

**Statistická komparace přesnosti měření mezi systémy Wenzel
LH87 a ATOS s využitím tvarově složitého polymerního dílu.**

Bc. Jan Pavlík

Diplomová práce
2019



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan Pavlík**
Osobní číslo: **T17279**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Řízení jakosti**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Statistická komparace přesnosti měření mezi systémy Wenzel LH87 a ATOS s využitím tvarově složitého polymerního dílu.**

Zásady pro vypracování:

- 1. Teoretický popis zařízení Wenzel LH 87 osazené softwarem Quartis a dále technický popis skeneru ATOS využívající software GOM Inspect.**
- 2. Numerická komparace časů a složitostí měření na obou systémech, zdůraznění výhod a nevýhod obou systémů.**
- 3. Stanovení rozdílů mezi měrovými zprávami se zaměřením na přesnost a opakovatelnost s využitím metodik matematické statistiky.**

Rozsah diplomové práce: **cca 60 stran**
Rozsah příloh: **dle pokynů VDP**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

- 1. BUMBÁLEK,L.- BUMBÁLEK,B.: Pokrokové trendy v hodnocení textury povrchu, Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně.**
- 2. MELOUN, Milan. Kompendium statistického zpracování dat: metody a řešené úlohy včetně CD. Praha: Academia, 2002, 764 s. ISBN 80-200-1008-4**

Vedoucí diplomové práce: **doc. Dr. Ing. Vladimír Pata**
Ústav výrobního inženýrství
Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2019**
Termín odevzdání diplomové práce: **17. května 2019**

Ve Zlíně dne 7. února 2019

L.S.

doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno:

Obor:

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně

.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevýdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlázení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá měřením pomocí dvou odlišných metod na složitém plastovém výrobku a následnou statistickou komparací. Teoretická část se věnuje základnímu rozdělení metrologie a základy statistiky, názvosloví a jeho chápání. Dále pak popsání skenovacích a souřadnicových měřících přístrojů. Praktická část popisuje samotné měření, což zahrnuje návrh měřícího přípravku a použití vhodných metod pro získání dat. Ze získaných výsledků jsou pomocí statistických nástrojů tyto data vyhodnocena.

Klíčová slova: polymer, metrologie, tvar, 3D měření, statistická komparace.

ABSTRACT

The master thesis deals with measurement of complex plastic product using a two different method and subsequent a statistical comparison. The theoretical part is focused on a basic division of metrology and the basics of statistics, terminology and its understanding. Further, the description of scanning and coordinate measuring devices. The experimental part describes the measurement itself, which includes a design of measuring tool and using suitable methods to obtain data. From the obtained results, the data are assessed by means of the statistical instruments.

Keywords: polymer, metrology, shape, 3D measurement, statistical comparison

Rád bych zde poděkoval vedoucímu mé diplomové práce, panu doc. Dr. Ing. Vladimíru Patovi, za odborné vedení, cenné rady, připomínky a hlavně trpělivost při vedení mé diplomové práce. Dále panu Mgr. Karlu Zapletalovy a Ing. Pavlu Stokláškovy za pomoc při měření. Poděkování patří především mé rodině a všem, kteří mi poskytli podporu, jak při studiu, tak při vypracování této práce.

Diplomová práce byla napsána ve spolupráci se společností Plastika a.s. a tímto jim také děkuji.

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 METROLOGIE	13
1.1 ČLENĚNÍ METROLOGIE	13
1.1.1 Vědecká.....	13
1.1.2 Legální.....	13
1.1.3 Podniková.....	13
1.2 DEFINICE ZÁKLADNÍCH POJMŮ V METROLOGII	13
1.2.1 Veličina	14
1.2.2 Kalibrace	14
1.2.3 Kontrola.....	14
1.2.4 Přesnost	15
1.2.5 Nejistota měření	15
1.2.6 Statistika.....	15
1.2.7 Pokus	15
1.2.8 Kvalita	15
1.2.9 Reprodukovatelnost.....	15
1.2.10 Opakovatelnost.....	16
1.2.11 Přesnost měření	16
2 KVALITA A KVANTITA	17
2.1 KVALITA	17
2.1.1 Způsobilost kvalitativní informace	17
2.2 KVANTITA	18
2.2.1 Výrobní odchylky.....	18
3 MĚŘENÍ	19
3.1 NEJISTOTA MĚŘENÍ.....	19
3.1.1 Veličiny ovlivňující měření.....	19
3.1.2 Standartní nejistota typu A.....	20
3.1.3 Standartní nejistota typu B.....	20
3.1.4 Kombinovaná nejistota.....	20
3.1.5 Rozšířená standartní nejistota	21
3.2 GAUSSOVO NORMÁLNÍ ROZLOŽENÍ.....	21
3.3 GRUBBSŮV TEST ODLEHLÝCH HODNOT	22
3.4 PARAMETRICKÉ TESTOVÁNÍ	22
3.4.1 F-test (pro 2 rozptyly)	22
3.4.2 t-test (pro 2 rozptyly)	22
3.5 SPRÁVNOST MĚŘENÍ.....	23
4 SOUŘADNICOVÉ MĚŘENÍ	24

4.1	VHODNÉ VYUŽITÍ	24
4.2	MĚŘENÍ ROZMĚRU, TVARU A POLOHY	24
4.3	SNÍMACÍ SONDA	24
4.4	DRUHY SOUŘADNICOVÝCH MĚŘÍCÍCH ZAŘÍZENÍ	25
4.4.1	Stojanový.....	25
4.4.2	Výložníkový	26
4.4.3	Portálový	26
4.4.4	Mostový.....	27
5	SKENOVÁNÍ 3D OBJEKTŮ	28
5.1	ČLENĚNÍ 3D SKENERŮ	28
5.1.1	Destruktivní skenování.....	28
5.1.2	Ultrazvukové skenování.....	28
5.1.3	Optické skenování	29
5.1.4	Laserové skenování	30
5.1.5	Rentgenové skenování	30
5.2	MATNÍCI NÁSTRÍK	30
5.2.1	Uhlíctan vápenatý	31
5.2.2	Oxid titaničitý.....	31
II	PRAKTICKÁ ČÁST	32
6	CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	33
7	VÝROBEK.....	34
8	MĚŘÍCÍ A SCANOVACÍ PŘÍPRAVEK.....	35
9	MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ.....	36
9.1	WENZEL LH 87	36
9.1.1	Metrosoft quartis	37
9.1.2	Průběh kalibrace.....	37
9.2	ATOS TRIPLE SCAN.....	38
9.2.1	GOM Inspect	38
9.2.2	Průběh kalibrace.....	39
10	POROVNÁNÍ ZPŮSOBŮ MĚŘENÍ.....	40
10.1	MĚŘENÍ NA ATOS	40
10.1.1	Výhody	41
10.1.2	Nevýhody	41
10.2	MĚŘENÍ NA WENZEL LH87	42
10.2.1	Výhody	42
-	Měření je ovlivněno menší chybou.	42
10.2.2	Nevýhody	42
11	HODNOCENÍ V RÁMCI IDENTICKÝCH PARAMETRŮ	43

11.1	VZDÁLENOST 01.....	44
11.2	ROVINNOST 02	46
11.3	TVAR PLOCHY 03	48
11.4	TVAR PLOCHY 04	50
11.5	KRUHOVITOST 05	52
11.6	POLOHA PRVKU 06	54
11.7	ÚHEL 07	56
11.8	ROVNOBĚŽNOST 08	58
11.9	ÚHEL 09	60
11.10	PRAVOÚHLOST 10	62
11.11	HODNOCENÍ JEDNOTLIVÝCH MĚŘENÍ.....	64
11.12	TESTOVÁNÍ ODLEHLÝCH HODNOT	65
11.12.1	Vyšetření odlehlé hodnoty	66
11.13	F-TEST.....	69
11.14	T-TEST	70
11.15	DENDOGRAM.....	71
	ZÁVĚR	72
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	74
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	77
	SEZNAM OBRÁZKŮ	78
	SEZNAM TABULEK.....	80

ÚVOD

Tématem diplomové práce je statistická komparace mezi měřením na dotykovém 3D měřícím přístroji a skenovacím zařízením s využitím složitého vstříkovaného výrobku.

Měření a jeho zpracování je prostředek, díky kterému poznáváme jevy, tělesa a látky. Je to tedy nástroj pochopení, s kterým se dostáváme do styku každý den a provází nás po celý život. Měření charakterizujeme vlastnosti a chápeme zákonitosti, které rozlišíme kvantitativně a následně kvalitativně určíme. Vědecké disciplíny, jako je statistika a metrologie, provází lidstvo už od nepaměti. Lidé, technici a vědci měří, aby dokázali určit daný problém. Objektivním vyhodnocením následně vnikneme do podstaty problému a jeho poznání.

Se zvyšujícími se nároky na přesnost výroby se také zvyšují nároky na měření a kvalitu. Metrologie se může zdát na povrchu pomyslně chladná, skrývá však hluboké znalosti, kterým opravdu rozumí jen málo jedinců. Většina však chápe pojmy jako kilogram, litr, metr za určenou jistotu.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 METROLOGIE

Jeden z nejstarších vědních oborů zabývající se měřením a definováním měřitelné veličiny, jevu, látky nebo tělesa. Slouží ke studiu zákonů měření a musíme jí chápat obecně jako vědu držící se faktů poznání v prostoru a čase s jasnou nejistotou a pravděpodobností [1, 2, 3].

1.1 Členění metrologie

1.1.1 Vědecká

Vědecká nebo také experimentální metrologie zajišťuje vývoj, výzkum a uchování etalonů. Udává budoucnost a hledá nová východiska problémů v metrologii [3].

1.1.2 Legální

Legální metrologie se zabývá právními, technickými a administrativními záležitostmi, které se vztahují k měřidlu a měřícím jednotkám, procesu a k vlastním měřícím metodám určených i neurčených měřidel v praxi [3, 4].

1.1.3 Podniková

Průmyslová nebo také výrobní metrologie se orientuje na činnost v různých organizacích, výrobních, zdravotnických, zkušebních, dopravních a dalších procesech. Podstatou její činnosti je zabezpečovat hlavní a sekundární podnikové etalony. Hlavní náplní její činnosti je vést evidenci měřidel používaných v organizaci a starat se o jejich metrologické zabezpečení [3].

1.2 Definice základních pojmů v metrologii

V Metrologii, tak jako v každém vědeckém oboru, je jednotnost, přesnost, správnost a pochopení základem. Když se dva lidé s hlubokým přesvědčením baví o stejné věci a každý to myslí jinak, nebo když vedou nekonečné spory, přitom to oba myslí stejně. Zde by stačilo jasné a přesné vymezení a pochopení pojmů.

Tak jako v každém jazyce jde o srozumitelnost a přesnost vyjadřování zejména potřebné při jednotnosti chápání nesnází měření jeho stavu, vlastnosti a zákonitosti.

Pro odstranění častých rozepří a nedopatření musíme zajistit přesné a důsledné stanovení metrologického úkonu, sjednocení a zásadní využívání pojmů v praxi [4, 5].

1.2.1 Veličina

Měřitelná veličina charakterizuje tělesa, jevy nebo látky, které jsme schopni kvalitativně rozlišit a kvantitativně určit. Příkladem takové veličiny je například čas, teplota, vzdálenost nebo práce teplo atd.

Pravá neboli skutečná hodnota veličiny je taková, která by byla získána dokonalým měřením. Veličinu jako takovou umíme definovat jen s určitou nejistotou [5].

1.2.2 Kalibrace

Kalibrace je souhrn úkonů, které stanovují vztah při jasně definovaných podmínkách mezi měřicím systémem, měřidlem a referenčním materiálem, který je realizován etalonem.

Tato činnost při specifických podmínkách v první řadě určuje souvislost mezi hodnotou veličiny a nejistotou měření, v druhé řadě se tyto informace použijí k zajištění vztahu pro získání výsledku měření.

Jsou to metody přenosu stupnic a jednotek veličin měření v rámci návaznosti etalonů a měřidel. Dále pak podle požadavků na přesnost se měřidlo porovnává v samostatných bodech rozsahu stupnice se smluvenými hodnotami etalonu.

Výsledkem je vystavení kalibračního listu s tabulkou odchylek hodnot nebo korekční křivka hodnot. Ke kalibračnímu listu je vystavena také kalibrační známka, která je umístěna viditelně na daném měřicím zařízení [1, 5].



Obr. 1: Ukázka kalibračních známek.

1.2.3 Kontrola

Kontrola slouží k zjištění zda, byly dodrženy stanovené požadavky v určité oblasti za určitých podmínek.

Ověření měřidla a potvrzení jeho funkce se schválenými technickými a metrologickými požadavky na daný typ měřidla. Metody zkoušení ověřování daných druhů měřidel ustanovuje všeobecně závazný právní předpis vydaný úřadem pro normalizaci a měření [5].

1.2.4 Přesnost

Je kvalitativní pojem a určuje těsnost shody mezi naměřenou hodnotou a skutečnou hodnotou veličiny. Přesnost se nedá bezprostředně kvalifikovat a nedá se kvantitativně vyjádřit. Při posuzování kvality určitého měřidla nás vždy zajímá nejistota měření měřidla. Žádný měřicí přístroj nám nezměří reálnou veličinu [5].

1.2.5 Nejistota měření

Nejistota měření je kladný parametr přiřazený výsledkům měření, který vystihuje rozptyl měřené veličiny, při aplikaci použitých informací. Je to interval hodnot, ve kterém se daná hodnota s určitou pravděpodobností nachází [5].

1.2.6 Statistika

Statistika je numerické zachycení početných pokusů, experimentů a jevů. Tento obor se zabývá studiem a kvantitativní charakteristikou experimentů, pochodů a jevů [5].

1.2.7 Pokus

Pokus nebo také experiment je nástroj k dosažení informací o objektu bádání. Je to komplex cílevědomých činů, díky kterým odhalujeme podstatu našeho bádání. Při každém experimentu máme množinu podmínek, ovlivňující veličiny, při kterých uskutečňujeme pokus [5].

1.2.8 Kvalita

Kvalita je hlavní otázkou teorie poznání, komplex všech znaků a parametrů úrovně kvality musí být v souladu s technickými a vědeckými poznatky v daném oboru. Parametr kvality určuje celkový souhrn všech kvantitativních vlastností měřitelných a odhadovaných veličin a znaků kvality.

Zabezpečení kvality jako tokové má dvě stránky. Stránku organizační nebo výrobní a stránku metrologickou. Tyto dvě stránky jsou obě nevyhnutelné a navzájem propojené [4, 5].

1.2.9 Reprodukovatelnost

Souhra výsledů měření mezi stejnou měřenou veličinou při změně podmínek měření jako je změna operátora, metody, místa, měřících podmínek [1, 5].

1.2.10 Opakovatelnost

Opakovatelnost metody je definována, jako rozdíl mezi po sobě jdoucími hodnotami výsledků měření, stejných vzorků se stejným pracovníkem na stejném přístroji při zachování stejné metody a zkušebního postupu [1, 5].

1.2.11 Přesnost měření

Je to kvalitativní pojem a nelze ho přímo kvalifikovat nebo kvantitativně určit. Při hodnocení kvality konkrétního měřidla nás zajímá nejistota měření, která je definovaná pro určité konstantní podmínky [5].

2 KVALITA A KVANTITA

2.1 Kvalita

Ukazatelé kvality ve všech lidských činnostech a oborech jsou obzvlášť aktuální a byly aktuální od samého počátku tvorby člověka, protože vymezovaly a vymezují stav a vlastnosti jakéhokoliv produktu nebo činnosti. O kvalitě hovoříme jako o vhodnosti tvaru pro daný účel, uspokojení zákazníka v souladu s technickými a vědeckými poznatky v daném oboru.

Parametrově musí produkt splnit metrologické a měřitelné parametry, které definují různé vlastnosti. Stejně jako se zdokonaluje věda a technika, objevují se nové aspekty určující kvalitu a vlastnosti, které přispívají k teoretickým a praktickým v oblasti měření, hodnocení a řízení kvality.

Hodnocení kvality se mění podle přístupu a požadavků zákazníka, v této práci budeme však hodnotit kvalitu objektivně, s určitou přesností vyjádřenou určitou nejistotou stanovenou číselně. Proto je nutné kvalitu definovat z pohledu metrologického, a to z pohledu měření parametrů veličin určujících parametry kvality [4,6].

2.1.1 Způsobilost kvalitativní informace

Věda, postupem času, stále více rozvíjí měření kvalitativních znaků. V případech, kde nemáme možnost některou kvalitativní vlastnost měřit, posuzovat kvantitativně, nemáme stanovenou pro tuto kvalitativní vlastnost měřitelnou veličinu, její jednotku nebo stupnici měření, přistupujeme k převodu kvalitativní informace na kvantitativní kvantifikaci.

Na tento převod existuje mnoho metod. Část vlastností popisující kvalitu jsou svojí povahou subjektivní a jejich věcný obsah lze chápat různě. Metody subjektivního měření jsou založené na získání znaleckých hodnot, dále se stanoví relativní důležitost posuzované charakteristiky.

Tyto metody jsou založené na hodnocení pomocí stupnic, bodovacích stupnic a jiných hodnotících ocenění s grafickým znázorněním.

Kvalitní a technicky zvládnutý stabilní proces je podmínkou kvalitních produktů. Kontrola a zajištění kvality je podmíněna měřením jak na jeho vstupu, tak na jeho výstupu. Kvalita také úzce souvisí s návrhem celého procesu daného projektu. Závisí zejména na tvořivých činnostech lidí v teoretické i praktické části [6,7,8].

2.2 Kvantita

Pod pojmem kvantita rozumíme množství a počet. Kvantita je určení předmětů vzhledem k množství, počtu a velikosti. Kvantifikovat znamená určit množství, je to tedy činnost směřující k objektivnímu stanovení hodnot, parametrů a vlastností látek. Do kvantifikace patří, z hlediska metrologie, měření a počítání. Při číselném vyjádření nějaké vlastnosti, vyjadřujeme počet jednotek příslušné veličiny [9,10].

2.2.1 Výrobní odchylky

Pro splnění předepsané funkce se musí výrobek vyrobit s určitou přesností a její skutečná geometrie je charakterizovaná rozměry, tvarem, polohou, drsností a musí ležet v přípustném rozsahu daném tolerancí. Odchylky jsou výsledkem výroby a zjistíme je pomocí měření, kdežto tolerance je hranice, předepsaná konstruktérem a určuje jaké maximální odchylky mohou nastat při výrobě.

Jmenovitá hodnota je hodnota pravé veličiny předepsaná technickou dokumentací. Skutečná hodnota je veličina naměřená a vzniklá po zhotovení daného výrobku. Dokážeme jí číselně určit opakovaným měřením a vyjádřením její nejistoty [7, 9, 10].

Výrobní odchylka je rozdíl mezi skutečnou a jmenovitou hodnotou:

$$\Delta 0 = X_s - X_m \quad (1)$$

3 MĚŘENÍ

Věda začíná tam, kde se začíná měřit. K naší tížené veličině, k neurčitému prvku, které chceme změřit, přidáme měřidlo jako protipól. Spolehlivost měření je hledání fyzikálních a matematických konstant. Hodnoty těchto konstant nelze určit přímo teoreticky, ale je zapotřebí je změřit.

3.1 Nejistota měření

Všechny chyby zanesené do měření mají za následek, že naměřené hodnoty jsou pouhou aproximací pravé hodnoty veličiny a výsledek měření je kompletní jen tehdy, máme-li určenou i nejistotu měření. Výraz nejistota vystihuje variabilitu hodnot skutečné veličiny.

Na každé měření působí spousta vlivů, které dále rozdělujeme na náhodné a systematické. Tyto vlivy způsobují při měření systematickou a náhodnou chybu. Na měření může působit také hrubá chyba a z takového měření nelze vyhodnotit žádný výsledek.

Rozptyl hodnot měřené veličiny při měření si vyžaduje statistickou metodu výpočtu nejistoty měření, které říkáme směrodatná odchylka a označuje se jako standartní nejistota měření [10, 11].

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

3.1.1 Veličiny ovlivňující měření

Měření a produkce jsou stochastické procesy, při jejichž opakování nikdy nedostaneme úplně stejný výsledek. Různorodost výsledků zapříčiní časově se měnící podmínky a náhodné vlivy veličin, které se dají dokázat statistickými zákony.

Identifikovatelné jsou systematické odchylky parametrů, dají se vyhodnotit, lineárně sečíst a korekcí vyloučit z výsledku měření. Při opakovatelném měření mají stálou hodnotu. Tato odchylka je daná přesností měřícího přístroje a měřící metody, a lze ji také odborně odhadnout nestatickými metodami.

Náhodné odchylce parametrů se také říká statistická odchylka, vznikají náhodnými změnami vlivů okolí měření a náhodnými proměnnými stroje. Teorie ověřená praxí ukázala, že nejčastějším druhem, při měření s náhodnou chybou, rozdělení hodnot je normální rozdělení [12].

Tab. 1: *Veličiny ovlivňující prostředí.*

Náhodné vlivy prostředí	Náhodné vlivy stroje
Teplota	Opotřebení nástroje
Tlak	Házení stroje
Vlhkost	Souososti stroje
Otřesy	Tření v přístroji
Magnetismus	Tuhost stroje
Mechanické rázy	Nerovnoměrná kvalita obrobku

3.1.2 Standartní nejistota typu A

Je zatížena pouze chybou náhodnou, možné příčiny jsou ryze náhodné a nelze je dále kvalifikovat. Vypočtená hodnota klesá s počtem měření. Vypočtená hodnota je spjatá s aritmetickým průměrem a bez něj postrádá smysl. Standartní nejistota u_A se zjistí výpočtem směrodatné odchylky, dle vzorce č. 2 [12, 13].

$$u_A = S \quad (3)$$

3.1.3 Standartní nejistota typu B

Příčiny vzniku této nejistoty se dají odhadnout a některé jsou popsány v tabulce č.1. Především se jedná o zjistitelné nedokonalosti se kterými můžeme počítat. Hodnota vypočtené nejistoty u_B není zatížena počtem měření. Standartní nejistotu typu B stanovíme sumou známých a odhadnutelných nejistot [12, 13].

$$u_B = \sqrt{\sum u_{Bj}^2} \quad (4)$$

3.1.4 Kombinovaná nejistota

Zřídka označovaná nejistota typu C se vypočítá kombinací nejistot u_A a u_B [12, 13].

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (5)$$

3.1.5 Rozšířená standardní nejistota

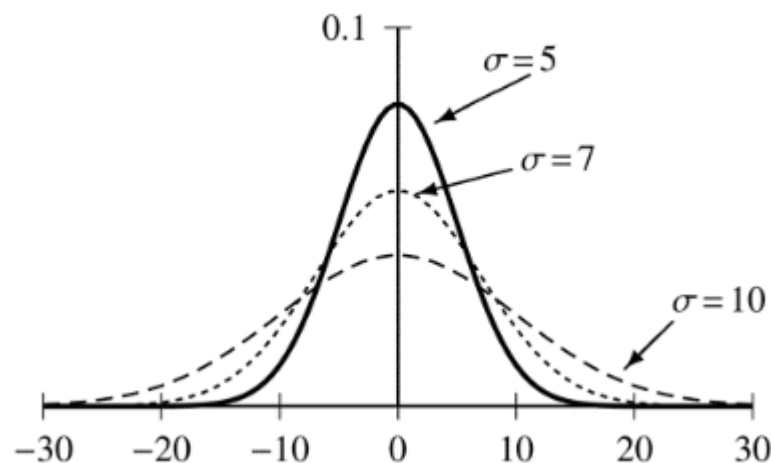
V případě potřeby zajištění vysoké pravděpodobnosti korektního výsledku se zesílí kombinovaná nejistota koeficientem K_u .

$$U = K_u \times u_c \quad (6)$$

3.2 Gaussovo normální rozložení

Statistika se nezajímá o jednotlivá měření, ale o celý soubor čísel. Zabývá se vztahy mezi výběrovým a základním souborem, a dále znaky měření a přesnosti měřících přístrojů. V metrologii a zkušebnictví se používá více než jen normální rozdělení.

Normální rozdělení je jako každé jiné rozdělení především myšlenkovým modelem a výpočtovou pomůckou. Přesnost je vyloučena samotnou náhodou výběrového souboru [14, 15].



Obr. 2: Normální rozdělení [15].

Symetrická zvonovitá křivka normálního rozdělení zcela vystihuje proměnou μ a pravděpodobnost rozptylu hodnot σ . Matematické vyjádření Gaussova rozložení [15]:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (7)$$

3.3 Grubbsův test odlehlých hodnot

Při sledování hodnot se mění rozptyl vlivem mnoha faktorů. Je nutné rozlišit chybu náhodnou, která má běžnou variabilitu a chybu hrubou, která může být zapříčiněna špatným měřením, měřicím přístrojem, metodikou apod.

Grubbsův je jeden z mnoha testů extrémních odchylek, který se používá především pro data podléhající normálnímu rozdělení. Testovací kritérium se potom počítá pro první a poslední hodnotu variační řady.

$$T_1 = \frac{\bar{x} - X_1}{s} \quad (8)$$

$$T_n = \frac{X_n - \bar{x}}{s} \quad (9)$$

Vypočtené kritérium je následně porovnané s tabulkou kritických hodnot pro daný počet měření výběrového souboru. Pokud je naše vypočtené T větší než tabulková hodnota T_{krit} , jedná se o hrubou chybu, a proto vyřadíme testovanou hodnotu ze souboru. Pokud je vypočtené T menší, jedná se o extrém a hodnota patří do souboru [13, 14].

3.4 Parametrické testování

Při zkoumání naměřených hodnot v rámci statistiky testujeme rozdíly mezi jednotlivými soubory hodnot. Základem parametrických testů jsou otázky na shodný aritmetický průměr souborů nebo jejich rozptylů. Pro tyto testy je nutno splnit podmínky normality.

3.4.1 F-test (pro 2 rozptyly)

Využívá se pro srovnání přesnosti dvou měřicích přístrojů a jejich metod. F-test hodnotí tzv. nulovou hypotézu: $H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$ a hypotézu alternativní: $H_a: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$.

Předpokladem pro hodnocení data je normální rozdělení s parametry μ a σ^2 [14,16].

3.4.2 t-test (pro 2 rozptyly)

Po provedení dvou měření stejného výběrového souboru např. před a po nějakém zásahu nebo měření na různých zařízeních získáme data tvořící páry. Testem se snažíme prokázat hypotézu nulovou: $H_0: \mu_1 = \mu_2$.

Výpočet testovacího kritéria t :

$$t = \frac{|\bar{x}|}{\sqrt{\frac{s^2}{n}}} \quad (10)$$

Dále testovací kritérium porovnáme s kritickou hodnotou a buď zamítneme H_0 nebo zamítneme H_a [14, 16].

3.5 Správnost měření

Správnost měření se vztahuje na hodnotu veličiny realizovanou etalonem podle mezinárodní přijaté úmluvy, která má vyjadřovat podstatu vlastnosti a fyzikální podstatu jednotky veličiny. Správnost realizace můžeme vyjádřit těsnou shodou hodnoty výsledků mezinárodního porovnávacího měření národních etalonů s podstatou definice.

Význam přesnosti měření spočívá v experimentálním faktu, že více měření, které se týkají stejného objektu měření, dávají přístroje navzájem rozdílné údaje, a tak vzniká otázka, do jaké míry jsou věrohodné. Získané údaje při měření jsou pod vlivem chyb. Stálé zdokonalování přístrojů dává stále menší chyby. Neexistuje přístroj, který by byl schopný měřit pravou hodnotu veličiny, tedy přesnost nemá teoretické hranice, ale jenom hranice praktické. Nemáme možnost získat a poznat pravou hodnotu.

Přesnost měřicího přístroje nebo měřicího procesu vyhodnocujeme z titulu jeho pravděpodobné způsobilosti poskytovat výsledky, které jsou kompatibilní s jiným měřením stejného objektu, přičemž každé měření ovlivňuje spousta faktorů a veličin. Odčítanou hodnotu vyjadřuje výstupní signál, který je statistickým výsledkem a metrologickou analýzou potřebnou na určení jejich vztahů [4, 10].

4 SOUŘADNICOVÉ MĚŘENÍ

Vývoj měřicí techniky a snižování nejistoty měření jsou úzce spjaté s požadavky na kvalitu výrobků a výrobních procesů.

Nejvýznamnější části souřadnicových měřících strojů jsou:

Tab. 2: *Součásti souřadnicového stroje.*

Hardware	Software
Pohon	Řídící systém
Měřicí systém	Programové vybavení
Snímací systém	Zobrazovač

Při měření na souřadnicovém zařízení musíme rozlišit souřadnicový systém stroje a souřadnicový systém výrobku. Pro určení souřadnicového systému výrobku nejprve musíme změřit referenční prvky, kde jejich polohu udává výkres. Jedna součást může mít i více souřadnicových systémů [17, 18, 19].

4.1 Vhodné využití

Využívá se zejména při malých produkcích nebo pro před sériové a laboratorní měření. Má flexibilní využití, zejména pro měření různých charakteristik při krátkodobé produkci.

4.2 Měření rozměru, tvaru a polohy

Na základě výkresové dokumentace zjistíme, jaké parametry a geometrické charakteristiky budeme měřit. Od složitosti měření těchto charakteristik se určuje měřicí zařízení. Souřadnicový měřicí přístroj je zařízení, které umí na základě přeměření součástky určit odchylky rozměrů, tvarů a vzájemných poloh vůči nominálním hodnotám [20].

4.3 Snímací sonda

Nejdůležitější součástí celého zařízení je měřicí sonda, ta vydává signál v momentě, kdy se dotkne měřené součásti. Software dále odečítá aktuální polohu dle souřadnicového systému a vyhodnotí měřený parametr [20].



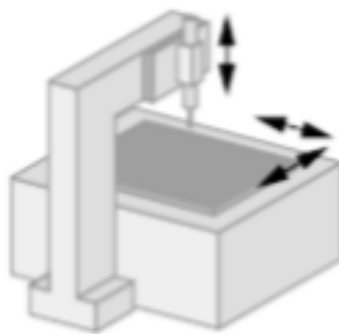
Obr. 3: Snímací sonda.

4.4 Druhy souřadnicových měřících zařízení

Souřadnicových měřících strojů je hned několik, dělí se především podle druhu, možnosti využití a ceny.

4.4.1 Stojanový

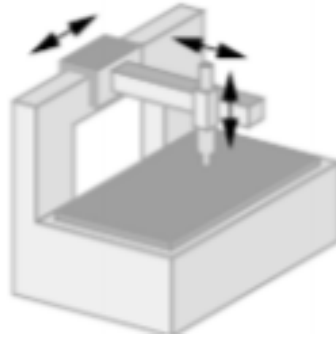
Stůl stojanového stroje se hýbe ve směru osy „x“ a „y“ a pinola je potom orientovaná ve směru „z“. Na desku stolu se potom upíná měřený objekt. Toto zařízení patří k nejpřesnějším a jsou příhodné pro menší rozsahy měření. Jeho tuhé úhlové uspořádání může být opatřeno kruhovým stolem. Výhodou je také snadný přístup k měřenému objektu [21, 22].



Obr. 4: Stojanové měřící zařízení [23].

4.4.2 Výložníkový

Měřené těleso se zde upne na nepohyblivou desku. Pinola se zde pohybuje v ose „z“ a v ose „y“, se mění vzdálenost od základny „x“. Na rameni je nezbytné vyvažování. Osa „y“ bývá u těch typů kratší, z důvodu pevnosti. Využívá se pro měření úzkých a dlouhých těles [21, 22].



Obr. 5: Vložkové měřicí zařízení [23].

4.4.3 Portálový

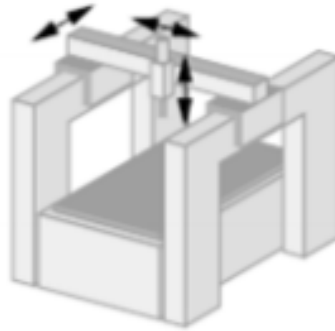
Pro středně velké a velké výrobky je to nejvhodnější, a také nejrozšířenější souřadnicový měřicí přístroj. Vysokou spolehlivost měření zajišťuje pevná a tuhá konstrukce. Struktura stroje omezuje přístup k měřenému tělesu. Z hlediska konstrukce rozdělujeme dva typy. S pevným stolem a pohyblivým portálem (Obr. 6 a)) nebo s pohyblivým stolem a pevným portálem (Obr. 6 b)) [21, 22].



Obr. 6: Portálové měřicí zařízení [23].

4.4.4 Mostový

Tento souřadnicový měřicí přístroj je význačný svým měřícím objemem, kde rozsah osy „x“ může dosahovat až 25 m a více. Velké a objemné součásti leteckého, lodního i automobilového průmyslu pro něj nejsou žádný problém. Často je také využíván pro měření celých karoserií [21, 22].



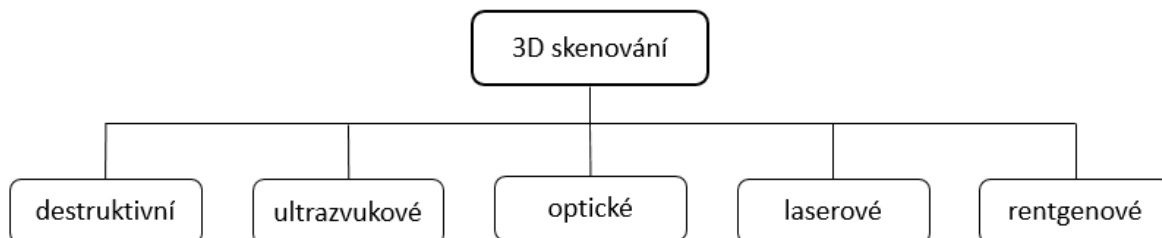
Obr. 7: Mostové měřicí zařízení [23].

5 SKENOVÁNÍ 3D OBJEKTŮ

Je to technologie, kdy se fyzický objekt a jeho tvar přenášejí do digitální podoby pomocí triangulace. Při vytváření 3D modelu skenováním nedochází k fyzickému kontaktu s objektem a tím zaniká riziko poškození tohoto objektu, zároveň je zachována značná přesnost a rychlost.

Ovládání 3D skenerů je v dnešní době velice snadné a intuitivní. Skenováním dokážeme převést do digitální podoby takřka jakýkoliv povrch, nezávisle na rozměru nebo složitosti. Tato technologie je proto hojně aplikovaná v mnoha odvětvích např. archeologie, lékařství, kinematografie, 3D tisk a reverzní inženýrství, metrologie a kontrola jakosti [24, 25, 26].

5.1 Členění 3D skenerů



Obr. 8: Dělení 3D skenerů.

5.1.1 Destruktivní skenování

Tato technologie se využívá zejména pro skenování produktů s členitou vnitřní geometrií, protože dokáže přenést do digitální podoby jak vnější, tak vnitřní geometrii. Většinou se však využívá ve spojení s bezkontaktní metodou. Jak již vyplívá z názvu, největší nevýhoda je zničení digitalizovaného objektu.

Než začne samotné skenování je do dutin výrobku nanesen kontrastní materiál, který se za pomoci vakua dokonale rozmístí do všech dutin. Skenování touto metodou probíhá na přístroji podobném frézce, kde se nejprve oddělují tenké vrstvy materiálu a po každém řezu proběhne samotné skenování [24].

5.1.2 Ultrazvukové skenování

Ultrazvukové skenování se řadí mezi nejlevnější snímací technologie povrchu objektů. Snímací sonda má kovový hrot a je ve tvaru pistole. Tato sonda se přikládá ke zkoumanému povrchu, kde vysílá ultrazvukové vlny, které jsou za pomoci čidel překládány do digitální

informace. Ultrazvukové snímání povrchy se využívá zejména v kinematografii a v oblastech, kde není vyžadována velká přesnost [24].

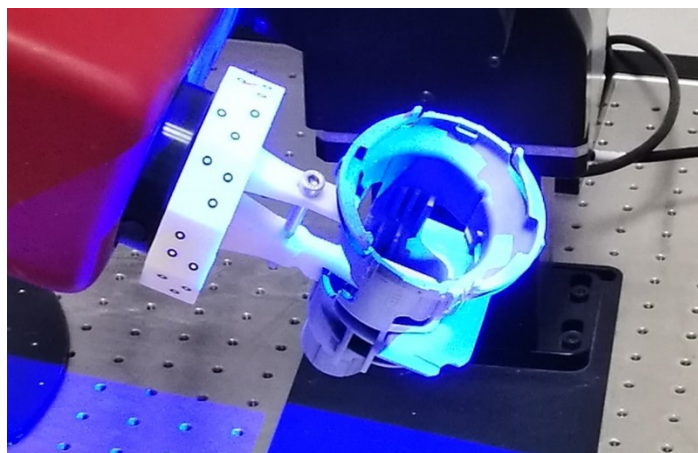


Obr. 9: *Ultrazvukový skener [27].*

5.1.3 Optické skenování

Optické skenování probíhá při snímání objektu z několika úhlů zároveň. Data se odesílají do počítače v podobě snímku objektu ze všech stran. Díky těmto snímkům daný software vytvoří digitální model. Tento model se vytváří z mračka bodů, které jsou spojeny různými geometrickými polygony nejčastěji typu spline.

Pro lepší skládání 3D digitálního obrazu se na těleso umístí několik centrovacích terčů, jejich počet se odvíjí od velikosti a členitosti skenovaného objektu [28, 29].



Obr. 10: *Optické skenování.*

5.1.4 Laserové skenování

Přístroje na laserové skenování fungují na principu podobném sonaru. Laserový paprsek je vyslán kolmo ke zkoumanému objektu. Informace o skenovaném předmětu si vyhodnocuje na základě odraženého paprsku, kde snímač zaznamenává dobu a úhel pod jakým se laserové záření vrací. Z polohy mračna bodů v prostoru při opakovaném snímání, je posléze software schopen zhotovit 3D model. Tato metoda má sice vyšší pořizovací náklady, ale za to je velice přesná [28, 29].



Obr. 11: *Laserová skenovací hlava.*

5.1.5 Rentgenové skenování

Využívá se zejména pro získání údajů o vnitřní stavbě tělesa nebo součásti. Tato nedestruktivní metoda je podobná klasickému rentgenování ve zdravotnictví s tou odlišností, že se používá vyšší intenzita záření. Tyto rentgenové zařízení se používají v uzavřených nádobách společně se zařízením CT nebo jsou mobilní a svým zářením skenují uzavřené nádoby např. potrubí, kotel a jiné [28, 29].

5.2 Matnicí nástřík

Matnicí nástříky se při skenování používají skoro pokaždé. I když výrobce udává, že jeho skener dokáže dokonale skenovat i bez matnicího nástříku nemusí to vždy být pravda. Je to jednoduchý způsob, jak se vypořádat s komplikacemi při skenování průhledných, matných

a lesklých povrchů. V rukou nezkušeného pracovníka může snadno dojít k zanesení velké nepřesnosti nanesením buď velké, a nebo tenké vrstvy nástřiku. Jako matnicí nástřik se v praxi nejčastěji používá prášek oxidu titaničitého, křídový prášek nebo prášek cyklododekanový [30, 31].

5.2.1 Uhlíčan vápenatý

Ve formě křídového prášku ve spreji patří k nejrozšířenějším a cenově přívětivým matnicím nástrojem. Snadné použití spreje však nezajistí tak tenkou vrstvu, jako je tomu v případě níže uvedeného oxidu titaničitého [30, 31].

5.2.2 Oxid titaničitý

Ve formě prášku se titanový matnicí nástřik využívá tehdy, vyžaduje-li skenování vysokou přesnost. Velice malé částice prášku vytvoří na matněném povrchu tenkou souvislou vrstvu. Pro přesné nanášení se Oxid titaničitý vrství pomocí airbrush pistole s kompresorem. Prášek se před použitím rozmíchá v rozpouštědle, nejčastěji lihu, které se po nanesení odpaří do několika sekund. Díky nepříznivé ceně, pracnému nanášení a čištění airbrush sady se v praxi využívá jen zřídka [30, 31].

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

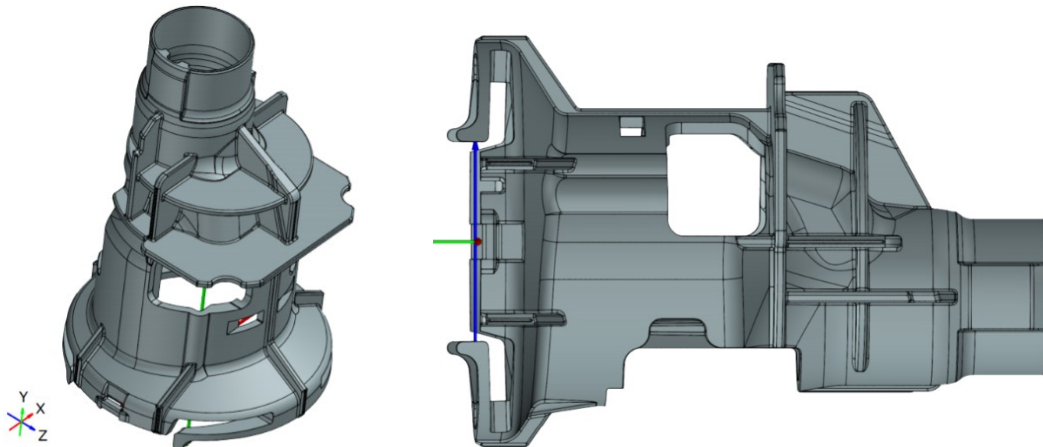
Cílem této diplomové práce je porovnání jak statistických, tak technických rozdílů dvou principů měření. Pro měření byly využity metrologické principy, které jsem se teoreticky v minulosti naučil a nyní je sám aplikoval. Dále jsem zde využil teoretické základy konstruování pro vytvoření měřícího přípravku.

Další problematikou, kterou se diplomová práce zajímá, je stanovení složitosti měření na stroji Wenzel LH 87 se softwarem Quartis a skenovacímu zařízení Atos a softwaru pro jeho vyhodnocení GOM Inspect.

Ze získaných poznatků bude vyhodnoceno, v jakém případě bude jednotlivé měření lépe užitelné v praxi.

7 VÝROBEK

Pro samotné měření bylo vybráno 30 ks složitého plastového výrobku. Tento produkt je vyroben technologií vstřikování. Použitý materiál je Polyoxymetylén (POM). Vstřikovací forma má dvě kavity. Pro diplomovou práci bylo odebráno z výrobního procesu po sobě jdoucích 30 kusů kavity č.1 a to z důvodu snížení standardní nejistoty typu B.



Obr. 12: Složitý polymerní díl.

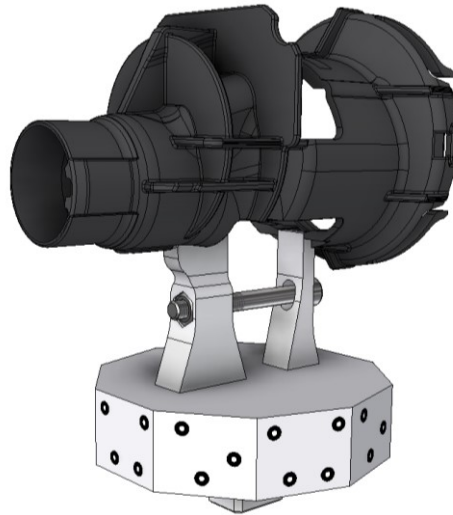
Pro zajištění následného smrštění a ustálení rozměrů byli díly uskladněny na 30 dní při pokojové teplotě.



Obr. 13: 30 ks ve výrobním procesu.

8 MĚŘÍCÍ A SCANOVACÍ PŘÍPRAVEK

Pro dosažení podmínek opakovatelnosti jednotlivých měření byl navrhnout přípravek zajišťující pevnost a stabilitu při samotném měření a skenování. Jednúčelový přípravek byl vyroben 3D tiskem společně s chránícími kleštěmi (Obr. 15).



Obr. 14: Skenovací a měřicí přípravek.

Důležitý aspekt na navrženém přípravku je vymezovací podložka na spodní části přípravku, ta zajistí pevné držení v otočné jednotce GOM-LIFT 890. Další důležité prvky jsou rovné hrany na obvodu přípravku, ty slouží k rozmístění referenčních bodů (terčů).



Obr. 15: Chránící kleště.

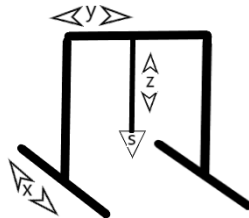
Dále byli navrženy kleště Obr. 15 které chrání referenční body při nanášení matného prášku.

9 MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ

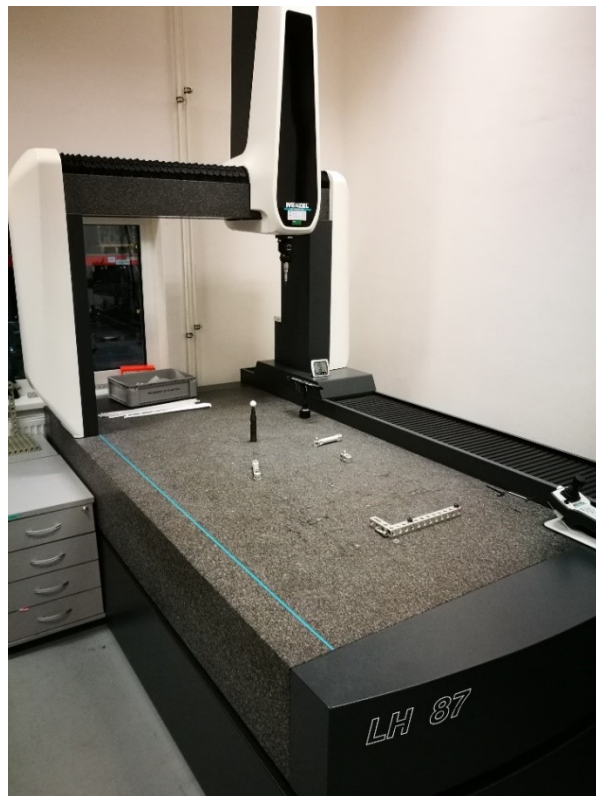
9.1 Wenzel LH 87

Výrobce je firma Wenzel, která je zaměřená na výrobu ultra přesných metrologických zařízení. Vysokou technologickou přesností a spolehlivostí představuje Wenzel od roku 1968.

Wenzel LH 87 je souřadnicové kontaktní měřicí zařízení, které je vybavené inkrementálním odměřováním a je odolný i při měření s nečistotami je docíleno přesného vyhodnocení polohy a stability ve všech třech osách. Jeho měřicí prostor je v ose: X = 1500 mm, Y = 800 mm, Z = 800 mm. Na obr.16 jsou tyto osy znázorněny.



Obr. 16: Osy měření.



Obr. 17: Měřicí zařízení Wenzel LH 87.

9.1.1 Metrosoft quartis

Je to úspěšný pokrokový celosvětově používaný měřicí program od firmy Wenzel. Snadno odměří hledané hodnoty proti jmenovitým hodnotám v CAD modelu. Disponuje graficky příjemným prostředím s okamžitým zobrazením naměřených výsledků s grafickým znázorněním směru odchylky.

9.1.2 Průběh kalibrace

Přístroj byl před samotným měřením kalibrován na kalibrační kouli. Pro efektivitu stačí, když sonda kalibruje jen ty doteky, které bude při samotném měření využívat.



Obr. 18: *Kalibrace doteku na kuličku.*

Pro měření byla využita kompaktní spínací doteková sonda Renishaw TP20 s modulem SF pro standartní sílu měření.

9.2 ATOS Triple Scan

Patří do nové generace mobilních skenerů, Používá modré světlo, které vytvářejí LED diody. Díky tomuto modrému světlu je skenování nezávislé na okolních světelných podmínkách. Přístroj je na bázi složení třech skenerů. První dva jsou v podstatě levá a pravá kamera s projektořem a třetí je klasický stereo skener.



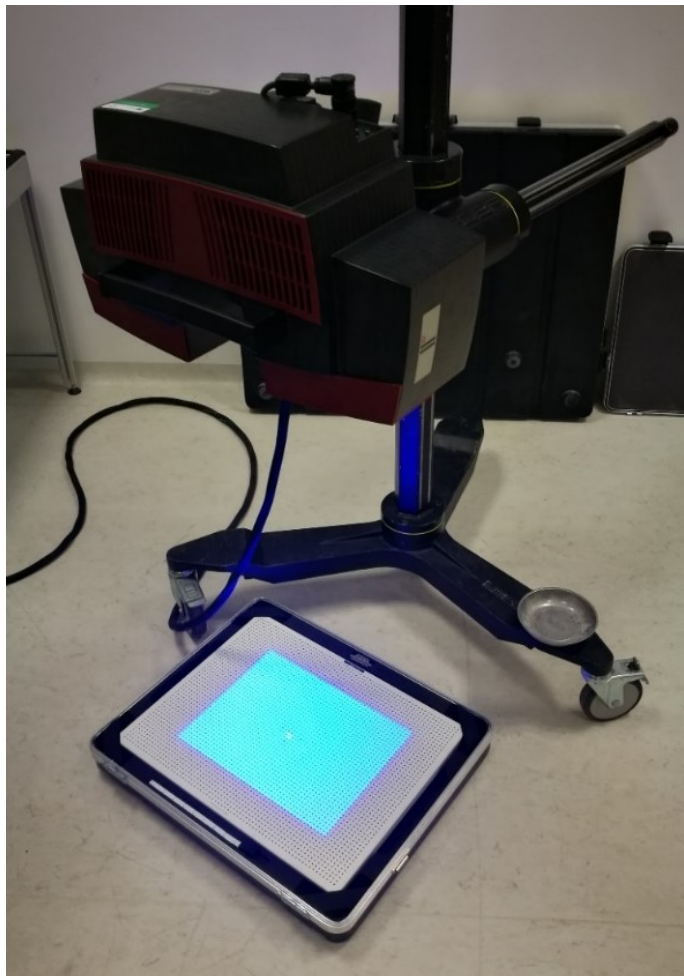
Obr. 19: *Atos triple scan* [32].

9.2.1 GOM Inspect

Na trhu je mnoho softwarů pracujících s polygonální sítí. GOM Inspect slouží především k softwarům pro vyhodnocení polygonální sítě. Pro vyhodnocení se skenovaný výrobek ustanoví na CAD model, program GOM Inspect nabízí mnoho metod. V našem případě byl použit Global bestFit na určené plochy tak, aby byli zajištěny všechny stupně volnosti. Stejně plochy byli použity i v programu metrosoft quartis při dotykovém měření.

9.2.2 Průběh kalibrace

Před skenováním samotným je potřeba vybrat ideální měřicí objem. Na skenování byl použit objem (400 x 320 x 320) mm. Dále byl přístroj kalibrován dle standartního postupu.



Obr. 20: *Kalibrace na kvantum bodů.*

10 POROVNÁNÍ ZPŮSOBŮ MĚŘENÍ

V této kapitole jsou popsány základy principů jednotlivých měřících zařízení se zdůrazněním na jejich výhody nevýhody.

10.1 Měření na Atos

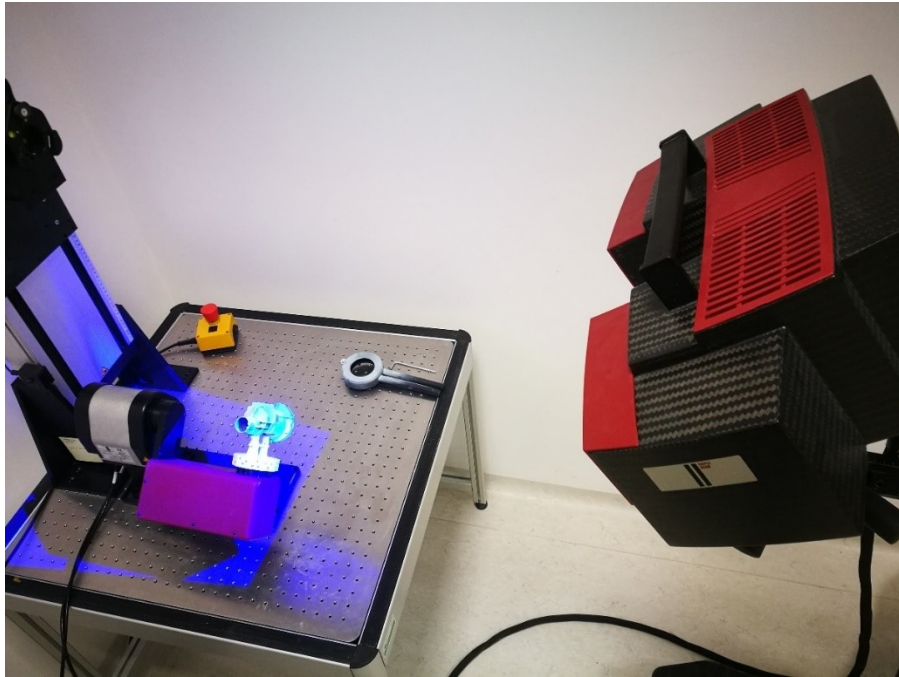
Nejprve byla provedena kalibrace stroje. Dále byly na měřící přípravek umístěné referenční body a na výrobek byl nanesen matnicí prášek Obr.21. Následně se přípravek se zafixovaným výrobkem umístí na rotační stůl. Následuje důkladný proces skenování Obr.22, který za pomoci programu převede fyzické těleso do počítače ve formě skenu.

Na naskenovaných výrobcích byly vyhodnoceny pomocí programu GOM Inspect měřené parametry.



Obr. 21: *Nanesení matnicího prášku.*

Jako matnicí prostředek byl použit oxid titaničitý ve formě prášku (TiO_2). Byl nanesen za pomoci kompresoru a airbrush pistole. Tento matnicí nástřik byl zvolen z důvodu největší výrobce udávané nejistoty pro matnicí nástřiky a to 0,003 mm.



Obr. 22: Proces skenování.

10.1.1 Výhody

- Jednoduchost při samotném vyhodnocení.
- Rychlé získání informací o výrobku.
- Vytvoření barevné mapy.
- Možnost přepravy zařízení.

10.1.2 Nevýhody

- Finanční dostupnost.
- Horší pro skenování vnitřních průměrů.
- Udávaná větší chyba měření.
- Zanesení chyby při použití matného prášku.
- Nevhodné pro sériovou výrobu.

10.2 Měření na Wenzel LH87

Nejprve musí přístroj vyrovnat CAD model na měřený výrobek a srovnat tak, souřadný systém stroje s souřadným systémem výrobku. Upneme si výrobek tak, aby se při dotyku se sondou nepohnul. Dále probíhalo měření dle předem naprogramovaného programu určeného na přesné vyhodnocení předem určených hodnot.



Obr. 23: Měření dotykovou sondou.

Pro měření byla využita sonda Renishaw TP20.

10.2.1 Výhody

- Měření je ovlivněno menší chybou.
- Nepotřebuje matnicí prášek.
- Po vytvoření programu se jedná o rychlé měření.

10.2.2 Nevýhody

- Nepřenosné zařízení.
- Výrobek musí být pevně upnut.
- Dotek může pohnout s výrobkem.
- Zdlouhavé tvoření programu.

11 HODNOCENÍ V RÁMCI IDENTICKÝCH PARAMETRŮ

Pomocí stroje Wenzel LH87 a jeho softwarového rozhraní Metrosoft Quartis a skenovacího zařízení ATOS za pomoci softwaru GOM Inspect bylo na třiceti stejných dílech vyhodnoceno těchto deset parametrů:

Tab. 3: *Měřené parametry.*

č.	Měřený Parametr		
	Wenzel (W)	Atos (A)	
1	vzdálenost		[mm]
2	rovinnost		[mm]
3	tvar		[mm]
4	tvar		[mm]
5	kruhovitost		[mm]
6	poloha		[mm]
7	úhel		[°]
8	rovnoběžnost		[mm]
9	úhel		[°]
10	pravoúhlost		[mm]

V této kapitole jsou popsány jednotlivé vyhodnocené parametry, dále jsou naměřené výsledky porovnány pomocí základních statistických nástrojů, ve kterých jsou vyhodnoceny také míry centrální tendence.

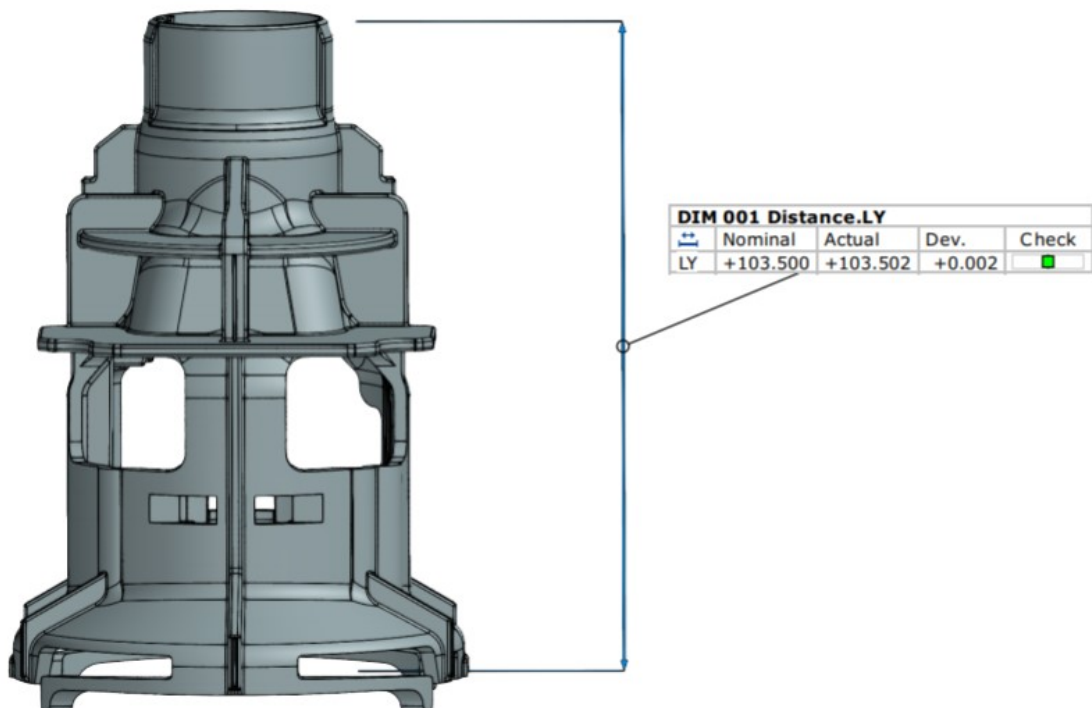
Předpokladem je, že odchylky u dotykového měření se budou lišit od odchylek získaných skenováním. Dále jde předpokládat, že skenování bude mít větší rozptyl naměřených hodnot, a to z důvodu menší přesnosti měření a zanesení větší chyby měření nanesením matnícího prášku.

Naměřená data, byla vyhodnocena a graficky zpracována v profesionálním statistickém programu Minitab.

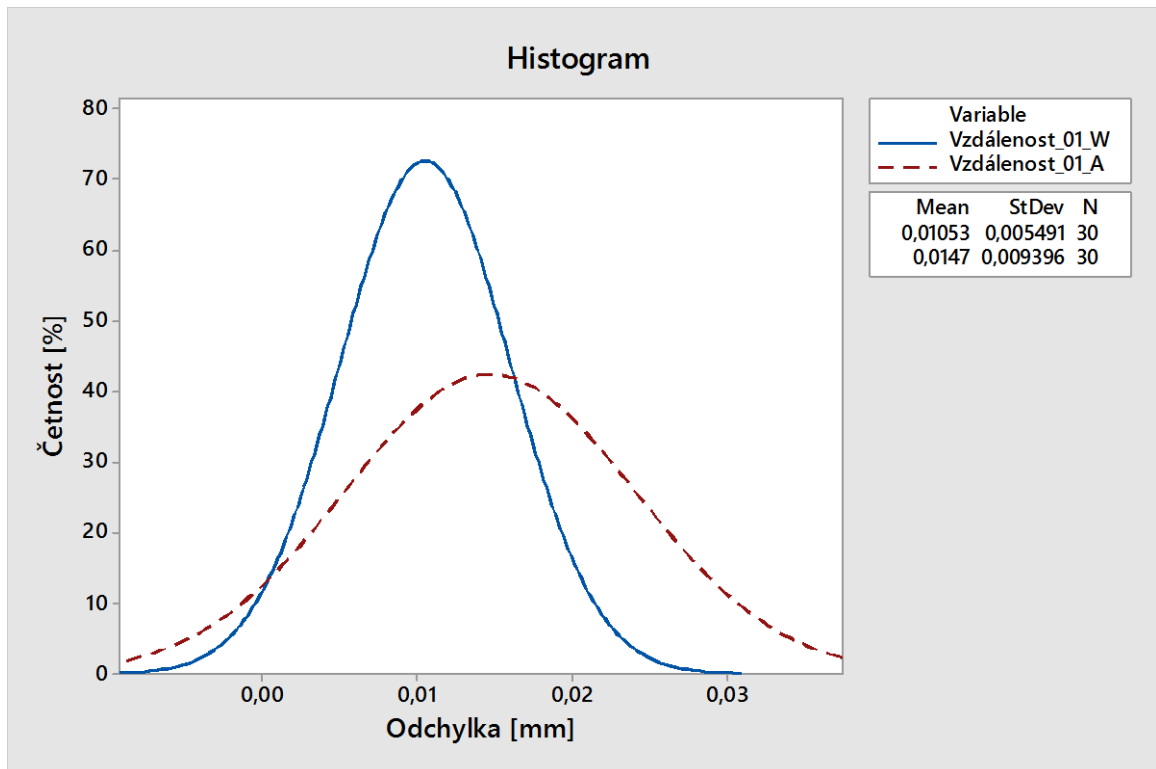
11.1 Vzdálenost 01

Jako první parametr byla vybrána nejdelší vzdálenost od spodní základní plochy k horní ploše válcovitého výstupku. Nominální hodnota této vzdálenosti je 103,5mm. Naměřený, tedy aktuální rozměr se odečte od nominálu a tím nám vznikne hledaná odchylka.

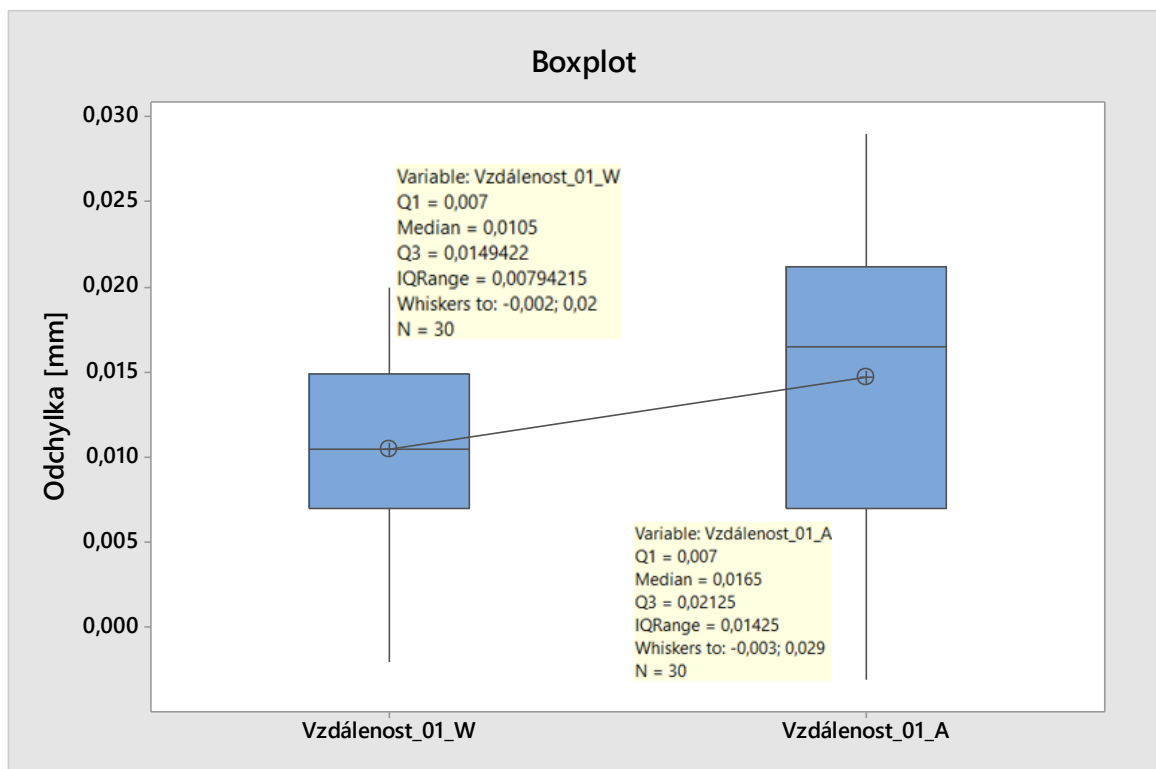
Tento parametr se kromě 3D měření dá určit konvenčnější metodou např. na výškoměru, byl však pro jednoduchost vybrán z důvodu zřetelnosti rozdílů mezi jednotlivými systémy.



Obr. 24: Měření vzdálenosti.



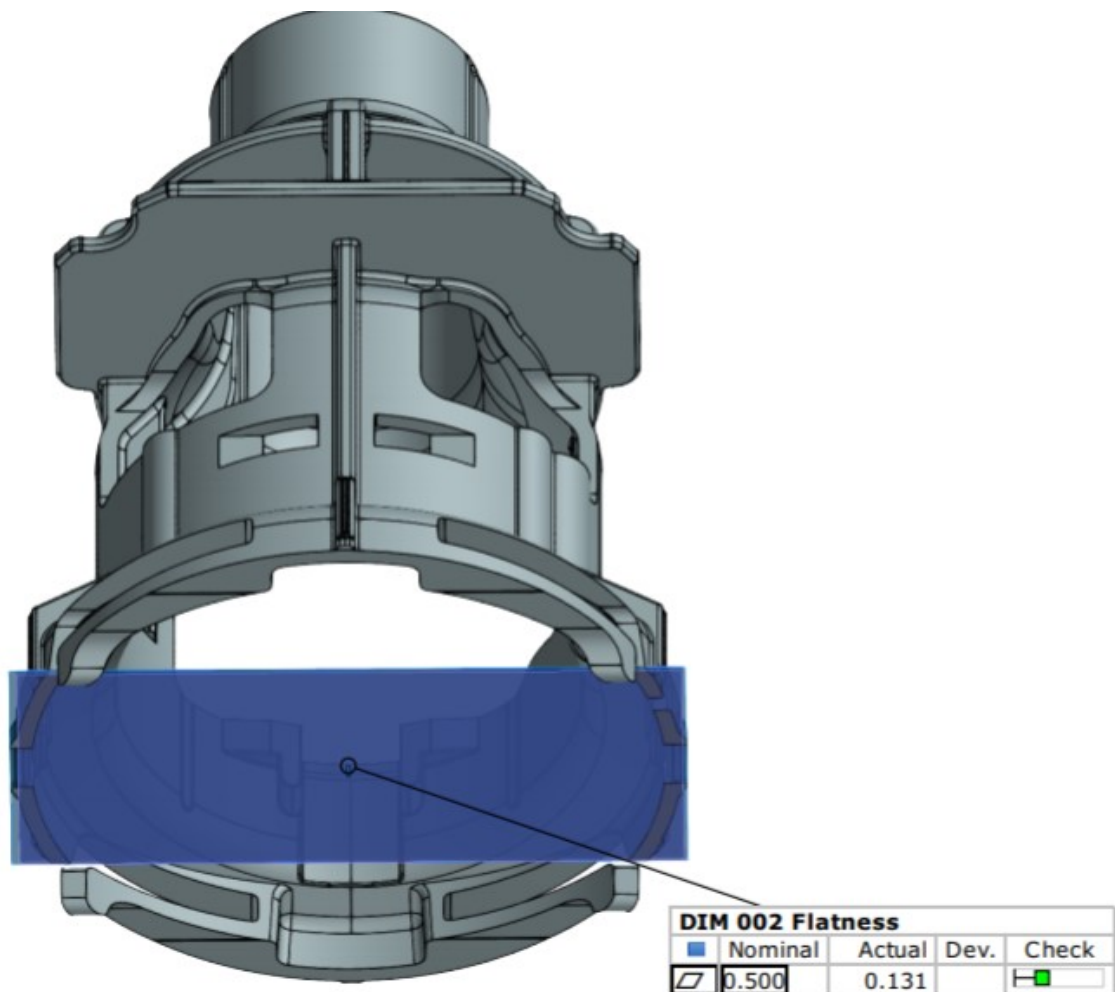
Obr. 25: Histogram měření vzdálenosti.



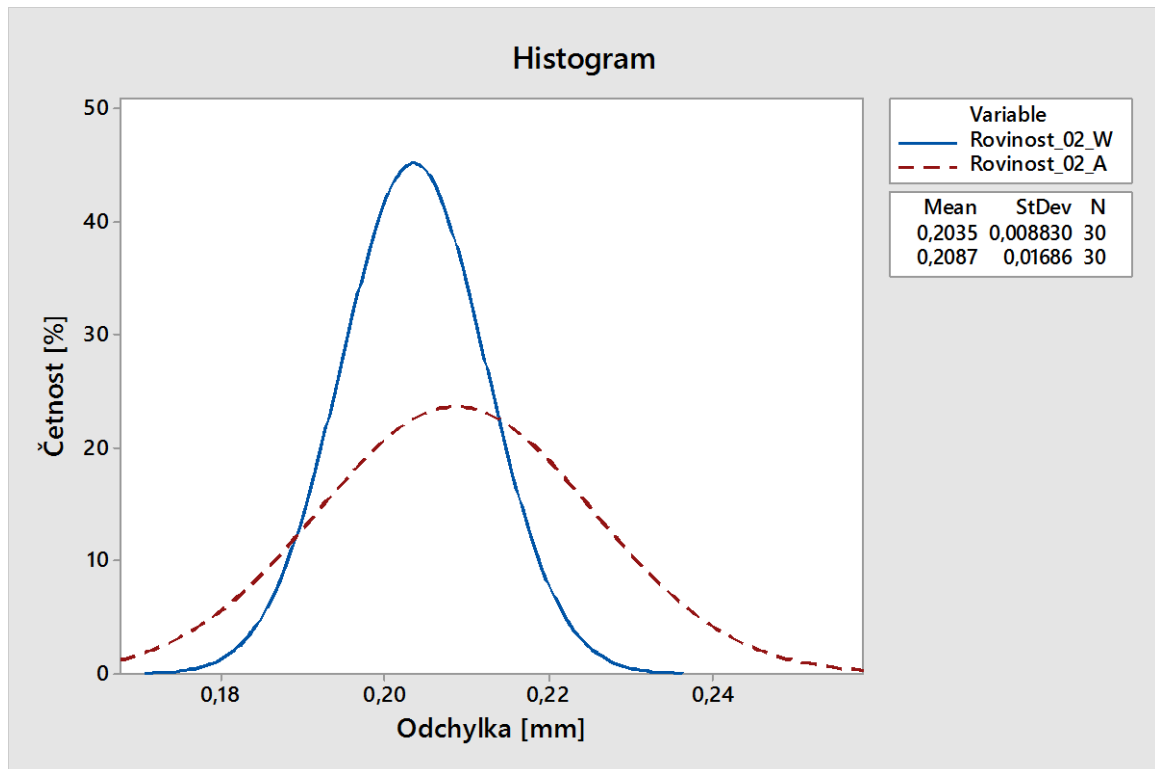
Obr. 26: Boxplot měření vzdálenosti.

11.2 Rovinnost 02

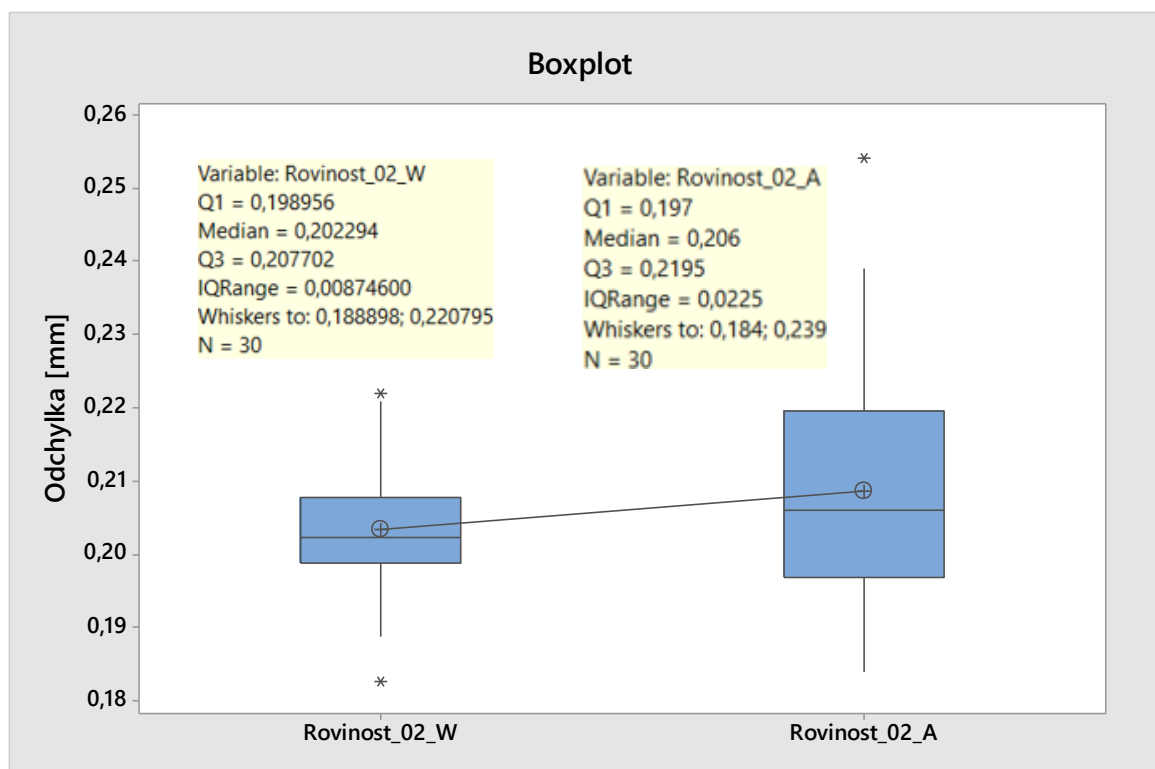
Jako další parametr byla vyhodnocena rovinnost plochy. Rovinnost je jednou ze základních tolerancí tvaru. Byla vyhodnocena jako rozdíl mezi plochou základny vytvořenou v CAD modelu a plochou na skenovaném výrobku.



Obr. 27: Měření rovinnosti.



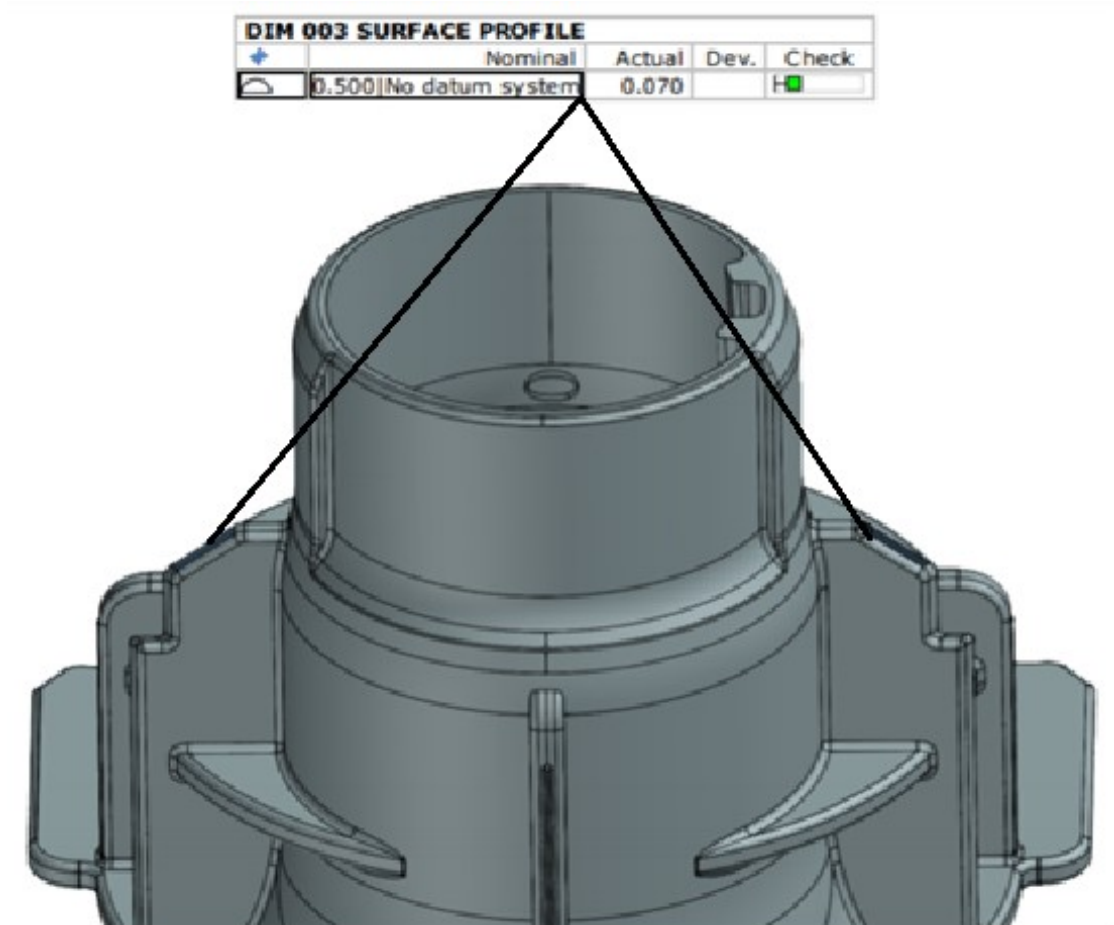
Obr. 28: Histogram měření rovinnosti.



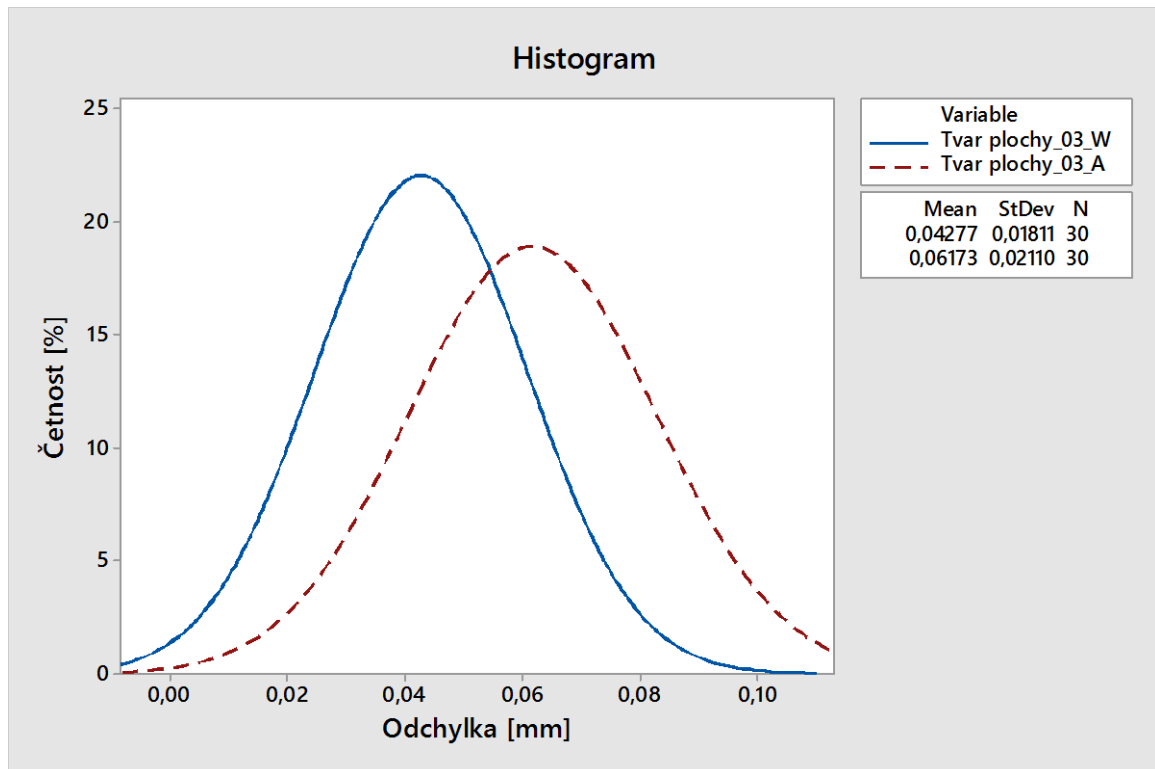
Obr. 29: Boxplot měření rovinnosti.

11.3 Tvar plochy 03

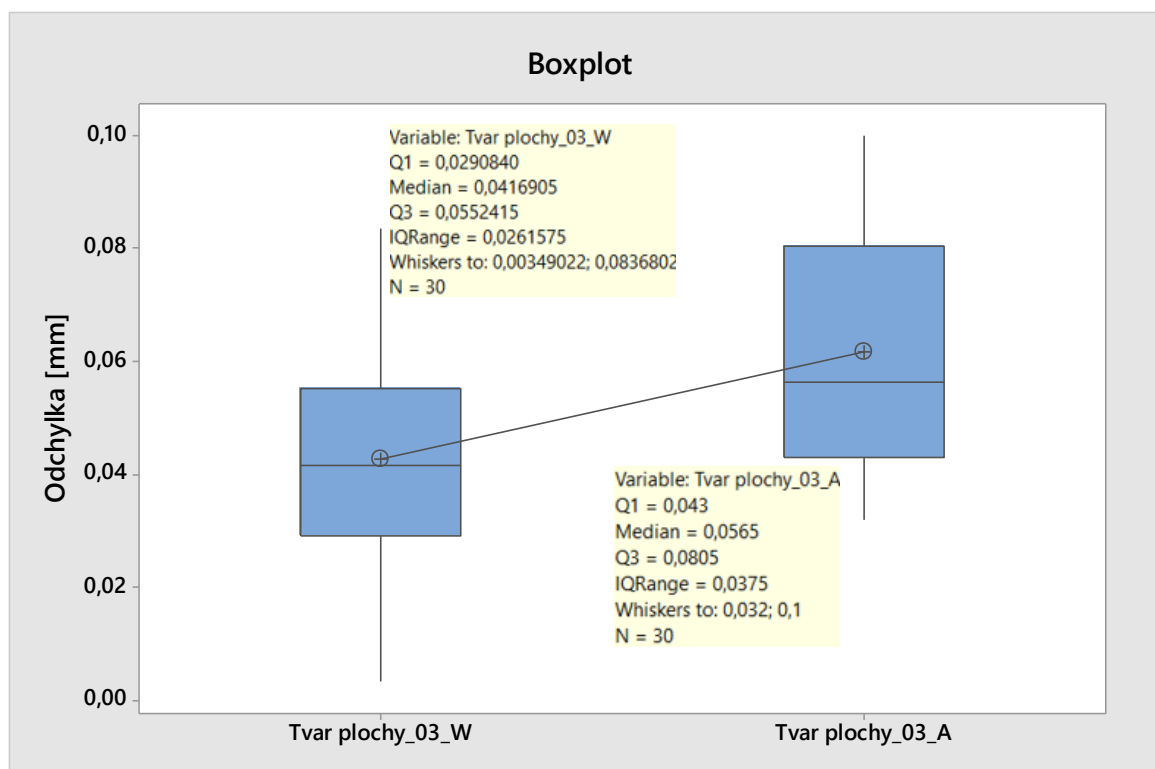
Odchylka tvaru plochy je jeden z častých parametrů 3D měření. Jeho výsledek je získán přiřazením skenovaného dílu k nominálním hodnotám a vyhodnocen dle určených ploch v příslušném programu.



Obr. 30: Měření odchylky tvaru plochy.



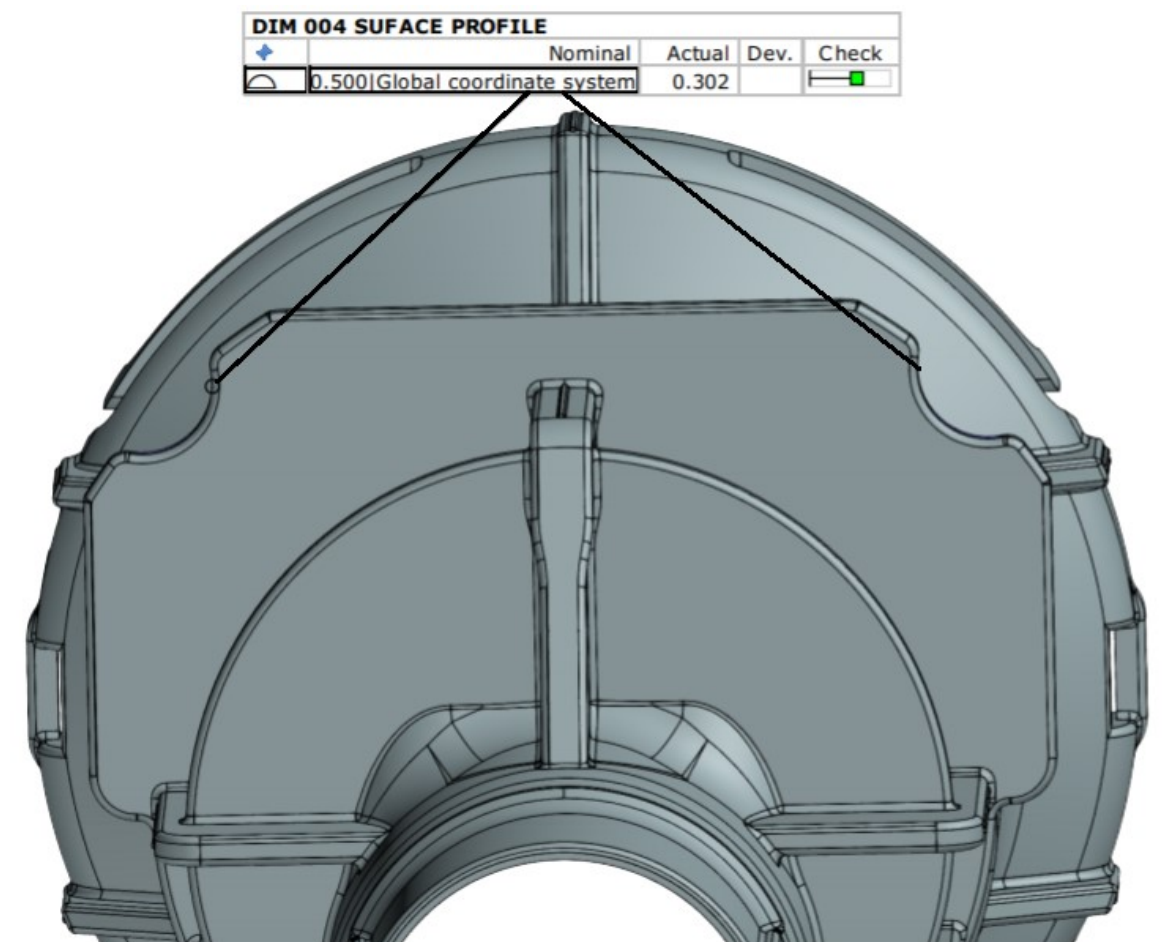
Obr. 31: Měření odchylky tvaru plochy.



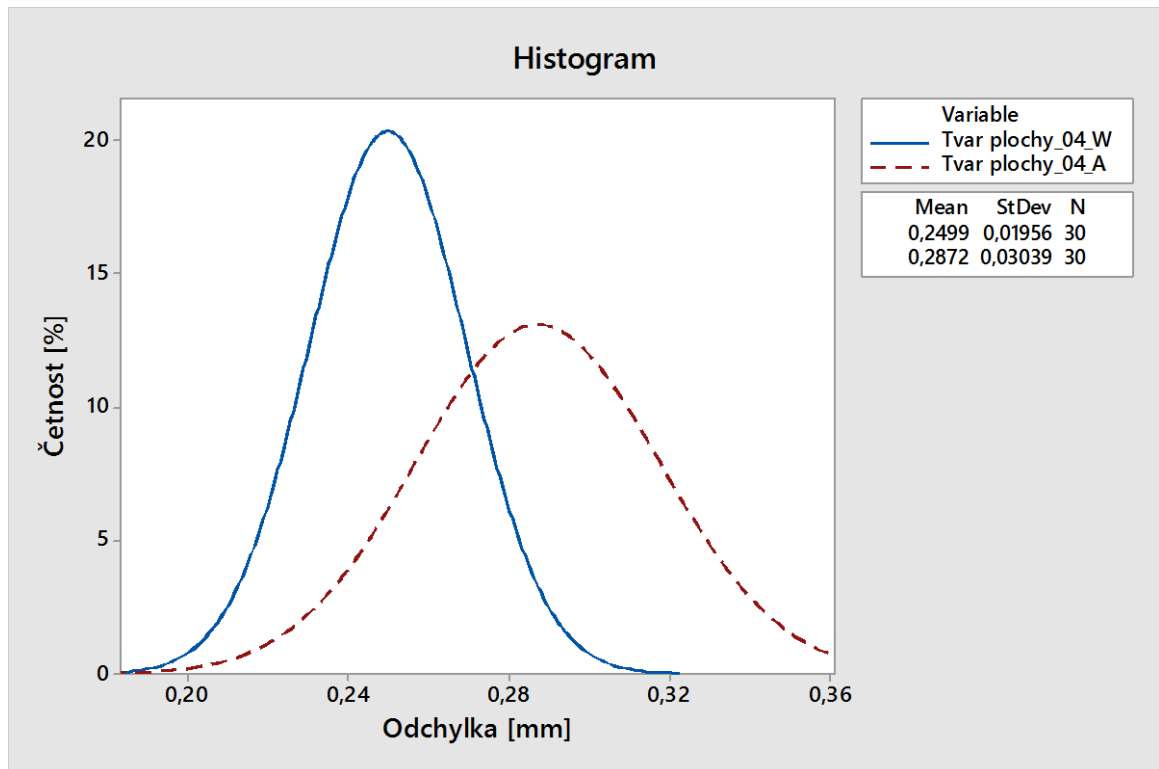
Obr. 32: Boxplot měření odchylky tvaru plochy.

11.4 Tvar plochy 04

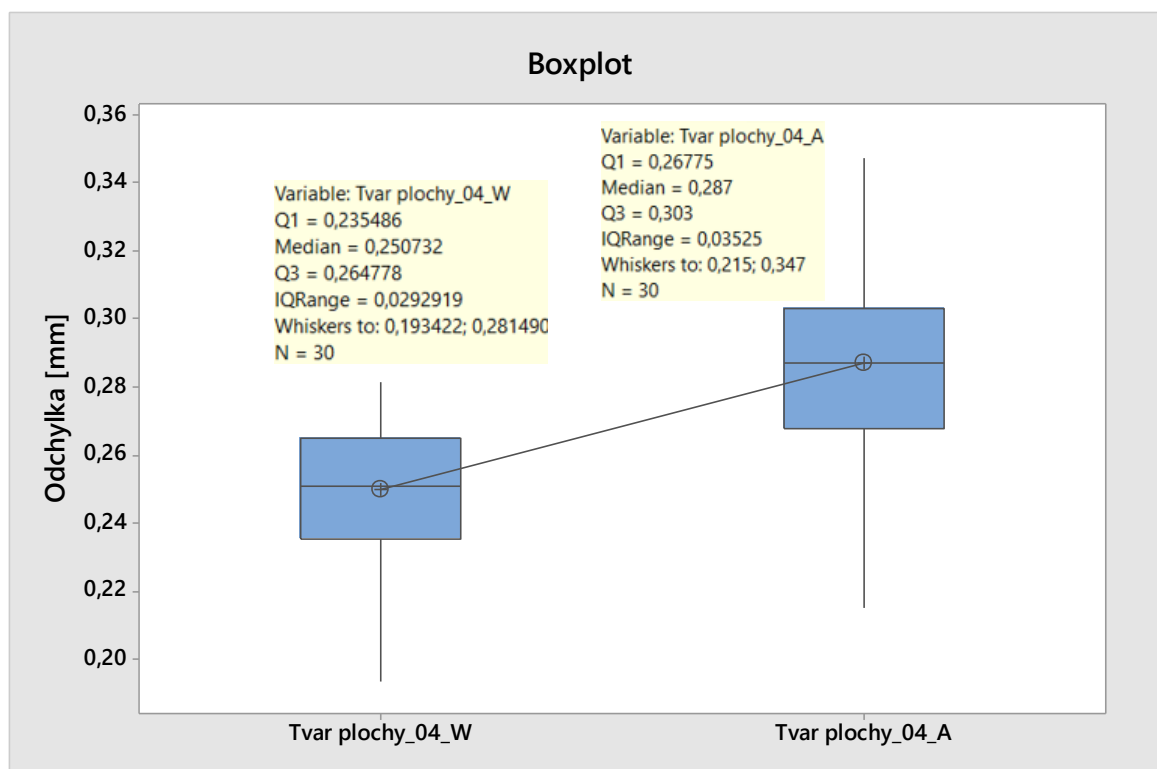
Jako odchylka tvaru plochy se často vyhodnocují hrany dílu, rámečku a hrany žeber.



Obr. 33: Měření odchylky tvaru plochy.



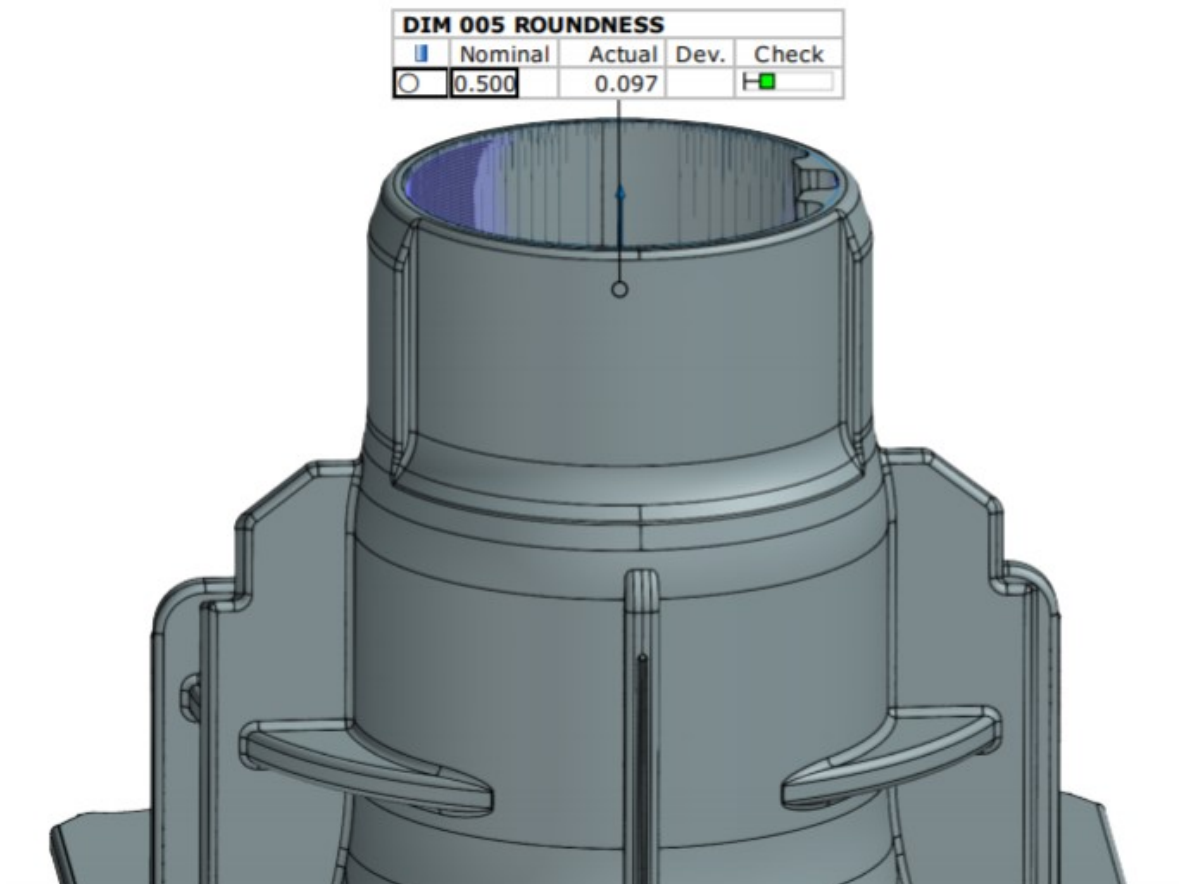
Obr. 34: Histogram měření odchylky tvaru plochy.



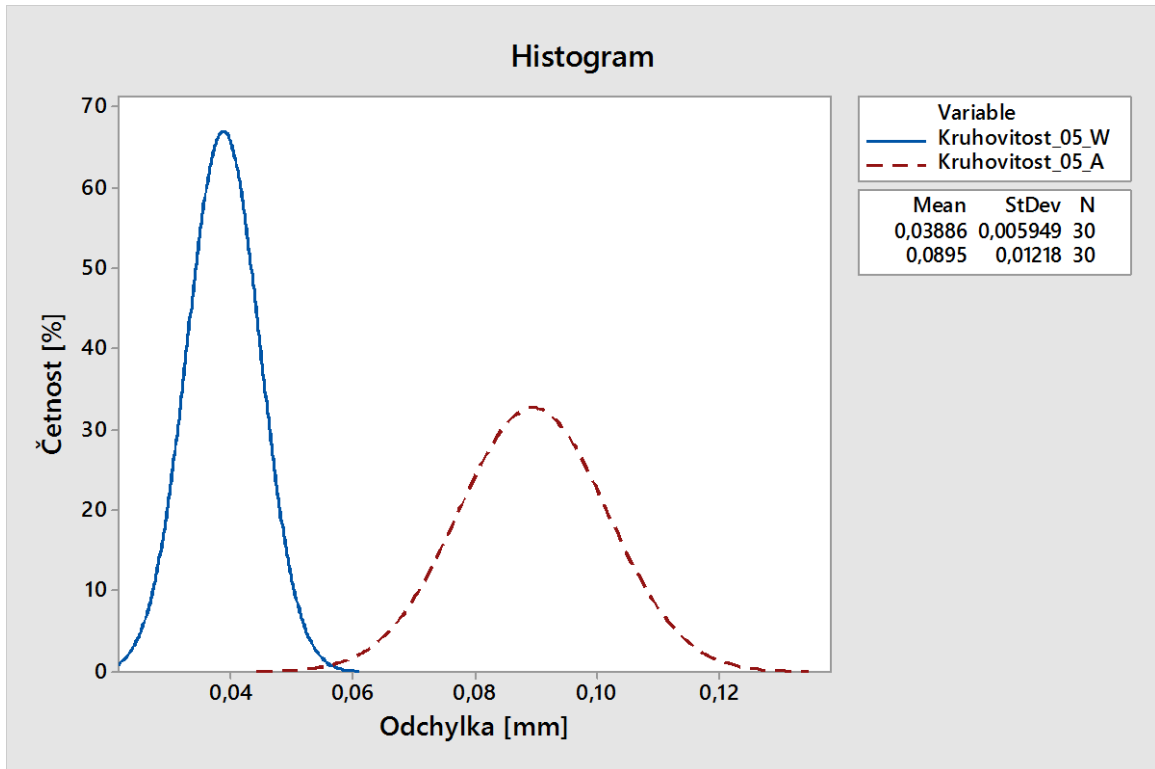
Obr. 35: Boxplot měření odchylky tvaru plochy.

11.5 Kruhovitost 05

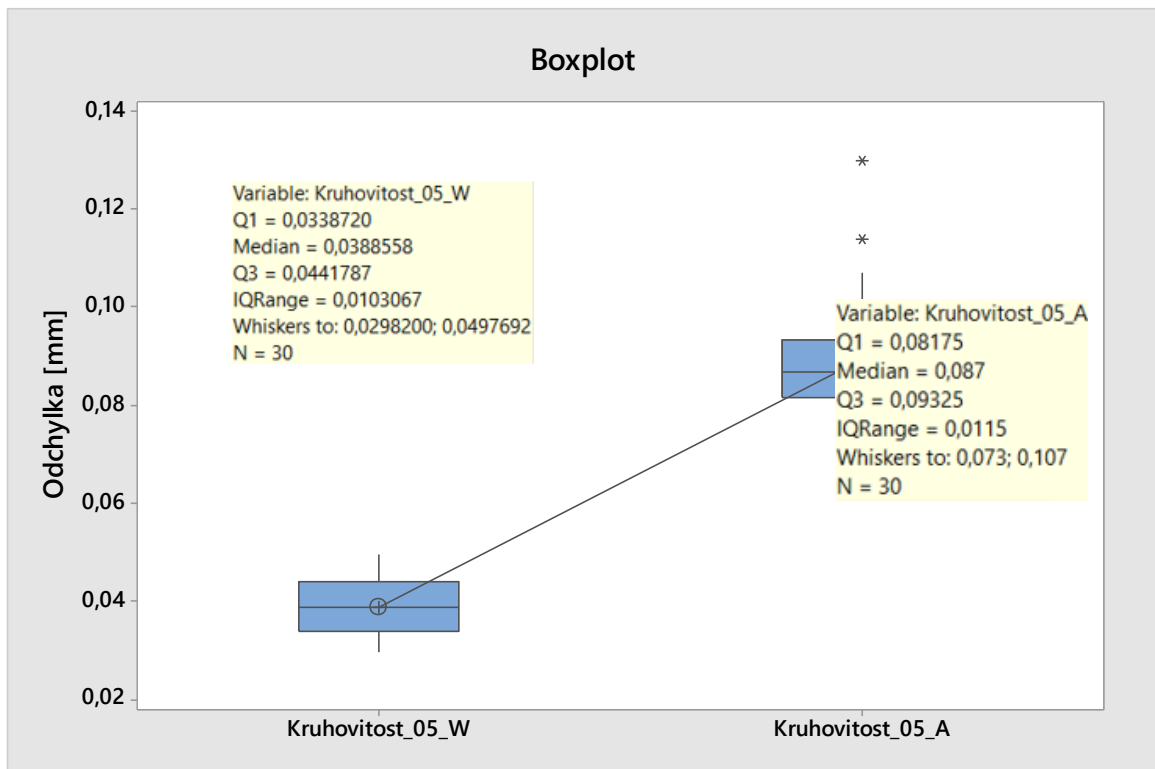
Geometrická definice tolerance kruhovitosti je rozdíl průměrů soustředných kružnic v našem případě rozdíl mezi nominální kružnicí vytvořenou v CAD modelu a kružnicí na naskenovaném výrobku. Kružnice byla v obou systémech vytvořena 3 mm pod hranou.



Obr. 36: Měření kruhovitosti.



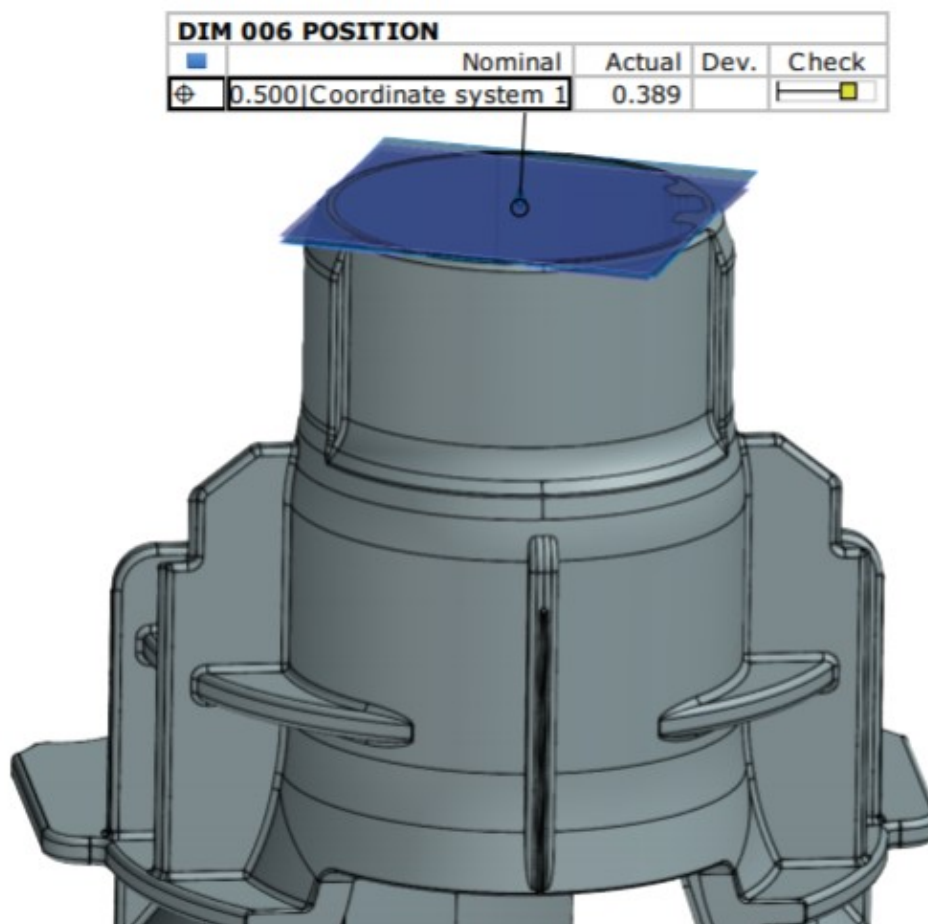
Obr. 37: Histogram měření kruhovitosti.



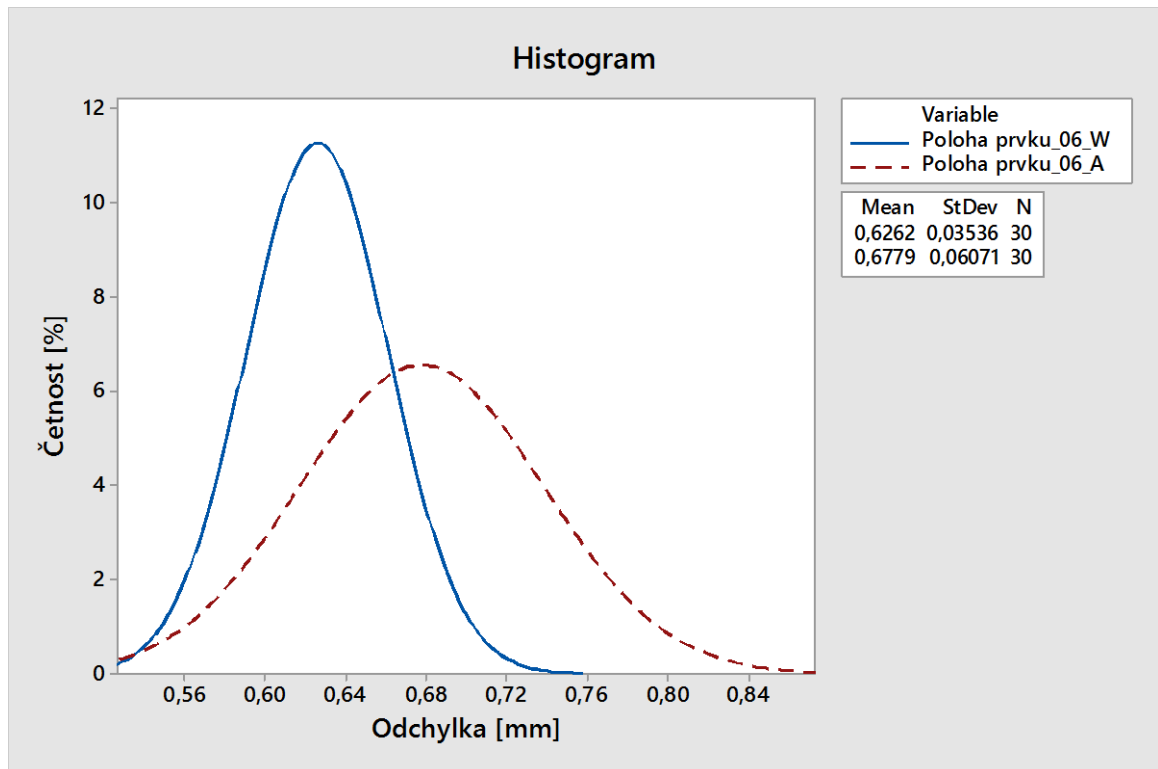
Obr. 38: Boxplot měření kruhovitosti.

11.6 Poloha prvku 06

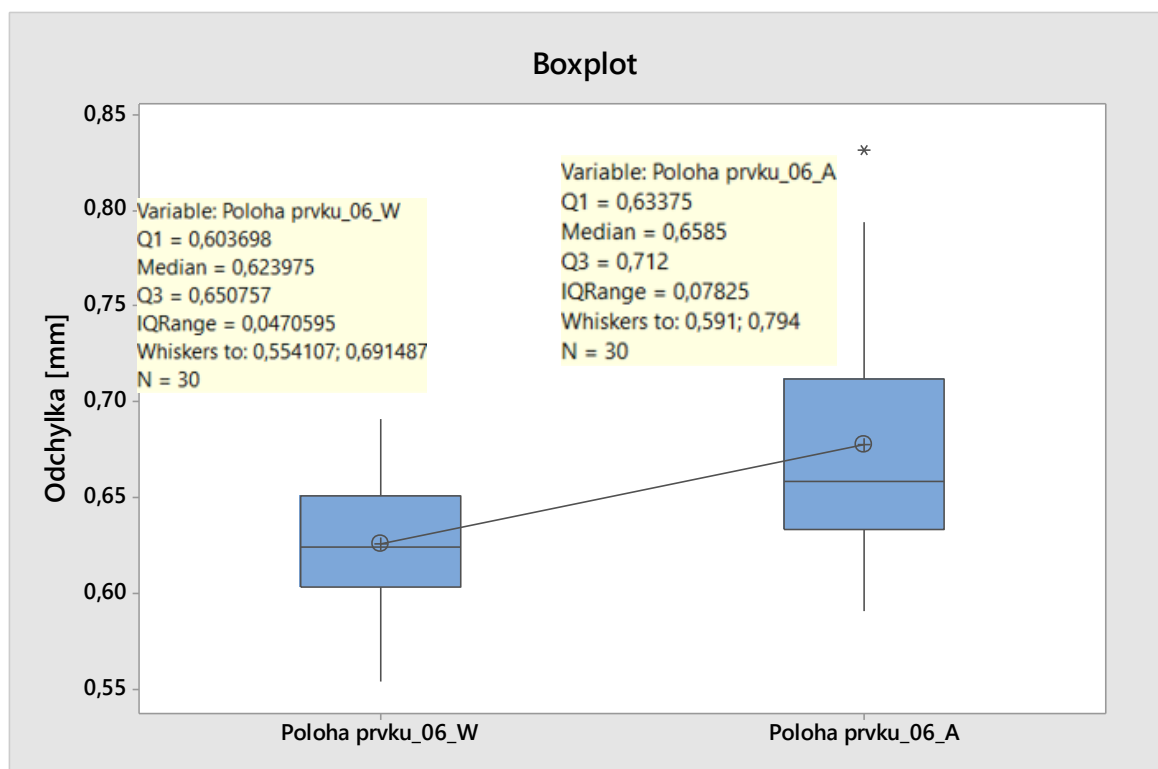
Vyhodnocovaným parametrem byla pozice bodu. Tento bod je v obou systémech vytvořen průsečíkem plochy v horní části výrobku a středem válce pod touto plochou.



Obr. 39: Odchylka polohy bodu.



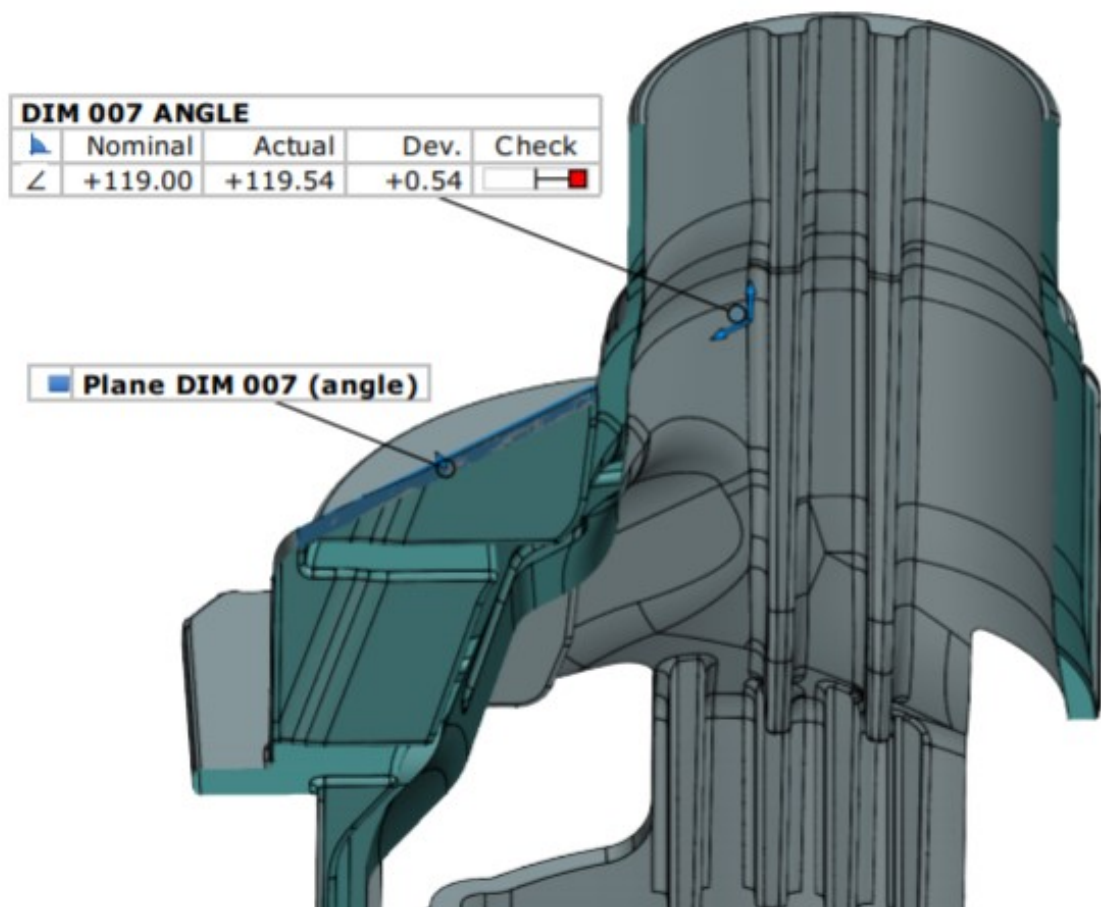
Obr. 40: Histogram měření odchylky bodu.



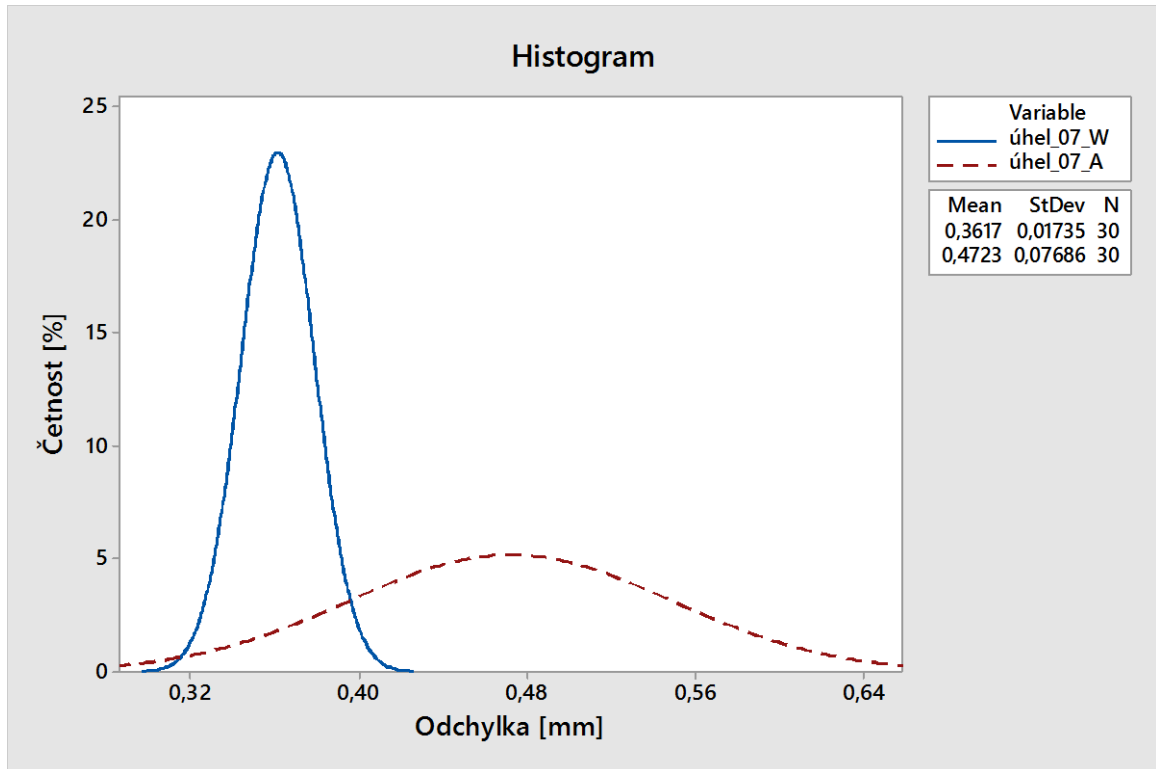
Obr. 41: Boxplot měření odchylky bodu.

11.7 Úhel 07

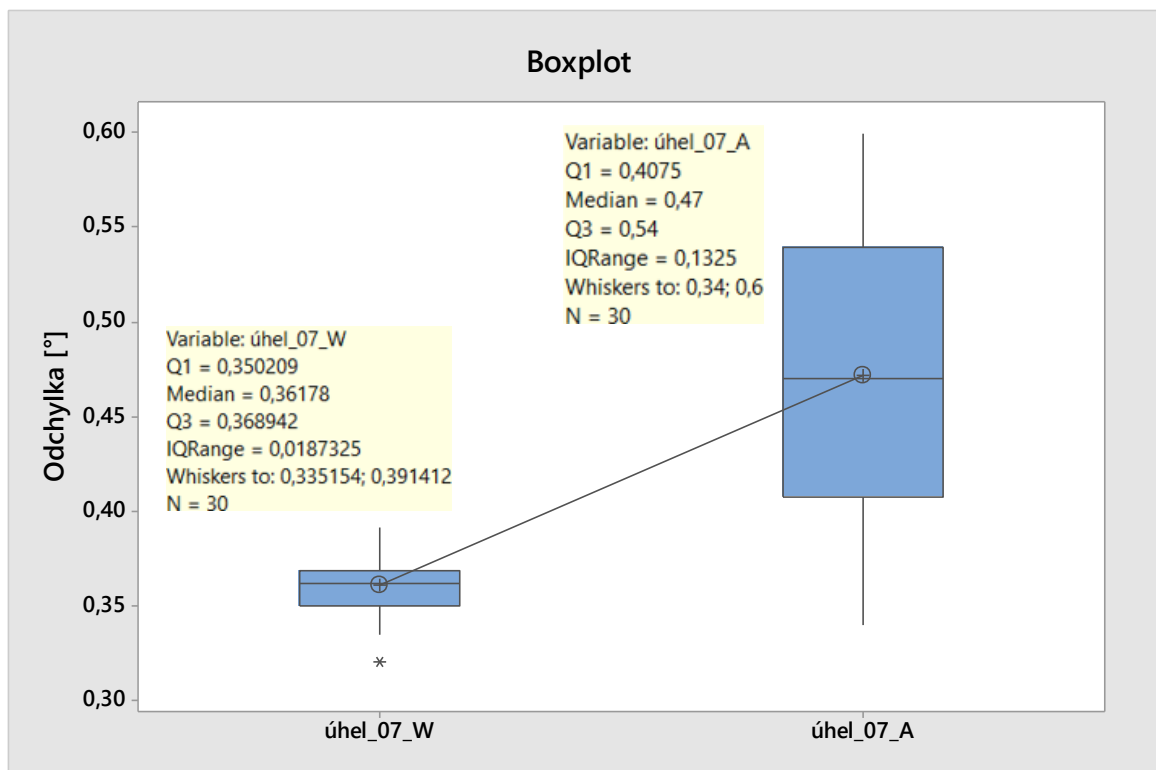
V řezu výrobku na obr. 42 vidíme vytvořený úhel z šikmé roviny DIM 007 a osy „Y“. Nominální hodnota tohoto úhlu je 119° a zkoumaná hodnota je rozdíl naměřeným úhlem a úhlem nominálním.



Obr. 42: Měření úhlu.



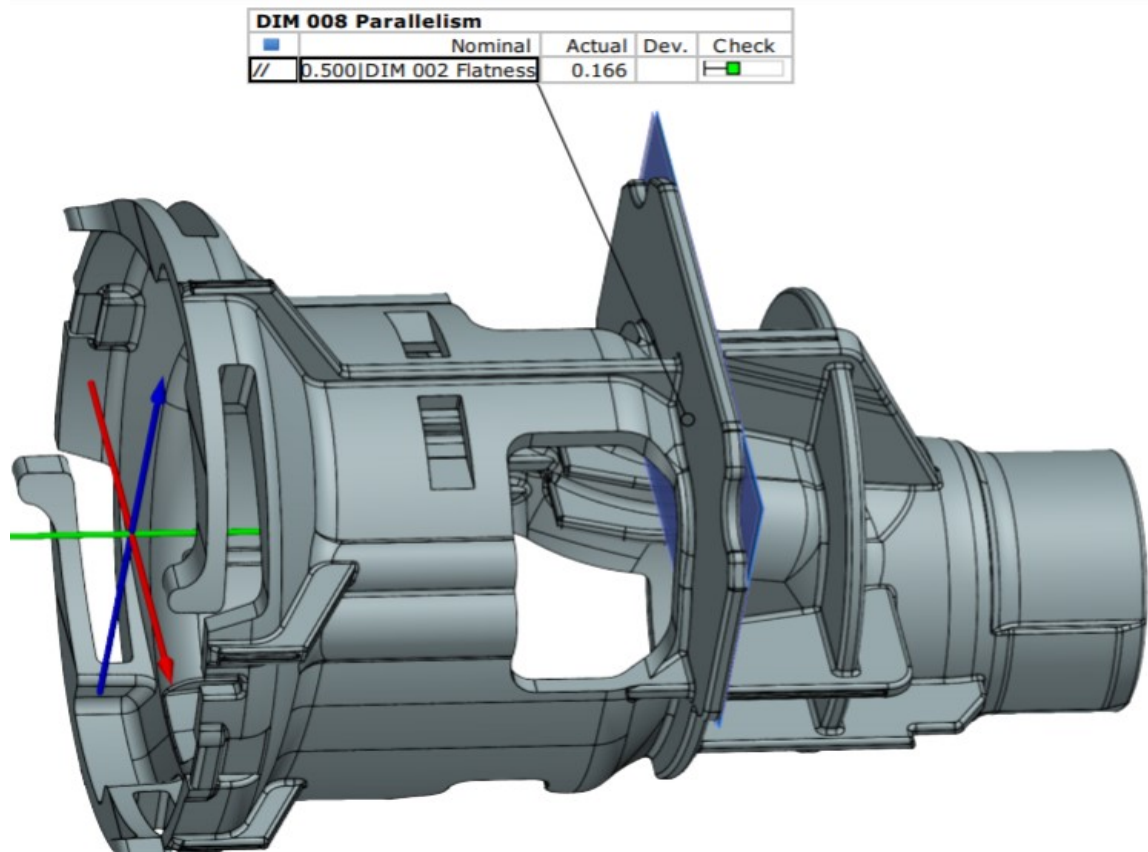
Obr. 43: Histogram měření úhlu.



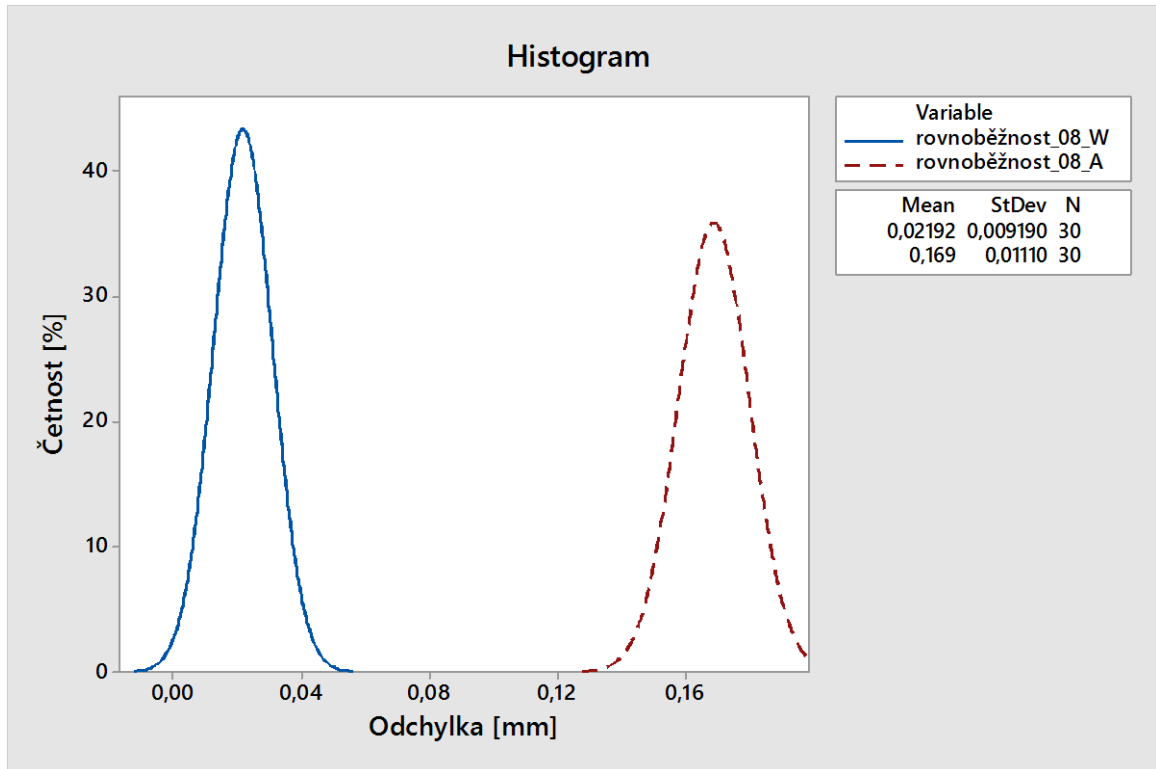
Obr. 44: Boxplot měření úhlu.

11.8 Rovnoběžnost 08

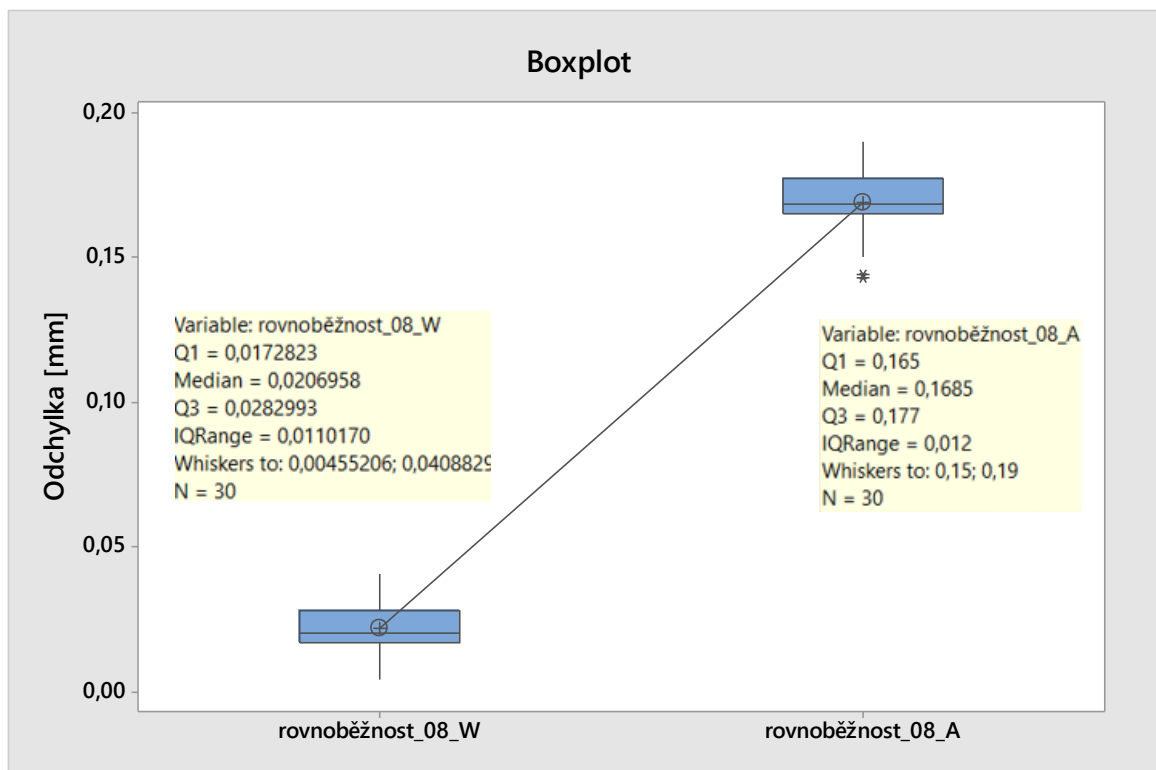
Rovnoběžnost je geometrická souvislost mezi dvěma rovinami. V našem případě je rovnoběžnost 08 tvořena horní plochou většího žebra a rovinou základny.



Obr. 45: Měření rovnoběžnosti.



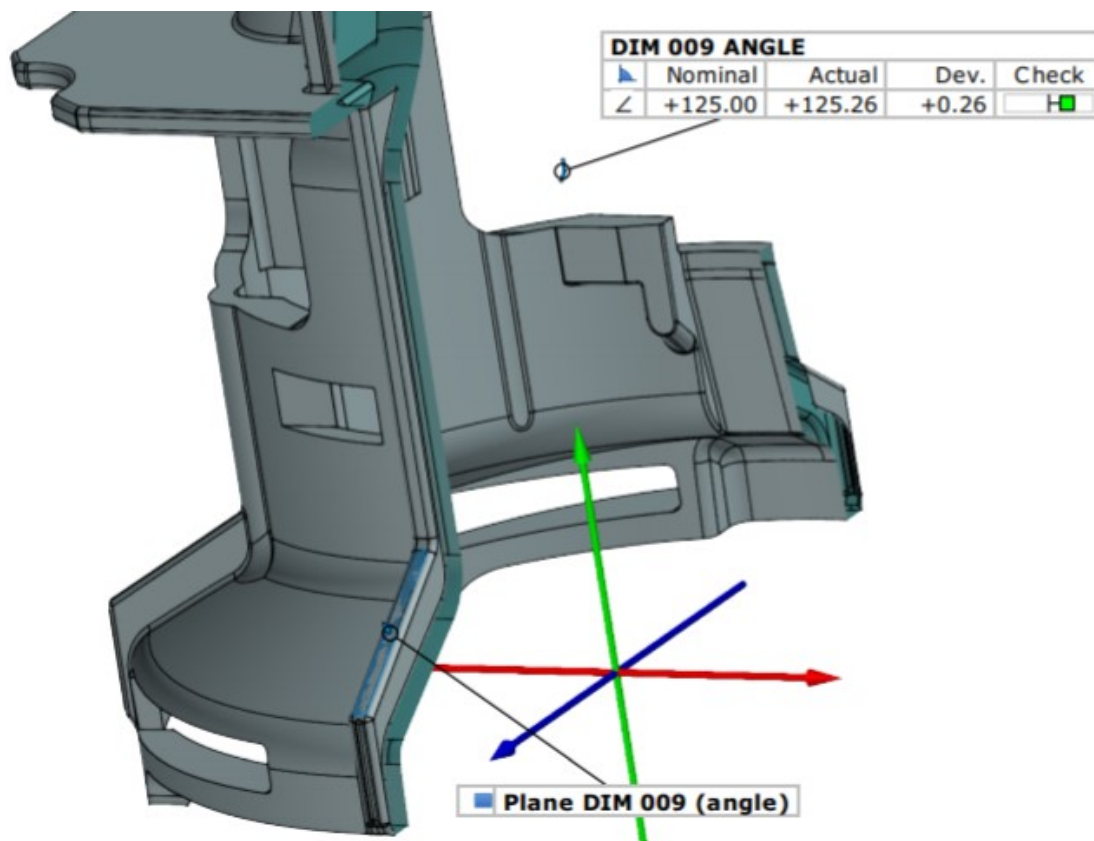
Obr. 46: Histogram měření rovnoběžnosti.



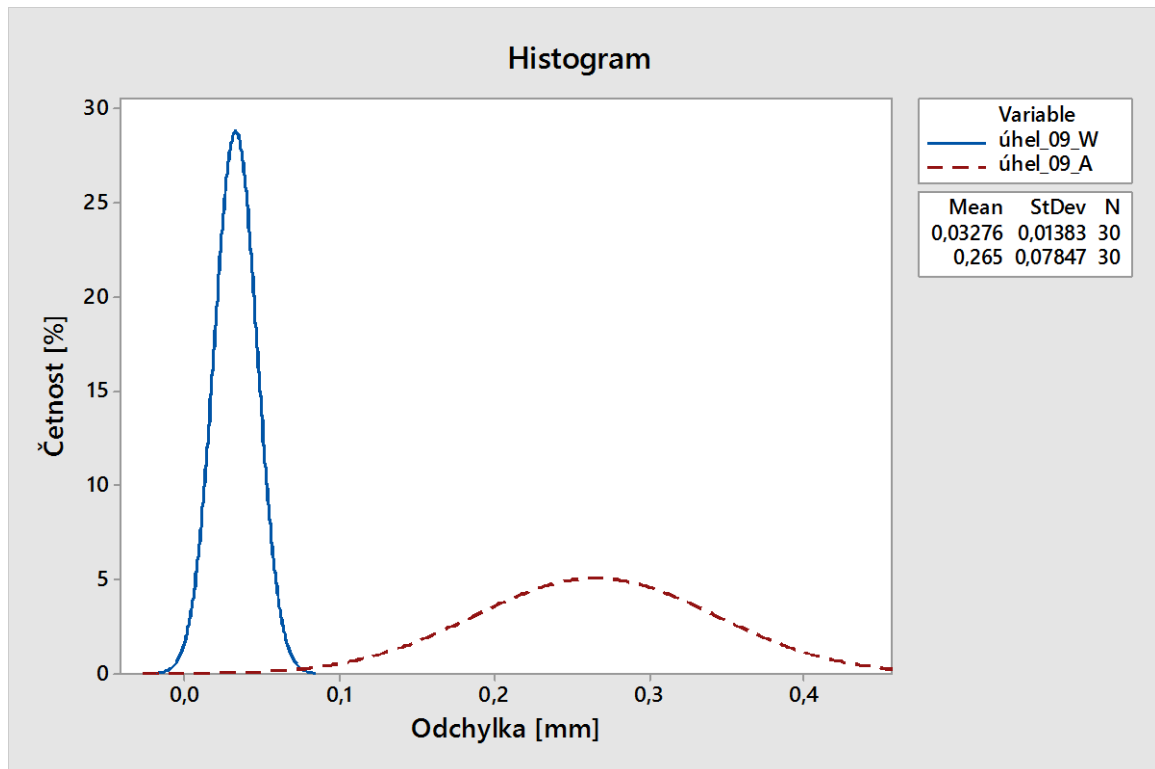
Obr. 47: Boxplot měření rovnoběžnosti.

11.9 Úhel 09

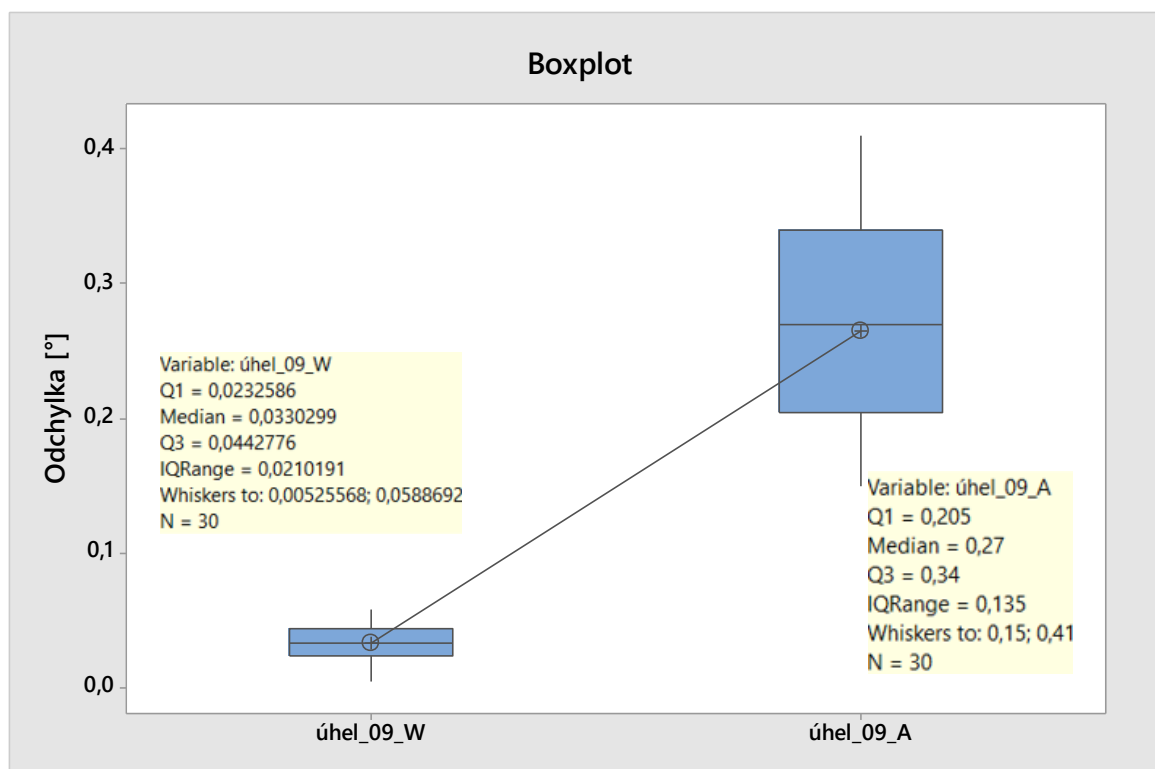
Úhel 09 je tvořen plochou hrany žebra na spodní části Plane DIM 009 a osou „Y“ přičemž jmenovitý úhel je 125°.



Obr. 48: Měření úhlu.



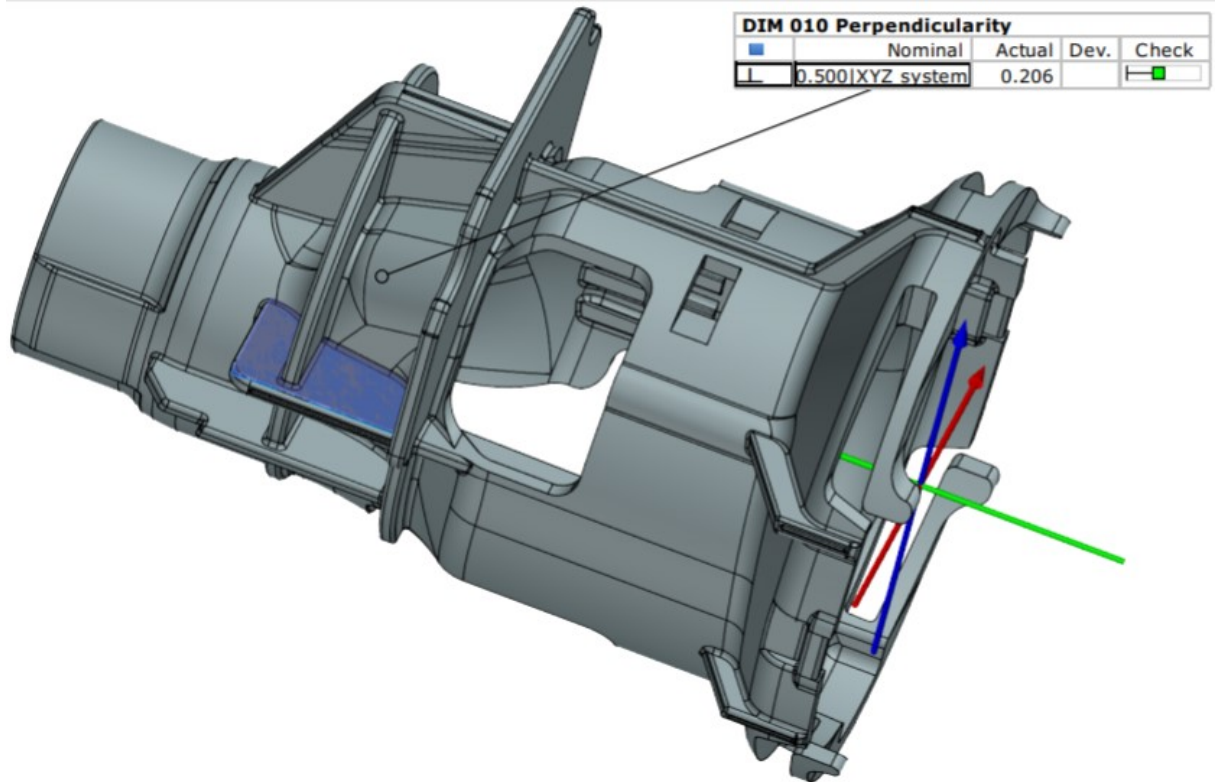
Obr. 49: Histogram měření úhlu.



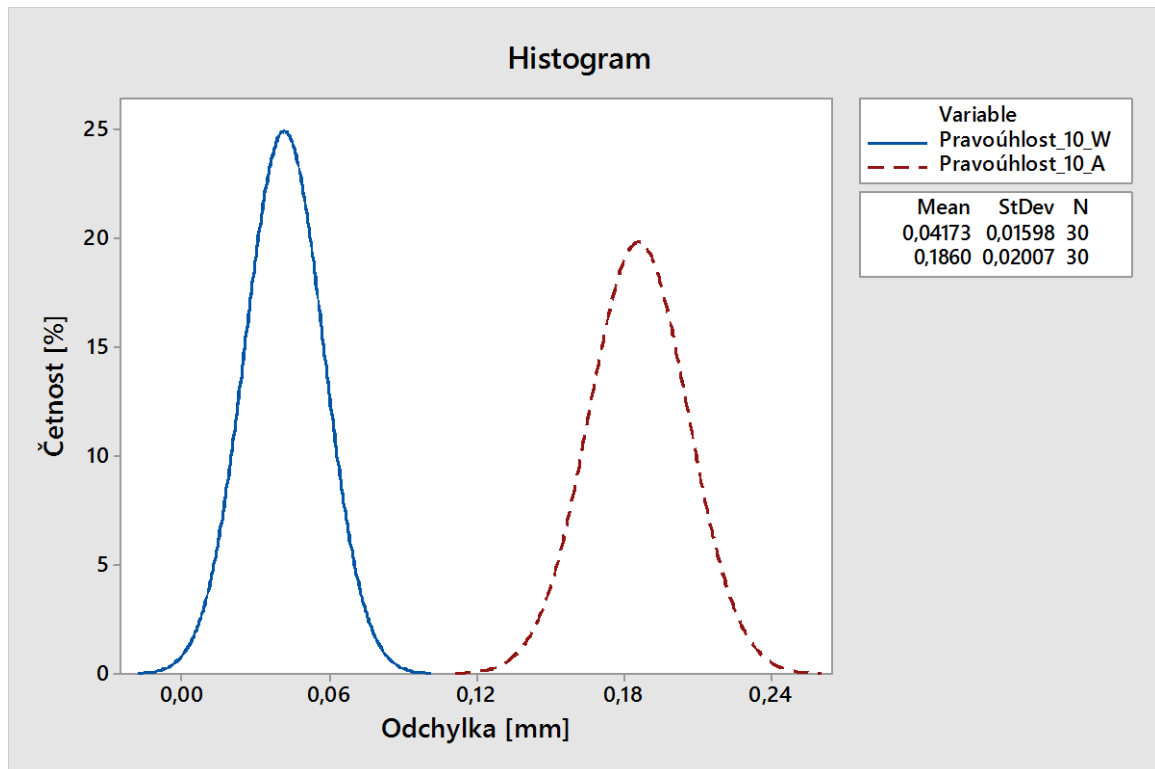
Obr. 50: Boxplot měření úhlu.

11.10 Pravoúhlost 10

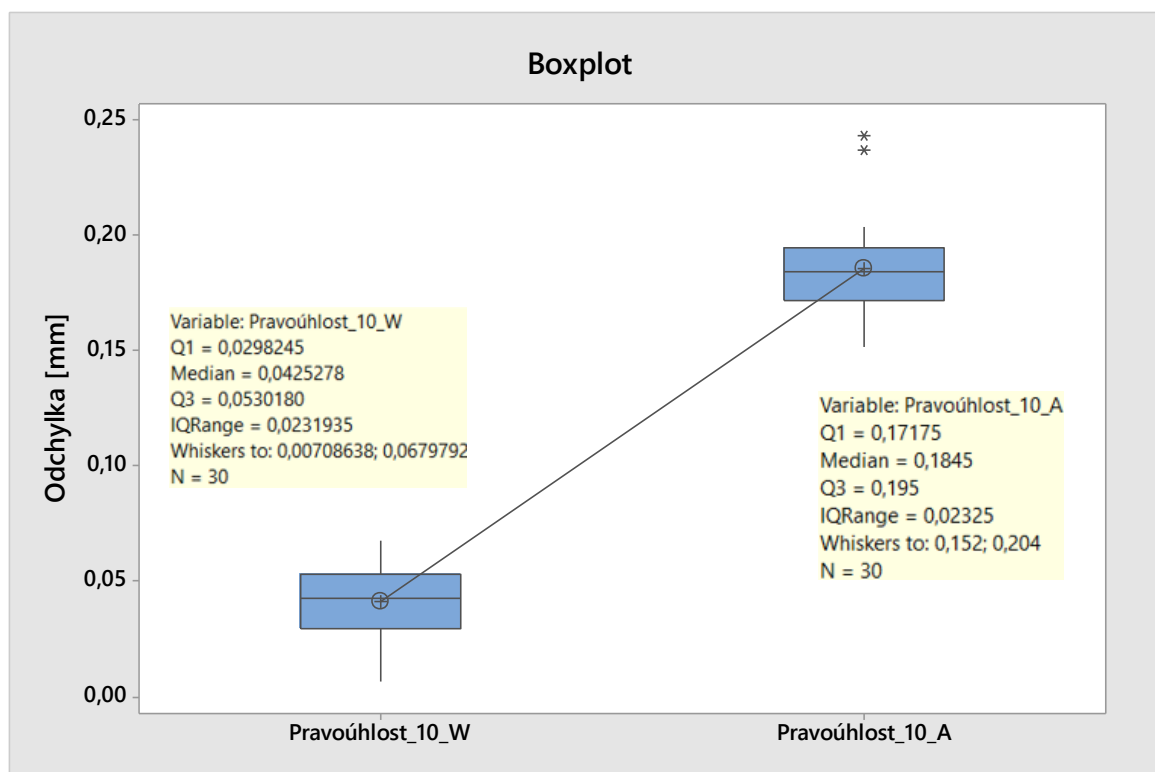
Pravoúhlost 10 je tvořena plochou žebra kolmou k ploše základní roviny. Odchylka je potom rozdíl mezi nominálními daty a daty naměřenými.



Obr. 51: Měření pravoúhlosti.



Obr. 52: Histogram měření pravoúhlosti.



Obr. 53: Boxplot měření pravoúhlosti.

11.11 Hodnocení jednotlivých měření.

V následujících dvou tabulkách jsou ukázány vypočtené hodnoty průměrů, mediánů, směrodatné odchylky, maximální hodnota, minimální hodnota.

Tab. 4: *Výsledky měření Wenzel LH87*

č.	Wenzel (W)	\bar{x}	Me	s	min	max	R
1	vzdálenost	0,0105	0,0105	0,0055	-0,0020	0,0200	0,0220
2	rovinnost	0,2035	0,2023	0,0088	0,1827	0,2220	0,0394
3	tvar	0,0428	0,0417	0,0181	0,0035	0,0837	0,0802
4	tvar	0,2499	0,2507	0,0196	0,1934	0,2815	0,0881
5	kruhovitost	0,0389	0,0389	0,0060	0,0298	0,0498	0,0200
6	poloha	0,6262	0,6240	0,0354	0,5541	0,6915	0,1374
7	úhel	0,3617	0,3618	0,0174	0,3202	0,3914	0,0712
8	rovnoběžnost	0,0219	0,0207	0,0092	0,0046	0,0409	0,0363
9	úhel	0,0328	0,0330	0,0138	0,0053	0,0589	0,0536
10	pravouhlost	0,0417	0,0425	0,0160	0,0071	0,0680	0,0609

Tab. 5: Výsledky měření Atos

č.	Atos (A)	\bar{x}	Me	s	min	max	R
1	vzdálenost	0,0147	0,0165	0,0094	-0,0030	0,0290	0,0320
2	rovinnost	0,2087	0,2060	0,0169	0,1840	0,2540	0,0700
3	tvar	0,0617	0,0565	0,0211	0,0320	0,1000	0,0680
4	tvar	0,2872	0,2870	0,0304	0,2150	0,3470	0,1320
5	kruhovitost	0,0895	0,0870	0,0122	0,0730	0,1300	0,0570
6	poloha	0,6779	0,6585	0,0607	0,5910	0,8310	0,2400
7	úhel	0,4723	0,4700	0,0769	0,3400	0,6000	0,2600
8	rovnoběžnost	0,1690	0,1685	0,0111	0,1430	0,1900	0,0470
9	úhel	0,2650	0,2700	0,0785	0,1500	0,4100	0,2600
10	pravoúhlost	0,1860	0,1845	0,0201	0,1520	0,2430	0,0910

11.12 Testování odlehlých hodnot

Pro testování odlehlých hodnot při normálním byl využit Grubbsův test extrémních odchylek. Testovací kritérium se potom počítá pro první a poslední hodnotu variační řady podle vzorce č.8 a č.9.

Grubbsovy testovací kritéria:

H_0 : (X_1 nebo X_{30}) patří do souboru naměřených dat

H_A : (X_1 nebo X_{30}) nepatří do souboru naměřených dat

S pravděpodobností $(1 - \alpha) = 0,95$

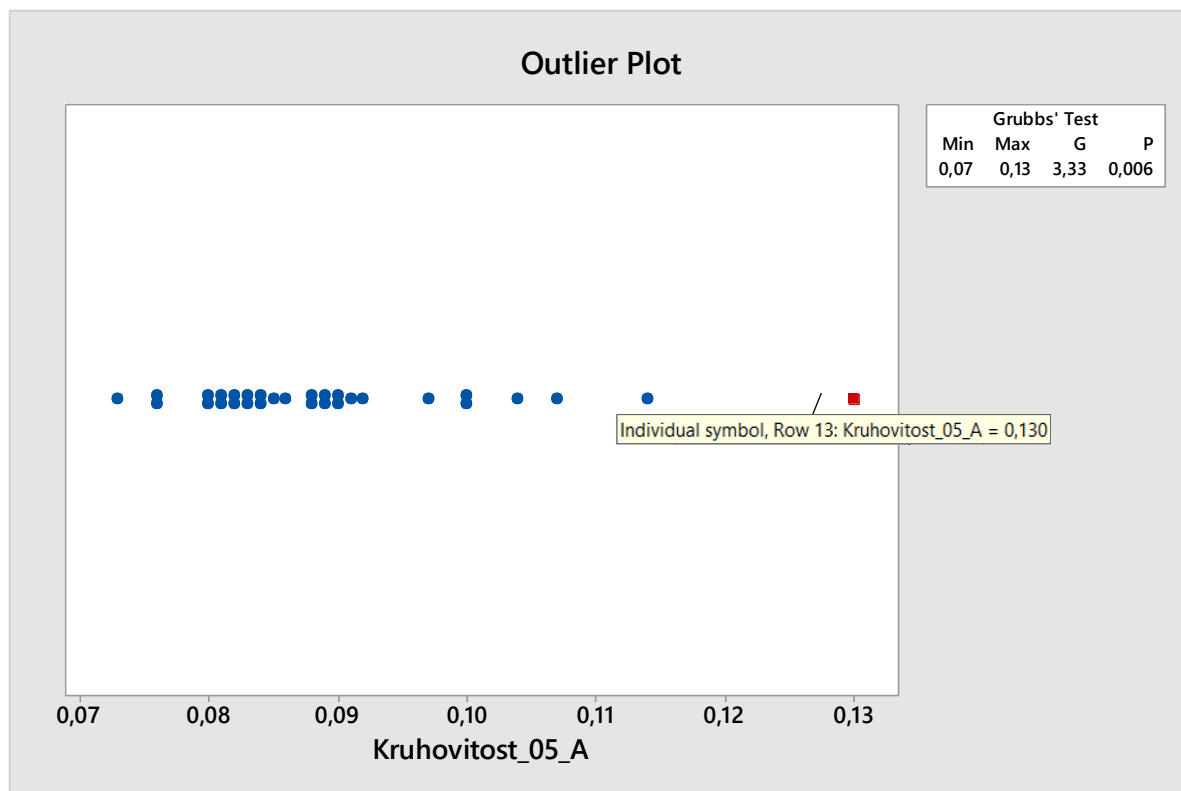
Tab. 6: Výsledky Grubbsova testu

Grubbsův test		P- hodnota	
č.	Měřený Parametr	Wenzel (W)	Atos (A)
1	vzdálenost	0,524	1,000
2	rovinnost	0,399	0,126
3	tvar	0,820	1,000
4	tvar	0,056	0,388
5	kruhovitost	1,000	0,006
6	poloha	1,000	0,235
7	úhel	0,369	1,000
8	rovnoběžnost	0,998	0,430
9	úhel	1,000	1,000
10	pravoúhlost	0,739	0,068

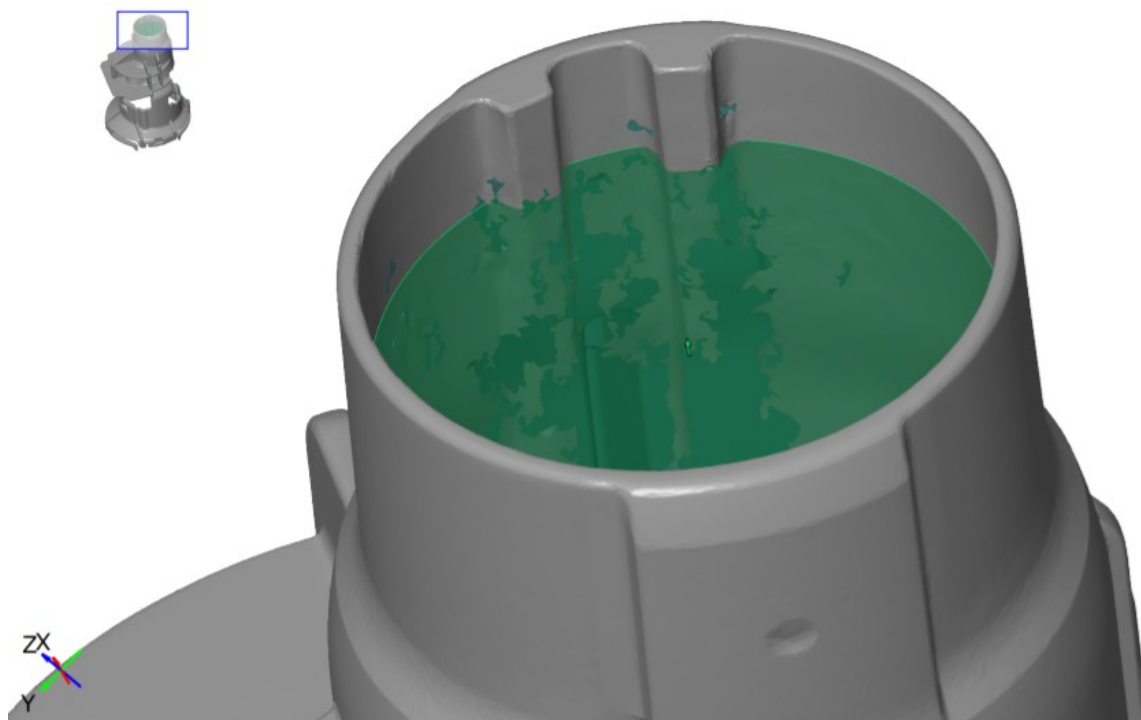
Podle Grubbsova testu vyšetřeného v programu Minitab pouze v jednom případě zamítám H_0 a proto tedy platí H_A to znamená, že jedna hodnota nepatří do našeho souboru a je to Outlier. Tvrzení platí s pravděpodobností 95 %.

11.12.1 Vyšetření odlehlé hodnoty

Pokud narazíme na hrubou chybu při jakémkoliv měření je důležité tuto chybu vyšetřit a zamezit tím následnému opakování. Na Obr. 54 je jasně vidět, že hrubá chyba byla naměřena na parametru kruhovitosti při skenování na stroji Atos třináctého měřeného dílu.



Obr. 54: Test odlehlých hodnot kruhovitosti.



Obr. 55: Vyšetření odlehlé hodnoty kruhovitosti.

Výhoda skenování je taková, že kdykoliv chceme překontrolovat samotné měření, postup při vyrovnání na daný souřadnicový systém nebo jakýkoliv zkoumaný parametr můžeme se jednoduše vrátit k danému skenu a zjistit příčinu problému.

Z obr. 55 jde jasně vidět, že hlavní problém je nedokonalost naskenovaného vnitřního průměru dílu. Kružnice vytvořená pro měření parametru kruhovitosti prochází trhlinami, které záporně ovlivňují samotný výsledek. Toto je častý problém při vyhodnocování naskenovaných dílů. Software GOM Inspect však s těmito chybami počítá a nabízí možnost doplnění povrchu softwarově.

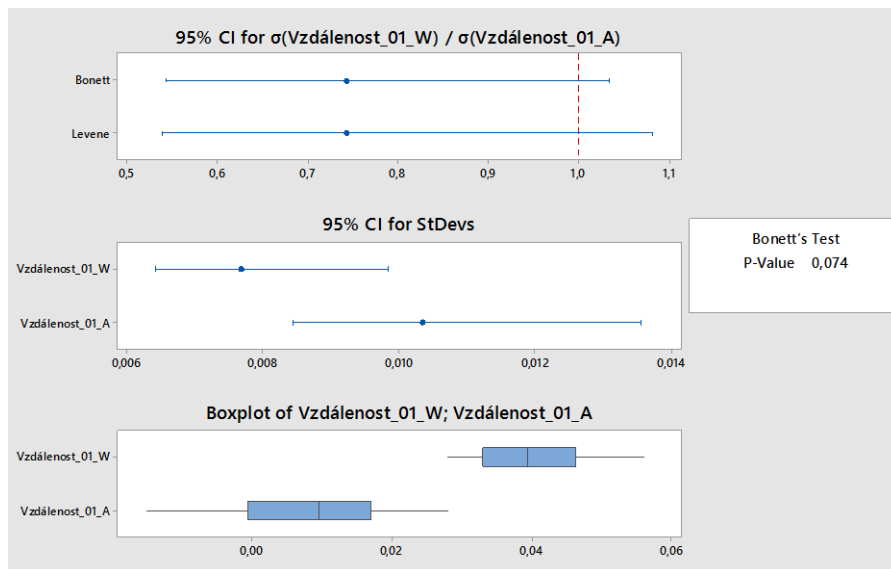
11.13 F-test

Parametry testů rovnosti rozptylů:

$$H_0: \sigma^2_{\text{Vzdálenost}_01_W} = \sigma^2_{\text{Vzdálenost}_01_A}$$

$$H_A: \sigma^2_{\text{Vzdálenost}_01_W} \neq \sigma^2_{\text{Vzdálenost}_01_A}$$

S pravděpodobností $(1 - \alpha) = 0,95$



Obr. 56: Test rovnosti rozptylů.

Pro další hodnoty byla vytvořena přehledná tabulka.

Tab. 7: Výsledky P hodnot jednotlivých F testů.

F-test		P-hodnota	
č.	Měřený Parametr	Wenzel (W)	Atos (A)
1	vzdálenost	0,074	
2	rovinnost	0,014	
3	tvar	0,045	
4	tvar	0,043	
5	kruhovitost	0,048	
6	poloha	0,019	
7	úhel	0	
8	rovnoběžnost	0,042	
9	úhel	0	
10	pravoúhlost	0,039	

Podle výsledků testu rovnosti bylo zjištěno, že rozptyly odchylek měření na stroji Wenzel a Atos jsou rozdílné až na parametr vzdálenosti kde platí hypotéza nulová u všech ostatních

parametrů je hypotéza nulová zamítnuta a platí hypotéza alternativní, tudíž rozptyly jsou rozdílné.

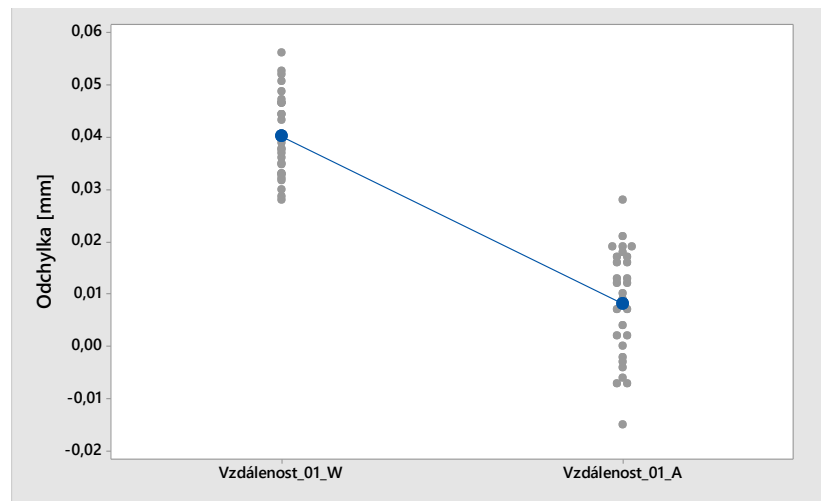
11.14 t-test

Parametry testů rovnosti průměrů.:

$$H_0: \mu^2_{\text{Vzdálenost}_01_W} = \mu^2_{\text{Vzdálenost}_01_A}$$

$$H_A: \mu^2_{\text{Vzdálenost}_01_W} \neq \mu^2_{\text{Vzdálenost}_01_A}$$

S pravděpodobností $(1 - \alpha) = 0,95$



Obr. 57: Test rovnosti průměrů.

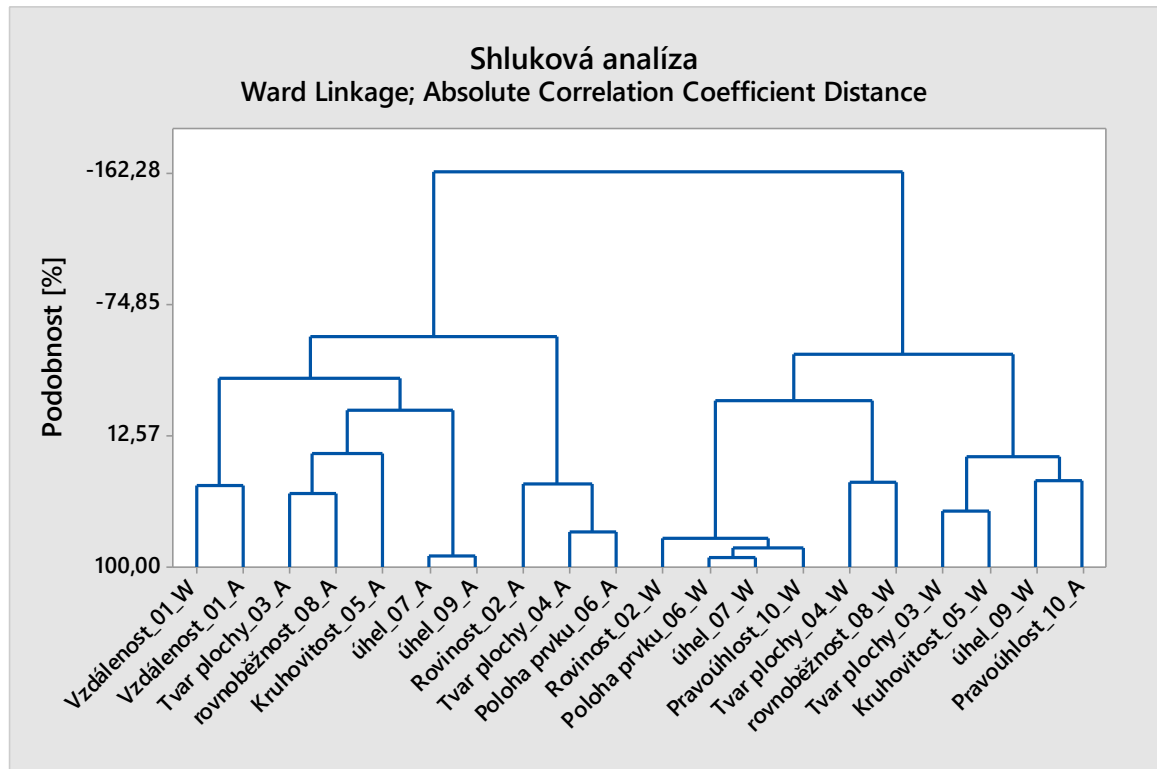
Pro ostatní parametry byly provedeny identické testy, pro výsledky byla vytvořena přehledná tabulka.

Tab. 8: Výsledky P hodnot jednotlivých t testů.

T-test		P-hodnota	
č.	Měřený Parametr	Wenzel (W)	Atos (A)
1	vzdálenost	0,041	
2	rovinnost	0,145	
3	tvar	0	
4	tvar	0	
5	kruhovitost	0	
6	poloha	0	
7	úhel	0	
8	rovnoběžnost	0	
9	úhel	0	
10	pravoúhlost	0	

Dle testu rovnosti průměrů bylo zjištěno, že průměry odchylek naměřených na stroji Atos a Wenzel jsou statisticky významně odlišné až na parametr rovinnosti kde nezamítám hypotézu nulovou. V ostatních případech hypotézu nulovou zamítám a platí tak hypotéza alternativní.

11.15 Dendogram



Pomocí shlukové analýzy, konkrétně Wardovy metody s využitím výpočtu absolutní korelace, byly nalezeny shluky mezi parametry měření na stroji Wenzel a shluky měření na stroji Atos.

V rámci jednotlivých shluků můžeme konstatovat, že hodnocení odchylek je na stroji Wenzel odlišné od měření na stroji Atos.

ZÁVĚR

Jak již bylo popsáno, cílem diplomové práce bylo porovnání rozdílů mezi dvěma odlišnými metodami měření. Jedná se o měření 3D rozměrů dotekovou metodou a nebo pomocí optického skenování, přičemž jejich odlišnost byla vyhodnocena s použitím třiceti vzorků.

Teoretická část byla věnována popsáním základních principů metrologie a důležitým pojmům v této oblasti. Rozdíl mezi kvantitou a kvalitou. Principy měření a následného vyhodnocení. Dále jsem se zabíral souřadnicovým měřením a popsání jednotlivých souřadnicových měřících strojů. V poslední kapitole teoretické části je popsáno skenování a druhy jednotlivých skenerů.

Praktická část obsahuje charakteristiku měřeného výrobku. Dále návrh, výrobu měřícího přípravku a chránících kleští. Jednotlivé měřící stroje a jejich softwary byly taktéž jednotlivě popsány. Hlavním zaměřením bylo statistické porovnání deseti měřených parametrů ve 3D. Byly vyhodnoceny odchylky od nominálních rozměrů.

Pro redukci zanesení zbytečných chyb měření, bylo vybráno třicet po sobě jdoucích vzorků jedné kavity přímo ze vstřikovacího stroje. Dále byly vzorky uskladněny z důvodu ustálení rozměrů a následně byly změřeny příslušnými metodami.

Při zkoumání odlehklých hodnot pomocí Grubbsova testu byl nalezen jeden outlier. Důvod byl následně prověřen a bylo zjištěno, že se jedná o hrubou chybu, která byla vnesena do měření z důvodu špatně naskenované dané plochy.

Testem rovnosti rozptylů bylo zjištěno, že rozptyly odchylek měření na stroji Wenzel a Atos jsou rozdílné až na parametr vzdálenosti, kde platí hypotéza nulová. U všech ostatních parametrů je nulová hypotéza zamítnuta a platí hypotéza alternativní, tudíž rozptyly jsou rozdílné.

S pomocí testu rovnosti průměrů bylo zjištěno, že průměry odchylek naměřených na stroji Atos a Wenzel jsou statisticky významně odlišné až na parametr rovinnosti, kde není zamítnuta nulová hypotéza. V ostatních případech je hypotéza nulová zamítnuta a platí hypotéza alternativní. Můžeme tak tedy tvrdit, že průměry jsou rozdílné.

Ze statistických výsledků lze konstatovat, že se jedná o dvě odlišené metody měření, což bylo i naším předpokladem.

Každá s těchto metod je již od započetí měření, což je kalibrace, zanesena rozdílnou chybou. Wenzel LH87 se kalibruje na kuličku a přístroj Atos na shluk bodů. Dále pak musíme zohlednit rozdílnost softwarů, kdy každý z nich využívá jiné matematické modely a metody zpracování hodnot. Rozdílnost u samotného měření je ta, že doteková kulička nikdy nesejme celou vyhodnocovanou plochu, ale vždy jen určitý počet bodů. V praxi se tento počet omezuje z důvodu rychlosti měření a opotřebení kuličky. U naskenovaného výrobku však celou plochu označit lze, avšak musíme dbát zvýšené opatrnosti na trhliny, výstupky a nedokonalosti.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BOUCHER, Jay L. *Metrology Handbook*. 2nd Edition. Milwaukee, Wisconsin: American Society for Quality (ASQ), 2012. ISBN 978-0-87389-838-6.
- [2] RAGHAVENDRA, N.V., KRISHNAMURTHY, L., ed. *Engineering Metrology and Measurements*. India: Oxford University Press, 2013. ISBN 978-0-19-808549-2.
- [3] HOWARTH, Preben, ed. *Metrologie v kostce: ... s doplňky a poznámkami : projekt Euromet č. 595*. V české mutaci 1. vyd. Praha: Sdělovací technika, 2002. ISBN 80-86645-01-0.
- [4] TŮMOVÁ, Olga. *Metrologie a hodnocení procesů*. Praha: BEN - technická literatura, 2009. ISBN 978-80-7300-249-7.
- [5] *TNI 01 0115 (010115) A Mezinárodní metrologický slovník - Základní a všeobecné pojmy a přidružené termíny (VIM)*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009. Dostupné také z: <http://csnonline.agentura-cas.cz/>
- [6] NENADÁL, Jaroslav. *Moderní systémy řízení jakosti: quality management*. 2. dopl. vyd. Praha: Management Press, 2002. ISBN 80-7261-071-6.
- [7] MILITKÝ, Jiří a Dana KŘEMENÁKOVÁ. *Metrologie a řízení jakosti*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. ISBN 978-80-7494-242-6.
- [8] AGACHI, Paul Șerban a Mircea Vasile CRISTEA. *Basic process engineering control*. Boston: Walter de Gruyter GmbH & Co., [2014]. ISBN 978-3-11-028981-7.
- [9] SŁADEK, Jerzy A. *Coordinate metrology: accuracy of systems and measurements*. Heidelberg: Springer, 2016. Springer tracts in mechanical engineering. ISBN 978-3-662-48463-0.
- [10] RICHARDS, Keith L. *Design Engineer's Sourcebook*. Boca Raton: CRC Press, 2018. ISBN 978-1-4987-6341-7.
- [11] MELOUN, Milan a Jiří MILITKÝ. *Interaktivní statistická analýza dat*. Praha: Karolinum, 2012. ISBN 978-80-246-2173-9.
- [12] Meloun, Milan a Jiří Militký. *Kompendium statistického zpracování dat*. Praha: Karolinum, 2012. ISBN 9788024621968.
- [13] JACKSON, Daniel. *Statistics for Quality Control*. USA: Industrial Press, 2015. ISBN 978-0-8311-3517-1.

- [14] OTTO, Matthias. *Chemometrics - Statistics and Computer Application in Analytical Chemistry*. 3rd Edition. Freiberg: John Wiley, 2017. ISBN 978-3-527-34097-2.
- [15] YANG, Xin-She. *Mathematics for civil engineers: an introduction*. Edinburgh: Dunedin, [2018]. ISBN 978-1-7804-6084-0.
- [16] PATA, Vladimír a Milena KUBIŠOVÁ. *Statistické metody hodnocení jakosti strojírenských povrchů*. Ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati, Fakulta technologická, 2018. ISBN 978-80-7454-740-9.
- [17] ALI, Salah H. R. *Automotive Engine Metrology*. USA: CRC Press, 2017. ISBN 978-981-4669-52-8.
- [18] CHUA, Chee Kai, Chee How WONG a Wai Yee YEONG. *Standards, quality control, and measurement sciences in 3D printing and additive manufacturing*. San Diego, CA: Academic Press, an imprint of Elsevier, 2017. ISBN 978-0-12-813489-4.
- [19] GAO, Wei. *Measurement technology and intelligent instruments VIII*. USA: Trans Tech Publications, 2008. ISBN 978-0-87849-382-1.
- [20] RAGHAVENDRA, N.V. a L. KRISHNAMURTHY. *Engineering Metrology and Measurements*. New Delhi: Oxford University Press, 2013. ISBN 978-0-19-808549-2.
- [21] RUFÉ, Philip D. *Fundamentals of manufacturing*. 3rd ed. Dearborn, Mich.: Society of Manufacturing Engineers, 2013. ISBN 978-0-87263-870-9.
- [22] WALKER, H. Fred, Donald W. BENBOW a Ahmad K. ELSHENNAWY. *The certified quality technician handbook*. Second edition. Milwaukee, Wisconsin: ASQ Quality Press, 2013. ISBN 978-0-87389-835-5.
- [23] ČEPOVÁ, Lenka a Lenka PETŘKOVSKÁ. *Legislativa ve strojírenské metrologii a přesné měření 3D ploch: studijní opora*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2514-4.
- [24] MOROVIČ, Ladislav. *Non-contact measurement of free-form surfaces*. Plzeň: Vydavatelství a nakladatelství Aleš Čeněk, 2016. Vědecké monografie (Vydavatelství a nakladatelství Aleš Čeněk). ISBN 978-80-7380-628-6.
- [25] BAHULOVÁ, Zuzana. *Vývoj nového produktu pomocí technologie 3D scanneru: Development of a new product using 3D scanner technology : teze disertační práce*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2015. ISBN 978-80-7454-526-9.

- [26] BEALE, Richard. *The planning guide to piping design*. 2nd edition. Cambridge, CA: Elsevier, 2017. ISBN 978-0-12-812661-5.
- [27] *TSI System s.r.o.* [online]. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <http://www.tsisystem.cz/produkty/ultraprobe-15000-447/>
- [28] SOBRINO, Daynier Rolando Delgado a Karol VELÍŠEK. *Novel Trends in Production Devices and Systems IV*. Zurich: Trans Tech Publications, 2018. ISBN 978-3-0357-1265-0.
- [29] GAO, Wei. *Measurement technology and intelligent instruments VIII*. USA: Trans Tech Publications, c2008. ISBN 978-0-87849-382-1.
- [30] DOKOUPIL, Filip. *DETERMINATION OF MEASUREMENT DEVIATIONS OF 3D OPTICAL SCANNER*. Brno, 2013. BACHELOR'S THESIS. BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY. Vedoucí práce Ing. DAVID PALOUŠEK, Ph.D.
- [31] AUGUSTIN, GORI, Franco, ed. *Sancti Augustini Opera*. Wien: Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, 2001. Corpus scriptorum ecclesiasticorum latinorum, vol. 95/3. ISBN 3-7001-2981-5
- [32] *GOM* [online]. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://www.gom.com/metrology-systems/atos/atos-triple-scan.html>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

3D	Trojrozměrný prostor.
f	Funkce Gaussova rozložení.
H_0	Nulová hypotéza.
H_A	Alternativní hypotéza.
k_u	Koeficient rozšíření.
Me	Medián
mm	Milimetr.
n	Počet měření.
s	Směrodatná odchylka.
t	Testovací kritérium.
U	Rozšířená standartní nejistota.
u_A	Standartní nejistota typu A.
u_B	Standartní nejistota typu B.
u_C	Kombinovaná standartní nejistota.
X_1	Nejmenší naměřená hodnota.
X_n	Největší naměřená hodnota.
X_S	Skutečná hodnota měřené veličiny.
X_m	Jmenovitá hodnota měřené veličiny.
\bar{x}	Aritmetický průměr.
Δ_0	Výrobní odchylka měřené veličiny.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Ukázka kalibračních známek.	14
Obr. 2: Normální rozdělení [15].	21
Obr. 3: Snímací sonda.	25
Obr. 4: Stojanové měřicí zařízení [23].	25
Obr. 5: Vložkové měřicí zařízení [23].	26
Obr. 6: Portálové měřicí zařízení [23].	26
Obr. 7: Mostové měřicí zařízení [23].	27
Obr. 8: Dělení 3D skenerů.	28
Obr. 9: Ultrazvukový skener [27].	29
Obr. 10: Optické skenování.	29
Obr. 11: Laserová skenovací hlava.	30
Obr. 12: Složitý polymerní díl.	34
Obr. 13: 30 ks ve výrobním procesu.	34
Obr. 14: Skenovací a měřicí přípravek.	35
Obr. 15: Chránič kleště.	35
Obr. 16: Osy měření.	36
Obr. 17: Měřicí zařízení Wenzel LH 87.	36
Obr. 18: Kalibrace doteku na kuličku.	37
Obr. 19: Atos triple scan [32].	38
Obr. 20: Kalibrace na kvantum bodů.	39
Obr. 21: Nanesení matného prášku.	40
Obr. 22: Proces skenování.	41
Obr. 23: Měření dotykovou sondou.	42
Obr. 24: Měření vzdálenosti.	44
Obr. 25: Histogram měření vzdálenosti.	45
Obr. 26: Boxplot měření vzdálenosti.	45
Obr. 27: Měření rovinnosti.	46
Obr. 28: Histogram měření rovinnosti.	47
Obr. 29: Boxplot měření rovinnosti.	47
Obr. 30: Měření odchyly tvaru plochy.	48
Obr. 31: Měření odchyly tvaru plochy.	49
Obr. 32: Boxplot měření odchyly tvaru plochy.	49

Obr. 33: <i>Měření odchyšky tvaru plochy.</i>	50
Obr. 34: <i>Histogram měření odchyšky tvaru plochy.</i>	51
Obr. 35: <i>Boxplot měření odchyšky tvaru plochy.</i>	51
Obr. 36: <i>Měření kruhovitosti.</i>	52
Obr. 37: <i>Histogram měření kruhovitosti.</i>	53
Obr. 38: <i>Boxplot měření kruhovitosti.</i>	53
Obr. 39: <i>Odchyška polohy bodu.</i>	54
Obr. 40: <i>Histogram měření odchyšky bodu.</i>	55
Obr. 41: <i>Boxplot měření odchyšky bodu.</i>	55
Obr. 42: <i>Měření úhlu.</i>	56
Obr. 43: <i>Histogram měření úhlu.</i>	57
Obr. 44: <i>Boxplot měření úhlu.</i>	57
Obr. 45: <i>Měření rovnoběžnosti.</i>	58
Obr. 46: <i>Histogram měření rovnoběžnosti.</i>	59
Obr. 47: <i>Boxplot měření rovnoběžnosti.</i>	59
Obr. 48: <i>Měření úhlu.</i>	60
Obr. 49: <i>Histogram měření úhlu.</i>	61
Obr. 50: <i>Boxplot měření úhlu.</i>	61
Obr. 51: <i>Měření pravouhlosti.</i>	62
Obr. 52: <i>Histogram měření pravouhlosti.</i>	63
Obr. 53: <i>Boxplot měření pravouhlosti.</i>	63
Obr. 54: <i>Test odlehlých hodnot kruhovitosti.</i>	67
Obr. 55: <i>Vyšetření odlehlé hodnoty kruhovitosti.</i>	67
Obr. 56: <i>Test rovnosti rozptylů.</i>	69
Obr. 57: <i>Test rovnosti průměrů.</i>	70

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: <i>Veličiny ovlivňující prostředí</i>	20
Tab. 2: <i>Součásti souřadnicového stroje</i>	24
Tab. 3: <i>Měřené parametry</i>	43
Tab. 4: <i>Výsledky měření Wenzel LH87</i>	64
Tab. 5: <i>Výsledky měření Atos</i>	65
Tab. 6: <i>Výsledky Grubbsova testu</i>	66
Tab. 7: <i>Výsledky P hodnot jednotlivých F testů</i>	69
Tab. 8: <i>Výsledky P hodnot jednotlivých t testů</i>	70