocení provedených experimentů.....	40
3.1 Souhrnné vyhodnocení a ověření správnosti postupu.....	40
3.1.1 Rozdělení získaných hodnot a zavedení chyby stroje do měření.....	40
3.1.2 Rozdělení odchylek dle měřených materiálů.....	42
3.1.3 Manuální ověření výpočtů kompenzace teploty.....	43
3.1.4 Ověření vlivu změny teploty na vyhodnocení měření.....	48
3.1.5 Vyloučení vlivu samotného měření.....	49
3.1.6 Opakované vyhodnocení měření po dodatečném měření dílu č. 2 materiálu 12 050.....	52
3.2 Materiál 12 050.....	53
3.2.1 Celkové vyhodnocení pro materiál 12 050.....	53
3.2.2 Analýza odchylek ve výsledcích pro materiál 12 050.....	54

3.3	Materiál EN AW-6061.....	61
3.3.1	Celkové vyhodnocení pro materiál 6061.....	61
3.3.2	Analýza odchylek ve výsledcích pro materiál 6061.....	62
3.4	Materiál ABS.....	67
3.4.1	Celkové vyhodnocení pro materiál ABS.....	67
3.4.2	Analýza odchylek ve výsledcích pro materiál ABS.....	68
4	Závěr	71
	Seznam použitých zdrojů.....	76
	Seznam příloh.....	77
	Příloha č. 1: Výrobní výkres součásti pro provedení experimentů.....	78
	Příloha č. 2: Kompletní náměrový protokol pro vybrané měření.....	80

Seznam tabulek

Tab. 1-1: Tabulka hodnot délkové teplotní roztažnosti pro vybrané materiály [6]

Seznam obrázků

- Obr. 1-1: NC řízený stroj zn. Mora a jeho stavební prvky [3]
- Obr. 1-2: Měřicí rameno Faro a jeho stavební prvky [3]
- Obr. 1-3: Zakončení dotykového systému ve formě kuličky [3]
- Obr. 1-4: Laserová snímací hlava značky Nikon [3]
- Obr. 1-5: Základní schéma délkové teplotní roztažnosti [5]
- Obr. 1-6: Zjednodušené schéma objemové teplotní roztažnosti [5]
- Obr. 1-7: Příklad materiálového složení automobilu Škoda Octavia [8]
- Obr. 1-8: Příklad materiálového složení letadel Boeing 787, 777 [10]
- Obr. 1-9: Příklad dialogového okna softwaru pro zadání hodnoty teplotní roztažnosti [13]
- Obr. 1-10: Příklad vyhodnocení měření průměru při reálné teplotě 26°C ve srovnání s nominální teplotou [15]
- Obr. 2-1: Schéma CMM Carl Zeiss Prismo 7 Navigator [12]
- Obr. 2-2: Navržený díl v izometrickém zobrazení [vlastní]
- Obr. 2-3: Díly z uhlíkové oceli a hliníkové slitiny [vlastní]
- Obr. 2-4: Díl vytištěný 3D tiskem a jeho významné výrobní defekty [vlastní]
- Obr. 2-5: Výstřížek z měřicího programu – nastavení informací k použití teplotních kompenzací [vlastní]
- Obr. 2-6: Použité teplotní sondy v rámci výbavy měřicího stroje [vlastní]
- Obr. 2-7: Teplota dílu zjištěná externím teploměrem [vlastní]
- Obr. 2-8: Ustavení měřené součásti v souřadnicovém prostoru stroje [vlastní]
- Obr. 2-9: Průběh měření s otočnou hlavou a rubínovým dotykem [vlastní]
- Obr. 2-10: Číselné označení konkrétního vzorku [vlastní]
- Obr. 2-11: Část protokolu s naměřenými hodnotami [vlastní]
- Obr. 2-12: Část souhrnné tabulky platné pro jeden konkrétní měřený díl [vlastní]
- Obr. 3-1: Část souhrnné tabulky pro příkladný manuální výpočet teplotní roztažnosti [vlastní]

- Obr. 3-2: Srovnání naměřených a empiricky vypočtených hodnot roztažnosti pro materiál 12 050 [vlastní]
- Obr. 3-3: Srovnání naměřených a empiricky vypočtených hodnot roztažnosti pro materiál 6061 [vlastní]
- Obr. 3-4: Srovnání naměřených a empiricky vypočtených hodnot roztažnosti pro materiál ABS [vlastní]
- Obr. 3-5: Srovnání naměřených a empiricky vypočtených hodnot roztažnosti pro materiál 12 050 s teplotní odchylkou 1 °C [vlastní]
- Obr. 3-6: Srovnání naměřených a empiricky vypočtených hodnot roztažnosti pro materiál 6061 s teplotní odchylkou 1 °C [vlastní]
- Obr. 3-7: Srovnání naměřených a empiricky vypočtených hodnot roztažnosti pro materiál ABS s teplotní odchylkou 1 °C [vlastní]
- Obr. 3-8: Použitý rubínový dotek Ø 3mm [vlastní]
- Obr. 3-9: Část databáze naměřených výsledků pro materiál ABS [vlastní]
- Obr. 3-10: Zvýrazněná část výše uvedeného grafu 3-2 [vlastní]
- Obr. 3-11: Část databáze naměřených výsledků pro díl č. 2 materiálu 12 050 [vlastní]
- Obr. 3-12: Geometrické prvky s největšími chybami při měření průměru [vlastní]
- Obr. 3-13: Plochy na součásti měřené na rovinnost a tvar plochy [vlastní]
- Obr. 3-14: Část databáze naměřených výsledků materiálu 6061 – odchylky pro kompenzace měření průměrů na kuželovitém výstupku [vlastní]
- Obr. 3-15: Válcové výstupky (označené černou barvou), jejichž měření (kompenzaci) vykazovala výrazné odchylky od očekávaných hodnot [vlastní]
- Obr. 3-16: Část databáze naměřených výsledků materiálu 6061 – odchylky pro kompenzace měření tvarů plochy [vlastní]
- Obr. 4-1: Celkové vyhodnocení s ohledem na jednotlivé geometrické prvky [vlastní]

Seznam grafů

Graf 3-1: Celkové rozložení chyb teplotních kompenzací

Graf 3-2: Celkové rozložení chyb teplotních kompenzací v závislosti na materiálech

Graf 3-3: Celkové rozložení chyb teplotních kompenzací – přepočteno po nadstavbovém měření

Graf 3-4: Celkové rozložení chyb teplotních kompenzací – materiál 12 050

Graf 3-5: Celkové rozložení chyb teplotních kompenzací – rozdíl mezi součástmi č. 1 a č. 2

Graf 3-6: Přesnost teplotních kompenzací v závislosti na vstupní teplotě – mat. 12 050

Graf 3-7: Přesnost teplotních kompenzací v závislosti na měřeném prvku – mat. 12 050

Graf 3-8: Naměřené hodnoty k další analýze – mat. 12 050

Graf 3-9: Celkové rozložení chyb teplotních kompenzací – materiál 6061

Graf 3-10: Celkové rozložení chyb teplotních kompenzací – rozdíl mezi součástmi č. 1 a č. 2

Graf 3-11: Přesnost teplotních kompenzací v závislosti na vstupní teplotě – mat. 6061

Graf 3-12: Přesnost teplotních kompenzací v závislosti na měřeném prvku – mat. 6061

Graf 3-13: Naměřené hodnoty k další analýze – mat. 6061

Graf 3-14: Celkové rozložení chyb teplotních kompenzací – materiál ABS

Graf 3-15: Celkové rozložení chyb teplotních kompenzací – rozdíl mezi součástmi č. 1 a č. 2

Graf 3-16: Přesnost teplotních kompenzací v závislosti na vstupní teplotě – mat. ABS

Graf 3-17: Přesnost teplotních kompenzací v závislosti na měřeném prvku – mat. ABS

Graf 3-18: Naměřené hodnoty k další analýze – mat. ABS

Seznam zkratk

NC – Numerical control

CMM – Coordinate measuring machine

BMW – Bayerische Motoren Werke

TEI – Thermal error index

RTI – Regionální technologický institut

ABS - Akrylonitrilbutadienstyren

ZČU – Západočeská univerzita v Plzni

CAD – Computed Aided Design

3D – trojrozměrný (three-dimensional)

CIV - Centrum informatizace a výpočetní techniky

1 Úvod do problematiky teplotních kompenzací a tepelné roztažnosti

1.1 Obecný úvod

V průmyslové výrobě je pro udržení spokojenosti zákazníka nezbytné vyrábět kvalitní výrobky, které odpovídají zadané specifikaci daného produktu. Tento požadavek je velmi důležitý také interně uvnitř výrobní společnosti a je proto nezbytné, aby výrobní procesy byly nastaveny správně s ohledem na zamezení přílišné zmetkovitosti výroby a případným vícenákladům.

V zájmu správně fungujícího výrobního podniku by pro dodržení nastavené kvality mělo být povinností pravidelné ověřování výroby měřením všech výrobků, které jsou v portfoliu dané výrobní společnosti a na jejichž kvalitě závisí spokojenost zákazníka. Procesem měření lze s odpovídající a požadovanou přesností určit, zdali jsou všechny výrobní kroky nastaveny správně a opakovatelně tak, že celkově je daný výrobní podnik nastaveným výrobním procesem schopen vyrábět kvalitní výrobky a zaručit tak spokojenost zákazníka.

Proces měření může být prováděn několika způsoby. V první řadě závisí na charakteru výrobku samotného z hlediska rozměrového a geometrického. Pokud nejsou u daného výrobku kladeny vysoké nároky na jeho rozměrovou, či jinak definovanou geometrickou přesnost, poté je také nezbytné, aby metoda měření byla tomuto faktu uzpůsobena – ve většině případů například není potřeba měřit rozměry tolerované v desetinách milimetrů měřidlem, které dokáže vzhledem ke své povaze měřit opakovatelně o dva, či tři řády přesněji. Měření by se takto nevhodně zvoleným měřidlem znevýhodnilo jak časově, tak i technicky a ekonomicky.

Současně s charakterem výrobku závisí proces měření také na typu výroby z hlediska množství. Při výrobě sériové je nutné mít výrobní proces nastaven natolik opakovatelně, aby se mohlo zamezit zejména z časového hlediska nutnosti kontrolovat každý vyrobený kus. Standardně se v sériové výrobě proto kontroluje jen určité procento z celkově vyrobených kusů, jako potvrzení, že do výrobního procesu nevstoupila nečekaně chyba ovlivňující kvalitu dosavadní výroby (jeden kus z dávky, periodická kontrola po určitém časovém období apod.).

Při výrobě kusové, kdy je daný výrobek sám o sobě unikátem, či vyráběn ve velmi malých množstvích, je s vyšší pravděpodobností nutné provádět měření důležitých charakteristik výrobku se zvýšenou pozorností. Tato nutnost je závislá na tom, že kusová výroba je prováděna ve velké většině na univerzálních strojích, které nemusí v určitých případech (přirovnáme-li situaci k výrobě na automatických strojích dle předem nastaveného NC programu) být nastaveny a odladěny dané výrobní procesy jako v případě výroby středně, či velkosériové. Proto je třeba klíčové rozměrové, či geometrické charakteristiky vhodně po výrobě prověřit odpovídající kontrolní metodou. Vhodnou a v dnešní době často využívanou metodou je měření pomocí souřadnicových měřicích strojů (z angl. jazyka používaná zkratka CMM – coordinate measuring machines).

Do standardních měřicích procesů ovšem vstupuje řada nezvaných proměnných, které mohou výsledky měření výrazně zkreslovat a znehodnocovat. Jedním z hlavních negativních faktorů ovlivňujícím měření je např. nesprávná teplota okolí či měřeného výrobku a s ní související teplotní roztažnost materiálu, ze kterého je měřený výrobek zhotoven.

1.2 Cíle práce

Hlavním cílem této práce je blíže prozkoumat vliv teplotní roztažnosti na měřené materiály, která je při měření na speciálních CMM korigována tzv. teplotními kompenzacemi, jejichž cílem je usnadnit měření v neideálních podmínkách definovaných základními metrologickými pravidly.

Vzhledem k tomu, že i při takovýchto měření metrologická laboratoř plně zodpovídá za správnost provedených měření, je cílem této diplomové práce ověřit a analyzovat správnost měření právě za použití teplotních kompenzací, případně stanovit na základě provedených pokusů danou přesnost takto prováděných měření.

Tato práce je zaměřena na výsledky měření a kompenzací na CMM Carl Zeiss Prismo 7 Navigator, který je součástí Laboratoři dílenské metrologie Západočeské univerzity v Plzni.

Po vyhodnocení provedených pokusů by měla být metrologická laboratoř schopna stanovit, v jakých specifických případech je schopna se zaručit za provedená měření s využitím teplotních kompenzací na tomto CMM, a to z hlediska:

- materiálového,
- tvarového (geometrického),
- rozměrového,
- teplotního.

1.3 Obecný úvod do metrologie a měření

1.3.1 Základní informace o metrologii

Metrologie je vědní a technická disciplína, která se zabývá měřením velmi různorodého spektra veličin. Nejznámějšími subjekty, které jsou měřeny, jsou různé délkové rozměry (základní jednotka metr [m]), hmotnostní charakteristiky (základní jednotka kilogram [kg]), ale také například čas (základní jednotka sekunda [s]), či jiné fyzikální veličiny jako teplota, napětí apod. [1]

Základní rozdělení metrologie v České republice je ustanoveno Zákonem o metrologii (505/1990 Sb. – ve znění pozdějších novel), který jej dělí do čtyř základních skupin:

- fundamentální metrologie,
- vědecká metrologie,
- legální metrologie,
- průmyslová metrologie [1].

Fundamentální metrologie je obecně řečeno základ metrologického systému. Její hlavní činnost je spíše vědecká, než praktická. Do fundamentální metrologie se zahrnuje výzkum soustav měřicích jednotek, ustavování etalonů a zkoumání metod vhodných pro měření. S fundamentální metrologií souvisí také metrologie vědecká, která je vedena jako samostatná kategorie metrologie. [1]

S prací a výsledky legální metrologie se lidé v běžné společnosti setkávají denně, jelikož jedním z hlavních úkolů legální metrologie je spravovat všechna veřejná měřidla, která ovlivňují výslednou cenu měřeného produktu (např. správa stojanů čerpacích stanic, či vah na zboží v obchodech s potravinami). Legální metrologie takováto měřidla kontroluje a stanovuje na ně zákonné požadavky. [1]

Nejdůležitější kategorií metrologie, kterou se tato práce bude zabývat, je metrologie průmyslová. Ta se zabývá správností a jednotností měření ve výrobě jakékoliv výrobní společnosti. Zajišťuje také kalibraci etalonů a pracovních měřidel. Toto odvětví metrologie je pro všechny výrobní průmyslové podniky klíčovým, jelikož bez správné funkce průmyslové metrologie by nemohly podniky ověřovat kvalitu svých výrobků pomocí prováděných měření. [1]

V této diplomové práci bude dále výhradně řeč o průmyslové metrologii ve strojírenských průmyslových podnicích.

1.3.2 Základní pravidla pro správné měření

Každé měření je zatíženou určitou chybou. Do celkové chyby měření vstupuje více faktorů, jako například:

- *chyba měřidla* – vycházející z konstrukce daného měřidla, například posuvné měřítko a s ním související chyba 1. řádu, která vzhledem ke konstrukci měřidla a nemožnosti eliminovat vliv přítlačné síly vzniká při každém měření,
- *chyba vzniklá provedením měření* – závisí na měřicí metodě,
- *chyba ovlivněná podmínkami měření* – závisí na tom, v jakých podmínkách je měření prováděno a zdali mohou být dodrženy všechny definované podmínky pro zamezení vysoké nepřesnosti měření (např. pracovní x laboratorní podmínky). [1,3]

Pro snížení dané chyby měření na co nejnižší hodnotu je třeba dodržovat daná pravidla měření, která ke zvýšení přesnosti napomáhají. K takovýmto základním pravidlům pro uskutečnění správného a přesného měření patří například:

- měření musí probíhat měřidlem s vyšší přesností, než je požadovaná přesnost výsledku,
- měřený díl i měřidlo musí být čisté a bez viditelných vad, které by mohly přesnost měření ovlivnit,
- měření musí být prováděno odpovídajícím měřidlem (kalibrované x orientační měřidlo),
- měřená součást i měřidlo musí mít stejnou teplotu 20 °C s gradientem ± 1 °C za hodinu (tato teplota definována pro nejvyšší přesnost měření). [1,3]

Před každým měřením je nutné rozhodnout, o jaký typ měření se v dané situaci bude jednat. V případě, že měření bude mít pouze orientační charakter (i u měření orientačního je třeba si definovat jeho přesnost), tak dodržování výše uvedených pravidel bude záviset na očekávané přesnosti výsledku.

Pro správné průmyslové měření je ovšem nezbytné výše uvedená pravidla dodržovat, zejména potom když se ověřováním výroby měřením výrobků zaručuje výrobní společnost

zákazníkovi za správnost vyrobeného dílu. V takovémto případě je nejideálnějším místem pro měření speciální měřicí laboratoř, která je k provedení přesného měření uzpůsobena (závisí na druhu a požadované přesnosti výrobků). V měřicí laboratoři je standardem udržování konstantní teploty $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ a zvýšené péče o měřidla, což ve výrobní hale během měření orientačního není vždy standardem. [1,3]

Měřicí laboratoře v závislosti na výrobním portfoliu daného podniku disponují měřidly klasickými (posuvná měřidla, koncové měrky apod.), tak třeba i měřidly speciálně uzpůsobenými pro dané výrobní portfolio (speciální délkoměry, mikroskopická měřidla, měřidla pro měření ozubení a další). Ve velké řadě případů nejhodnotnějšími měřidly v portfoliu měřících laboratoří jsou souřadnicové měřicí stroje (CMM), které jsou univerzálními a často velmi přesnými měřidly.

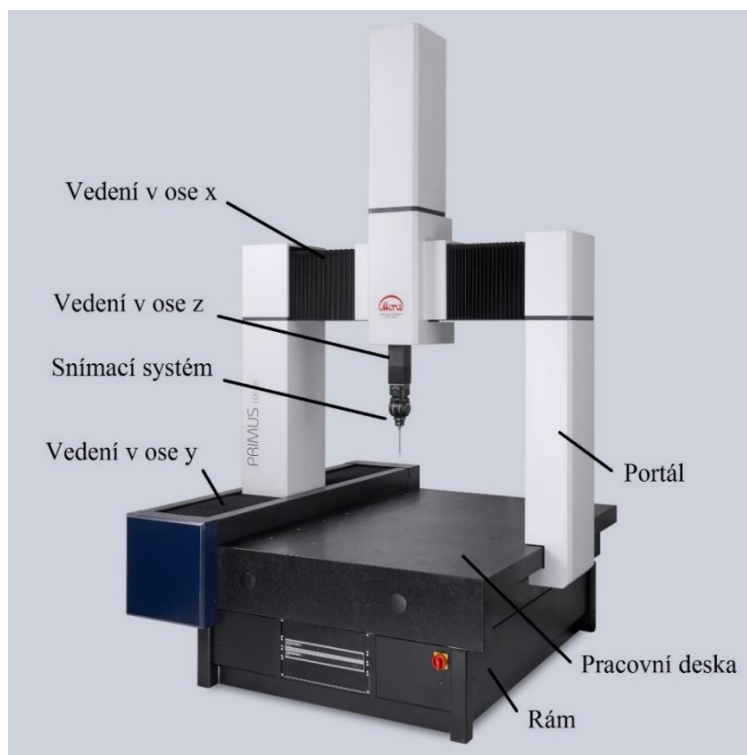
1.3.3 Souřadnicové měřicí stroje

Souřadnicové měřicí stroje jsou univerzálními měřidly, které lze použít na měření široké škály měřených charakteristik, jako jsou např.:

- délkové rozměry,
- průměry,
- přímosti,
- rovinnosti ploch,
- kruhovitosti a válcovitosti,
- úhly a kolmosti,
- kruhová či celková házení a další. [3]

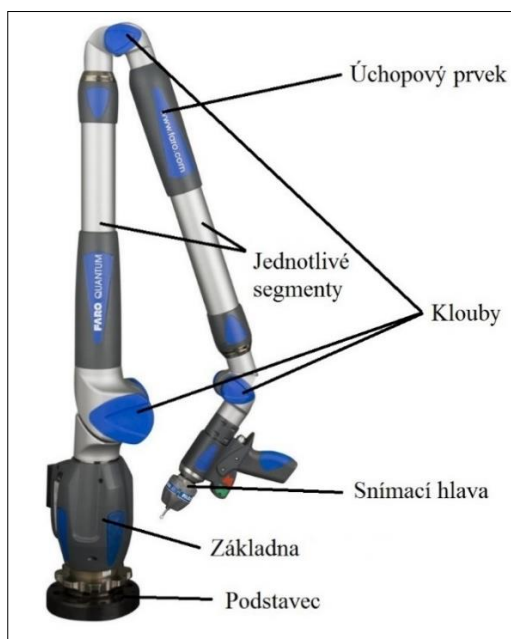
Jejich princip spočívá v přenesení fyzicky naměřených bodů pomocí dotykové, či bezdotykové sondy do softwaru měřicího stroje a následně jejich vyhodnocení / analýza v daném softwaru. Z hlediska ovládání souřadnicových měřících strojů existují dvě základní varianty, a to:

- *CMM řízené NC programem* – velmi přesné stroje (v závislosti na konstrukci konkrétního CMM přesnost až v řádech μm), které fungují na základě naprogramovaných drah (obdoba NC výrobních strojů) – během měření pomocí takovýchto strojů je eliminována chyba zapříčiněná lidským faktorem, jelikož stroj funguje samostatně dle naprogramovaných NC cyklů. U takovýchto strojů je velkou výhodou možnost opakovaného použití daného měřicího programu pro opětovné měření stejných dílů vyráběných ve větších sériích. Časová úspora měření je ve většině případů značná, nevýhodou je pouze vyšší časová náročnost pro vytvoření konkrétního NC programu.



Obr. 1-1: NC řízený stroj zn. Mora a jeho stavební prvky [3]

- *ručně ovládané souřadnicové měřicí stroje (např. měřicí ramena)* – přesnost takovýchto strojů je řádově nižší, než u programem řízených strojů (standardně přesnost v setinách mm) – teoretická chyba použití člověkem není v tomto případě eliminována – tyto stroje jsou ovšem výrazně levnější variantou CMM a i přes svojí nižší přesnost v sobě stále skrývají výhodu ve vysoké univerzálnosti měření, která je hojně využívána při specifických měřicích aplikacích.



Obr. 1-2: Měřicí rameno Faro a jeho stavební prvky [3]

Dále se u CMM rozlišují dvě hlavní kategorie z pohledu typu snímače měřených bodů na součásti a v závislosti na tom se měření dělí na:

- *dotyková měření* – jsou přesnější – používají zakončení ve formě kuličky, která je nejčastěji vyrobena ze syntetického rubínu, hlavně kvůli jeho vysoce otěruvzdorným vlastnostem,



Obr. 1-3: Zakončení dotykového systému ve formě kuličky [3]

- *bezdotyková měření* – využívají snímače ve formě laserového skeneru – takovéto měření nedosahuje stejně vysokých přesností, jako měření dotykové a používá se běžně pro jiné portfolio výrobků – velkou výhodou je relativně rychlé získání informace např. o tvaru komplexních nerovinných ploch specifických výrobků (často využíváno v automobilovém průmyslu)



Obr. 1-4: Laserová snímací hlava značky Nikon [3]

Výhodou CMM v průmyslovém měření je také možnost předat zákazníkovi unikátní měřicí protokol z daného měření provedeným pomocí CMM jako důkaz o správnosti rozměrových charakteristik na daném výrobku.

1.4 Úvod do problematiky teplotní roztažnosti

1.4.1 Co je teplotní roztažnost

Z hlediska fyzikálního je teplotní (popř. tepelná) roztažnost chování materiálu, při kterém se vlivem změny teploty mění objem a rozměry pevného tělesa. Obecně lze říci, že teplotní roztažnost je funkcí teploty. Tlak a ostatní veličiny se považují v tomto případě za konstantní. [4]

V závislosti na charakteru změny rozměrů vlivem teploty je možné tento jev názvoslovně rozdělit na:

- *délkovou roztažnost* - pokud má dané těleso jeden rozměr výrazně větší, než ostatní rozměry – u těch se změna rozměrů vlivem změny teploty zanedbává,
- *objemovou roztažnost* - tento pojem je hojně využíván při hodnocení roztažnosti kapalných, či plyných látek.

Dále bude již zmínka pouze o teplotní délkové roztažnosti pevných látek, která je hlavním tématem této diplomové práce. [4]

Rozdíl mezi délkovou a objemovou roztažností lze definovat i mezi pevnými látkami v závislosti na jejich fyzikálním složení. U těles z izotropního materiálu (vlastnosti materiálu jsou ve všech směrech stejné) se následky změny rozměrů kvůli změně teploty projevují rovnoměrně stejně ve všech směrech. Na rozdíl od toho anizotropní tělesa, jejichž vlastnosti nejsou ve všech směrech stejné, mají definici délkové roztažnosti složitější. U takovýchto těles je změna délky v různých směrech různá (polymerní látky s lineárními řetězci, dřevo apod.), a je proto třeba při podrobnějším výzkumu definovat, ve kterém směru se závislost změny délky na teplotě zkoumá. [7]

Změnu objemu pevné látky při změně termodynamické teploty T způsobuje změna amplitudy kmitů jednotlivých atomů krystalické mřížky daného materiálu. Při změně kmitů se mění poloha atomů vzhledem k jejich rovnovážnému stavu, což zapříčiňuje změnu objemu. Vzhledem k odlišné struktuře jednotlivých materiálů jsou i hodnoty koeficientu teplotní délkové roztažnosti α odlišné. [4]

Závislost délkové změny materiálu se vyjadřuje pomocí součinitele délkové teplotní roztažnosti α . Tento koeficient se vyjadřuje jednotkách $[K^{-1}]$. Číselná hodnota tohoto součinitele odpovídá číselné hodnotě prodloužení tyče. Pro tuto závislost obecně platí vztah (1):

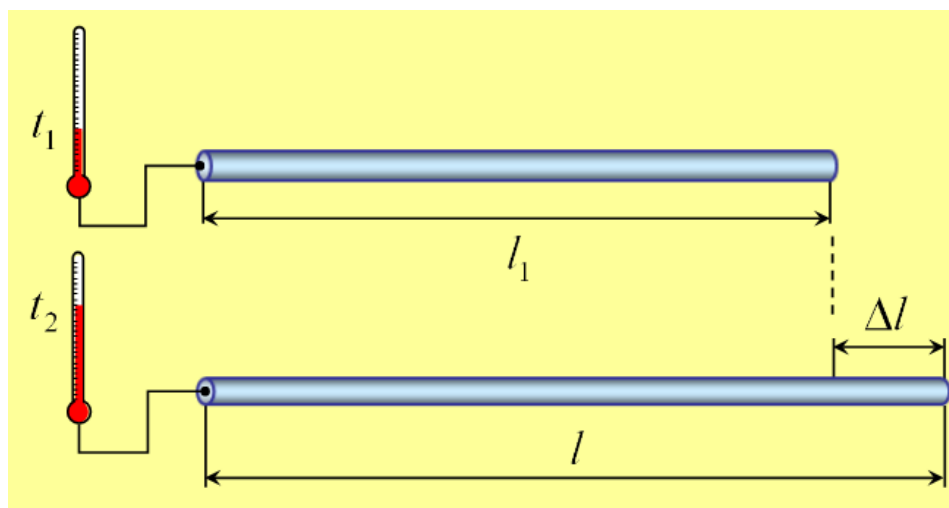
$$\Delta l = \alpha \cdot l_1 \cdot \Delta t \quad (1)$$

kde:

Δl – změna délky tyče [mm], $\Delta l = l - l_1$,

α – koeficient délkové teplotní roztažnosti $[K^{-1}]$,

Δt – změna teploty [mm], $\Delta t = t_2 - t_1$. [5]



Obr. 1-5: Základní schéma délkové teplotní roztažnosti [5]

Při zavedení pojmu objemová teplotní roztažnost poté platí:

$$V = V_1 \cdot (1 + \beta \cdot \Delta t) \quad (2)$$

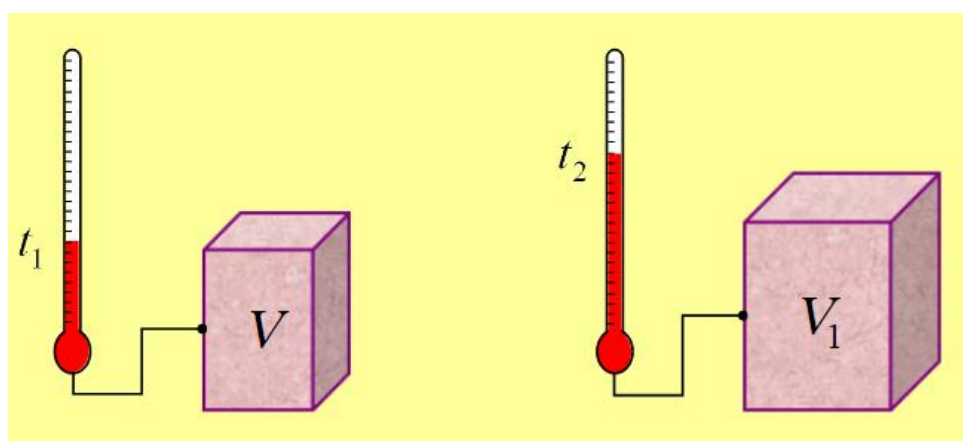
kde:

V – původní objem pevné látky [m^3],

V_1 – výsledný objem pevné látky v závislosti na změně teploty [m^3],

β – koeficient objemové teplotní roztažnosti [K^{-1}], $\beta = 3\alpha$,

Δt – změna teploty [mm], $\Delta t = t_2 - t_1$. [5]



Obr. 1-6: Zjednodušené schéma objemové teplotní roztažnosti [5]

Ve strojírenské praxi se pro jednotlivé typy konstrukčních materiálů uvádí spíše koeficient teplotní roztažnosti α . Jeho započítání by mělo vstoupit již do samotné konstrukce dílu, aby bylo zamezeno budoucímu negativnímu dopadu chování součásti ve specifickém teplotním prostředí. Pro naprostou většinu známých materiálů používaných pro strojírenské díly platí úměra, že se zvyšující se teplotou se délka / objem materiálu také zvětšuje.

To znamená, že čím vyšší je hodnota koeficientu α , tím vyšší je změna délky / objemu při rostoucí teplotě. [5]

Pro znázornění, jak roztažnost funguje v praxi, lze uvést krátký teoretický příklad:

- ocelová tyč délky 100 mm s koeficientem $\alpha = 11 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ zvýší svoji teplotu o 1 °C → tím se zvýší celková délka této tyče o 0,0011 mm na celkových **100,0011 mm**,
- stejná logika platí také opačně, tj. v případě, že se teplota dílu o 1 °C sníží, celková délka tyče se o 0,0011 mm sníží na celkových **99,9989 mm**.

Materiál	α [$10^{-6} K^{-1}$]
Bronz	18
Cín	27
Hliník	22,3
Chrom	8
Křemík	2
Měď	17
Mosaz	18
Nikl	13
Ocel	11,5
Olovo	29
Polyetylen	200
PVC	80-10
ABS	73,8
Sklo	85
Stříbro	19
Titan	9
Uhlík (amorfní)	8
Uhlík (diamant)	13
Wolfram	4
Zlato	14
Železo	12

Tab. 1-1: Tabulka hodnot délkové teplotní roztažnosti pro vybrané materiály [6]

1.4.2 Pozitivní využití teplotní roztažnosti ve strojírenství

Vlastností materiálů, které podléhají teplotní roztažnosti, se s výhodou využívá při některých strojírenských, nebo spíše montážních operacích. Nejčastější použití je při montážních operacích, kde je konstrukčně předepsáno lícování dvou dílů s přesahem. V takovém případě se jeden, nebo oba díly, před montáží teplotně ovlivní tak, aby jejich montáž byla vůbec možná, či výrazně usnadněná (např. montáž ložisek, nábojů, ozubených kol apod.)

Obecně řečeno je ale teplotní roztažnost materiálů pro strojírenskou výrobu spíše negativně ovlivňujícím faktorem, a to zejména pro velmi přesné součásti tolerované v tisícinách milimetrů a přesněji. U takových součástí stačí i velmi malé ovlivnění teplotou k vygenerování nepřesnosti.

1.5 Materiály využívané ve strojírenství a dopravním průmyslu

Jak je již ve výše uvedené tabulce 1-1 naznačeno, teplota ovlivňuje různé skupiny materiálů odlišně v závislosti na jejich fyzikální a chemické povaze. Vzhledem k velké škále existujících materiálů, které se využívají pro strojírenské a dopravní konstrukce, je třeba tento rozptyl v rámci této diplomové práce ohraničit na určitou skupinu materiálů využívajících se hojně např. v automobilovém, či leteckém průmyslu. Obě tato zaměření společně s rozvíjejícím se technologickým pokrokem vytvářejí tlak také na kvalitu a přidanou hodnotu použitých materiálů.

Z globálního hlediska jsou nejobvyklejšími hlavními faktory pro výběr a použití jednotlivých materiálů v automobilovém a leteckém průmyslu:

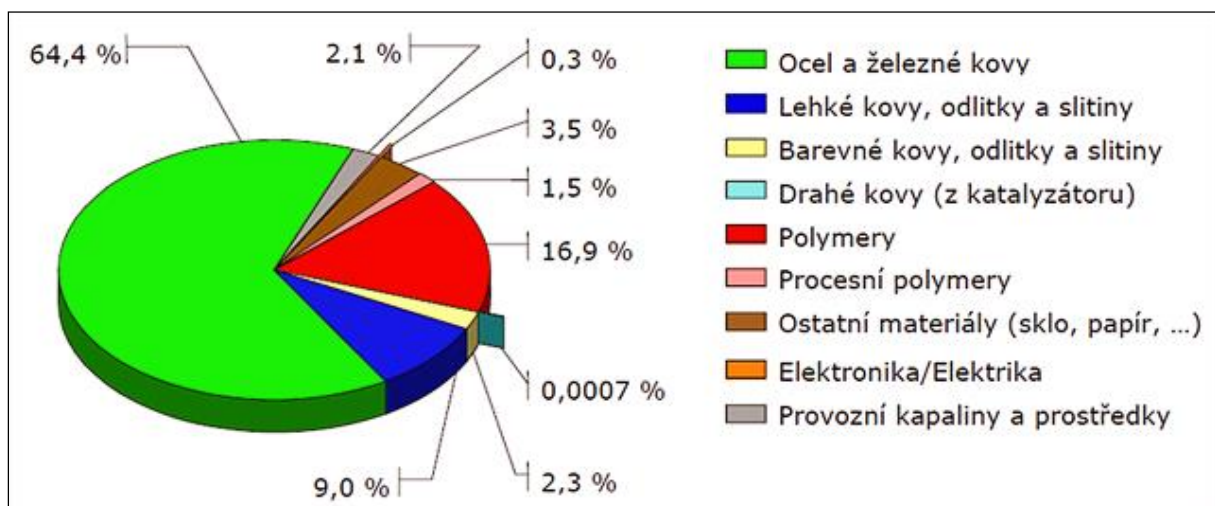
- pevnostní charakteristiky materiálů,
- trvanlivostní charakteristiky materiálů,
- hmotnost materiálů,
- cena.

Pevnostní charakteristiky je třeba volit zejména pro zachování bezpečnosti konstrukce pro účely, ke kterému byla konstrukce vytvořena a dimenzována. V součinnosti s tím lze uvést také trvanlivost, která by měla zaručovat dlouhodobě se neměnicí pevnostní charakteristiky v závislosti na specifickém fyzikálním, či chemickém namáhání konkrétního materiálu.

Hmotnost materiálů je v rámci konstrukce v automobilovém a leteckém průmyslu v současnosti velmi důležitým faktorem, jež z globálního hlediska dokáže ve velké míře ovlivnit spotřebu použitých paliv, případně namáhání dalších konstrukčních prvků při dlouhodobém zatěžování souvisejícím se standardním provozem.

V neposlední řadě do volby použitých materiálů vstupuje v dnešní době jejich cena. Tento faktor je jedním z klíčových v rámci automobilového průmyslu, kde se již na počátku projektu kalkuluje se sériovou výrobou o objemu stovek tisíc, či dokonce objemu výroby v řádech milionů kusů na daný projekt (např. automobilka BMW s aktuální strategií délky projektu 5-10 let s výrobou v taktu více než 1000 automobilů / den).

V rámci výše uvedených charakteristik je vždy třeba pro dané konstrukční aplikace najít rozumný kompromis tak, aby všechny parametry byly splněny v co nejvíce odpovídající míře úměrné k použití v reálném provozu. Primárním kritériem by vždy měla pro každou takovou konstrukci být její bezpečnost neohrožující zdraví člověka jako uživatele, či jeho okolí. Jak již ovšem bylo zmíněno výše, aktuálně do tohoto řetězce velmi významně vstupuje faktor finanční, který se dostává na stejnou, či možná někdy i vyšší úroveň důležitosti.



Obr. 1-7: Příklad materiálového složení automobilu Škoda Octavia [8]

a) Automobilový průmysl

Rozložení použití jednotlivých materiálových skupin v automobilovém průmyslu lze uvést na příkladu Škody Octavie (automobil střední třídy) z grafu na obrázku 1-7. Z tohoto grafu je jasně zřetelné, že pro hlavní nosné a konstrukční části automobilu slouží stále ocelové slitiny a další slitiny na bázi železa – tato materiálová skupina tvoří bezmála dvě třetiny z celkového množství použitých materiálů. [8, 9]

Jako další důležitou složkou, mimo jiné kvůli výhodným hmotnostním a pevnostním parametrům, vstupuje do konstrukce automobilů hliník a jeho slitiny, který u automobilů vyšších tříd částečně nahrazuje, nebo vhodněji doplňuje standardní ocelové konstrukce karoserií automobilů. Také proto u automobilů vyšších tříd v závislosti na použití hliníku stoupá jeho výrobní cena. [8, 9]

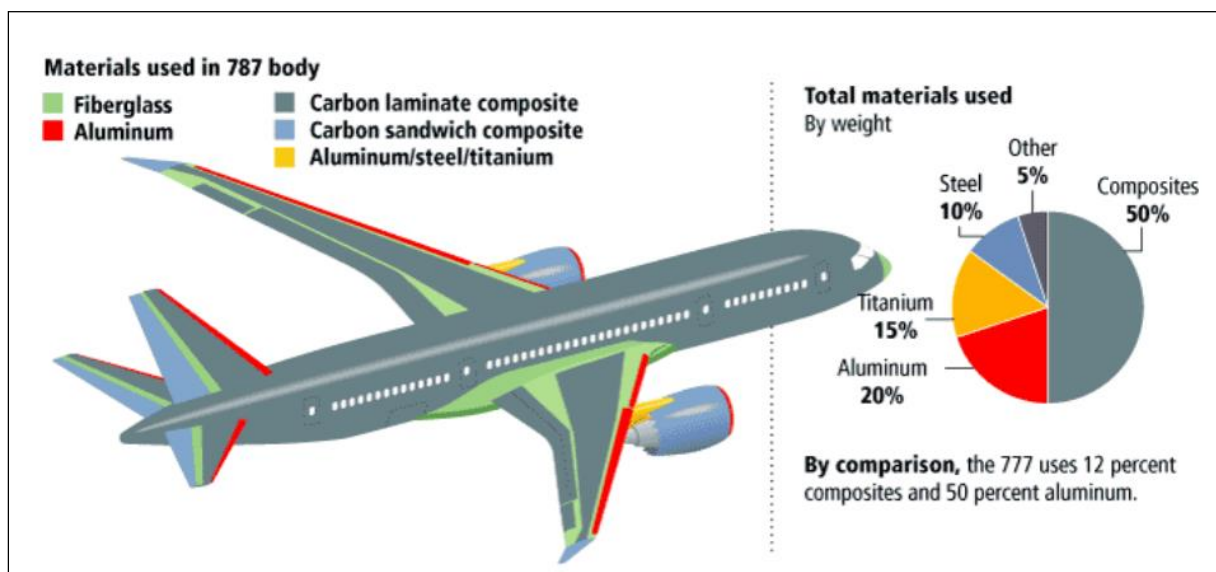
Třetím nejčastějším zastupitelem v celkovém podílu používaných materiálů na výrobu automobilu jako celku jsou polymerní materiály (významné zastoupení mají plasty), využívající se jak na interiérové komponenty, tak exteriérové díly (např. nárazníky). Zásadní výhodou těchto materiálů je oproti dříve používaným materiálům jejich hmotnost a také cena (za předpokladu velkosériové výroby). [8, 9]

Každá z těchto tří procentuálně nejvýznamnějších materiálových skupin se vyznačuje odlišným chováním v závislosti na teplotním zatížení, proto je také zajímavé a vhodné se v rámci této diplomové práce zaměřit právě na tyto skupiny z hlediska jejich teplotní roztažnosti. Jelikož velké množství výrobních podniků v České republice a konkrétně i Západočeském regionu pracuje s těmito materiály a zaměřuje se na výrobu dílů pro automobilový průmysl, je tak zúžení materiálových skupin na výše vybrané logicky odůvodnitelné.

b) Letecký průmysl

Za zmínku také stojí průmysl letecký a využití materiálů v tomto odvětví. U leteckého průmyslu je z hlediska hmotnosti na finální výrobek ještě větší požadavek, než v průmyslu automobilovém, proto je celkový poměr používaných materiálů oproti automobilovému průmyslu odlišný (viz příklad na obrázku 1-8). Primárně zastoupenou skupinou materiálů letadel jsou hliníkové slitiny, případně vysokopevnostní kompozitní materiály (v závislosti na typu letadla zastoupení jedné z těchto hlavních skupin 50% či více).

Tyto dvě skupiny následně doplňuje zejména titan (vysoká chemická stálost), a dále v menší míře také ocelové slitiny a další prvky. [10]



Obr. 1-8: Příklad materiálového složení letadel Boeing 787, 777 [10]

1.6 Úvod do problematiky teplotních kompenzací

Problematika teplotních kompenzací spojuje v rámci této diplomové práce dvě výše uvedená témata, a to měření pomocí CMM a problematiku teplotní roztažnosti materiálu.

Metrologické laboratoře jsou ve většině případů uzpůsobeny podle základních pravidel pro správné měření z hlediska teploty, tj. jsou klimatizovány a je v nich udržována standardní hodnota teploty blízká 20 °C, která je jediná správná předepsaná pro přesné měření.

Nutnost využití teplotních kompenzací na CMM tedy nenastává většinou z důvodu nedodržení předepsané teploty ovzduší, nýbrž nedodržení teploty měřeného objektu, jehož teplota by v ideálním případě měla být stejná, jako teplota okolí – v tomto případě tedy již zmiňovaných 20 °C s gradientem ± 1 °C. Důležité je, aby měřený objekt dodržoval tuto teplotu v celém svém průřezu, nikoliv pouze na jeho povrchu, kde jsou dotykovou sondou CMM nabírány referenční body pro měření.

1.6.1 Teplotní kompenzace na CMM zařízeních

V ideálním světě a ideálním měřicím procesu by teplotních kompenzací nebylo potřeba. Vzhledem k variabilitě, která v každém reálném procesu nastává, je ovšem nulový negativní teplotní vliv na průběh měření prakticky nedosažitelný.

Empiricky se hodnota této teplotní odchylky nazývá *Index teplotní chyby* (TEI z angl. Thermal error index). Ten udává celkovou odhadovanou teplotní chybu vyjádřenou procentuálně z celkové tolerance daného rozměru (tj. kolik z celkové tolerance rozměru na díle odebere pouze chyba vlivem teploty). [14]

Neformálně by se tato hodnota dala spočítat jako dvojnásobek nejistoty délkového měření dělené hodnotou tolerance dílu (daného rozměru) – tento podíl vynásoben hodnotou 100 je poté

výslednou procentuální částí uvnitř již známé hodnoty tolerance pro měřený rozměr / geometrický prvek. [14]

V průmyslové praxi ovšem není nijak výhodné se zabývat výpočtem tohoto indexu a proto je třeba vzít automaticky v úvahu vlivy, které negativní dopad vlivu teploty omezí na co nejmenší hodnotu.

Nejhlavnějšími faktory, které vlivy teploty během měření pozitivně omezují, jsou:

- udržení teploty ve stabilním předepsaném rozmezí,
- použití teplotních kompenzací. [14]

V praxi se k nejideálnějšímu možnému stavu pro eliminaci teplotou vzniklých chyb měřicí proces přiblíží dodržením definované hodnoty teploty $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ v rámci měřicího prostředí (ovzduší laboratoře), CMM (a jeho všech komponent) a měřeného dílu v celém svém průřezu. Čím více by se teploty všech článků tohoto měřicího řetězce blížily stabilně v čase přesné teplotě 20 °C , tím by byl měřicí proces s ohledem na vliv teplotní roztažnosti stabilnější. V rámci velmi přesného měření ovšem může i drobné teplotní kolísání mít vliv na finální naměřený výsledek, proto jsou současné CMM velmi často vybavovány přídatnou funkcí teplotních kompenzací, která má za cíl eliminovat tyto teplotní nuance.

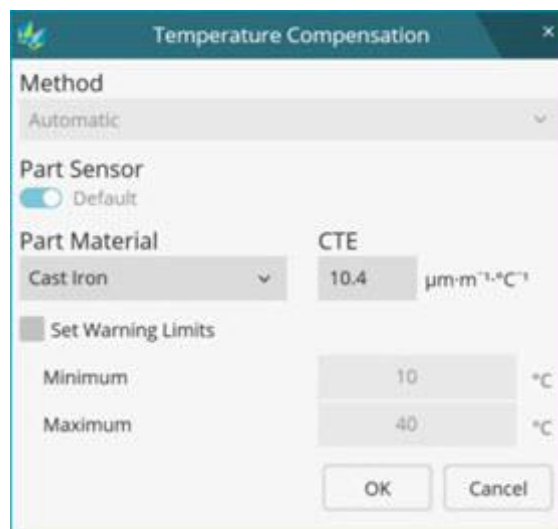
Dále bude v rámci této diplomové práce uvažováno, že přesné měření probíhá v metrologické laboratoři o stálé teplotě $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$. V takovém případě je primárně řeč o teplotních kompenzacích týkajících se přímo měřeného dílu, jelikož další složky řetězce (teplota prostředí, teplota stroje a jeho komponent) by se měly nacházet v relativně stabilní teplotní poloze, a proto jejich teplotní roztažnosti budou zanedbány.

Dle nabídky dostupných strojů a kompenzačních balíčků na trhu lze vybavit vhodně CMM teplotními kompenzacemi pro velký rozsah teplot. Zároveň ale vždy platí, že čím je teplota měřeného dílu bližší teplotě pracovního prostředí, tím snáze se eliminuje chyba vznikající při vyrovnávání teplot dílu s pracovním prostředím. Ke snaze vyrovnání teplot dochází kontinuálně v závislosti na čase a samotných teplotách dílu a měřicího prostředí.

Celý systém prakticky funguje na základě dvou klíčových informací, a to:

- koeficientu teplotní roztažnosti měřeného materiálu,
- aktuálních naměřených teplotách.

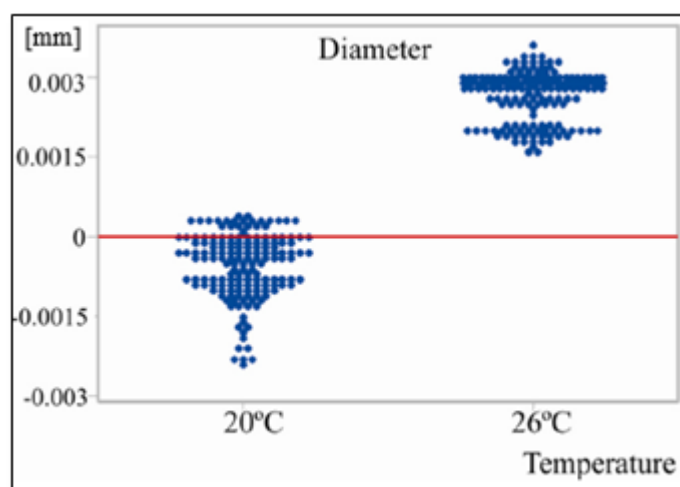
Z hlediska přípravy NC programu pro provedení měření se mění při použití kompenzací jen velmi málo. Klíčovým prvkem je zadání koeficientu teplotní roztažnosti měřeného materiálu skrze dialogové okno tak, aby byla softwaru zadána hlavní informace potřebná k výpočtu kompenzací. [13]



Obr. 1-9: Příklad dialogového okna softwaru pro zadání hodnoty teplotní roztažnosti [13]

Po přípravě NC programu a umístění dílu do měřicího prostoru je nutné zjistit aktuální teplotu dílu, aby tak byla kompenzačnímu systému dána další klíčová informace potřebná k samotné kompenzaci rozměrů. Nejlepším možným způsobem, jak teplotu z dílu odečíst, je např. použití dotykových přesných termočlánků. Alternativou by poté bylo použití bezdotykového teplotního snímače, jehož použitím ovšem přesnost odečtení teploty značně klesá. S takto zjištěnými informacemi o teplotě poté systém počítá během celého průběhu měření.

Po zadání teplotní roztažnosti materiálu a zjištění aktuální teploty měřeného dílu již může proběhnout standardní měření řízené zvoleným NC programem. Výstupem takto provedeného měření je kompenzovaný výsledek, který by se měl co nejvíce přibližovat nominálnímu měření za dodržení teploty 20 °C. Cílem kompenzací je tak plně eliminovat všechny negativní teplotní vlivy a získat výsledky, kterých by bylo dosaženo při standardní teplotě dílu 20 °C ± 1 °C. Výsledky jsou samozřejmě vždy závislé také na přesnosti konkrétních CMM, které se musí dále do výsledků započítat.



Obr. 1-10: Příklad vyhodnocení měření průměru při reálné teplotě 26°C ve srovnání s nominální teplotou [15]

2 Návrh experimentu

2.1 Teoretický návrh experimentu

Přesnost měření pomocí CMM za použití teplotních kompenzací je výrobcem měřicího stroje garantována pouze v určitém rozsahu teplot nepřilíš se vzdalujících od ideálních 20 °C (často pouze v rozsahu 18 – 22 °C). V reálné praxi ovšem není ve všech případech možné se s teplotou udržet v tomto rozmezí, vzhledem k teplotním okolnostem a časovým požadavkům zákazníka na rychlé proměření dílu.

Koncepce navrženého experimentu odráží aktuální portfolio měření prováděné Laboratoří dílenské metrologie Západočeské univerzity v Plzni, která je součástí Regionálního technologického institutu (RTI). Laboratoř dílenské metrologie využívá k měření pro externí zákazníky vysoce přesný CMM Carl Zeiss Prismo 7 Navigator. Výrobcem uváděná maximální dovolená chyba při měření délky je:

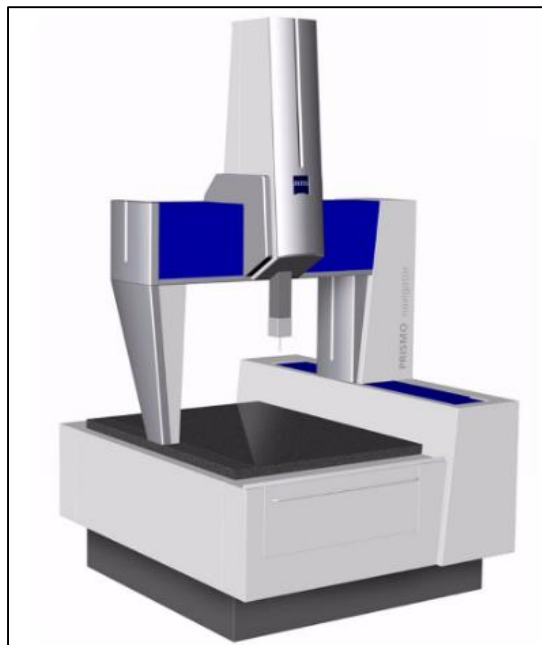
$$\Delta = 1,6 + \frac{L}{350} \quad (3)$$

kde:

Δ - maximální dovolená chyba měřicího stroje [μm]

L – měřený délkový rozměr [mm]. [11, 12]

Tento moderní CMM je vybaven funkcí teplotních kompenzací, která ovšem dosud na tomto stroji nebyla hojně využívána, zvláště ne pro potřeby ověření rozměrů součástí zadaných externími společnostmi.



Obr. 2-1: Schéma CMM Carl Zeiss Prismo 7 Navigator [12]

Pro analýzu v rámci této diplomové práce byly zvoleny tři druhy materiálů z odlišných materiálových skupin, a to konkrétně:

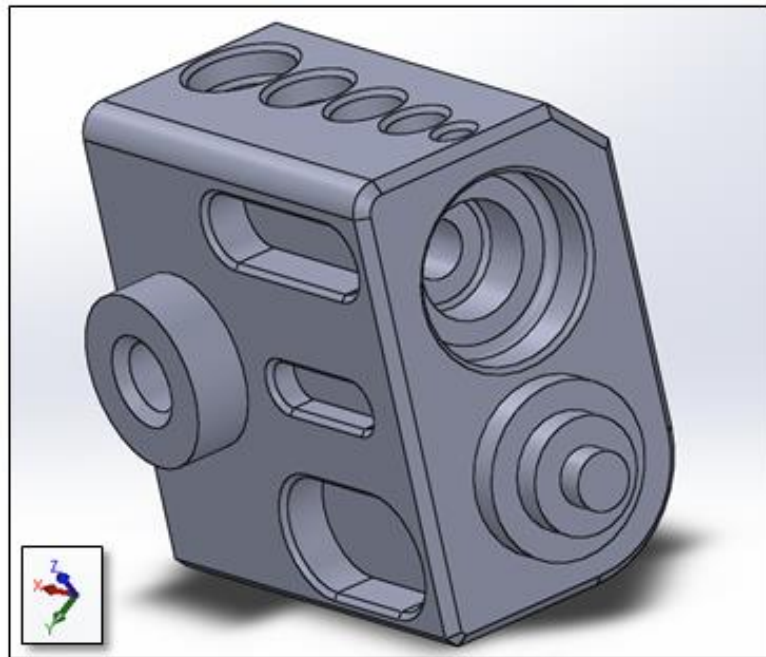
- uhlíková konstrukční ocel 12 050.1 (dále jen 12 050),
- hliníková slitina EN AW-6061 (dále jen 6061),
- průmyslový polymer ABS (Akrylonitrilbutadienstyren – dále jen ABS).

Tyto druhy materiálů byly zvoleny na základě kapitoly 1.5 o využití průmyslových materiálů v dopravném průmyslu. V kapitole 1.5 výše právě tyto tři materiálové skupiny zastupovaly významnou část využití v současném automobilovém / leteckém průmyslu. Zároveň jsou tyto materiálové skupiny vhodné k provedení tohoto experimentu z hlediska odlišných vlastností v rámci teplotních roztažností. V plzeňském regionu se nachází velká řada výrobních podniků, která se zabývá výrobou dílů mimo jiné právě pro automobilový / letecký průmysl. Vzhledem k tomu, že některé z těchto firem již v minulosti využívaly a nadále využívají metrologické služby Laboratoří dílenské metrologie ZČU, jsou tak výše zvolené materiály vhodným prověřením funkce a spolehlivosti využití teplotních kompenzací na tomto CMM.

V rámci analýzy tvarové a rozměrové různorodosti byla pro provedení experimentu ve studentské verzi CAD systému Solidworks navržena součást o základních rozměrech 80 x 80 x 50 mm (viz výkres v příloze a model na obr. 2-2), u které bylo navrženo několik typů geometrických útvarů a úprav vhodných k provedení měření a vhodných k prozkoumání rozměrových a vzdálenostních závislostí na základě provedeního měření.

Hlavními geometrickými charakteristikami, které na navržené součásti lze najít, jsou:

- soustředné válcové výstupky o různých průměrech,
- soustředná válcová zahlobení o různých průměrech,
- válcová zahlobení o různých průměrech posunutá vůči sobě v ose x,
- válcový výstupek s vnitřní vrtanou dírou,
- oválné drážky (drážky pro pero) s různými poloměry zaoblení a délkami posunuté vůči sobě v ose z,
- kuželový výstupek.



Obr. 2-2: Navržený díl v izometrickém zobrazení [vlastní]

Tato součást byla vyrobena z tří výše uvedených materiálů vždy ve dvou kopiích pro každý z materiálů - pro experiment bylo tedy připraveno celkem 6 vzorků tak, aby bylo možné při vyhodnocení sledovat určitou míru variability, a aby bylo možné získat co nejvíce dat k výsledné analýze.

Pro simulaci možných teplotních rozsahů, které by se mohly v reálných případech v rámci měření součástí objevit, byl experiment naplánován pro tři zcela odlišné teploty a situace, a to:

- referenční měření při cca 20 °C,
- ochlazení dílu – teplota dílu cca 5 – 15 °C,
- zahřátí dílu – teplota dílu cca 25 – 35 °C.

Navržením všech výše uvedených charakteristik a proměnných v tomto experimentu je pokryto základní rozložení možných situací při reálném provádění měření za použití teplotních kompenzací v metrologické laboratoři RTI.

Cílem práce je na základě vyhodnocení takto provedených měření určit spektrum proměnných, které jsou vhodné pro budoucí využití teplotních kompenzací na měřicím stroji CMM Carl Zeiss Prismo 7 Navigator a ohraničení použitelnosti těchto kompenzací pro dodržení požadovaných přesností měření při konkrétních měřicích aplikacích.

2.2 Průběh experimentu

Výroba dílů z konstrukční oceli a hliníkové slitiny proběhla ve výrobní hale RTI. Díly se podařilo vyrobit bez velkých komplikací a byly tak plně použitelné pro naplánované měření.

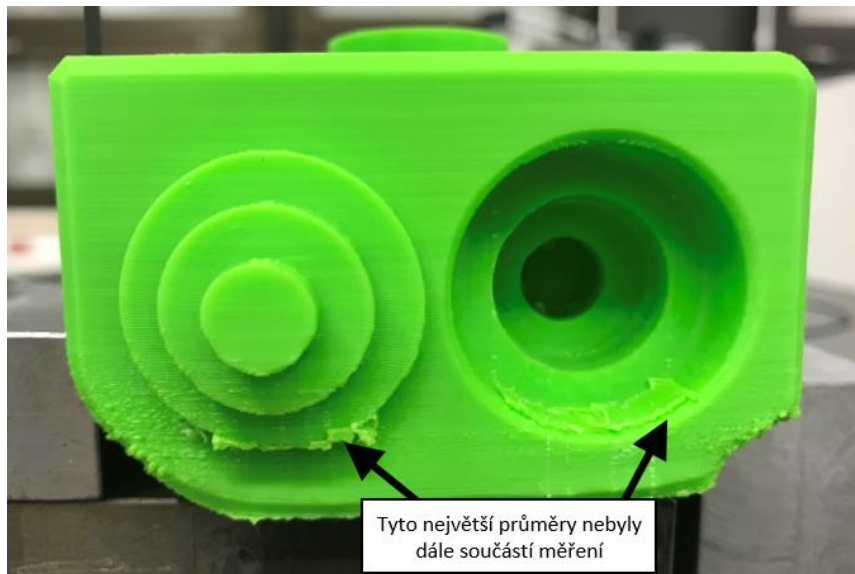


Obr. 2-3: Díly z uhlíkové oceli a hliníkové slitiny [vlastní]

Výroba vzorku z ABS plastu proběhla také v rámci Západočeské univerzity v Plzni, a to konkrétně na tiskárně v Centru informatizace a výpočetní techniky (CIV).

U dílů z ABS vzhledem k omezeným kvalitativním možnostem 3D tiskárny byly po vytištění dílů dodatečně provedeny drobné povrchové úpravy - zejména u vnitřních otvorů, pro jejichž tvarovou úpravu bylo použito ručních výstružníků. V jiných oblastech na dílech vyrobených pomocí 3D tisku ale byly bohužel nepřesnosti tisku tak velké, že je nebylo možné žádným způsobem opravit tak, aby jejich následné proměření bylo vzhledem k pokusu relevantní. Z tohoto důvodu byly tyto plochy následně při měření vynechány. Konkrétně se jedná o dva velké průměry výstupku a válcového zahloubení (lze vidět na obrázku 2-4 níže).

Tyto deformace vznikly také pravděpodobně kvůli tomu, že vzorek byl tisknut na 3D tiskárně relativně nestandardně jako plný díl, bez jakéhokoliv vnitřního odlehčení. Tento typ výroby byl zvolen hlavně z důvodu možné vyšší teplotní variability materiálu při jeho ovlivnění teplem, či ochlazením.

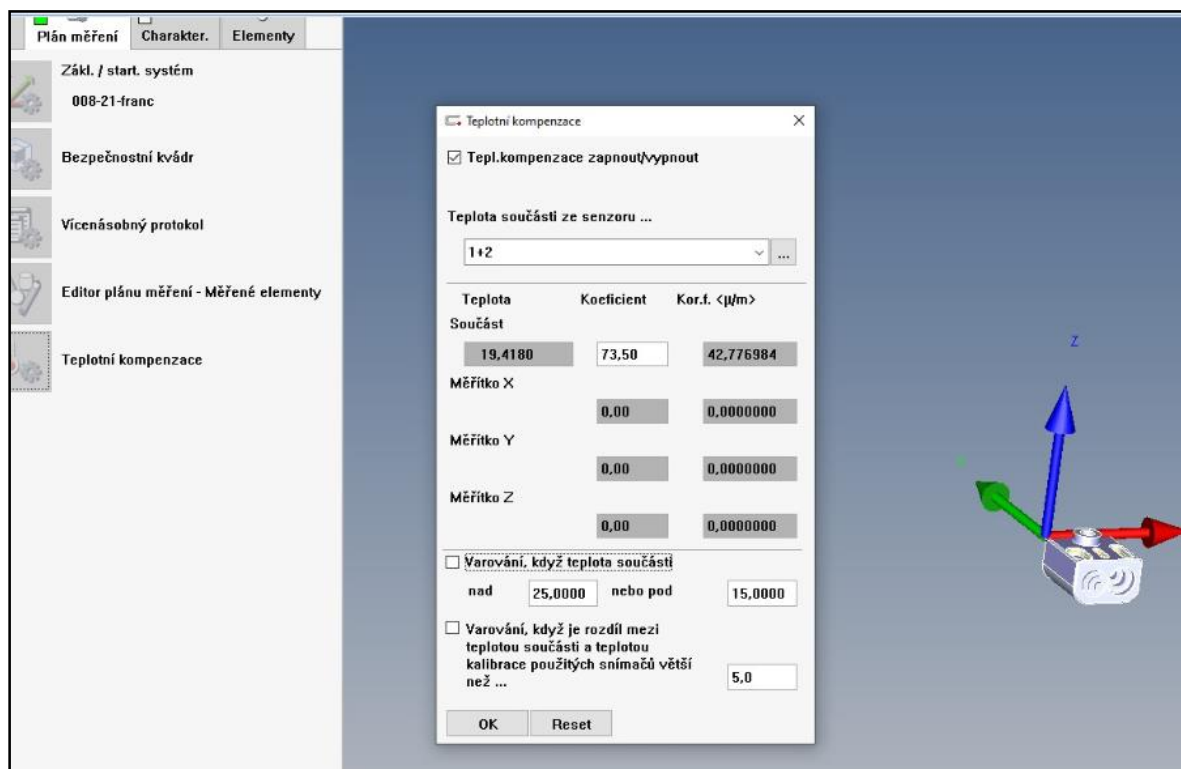


Obr. 2-4: Díl vytištěný 3D tiskem a jeho významné výrobní defekty [vlastní]

Po výrobě všech těchto dílů byl vytvořen univerzální měřicí program, jehož pomocí byly nadefinovány klíčové geometrické prvky na díle k jejich proměření. Takto vytvořený program byl použit shodně pro všechna měření.

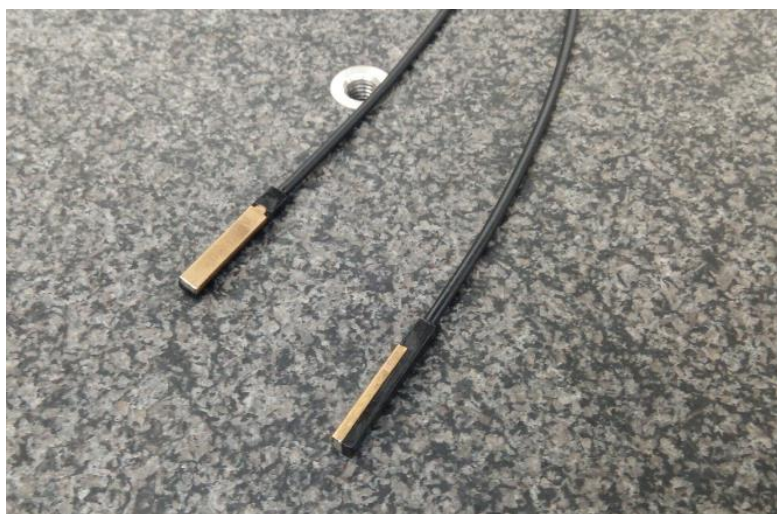
Vzhledem k charakteru celého experimentu, kde primárním zájmem bylo zjistit závislost chování jednotlivých materiálů na teplotě a následné automatické přepočítání rozměrů do nominálních rozměrů, bylo nutné do měřicího programu vždy zahrnout klíčové informace nad rámec standardního měření prováděného v laboratoři RTI, a to:

- zapnutí funkce teplotních kompenzací na měřicím stroji,
- specifikace konkrétního materiálu,
- určení aktuální konkrétní teploty dílu.



Obr. 2-5: Výstřížek z měřicího programu – nastavení informací k použití teplotních kompenzací [vlastní]

Funkce teplotních kompenzací je nutné spustit v měřicím programu nad rámec jeho klasického nastavení – viz výše na obrázku 2-5. V rámci takového nastavení je stroji nadefinován měřený materiál, a to konkrétně zadáním hodnoty součinitele teplotní roztažnosti (zdroj chemické tabulky). Další klíčovou informací do systému pro správné dopočtení kompenzovaného rozměru je aktuální teplota dílu, která je do systému zanesena skrze speciální magnetické termočláanky, které jsou standardně součástí vybavení stroje. V případě měření dílu z ABS plastu byly tyto termočláanky k povrchu přitlačovány uměle, jelikož plastový materiál není magnetický.



Obr. 2-6: Použité teplotní sondy v rámci vybavy měřicího stroje [vlastní]

V případě, že probíhalo měření dílu ochlazeného, nebo dílu zahřátého oproti laboratorní teplotě okolí, která se drží blízko 20 °C, by bylo teoreticky nutné uvažovat také změnu teploty daného dílu v průběhu samotného měření. Pro tyto účely bylo vzhledem ke zvoleným teplotám pro díly ochlazené (cca 10 °C) a pro díly zahřáté (cca 30 °C) provedeno krátké pozorování vyrovnávání teploty ze strany dílu vzhledem k teplotě okolí. Pro konkrétní délku měřicího programu (cca 20 minut) se pro všechny materiály teplota daného dílu změnila vždy maximálně o zhruba 1 °C oproti vstupní teplotě naměřené na teoretickém začátku měřicího cyklu.

Na základě tohoto zjištění byla již v průběhu dalšího měření uvažována za jedinou relevantní teplotu naměřená hodnota na začátku měření. Změna roztažnosti pro uvažované materiály a geometrické prvky tímto teplotním rozdílem nesehrává zásadní vliv pro další významné odchylky, proto lze dále tyto drobné teplotní změny zanedbat.

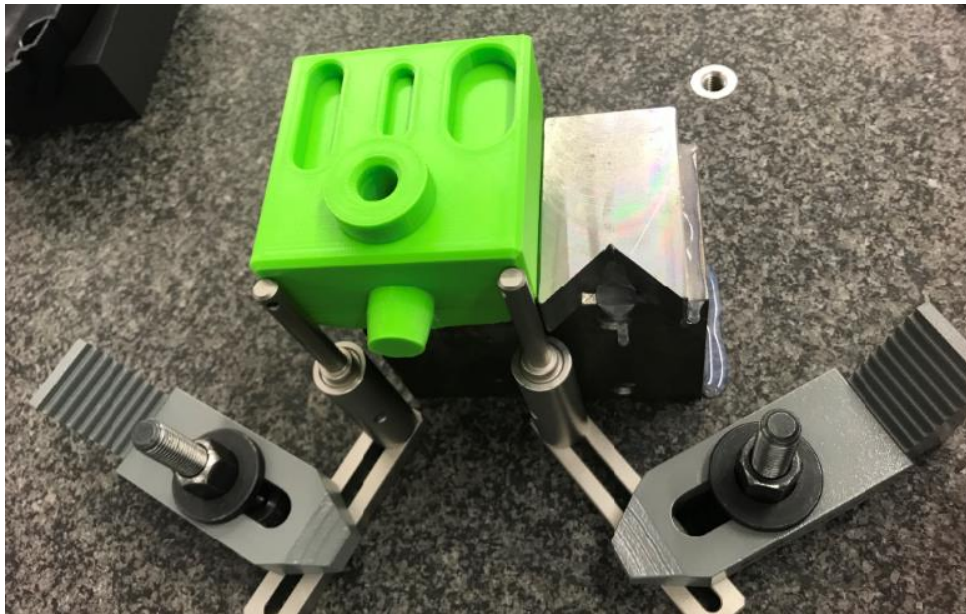
Vzhledem k tomu, že teplotní kompenzace se na tomto stroji aktuálně nevyužívají, bylo pro ověření správnosti funkce teplotních sond ve stroji provedeno dvojí proměření teploty dílu externím teploměrem (viz obrázek 2-7). Během této zkoušky ani v jednom z případů nebyly zjištěny problémy s rozdílností teplot mezi sondami na stroji a tímto přídavným teploměrem, proto jsou nadále uvažovány teploty naměřené vestavěnými termočlánky za správné.



Obr. 2-7: Teplota dílu zjištěná externím teploměrem [vlastní]

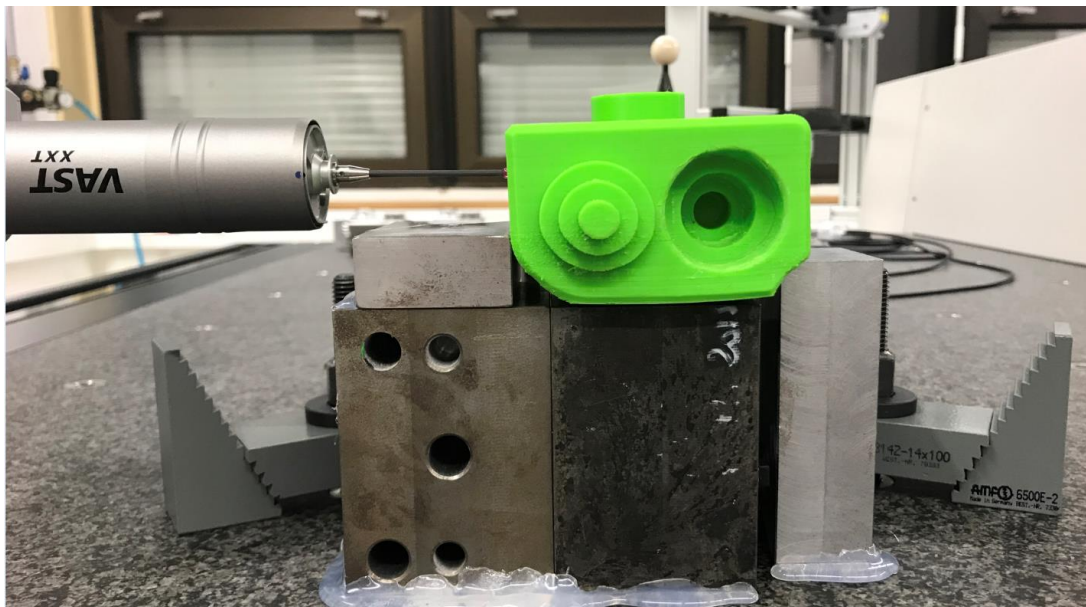
Všechny měřené prvky na součástech bylo během tohoto dotykového měření možné proměřit na jedno ustavení součásti. Pro zajištění vhodnější polohy pro průběh měření nebyla součást ustavena přímo na granitové desce stroje, ale na podpěrách se zážkami.

Zarážky byly k součásti umístěny tak, aby zabránily možnému pohybu součásti v průběhu měření a zajistily tak stabilitu ve všech osách souřadnicového prostoru stroje.



Obr. 2-8: Ustavení měřené součásti v souřadnicovém prostoru stroje [vlastní]

Pro měření bylo využito otočné hlavy a použit byl dotyk s rubínovou kuličkou o průměru 3 mm. Tento dotyk splňoval požadavky na všechny měřené geometrické prvky, proto nebylo nutné ho během měření měnit za dotyky s jinými průměry a tím se zásadně celý měřicí proces zjednodušil.



Obr. 2-9: Průběh měření s otočnou hlavou a rubínovým dotykem [vlastní]

Jak již bylo výše zmíněno v původním návrhu experimentu, součást z každého materiálu byla vyrobena vždy ve dvou kopiích a každý takto vyrobený díl byl proměřen v celkem

šesti opakováních za různých podmínek vzhledem k vstupní teplotě a nastavení měřicího programu, a to konkrétně:

- referenční měření při teplotě dílu cca 20 °C (výchozí pro všechna ostatní měření),
- měření při teplotě dílu cca 20 °C s použitím funkce teplotních kompenzací,
- měření při teplotě dílu cca 10 °C,
- měření při teplotě dílu cca 10 °C s použitím funkce teplotních kompenzací,
- měření při teplotě dílu cca 30 °C,
- měření při teplotě dílu cca 30 °C s použitím funkce teplotních kompenzací.











Ochlazení dílů pro všechny materiály na hodnotu kolem 10 °C bylo dosaženo dlouhodobým umístěním dílu v chladničce. Prohřátí dílů bylo poté dosaženo dlouhodobým umístěním dílu na topném tělese. Oba tyto teplotní procesy bylo nutné provést tak, aby díl získal vnějším vlivem teplotu do celého svého průřezu a simuloval tak reálnou situaci, kdy zákazník donese k proměření díl kompletně ochlazený / zahřátý.

Jelikož ze všech materiálů byly vyrobeny dvě kopie dílů, byl každý z dílů řádně označen, aby nedošlo během měření a následné manipulaci s díly k chybám a zamíchání získaných hodnot.



Obr. 2-10: Číselné označení konkrétního vzorku [vlastní]

Celkově bylo měřením získáno pro každou ze součástí šest kategorií naměřených hodnot dohromady čítajících přes 300 samostatných náměrů. Souhrnně pro všechny součásti se poté počet náměrů přibližuje 2000 položek, které bylo možné dále zahrnout do následné statistiky a vyhodnocení takto provedených měření. Příklad části originálního měřicího protokolu lze vidět na obrázku 2-11 (celý protokol pro vybrané měření v příloze práce).

Regionální technologický institut - Laboratoř dílenské metrologie					
Regional technological institute - Metrology Laboratory					
Zkouška č. (Test no.): 008-21					
Plán měření 008-21-franc	Datum krátoe 15.03.21	Metoda LDM_OP1			
Číslo výkresu * drawingno *	Čas 9:06:44	Tepl. souč. 10.47			
Operátor Dana Kubátová	Stroj * LDM 15/003 *	Č.dílu inkrementálně díł. 12050 - c. 1-S-s	Délková jednotka mm		
Stránka 1 / 5	Mer	Jmen	Horní tol.	Dolní tol.	Odchylka
	Prumer_díra pr. 12 - poz. 5 mm	11.811	12.000		-0.189
	Prumer_díra pr. 12 - poz. - 10 mm	11.813	12.000		-0.187
	Prumer_díra pr. 12 - poz. -15 mm	11.813	12.000		-0.187
	Prumer_díra pr. 12 - poz. -20 mm	11.813	12.000		-0.187
	Prumer_díra pr. 12 - poz. -23 mm	11.813	12.000		-0.187
	Prumer_Válec1	11.812	12.000		-0.188
	Kruhovitost - díra pr. 12 - poz. 5 mm	0.007	0.000	0.000	0.007
	Kruhovitost - díra pr. 12 - poz. 10 mm	0.006	0.000	0.000	0.006
	Kruhovitost - díra pr. 12 - poz. 15 mm	0.006	0.000	0.000	0.006
	Kruhovitost - díra pr. 12 - poz. 20 mm	0.006	0.000	0.000	0.006

Obr. 2-11: Část protokolu s naměřenými hodnotami [vlastní]

Z celkového počtu takto získaných dat bylo cílem určit, pro jaké materiály a pro jaké geometrické charakteristiky je vhodné využívat měření za použití teplotních kompenzací. Provedeným měřením byla získána data o různých geometrických prvcích, které je možné následně vyhodnotit. Konkrétně se jedná o náměry prvků, jako:

- průměry,
- kruhovitosti,
- délky,
- úhel (pouze jeden úhlový prvek),
- rovinnosti,
- tvary plochy.

Všechny tyto parametry byly během provedených měření zaznamenány v minimálně dvou různých rozměrech, aby bylo možné pokusit se najít případné závislosti použití kompenzací vzhledem k danému rozměru. Výjimkou je měření úhlu, které se provádělo pouze na jedné úhlové ploše součásti.

Pro potřeby analýzy byly všechny hodnoty zaznamenány do souhrnné tabulky pro konkrétní díl. Příklad části takové tabulky lze vidět na obrázku 2-12.

1. díl 12 050		Nominálně naměřená hodnota	Nominální teplota s kompenzací	Ochlazený díl	Ochlazený díl s kompenzací	Zahřátý díl	Zahřátý díl s kompenzací
		26.2.21 19,92°C	26.2.21 19,89°C	15.3.21 10,16°C	15.3.21 10,47°C	17.3.21 30,11°C	17.3.21 31,38°C
Průměr	díra Ø 12 mm, pozice 5 mm	11,811	11,812	11,810	11,811	11,813	11,811
Průměr	díra Ø 12 mm, pozice -10 mm	11,813	11,813	11,811	11,813	11,814	11,812
Průměr	díra Ø 12 mm, pozice -15 mm	11,813	11,813	11,811	11,813	11,814	11,812
Kruhovitost	díra Ø 12 mm, pozice -20 mm	0,005	0,006	0,006	0,006	0,005	0,006
Kruhovitost	díra Ø 12 mm, pozice -23 mm	0,005	0,006	0,006	0,006	0,005	0,006
Délka	drážka délky 38 mm	38,085	38,085	38,080	38,086	38,096	38,086
Šířka	drážka délky 38 mm	20,091	20,091	20,088	20,090	20,091	20,089
Rovinnost	Rovinnost 1	0,006	0,006	0,006	0,005	0,005	0,009
Profil plochy	Profil plochy 4	0,008	0,007	0,007	0,006	0,006	0,011
Rovinnost	Rovinnost 2	0,024	0,023	0,025	0,025	0,040	0,023
Profil plochy	Profil plochy 2	0,046	0,041	0,046	0,039	0,193	0,030
Rovinnost	Rovinnost 3	0,023	0,023	0,024	0,023	0,024	0,024
Profil plochy	Profil plochy 3	0,288	0,283	0,310	0,285	0,142	0,298

Obr. 2-12: Část souhrnné tabulky platné pro jeden konkrétní měřený díl [vlastní]

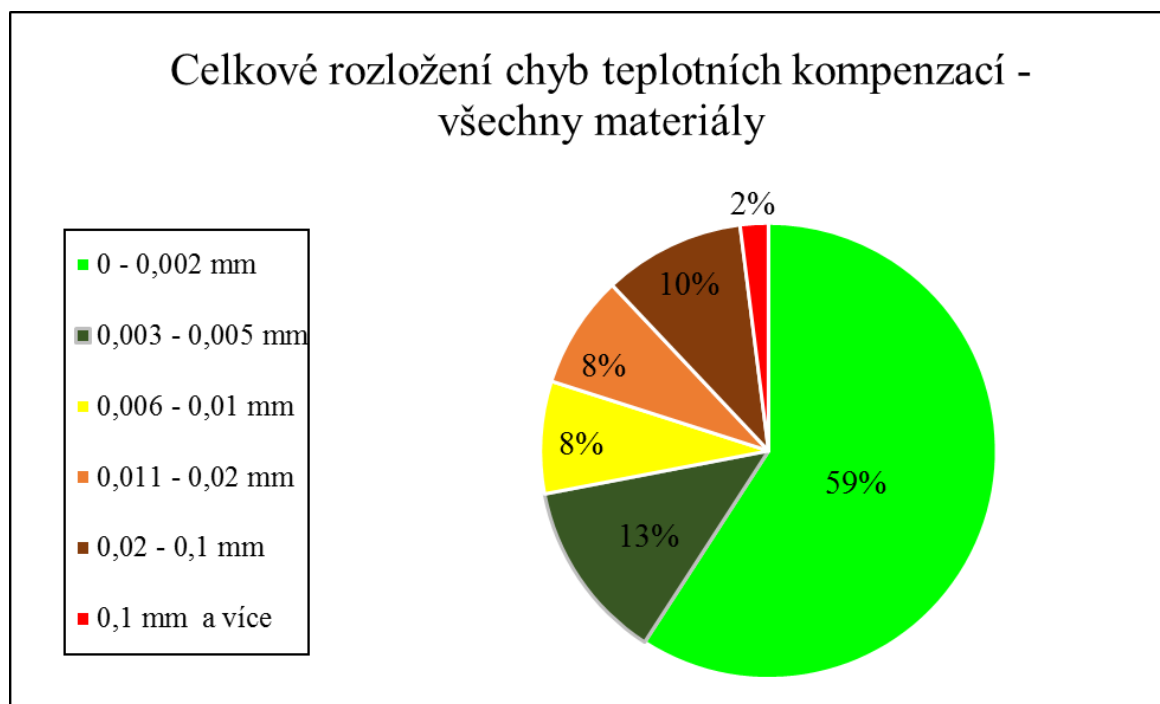
3 Zhodnocení provedených experimentů

3.1 Souhrnné vyhodnocení a ověření správnosti postupu

Pro potřeby této diplomové práce bylo celkem provedeno 36 opakování měření pro součást vyrobenou ze třech různých materiálů. Takovými měřeními bylo získáno téměř 2000 hodnot, které byly k dispozici pro vyhodnocení rozmanitosti v rámci jednotlivých materiálů a také měřených geometrických a rozměrových prvků.

3.1.1 Rozdělení získaných hodnot a zavedení chyby stroje do měření

Pro potřeby vyhodnocení byly naměřené a následně vykompenzované hodnoty vždy rozděleny do celkem šesti skupin, a to v závislosti na velikosti odchylky teplotní kompenzace od očekávaného výsledku. Základní příklad lze vidět na koláčovém grafu 3-1 níže. Tento graf ukazuje vyhodnocení všech provedených měření bez ohledu na měřený materiál, či na konkrétně měřené prvky. Pro každé další vyhodnocení byly výsledky rozděleny přesně tak, jak je uvedeno v tomto grafu.



Graf 3-1: Celkové rozložení chyb teplotních kompenzací

První hodnota odchylky (0 - 0,002 mm) reprezentuje měření za použití teplotních kompenzací, které se dá považovat za bezchybné vzhledem k maximální uváděné chybě měřicího stroje Zeiss, na kterém byla všechna měření prováděna. Uvedenou odchylku 0,002 mm lze snadno odůvodnit výpočtem maximální dovolené chyby pro největší rozměr, který mohl být na součásti měřen.

Pro takový výpočet platí vztah uváděný výrobcem tohoto stroje (3), který je zmíněn výše v kapitole 2.1:

$$\Delta = 1,6 + \frac{L}{350} \quad (3)$$

Vzhledem k maximálnímu rozměru součásti 80 mm poté lze tuto chybu vypočítat jako:

$$\Delta = 1,6 + \frac{80}{350}$$

$$\Delta = 1,83 \mu\text{m} \cong 2 \mu\text{m} = 0,002 \text{ mm}$$

Z tohoto důvodu lze všechny kompenzované hodnoty, které se od nominálního měření součásti lišily o $\pm 0,002$ mm, považovat za potenciální chybu měření uvedenou výrobcem měřicího stroje. Další rozmezí odchylek po kompenzaci teploty byla navržena tak, aby byla dále přehledná.

Celkově bylo tedy vytvořeno šest následujících chybových rozsahů:

- $\pm 0,002$ mm (maximální dovolená chyba stroje),
- $\pm 0,005$ mm,
- $\pm 0,01$ mm,
- $\pm 0,02$ mm,
- $\pm 0,1$ mm,
- $\pm 0,1$ mm a více.

Pokud by byl důležitý výsledek jako celek bez ohledu na měřené materiály a jednotlivé prvky, spolehlivost teplotních kompenzací by se jevila jako velmi nedostačující. Celkových 59% naměřených hodnot se vešlo do rozsahu $\pm 0,002$ mm, což lze považovat za měření, kde teplotní kompenzace proběhly naprosto spolehlivě.

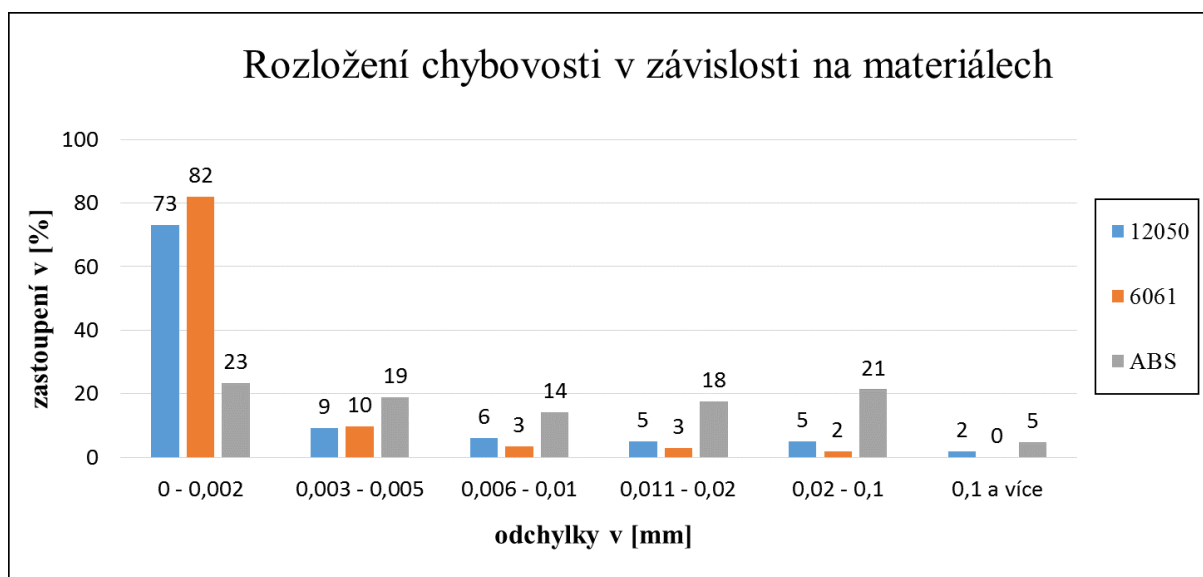
Ovšem u zbývajících 41% se během měření a následných kompenzací ve výsledcích projeví různě velké odchylky, s nimiž by výsledné měření nemuselo být vždy vyhodnoceno jako úspěšné (vždy samozřejmě záleží na požadovaných délkových a geometrických tolerancích dané měřené součásti). Proto je třeba se zaměřit na těchto 41% procent a odhalit, v jakých případech se teplotní kompenzace odchýlily od původně očekávaného nominálního výsledku.

3.1.2 Rozdělení odchylek dle měřených materiálů

Na grafu 3-2 níže lze vidět celkové rozdělení do uvedených skupin odchylek na základě dat z měření jednotlivých materiálů. Z tohoto grafu je jednoznačně zřetelné, že výrobky z ocelové a hliníkové slitiny v měřeních vykazovaly zásadně odlišnou celkovou přesnost oproti součásti vyrobené z plastového materiálu ABS.

U hliníkové slitiny se celkový počet odchylek do 0,005 mm pohybuje kolem 92%, u oceli 12 050 to je poté kolem 82%. Ve srovnání s těmito čísly má materiál ABS velmi rozdílné rozložení chyb a procentuální zastoupení v jednotlivých skupinách je velmi obdobné (s výjimkou skupiny s extrémními odchylkami nad 0,1 mm).

V úvahu je také třeba vzít, že každý materiál zastupovaly při měření dvě součásti, proto je zapotřebí vzít v úvahu i rozdíly mezi jednotlivými součástmi. Celkový obraz výsledků pro každý materiál je ovšem patrný již z grafu reprezentujícího materiálové skupiny jako celky.



Graf 3-2: Celkové rozložení chyb teplotních kompenzací v závislosti na materiálech

Detailním vyhodnocením pro jednotlivé materiálové skupiny a pro jednotlivé součásti v rámci těchto materiálových skupin se tato práce zabývá dále v podkapitolách 3.2, 3.3, a 3.4 níže.

3.1.3 Manuální ověření výpočtů kompenzace teploty

Vzhledem k různorodosti získaných výsledků (dle grafu 3-1), a celkově dosud nijak neověřované funkčnosti systému teplotních kompenzací na měřicím stroji Zeiss, je nezbytné na několika příkladech ověřit, že:

- chování jednotlivých materiálů z pohledu teplotní roztažnosti probíhalo v reálné situaci shodně s tím, co říká teorie (koeficient délkové roztažnosti),
- nepřesnost výsledků neovlivnila možná změna teploty v rámci jednoho cyklu měření (dále v kapitole 3.1.4).

V rámci všech součástí byla provedena měření za snížené a zvýšené teploty primárně pro účely analýzy správnosti funkce teplotních kompenzací na měřicím stroji Zeiss. Měření za těchto nestandardních teplot byla ovšem v dalším opakování provedena také bez spuštění teplotních kompenzací, aby bylo možné zjistit, zdali reálná teplotní roztažnost pro dané materiály odpovídá známé hodnotě, která je nadefinována měřicímu stroji pro samotné spuštění teplotních kompenzací.

Pro výpočet změny měřeného rozměru vlivem teploty a tím i vlivem teplotní roztažnosti je uvažován vztah (1) uváděný výše v kapitole 1.3.1:

$$\Delta l = \alpha \cdot l_1 \cdot \Delta t \quad (1)$$

kde:

Δl – změna délky měřeného prvku [mm], $\Delta l = l_2 - l_1$,

α – koeficient délkové teplotní roztažnosti [K^{-1}],

Δt – změna teploty [mm], $\Delta t = t_2 - t_1$.

Po dosazení do vzorce platí vztah:

$$l_2 - l_1 = \alpha \cdot l_1 \cdot (t_2 - t_1) \quad (4)$$

Pro vyjádření výsledného rozměru po započtení vlivu roztažnosti poté platí finální vztah:

$$l_2 = [\alpha \cdot l_1 \cdot (t_2 - t_1)] + l_1 \quad (5)$$

Hodnoty koeficientu délkové teplotní roztažnosti α se dále uvažují dle tab. 1-1 :

- materiál 12 050 → $\alpha = 11,5 \cdot 10^{-6} K^{-1}$
- materiál 6061 → $\alpha = 22,3 \cdot 10^{-6} K^{-1}$
- materiál ABS → $\alpha = 73,8 \cdot 10^{-6} K^{-1}$

Pro účely ověření byly náhodně vybrány čtyři naměřené hodnoty pro každý měřený materiál. Tyto hodnoty reprezentují:

- délku drážky 42 mm na ochlazeném díle,
- průměr díry Ø 30 mm na ochlazeném díle,
- délku drážky 42 mm na zahřátém díle,
- průměr díry Ø 30 mm na zahřátém díle.

První čtyři takovéto výpočty jsou uvedeny níže jako příklad pro první součást materiálu 12 050.

Geometrická charakteristika	Tvar / Konkrétní prvek	Nominálně naměřená hodnota	Nominální teplota s kompenzací	Ochlazený díl	Ochlazený díl s kompenzací	Zahřátý díl	Zahřátý díl s kompenzací
		26.2.21 19,92°C	26.2.21 19,89°C	15.3.21 10,16°C	15.3.21 10,47°C	17.3.21 30,11°C	17.3.21 31,38°C
Délka	drážka délky 42 mm	42,084	42,084	42,079	42,083	42,087	42,081
Průměr	výstupek Ø 30 mm, spodní (VRT. DÍRA)	29,909	29,909	29,905	29,909	29,914	29,909

Obr. 3-1: Část souhrnné tabulky pro příkladný manuální výpočet teplotní roztažnosti [vlastní]

a) délka drážky 42 mm na ochlazeném díle

$$l_2 = [\alpha \cdot l_1 \cdot (t_2 - t_1)] + l_1$$

$$l_2 = [11,5 \cdot 10^{-6} \cdot 42,084 \cdot (10,16 - 20)] + 42,084$$

$$l_2 = 42,0792 \text{ mm} \cong 42,079 \text{ mm}$$

V tomto případě se naměřená délka na ochlazeném díle rozměrově shoduje s hodnotou empiricky vypočítanou (viz tabulka s naměřenými daty na Obr. 3-1).

b) průměr díry Ø 30 mm na ochlazeném díle

$$l_2 = [\alpha \cdot l_1 \cdot (t_2 - t_1)] + l_1$$

$$l_2 = [11,5 \cdot 10^{-6} \cdot 29,909 \cdot (10,16 - 20)] + 29,909$$

$$l_2 = 29,9056 \text{ mm} \cong 29,906 \text{ mm}$$

Tentokrát po zaokrouhlení empiricky získaného výsledku na stejný počet desetinných míst, na jaký je uveden výsledek z reálného měření, hodnota není totožná tak, jako v prvním případě. Rozdíl jedné tisíce milimetru ovšem u velikosti měřeného prvku spadá do teoreticky maximální chyby stroje, kterou lze v tomto konkrétním případě vypočítat jako:

$$\Delta = 1,6 + \frac{29,909}{350}$$

$$\Delta = 1,69 \mu\text{m} = 0,00169 \text{ mm} \cong 0,002 \text{ mm}$$

Vzhledem k velikosti této chyby stroje samotného je tedy odchylka tisíce mm plně v toleranci a je možné považovat chování ochlazeného materiálu za shodné s teoretickým předpokladem.

c) délka drážky 42 mm na zahřátém díle

$$l_2 = [\alpha \cdot l_1 \cdot (t_2 - t_1)] + l_1 \quad (5)$$

$$l_2 = [11,5 \cdot 10^{-6} \cdot 42,084 \cdot (30,11 - 20)] + 42,084$$

$$l_2 = 42,0888 \text{ mm} \cong 42,089 \text{ mm}$$

V tomto případě rozdíl mezi reálně naměřenou hodnotou a empiricky získanou hodnotou činí po zaokrouhlení 0,002 mm, což je při uvažování teoretické nepřesnosti stroje stále hodnota, kterou lze považovat za správnou.

d) průměr díry Ø 30 mm na zahřátém díle

$$l_2 = [\alpha \cdot l_1 \cdot (t_2 - t_1)] + l_1 \quad (5)$$

$$l_2 = [11,5 \cdot 10^{-6} \cdot 29,909 \cdot (30,11 - 20)] + 29,909$$

$$l_2 = 29,9124 \text{ mm} \cong 29,912 \text{ mm}$$

Tentokrát platí shodné tvrzení, jako u předchozího případu c), kdy rozdíl mezi naměřenou a empirickou hodnotou je 0,002 mm, které v průběhu měření nelze nijak ovlivnit.

Stejně srovnání bylo provedeno pro tyto vybrané rozměry a pro všechny součásti. Výsledky těchto srovnání lze vidět z tabulek níže (obr. 3-2, 3-3, 3-4). V těchto srovnáních jsou empiricky vypočítané hodnoty označené třemi barvami:

- zelená barva – odchylka do 2 μm od naměřené hodnoty,
- žlutá barva – odchylka více než 2 μm , ale stále v rámci několika jednotek mikrometrů od naměřené hodnoty,
- červená barva – výraznější odchylka od naměřené hodnoty.

Srovnání naměřených a empiricky získaných hodnot [mm]		12 050 - č. 1			12 050 - č. 2		
Prvek	Hodnota	Nominálně naměřená hodnota	Ochlazený díl 10,16 °C	Zahřátý díl 30,11 °C	Nominálně naměřená hodnota	Ochlazený díl 10,47 °C	Zahřátý díl 30,90 °C
Drážka délky 42 mm	Naměřená hodnota	42,084	42,079	42,087	42,077	42,072	42,081
Drážka délky 42 mm	Empiricky vypočtená hodnota	42,084	42,079	42,089	42,077	42,072	42,082
Výstupek Ø 30 mm	Naměřená hodnota	29,909	29,905	29,914	29,918	29,914	29,924
Výstupek Ø 30 mm	Empiricky vypočtená hodnota	29,909	29,906	29,912	29,918	29,915	29,922

Obr. 3-2: Srovnání naměřených a empiricky vypočtených hodnot roztažnosti pro materiál 12 050 [vlastní]

Jak již bylo popsáno během příkladů manuálních výpočtů pro první díl z materiálu 12 050 výše, chování tohoto materiálu po ochlazení i zahřátí rozměrově ve všech čtyřech případech odpovídalo empirickým výpočtům, samozřejmě společně se započítáním teoreticky největší uváděné nepřesnosti stroje. Není tedy v zásadě žádný předpoklad k tomu, že v průběhu dalšího vyhodnocení byla roztažnost materiálu zásadně odlišná.

Srovnání naměřených a empiricky získaných hodnot [mm]		6061 - č. 1			6061 - č. 2		
Prvek	Hodnota	Nominálně naměřená hodnota	Ochlazený díl 10,78 °C	Zahřátý díl 29,69 °C	Nominálně naměřená hodnota	Ochlazený díl 10,28 °C	Zahřátý díl 30,80 °C
Drážka délky 42 mm	Naměřená hodnota	42,098	42,092	42,106	42,107	42,098	42,115
Drážka délky 42 mm	Empiricky vypočtená hodnota	42,098	42,089	42,107	42,107	42,098	42,117
Výstupek Ø 30 mm	Naměřená hodnota	29,910	29,905	29,920	29,911	29,904	29,922
Výstupek Ø 30 mm	Empiricky vypočtená hodnota	29,910	29,904	29,916	29,911	29,905	29,918

Obr. 3-3: Srovnání naměřených a empiricky vypočtených hodnot roztažnosti pro materiál 6061 [vlastní]

U hliníkové slitiny pro vybrané prvky byla roztažnost materiálu v reálu také blízko empirickým výpočtům, i když pro tyto konkrétní prvky nebyly tyto hodnoty tak blízko, jako tomu bylo u oceli 12 050. Ve třech případech (žluté buňky v tabulce výše) byla odchylka reálné hodnoty od očekávané hodnoty odlišná, a to konkrétně o maximálně 0,004 mm.

V celkovém pohledu ale tyto odchylky nejsou nijak zásadní, vezme-li se v úvahu možná lehká změna teploty v průběhu samotného měření (postupné vyrovnávání nestandardní laboratorní teploty dílu se standardní teplotou laboratorního prostředí). Tímto přídatným negativním faktorem, který je ale globálně pro potřeby experimentů této diplomové práce zanedbáván, se zabývá další podkapitola 3.1.4., ve které bude uvedeno ohraničení potenciálního vlivu takovéto změny teploty v průběhu jednotlivých měření.

Srovnání naměřených a empiricky získaných hodnot [mm]		ABS - č. 1			ABS - č. 2		
Prvek	Hodnota	Nominálně naměřená hodnota	Ochlazený díl 10,26 °C	Zahřátý díl 30,21 °C	Nominálně naměřená hodnota	Ochlazený díl 10,21 °C	Zahřátý díl 30,79 °C
Drážka délky 42 mm	Naměřená hodnota	41,709	41,566	41,665	41,573	41,555	41,601
Drážka délky 42 mm	Empiricky vypočtená hodnota	41,709	41,679	41,740	41,573	41,543	41,606
Výstupek Ø 30 mm	Naměřená hodnota	29,683	29,663	29,709	29,692	29,726	29,750
Výstupek Ø 30 mm	Empiricky vypočtená hodnota	29,683	29,662	29,705	29,692	29,671	29,716

Obr. 3-4: Srovnání naměřených a empiricky vypočtených hodnot roztažnosti pro materiál ABS [vlastní]

Nejhůře ze všech materiálů si v tomto srovnání vede materiál ABS, u kterého byly ve čtyřech z osmi přepočítávaných případů odchylky reálně naměřených hodnot od empiricky vypočítaných výrazné, v některých případech dokonce vyšší než 0,1 mm. Z celkového pohledu je u tohoto materiálu variabilita nejvyšší, což už ukazuje graf 3-2, ze kterého je patrná velká variabilita odchylek kompenzovaných výsledků vůči hodnotám očekávaným.

Z tabulky na obrázku 3-4 lze na příkladu vidět, že materiál se v některých případech choval opravdu velmi nestandardně. Například u ochlazeného dílu č. 2 a měření výstupku Ø 30 mm lze vidět, že naměřená hodnota byla dokonce vyšší (29,726 mm), než hodnota naměřená při přibližně 20 °C (29,692 mm), což je z fyzikálního hlediska naprosto opačný jev, než říká teorie.

Samozřejmě i u tohoto materiálu je zapotřebí omezit možný vliv lehké změny teploty v průběhu měření (kapitola 3.1.4.)

U součástí vyrobených z materiálu ABS se vzhledem k prvním datům vykazujících výrazně nižší přesnost naměřených hodnot nabízí otázka o možném vlivu způsobu výroby těchto součástí. Díly byly vyrobeny technologií 3D tisku, jejíž přesnost je samozřejmě oproti konvenčnímu obrábění řádově nižší, navíc vezme-li se v úvahu konkrétní kvalita 3D tiskárny a použitý materiál. Obecně řečeno mají plastové díly širší rozsahy výrobních tolerancí než díly vyráběné z oceli či hliníku – minimální tolerance bývá obvykle stanovena na $\pm 0,3$ mm.

Je ovšem nutné podotknout, že v reálu při tomto měření nebylo cílem vyrobit součásti 3D tiskem co nejbližší výkresové specifikaci a následně srovnávat přesnost výroby s obráběnými díly. Cílem bylo získat informaci z měřicího stroje, jehož opakovatelnost a přesnost by měla být vhodná i pro plastové díly vyráběné technologií 3D tisku (po výše zmíněných drobných úpravách vzhledem ke kvalitě tisku).

Vzhledem k použitému rubínovému doteku průměru 3 mm je také možné vyloučit, že samotné dotykové měření na tomto CMM by generovalo hrubé chyby vzhledem k textuře s výrazně vyšší drsností povrchu.

3.1.4 Ověření vlivu změny teploty na vyhodnocení měření

Během experimentů prováděných v rámci této diplomové práce byla prováděna měření tepelně ovlivněných dílů oproti laboratorní teplotě 20 °C. Každý materiál má tendenci se v závislosti na své chemické struktuře postupně teplotně srovnávat s okolím. Různé materiály odvádějí teplo do okolí různě, avšak již v úvodu praktických měření bylo vyzkoušeno a zjištěno, že v rámci jednoho měřicího cyklu (cca 20 minut) byla maximální odchylka teploty od začátku měřicího cyklu 1 °C. Tato teplotní diference byla následně pro potřeby této práce zanedbána.

Přesto lze vliv této změny znázornit na výše uvedených příkladech, aby bylo potvrzeno, že tato teplotní změna na celkové výsledky nemá nijak zásadní vliv a je možno ji ve vyhodnocení dále zanedbat.

Srovnání naměřených a empiricky získaných hodnot - uvažování teplotní změny 1 °C [mm]		12 050 - č. 1			12 050 - č. 2		
Prvek	Hodnota	Nominálně naměřená hodnota	Ochlazený díl 11,16 °C	Zahřátý díl 29,11 °C	Nominálně naměřená hodnota	Ochlazený díl 11,47 °C	Zahřátý díl 29,90 °C
Drážka délky 42 mm	Naměřená hodnota	42,084	42,079	42,087	42,077	42,072	42,081
Drážka délky 42 mm	Empiricky vypočtená hodnota	42,084	42,080	42,088	42,077	42,073	42,082
Výstupek Ø 30 mm	Naměřená hodnota	29,909	29,905	29,914	29,918	29,914	29,924
Výstupek Ø 30 mm	Empiricky vypočtená hodnota	29,909	29,906	29,912	29,918	29,915	29,921

Obr. 3-5: Srovnání naměřených a empiricky vypočtených hodnot roztažnosti pro materiál 12 050 s teplotní odchylkou 1 °C [vlastní]

Pro materiál 12 050 se při započítání možné změny teploty během měření ve srovnání s původními hodnotami v tabulce na obrázku 3-2 odchýlila jedna z hodnot z uvažovaného nejužšího rozptylu, ale odchylka o 1 µm není pro celkové vyhodnocení nijak zásadní.

Srovnání naměřených a empiricky získaných hodnot - uvažování teplotní změny 1 °C [mm]		6061 - č. 1			6061 - č. 2		
Prvek	Hodnota	Nominálně naměřená hodnota	Ochlazený díl 11,78 °C	Zahřátý díl 28,69 °C	Nominálně naměřená hodnota	Ochlazený díl 11,28 °C	Zahřátý díl 29,80 °C
Drážka délky 42 mm	Naměřená hodnota	42,098	42,092	42,106	42,107	42,098	42,115
Drážka délky 42 mm	Empiricky vypočtená hodnota	42,098	42,090	42,106	42,107	42,099	42,116
Výstupek Ø 30 mm	Naměřená hodnota	29,910	29,905	29,920	29,911	29,904	29,922
Výstupek Ø 30 mm	Empiricky vypočtená hodnota	29,910	29,905	29,916	29,911	29,905	29,918

Obr. 3-6: Srovnání naměřených a empiricky vypočtených hodnot roztažnosti pro materiál 6061 s teplotní odchylkou 1 °C [vlastní]

U hliníkové slitiny 6061 se při uvažování vyrovnání teploty dílu v průběhu měření ve srovnání s originálními hodnotami v tabulce na obrázku 3-3 také hodnoty příliš neměnily. Jedna z těchto hodnot se přiblížila do nejpřesnějšího rozsahu odchylky 2 µm od naměřené hodnoty, další hodnoty zůstaly v původních kategoriích odchylky a jejich změna nabyla maximálně 1 µm. Také v tomto případě je tedy případná změna teploty v průběhu měření zanedbatelná.

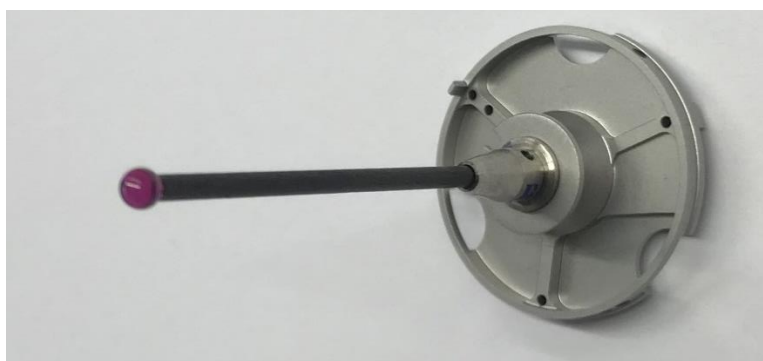
Srovnání naměřených a empiricky získaných hodnot - uvažování teplotní změny 1 °C [mm]		ABS - č. 1			ABS - č. 2		
Prvek	Hodnota	Nominálně naměřená hodnota	Ochlazený díl 11,26 °C	Zahřátý díl 29,21 °C	Nominálně naměřená hodnota	Ochlazený díl 11,21 °C	Zahřátý díl 29,79 °C
Drážka délky 42 mm	Naměřená hodnota	41,709	41,566	41,665	41,573	41,555	41,601
Drážka délky 42 mm	Empiricky vypočtená hodnota	41,709	41,682	41,737	41,573	41,546	41,603
Výstupek Ø 30 mm	Naměřená hodnota	29,683	29,663	29,709	29,692	29,726	29,750
Výstupek Ø 30 mm	Empiricky vypočtená hodnota	29,683	29,662	29,703	29,692	29,673	29,713

Obr. 3-7: Srovnání naměřených a empiricky vypočtených hodnot roztažnosti pro materiál ABS s teplotní odchylkou 1 °C [vlastní]

Vzhledem k výrazně odlišné hodnotě délkové teplotní roztažnosti materiálu ABS ve srovnání s ocelovou a hliníkovou slitinou se při uvažování změny teploty v průběhu měření o 1 °C hodnoty měnily o něco více, než jak tomu bylo u předchozích materiálů (u nich max. odchylka 1 µm). V případě tohoto materiálu se hodnoty měnily o 2 – 3 µm v různých směrech (blíže, či dále od nominální hodnoty). Avšak vzhledem k celkově velké míře kolísavosti vybraných hodnot tyto potenciální vlivy budou při dalších vyhodnoceních také zanedbány.

3.1.5 Vyloučení vlivu samotného měření

Pro potřeby měření v rámci této diplomové práce bylo využito otočné měřicí hlavy s rubínovým dotykem průměru 3 mm. Cílem využití tohoto doteku s vyšším průměrem bylo zamezit nepřesnostem měření vlivem různorodé textury povrchu, a to hlavně u součástí z materiálu ABS, které byly vyrobeny postupným nanášením vrstev materiálu technologií 3D tisku. Tento materiál není vhodný k případnému dokončování s využitím klasických obráběcích technologií, s výjimkou ručních nástrojů, které byly pro některé z válcových výstupků na tyto díly využity (ruční výstružníky). Ostatní plochy zůstaly v původním stavu - tedy neobrobeny. Použitím doteku s vyšším průměrem tak lze obecně zabránit případným nepřesnostem v měření kvůli nerovnoměrné textuře povrchu.



Obr. 3-8: Použitý rubínový dotek Ø 3mm [vlastní]

Vysoká různorodost výsledků pro materiály ABS by tedy z tohoto hlediska neměla být způsobena výraznými chybami způsobenými měřením. V rámci výsledků měření tohoto materiálu je ovšem zřejmá velká variabilita (příklad lze vidět na obrázku 3-9). Při tak zásadní variabilitě je poté velmi složité určit jakoukoliv potenciální hrubou chybu

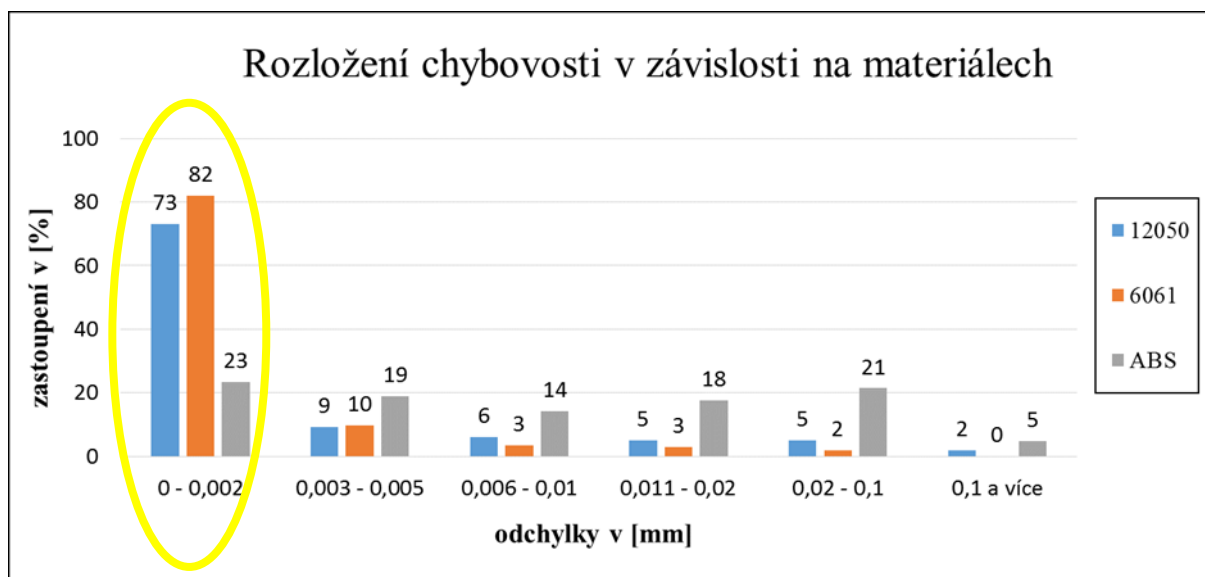
měření, také vzhledem k výše ověřenému nestabilnímu chování tohoto materiálu po zásadním teplotním zásahu.

ABS - č. 1			ABS - č. 2		
Nominálně naměřená hodnota	Ochlazený díl s kompenzací	Zahřátý díl s kompenzací	Nominálně naměřená hodnota	Ochlazený díl s kompenzací	Zahřátý díl s kompenzací
1.3.21 20,03°C	15.3.21 10,98°C	17.3.21 30,49°C	1.3.21 19,93°C	15.3.21 10,42°C	30.3.21 29,88°C
11,836	11,836	11,852	12,168	12,104	12,107
11,878	11,887	11,894	11,993	11,975	11,982
11,792	11,844	11,846	11,857	11,843	11,844
11,619	11,711	11,707	11,819	11,813	11,809
11,509	11,605	11,598	11,760	11,754	11,753
11,728	11,776	11,779	11,920	11,897	11,899
0,127	0,128	0,124	0,117	0,052	0,048
0,079	0,074	0,072	0,016	0,073	0,049
0,159	0,068	0,074	0,119	0,126	0,132
0,231	0,071	0,068	0,120	0,128	0,124
0,231	0,071	0,068	0,120	0,128	0,124

Odchylky [mm]
0 - 0,002
0,003 - 0,005
0,006 - 0,010
0,011 - 0,020
0,020 - 0,1
0,1 a více

Obr. 3-9: Část databáze naměřených výsledků pro materiál ABS [vlastní]

Pro potenciální odhalení hrubých chyb pro zbývající dva materiály lze použít již výše uvedený graf 3-2. V první části grafu (označené žlutě na obrázku níže), která reprezentuje celkový percentil hodnot, které se po kompenzaci odchylovaly od nominálně naměřené hodnoty nejvýše o maximální chybu stroje, lze mezi ocelí a hliníkovou slitinou vidět nečekaně velký rozdíl.



Obr. 3-10: Zvýrazněná část výše uvedeného grafu 3-2 [vlastní]

Zatímco pro materiál 6061 je podíl takto přesných hodnot roven 82 %, pro ocel 12 050, která je čistě teoreticky dle koeficientu délkové roztažnosti méně teplotně náchylná, je podíl těchto hodnot nižší o 9 %, celkově čítající 73 %. Poměry v dalších kategoriích odchylek jsou již pro oba materiály víceméně srovnatelné.

Při pohledu do databáze naměrů lze u dílu č. 2 z materiálu 12 050 vidět nečekané odchylky hodnot naměřených za přibližné teploty 20 °C se spuštěnou funkcí teplotních kompenzací oproti všem ostatním získaným hodnotám. Ve velké části níže zvýrazněných hodnot na obrázku 3-11, které byly získány přepočtem za pomoci teplotních kompenzací a měly by se přiblížit nominální hodnotě, lze vidět, že tyto hodnoty se po přepočtení softwarem příliš neliší mezi sebou, zatímco odchylky od nominálních hodnot v prvním sloupci jsou ve většině případů výraznější.

Z tohoto důvodu lze usoudit, že v průběhu měření pro získání hodnot v prvním sloupci (měření za 20° C bez použití kompenzací) s vysokou mírou pravděpodobnosti došlo k neznámé chybě měření. Touto chybou byly výrazně ovlivněny výsledně získané hodnoty, které jsou výchozími pro vyhodnocení celého experimentu a mají tak negativní vliv na celkovou přesnost kompenzací pro materiál 12 050 oproti materiálu 6061.

Z tohoto důvodu bylo provedeno nastavbové měření dílu č. 2 materiálu 12 050 pro dodatečné ověření správnosti měření.

12 050 - č. 2			
Nominálně naměřená hodnota	Nominální teplota s kompenzací	Ochlazený díl s kompenzací	Zahřátý díl s kompenzací
26.2.21 19,97°C	26.2.21 19,88°C	15.3.21 11,00°C	17.3.21 29,33°C
11,788	11,814	11,814	11,814
11,811	11,800	11,815	11,815
0,026	0,029	0,010	0,006
0,094	0,015	0,012	0,011
0,094	0,015	0,012	0,011
19,479	18,486	18,480	18,477
14,032	14,035	14,036	14,035
0,062	0,049	0,050	0,045
12,016	12,021	12,024	12,023
0,072	0,053	0,051	0,052
10,009	10,014	10,016	10,016
0,067	0,055	0,056	0,056
6,002	6,009	6,012	6,011
0,080	0,050	0,036	0,036
0,343	0,038	0,034	0,029

Odchylky [mm]
0 - 0,002
0,003 - 0,005
0,006 - 0,010
0,011 - 0,020
0,020 - 0,1
0,1 a více

Obr. 3-11: Část databáze naměřených výsledků pro díl č. 2 materiálu 12 050 [vlastní]

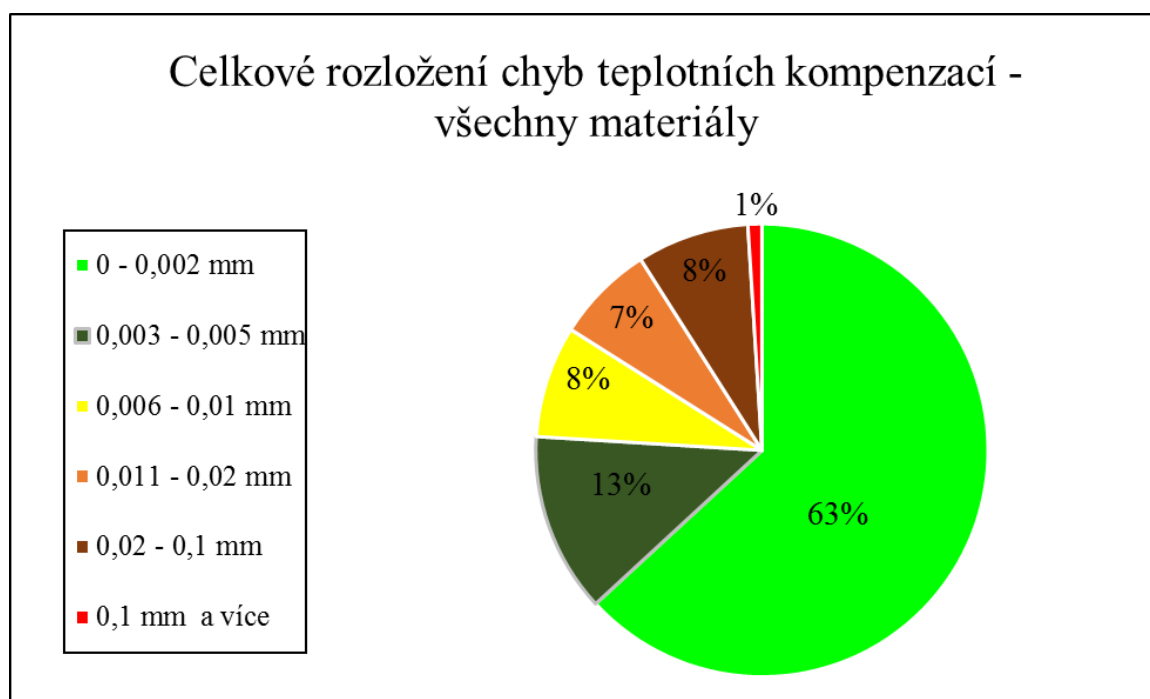
3.1.6 Opakované vyhodnocení měření po dodatečném měření dílu č. 2 materiálu 12 050

Po nadstavbovém měření byla provedena celková analýza výsledků, obdobně jako v kapitolách 3.1.1 a 3.1.2. Na základě nově provedeného měření lze konstatovat, že u tohoto měření bylo dosaženo výsledných hodnot blíže původnímu očekávání, než tomu bylo u původního měření (výsledky dále v kapitole 3.2).

Vzhledem k nepřesnosti prvního měření pro díl č. 2 materiálu 12 050 je tedy ve vyhodnocení dále počítáno z hodnotami získanými v opakovaném měření a původní hodnoty jsou nadále zanedbány.

Pravá příčina výrazných nepřesností u původního měření není známá, ovšem s největší pravděpodobností došlo během měření k nepatrnému pohybu dané součásti, kvůli kterému se mnohé měřené prvky výrazně odchylovaly.

Při přehodnocení se započtením nadstavbově provedeného měření bylo provedeno přepočítání celkových nepřesností pro všechny materiály, což lze vidět na grafu 3-3. Celkové zastoupení hodnot v nejpřesnější skupině (označené světle zelenou barvou) stoupl celkově o 4 %.



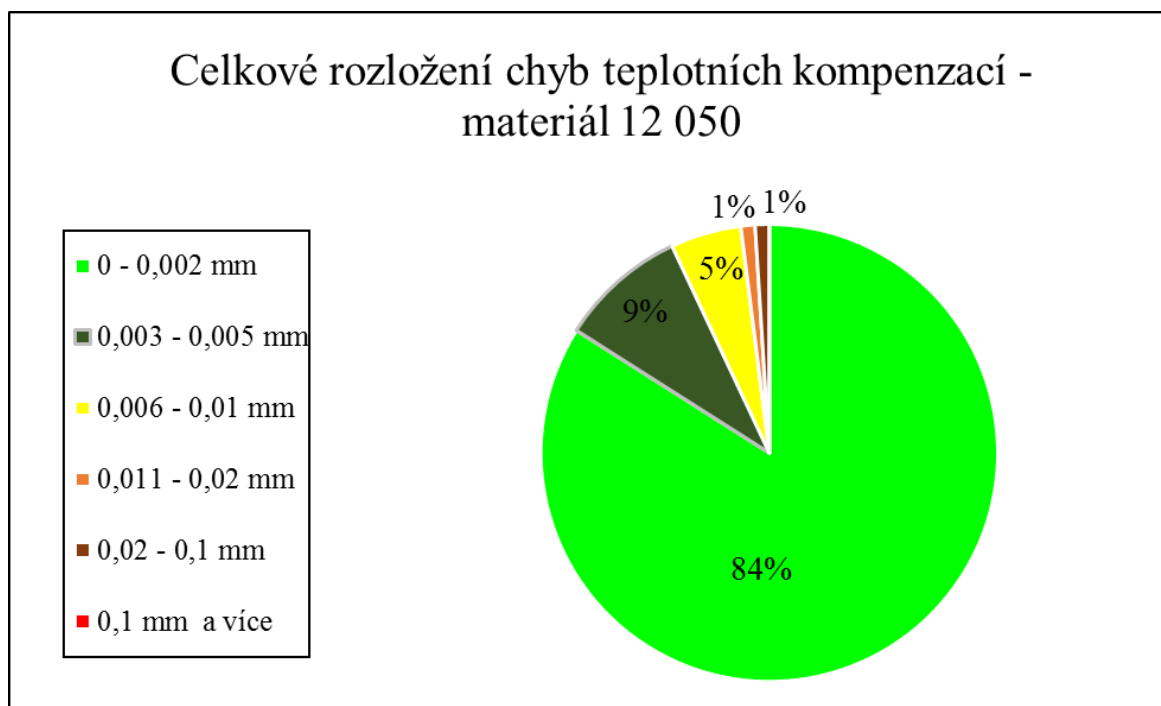
Graf 3-3: Celkové rozložení chyb teplotních kompenzací – přepočteno po nadstavbovém měření

3.2 Materiál 12 050

3.2.1 Celkové vyhodnocení pro materiál 12 050

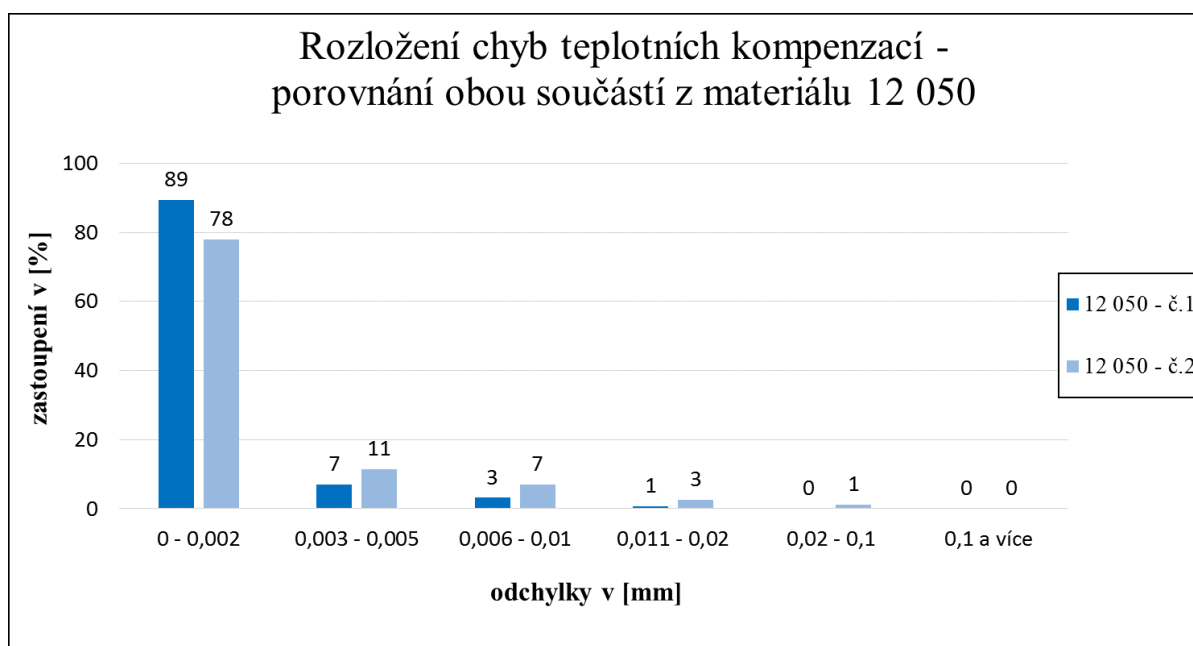
Ocelová slitina 12 050 by vzhledem ke svým chemickým vlastnostem měla být nejméně teplotně roztažným materiálem. Z tohoto důvodu by také potenciální chyba v t teplotní odchylce od nominálního měření a následné teplotní kompenzaci měla být u tohoto materiálu co nejmenší.

Po opakovaném měření pro druhý vyrobený vzorek z tohoto materiálu se celková přesnost kompenzace teploty výrazně vylepšila, což lze vidět ze souhrnného koláčového grafu níže. Celkových 84 procent měřených hodnot se vešlo do teoreticky největší nepřesnosti stroje, se kterou je třeba počítat. Dalších 9% a 5% naměrů bylo vykompenzováno s nepřesností do 5 μm , popř. 10 μm od nominální hodnoty, což celkově zahrnuje 97% hodnot, které byly po použití teplotních kompenzací odchýlené maximálně 10 μm od nominálně naměřených hodnot.



Graf 3-4: Celkové rozložení chyb teplotních kompenzací – materiál 12 050

Při srovnání obou vyrobených vzorků je stále možné vypořadovat drobné odchylky mezi oběma díly. Úspěšnost teplotní kompenzace prvního dílu je ze srovnání zobrazené v grafu 3-5 vyšší, než pro druhý vyrobený vzorek. Přesto lze říci, že pro oba materiály měla kompenzace obdobné chování.



Graf 3-5: Celkové rozložení chyb teplotních kompenzací – rozdíl mezi součástmi č. 1 a č. 2

3.2.2 Analýza odchylek ve výsledcích pro materiál 12 050

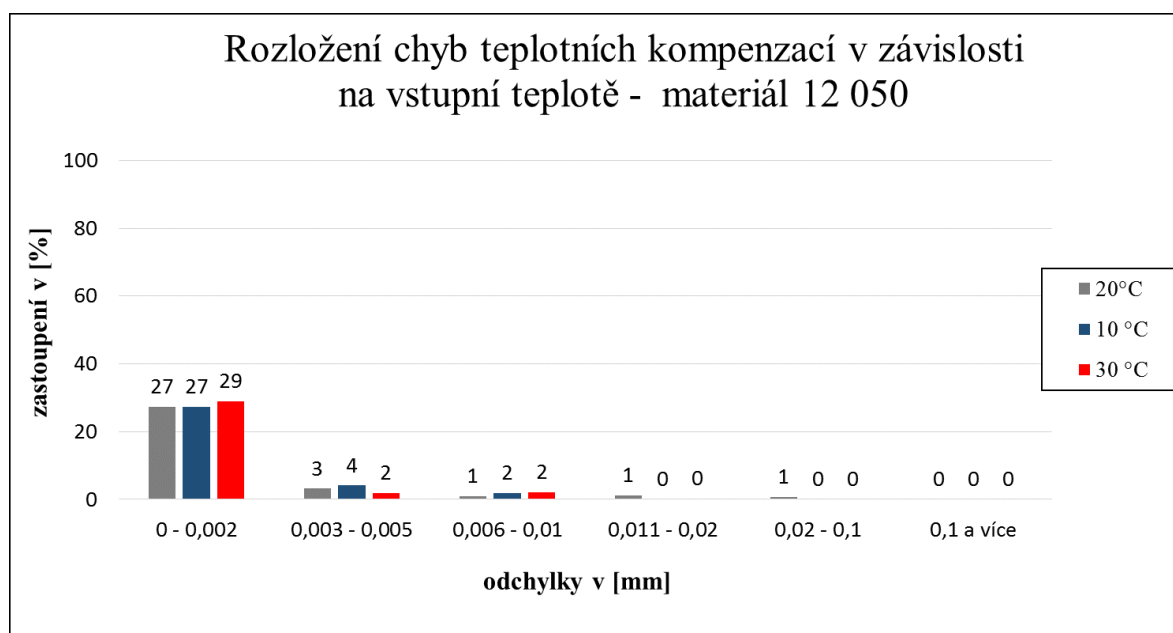
Vzhledem k tomu, že teplotní kompenzace byly aplikovány z různých výchozích teplot, a také byly proměřovány různé geometrické prvky, je pro každý materiál vyhodnoceno více faktorů, a to konkrétně:

- a) přesnost teplotních kompenzací v závislosti na vstupní teplotě,
- b) přesnost teplotních kompenzací v závislosti na měřených geometrických prvcích.

a) Přesnost teplotních kompenzací v závislosti na vstupní teplotě

Celkově do vyhodnocení přesnosti teplotních kompenzací vstupovaly výsledky z celkem tří variant měření vzhledem ke vstupní teplotě, a to konkrétně:

- teplotní kompenzace dílu, který nebyl teplotně ovlivněn (teplota blízká 20 °C), a tím pádem z hlediska roztažnosti by neměl vykazovat téměř žádné odchylky,
- teplotní kompenzace dílu, který byl ochlazený na cca 10 °C,
- teplotní kompenzace dílu, který byl zahřátý na cca 30 °C.



Graf 3-6: Přesnost teplotních kompenzací v závislosti na vstupní teplotě – mat. 12 050

Z rozdělení na grafu 3-6, které ukazuje rozložení hodnot pro jednotlivé typy měření podle vstupní teploty, lze vidět, že mezi jednotlivými skupinami měření nejsou žádné zásadnější rozdíly. Nejzásadnější odchylky spadající do skupin s větší nepřesností kompenzace překvapivě spadají do kompenzace z teploty blízké 20 °C. Toto měření by čistě teoreticky mělo být nejméně náchylné chybám, jelikož teplota se od měření za teploty 20 °C prakticky neliší, tím pádem ani nízká teplotní roztažnost materiálu by neměla dovolit chybu zapříčiněnou velkým rozdílem mezi fyzicky naměřeným rozměrem a výsledkem získaným použitím kompenzace.

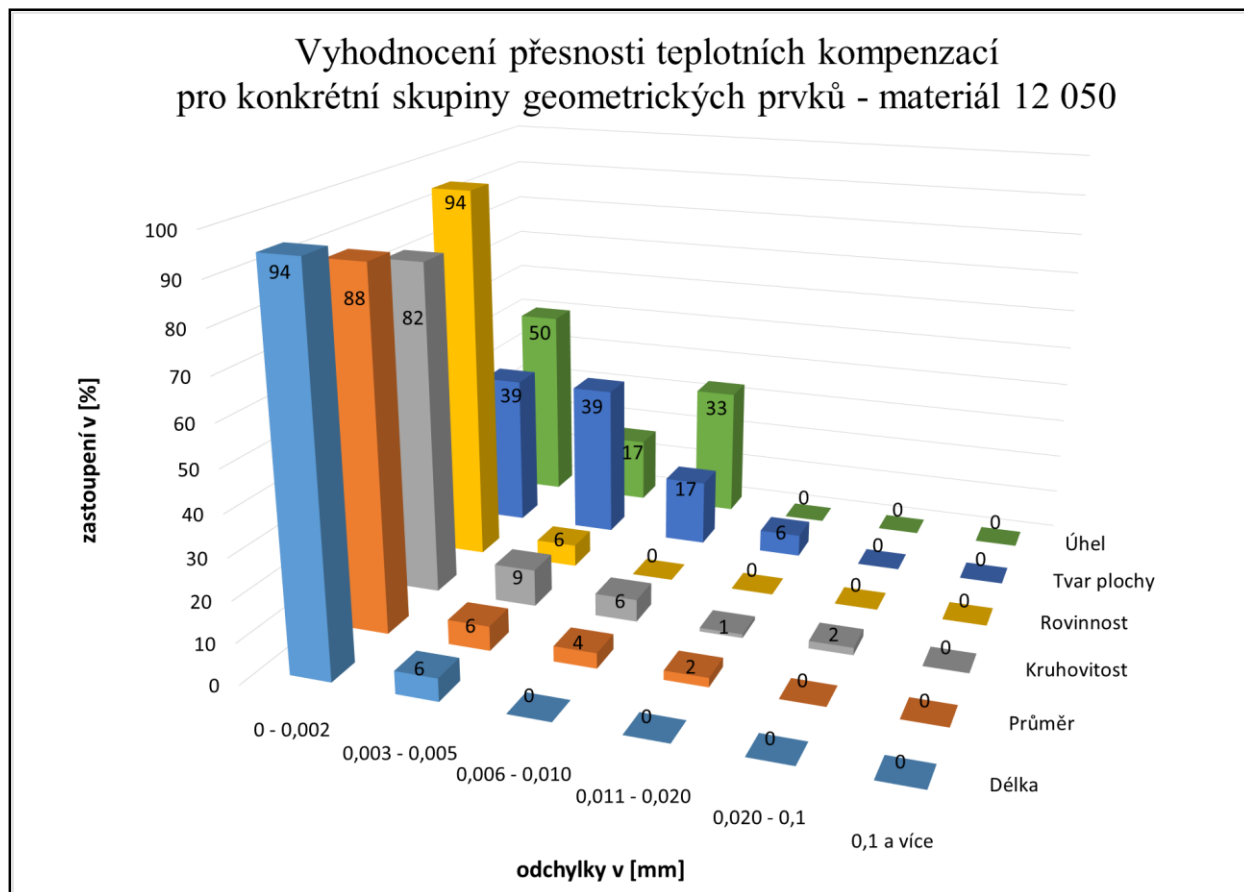
b) Přesnost teplotních kompenzací v závislosti na měřených geometrických prvcích

Měřená součást byla navržena tvarově komplikovaně tak, aby bylo možné v rámci měření získat hodnoty z různých geometrických prvků. V případě, že teplotní kompenzace vykazují odchylky od matematicky očekávané hodnoty, je zapotřebí se zaměřit také na variabilitu výsledků vztahujících se na jednotlivé tvary a prvky.

Naměřené hodnoty byly rozděleny celkem na šest skupin prvků, mezi kterými lze teoreticky sledovat různé chování teplotních kompenzací, a to konkrétně:

- délkové rozměry,
- průměry,
- kruhovitosti,
- rovinnosti,
- tvary plochy,
- úhel (spíše doplňující informace – pouze jedna hodnota v každém měřicím cyklu).

Pro odchylky kompenzací, které jsou větší než mnohokrát zmiňované 2 μm od originálně naměřené hodnoty, je možné dále z naměřených dat provést analýzu konkrétně měřených geometrických prvků a jejich odchylek dle výše uváděných skupin.



Graf 3-7: Přesnost teplotních kompenzací v závislosti na měřeném prvku – mat. 12 050

Na grafu 3-7 je vyobrazeno kompletní rozložení všech naměřených hodnot dle toho, jaký tvarový, či geometrický prvek byl měřen. Vyhodnocení je v procentech, přičemž každé měřené skupině přísluší rozdílný počet hodnot, který byl na jednotlivých součástech získán a použit k výsledné statistice, konkrétně v číslech to je:

- délkové rozměry – 36 hodnot,
- průměry – 132 hodnot,
- kruhovitosti – 108 hodnot,
- rovinnosti – 18 hodnot,
- tvary plochy – 18 hodnot,
- úhel – 6 hodnot.

První dvě skupiny přesnosti, jak již bylo výše zmíněno, mají zastoupení nejhojnější (celkem 93% naměřených hodnot) a každá skupina měřených geometrických a tvarových prvků zde má stále své zastoupení.

V dalších skupině přesnosti kompenzování (odchylka 6 – 10 μm) existují již dvě skupiny, ve kterých už nejsou procentuálně zastoupeny žádné hodnoty – konkrétně délkové rozměry a rovinnosti. Znamená to, že všechny kompenzované hodnoty délek a rovinností byly přesnější. Pro jiné prvky však i v této skupině odchylek 6 – 10 μm lze nalézt hodnoty s relativně vysokým procentuálním zastoupením, zejména potom hodnoty spadající do skupiny náměrů tvarů plochy (celkových 17% z této skupiny) a také hodnoty pro úhel (33% z hodnot úhlů). Úhly mají ovšem pouze jedno zastoupení na každé součásti (jeden úhlovitý výběžek 20°) a informace o nich je tedy spíše informativní, protože nedokáže vyjádřit prakticky žádnou rozměrovou variabilitu. Toto platí nejen pro vyhodnocení v rámci ocelové slitiny, ale také pro oba další materiály, jelikož pro všechny součásti byl předlohou jeden shodný model.

Další skupina přesnosti (odchylka 0,011 – 0,020 mm od nominální hodnoty) obsahuje již menší procentuální zastoupení – v celkovém součtu jsou to již pouze 2%, která jsou ovšem stále rozprostřená mezi vícero skupin měřených prvků.

Poslední skupinou měřených prvků, která neměla ve všech předchozích skupinách přesnosti 100% svých hodnot, je kruhovitost, jejíž 2% výsledků jsou nejméně přesné ze všech hodnot materiálu 12 050, a spadají konkrétně do rozsahu odchylky 0,020 – 0,1 mm od nominální hodnoty.

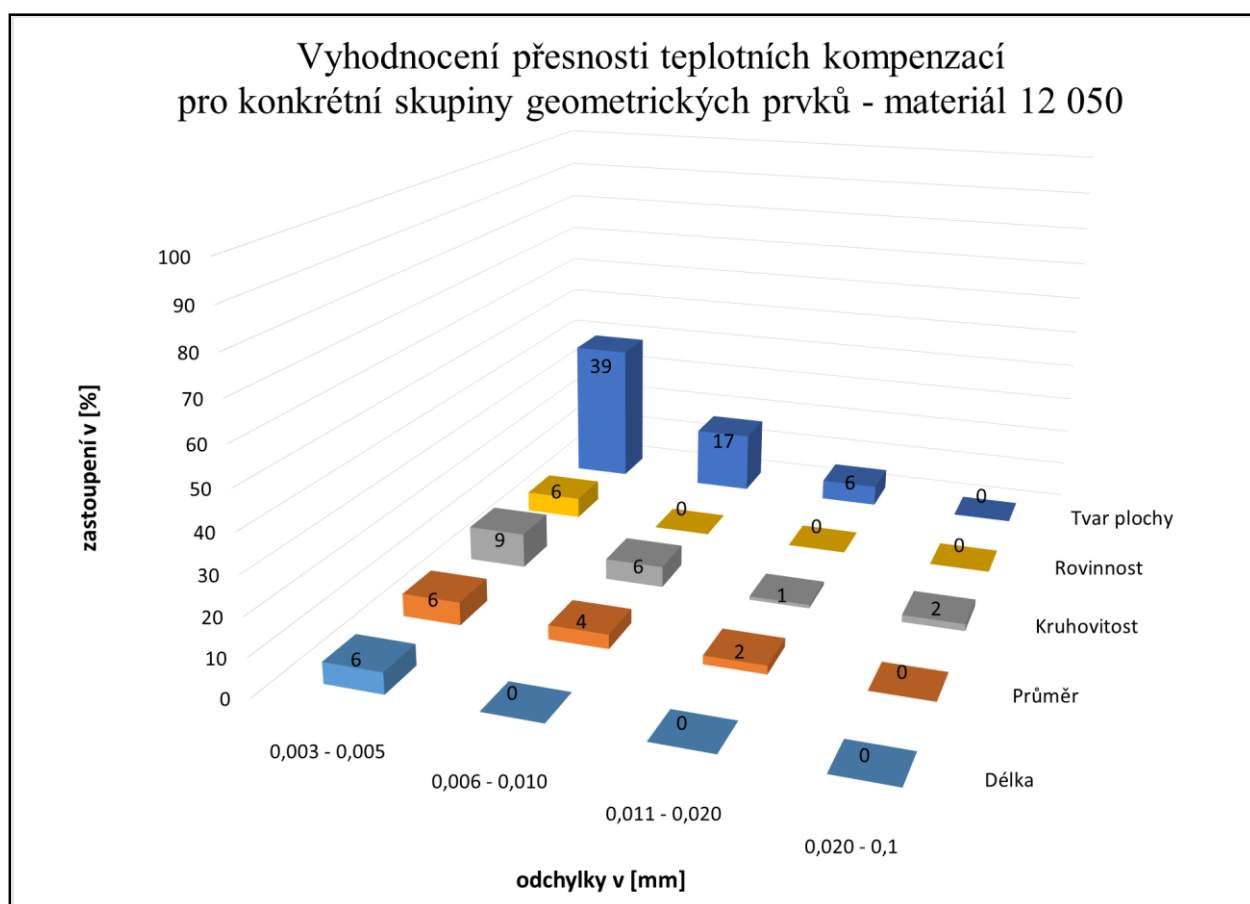
Pro další analýzu těchto dat je třeba si určit, pro jaké rozsahy nepřesností je stále zajímavé si získané výsledky rozebrat podrobněji. Celkový součet hodnot v prvních dvou skupinách činí výše zmiňovaných 93%. První skupinu hodnot lze považovat za bezchybné výsledky v rámci přesnosti měřicího stroje, hodnoty ve druhé skupině jsou již menšími odchylkami od očekávaných hodnot, i přesto že se do tohoto rozsahu může projevit nepatrně také vliv změny teploty při měření (viz kapitola 3.1.4.). Přesto i odchylky v této skupině mohou být ve vyhodnocení zajímavé a proto jsou také součástí další analýzy.

Celkově jsou tedy pro materiál 12 050 uvažovány hodnoty nepřesnosti od 3 μm do 0,1 mm v rámci tohoto vyhodnocení za neuspokojivě přesné. Vyobrazení těchto hodnot k další analýze lze vidět z grafu 3-9 níže.

Systém vyhodnocení, podle kterého lze provést další podrobnější analýzu neshodných výsledků, byl zvolen dle potenciálních podobností a závislostí, které mezi jednotlivými neshodnými výsledky nastaly. Pro účely takového vyhodnocení lze využít hlavně tři parametrů, a to konkrétně:

- porovnání obou měřených dílů a zkoumání podobností pro konkrétní neshodné prvky,
- porovnání konkrétních neshodných prvků z hlediska velikosti měřeného prvku (různé hodnoty délek, průměrů apod.),
- závislost odchylek jednotlivých neshodných prvků na teplotě.

Pokud při takovémto vyhodnocení není možné dále nalézt závislost, tak je rozložení chyb teplotních kompenzací náhodné napříč různými prvky, což značně ztěžuje celkové vyhodnocení a další vymezení použitelnosti teplotních kompenzací na zkoumaném CMM Zeiss.



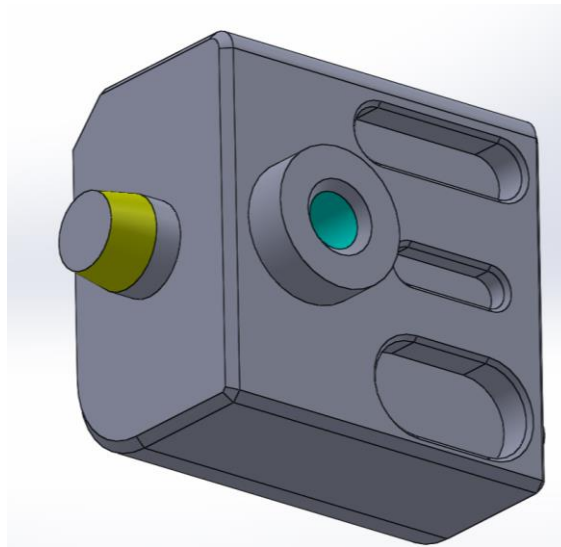
Graf 3-8: Naměřené hodnoty k další analýze – mat. 12 050

1) Délky – podrobnější vyhodnocení pro neshodné hodnoty

Pro 6% délkových rozměrů (celkově dva neshodné rozměry), které se nevešly do nejpřesnější skupiny, nelze konstatovat žádnou závislost, která by byla pro vyhodnocení dat přínosná. Obě tyto hodnoty jsou neshodné o 1 μm mimo rozsah, což není dále statisticky zajímavé.

2) Průměry - podrobnější vyhodnocení pro neshodné hodnoty

Pro kategorii průměru bylo možné nalézt závislost mezi oběma měřenými díly v neshodných výsledcích pro kuželový výstupek (označen žlutě na obrázku 3-12 níže), u kterého byly měřeny průměry ve třech různých úrovních. V součtu pro oba tyto díly se objevily na těchto třech prvcích neshodné hodnoty za různých teplot měření, nelze tedy jednotlivé odchylky vztáhnout na konkrétní díl, či konkrétní teploty. Nejméně přesné hodnoty vznikly překvapivě z měření s teplotou blízkou 20 °C se zapnutou funkcí teplotních kompenzací.



Obr. 3-12: Geometrické prvky s největšími chybami při měření průměru [vlastní]

Další neshodné hodnoty připadly na díru označenou modře na obrázku 3-12. U této díry ovšem nebylo možné nalézt žádné další závislosti s ostatními měřeními.

3) Kruhovitosti - podrobnější vyhodnocení pro neshodné hodnoty

Pro výsledky kruhovitostí nebylo možné najít žádné zjevné závislosti mezi vzniklými odchylkami při teplotních kompenzacích. Měření prvního dílu nevykázalo při měření kruhovitostí žádné chyby mimo rozsah $\pm 2 \mu\text{m}$ od nominálně naměřené hodnoty.

Pro druhý měřený díl se odchylky objevovaly nezávisle na teplotách, či velikostech kruhovitých útvarů. Nejzásadnější odchylky lze ze získaných dat vidět opět na měření za teploty cca 20° C se zapnutou funkcí teplotních kompenzací. Kompenzace ochlazeného a zahřátého dílu zde dosahovaly maximální nepřesnosti 0,01 mm od nominálně naměřené hodnoty.

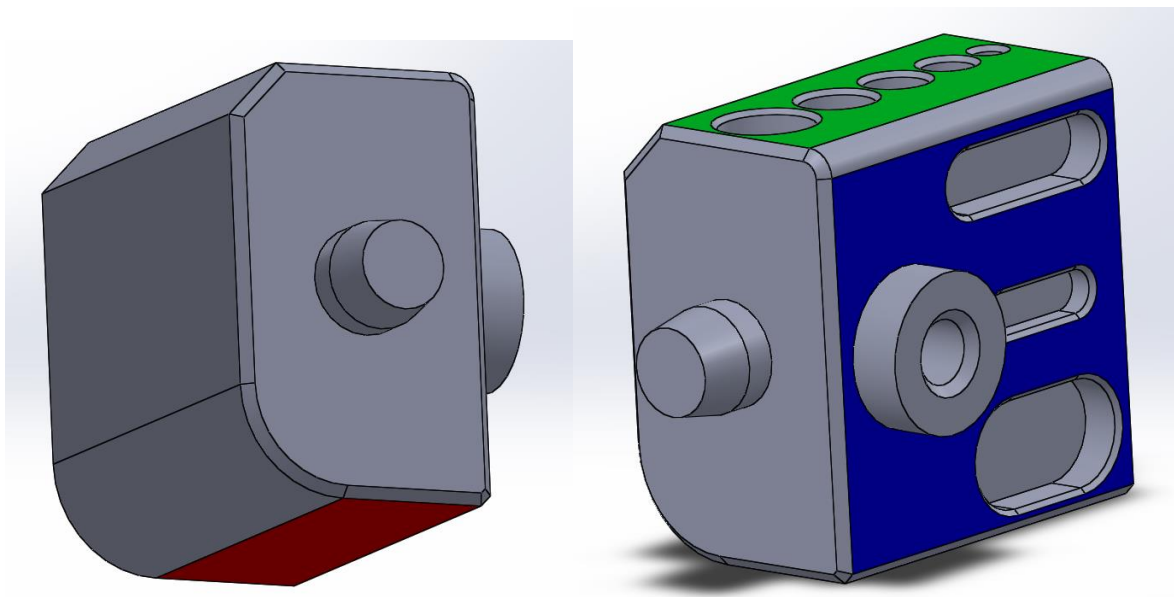
4) Rovinnosti - podrobnější vyhodnocení pro neshodné hodnoty

Pro měřené rovinnosti se odchyluje pouze 1 naměřená hodnota o 1 μm z nejužšího - obdobně jako tomu bylo u délkových rozměrů. Dále je tedy tato odchylka pro statistiku nezajímavá.

5) Tvary plochy - podrobnější vyhodnocení pro neshodné hodnoty

V rámci každé součásti byly celkem 3 plochy, které byly proměřovány na rovinnost a tvar plochy (viz obr. 3-13). Největší odchylky při kompenzování vykazuje plocha zabarvená červeně, a to u obou naměřených dílů. Na této ploše stroj nevykompenzoval správně hodnoty jak u ochlazeného, tak zahřátého dílu.

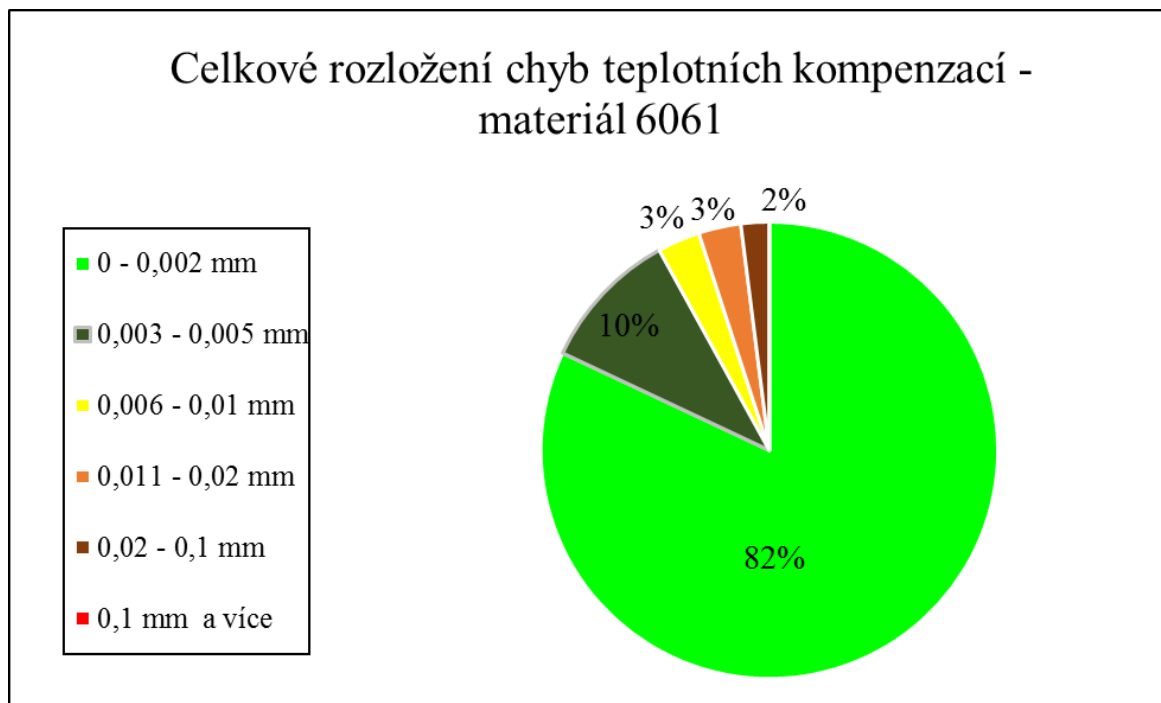
Obecně ale na všech těchto třech plochách vznikly během kompenzování nepřesnosti, nezávisle na jednotlivých dílech, či teplotách. Souhrnně lze tedy říci, že kompenzace při měření tvarů plochy je z dosud získaných hodnot nejvíce negativně variabilní, což je možné vidět i na procentuálních zastoupeních v grafech výše.



Obr. 3-13: Plochy na součásti měřené na rovinnost a tvar plochy [vlastní]

3.3 Materiál EN AW-6061

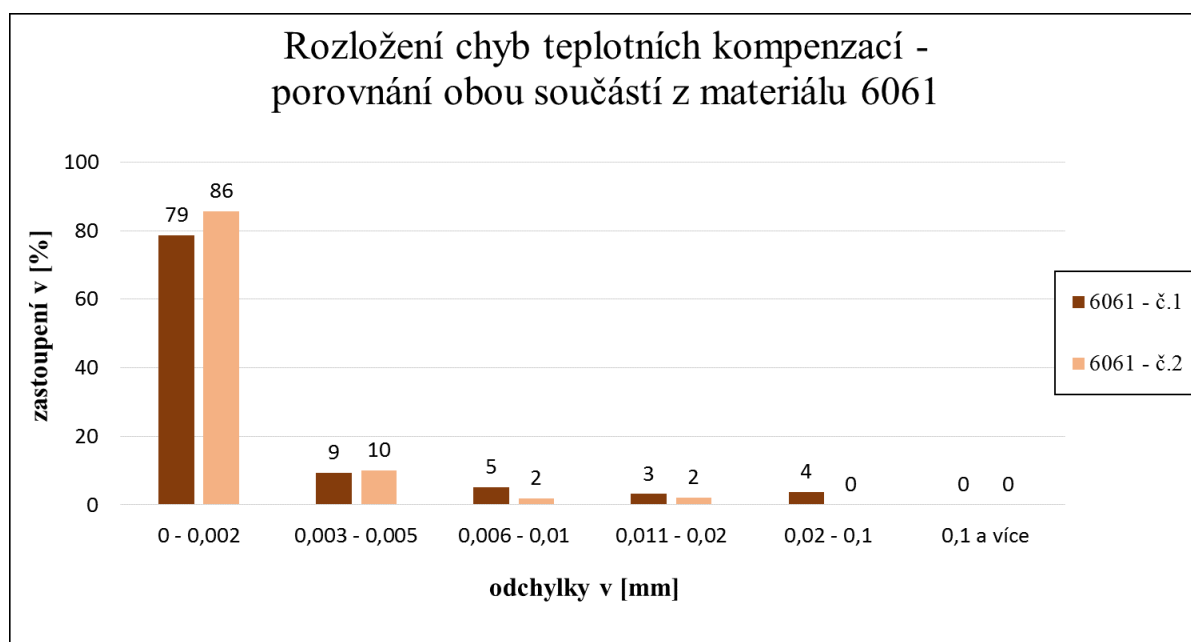
3.3.1 Celkové vyhodnocení pro materiál 6061



Graf 3-9: Celkové rozložení chyb teplotních kompenzací – materiál 6061

U hliníkové slitiny je celková situace velmi obdobná výsledkům ocelové slitiny. Jak lze vidět na grafu 3-9, celkových 82 % kompenzovaných hodnot se vešlo do rozestupu 2 μm od nominální hodnoty, dalších 10 % je poté v rozmezí $\pm 5 \mu\text{m}$ od referenčně naměřené hodnoty.

Ve srovnání obou dílů materiálu 6061 z grafu 3-10 lze vidět na první pohled také obdobný trend jako u ocelové slitiny – hodnoty prvního měřeného dílu jsou o něco méně přesné oproti dílu druhému – tento rozdíl je nejzásadněji zastoupen ve skupině odchylek 0,020 mm – 0,1 mm, kde výsledky prvního z dílů zaujímají celková 4 % z této součásti, zatímco všechny kompenzované hodnoty dílu druhého se vešly do rozsahu maximální odchylky do 0,02 mm.

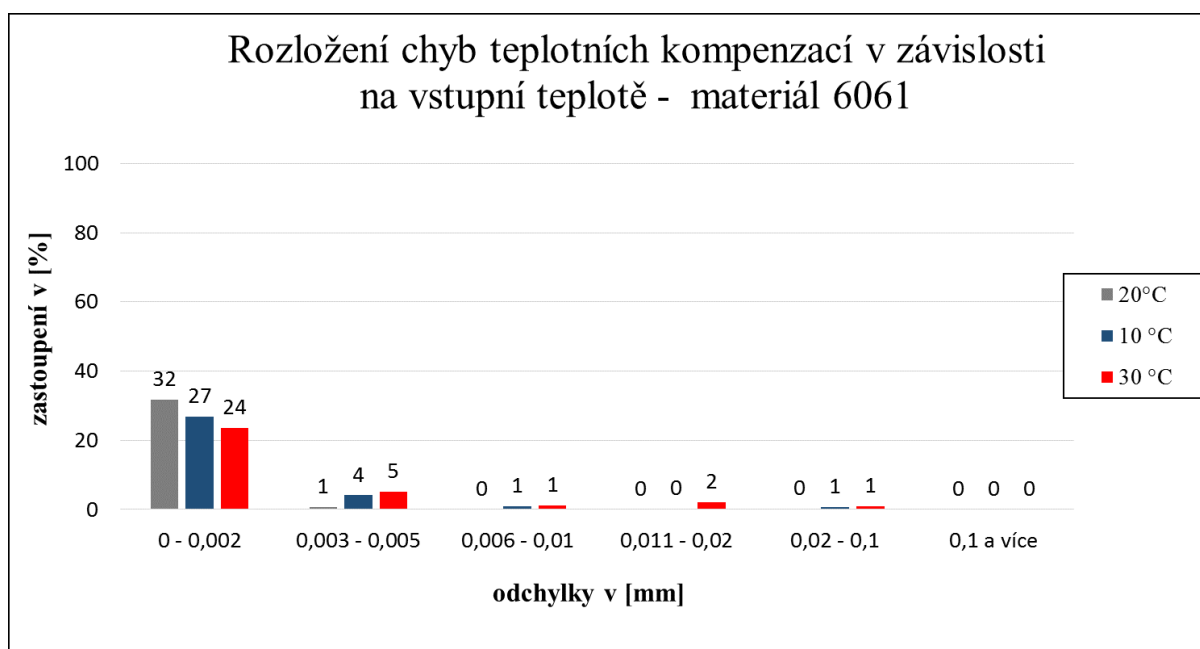


Graf 3-10: Celkové rozložení chyb teplotních kompenzací – rozdíl mezi součástmi č. 1 a č. 2

3.3.2 Analýza odchylek ve výsledcích pro materiál 6061

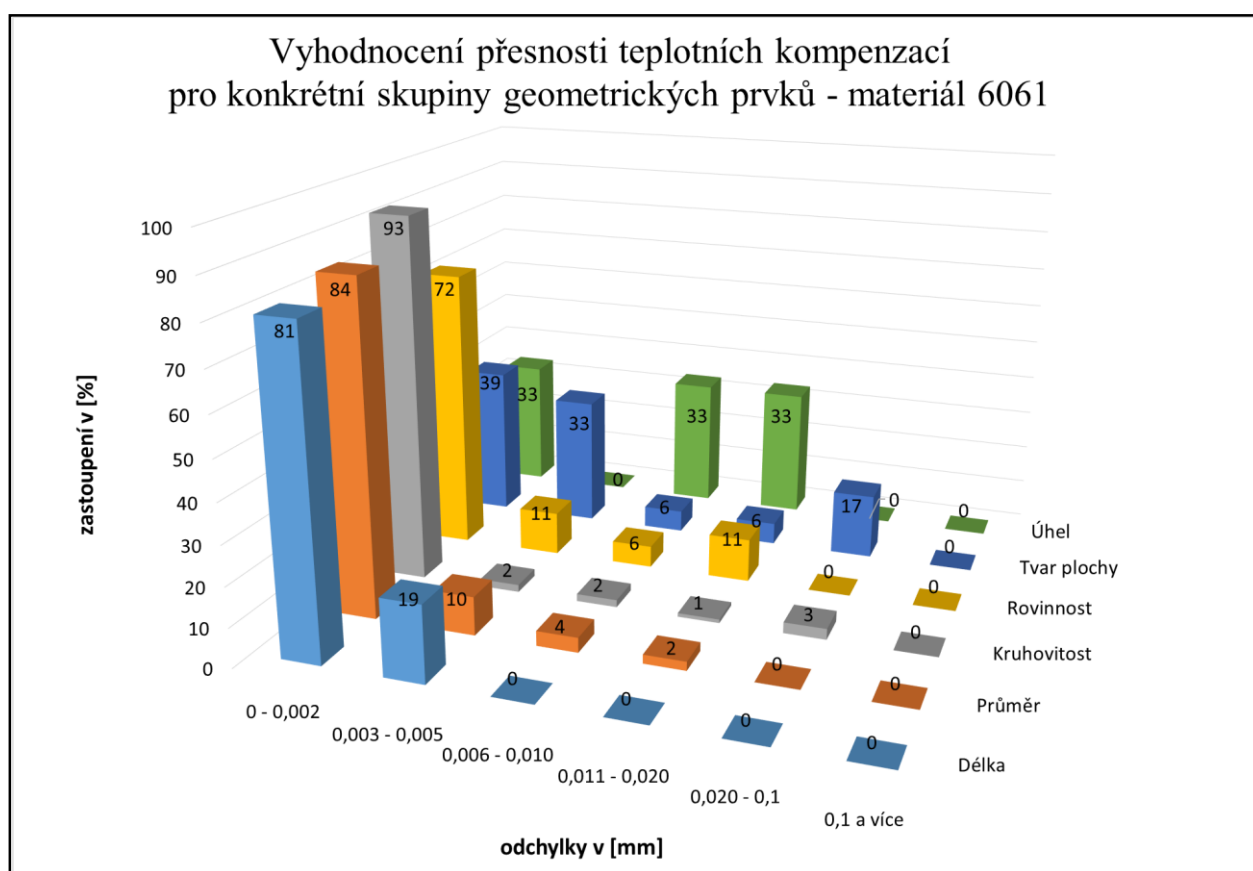
a) Přesnost teplotních kompenzací v závislosti na vstupní teplotě

Stejně jako pro ocelovou slitinu byla provedena podrobná analýza kompenzací pro jednotlivé rozsahy teplot souhrnně pro oba měřené díly – toto srovnání lze vidět v grafu 3-11. Ve srovnání s ocelovou slitinou byly hodnoty kompenzací měřené za přibližné teploty 20 °C relativně přesné. Celkové výsledky pro ochlazené a zahřáté díly jsou relativně srovnatelné s materiálem 12 050 – lehce hůře z tohoto srovnání vychází výsledky kompenzací, které vzešly z dílu zahřátého.



Graf 3-11: Přesnost teplotních kompenzací v závislosti na vstupní teplotě – mat. 6061

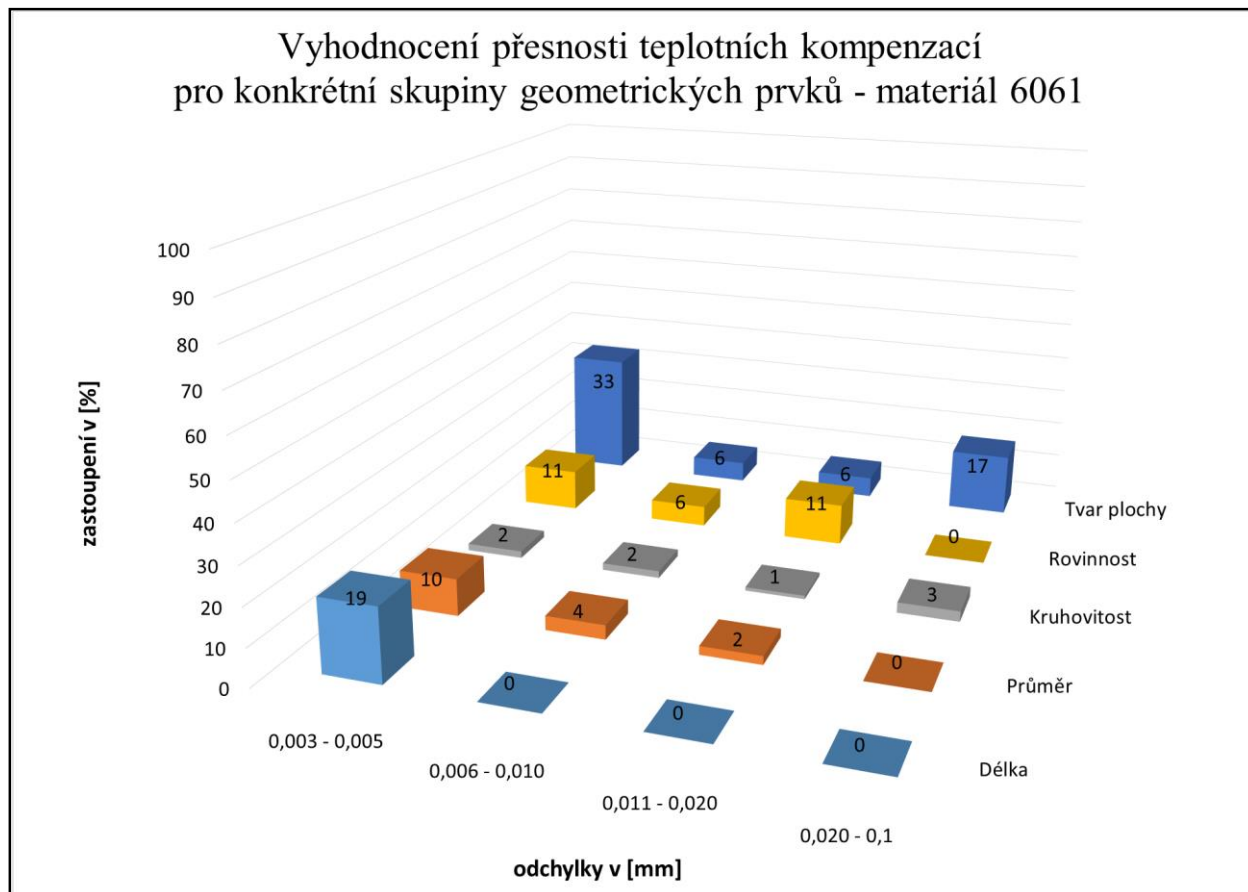
b) Přesnost teplotních kompenzací v závislosti na měřených geometrických prvcích



Graf 3-12: Přesnost teplotních kompenzací v závislosti na měřeném prvku – mat. 6061

Z grafu 3-12 lze vidět, že mezi jednotlivými geometrickými prvky jsou různé rozdíly týkající se přesnosti kompenzací. Nejlépe z tohoto srovnání vycházejí délkové rozměry, které mají 100% svých hodnot v rozmezí nepřesnosti do 5 μm od nominální hodnoty. Dále jsou relativně přesnými také měření průměrů a kruhovitostí.

Stejně jako pro materiál 12 050 je analýza dále zaměřena na odchylky vyšší než 3 μm – rozložení těchto hodnot lze vidět na grafu 3-13. Z vyhodnocení je opět vynecháno měření úhlu, z důvodu nízké variability měření.



Graf 3-13: Naměřené hodnoty k další analýze – mat. 6061

1) Délky - podrobnější vyhodnocení pro neshodné hodnoty

Celkem šest hodnot proměřovaných délkových rozměrů drážek na součásti vykázalo nepřesnosti v kompenzacích. Tyto nepřesnosti byly vždy maximálně odchýleny 5 μm od výchozí hodnoty.

Chyba se objevila u celkově čtyř různých rozměrů relativně nezávisle na sobě při porovnání obou součástí. Tyto odchylky nastaly u zcela odlišných měřených délek (8 mm, 20 mm, 38 mm, 42 mm), což nenapomáhá ukázat na konkrétní rozměry, které by v rámci kompenzace mohly být označeny za problémové. Co je naopak pro odchylky u těchto délkových rozměrů shodné, že většina z nich nastala při kompenzaci rozměru ze zahřátého dílu.

2) Průměry - podrobnější vyhodnocení pro neshodné hodnoty

Ve výsledcích u měření průměrů lze vidět z dosažených dat opakovanou chybovost u měření na kuželovém výstupku (obrázek 3-14) označeném žlutou barvou na obrázku 3-12. Stejně jako u materiálu 12 050, tak i u materiálu 6061 bylo kompenzování rozměrů při měření ve všech třech řezech na tomto kuželu velmi odchýleno od očekávaných hodnot. Odchyly se v tomto případě objevily u kompenzací obou ochlazených a zahřátých dílů, což je proti materiálu 12 050 rozdílné.

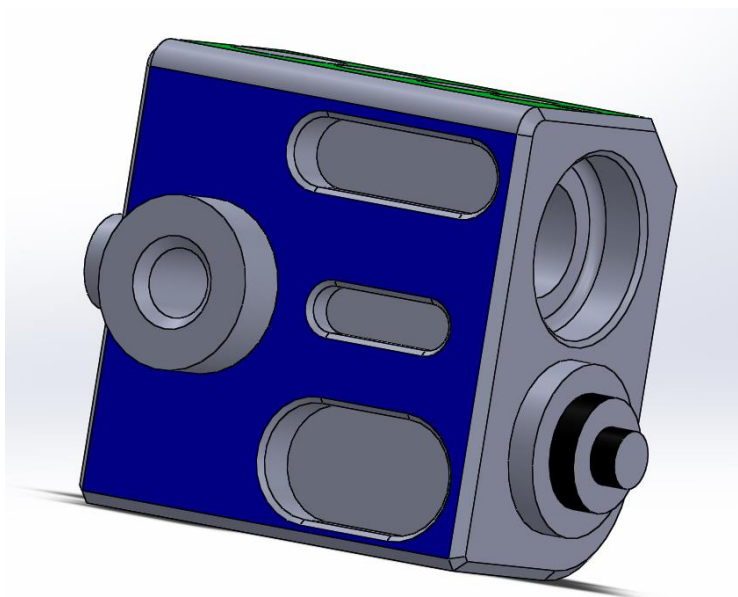
6061	6061 - č. 1				6061- č. 2				Odchyly [mm]
	Nominálně naměřená hodnota	Nominální teplota s kompenzací	Ochlazený díl s kompenzací	Zahřátý díl s kompenzací	Nominálně naměřená hodnota	Nominální teplota s kompenzací	Ochlazený díl s kompenzací	Zahřátý díl s kompenzací	
Tvar / Konkrétní prvek	26.2.21 20,04°C	26.2.21 20,08°C	15.3.21 10,13°C	17.3.21 30,80°C	26.2.21 19,96°C	26.2.21 19,99°C	15.3.21 10,98°C	17.3.21 30,11°C	0 - 0,002
			19,600	19,596	19,599	19,599	19,595	19,589	0,003 - 0,005
Kružnice kužele dolní	19,605	19,606	19,600	19,596	19,599	19,599	19,595	19,589	0,006 - 0,010
Kružnice kužele střední	18,455	18,455	18,449	18,445	18,447	18,446	18,442	18,436	0,011 - 0,020
Kružnice kužele horní	16,831	16,831	16,824	16,820	16,832	16,832	16,827	16,820	0,020 - 0,1
									0,1 a více

Obr. 3-14: Část databáze naměřených výsledků materiálu 6061 – odchyly pro kompenzace měření průměrů na kuželovém výstupku [vlastní]

Další odchyly v kompenzacích průměrů neukazují žádnou výraznější souvislost. Všechny tyto ostatní odchyly nabývají maximální nepřesnosti 5 µm od výchozí hodnoty.

3) Kruhovitosti - podrobnější vyhodnocení pro neshodné hodnoty

Z celkových 20 položek kruhovitosti odchyly během kompenzace vznikly u dvou z nich, konkrétně se jednalo o kruhovitosti válcových výstupků průměru 10 a 20 mm (lze vidět černě označené na obr. 3-15). Průměr 10 mm již vykazoval jednu vyšší nepřesnost u materiálu 12 050, ale u tohoto materiálu byla tato nepřesnost ojedinělou. V tomto případě jsou odchýleny kompenzace všech teplot u první ze součástí, avšak rozestupy mezi jednotlivými odchylkami nejsou nikterak zásadní, což teoreticky také může poukazovat na chybu hodnoty naměřené za teploty 20 °C bez použití kompenzací, která je pro ostatní hodnoty vedena jako hodnotou výchozí pro vyhodnocení přesnosti kompenzace. Ostatních 18 hodnot kruhovitosti bylo pro oba díly ve všech teplotách dopočteno správně.



Obr. 3-15: Válcové výstupky (označené černou barvou), jejichž měření (kompenzaci) vykazovala výrazné odchylky od očekávaných hodnot [vlastní]

4) Rovinnosti - podrobnější vyhodnocení pro neshodné hodnoty

U hodnot rovinnosti lze z nasbíraných dat vidět, že hlavní odchylky se objevily u jedné z ploch, konkrétně potom červeně označené plochy z obrázku 3-13. Je to shodná plocha, u které již byly odhaleny odchylky kompenzací při měření tvaru plochy u materiálu 12 050. V tomto případě se objevily vyšší odchylky u obou měřených dílů a zastoupení mají i všechny teplotní skupiny.

5) Tvary plochy - podrobnější vyhodnocení pro neshodné hodnoty

Obdobně jako u materiálu 12 050, tak i u hliníkové slitiny měření tvarů plochy vybraných tří ploch vykazují různě velké chyby teplotních kompenzací na každé z nich, a to v různých teplotních skupinách. Tuto variabilitu lze vidět ve výstřižku z databáze na obrázku 3-16.

Jako nejhorší opět vychází výsledky u červeně označené plochy na obr. 3-13, výrazné odchylky v kompenzacích také vznikly u horní plochy pěti válcových zahloubení, označené zelenou barvou na obr. 3-13.

Celkově lze konstatovat, že kompenzace teplot při měření tvarů plochy je stejně jako u materiálu 12 050 na první pohled nejméně spolehlivou. Je pravdou, že zastoupení pouze tří ploch neposkytuje tak velké množství dat, jako u ostatních geometrických prvků jako např. průměrů, či kruhovitostí, přesto na každé takové ploše je vždy evidentní chyba vzniklá použitím kompenzací.

6061	6061 - č. 1				6061- č. 2				Odchytky [mm]
Tvar / Konkrétní prvek	Nominálně naměřená hodnota	Nominální teplota s kompenzací	Ochlazený díl s kompenzací	Zahřátý díl s kompenzací	Nominálně naměřená hodnota	Nominální teplota s kompenzací	Ochlazený díl s kompenzací	Zahřátý díl s kompenzací	
	26.2.21 20,04°C	26.2.21 20,08°C	15.3.21 10,13°C	17.3.21 30,80°C	26.2.21 19,96°C	26.2.21 19,99°C	15.3.21 10,98°C	17.3.21 30,11°C	0 - 0,002
Tvar plochy (modrá pl.)	0,005	0,005	0,006	0,005	0,006	0,007	0,011	0,011	0,003 - 0,005
Tvar plochy (červená pl.)	0,058	0,050	0,029	0,015	0,025	0,028	0,021	0,027	0,006 - 0,010
Tvar plochy zelená pl.)	0,281	0,281	0,286	0,303	0,304	0,306	0,300	0,319	0,011 - 0,020
									0,020 - 0,1
									0,1 a více

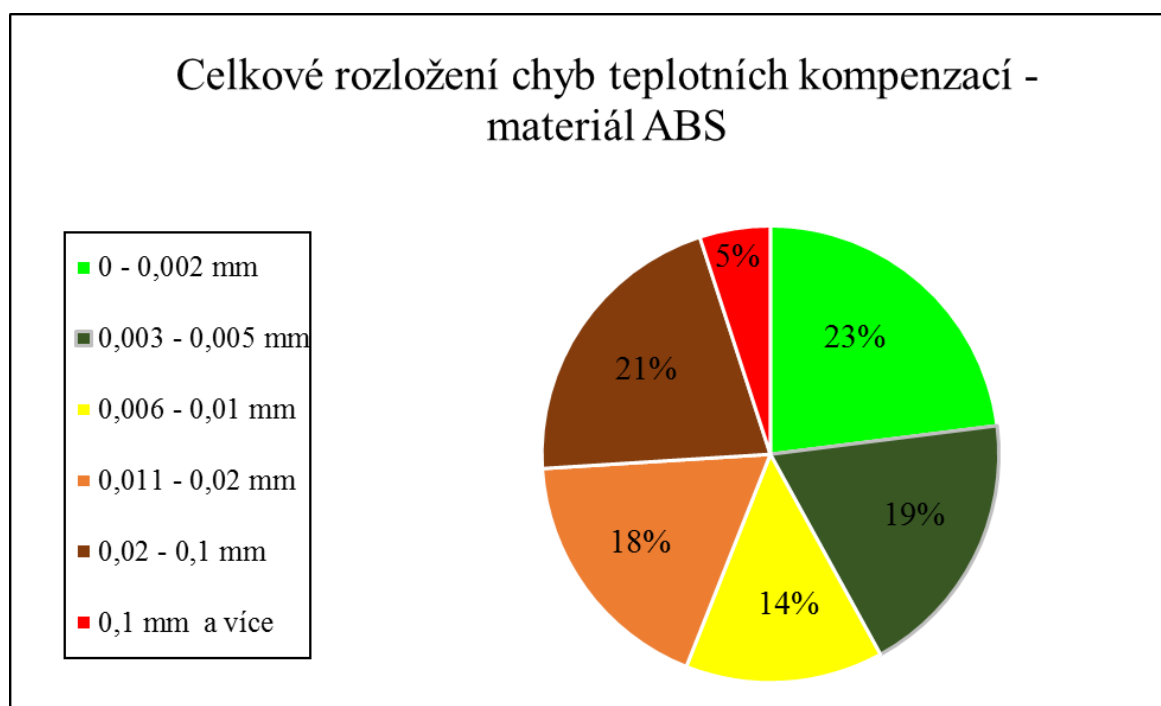
Obr. 3-16: Část databáze naměřených výsledků materiálu 6061 – odchytky pro kompenzace měření tvarů plochy [vlastní]

3.4 Materiál ABS

3.4.1 Celkové vyhodnocení pro materiál ABS

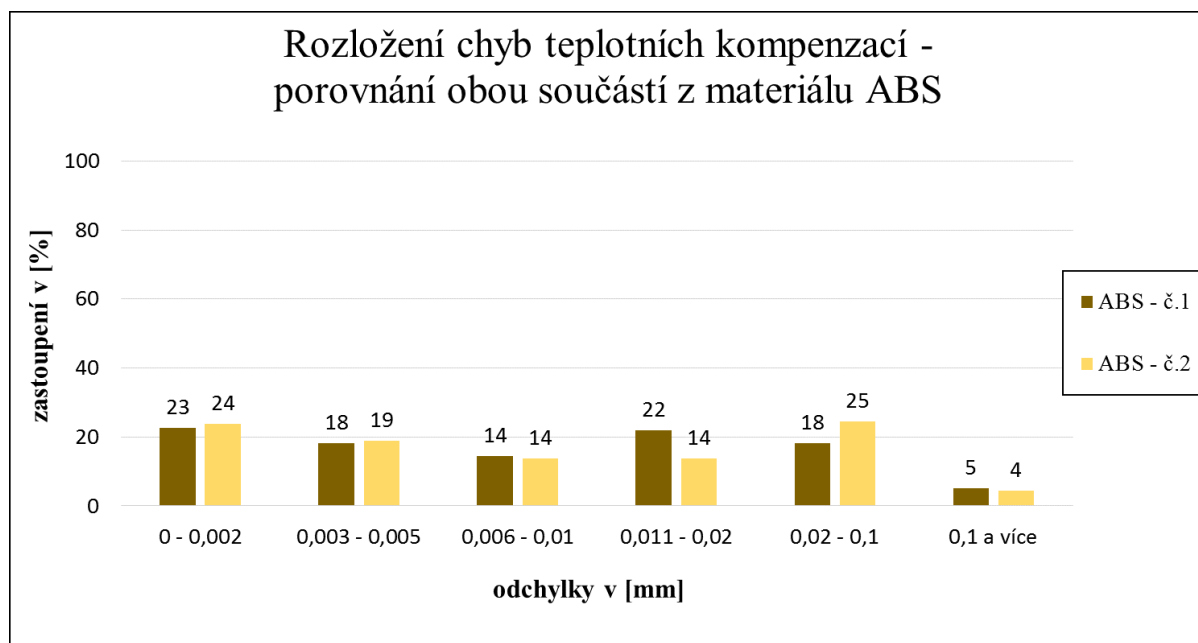
Pohled na celkové vyhodnocení výsledků pro materiál ABS je velmi odlišný od toho, co bylo možné pozorovat u dvou předchozích materiálů. Grafy 3-14 a 3-15 ukazují, jak velké rozptyly výsledné hodnoty vykazují.

U materiálů ocelové a hliníkové slitiny bylo v celkovém součtu vždy přes 90% naměřených hodnot v prvních dvou skupinách přesnosti, tj. maximální odchytka $\pm 5 \mu\text{m}$. V případě plastového materiálu je v těchto prvních dvou skupinách celkově pouze 42% hodnot a zbytek výsledných hodnot je dále relativně rovnoměrně rozmístěn v dalších skupinách nepřesností (s výjimkou poslední nejméně přesné skupiny, na kterou připadá 5 % všech hodnot).



Graf 3-14: Celkové rozložení chyb teplotních kompenzací – materiál ABS

Ve srovnání mezi oběma vyrobenými díly není možné pozorovat zásadní rozdíly, vzhledem k tomu, že celkově všechny hodnoty jsou relativně rovnoměrně rozmístěny po celém nastaveném spektru. Jediný viditelný rozdíl je ve čtvrté a páté skupině přesnosti, ovšem z celkového hlediska nemá význam věnovat tomuto rozdílu další pozornost.



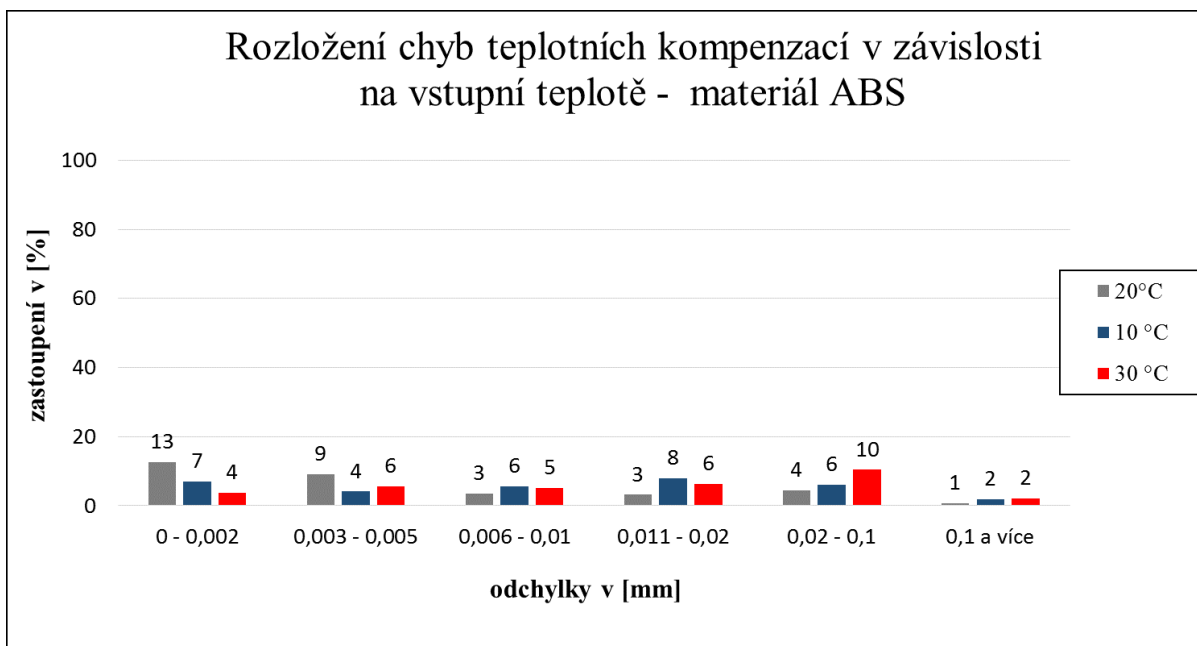
Graf 3-15: Celkové rozložení chyb teplotních kompenzací – rozdíl mezi součástmi č. 1 a č. 2

3.4.2 Analýza odchylek ve výsledcích pro materiál ABS

a) Přesnost teplotních kompenzací v závislosti na vstupní teplotě

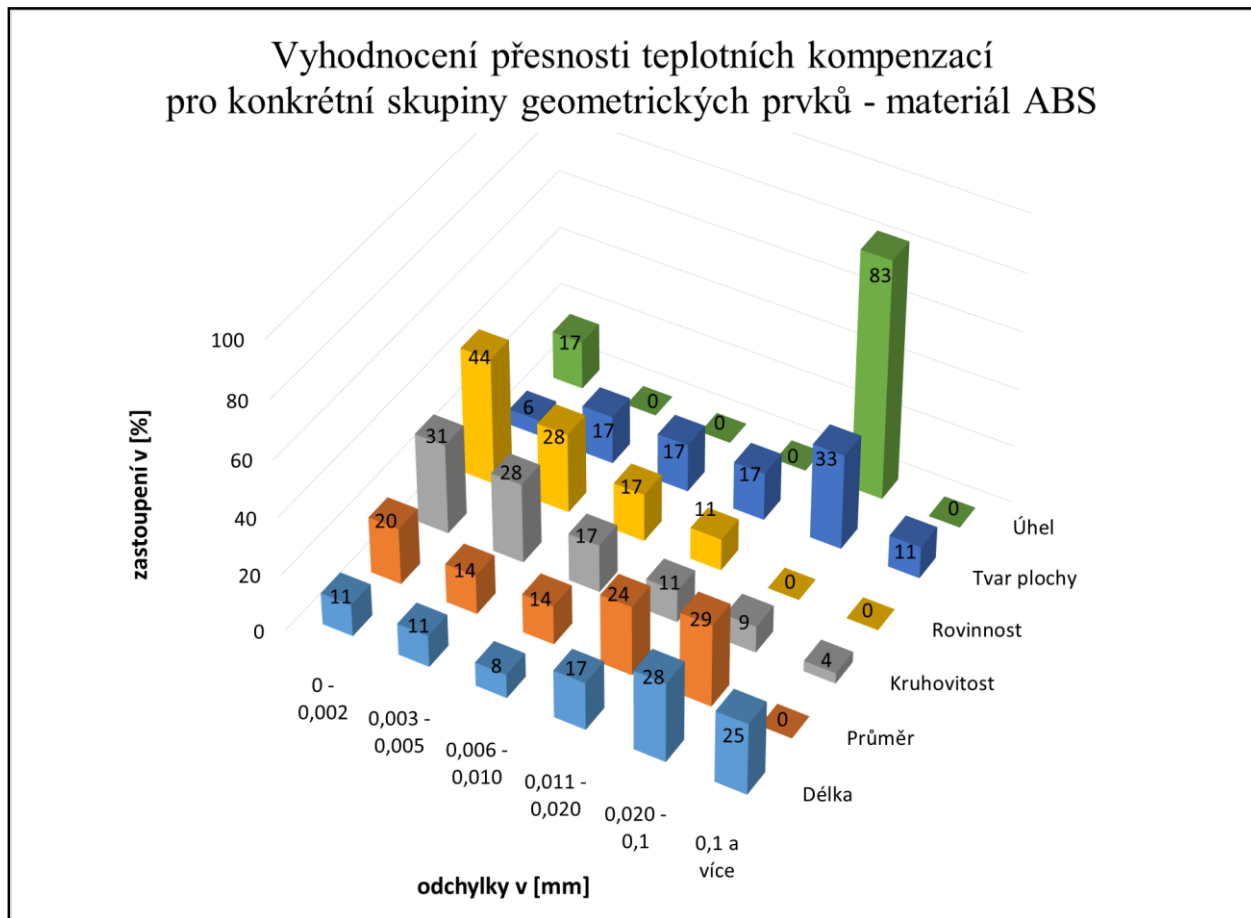
Ve srovnání kompenzací dle výchozí teploty dílu (graf 3-16) je patrné, že kompenzace z teplot blízkých 20 °C byly celkově přesnější, než tomu bylo u kompenzací dílů ochlazených a zahřátých, ovšem ani této skupině se nevyhýbají výraznější odchylky i přes 0,1 mm.

Srovnání kompenzací ochlazených a zahřátých dílů v tomto případě lehce prohrávají hodnoty kompenzované z vyšší teploty, i když v celkovém součtu není vidět z hodnot opět nijak zásadní rozdíl, který by určil, že hlavním viníkem v celkovém zhodnocení pro daný materiál jsou např. pouze výsledky kompenzací z ohřátého dílu. Z tohoto hlediska je tedy potřeba se opět, jako tomu bylo u předchozích materiálů, soustředit na jednotlivé geometrické prvky a případnou rozdílnost mezi nimi.



Graf 3-16: Přesnost teplotních kompenzací v závislosti na vstupní teplotě – mat. ABS

b) Přesnost teplotních kompenzací v závislosti na měřených geometrických prvcích



Graf 3-17: Přesnost teplotních kompenzací v závislosti na měřeném prvku – mat. ABS

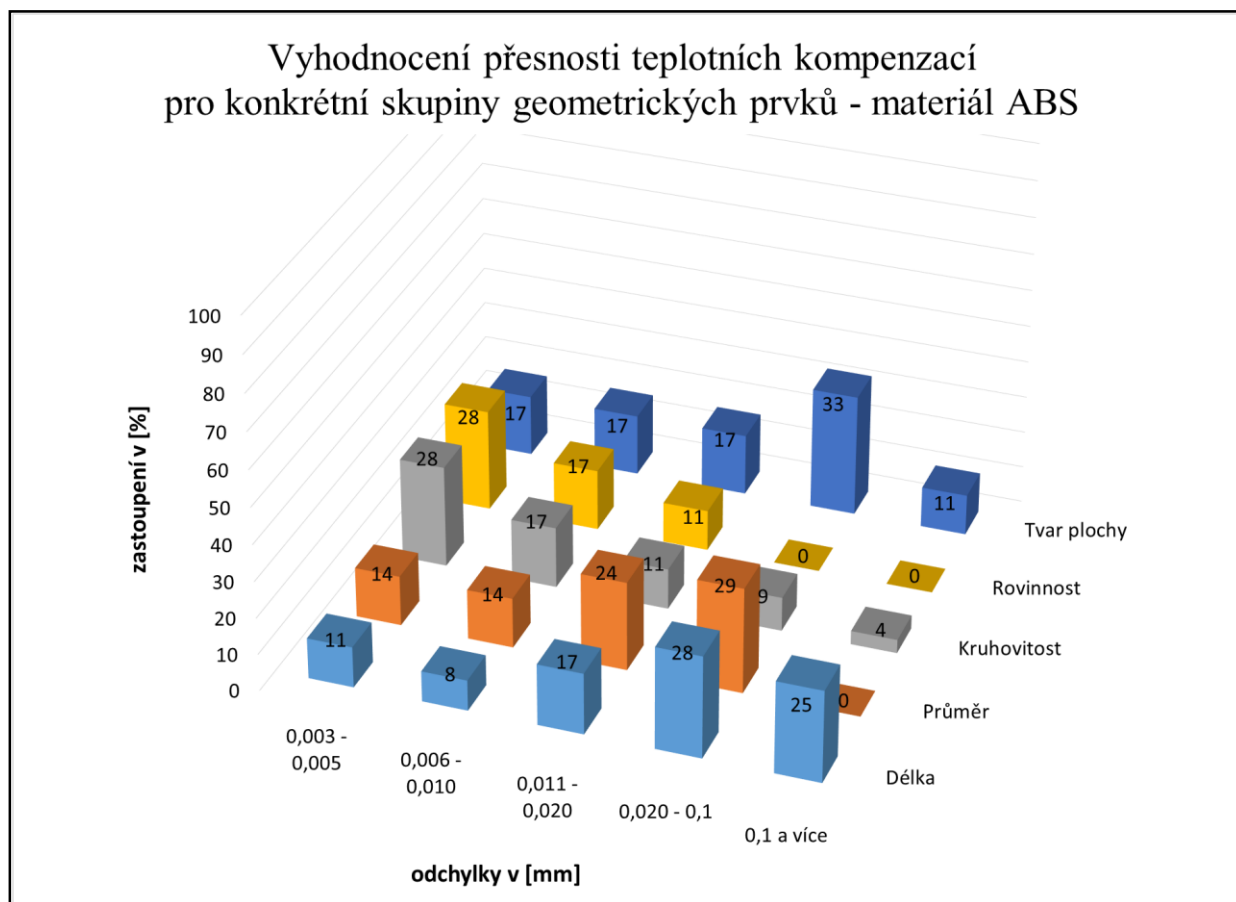
Jak je možné vidět z grafu 3-17, materiál ABS poskytuje diametrálně odlišné výsledky oproti předchozím dvěma materiálům. U tohoto materiálu je z dat níže nejpřesnější skupinou měření rovinností, jejichž všechny hodnoty vykazují maximální odchylku 0,02 mm. Například měření délkových rozměrů, které bylo u předchozích materiálů nejpřesnějším, je pro materiál ABS tím nejméně přesným ze všech.

Celková diverzita výsledků pro materiál ABS je tak velká, že i kdyby bylo provedeno zúžení hodnot tak, jako tomu bylo pro předchozí materiály (viz graf 3-18), tak procentuální zastoupení nepřesných hodnot je tak vysoké, že nemá praktický význam mezi těmito hodnotami hledat žádné závislosti, či zajímavosti.

Vzhledem k tomu, že 5 % ze všech výsledků kompenzací pro materiál ABS připadá do nejméně přesné skupiny s odchylkou 0,1 mm a více, lze dohledat vůbec největší odchylky, kterých bylo v rámci měření dosaženo, aby mohl být stanoven na základě získaných dat minimální limit tolerance, pro které jsou teplotní kompenzace pro případná další měření použitelné.

Při pohledu do databáze výsledků jsou největšími odchylkami ze skupiny přesnosti 0,1 mm a více:

- délka – 0,118 mm,
- kruhovitost – 0,160 mm,
- tvar plochy – 0,153 mm.



Graf 3-18: Naměřené hodnoty k další analýze – mat. ABS

4 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo ověření a vyhodnocení funkce teplotních kompenzací na CMM Zeiss Prismo 7 Navigator, který je součástí Laboratoře dílenské metrologie ZČU v Plzni. Vzhledem k tomu, že tento stroj je hojně využíván k měření pro externí zákazníky, využití funkce teplotních kompenzací má potenciál rozšířit portfolio této metrologické laboratoře o další nabízenou službu finálnímu zákazníkovi, a to zejména ve chvíli, kdy nemohou být splněny všechny teplotní podmínky pro předepsané měření v metrologické laboratoři.

Pro účel této analýzy byla zkonstruována speciální součást o maximálních rozměrech 80 x 80 x 50 mm (viz model součásti na obr. 2-2), která byla následně vyrobena ze tří různých materiálů – ocelové slitiny 12 050.1, hliníkové slitiny EN AW-6061 a plastového materiálu ABS. Všechny tyto materiály a všechny prvky měřené na těchto součástech plně odpovídají portfolio měření, které je prováděno pravidelně na tomto CMM.

Celkově bylo provedeno 36 cyklů měření tak, aby byla pro analýzu získána data z měření v různých podmínkách. Každý díl byl proměřován za standardní teploty přibližující se 20 °C, a poté při teplotách cca 10 °C a 30 °C. Teplotním ovlivněním dílu došlo vzhledem k chemicko-fyzikálním zákonitostem k teplotní roztažnosti materiálu, jehož negativní vlivy byly méně, či více úspěšně kompenzovány využitím funkce teplotních kompenzací na CMM Zeiss.

Získaná data byla analyzována z hlediska dvou hlavních faktorů, které mají teoreticky významný vliv na ovlivnění měření při použití teplotních kompenzací. Těmito faktory jsou:

- variabilita v závislosti na teplotě dílu,
- rozměrová a geometrická variabilita měřených prvků.

Prvním faktorem byla variabilita přesnosti teplotních kompenzací v závislosti na teplotě dílu v průběhu měření. Čistě statisticky pro všechny tři materiály (grafy 3-6, 3-11, 3-16) nebyl z provedených pokusů prokázán výrazně odlišný vliv konkrétní teploty na výslednou přesnost teplotních kompenzací.

Celkově je tedy možné vyhodnotit možný negativní vliv teploty na ovlivnění chování materiálů, nebo výpočtů kompenzací za shodný, či velmi podobný pro všechny tři použité teplotní rozsahy.

Druhým z hlavních faktorů k vyhodnocení byla rozměrová různorodost měřených prvků, a hlavně měření různých tvarových a geometrických veličin. V tomto případě byl analyzován každý materiál samostatně.

Na základě analýzy dosažených výsledků byl tímto vytvořen přehled pro všechny zkoumané geometrické prvky, který ukazuje, s jakou celkovou chybou je třeba při použití teplotních kompenzací během měření počítat. Tento přehled pro všechny materiály lze vidět v tabulce na obrázku 4-1.

12 050.1	$\pm 2 \mu\text{m}$	$\pm 5 \mu\text{m}$	$\pm 0,01 \text{ mm}$	$\pm 0,02 \text{ mm}$	$\pm 0,1 \text{ mm}$	$> 0,1 \text{ mm}$
Délkové rozměry	n.a.	✓	✓	✓	✓	✓
Průměry	n.a.	✗	✗	✓	✓	✓
Kruhovitosti	n.a.	✗	✗	✓ 0,022 mm	✓	✓
Rovinnosti	n.a.	✓	✓	✓	✓	✓
Tvary plochy	n.a.	✗	✗	✓	✓	✓
Úhly	n.a.	✗	✓	✓	✓	✓
EN AW-6061	$\pm 2 \mu\text{m}$	$\pm 5 \mu\text{m}$	$\pm 0,01 \text{ mm}$	$\pm 0,02 \text{ mm}$	$\pm 0,1 \text{ mm}$	$> 0,1 \text{ mm}$
Délkové rozměry	n.a.	✓	✓	✓	✓	✓
Průměry	n.a.	✗	✓ 0,012 mm	✓	✓	✓
Kruhovitosti	n.a.	✗	✗	✓ 0,025 mm	✓	✓
Rovinnosti	n.a.	✗	✗	✓	✓	✓
Tvary plochy	n.a.	✗	✗	✓ 0,043 mm	✓	✓
Úhly	n.a.	✗	✗	✓	✓	✓
ABS	$\pm 2 \mu\text{m}$	$\pm 5 \mu\text{m}$	$\pm 0,01 \text{ mm}$	$\pm 0,02 \text{ mm}$	$\pm 0,1 \text{ mm}$	$> 0,1 \text{ mm}$
Délkové rozměry	n.a.	✗	✗	✗	✗	✓ 0,118 mm
Průměry	n.a.	✗	✗	✗	✓	✓
Kruhovitosti	n.a.	✗	✗	✗	✗	✓ 0,160 mm
Rovinnosti	n.a.	✗	✓ 0,012 mm	✓	✓	✓
Tvary plochy	n.a.	✗	✗	✗	✗	✓ 0,153 mm
Úhly	n.a.	✗	✗	✗	✓	✓

Obr. 4-1: Celkové vyhodnocení s ohledem na jednotlivé geometrické prvky [vlastní]

Pro CMM Zeiss je výrobcem definovaná maximální odchylka stroje v rámci standardního měření, která činí $\pm 2 \mu\text{m}$. Z tohoto důvodu pro tento rozsah odchylek od nominálně naměřené hodnoty nelze určit, zda byly odchylky způsobeny nepřesností funkce teplotních kompenzací, či nepřesností samotného měřicího stroje, proto je tento rozsah z vyhodnocení vynechán.

Rozsahy, ve kterých bylo zaznamenáno 100 % měřených hodnot, jsou označeny zelenou šipkou. V takovém případě bylo provedenými pokusy ověřeno, že pro daný měřený parametr je stroj opakovaně schopen vykazovat měření s definovanou maximální odchylkou.

U žlutě označených položek je doporučeno pro potvrzení získaných výsledků jednotlivá měření zopakovat, případně provést více měření pro různě variabilní rozměry, či plochy. Ve výsledcích získaných pokusy v rámci této diplomové práce byly tyto žluté položky většinou ojedinělými odchylkami v jednotlivých skupinách přesnosti, a to často ještě velmi hraničně vzhledem k nastaveným rozsahům. U žlutých položek je vždy uvedena maximální ojedinělá hodnota odchylky, která v daném měření nastala.

Rozsahy označené červeně neobsahovaly dostatečný počet výsledků tak, aby mohly být celkově doporučeny jako maximální možná uvažovaná nepřesnost při měření za použití teplotních kompenzací.

Z dosažených výsledků v rámci této diplomové práce lze konstatovat, že oproti standardnímu použití měřicího stroje Zeiss, který vykazuje vysokou přesnost a opakovatelnost s maximální chybou do 2 μm , jsou výsledky použití teplotních kompenzací celkově neuspokojivě přesné. Použitelnost teplotních kompenzací samozřejmě vždy závisí na konkrétní výrobní toleranci měřeného dílu, i když ve chvíli, kdy je daná součást vyrobena na hraně jedné z tolerancí, je potřeba vždy v případě použití teplotních kompenzací dbát zvýšené opatrnosti, aby chyba vnesená do měření nebyla zkreslujícím prvkem přes hranici tolerance. V takovém případě je lepší variantou měření zopakovat za podmínek, kdy je teplota dílu plně vyrovnána s teplotou okolí, což je základním požadavkem pro provedení stabilního měření.

Obzvláště velkými odchylkami se prezentovaly kompenzace při měření plastového materiálu ABS. Tento materiál byl vyroben pomocí technologie 3D tisku a byl vyhotoven jako plný díl tak, aby se tvarově a hmotnostně co nejvíce přiblížil součástí z ostatních materiálů. Tepelné vlastnosti ovšem již z propočtů v kapitole 3.1.3 vykazovaly nepředvídatelné chování oproti teorii, což zcela určitě přispělo k celkově horším výsledkům pro tento materiál.

Dalším možným vlivem pro zhoršené výsledky u tohoto materiálu je anizotropie tohoto dílu, vzhledem k jeho výrobní metodě (3D tisk). Největší odchylka v rámci materiálu ABS oproti nominálně naměřené hodnotě činila 0,160 mm. V praxi bývají pro plastové díly výkresově definované větší tolerance, než pro díly vyráběné klasickými obráběcími metodami. V takovém případě je možné, že i pro měření plastových materiálů funkce teplotních kompenzací na CMM Zeiss může najít své uplatnění.

Na navržené součásti se objevovaly geometrické prvky, které byly v rámci použití teplotních kompenzací obdobně nestabilní pro všechny materiály, zejména se zde objevila výrazná podobnost mezi ocelovou a hliníkovou slitinou (materiál ABS obecně méně přesný). Konkrétně se jednalo o kuželový výstupek (obr. 3-12), na němž byly proměřovány průměry a kruhovitosti ve třech různých řezech, nebo plochy proměřované na tvar plochy, či rovinnost (obr. 3-13).

Celkově ale nebylo možné najít mezi jednotlivými součástmi z různých materiálů žádné zásadní rozměrové závislosti, které by předurčovaly použití teplotních kompenzací za vhodné, či nevhodné pro rozměry v konkrétním délkovém rozmezí.

V rámci měření úhlů by bylo pro ověření správnosti kompenzací, případně potvrzení správnosti doporučeného rozsahu tolerancí, nutné provést sérii dalších měření. Na dané součásti byla na hodnotu úhlu provedena měření pouze na jednom prvku, což nezaručuje žádnou průkaznou variabilitu pro potvrzení správnosti momentálně dosažených výsledků.

Závěrem je možné konstatovat, že rozsahy pro použití funkce teplotních kompenzací, které lze vidět z tabulky na obrázku 4-1, jsou tak jediným jasným zdrojem informací na základě provedených měření. Při zohlednění těchto dosažených výsledků lze funkce teplotních kompenzací na CMM Zeiss pro prováděná měření využívat. Pravděpodobnější je vzhledem k velikostem vnesených nepřesností využití u ocelové slitiny 12 050 a hliníkové slitiny 6061. Pro plastový materiál ABS je využití vzhledem k obecně širším tolerancím pro plastové díly za určitých okolností také možné.

Ostatní zásadní závislosti na konkrétních teplotách, nebo konkrétních rozměrech vztažených na délkovou jednotku, nebyly v rámci pokusů této diplomové práce prokázány.

Seznam použitých zdrojů

- [1] TICHÁ, Šárka. Strojírenská metrologie. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2006. ISBN 80-248-1209-6.
- [2] KOM 3.2-měřidla délek, pevné kalibry [online]. [cit. 2021-5-23]. Dostupné z: https://www.spszengrova.cz/wp-content/uploads/2020/04/KOM_3_2_SPU-meridla_delek_pevne_kalibry.pdf
- [3] Evaluace měřicích metod ve společnosti Wikov Gear s.r.o.: Bakalářská práce - Štěpán Franc [online]. [cit. 2021-5-23].
- [4] Měření teplotní roztažnosti [online]. [cit. 2021-5-23]. Dostupné z: http://www.matfyz.eu/dokumenty/olomouc/labcv/molekultmd/U081_teplotniroztaznost_kov_ove_tyce.pdf
- [5] Teplotní roztažnost pevných těles [online]. [cit. 2021-5-23]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/3078047/>
- [6] TEPLTNÍ ROZTAŽNOST, TEPELNÁ KAPACITA - Fyzikální kabinet GymKT [online]. [cit. 2021-5-23]. Dostupné z: <http://kabinet.fyzika.net/studium/tabulky/tepelna-kapacita-roztaznost.php>
- [7] OBJEMOVÁ TEPLTNÍ ROZTAŽNOST :: MEF [online]. [cit. 2021-5-23]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/635-objemova-teplotni-roztaznost>
- [8] Materiály k výrobě Škody Octavia [online]. [cit. 2021-2-5]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/do/ped/kat/fyzika/autem/pages/vyroba.html>
- [9] Materiály v automobilech a ještě něco navíc [online]. [cit. 2021-2-5]. Dostupné z: <https://www.vvautomotive.cz/materialy-v-automobilech-i-neco-navic/>
- [10] Letecké materiály [online]. [cit. 2021-2-5]. Dostupné z: <http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/matlet/OLR-Uvod.pdf>
- [11] Regionální technologický institut - vybavení [online]. [cit. 2021-2-5]. Dostupné z: https://rti.zcu.cz/laboratore/ldm/vybaveni_ldm.html
- [12] Meßzentrum PRISMO Navigator 5/7 HTG/S-ACC [online]. [cit. 2021-2-5]. Dostupné z: <https://docplayer.org/57067527-Messzentrum-prismo-navigator-5-7-htg-s-acc.html>
- [13] Kompenzace teploty [online]. [cit. 2021-2-5]. Dostupné z: https://docs.hexagonmi.com/pcdmis/2019.1/cs/helpcenter/mergedProjects/core/06_pref_topics/Temperature_Compensation.htm
- [14] HOCKEN, Robert J. a Paulo H. PEREIRA. Coordinate Measuring Machines and Systems. 2017, 592. ISBN 9781138076891.
- [15] ŠTRBAC, Branko, Bojan AČKO, Sara HAVRLIŠAN, Ivan MATIN, Borislav SAVKOVIĆ a Miodrag HADŽISTEVIĆ. Investigation of the effect of temperature and other significant factors on systematic error and measurement uncertainty in CMM measurements by applying design of experiments. 2020, , 158. ISSN 0263-2241.

Seznam příloh

Příloha č. 1 – Výrobní výkres součásti pro provedení experimentů [vlastní]

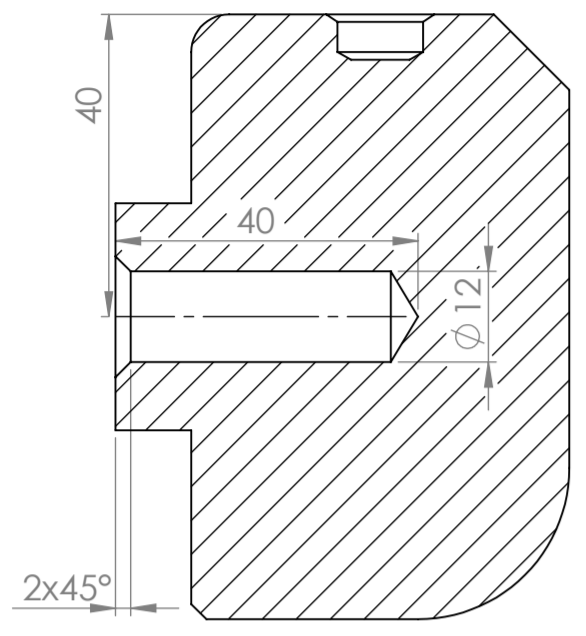
Příloha č. 2 – Kompletní náměrový protokol pro vybrané měření [vlastní]

PŘÍLOHA č. 1

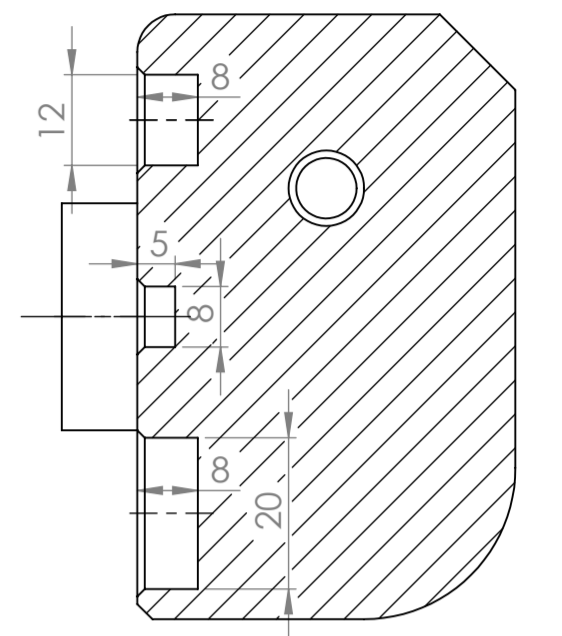
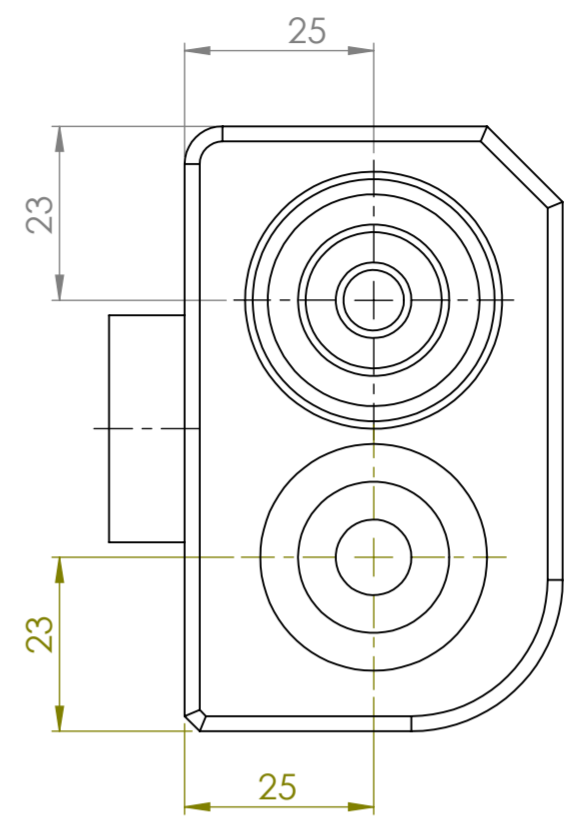
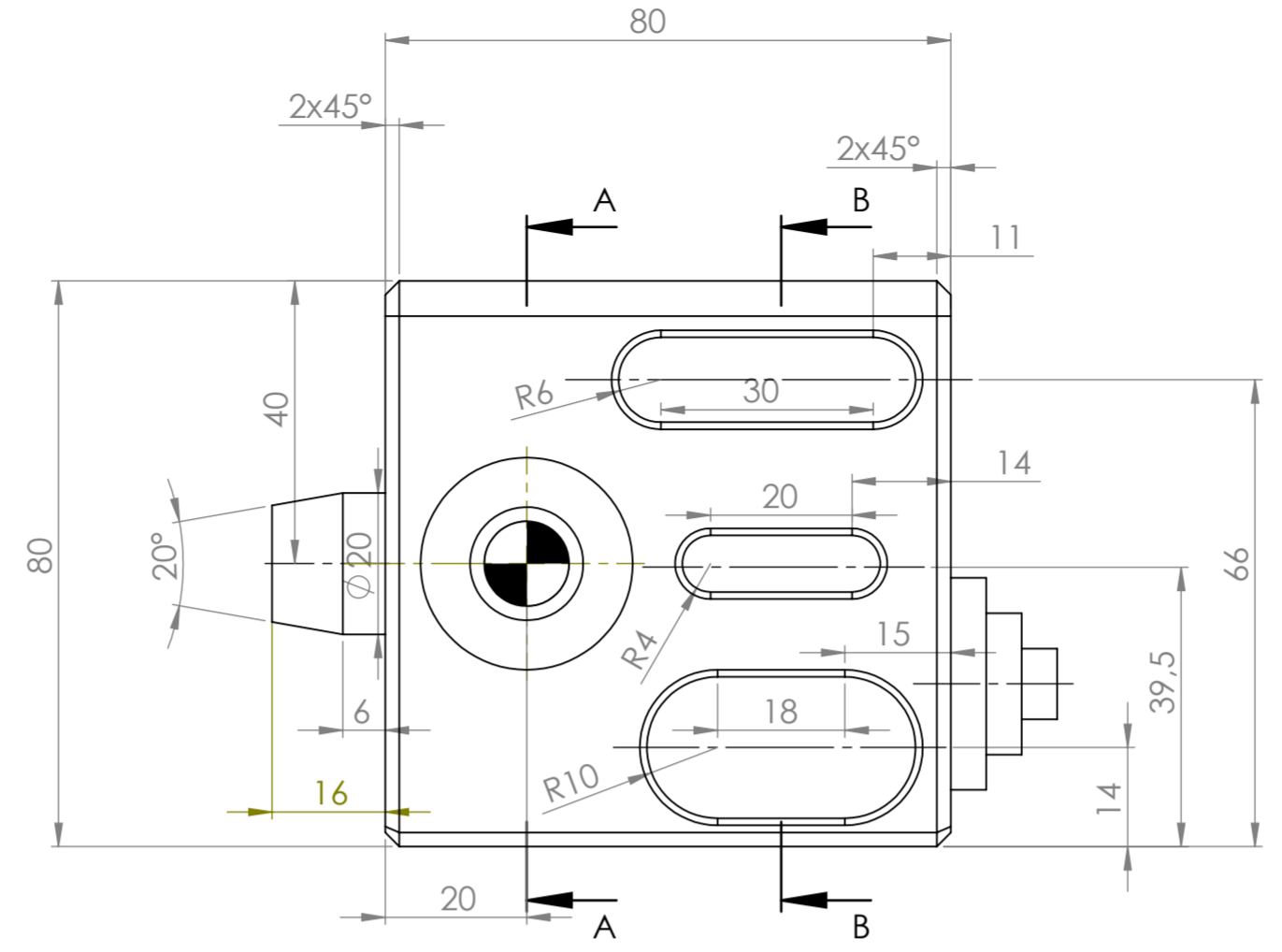
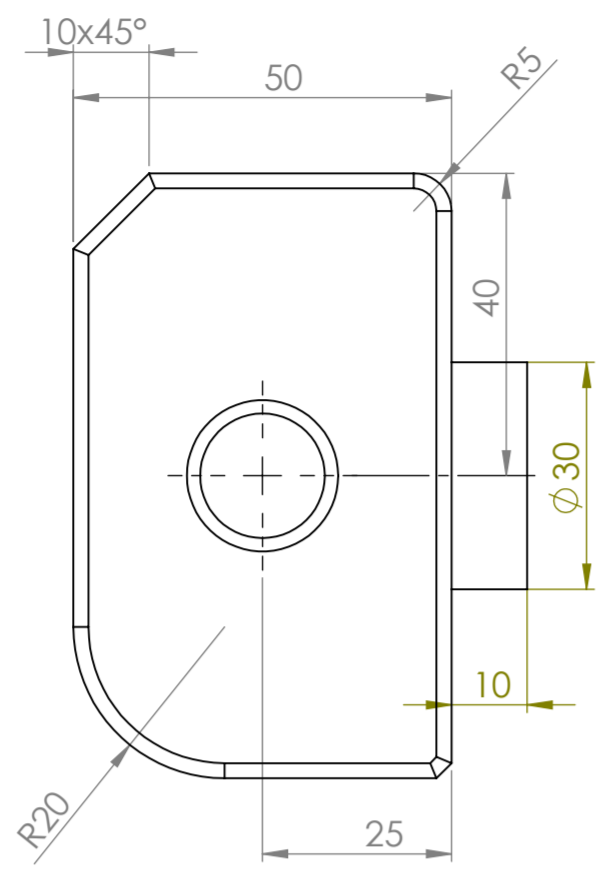
Výrobní výkres součásti pro provedení experimentů

12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1

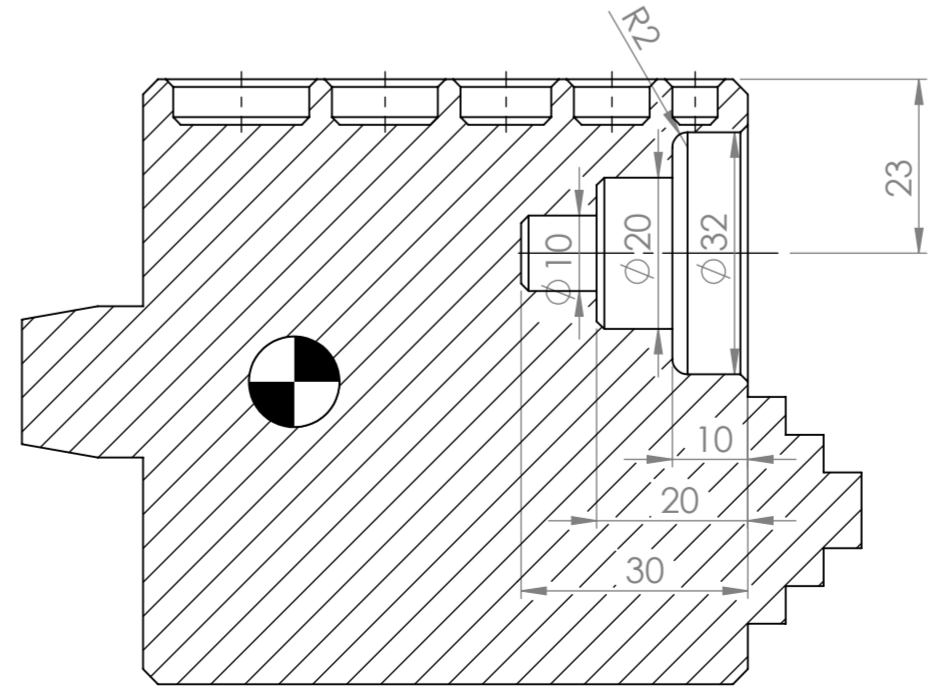
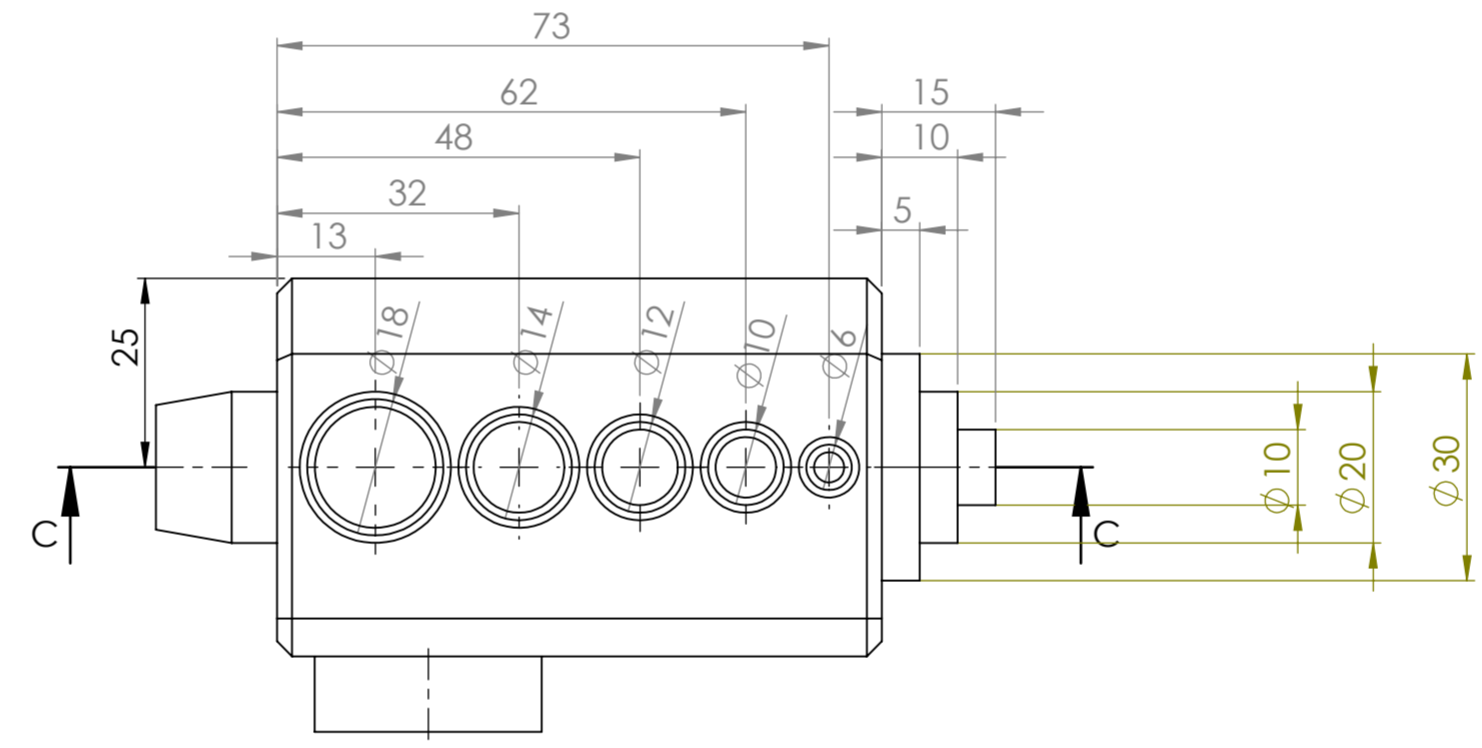
H
G
F
E
D
C
B
A



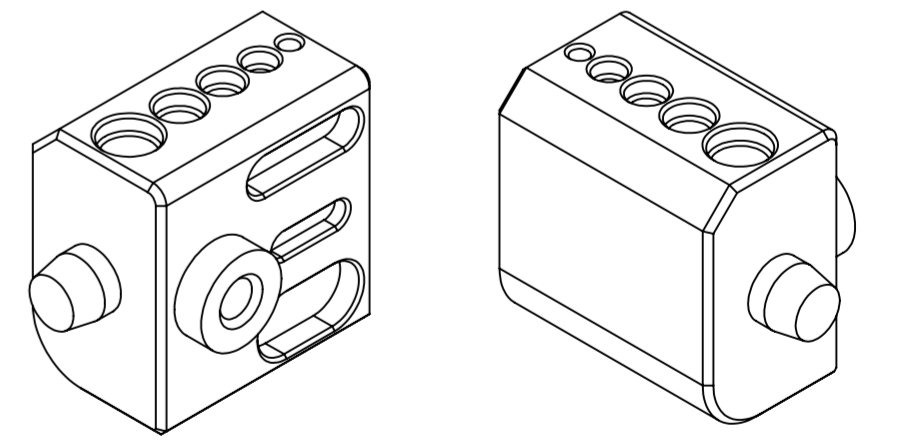
ŘEZ A-A



ŘEZ B-B



ŘEZ C-C



✓ Ra 3,2 Nekótovaná sražení 1x45°

POKUD NENÍ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH		OPRACOVÁNÍ:		ODSTRANIT OSTŘÍ HRANY	NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU	ZMĚNA
TOLERANCE: LINEÁRNÍ: ÚHLOVÁ:				NÁZEV: Kostka pro měření teplotních kompenzací		
NAVRHL	JMÉNO Štěpán Franc	PODPIS	DATUM 6.1.2021	C. VÝKRESU Kostka_Franc		
PŘEZKOUSĚL				MĚŘÍTKO:1:1		
SCHVÁLIL				HMOTNOST:		
VÝROBA				MATERIÁL:		
Z. JAKOSTI				LST 1 Z 1 LSTŮ		

8 7 6 5 4 3 2 1

PŘÍLOHA č. 2

Kompletní náměrový protokol pro vybrané měření



Plán měření
008-21-franc

Datum krátce
17.03.21

Metoda
LDM_OP1

Číslo výkresu
* drawingno *

Čas
9:10:27

Tepl. souč.
29.33

Operátor
Dana Kubátová

Stroj
* LDM 15/003 *

Č.dílu inkrementálně
dil. 12050 - c. 2-T-s

Délková jednotka
mm

Stránka 1 / 5	Mer	Jmen	Horní tol.	Dolní tol.	Odchylka
	Prumer_dira pr. 12 - poz. 5 mm 11.814	12.000			-0.186
	Prumer_dira pr. 12 - poz. - 10 mm 11.814	12.000			-0.186
	Prumer_dira pr. 12 - poz. -15 mm 11.813	12.000			-0.187
	Prumer_dira pr. 12 - poz. -20 mm 11.814	12.000			-0.186
	Prumer_dira pr. 12 - poz. -23 mm 11.815	12.000			-0.185
	Prumer_Válec1 11.814	12.000			-0.186
	Kruhovitost - dira pr. 12 - poz. 5 mm 0.010	0.000	0.000		0.010
	Kruhovitost - dira pr. 12 - poz. 10 mm 0.010	0.000	0.000		0.010
	Kruhovitost - dira pr. 12 - poz. 15 mm 0.006	0.000	0.000		0.006
	Kruhovitost - dira pr. 12 - poz. 20 mm 0.011	0.000	0.000		0.011













Náz.souč.
008-21-franc









Operátor
Dana Kubátová

Čas
9:10:27







Datum
17. března 2021



	Mer	Jmen	Horní tol.	Dolní tol.	Odchylka
	Kruhovitost - díra pr. 12 - poz. 23 mm				0.011
	0.011	0.000	0.000		0.011
	Délka_Podélný otvor1				0.082
	38.082	38.000			0.082
	Šířka_Podélný otvor1				0.086
	20.086	20.000			0.086
	Délka_Podélný otvor2				0.064
	28.064	28.000			0.064
	Šířka_Podélný otvor2				0.068
	8.068	8.000			0.068
	Délka_Podélný otvor3				0.077
	42.077	42.000			0.077
	Šířka_Podélný otvor3				0.088
	12.088	12.000			0.088
	Prumer_díra pr. 30 - spodni				-0.081
	29.919	30.000			-0.081
	Prumer_díra pr. 30 - horni				-0.081
	29.919	30.000			-0.081
	Prumer_Válec -díra 30 mm				-0.080
	29.920	30.000			-0.080
	Prumer_Kružnice pod kuzelem				-0.082
	19.918	20.000			-0.082
	Kruhovitost_Kružnice pod kuzelem				0.007
	0.007	0.000	0.000		0.007

	Mer	Jmen	Horní tol.	Dolní tol.	Odchylka
	Prumer_Kružnice -kuzel 1 19.626	19.608			0.018
	Kruhovitost - Kružnice -kuzel 1 0.014	0.000	0.000		0.014
	Prumer_Kružnice -kuzel 2 18.477	18.451			0.026
	Kruhovitost - Kružnice -kuzel 2 0.012	0.000	0.000		0.012
	Prumer_Kružnice -kuzel 3 16.866	16.841	0.100		0.026
	Kruhovitost - Kružnice -kuzel 3 0.016	0.000	0.000		0.016
	Úhel kužele1 19.943	20.000	0.000	0.000	-0.057
	Prumer_Kružnice pr. 18 18.043	18.000			0.043
	Kruhovitost_Kružnice pr. 18 0.012	0.000	0.000		0.012
	Prumer_Kružnice pr. 14 14.035	14.000			0.035
	Kruhovitost_Kružnice pr. 14 0.045	0.000	0.000		0.045
	Prumer_Kružnice pr. 12 12.023	12.000			0.023



	Mer	Jmen	Horní tol.	Dolní tol.	Odchylka
	Kruhovitost_Kružnice pr. 12 0.052	0.000	0.000		0.052
	Prumer_Kružnice pr. 10 10.016	10.000			0.016
	Kruhovitost_Kružnice pr. 10 0.056	0.000	0.000		0.056
	Prumer_Kružnice pr. 6 6.011	6.000			0.011
	Kruhovitost_Kružnice pr. 6 0.036	0.000	0.000		0.036
	Prumer_Kružnice vnější pr. 10 9.909	10.000			-0.091
	Kruhovitost_Kružnice vnější pr. 10 0.008	0.000	0.000		0.008
	Prumer_Kružnice vnější pr. 20 19.910	20.000			-0.090
	Kruhovitost_Kružnice vnější pr. 20 0.011	0.000	0.000		0.011
	Prumer_Kružnice vnitřní pr. 10 10.114	10.000			0.114
	Kruhovitost_Kružnice vnitřní pr. 10 0.048	0.000	0.000		0.048
	Prumer_Kružnice vnitřní pr. 20 20.072	20.000			0.072








Náz.souč.
008-21-franc

Operátor
Dana Kubátová

Čas
9:10:27

Datum
17. března 2021



	Mer	Jmen	Horní tol.	Dolní tol.	Odchylka
	Kruhovitost_Kružnice vnitřní pr. 20				0.030
	0.030	0.000	0.000		0.030
	Rovinnost1				0.005
	0.005	0.000	0.000		0.005
	Profil plochy4				0.007
	0.007	0.000	0.000		0.007
	Rovinnost2				0.021
	0.021	0.000	0.000		0.021
	Profil plochy2				0.029
	0.029	0.000	0.000		0.029
	Rovinnost3				0.021
	0.021	0.000	0.000		0.021
	Profil plochy3				0.288
	0.288	0.000	0.000		0.288