

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N0715A270011 - Obrábění, aditivní
technologie a zabezpečování kvality

Studijní specializace: Bez specializace

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh kontrolního přípravku a ověření jeho způsobilosti

Autor: Bc. Anna VÁGNEROVÁ

Vedoucí práce: Ing. Kateřina BÍCOVÁ, PhD.

Akademický rok 2021/2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Anna VÁGNEROVÁ**
Osobní číslo: **S19N0110P**
Studijní program: **N0715A270011 Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality**
Téma práce: **Návrh kontrolního přípravku a ověření jeho způsobilosti**
Zadávací katedra: **Katedra technologie obrábění**

Zásady pro vypracování

1. Úvod
2. Rozbor a analýza současného stavu
3. Návrh kontrolního přípravku
4. Hodnocení způsobilosti navrženého kontrolního přípravku
5. Zhodnocení výsledků
6. Závěr

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

Seznam doporučené literatury:

- *Analýza systému měření (MSA)*. 3. vyd. Praha: Česká společnost pro jakost, 2003. 233 s. ISBN 80-02-01562-2.
- NĚMEČEK, Pavel. *Způsobilost nereplikovatelných procesů kontroly*. Druhé přepracované a doplněné vydání. Praha: Česká společnost pro jakost, 2019. ISBN 978-80-02-02843-7.
- BUMBÁLEK, Leoš. *Kontrola a měření*. Praha: Informatorium, 2009. ISBN 978-80-7333-072-9.
- BOHÁČEK, Jaroslav. *Metrologie*. 3. přepracované vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2019. ISBN 978-80-01-06612-6.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Kateřina Bícová, Ph.D.**
Katedra technologie obrábění

Konzultant diplomové práce: **Ing. Michal Povolný**
Regionální technologický institut

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2021**
Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2022**

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 vypracovala samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Tímto bych chtěla poděkovat paní Ing. Kateřině Bícové, Ph.D. za vedení diplomové práce, odborné rady, ochotný přístup a čas, který mi věnovala. Dále bych také chtěla poděkovat panu Ing. Michalu Povolnému za poskytnuté konzultace a rady.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Vágnerová	Jméno Anna	
STUDIJNÍ PROGRAM	N0715A270011S00 Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Bícová, PhD.	Jméno Kateřina	
PRACOVÍŠTĚ	ZČU - FST - KTO		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Návrh kontrolního přípravku a ověření jeho způsobilosti		

FAKULTA	Strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2022
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	72	TEXTOVÁ ČÁST	70	GRAFICKÁ ČÁST	2
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Diplomová práce se zabývá návrhem kontrolního přípravku a ověřením jeho způsobilosti. Kontrolní přípravek by měl sloužit pro ověření správnosti měření mikroskopu Keyence VHX – 6000. Při vyhodnocování způsobilosti přípravku budou použity statistické metody a nástroje řízení jakosti.
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	Hodnocení způsobilosti, nástroje kvality, jakost, ISO 9001

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Vágnerová	Name Anna		
STUDY PROGRAMME	N0715A270011S00 - Machining, Additive Technology and Quality Assurance			
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Bícová, PhD	Name Kařejna		
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO			
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable	
TITLE OF THE WORK	Design of a control product and verification of its suitability			

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machining Technology	SUBMITTED IN	2022
----------------	------------------------	-------------------	----------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	72	TEXT PART	70	GRAPHICAL PART	2
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The diploma thesis deals with the design of a control device and verification of its suitability. The control product should be used to verify the accuracy of the Keyence VHX-6000 microscope measurements. Statistical methods and quality control tools will be used to evaluate product suitability.
KEY WORDS	Competence assessment, quality tools, quality, ISO 9001

Obsah

Zadání DP.....	2
Seznam obrázků	10
Seznam tabulek	11
1 Úvod.....	12
1.1 Kvalita a jakost.....	12
1.2 Systém řízení kvality	12
1.3 Cíl diplomové práce.....	14
2 Rozbor a analýza současného stavu	15
2.1 Optická měřidla	15
2.2 Měřicí zařízení Keyence VHX-6000.....	19
2.2.1 Možnosti měření.....	19
2.3 Požadavky na kalibraci.....	20
2.3.1 Kalibrace jedním stisknutím.....	20
2.3.2 Auto kalibrace	21
2.3.3 Manuální kalibrace	21
2.4 Sběr, zpracování a analýza dat	22
2.4.1 7 Nástrojů kvality	22
2.4.2 Chyby a nejistoty měření.....	27
2.5 Hodnocení způsobilosti navrženého přípravku	30
2.5.1 Index způsobilosti C_p	30
2.5.2 Index způsobilosti C_{pk}	30
2.5.3 Analýza systému měření (MSA).....	31
3 Návrh kontrolního přípravku.....	35
3.1 Měřicí zařízení.....	35
3.2 Provádění kalibrace a ověřování správnosti měření	36
3.3 Návrh modelu kontrolního přípravku	36
3.4 Metodika ověření způsobilosti.....	39
4 Hodnocení způsobilosti navrženého kontrolního přípravku	41
4.1 Ukázka hodnocení způsobilosti pro schod o výšce 2 mm.....	41
4.2 Způsobilost měřidla pro měření rozměrů v ose Z.....	49
4.3 Způsobilost měřidla pro měření rozměrů v osách x a y	51
4.4 Způsobilost měřidla pro měření průměrů děr	54
4.5 Způsobilost měřidla pro měření úhlů.....	55

4.6	Způsobilost schodů na kontrolním přípravku.....	57
4.7	Způsobilost kostky na kontrolním přípravku.....	58
4.8	Způsobilost díry o průměru 15 mm na kontrolním přípravku.....	60
4.9	Způsobilost úhlů 5° a 10° na kontrolním přípravku.....	61
4.10	Způsobilost drážky pro pero 8P9 na kontrolním přípravku.....	62
5	Zhodnocení výsledků.....	63
5.1	Metoda 3D stitching.....	63
5.2	Metoda 3D depth.....	64
5.3	Metoda 2D stitching.....	66
5.4	Nedostatky měřicího zařízení.....	66
5.5	Způsobilost kontrolního přípravku.....	67
6	Závěr.....	68
	Seznam použitých zdrojů.....	69
	PŘÍLOHA č. 1.....	i

Přehled použitých zkratk a symbolů

ČSN	Česká technická norma
EN	Evropská norma
EU	Evropská unie
FST	Fakulta strojní
KTO	Katedra technologie obrábění
ZČU	Západočeská univerzita v Plzni
MSA	Analýza systému měření
3D	Trojrozměrné
2D	Dvojměrné
SPC	Statistické řízení jakosti
FMEA	Analýza možností vzniku vad a jejich následků
QDFD	Rozpracování požadavků zákazníka
DOE	Navrhování experimentů
Atd.	a tak dále

Seznam obrázků

Obr. 1: Cyklus PDCA [5].....	12
Obr. 2: Znázornění struktury mezinárodní normy v cyklu PDCA [7]	13
Obr. 3: Hloubka ostrosti [24]	16
Obr. 4: Obrazový snímač [24].....	17
Obr. 5: Mechanismus tvorby digitálních obrazů [24]	17
Obr. 6: Metody osvětlení [24].....	18
Obr. 7: Mikroskop Keyence VHX-6000	19
Obr. 8: Ovládací panel mikroskopu [25].....	19
Obr. 9: Histogram [5]	23
Obr. 10: Typy histogramů [23]	24
Obr. 11: Křivka Gausova normálního rozdělení [20]	24
Obr. 12: Paretův diagram [5].....	25
Obr. 13: Ishikawův diagram [5]	26
Obr. 14: Základní typy bodových diagramů [5].....	26
Obr. 15: Regulační diagram [5].....	27
Obr. 16: Variabilita polohy - Strannost [16]	32
Obr. 17: Variabilita polohy - Stabilita [17].....	32
Obr. 18: Variabilita šíře - Opakovatelnost [18].....	33
Obr. 19: Variabilita šíře - Reprodukovatelnost [19]	33
Obr. 20: Nabídka měřicích nástrojů mikroskopu Keyence VHX-6000 [26]	35
Obr. 21 - Výkres kontrolního přípravku.....	37
Obr. 22: Výkres kontrolního přípravku se skutečnými rozměry	37
Obr. 23: Výkres s vyznačenými rozměry pro hodnocení způsobilosti	40
Obr. 24: Ukázka měření rozměrů v ose z.....	41
Obr. 25: Ishikawův diagram pro určení nejistoty typu B.....	45
Obr. 26: Protokol hodnocení způsobilosti.....	47
Obr. 27: Měření výšky měřky o rozměru 2 mm při zvětšení 150	49
Obr. 28: Měření výšky měřky o rozměru 2 mm při zvětšení 20	50
Obr. 29: Měření velikosti měřky o rozměru 15 mm při zvětšení 20 – metoda 2D stitching ...	51
Obr. 30: Měření velikosti měřky o rozměru 15 mm při zvětšení 150 – metoda 3D stitching .	52
Obr. 31: Měření kontrolního kroužku o průměru 16 mm při zvětšení 150.....	54
Obr. 32: Měření úhlové měřky o rozměru 10° při zvětšení 150	56
Obr. 33: Ukázka měření drážky pro pero při zvětšení 20	64

Obr. 34: Ukázka měření úhlu 10° metodou 3D depth při zvětšení 20	65
Obr. 35: Vliv vibrací na měření metodou 2D stitching.....	66
Obr. 36: Umístění mikroskopu v laboratoři UF106	67

Seznam tabulek

Tab. 1: Hodnoty koeficientů k_s	29
Tab. 2 - naměřené hodnoty – schod 2 mm - zvětšení 150X.....	42
Tab. 3: Vypočítané přesnosti měření a nejistoty měření pro měrku o velikosti 2 mm	50
Tab. 4: Vypočítané přesnosti měření a nejistoty měření pro koncovou měrku o velikosti 15 mm (2D stitching).....	53
Tab. 5: Vypočítané přesnosti měření a nejistoty měření pro koncovou měrku o velikosti 15 mm (3D stitching).....	53
Tab. 6: Vypočítané přesnosti měření a nejistoty měření pro kontrolní kroužek o průměru 16 mm	55
Tab. 7: Vypočítané přesnosti měření a nejistoty měření pro úhlovou měrku o velikosti 10° ..	56
Tab. 8: Vypočítané přesnosti měření a nejistoty měření pro schod o výšce 2 mm	57
Tab. 9: Vypočítané přesnosti měření a nejistoty měření pro schod o výšce 4 mm.....	57
Tab. 10: Vypočítané přesnosti měření a nejistoty měření pro schod o výšce 6 mm	58
Tab. 11: Vypočítané přesnosti měření a nejistoty měření pro kostku 15x15 mm – Rozměr v ose x (2D stitching).....	58
Tab. 12: Vypočítané přesnosti měření a nejistoty měření pro kostku 15x15 mm – Rozměr v ose x (3D stitching).....	59
Tab. 13: Vypočítané přesnosti měření a nejistoty měření pro kostku 15x15 mm – Rozměr v ose y (2D stitching).....	59
Tab. 14: Vypočítané přesnosti měření a nejistoty měření pro kostku 15x15 mm – Rozměr v ose y (3D stitching).....	60
Tab. 15: Vypočítané přesnosti měření a nejistoty měření pro díru 15H6	60
Tab. 16: Vypočítané přesnosti měření a nejistoty měření pro úhel 5°	61
Tab. 17: Vypočítané přesnosti měření a nejistoty měření pro úhel 10°	61
Tab. 18: Vypočítané přesnosti měření a nejistoty měření hloubku drážky 8P9.....	62
Tab. 19: Vypočítané přesnosti měření a nejistoty měření pro šířku drážky 8P9	62

1 Úvod

1.1 Kvalita a jakost

Kvalita je v současnosti velmi důležitým pojmem. Zákazník se na základě kvality výrobku rozhoduje, zda si daný výrobek či službu zakoupí. Společnosti se proto snaží vyrábět co nejkvalitnější výrobky a tím zákazníky na trhu zaujmout.

Norma ČSN EN ISO 9000:2015 definuje kvalitu takto: „Kvalita je stupeň plnění požadavků souborem inherentních charakteristik“. Kvalita je tedy komplexní vlastnost výrobků, služeb, informací, lidí i systémů, která se projevuje mírou schopnosti plnit požadavky, které jsou na ně kladeny. V současnosti je jakost chápána jako stav nadprůměrné výkonnosti v oblasti řízení podniků, tento stav lze také nazvat excellence organizací. Pro kvalitu jsou rozhodující procesy, které předcházejí výrobě nebo poskytování služeb. [5]

1.2 Systém řízení kvality

Pro zajišťování kvality v podnicích je využíván systém řízení kvality (QMS – Quality Management Systém). Systémem řízení kvality se zabývá norma ISO 9001:2015. Tato norma představuje principy, díky kterým si firmy stanovují své plány a cíle v oblasti kvality. Cíle jsou realizovány pomocí jednotlivých procesů, jejichž účinnost je monitorována. Na základě monitorování realizují firmy jednotlivá opatření a tím zlepšují procesy v organizaci. Aplikování normy ISO 9001:2015 může podnikům přinést zvýšení nebo alespoň udržení úrovně procesů. Zvyšování úrovně procesů přináší kvalitnější výrobky na trh a tím spokojenější zákazníky. Norma ISO 9001:2015 nabízí principy pro zvýšení zisků a optimalizaci nákladů, a to díky správnému nastavení procesů, kvalitnímu systému řízení a dalším metodám. [6]

Každá organizace má možnost své procesy neustále zlepšovat. Zlepšováním jsou chápány veškeré aktivity, které vedou k vyšší úrovni systému řízení. Toho můžeme dosáhnout například aplikací Demingovy metodiky PDCA (Plan – Do – Check – Act).

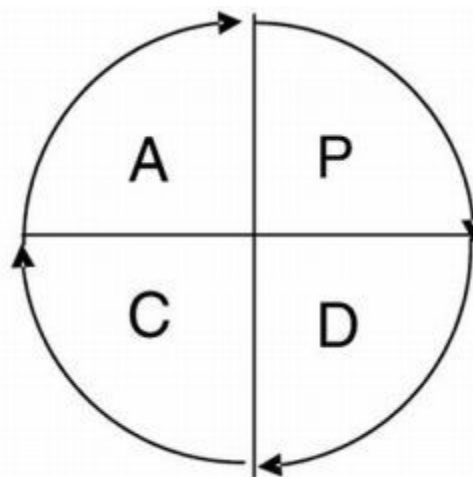
Demingova metodika má 4 fáze:

Plan (Plánuj) – Identifikování problémů v procesu a stanovení cílů.

Do (Konej) – Realizace stanovených cílů pomocí jednotlivých činností.

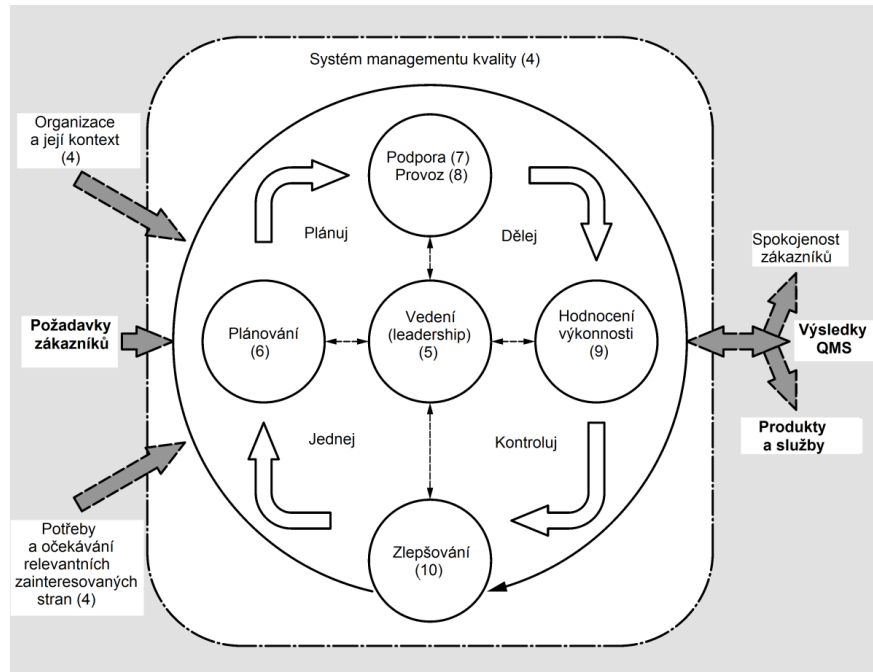
Check (Zkontroluj) – Kontrola systému a hodnocení výsledků.

Act (Reaguj) – Zavedení opatření do systému. Pokud nedojde k naplnění cílů, dojde k nalezení nových problémů. [5]



Obr. 1: Cyklus PDCA [5]

Norma ISO 9001 prosazuje zavádění procesního přístupu. Cílem je plnění požadavků zákazníka a tím zvýšení jeho spokojenosti. Všechny procesy jsou chápány jako vzájemně propojený systém. Pro zvýšení celkové kvality organizace je tedy potřeba řídit vzájemné vztahy a závislosti mezi procesy.



Obr. 2: Znárodnění struktury mezinárodní normy v cyklu PDCA [7]

Schéma cyklu PDCA dle normy ISO 9001 ukazuje vliv požadavků zákazníka na celý proces. Splnění požadavků je vyhodnocováno pomocí spokojenosti zákazníka a organizace provádí neustálé zlepšování tak, aby plnila požadavky svých zákazníků. [7]

Pro zajištění neustálého zlepšování jsou podstatná data a informace o fungování procesů. Jedná se především o data z výroby a informace o výrobních procesech. Tato diplomová práce se zaměřuje na návrh kontrolního přípravku pro optimalizaci měření. Pomocí navrženého kontrolního přípravku budou měřena data, která budou sloužit k hodnocení měřicího procesu.

Koncept zlepšování jakosti představuje Juranova spirála.

Tento koncept je založen na třech krocích:

- 1) Plánování kvality
- 2) Řízení kvality
- 3) Zlepšování kvality [10]

Plánování kvality (ad. 1)

Jedná se o první krok Juranovy spirály kvality. Plánování je prováděno na základě požadavků zákazníka, které jsou následně přetransformovány v procesy. U procesů je zjištěna jejich způsobilost a požadavky jsou převedeny do výrobních instrukcí. Plánování kvality je prováděno v předvýrobní etapě, tím lze díky vhodným metodám eliminovat některé chyby. Vyrábět kvalitní výrobky je ekonomicky výhodnější než vyrábět vadné výrobky, které se musejí vyřadit nebo opravit.

Plánování postupů lze provést dvěma metodami, a to APQP a VDA 4.

Pro plánování kvality lze využít následující nástroje a metody:

- 4) Metoda QDFD (Rozpracování požadavků zákazníka)
- 5) Metoda FMEA (Analýza možností vzniku vad a jejich následků)
- 6) Metoda MSA (Analýza systému měření)
- 7) Metoda DOE (Navrhování experimentů) [8]

Řízení kvality (ad. 2)

Řízení kvality jsou činnosti potřebné pro zajištění požadované kvality produktu. Pro řízení kvality se využívá nástrojů řízení kvality.

Zlepšování kvality (ad. 3)

Tato fáze Juranovy spirály úzce souvisí se stanovenými cíli a s uspokojením požadavků zákazníka. Fáze zlepšování je neustálý proces, jehož výsledkem je nejen spokojený zákazník, ale také efektivnější procesy, nižší náklady a vyšší produktivita. Zlepšování kvality se zabývá především zvyšováním účinnosti procesů.

Rozlišujeme dva rozdílné přístupy ke zlepšování:

- 1) Postupné zlepšování – Je uplatňováno ve všech úrovních řízení a ve všech procesech. Garantuje zamezení opakujících se chyb a stereotypů. Změny jsou zaváděny pracovníky organizace.
- 2) Zlomové zlepšování – Jedná se o dramatické změny ve výkonnosti systémů. Dochází k zásadní změně procesů nebo k realizaci nových procesů. Změny jsou zaváděny specialisty v jednotlivých oborech. [5]

K identifikaci problémů se využívají statistické analýzy a metody. Statistické metody vycházejí z matematických výpočtů statistiky a pravděpodobnosti.

Pro zlepšování kvality se využívají metody jako cyklus PDCA, vývojový diagram, Kaizen, regulační diagram a další. [9]

1.3 Cíl diplomové práce

Cílem diplomové práce je vytvořit kontrolní přípravek a ověřit jeho způsobilost.

Navržený kontrolní přípravek bude sloužit k hodnocení správnosti měření měřicího zařízení Keyence VHX - 6000. Přípravek bude navržen za účelem snížení času potřebného k ověření způsobilosti měřicího zařízení. Způsobilost kontrolního přípravku bude hodnocena pomocí statistických metod a základních nástrojů hodnocení kvality. Z naměřených dat bude zjištěna způsobilost kontrolního přípravku.

Z výpočtů hodnocení způsobilosti je možné určit přesnosti měření, kterých měřicí zařízení dosahuje. Na základě měření a výpočtů budou vytvořeny tabulky s vypočítanými přesnostmi měření. Tyto tabulky budou sloužit pro obsluhu optického měřidla. Pomocí těchto tabulek bude moci obsluha zjistit s jakými přesnostmi je mikroskop pro určitá zvětšení schopen měřit.

Prvním krokem bude ověření způsobilosti měřicího zařízení pomocí etalonů. Druhým krokem poté bude změření rozměrů navrženého kontrolního přípravku, z naměřených dat bude vyhodnocena jeho způsobilost.

2 Rozbor a analýza současného stavu

Hlavním úkolem této práce je návrh kontrolního přípravku pro optická měřidla. Pro měření rozměrů je používán digitální mikroskop Keyence VHX – 6000. Tento mikroskop je pravidelně dvakrát ročně kalibrován a po kalibraci je vždy vhodné ověřit, zda kalibrace proběhla správně. Správnost měření mikroskopu je ověřována nejen po kalibraci, ale také po manipulaci s mikroskopem, nebo v mezidobí mezi dvěma kalibracemi.

Pro ověření způsobilosti měřidla jsou v současnosti používány etalony, jako například koncové měrky nebo kontrolní kroužky. Vzhledem k tomu, že rozměry etalonů jsou známé, je možné z naměřených hodnot říci, zda mikroskop měří správně. Pro ověření různých měřicích funkcí mikroskopu je potřeba použít více etalonů. Navržený kontrolní přípravek by tedy měl obsahovat prvky, které nahradí používání více etalonů a pro ověření správnosti měřidla bude potřeba pouze jeden kontrolní přípravek.

Měřicím zařízením je digitální mikroskop Keyence VHX-6000. Jedná se o druh optického měřidla.

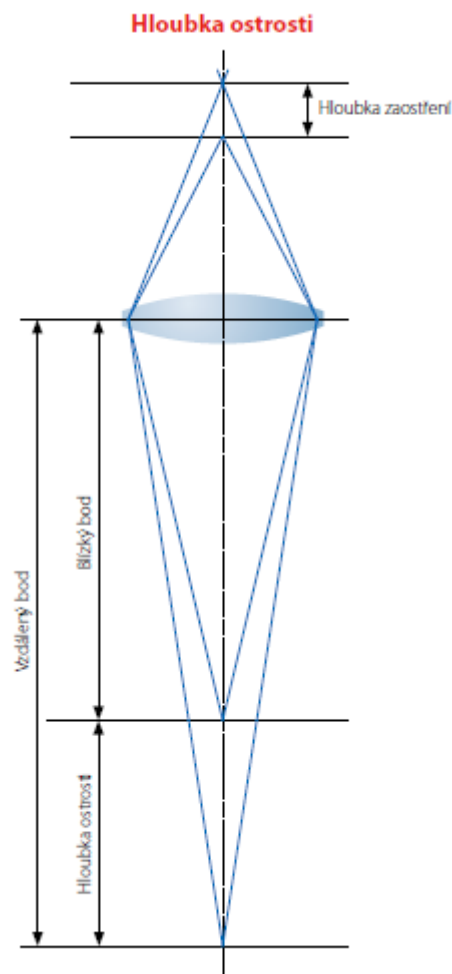
2.1 Optická měřidla

Digitální mikroskop je typ měřicího a kontrolního zařízení. Slouží ke snímání obrazů zobrazovacím zařízením v reálném čase.

Zvětšovací čočka

U digitálních mikroskopů je součástí vybavení zvětšovací čočka, která umožňuje přizpůsobit zvětšení dle požadavků. Toto umožňuje struktura čočky, která je tvořena jednotlivými čočkami s proměnlivou vzdáleností mezi nimi. Struktura zvětšovacích čoček umožňuje velkou hloubku ostrosti, což je rozsah tolerance vzdálenosti mezi objektem a čočkou, kdy je objekt ještě viditelný.

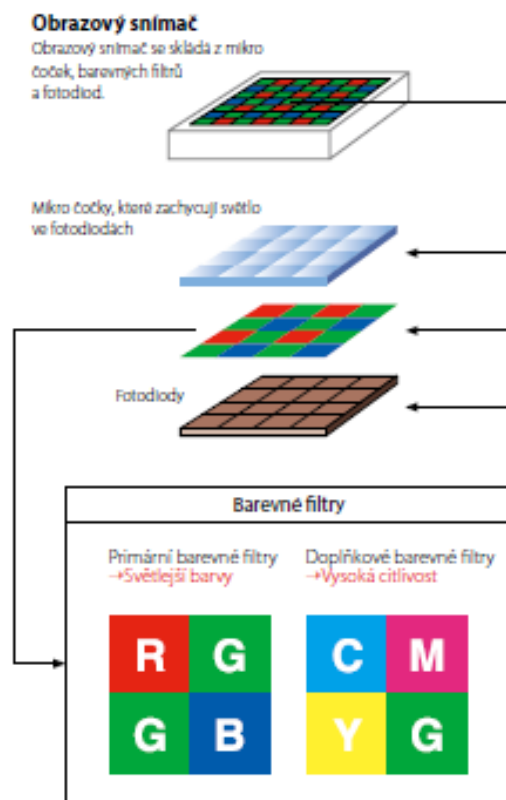
Zvětšovací objektivy umožňují plynulou změnu zvětšení, aniž by došlo ke ztrátě viditelnosti pozorovaného objektu. Moderní digitální mikroskopy umožňují automatické rozpoznání zvětšení, což zmenšuje riziko chyby v průběhu měření.



Obr. 3: Hloubka ostrosti [24]

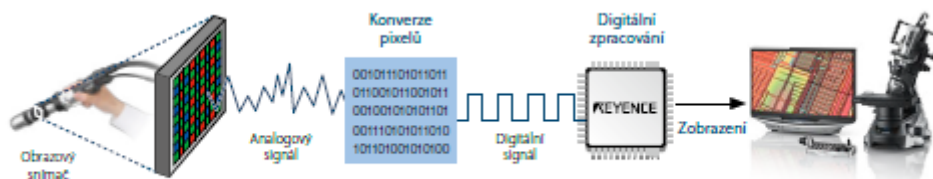
Obrazové snímače

Pro zobrazení obrazu snímaného objektu jsou stěžejní obrazové snímače. Jedná se o desky složené z malých diod, které jsou schopny přeměnit světlo na elektrický signál. Světlo naráží na povrch diod, obrazový snímač převede náraz na elektrický signál a vytvoří koncový obraz. Fotodiody nejsou schopny reprodukovat barvy, je proto potřeba před snímač vložit barevný RGB filtr.



Obr. 4: Obrazový snímač [24]

Pro zobrazení obrazu z mikroskopu je potřeba aby obrazový snímač pomocí barevného filtru přeměnil světlo přijaté z čočky na digitální signál. Po zpracování digitálního signálu jsou data převedena na obraz, který se zobrazí na displeji.



Obr. 5: Mechanismus tvorby digitálních obrazů [24]

Metody osvětlení

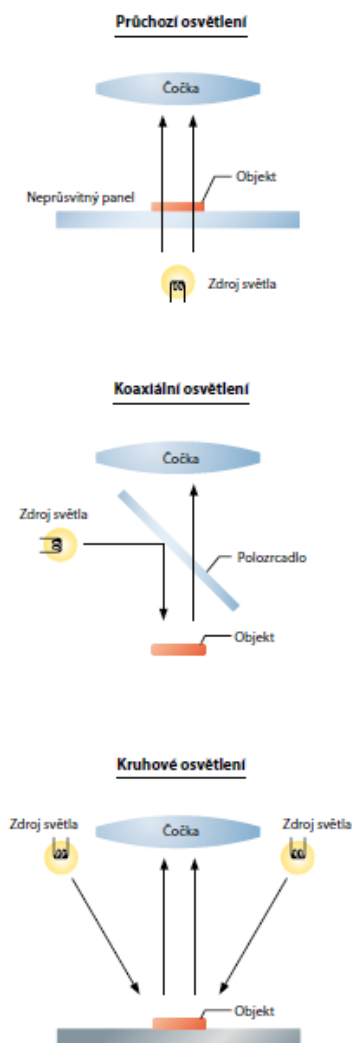
Osvětlení mikroskopu je stěžejní funkce, která má vliv na kvalitu výsledného obrazu. Osvětlení je možné rozdělit na 3 typy.

Průchozí osvětlení, které prochází vzorkem ze spodu. Tohoto osvětlení se využívá pro pozorování vnitřních vrstev vzorků, které jsou transparentní.

Pro pozorování povrchu vzorků je vhodné osvětlení shora. Tento typ osvětlení se dále dělí na koaxiální a kruhové osvětlení.

Koaxiální osvětlení nasvítí pozorovaný objekt rovnoběžně s optickou osou. Tento typ osvětlení je vhodný pro sledování odrazivých povrchů jako jsou například kovy nebo plasty, protože velká část světla se odráží mimo objektiv. Pro zobrazení povrchové struktury povrchu musí odražené světlo dosáhnout až k čočce.

Kruhové osvětlení se využívá pro pozorování vzorku z úhlu. Díky stínům, které při osvětlení z úhlu vzniknou je možné pozorovat oblasti s jasně vymezenými konturami.



Obr. 6: Metody osvětlení [24]

Digitální mikroskopy mají vestavěné osvětlení. Optický kabel vede světlo ze světelného zdroje na stranu čočky. Takto vestavěné osvětlení zajišťuje ideální rozptyl světla, který se shoduje se vzdáleností pozorování. Díky tomuto způsobu osvětlení není potřeba nastavovat polohu zvlášť čočky a osvětlení. [24]

Na základě definovaných cílů a problémů je potřeba navrhnout jakým způsobem bude vyhodnocována způsobilost přípravku pro následný sběr dat. Měřicím zařízením pro měření dat je digitální mikroskop Keyence HVX-6000.

2.2 Měřicí zařízení Keyence VHX-6000



Obr. 7: Mikroskop Keyence VHX-6000

Měřicím zařízením je digitální mikroskop Keyence VHX-6000. Tento digitální mikroskop má podložku o rozměrech 100 x 100 mm s pohybem v osách x, y a z. Podložka pro snímání je vysokorychlostní, což snižuje čas potřebný ke snímání objektů. Mikroskop má možnost naklápění objektivu a kamery až o 90°. Nosnost podložky je 5 kilogramů. Mikroskop má 2 vyměnitelné objektivy. První objektiv umožňuje měřit při zvětšení 20 až 250. Druhý umožňuje měřit při zvětšení 100 až 1000.

Ovládací panel slouží k posunu v osách x, y a z. Pomocí joysticku je možné iniciovat posun podložky v osách x a y. Pro posuv v ose z lze využít kolečko na pravé straně ovládacího panelu.



Obr. 8: Ovládací panel mikroskopu [25]

2.2.1 Možnosti měření

Mikroskop Keyence VHX – 6000 umožňuje funkci okamžitého měření. Měření mohou být provedena přímo na obrazovce kliknutím myši. Toto je umožněno samostatným počítačem připojeným k mikroskopu.

Funkce automatické detekce okrajů umožňuje měření, která jsou nezávislá na uživateli. Tato funkce je prováděna automaticky na základě kontrastů v obrazu. Tato možnost eliminuje chybu vnesenou uživatelem. V některých případech není možné automatickou detekci okrajů použít. Při měření větších rozměrů může dojít k chybnému zaostření hrany. Při použití funkce automatické detekce hran poté dochází k chybnému detekování hrany a tím i k chybnému měření rozměrů.

Automatické měření nebo měření jedním kliknutím umožňuje měřit jednotlivé pozice jedním kliknutím. Toto je umožněno díky párování šablony s cílovými pozicemi.

3D zachycení vytváří 3D obraz nebo hloubkové kompozice. Motorizovaný pohon osy z umožňuje automatické snímání bez nutnosti ručního posouvání v ose z. Funkce 3D měření umožňuje zjištění informací o rozměrech v osách x, y a z v jakékoli poloze. Tato funkce také umožňuje skenování větších ploch.

Měření rozměrů v ose z funguje na základě měření rozdílů ve výškách výběrem dvou bodů nebo čar. Tato funkce také umožňuje automatickou detekci nejnižšího a nejvyššího bodu v určené oblasti.

Vyhodnocení drsností povrchů je prováděno na základě měření liniové drsnosti.

2.3 Požadavky na kalibraci

Mikroskop Keyence VHX – 600 je kalibrován externí firmou jednou ročně. Obsluha stroje provádí ruční kalibrace pravidelně jednou ročně a vždy když je s mikroskopem manipulováno.

Funkce kalibrace nastavuje převodní síť mezi vzdáleností na snímku a jeho skutečnou vzdáleností na měřeném objektu.

Kalibraci na mikroskopu nelze provést pokud:

- je aktivována funkce HDR
- je používáno digitální přiblížení
- je aktivováno rozdělení obrazovky
- je aktivována funkce slepených obrázků
- je nahrávání nastaveno na vyšší rozlišení než 3200 x 2400
- je nastavena funkce automatického měření.

Pro kalibraci mikroskopu Keyence VHX-6000 jsou využívány 3 metody.

- 1) Kalibrace jedním stisknutím
- 2) Auto kalibrace
- 3) Manuální kalibrace

2.3.1 Kalibrace jedním stisknutím

Tato kalibrace vyžaduje použití referenční stupnice OP-87426, OP-87427 nebo OP-84124, aby bylo možné provést kalibraci automaticky. Tato funkce nevyžaduje přesné polohování stolku a usnadňuje kalibraci.

Polocování a čtení referenční stupnice je provedeno automaticky

Postup kalibrace:

- 1) Vybrat One-Push auto Calibration a kliknout na Start
- 2) Odstranit desku z polohy stolku XY a umístit referenční stupnici

- 3) Zvednout stolek co nejvýše to jde
- 4) Podle potřeby zkontrolovat funkci Auto focus automatic execution
- 5) Kliknout na Execute, kalibrace se provede automaticky, po provedení je zobrazena hláška „Auto calibration finished successfully“
- 6) Kliknout na OK, toto potvrdí a ukončí kalibraci

2.3.2 Auto kalibrace

Auto kalibrace vyžaduje použití referenční stupnice OP-87656 nebo OP-87657.

Čtení referenční stupnice probíhá automaticky. Zvětšení objektivu musí být manuálně zarovnáno s odpovídajícími pozicemi stupnice.

Postup kalibrace:

- 1) Vybrat Auto Calibration a kliknout na Start
- 2) Umístit referenční stupnici podle metody osvětlení
- 3) Zobrazit na obrazovce křížové značky referenční stupnice. Upravit zaostření a jas k dosažení kontrastu mezi bílou a černou. Zobrazit stupnici, která odpovídá zvětšení čočky.
- 4) Vybrat Full auto a kliknout na provést. Funkce Full Auto určuje rozsah výkonu na základě počtu vodorovných čar. Pokud se kalibrace nezdaří při použití plně automatické volby, rozsah výkonu objektivu se zvolí [x20-100], [x100-800] nebo [x450-5000] podle zobrazených křížových značek a vodorovných čar. Kalibrace se spustí automaticky. Po dokončení se zobrazí zpráva „Auto calibration finished successfully“
- 5) Kliknout na OK, toto potvrdí a ukončí kalibraci

2.3.3 Manuální kalibrace

Manuální kalibrace vyžaduje zadání známé referenční délky a označení ekvivalentní délky kliknutím na obrazovce. Používají se známé rozměry pozorovaných předmětů (pravítko) pro ruční nastavení kalibrace. Kalibrace může být provedena průběžně, pro různá zvětšení objektivu.

Postup kalibrace:

- 1) Vybrat manuální kalibraci a kliknout na OK
- 2) Zobrazit obrázek délkového referenčního pozorovatelného objektu (kalibrační měřítko)
- 3) Kliknout na počáteční bod na stupnici. Kalibrační stupnici lze také přetáhnout na obrazovku a přesunout ke křížovým značkám na objektu.
- 4) Kliknout myší na koncový bod referenční délky
- 5) Vybrat „Reference length“ a kliknout „Apply“

Jednotky a počty desetinných míst:

Jednotky atd., které se mají zobrazovat spolu s výsledky měření, lze změnit na obrazovce měření.

Načítání z uloženého obrázku:

Kalibrační hodnoty jsou uloženy v každém uloženém snímku. Po přehrání snímků z alba jsou kalibrační hodnoty načtené ze snímků připraveny k použití, což umožňuje další měření pomocí stejné kalibrace jako při pořízení snímku.

Inicializace kalibrace:

Inicializace vrátí kalibrační hodnoty na hodnoty nastavené z výroby. [26]

2.4 Sběr, zpracování a analýza dat

Pro hodnocení způsobilosti kontrolního přípravku je potřeba naměřit určité množství dat. Naměřená data je nutné zpracovat a analyzovat. Pro zpracování a analýzu dat jsou využívány nástroje kvality. Při zpracování dat je dále potřeba zjistit nejistoty a chyby měření.

2.4.1 7 Nástrojů kvality

Pro zpracování a analýzu dat se využívají nástroje řízení jakosti, které jsou založené na statistických metodách. Rozdělujeme celkem 7 základních nástrojů kvality:

- 1) Kontrolní tabulky a záznamníky
- 2) Histogram
- 3) Vývojové diagramy
- 4) Paretův diagram
- 5) Išikawův diagram
- 6) Bodový diagram
- 7) Regulační diagramy

7 základních nástrojů kvality je používáno pro sběr, analýzu a zpracování dat. Jedná se o jednoduché nástroje, díky kterým je možné zjistit základní informace o naměřených datech. [5]

1) Kontrolní tabulky a záznamníky

Management kvality se zabývá informacemi o kvalitě. Řízení kvality vychází z informací o naměřených datech. Kontrolní tabulky slouží ke spolehlivému a organizovanému zaznamenávání dat.

Tabulky vycházejí ze 3 principů:

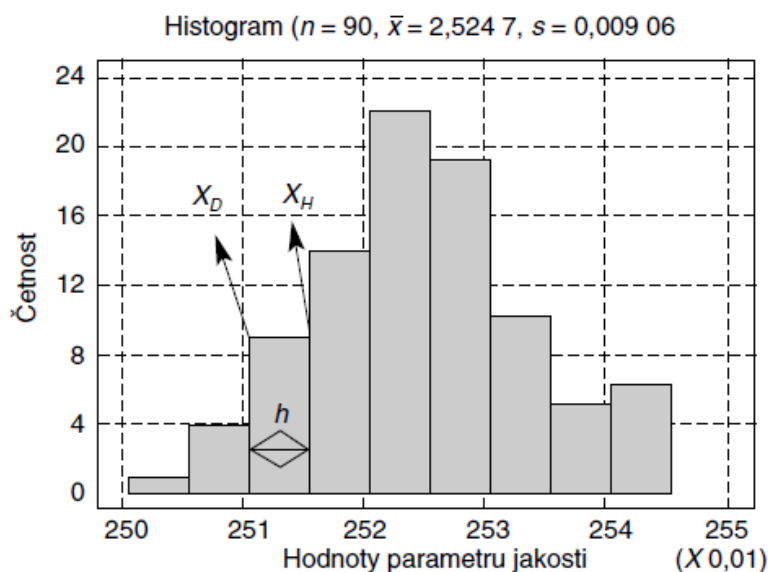
- 1) Stratifikace
- 2) Jednoduchost a standardizace
- 3) Vizualní interpretace

Data musí být seřazena tak, aby bylo možné jednoduše zjistit jejich původ. Data musí být zapsána jednoznačně, například pomocí značek nebo symbolů tak, aby tuto práci mohl vykonávat každý pracovník. Uspořádání dat musí být přehledné, aby bylo možné je snáze interpretovat. Standardizované dotazníky snižují potřebu přepisovat data a pomáhají rychlejšímu zpracování. [5]

2) Histogram

Histogram je sloupcový diagram určující rozdělení dat. Sloupce diagramu představují jednotlivé třídy. Šířka sloupce odpovídá rozpětí hodnot. Výška sloupce vyjadřuje množství hodnot, které spadají do jedné třídy. Díky zobrazení tolerančních mezí v histogramu je možné sledovat, zda jsou data v tolerančním poli, nebo mimo něj.

Histogram slouží k prvotnímu zhodnocení dat. Poznatky z histogramu jsou využity při dalších hodnoceních a výpočtech.

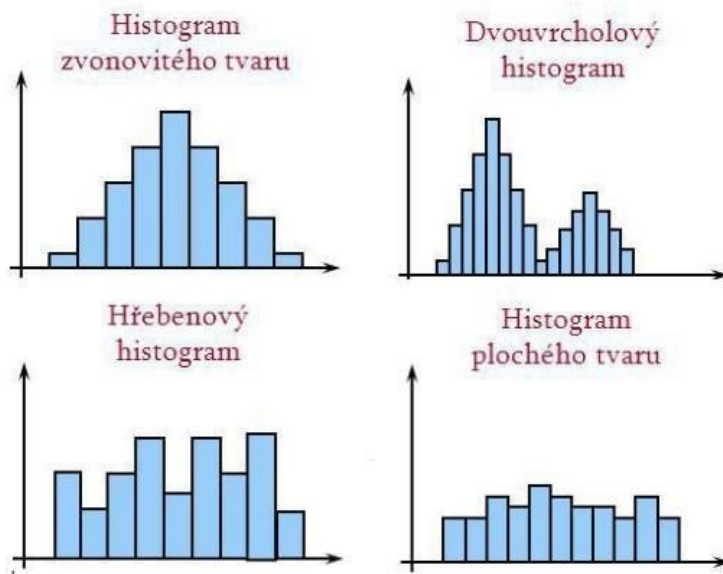


Obr. 9: Histogram [5]

Postup při sestavení histogramu:

- naměření dat
- výpočet rozpětí naměřených dat (rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší naměřenou hodnotou)
- určení počtu tříd (sloupců)
- rozdělení naměřených dat do jednotlivých tříd
- zjištění četnosti
- vytvoření histogramu. [5]

Výsledný histogram může mít několik podob.



Obr. 10: Typy histogramů [23]

Pro sběr dat je potřeba znát **rozdělení dat**.

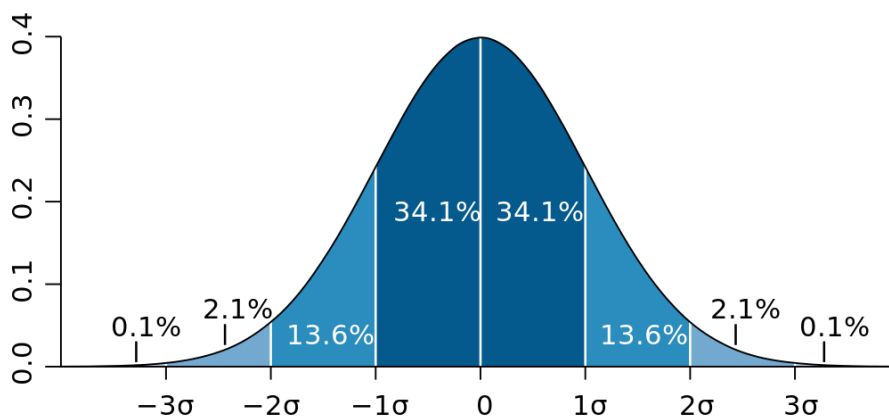
Známe dvě rozdělení spojité náhodné veličiny:

- 1) Normální Gaussovo rozdělení
- 2) Nenormální rozdělení

- 1) Normální Gaussovo rozdělení

Gaussovo normální rozdělení je nejběžnějším rozdělením dat. Zpravidla lze říci, že při vyšším počtu naměřených dat se jejich rozdělení blíží normálnímu.

Normální rozdělení dat umožňuje predikovat jakým způsobem se bude systém chovat, proto je tento typ rozdělení spojité veličiny požadován.



Obr. 11: Křivka Gausova normálního rozdělení [20]

Gaussova křivka popisuje Gaussovo rozdělení. Jedná se o křivku, která je symetrická podle střední hodnoty μ . Gaussovu křivku určují dva parametry, a to střední hodnota μ a rozptyl náhodné veličiny σ . Parametr σ udává velikost pásma, kde je pravděpodobnost výskytu veličiny 68,27%, parametr 2σ udává velikost pásma s pravděpodobností výskytu veličiny 95,45%. [15]

Funkce je popsána vztahem:

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

2) Nenormální rozdělení

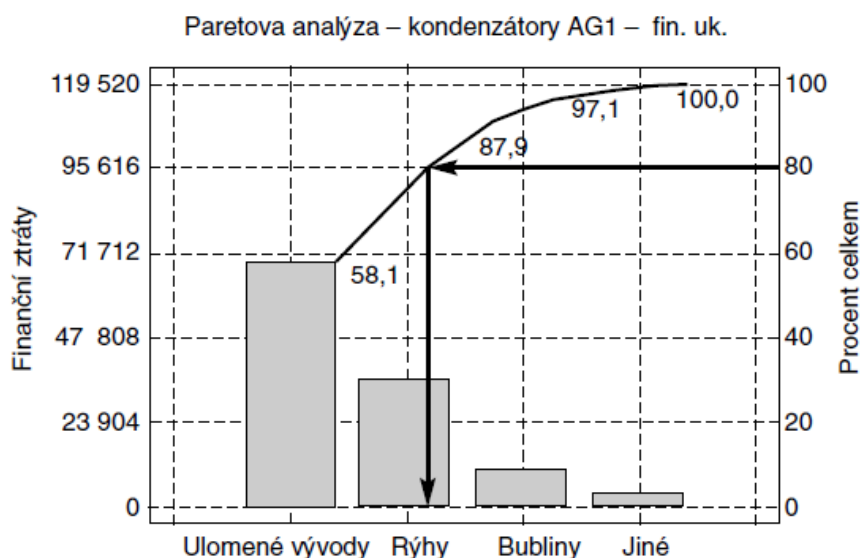
Nenormální rozdělení je rozdělení, které se neshoduje s normálním rozdělením. Dalšími rozděleními jsou například exponenciální nebo logaritmicko-normální rozdělení. Pro zjištění druhu rozdělení a jeho parametrů je vhodné využít software. Nenormální rozdělení neumožňuje předvídat chování procesů.

3) Vývojový diagram

Vývojový diagram je používán pro lepší pochopení vnitřních vztahů v procesu. Je možné jej použít pro popis jakéhokoli procesu. Vývojový diagram je orientovaný graf, který má jeden začátek a jeden konec. Při vytváření vývojových diagramů jsou používány předem stanovené symboly. [5]

4) Paretův diagram

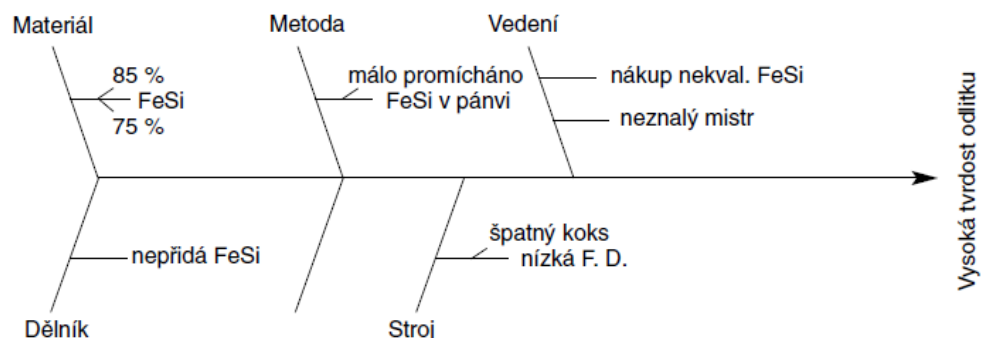
Paretův diagram předpokládá že existuje životně důležitá menšina příčin a užitečná většina příčin. Životně důležitá menšina zaujímá 20 % příčin a způsobuje 80 % následků. Ostatní příčiny jsou označeny jako užitečná většina a způsobují menšinu následků. Životně důležitou menšinu příčin je třeba co nejrychleji analyzovat a odstranit. [5]



Obr. 12: Paretův diagram [5]

5) Ishikawův diagram příčin a následků

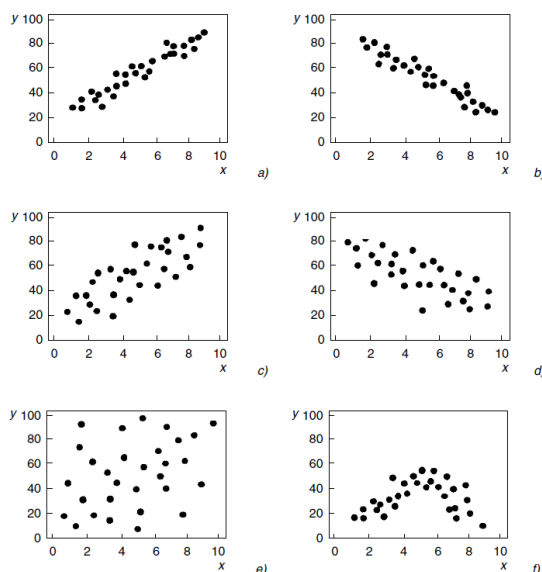
Ishikawův diagram se využívá k popsání všech příčin vedoucích k definovanému následku. Díky němu je možné nalézt příčiny, a ne pouze symptomy daného problému. Jedná se o jednoduchý nástroj ke shromažďování dat o výkonosti a výsledku procesu. K jeho vytvoření je potřeba tým odborníků, kteří při brainstormingu formulují jednotlivé příčiny a subpříčiny [5]



Obr. 13: Ishikawův diagram [5]

6) Bodový diagram

Bodový diagram je grafické zobrazení dvou proměnných. Tento diagram poskytuje informace o závislosti mezi proměnnými.



Obr. 14: Základní typy bodových diagramů [5]

7) Regulační diagram

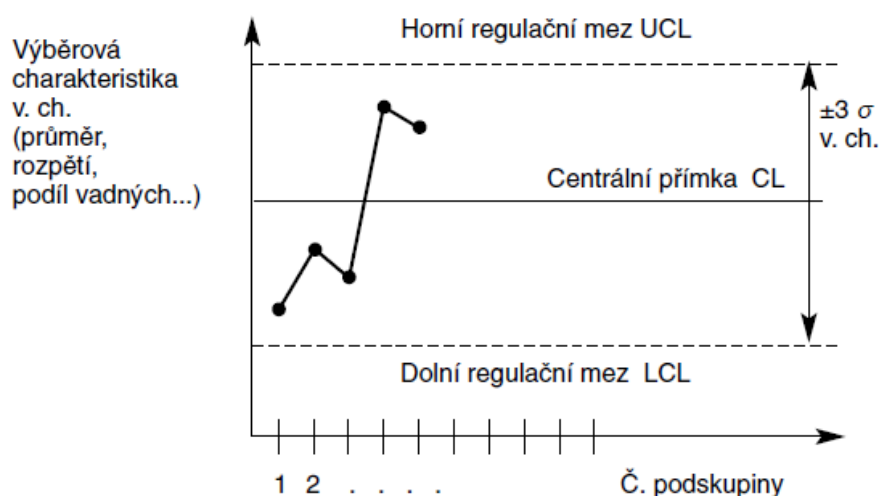
Statistická regulace umožňuje udržovat proces na stabilní úrovni díky brzkému odhalení odchylek. Statistická regulace je spočívá ve výstupní kontrole určité veličiny. Zjišťuje se, zda daná veličina odpovídá požadavkům. Pro dosažení stability procesu je potřeba provést analýzu variability. Statistická regulace je tedy kontrolou procesu založenou na matematicko-statistických metodách.

Regulační diagram je používán k zaznamenání dat v časovém sledu. Jedná se o základní nástroj kvality, který slouží k statistickému řízení jakosti.

Regulační diagram je základním nástrojem regulace. Díky regulačnímu diagramu je možné zjistit, zda je daný proces statisticky zvládnutý. Základem pro sestavení regulačního diagramu jsou centrální přímkou a akční meze.

Centrální přímkou (CL) je rovna referenční hodnotě. Referenční hodnotou může být hodnota stanovená technickým předpisem, například kóta ve výkresu, dále může být hodnota odhadnuta ze zkušeností z předchozích měření. Referenční hodnota může být také rovna průměru naměřených hodnot.

Akční meze, nebo také regulační meze vymezují pásmo v regulačním diagramu. Pásmo je ohraničeno horní regulační mezí (UCL) a dolní regulační mezí (LCL). V tomto pásmu působí na proces jen náhodné příčiny.



Obr. 15: Regulační diagram [5]

Hodnocení procesu se řídí následujícími pravidly:

- Pokud leží body mezi horní a dolní akční mezí, je možné říci, že je proces statisticky zvládnutý. V tomto případě není potřeba systém regulovat.
- Pokud leží alespoň 1 bod mimo pásmo vymezené akčními mezemi, není proces statisticky zvládnutý. V takovém případě je potřeba nalézt příčinu a přijmout opatření pro její odstranění. [5]

Při hodnocení procesu měření je potřeba určovat také nejistoty měření.

2.4.2 Chyby a nejistoty měření

Chyby měření jsou způsobeny několika faktory, jakými jsou například nestabilní podmínky pro měření, omezená přesnost měřicích zařízení, chyby operátorů při odečítání hodnot z měřicích zařízení. Každé měření je zatíženo chybou, skutečnou hodnotu měřené veličiny tedy není možné změřit. Chyba měření se definuje jako rozdíl mezi naměřenou hodnotou a skutečnou hodnotou měřené veličiny.

Chyby měření je možné rozdělit na systematické, náhodné a hrubé.

Systematické chyby vznikají vlivem nepřesného měřidla, chybou operátora nebo vlivem chybně zvolené měřicí metody. Systematické chyby mají vliv na zkreslení výsledku,

a to obvykle zmenšením nebo zvětšením výsledku měření, které vzniká za totožných podmínek. Odhalení systematické chyby je možné například opakováním měření na jiném měřicím zařízení. Dalším ze zdrojů systematické chyby je opotřebení zařízení. Opotřebení má vliv na výsledky měření, které je možné regulovat zavedením korekcí.

Náhodné chyby jsou nepředvídatelné. Jsou součástí všech měření. Zdrojem náhodné chyby je například změna podmínek v místě měření (změna teploty, vlhkosti apod.).

Výsledná chyba měření ε_i je rozdílem mezi hodnotou měření x_i a skutečnou hodnotou x_o . Výsledná chyba měření je pouze odhadnutá hodnota, není možné ji přesně vypočítat.

Systematická chyba má vliv na správnost celého měření. Náhodná chyba ovlivňuje přesnost výsledku měření.

Hrubé chyby mohou vzniknout například chybným zaznamenáním dat, chybným nastavením podmínek měření nebo selháním měřicího zařízení. Pokud jsou měření opakována, je hrubá chyba snadno odhalitelná, neboť se výrazně odlišuje od ostatních naměřených hodnot. Hrubé chyby je potřeba z naměřených dat odstraňovat, protože mají vliv na výsledky měření. [22]

V současnosti je zaveden nový termín nejistota měření.

Nejistota měření se používá pro hodnocení systému měření. Při výpočtu nejistoty měření je určen interval hodnot okolo naměřené hodnoty. Tento interval hodnot je poté k výsledku měření přiřazen. V intervalu hodnot se skutečná hodnota veličiny nachází s určitou pravděpodobností.

Pro určování nejistoty měření jsou využívány statistické metody.

Standardní nejistoty je možné rozdělovat na dva typy:

- 1) nejistota typu A
- 2) nejistota typu B.

Standardní nejistota typu A (u_a)

Standardní nejistota typu A je způsobena náhodnými příčinami. Náhodné příčiny je možné předpovídat a při působení pouze náhodných příčin je možné říci, že je proces statisticky zvládnutý. Tento typ nejistoty je závislý na počtu provedených měření. S vyšším počtem provedených měření se hodnota standardní nejistoty typu A snižuje.

Standardní nejistota typu A se rovná výběrové směrodatné odchylce \bar{s} aritmetického průměru.

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

n – počet měření

x_i – hodnoty naměřených veličin

\bar{s} – směrodatná odchylka aritmetického průměru

\bar{x} - aritmetický průměr

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Pro počet měření menší než 10 je nejistota počítána dle vzorce:

$$u_a = k_s \bar{s}$$

k_s – koeficient závislý na počtu měření (viz. Tab.1)

n	9	8	7	6	5	4	3	2
ks	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,7	2,3	7,0

Tab. 1: Hodnoty koeficientů k_s

Z tabulky 1 je patrné, že při menším počtu měření je počítáno s koeficientem, který má vyšší hodnotu, je tedy možné říci, že při snižování počtu měření se hodnota nejistoty typu A zvyšuje.

Standardní nejistota typu B (u_b)

Nejistota typu B je způsobena vymežitelnými příčinami. Vymežitelné příčiny není možné předpovídat a pokud působí na proces, je možné říci, že proces není statisticky zvládnutý. Nejistota typu B se pouze odhaduje. Tento typ nejistoty nezávisí na počtu měření.

Příčiny nejistoty typu B jsou chybně zvolen měřicí metoda, chybně zvolená konstanta, chybně zvolené podmínky měření a další.

Zdroji nejistoty typu b jsou vlivy:

- měřicího zařízení (chybná kalibrace, malá stabilita přístroje)
- metody (nestabilní kontakt s měřeným objektem, chybně zvolená konstanta)
- operátora (tepelný vliv operátora, chybný postup měření)
- prostředí (vliv podmínek v místnosti, kde měření probíhá)
- další (chyby při zapisování hodnot).

Nejistota typu B pro jednotlivé zdroje se určí ze vztahu:

$$u_B = \frac{\Delta z_{\max}}{x}$$

Δz_{\max} – rozsah změn

x – konstanta, vyjadřuje poměr maximální hodnoty rozsahu ku směrodatné odchylce Gausova rozdělení

Nejistota typu B je počítána dle vztahu:

$$u_B = \sqrt{\sum u_{B_i}^2}$$

Kombinovaná standardní nejistota je vypočtena jako odmocnina ze součtu druhých mocnin obou nejistot měření.

$$U = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$$

[22]

2.5 Hodnocení způsobilosti navrženého přípravku

Způsobilost nebo také přijatelnost nebo vhodnost, je vlastnost procesu naplňovat zamýšlené použití. Řeší vazby mezi požadavky a schopnostmi systému tyto požadavky splnit. Způsobilost slouží jako hodnotitel jakosti procesů. Analýza způsobilosti je prováděna už během plánování procesů. Hodnocením způsobilosti procesů lze získat informace o stabilitě výroby.

Pokud chceme hodnotit proces je potřeba vědět:

- 1) Co má proces dělat
- 2) Kde mohou vzniknout chyby
- 3) Co proces ve skutečnosti dělá.

Co má proces dělat definují technické požadavky.

Analýza PFMEA odhaluje rizika v procesech, která mohou způsobovat poruchy, a navrhuje nápravná opatření dříve, než k poruše dojde.

Co proces dělá lze zjistit na základě hodnocení výsledků, tedy pomocí kontroly. Kontrola slouží k hodnocení výsledných produktů, ale i rozpracovaných dílů.

Při hodnocení způsobilosti procesu je velmi důležitá kvalita naměřených dat. Při hodnocení způsobilosti procesu je proto potřeba hodnotit také samotný proces měření. [1]

Pro hodnocení celkové variability se využívá indexů způsobilosti. Při hodnocení způsobilosti procesů je možné využívat také metody MSA.

2.5.1 Index způsobilosti C_p

Index C_p slouží k hodnocení způsobilosti procesu. Pro jeho výpočet je potřeba znát hodnoty tolerančních mezí. Index způsobilosti C_p udává informace o způsobilosti procesu.

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma}$$

USL – Horní toleranční mez

LSL – Dolní toleranční mez

σ – Směrodatná odchylka

2.5.2 Index způsobilosti C_{pk}

Index C_{pk} určuje, zda proces dodržuje předem dané toleranční meze. Index způsobilosti C_{pk} udává informace o způsobilosti procesu a o tom, zda se naměřené hodnoty nachází v tolerančním poli. Dále udává polohu naměřených dat vůči oběma tolerančním mezím.

$$C_{pU} = \frac{USL - \mu}{3\sigma}$$

$$C_{pL} = \frac{\mu - LSL}{3\sigma}$$

$$C_{pk} = \min\{C_{pU}; C_{pL}\}$$

USL – Horní toleranční mez

LSL – Dolní toleranční mez

σ – Směrodatná odchylka

μ – Střední hodnota sledovaného znaku

Způsobilost hodnotí schopnost procesu dodržovat horní mez (C_{pU}) a schopnost dodržovat dolní toleranční mez (C_{pL}). Výsledná hodnota indexu způsobilosti C_{pk} je rovna minimu z obou vypočítaných hodnot. [15]

2.5.3 Analýza systému měření (MSA)

Metoda MSA byla vytvořena v USA automobilkami Ford, Chrysler a General Motors. Cílem metody bylo stanovení standartních procesů, manuálů a jednotných dokumentací pro zvýšení přesnosti systému měření. Výsledkem metody MSA je určení vhodnosti systému měření pro měření znaku kvality. Analýza systému měření je souborem postupů, které jsou používány pro klasifikaci systému měření. Analýzou MSA je možné hodnotit měřidlo nebo měřicí systém jako celek. Analýza se zaměřuje na hodnocení zdrojů nejistot v procesu měření. Analýza systému měření předpokládá, že vliv na výsledek měření mají různé faktory, nejen měřidlo.

Optimální systém měření neexistuje, musel by měřit pouze správně a mít nulový rozptyl, nulovou strannost a další parametry. Metodu MSA je možné použít pouze u opakujících se systémů měření. Analýza MSA hodnotí systematické chyby pomocí metod strannosti, stability, linearity, a náhodné chyby pomocí metody GRR.

Pro hodnocení analýzy systému měření se používají následující metody:

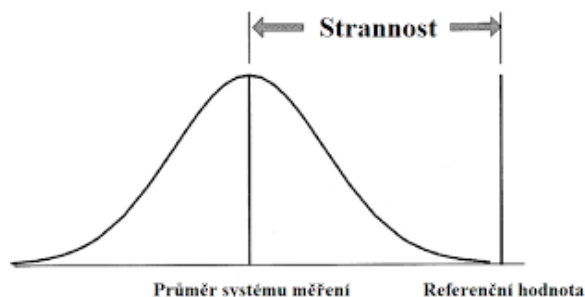
- a) strannost
- b) stabilita
- c) linearita
- d) opakovatelnost
- e) reprodukovatelnost
- f) opakovatelnost a reprodukovatelnost (GRR) [11]

Strannost

Strannost určuje rozdíl mezi pravou referenční hodnotou a střední hodnotou neboli průměrnou hodnotu měření. Metoda strannosti odhaluje systematické chyby měření.

Příčiny strannosti:

- nekalibrovaný přístroj
- opotřeбенé měřicí zařízení
- nekalibrovaný etalon
- chybně provedená kalibrace
- použití nekvalitního přístroje
- deformované měřidlo
- vliv prostředí, ve kterém je měření provedeno.



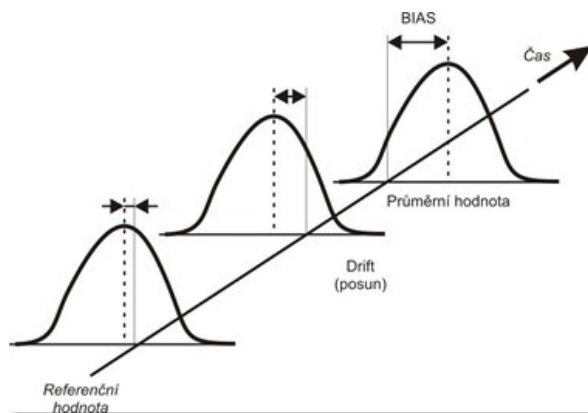
Obr. 16: Variabilita polohy - Strannost [16]

Stabilita

Stabilita vyjadřuje strannost v čase. Díky stabilitě je možné pozorovat proměnlivost procesu v čase. Hodnocení stability vyžaduje, aby byla měření provedena na jednom měřicím zařízení, měřením jednoho dílu, a to v dostatečně dlouhém časovém horizontu.

Příčiny nestability:

- chybně kalibrovaný přístroj
- opotřebené měřicí zařízení
- stárnutí měřicího zařízení
- nekvalitní údržba měřicích zařízení
- nekalibrovaný etalon
- použití nekvalitního přístroje



Obr. 17: Variabilita polohy - Stabilita [17]

Linearita

Linearita zobrazuje celý rozsah měřicího zařízení. Jedná se o změnu strannosti vztahenou k velikosti.

Příčiny nelinearity:

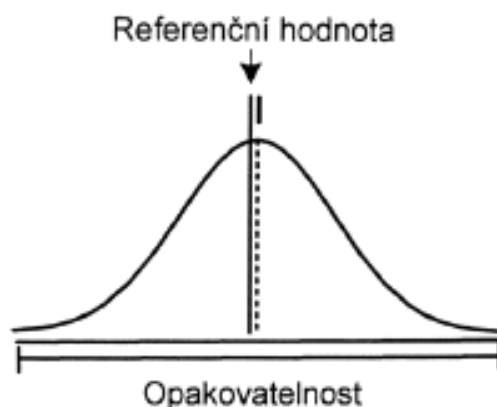
- nekalibrovaný přístroj
- opotřebené měřicího zařízení
- neudržované měřicího zařízení
- poškozený etalon
- chybně provedená kalibrace
- chybně zvolené měřicího zařízení

Opakovatelnost

Opakovatelnost vyjadřuje variabilitu obsluhy měřicího zařízení. Variabilitu je možné hodnotit, pokud byla měření provedena jednou osobou, na jednom měřicím zařízení, měřením jednoho dílu.

Příčiny chybné opakovatelnosti:

- poloha, povrchové úpravy, zkosení dílu
- závada, špatná údržba nebo opotřebení přístroje
- opotřebení nebo špatná kvalita etalonu
- chybné upnutí, uchycení, chybná technika měření
- nezkušenost operátora
- vliv změny teploty, vlhkosti, osvětlení prostředí



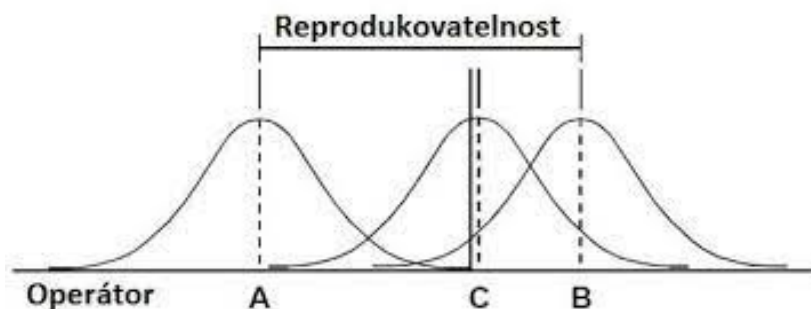
Obr. 18: Variabilita šíře - Opakovatelnost [18]

Reprodukovatelnost

Reprodukovatelnost vyjadřuje variabilitu mezi dvěma operátory. Je možné ji hodnotit v případě že byla měření provedena na jednom stroji při měření jednoho dílu více operátory.

Příčiny chybné reprodukovatelnosti

- rozdíl při měření různých dílů
- rozdíl při měření na různých přístrojích
- vliv použití různých etalonů
- rozdíl mezi použitými metodami
- rozdíl mezi různými operátory



Obr. 19: Variabilita šíře - Reprodukovatelnost [19]

Opakovatelnost a reprodukovatelnost (GRR)

GRR udává kombinovanou variabilitu procesu měření.

Možnosti využití metody MSA:

- 1) Určení způsobilosti systému měření
- 2) Určení pole variability systému měření
- 3) Popis zdrojů proměnlivosti
- 4) Poskytnutí informací o systému měření

Každý systém měření je omezován různými činiteli jako jsou možnosti měřidel, personálu, postupy, podmínky měření a další. Variabilitu, která ovlivňuje proces měření, je potřeba nalézt a odstranit.

Rozdělujeme dvě příčiny variability:

- Náhodné příčiny
- Vymežitelné příčiny

Náhodné příčiny

Náhodné příčiny je velmi těžko odhalit. Při působení náhodných příčin, je možné označit proces za statisticky zvládnutý. Statisticky zvládnutý proces je možné předvídat, výstupy procesu také. Náhodné příčiny způsobují předvídatelné, periodické kolísání procesu. Působení náhodných příčin lze výrazně omezit pouze změnou ve výrobě.

Náhodné příčiny mohou být například nevhodná kvalita polotovaru, teplota ovzduší, vibrace stroje.

Vymežitelné příčiny

Vymežitelné příčiny jsou skupina jevů, které na proces běžně nepůsobí. Pokud tyto jevy působí na proces, lze proces charakterizovat jako statisticky nezvládnutý, nereprodukovatelný, s nejistou jakostí výstupu.

3 Návrh kontrolního přípravku

Návrh kontrolního přípravku bude proveden na základě požadavků obsluhy měřicího zařízení a na základě možností měřicího zařízení.

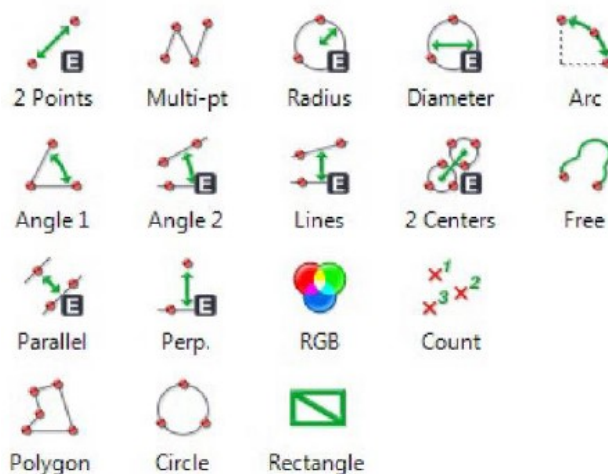
3.1 Měřicí zařízení

Měřicím zařízením je digitální mikroskop Keyence VHX-6000, který je podrobně popsán v kapitole 2.2.

Pro návrh kontrolního přípravku je potřeba vycházet z rozměrů podložky, které jsou 100x100 mm, a z nosnosti podložky 5 kilogramů. Velikost a nosnost podložky udávají základní požadavky na kontrolní přípravek.

Mikroskop Keyence VHX-6000 má celou řadu automatických měřicích nástrojů, které umožňují měření:

- vzdálenosti 2 bodů
- rádiusu
- průměru
- délky oblouku
- velikosti úhlu
- vzdálenosti 2 čar
- vzdálenosti středů 2 kružnic
a další.



Obr. 20: Nabídka měřicích nástrojů mikroskopu Keyence VHX-6000 [26]

Mikroskop umožňuje 3D zachycení objektu a funkci 3D měření hloubky, která udává informaci o výšce v kterékoli poloze, ve 3D je tedy možné provádět měření skutečného tvaru objektu.

Další funkcí je možnost skenování povrchu ve 2D a ve 3D.

Mikroskop také umožňuje měření drsnosti povrchu. Mikroskop změří a zhodnotí drsnost určené plochy.

3.2 Provádění kalibrace a ověřování správnosti měření

Kalibraci je možné provádět třemi způsoby.

- Kalibrace jedním stisknutím
- Auto kalibrace
- Manuální kalibrace

První dva typy kalibrace vyžadují speciální přípravky. Tyto kalibrace jsou tedy na mikroskopu prováděny externí firmou jednou do roka. Manuální kalibraci je možné provádět bez speciálních přípravků. Tento typ kalibrace se provádí pomocí kalibrované měrky, jejíž velikost je známá. Na monitoru je vybrána vzdálenost mezi dvěma body a je manuálně zadáno, jak velká je tato vzdálenost.

Pro ověření způsobilosti mikroskopu Keyence VHX-6000 po kalibraci nebo mezi kalibracemi se používají různé etalony, kterými jsou kontrolní kroužky, koncové měrky a úhlové měrky. Jednotlivé měrky jsou položeny na stolek a změřením na mikroskopu je zjištěno, zda je mikroskop dobře kalibrován. Tento způsob vyžaduje minimálně 3 různé měrky, které se musí položit na stolek, změřit a vyměnit za další měrku.

Cílem přípravku je tedy snížit čas pro ověřování způsobilosti mikroskopu tím, že nebude potřeba používat více etalonů, ale bude použit jeden přípravek, který bude obsahovat různé elementy, jejichž změřením se ověří způsobilost měřidla.

3.3 Návrh modelu kontrolního přípravku

Návrh modelu vychází ze základních rozměrů mikroskopu, tedy velikosti stolečku a rozsahu možnosti měření v ose z. Velikost stolečku je 100x100 mm, navržený kontrolní přípravek bude tedy 80x80 mm velký.

Kontrolní přípravek bude odpovídat maximálním rozměrům které je na mikroskopu možné měřit. Pro měření větších rozměrů se využívá především objektiv 1, který má rozsah zvětšení 20 až 250.

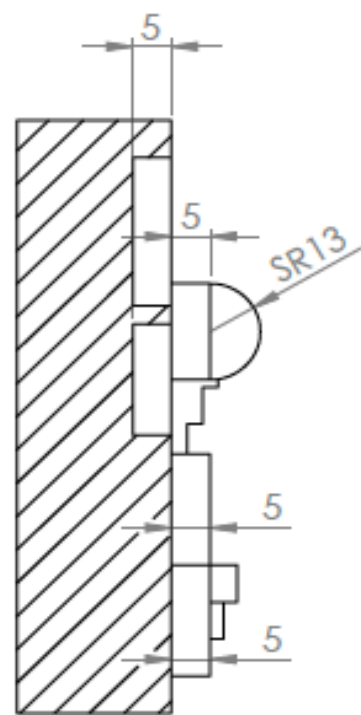
Při hodnocení způsobilosti mikroskopu je potřeba změřit různé geometrické tvary, pro ověření základních funkcí mikroskopu. Model by tedy měl obsahovat více elementů. Navržený přípravek bude obsahovat díry pro měření průměrů, šikmé plochy pro měření úhlů, obdélníkové elementy pro měření rozměrů v osách x, y a z. Pro vyžití měřicích nástrojů mikroskopu nebude potřeba používat více různých měrek, ale bude se využívat jen jeden přípravek. Posouváním stolku tedy bude možné změřit více elementů bez nutnosti výměny přípravku.

Materiál kontrolního přípravku je hliníková slitina EN AW 7075. Slitina se vyznačuje dobrou obrobiteľnosťou a leštiteľnosťou. Má veľmi vysokou pevnosť v tahu (450-540 MPa). Slitina obsahuje od 5 do 8% zinku a približne 2% horčíku.

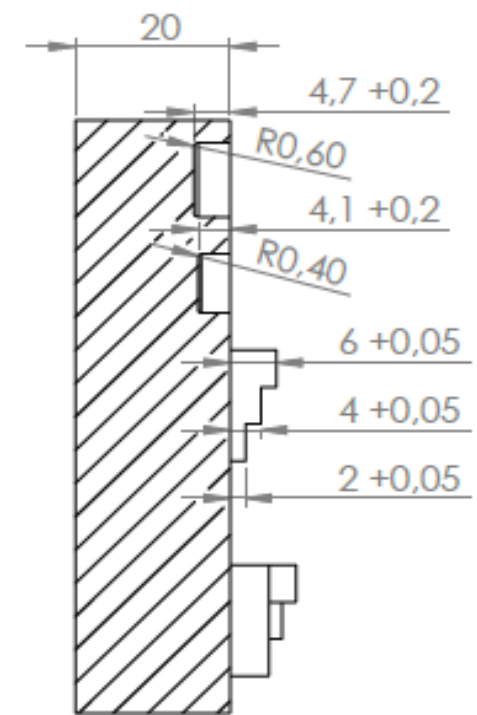
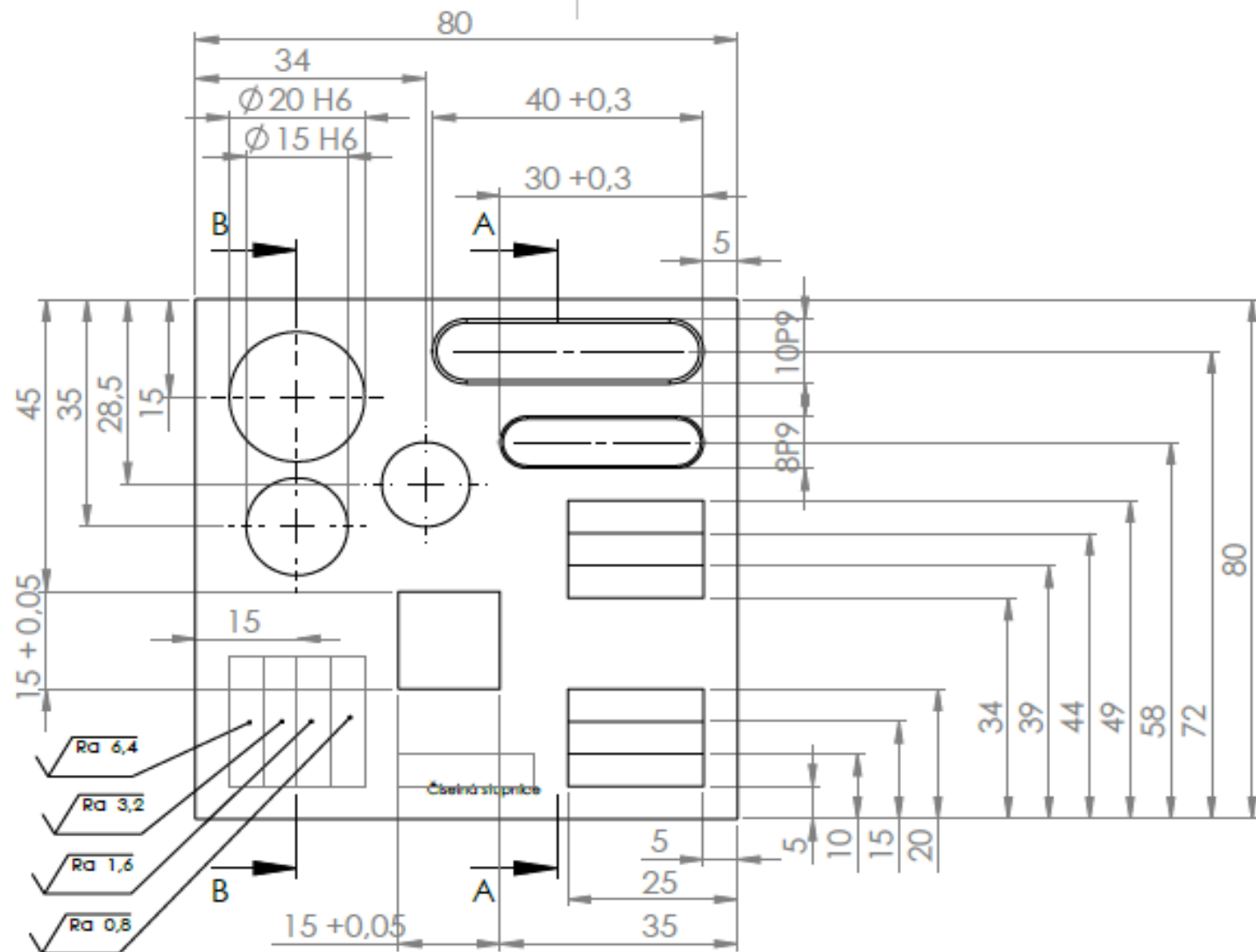
Jako polotovár bol použit kvádr o výšce 50 mm a rozměrech podstavu 85X85 mm.

Na obr. 21 je výkres přípravku. Podle tohoto výkresu byl přípravek vyroben.

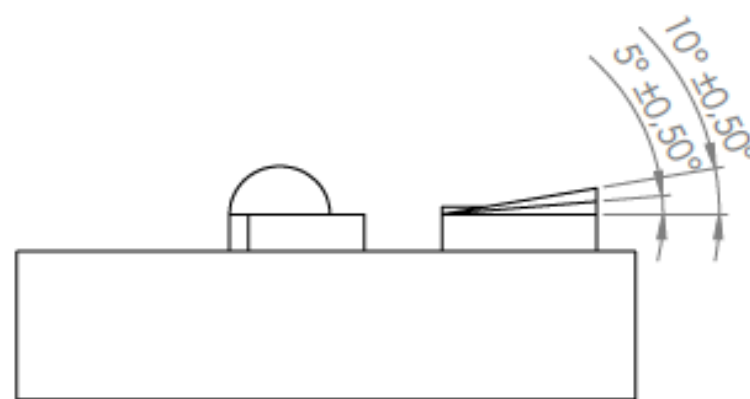
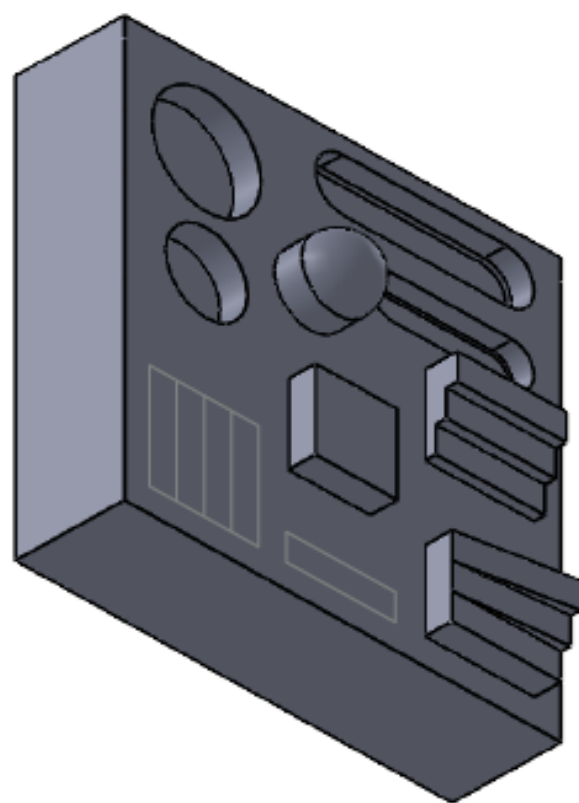
Na obr. 22 je výkres přípravku s rozměry po výrobě. Vyrobený přípravek byl změřen na měřicím zařízení Carl Zeiss Prismo 7 Navigator celkem čtyřikrát. Z naměřených hodnot byl vypočítán průměr a byl vytvořen výkres přípravku s naměřenými hodnotami. Tyto rozměry budou sloužit při vyhodnocování způsobilosti jako skutečné rozměry.



ŘEZ B-B

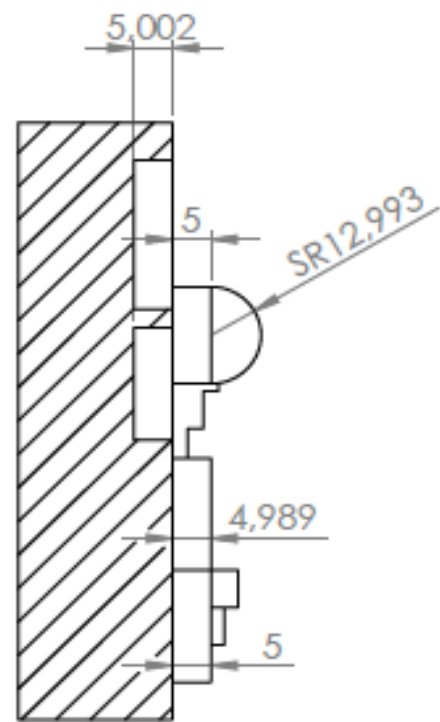


ŘEZ A-A

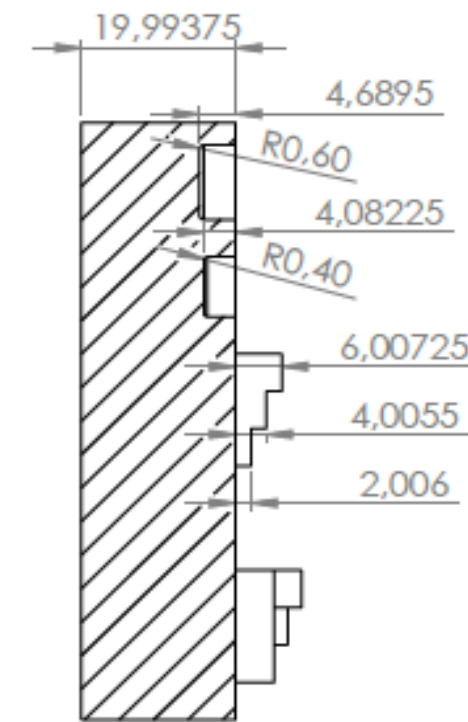
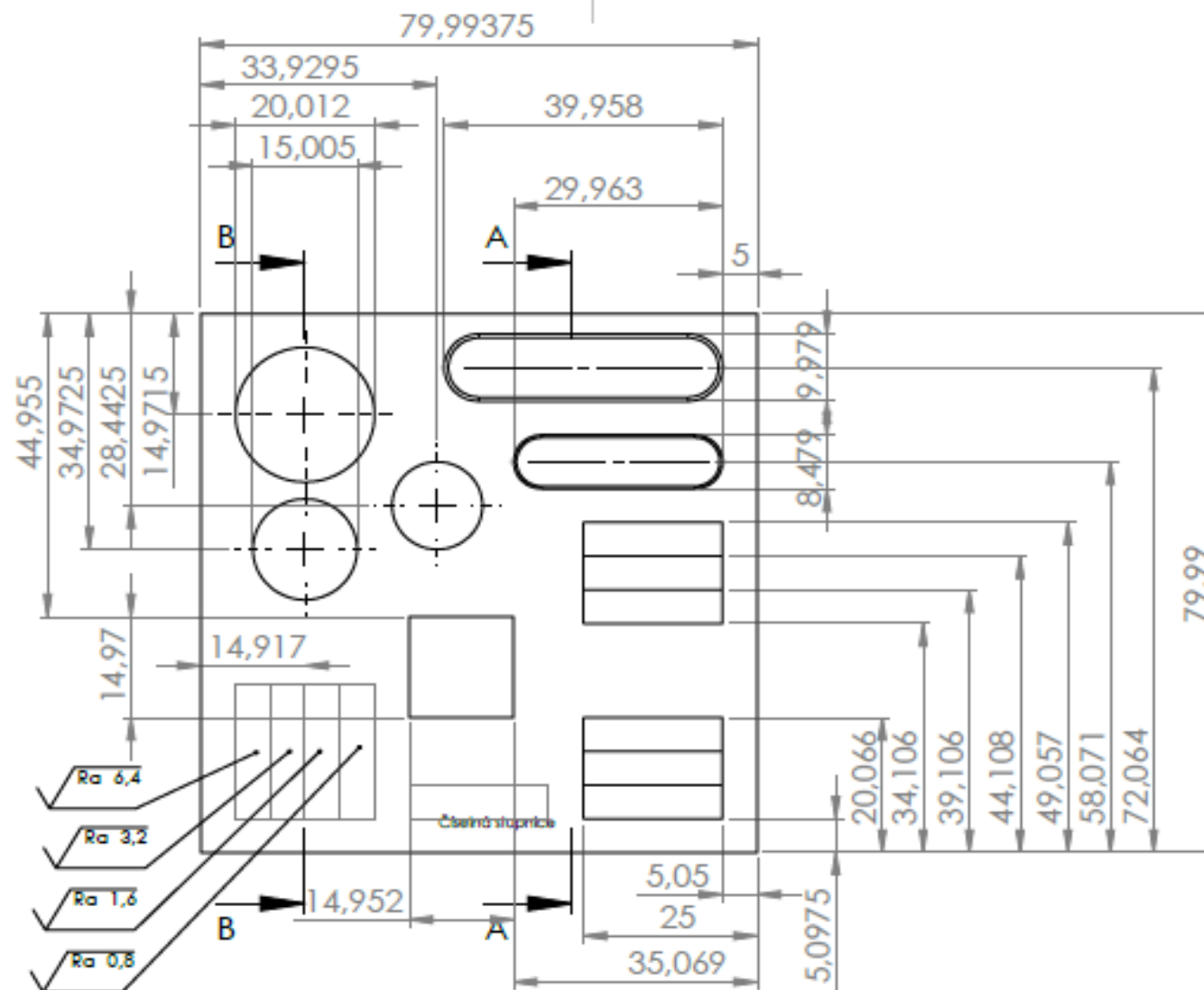


Rozměry číselné stupnice a oblasti drsnosti povrchu dle modelu

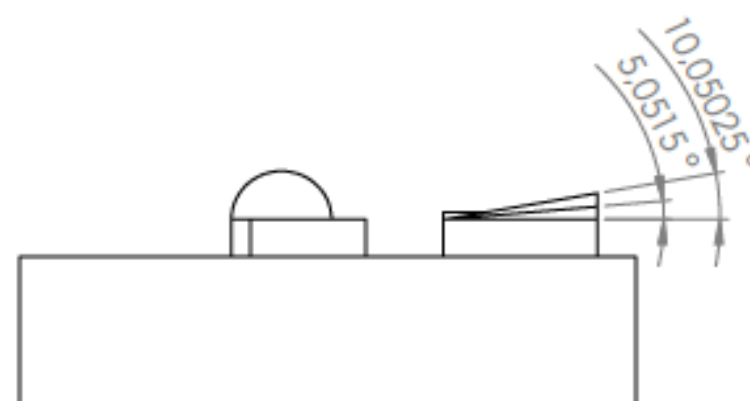
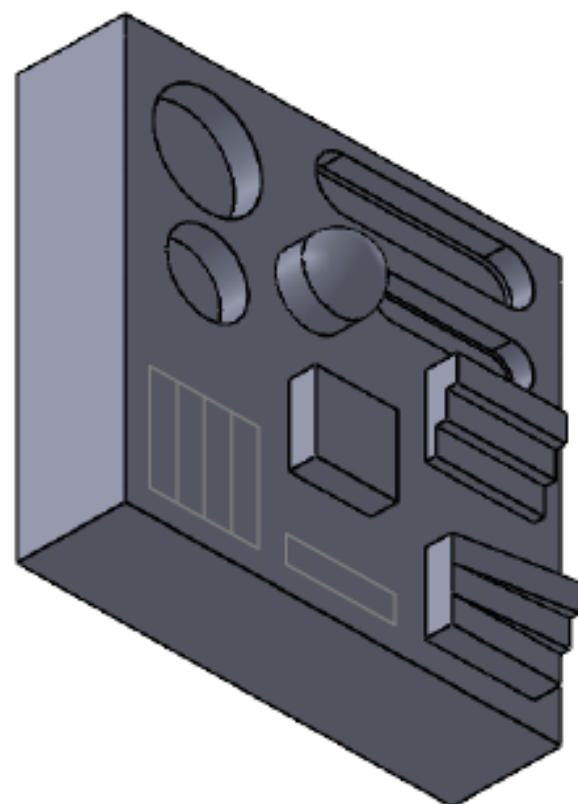
POKUD NENÍ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH DRSNOST: Ra 6,4 TOLERANCE: ISO 2768 mK LINEÁRNÍ ÚHELOVÁ:	OPRACOVÁNÉ			ODSTRANIT OSTRÉ HRANY	NEUPRAVOVAT MĚŘITKO VÝKRESU	ZMĚNA
	JMÉNO	PODPS	DATUM		NÁZEV: KONTROLNI_PRIPRAVEK	
NAVRHL	Váagnerová		12.1.2022		Č. VÝKRESU DP_VAGNEROVA_01	
PREKOUSĚL					A3	
SCHVÁLIL					MĚŘITKO: 1:1	
VÝROBA				MATERIÁL: EN AW 7075	LIST 1 Z 1 LISTŮ	
Z. JAKOSTI				POLOTOVAR: 50X85X85 mm		
				HMOTNOST: 0,15 KG		



ŘEZ B-B



ŘEZ A-A



Rozměry číselné stupnice a oblasti drsnosti povrchu dle modelu

POKUD NĚJ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH DRSNOST: Ra 6,4 TOLERANCE: ISO 2768 mK LINEÁRNĚ ÚHLOVĚ:				OPRACOVÁNĚ		OSTRANIT OSTRÉ HRANY		NEUPRAVOVAT MĚŘIKO VÝKRESU		ZMĚNA	
NAVÍHL	JMÉNO	PODPIS	DATUM					NÁZEV: KONTROLNI_PRIPRAVEK			
PŘEDOUŠEL	Vágnarová		17.2.2022								
SCHVÁLE											
VÝROBA											
Z. JAKOSTI						MATERIÁL:	EN AW 7075	Č. výkresu DP_VAGNEROVA_02			
						POLOTOVÁŘ:	50X85X85 mm	A3			
						HMOTNOST:	0,15 KG	MĚŘIKO: 1:1			
								LIST 1 Z 1 LISTŮ			

3.4 Metodika ověření způsobilosti

Ověření způsobilosti bude provedeno pomocí statistických metod a nástrojů řízení kvality.

Pro ověření způsobilosti přípravku je potřeba nejprve ověřit způsobilost měřicího zařízení. Toto ověření bude provedeno pomocí kalibrovaných koncových měrek, úhlových měrek a kontrolních kroužků. Kalibrované měrky jsou používány proto, že je známa jejich skutečná velikost.

Ověření způsobilosti měřicího zařízení bude provedeno pomocí vybraných etalonů.

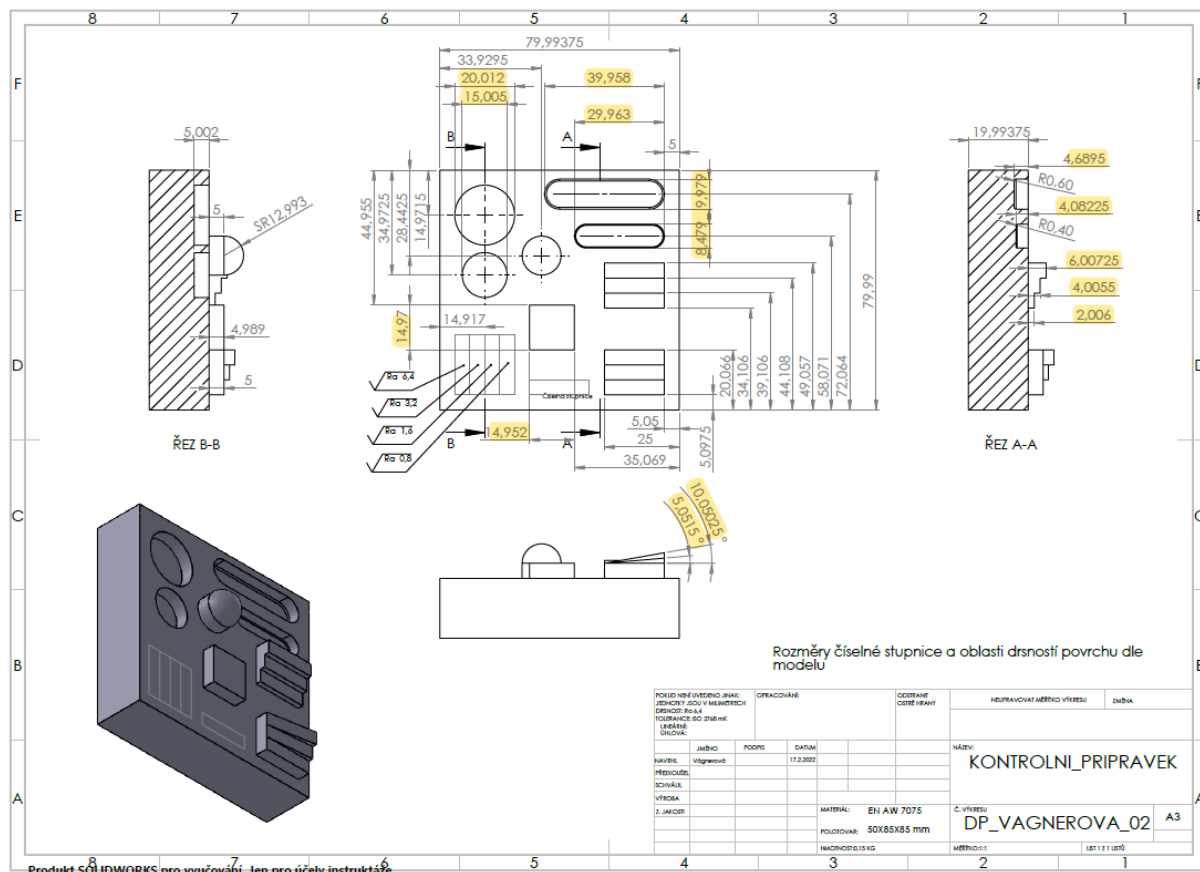
Pro ověření způsobilosti měřicího zařízení budou použity koncové měrky o rozměru 2 mm pro ověření způsobilosti měření v ose z, a o rozměru 15 mm pro ověření způsobilosti měření v osách x a y. Dále bude použita úhlová měrka o rozměru 10° pro ověření způsobilosti měření úhlů a kontrolní kroužek o průměru 16 mm pro ověření způsobilosti měření průměrů. Rozměry etalonů byly vybrány tak, aby se blížily rozměrům měřených prvků kontrolního přípravku. Vzhledem k tomu, že budou při hodnocení způsobilosti při měření etalonů a kontrolního přípravku měřeny stejné, nebo velmi podobné rozměry, je možné vypočítané přesnosti měření porovnat a díky tomu určit způsobilost navrženého kontrolního přípravku.

Způsobilost měřicího zařízení bude ověřována pro všechna zvětšení objektivu 1, tedy pro zvětšení 20, 30, 50, 100, 150 a 200. Pro objektiv 2 bude ověřena způsobilost pro zvětšení 100 a 200. Vyšší zvětšení jsou používána především pro měření menších rozměrů a drsností povrchu a nebudou tedy pro měření navrženého kontrolního přípravku použita.

Pro ověření způsobilosti měřicího zařízení je potřeba provést alespoň 20 měření. Hodnocení způsobilosti pomocí indexů C_p a C_{pk} vyžaduje alespoň 10 měření, pro vytvoření histogramu a regulačního diagramu je ale potřeba alespoň 20 měření, proto byl každý prvek změřen dvacetkrát. Po naměření dat bude ověřena jejich normalita pomocí histogramu a budou odstraněny hrubé chyby měření. Z naměřených hodnot bude vypočítána způsobilost pomocí indexů C_p a C_{pk} . Z výsledků hodnocení způsobilosti bude zjištěno rozmezí okolo skutečné hodnoty, pro které je měřicí zařízení způsobilé. Toto rozmezí je ohraničeno horní a dolní toleranční mezí. Hodnoty tolerančních budou použity v regulačním diagramu jako akční meze UCL a LCL. Z Regulačního diagramu bude určeno, zda je proces statisticky zvládnutý.

Poté co bude ověřena způsobilost měřicího zařízení pomocí kalibrovaných měrek, bude provedeno ověření způsobilosti kontrolního přípravku.

Pro hodnocení způsobilosti kontrolního přípravku byly vybrány tolerované rozměry přípravku (označené žlutě na Obr.23). Tolerované rozměry byly vybrány proto, že při výrobě je zajištěna vyšší přesnost. Při návrhu kontrolního přípravku byly také tolerovány takové rozměry, aby jejich změřením bylo možné ověřit požadované měřicí nástroje mikroskopu.



Obr. 23: Výkres s vyznačenými rozměry pro hodnocení způsobilosti

Hodnocení způsobilosti přípravku bude provedeno stejným způsobem jako hodnocení způsobilosti měřicího zařízení pomocí kalibrovaných měrek.

Způsobilost bude ověřena pro všechna zvětšení objektivu 1, tedy pro zvětšení 20, 30, 50, 100, 150 a 200. Pro objektiv 2 bude ověřena způsobilost pro zvětšení 100 a 200. Oba objektivy umožňují měření pro stejná zvětšení 100 a 200, tato měření budou tedy porovnána.

Přesnosti měření budou porovnány. Při použití zvětšení 20 a 30 byla hodnota akceptovatelného rozdílu mezi přesnostmi měření etalonu a kontrolního přípravku stanovena na $\pm 2^\circ$ při měření úhlů a ± 1 mm při měření rozměrů v osách x, y a z. Při použití vyšších zvětšení byla tato hodnota stanovena na $\pm 1^\circ$ při měření úhlů a $\pm 0,2$ mm při měření rozměrů v osách x, y a z.

Výsledkem měření bude určení, zda je přípravek způsobilý. Dále bude vytvořena tabulka, ve které bude zaznamenáno, v jakých tolerancích je mikroskop schopen měřit, tedy jakých dosahuje přesností měření. Tabulky s vypočítanými přesnostmi měření budou dále sloužit pro obsluhu mikroskopu.

Pro měření jednotlivých prvků budou použity 3 metody:

- 1) Quick composition and 3D - 3D depth
- 2) 2D skenování povrchu – 2D stitching
- 3) 3D skenování povrchu – 3D stitching

4 Hodnocení způsobilosti navrženého kontrolního přípravku

Pro hodnocení způsobilosti přípravku byly vybrány prvky, které byly na původním výkrese tolerovány. Tyto prvky představují základní geometrické tvary, které je možné na mikroskopu měřit. Během měření bylo zjištěno, že délky drážek pro pero, hloubku drážky pro pero 10P9, a díru o průměru 20 mm není možné na mikroskopu změřit při zvětšeních větších než 50, protože měřená plocha je větší, než je mikroskop schopen zachytit. Pro tyto prvky tedy nebyla hodnocena způsobilost.

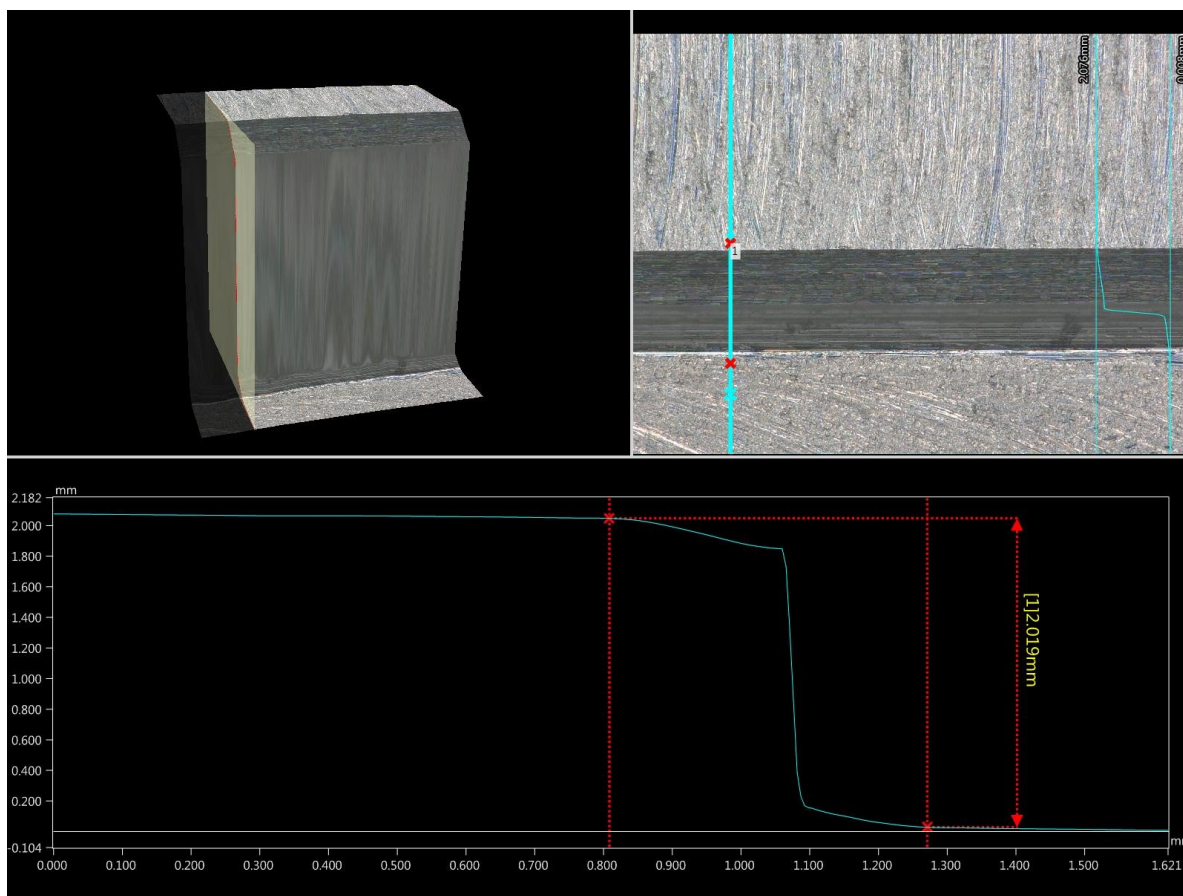
Hodnocení způsobilosti proběhne následujícím způsobem:

- 1) Vytvoření histogramu z naměřených dat
- 2) Ověření normality dat
- 3) Odstranění hrubé chyby měření
- 4) Výpočet nejistoty měření
- 5) Hodnocení způsobilosti metodou SPC.

4.1 Ukázka hodnocení způsobilosti pro schod o výšce 2 mm

Pro ukázkou hodnocení způsobilosti přípravku byl vybrán prvek schodu o výšce 2 mm. Měření bylo provedeno při použití objektivu 1, při zvětšení 150.

Pro měření rozměrů v ose z byla použita měřicí funkce mikroskopu 3D depth, která provádí skenování objektu v ose z. Výsledný sken umožňuje měřit rozměry v ose z tak, že je vykreslená křivka kopírující tvar povrchu. Na této křivce je poté možné měřit rozdíly ve výšce 2 bodů. Tuto metodu zobrazuje Obr. 24.



Obr. 24: Ukázka měření rozměrů v ose z

Po změření přípravku na stroji Carl Zeiss Prismo 7 Navigator byla zjištěna skutečná výška schodu 2,006 mm.

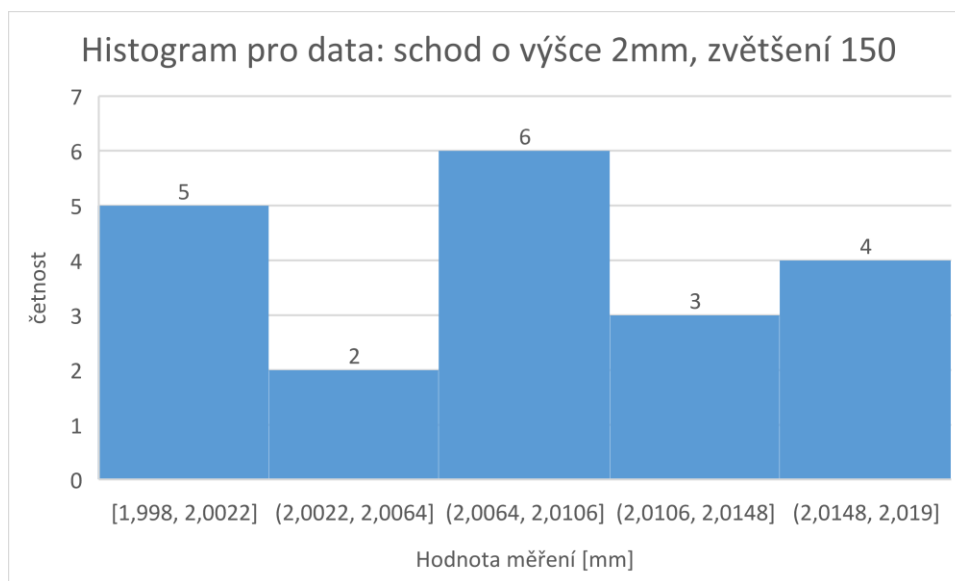
Hodnocení způsobilosti pomocí metody SPC vyžaduje minimálně 10 měření, pro vytvoření regulačního diagramu je poté potřeba alespoň 20 měření. Každý prvek kontrolního přípravku byl tedy měřen dvacetkrát.

	naměřené hodnoty
1	2,001
2	2,01
3	2,005
4	2,004
5	2,011
6	2,012
7	1,998
8	2,01
9	2
10	2,009
11	2,009
12	2,008
13	2,013
14	1,998
15	2,007
16	2,017
17	2,015
18	2,019
19	2,016
20	1,999

Tab. 2 - naměřené hodnoty – schod 2 mm - zvětšení 150X

V tabulce 2 jsou zobrazeny naměřené hodnoty pro schod o výšce 2 mm při zvětšení 150.

Prvním krokem při zpracování naměřených dat je odstranění hrubých chyb měření. Bude vytvořen histogram z naměřených hodnot a hodnoty, které se nacházejí mimo rozsah $\pm 3\sigma$, budou považovány za hrubou chybu měření a nebudou použity pro hodnocení způsobilosti.



Graf 1: Histogram sestavený z hodnot výšky schodu naměřených při zvětšení 150

Z grafu 1 není na první pohled patrné, zda se jedná o normální rozdělení. Pro ověření normálního rozdělení dat je možné využít výpočtů průměrné hodnoty, modusu a mediánu naměřených dat. Pokud jsou tyto tři hodnoty stejné, nebo velmi podobné, jedná se o normální rozdělení dat.

Průměrná hodnota:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$\bar{x} = \frac{1}{20} * 40,161$$

$$\bar{x} = 2,00805 \text{ mm}$$

Modus (nejčastější výskyt):

$$\text{Modus} = 2,01 \text{ mm}$$

Medián:

$$\tilde{x} = \frac{x_{(\frac{n}{2})} + x_{(\frac{n}{2}+1)}}{2}$$

$$\tilde{x} = 2,009 \text{ mm}$$

Rozdíly mezi hodnotami nejsou velké, je proto možné říci, že se jedná o Gausovo normální rozdělení.

Poté co byla ověřena normalita dat je možné udělat kontrolu hrubé chyby dat. Nejprve je potřeba vypočítat výběrovou směrodatnou odchylku.

Výběrová směrodatná odchylka:

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

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{(20-1)} 0,00079495}$$

$$\sigma = 0,006468 \text{ mm}$$

Pro odstranění hrubé chyby je potřeba znát rozmezí $\pm 3\sigma$ od střední hodnoty. Po dosazení je minimální hodnota rozmezí 1,988645 mm a maximální hodnota 2,027455 mm. Porovnáním s naměřenými hodnotami bylo zjištěno, že všechny hodnoty jsou v intervalu $\pm 3\sigma$. Naměřené hodnoty tedy neobsahují hrubou chybu.

V předchozích krocích byla ověřena normalita dat a byly odstraněny hrubé chyby měření. Dalším krokem je výpočet nejistoty měření.

Nejistota měření se skládá ze dvou složek, nejistoty typu A a nejistoty typu B.

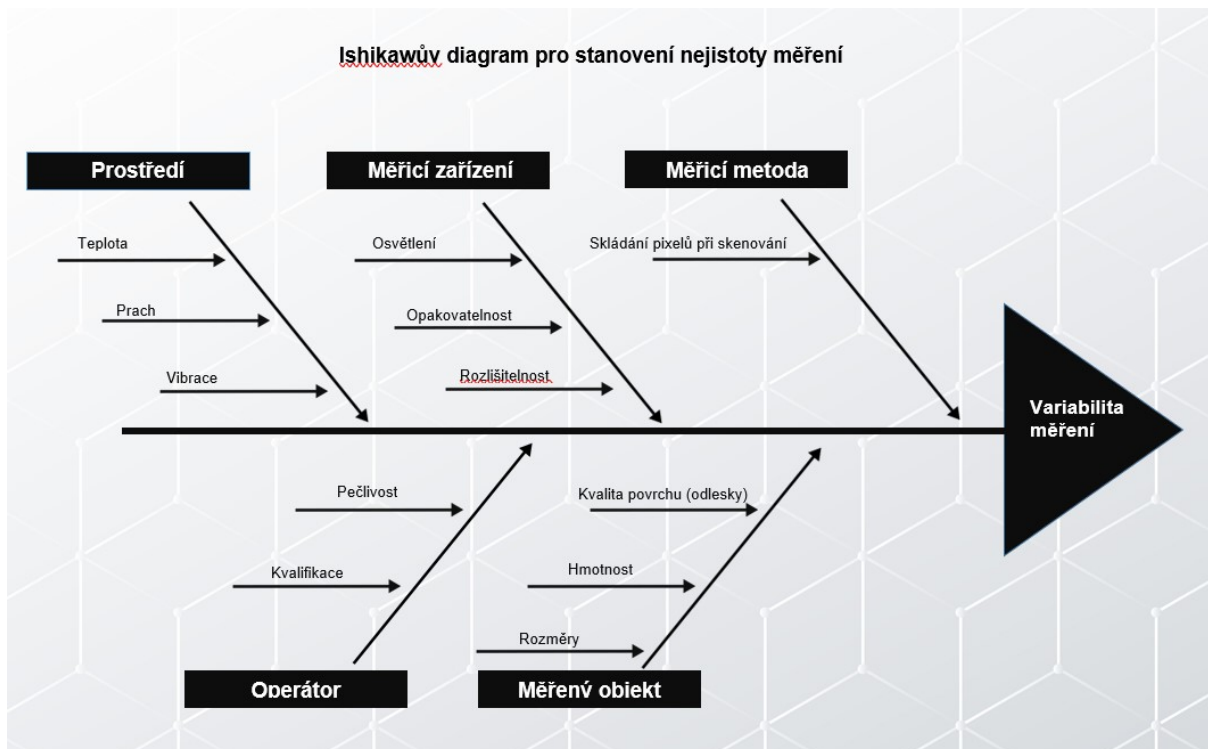
Nejistota typu A se pro počet měření větší než 10 vypočítá jako směrodatná odchylka (viz. Výpočet výše)

Nejistota typu B nezávisí na počtu měření a určuje se různými postupy. Hlavními složkami nejistoty typu B jsou nejistota etalonu a nejistota měřidla. Pro určení nejistot, které do procesu měření vstupují byl vytvořen Ishikawův diagram, který zachycuje všechny zdroje nejistot.

Dle Ishikawova diagramu bylo určeno celkem 5 zdrojů nejistot:

- prostředí
- měřicí zařízení
- měřicí metoda
- operátor
- měřený objekt.

Tyto zdroje nejistot byly určeny na základě zkušeností, pozorování procesu měření, pozorování prostředí, ve kterém se měřicí zařízení nachází.



Obr. 25: Ishikawův diagram pro určení nejistoty typu B

Měření nejvíce ovlivňuje nejistota měřicího zařízení a nejistota etalonu. Nejistota měřicího zařízení není známá, cílem práce je zjistit v jakých tolerancích je mikroskop schopen měřit. Hodnota etalonu je zanedbatelná, měřky používané pro hodnocení způsobilosti jsou vyráběny s vysokou přesností. Nejistota typu B bude tedy při výpočtu celkové nejistoty zanedbána.

Kombinovaná nejistota měření u_c :

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$$

po zanedbání nejistoty typu B u_B :

$$u_c = u_A$$

Výpočet nejistoty typu A je pro počet měření větší než 10 roven směrodatné odchylce, kombinovaná nejistota měření je tedy:

$$u_c = \sigma = 0,006468$$

Vzhledem k tomu, že je u měřicích zařízení požadována vysoká spolehlivost, je potřeba zjistit rozšířenou standardní nejistotu. Tato nejistota je rovna celkové nejistotě rozšířené o koeficient rozšíření k_u . Koeficient rozšíření má rozsah 2-3. Pro výpočet bude použit koeficient $k_u = 3$, to odpovídá pravděpodobnosti pro normální Gausovo rozdělení 99,7%.

Výpočet rozšíření standardní nejistoty:

$$\begin{aligned}U &= k_u u_c \\U &= 3 * 0,006468 \\U &= 0,019404 \text{ mm}\end{aligned}$$

Po zaokrouhlení je nejistota měření:

$$U = 0,02 \text{ mm}$$

Po ověření normality dat, odstranění hrubé chyby a výpočtu nejistoty měření je možné přistoupit k výpočtu způsobilosti měření.

Způsobilost bude vyšetřována pomocí metody SPC Ford, tato metoda využívá výpočtů indexů způsobilosti C_p a C_{pk} . Způsobilost je možné vyhodnotit online. Výsledkem hodnocení je formulář, který obsahuje informace o měřidle, jméno uživatele měřidla, skutečnou hodnotu etalonu, horní a dolní toleranční mez, veškeré naměřené hodnoty, výsledné hodnoty indexů způsobilosti a informaci, zda je měřidlo způsobilé.

Pro hodnocení způsobilosti měřidla se do protokolu zadávají skutečná hodnota etalonu a horní a dolní toleranční meze. Pomocí upravování tolerančních mezí je možné zjistit přesnost měřidla, postupným zmenšováním tolerančního pole je zjištěna maximální přesnost, které měřidlo dosahuje. Protokol o hodnocení způsobilosti prvku schodu o výšce 2 mm měřeného při zvětšení 150 je na Obr. 26.

Při hodnocení způsobilosti měřidla se postupuje stejným způsobem jako při hodnocení způsobilosti kontrolního přípravku.

Při hodnocení způsobilosti kontrolního přípravku je skutečnou hodnotou etalonu, hodnota naměřená z měřicího přístroje Carl Zeiss Prismo 7 Navigator, horní a dolní toleranční meze se poté upravují tak, aby měřidlo bylo způsobilé. Díky tomuto upravování tolerančních mezí je možné zjistit maximální přesnost měření, které mikroskop Keyence VHX-600 při měření daného prvku dosahuje.

Při vyhodnocování způsobilosti měřicího zařízení je zadána skutečná hodnota etalonu a obě toleranční meze. Úpravou tolerančních mezí je možné zjistit maximální přesnosti měření.

Při měření koncové měrky o rozměru 2 mm při zvětšení 150 byla zjištěna přesnost měření mikroskopu $\pm 0,2$ mm. Z protokolu pro hodnocení způsobilosti schodu o výšce 2 mm při zvětšení 150 je možné zjistit přesnost měření mikroskopu $\pm 0,2$ mm. Vzhledem k tomu, že hodnoty přesnosti měření etalonu a kontrolního přípravku jsou totožné, je možné říci, že je tento prvek kontrolního přípravku měřený při zvětšení 150 **způsobilý**.

Protokol o vyšetření způsobilosti měřidla

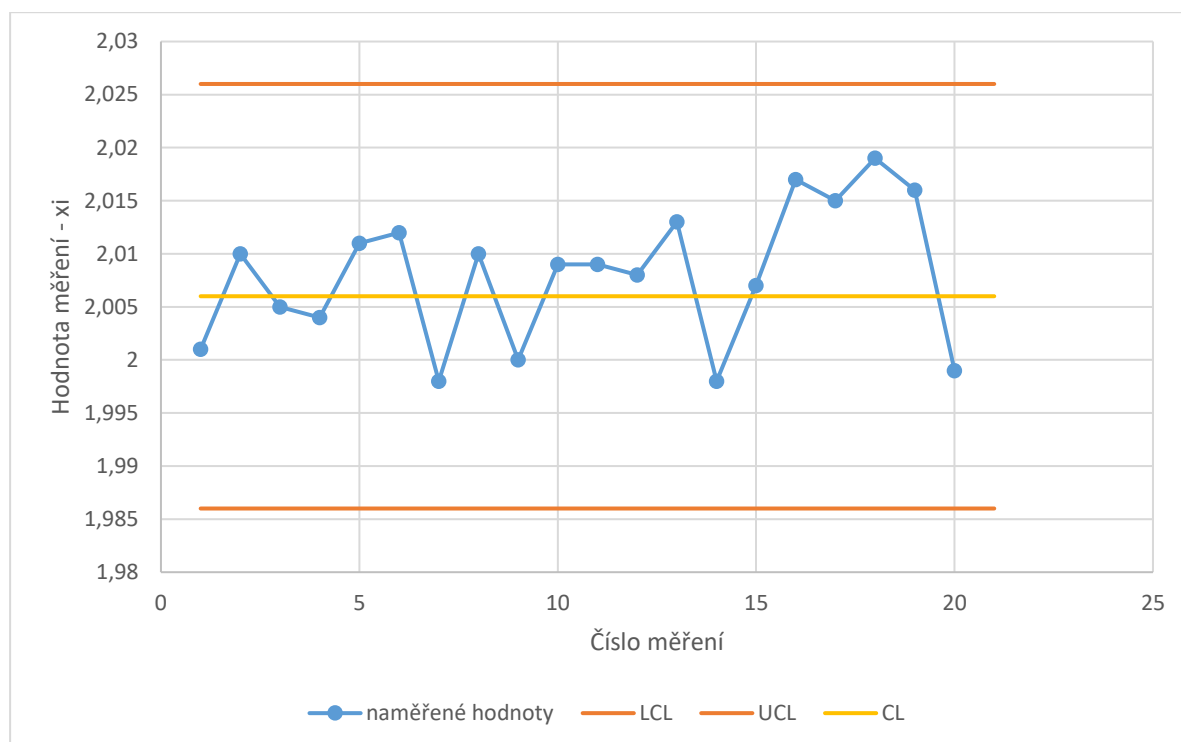
Metoda A - opakovatelnost (měření provádí pouze jeden pracovník)

Uživatel měřidla:	Anna Vágnerová
Název měřidla:	Keyence VHX - 6000
Evidenční číslo měřidla:	
Horní toleranční mez:	2.206
Dolní toleranční mez:	1.806
Skutečná hodnota etalonu:	2.006
Konstanta $K[\%]$:	15
Počet opakování:	20
Počet pracovníků:	1
Č.	Pracovník 1
1	2.001
2	2.01
3	2.005
4	2.004
5	2.011
6	2.012
7	1.998
8	2.01
9	2
10	2.009
11	2.009
12	2.008
13	2.013
14	1.998
15	2.007
16	2.017
17	2.015
18	2.019
19	2.016
20	1.999
Střední naměřená hodnota:	2.00805
Vypočtená směrodatná odchylka:	0.00647
Index způsobilosti C_g :	1.54560
Index způsobilosti C_{gk} :	1.43998
Závěrečné hodnocení:	Měřidlo je způsobilé!
Komentář:	Schod o výšce 2 mm - zvětšení 150
Vypracoval:	Anna Vágnerová
Dne:	26.03.2022

Zpracováno prostřednictvím online software na stránce www.trestik.cz/msa-spc-ford

Obr. 26: Protokol hodnocení způsobilosti

Posledním krokem při hodnocení způsobilosti je vytvoření regulačního diagramu. Pro vytvoření regulačního diagramu je potřeba znát hodnotu centrální přímkky (CL), horní akční meze (UCL) a spodní akční meze (LCL). Hodnota centrální přímkky je rovna skutečné hodnotě etalonu, v případě kontrolního přípravku se jedná o naměřenou hodnotu z měřicího přístroje Carl Zeiss Prismo 7 Navigator. Hodnoty akčních mezí poté vycházejí z protokolu o vyšetření způsobilosti a jedná se konkrétně o horní toleranční mez a dolní toleranční mez, tyto hodnoty byly při hodnocení způsobilosti přípravku upravovány tak, aby byla zjištěna maximální přesnost měřicího zařízení.



Graf 2: Regulační diagram pro schod o výšce 2 mm měřený při zvětšení 150

Z regulačního diagramu je patrné, že se všechny body nacházejí v tolerančních mezích. V diagramu se nevyskytují žádné trendy, nenachází se zde několik bodů za sebou nad ani pod centrální přímkou. Rozložení bodů se jeví jako náhodné. Je možné říci, že proces měření je statisticky zvládnutý.

Na příkladu bylo detailně popsáno, jakým způsobem bude probíhat hodnocení způsobilosti měřicího procesu.

V následujících kapitolách bude vyhodnocena způsobilost měřicího zařízení pomocí kalibrovaných měrek a dále bude vyhodnocena způsobilost kontrolního přípravku pro všechna zvětšení mikroskopu. Budou vytvořeny tabulky s vypočítanými přesnostmi měření mikroskopu a nejistotami měření.

Při měření rozměrů byly použity 3 metody:

- 3D depth,
- 3D stitching,
- 2D stitching

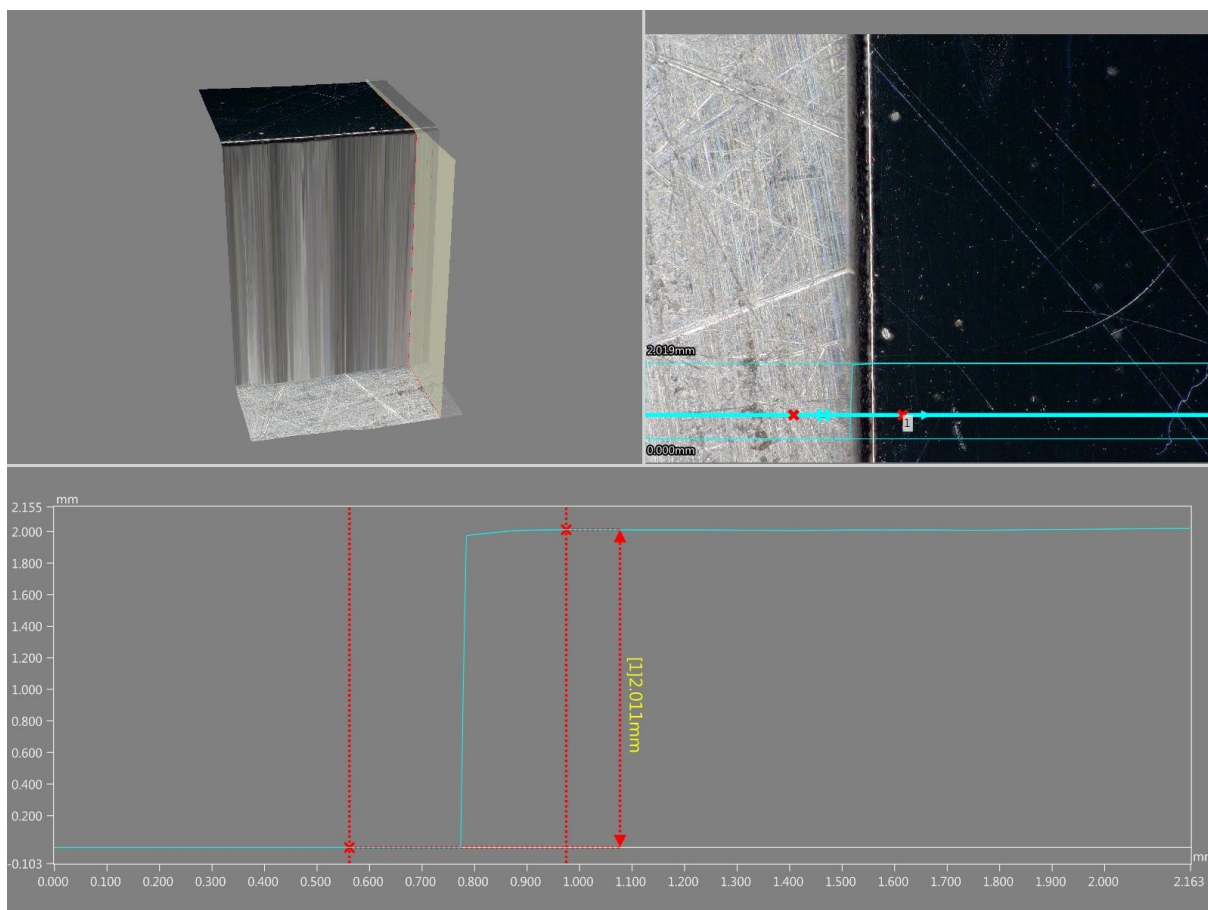
Tyto metody budou v dalších kapitolách popsány. Výše jmenované metody jsou nejčastěji používané při měření větších rozměrů na mikroskopu. Z tohoto důvodu byly použity také při měření kontrolního přípravku.

4.2 Způsobilost měřidla pro měření rozměrů v ose Z

Pro hodnocení způsobilosti měřidla pro měření v ose z byla vybrána koncová měrka o šířce 2 mm. Tato velikost byla vybrána proto, že odpovídá výšce tolerovaných schodů na kontrolním přípravku.

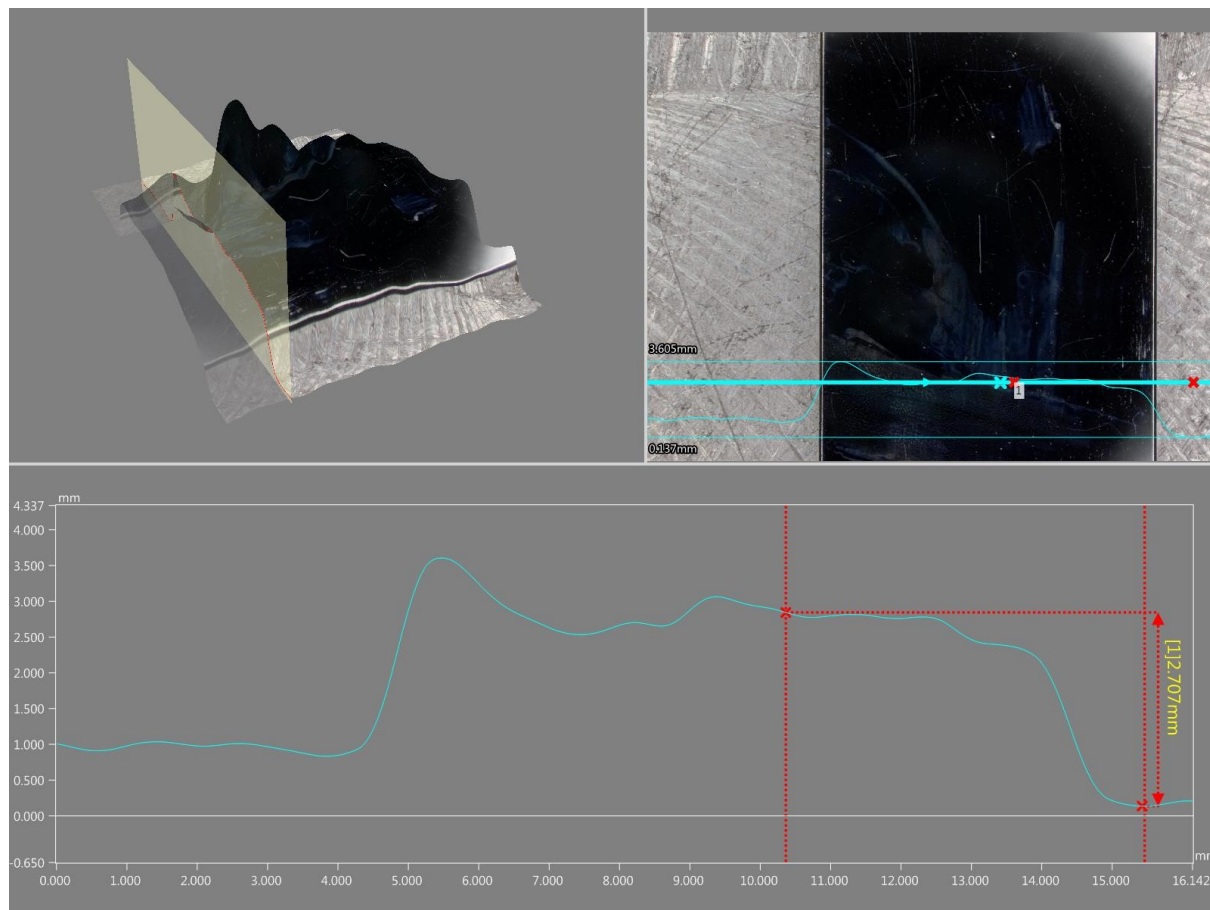
Pro měření byla zvolena nejčastěji používaná metoda Quick composition and 3D, dále jen 3D depth, U této metody je velmi jednoduché určit rozmezí, ve kterém má být povrch v ose z skenován.

Pro měření rozměrů v ose z byla použita funkce mikroskopu 3D depth. Tato funkce umožňuje skenování objektu pouze v ose z. Výsledkem skenování je 3D obraz plochy. Tento obraz plochy je možné proložit libovolnou rovinou. V této rovině je poté vykreslena křivka (na Obr. 27 vyznačena modře) kopírující tvar naskenované plochy. Na této křivce je možné provádět libovolná měření. V případě měření rozměrů v ose z se jedná o měření vzdálenosti mezi nejnižším a nejvyšším bodem na křivce. Tyto body jsou vyznačeny automaticky pomocí softwaru na ploše, která je ručně vybrána.



Obr. 27: Měření výšky měrky o rozměru 2 mm při zvětšení 150

Při nižších zvětšeních nedosahuje mikroskop vysokých přesností z důvodu špatné kvality naskenované plochy



Obr. 28: Měření výšky měrky o rozměru 2 mm při zvětšení 20

Z naměřených hodnot byla vypočítána způsobilost a byla vytvořena souhrnná tabulka s uvedenými nejistotami měření a přesnostmi měřicího zařízení.

Měřený prvek: Koncová měrka o velikosti 2 mm

Skutečná hodnota: 2 mm

Měřicí metoda: 3D Depth

	Zvětšení	Průměrná naměřená hodnota [mm]	Nejistota měření [mm]	Přesnost měření [mm]
Obj. 1	20	2,366	0,3	± 1
	30	2,063	0,2	± 1
	50	2,006	0,01	± 0,5
	100	2,002	0,01	± 0,3
	150	2,004	0,01	± 0,2
	200	2,001	0,01	± 0,1
Obj. 2	100	2,001	0,01	± 0,2
	200	2,007	0,03	± 0,1

Tab. 3: Vypočítané přesnosti měření a nejistoty měření pro měrku o velikosti 2 mm

Z tabulky 3 je patrné že při zvětšujícím se zvětšení mikroskop dosahuje vyšších přesností. Pro zvětšení 20 a 30 je přesnost pouze ± 1 mm. Takto nízká přesnost je způsobena kvalitou skenování. Během skenování při nižším zvětšení dochází k ovlivnění skenu například

odlesky od plochy objektu. Dalším problémem při nižších zvětšeních je malý rozdíl mezi spodním a horním bodem skenované plochy, který neumožňuje přesné zaostření.

Se zvyšujícím se zvětšením dochází ke zvýšení přesnosti měření. Maximální přesnosti $\pm 0,1$ mm je dosahováno při zvětšení 200.

Při porovnání obou objektivů bylo při zvětšení 100 dosaženo přesnosti $\pm 0,3$ mm pro objektiv 1 a přesnosti $\pm 0,2$ mm pro objektiv 2. Při zvětšení 200 bylo dosaženo u obou objektivů stejné přesnosti $\pm 0,1$ mm.

Při porovnání obrázku 27 s obrázkem 28 je možné při zvětšení 150 pozorovat výrazně přesnější skenování povrchu. Při zvětšení 50 a vyšším nedochází při skenování povrchu k tak častému zachycování odlesků a naskenovaný povrch odpovídá více skutečnému povrchu skenovaného objektu.

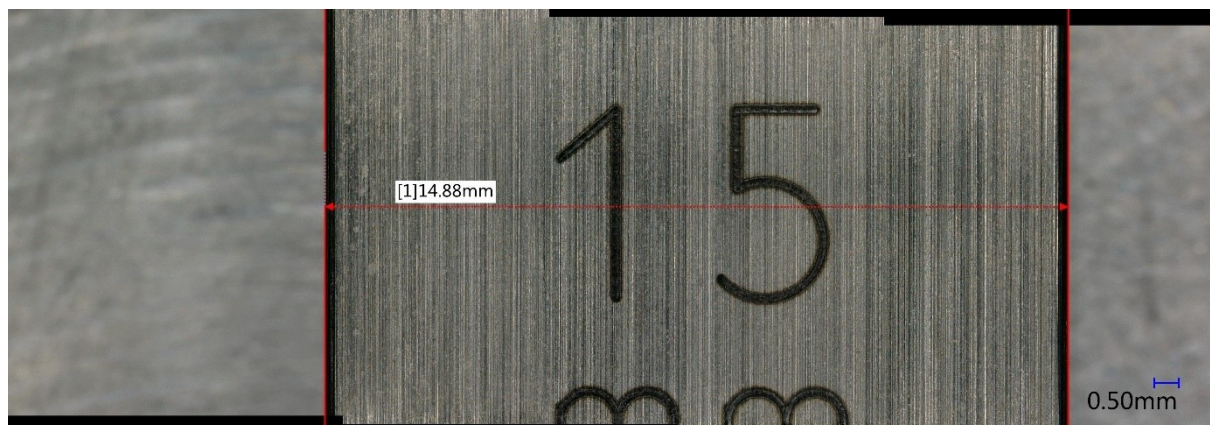
Měřením etalonu byla zjištěna přesnost měření v ose z a je možné měřit rozměry v ose z na kontrolním přípravku.

4.3 Způsobilost měřidla pro měření rozměrů v osách x a y

Pro hodnocení způsobilosti měřidla pro měření v osách x a y byla vybrána koncová měřka o šířce 15 mm. Tento rozměr koncové měřky odpovídá rozměrům kostky kontrolního přípravku v osách x a y.

Pro měření rozměrů v osách x a y, neboli v rovině z, je možné použít metody 2D stitching a 3D stitching. Obě metody fungují na principu skládání jednotlivých obrazů, nebo také pixelů, do výsledného naskenovaného obrazu. Nejprve je definována plocha, která má být naskenována. Definování plochy je možné pomocí několika způsobů. Pokud je požadováno skenování plochy pouze v ose x nebo v ose y, je zadán počáteční bod a vzdálenost od bodu, která má být skenována. Další možností je výběr počátečního a koncového bodu skenování, například opačných rohů čtverce. Poslední možností je poté skenování po spirále, které začíná ve středovém bodě. Po definování plochy probíhá skenování automaticky a mikroskop vytváří celkový obraz povrchu pomocí jednotlivých obrazů, které zaznamenává v každé pozici, ve které se nachází.

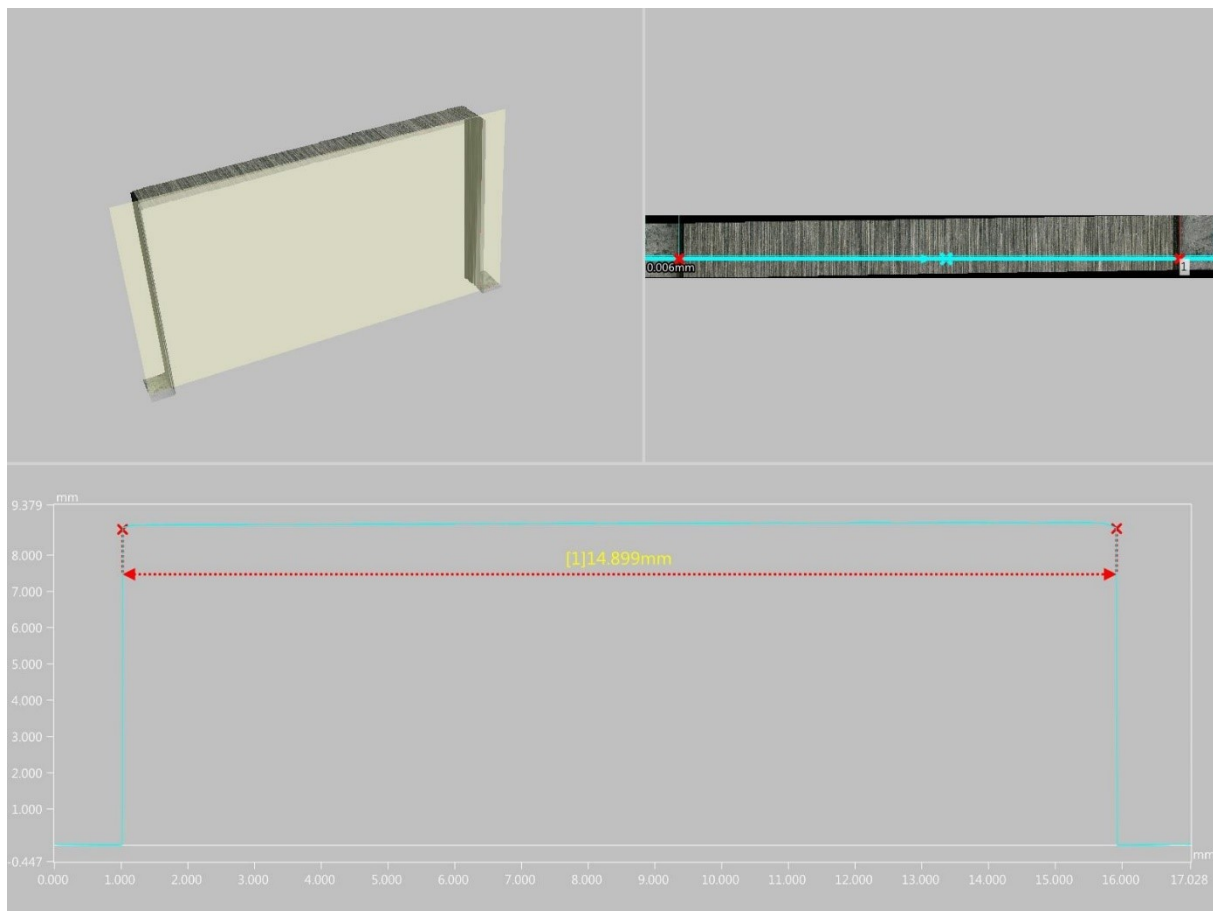
Výsledným obrazem 2D stitching je povrch, zachycený ve 2D, na kterém je možné provádět měření.



Obr. 29: Měření velikosti měřky o rozměru 15 mm při zvětšení 20 – metoda 2D stitching

Při měření je možné použít automatickou detekci okrajů, nebo hranu měřky vybrat ručně. V některých případech jsou při automatické detekci vybrány okraje chybně.

Výsledkem 3D stitching je naskenovaný povrch, který je možné proložit libovolnou rovinou. To umožní vykreslení přímky kopírující naskenovaný povrch, na které je možné provádět libovolná měření



Obr. 30: Měření velikosti měrky o rozměru 15 mm při zvětšení 150 – metoda 3D stitching

Pro měření kontrolní měrky byly použity obě metody, 2D i 3D stitching.

Při měření byla měrka libovolně natáčena a není proto provedeno měření zvlášť pro osu x a osu y.

Z naměřených hodnot byla vypočítána způsobilost a byly vytvořeny souhrnné tabulky pro měření metodou 2D stitching a 3D stitching s uvedenými nejistotami měření a přesnostmi měřicího zařízení.

Měřený prvek: Koncová měrka o velikosti 15 mm

Skutečná hodnota: 15 mm

Měřicí metoda: 2D stitching

	Zvětšení	Průměrná naměřená hodnota [mm]	Nejistota měření [mm]	Přesnost měření [mm]
Obj. 1	20	14,68	0,2	± 1,5
	30	14,92	0,06	± 1,5
	50	14,97	0,02	± 0,6
	100	14,91	0,06	± 0,6
	150	14,90	0,02	± 0,6
	200	14,92	0,01	± 0,8
Obj. 2	100	14,93	0,02	± 0,7
	200	14,92	0,02	± 0,7

Tab. 4: Vypočítané přesnosti měření a nejistoty měření pro koncovou měrku o velikosti 15 mm (2D stitching)

Hodnoty přesnosti měření pro 2D stitching vykazují nižší přesnost pro vyšší zvětšení. Toto platí pro zvětšení 50 a větší. Důvodem pro nižší přesnost je především počet pixelů, nebo také obrazů, které jsou potřeba ke složení výsledného skenu. Při skládání jednotlivých obrazů může docházet k chybám, které ovlivňují výsledné hodnoty měření.

Při porovnání měření pomocí objektivu 1 a objektivu 2 je dosahováno podobné přesnosti. Pro zvětšení 100 je rozdíl v přesnosti měření ± 0,1 mm, stejně jako pro zvětšení 200.

Měřený prvek: Koncová měrka o velikosti 15 mm

Skutečná hodnota: 15 mm

Měřicí metoda: 3D stitching

	Zvětšení	Průměrná naměřená hodnota [mm]	Nejistota měření [mm]	Přesnost měření [mm]
Obj. 1	20	15,028	0,2	± 1
	30	14,915	0,4	± 1
	50	15,001	0,02	± 0,5
	100	15,000	0,01	± 0,2
	150	14,997	0,01	± 0,2
	200	15,005	0,01	± 0,2
Obj. 2	100	14,999	0,01	± 0,2
	200	15,000	0,01	± 0,2

Tab. 5: Vypočítané přesnosti měření a nejistoty měření pro koncovou měrku o velikosti 15 mm (3D stitching)

Hodnoty přesnosti měření pro 3D stitching se s větším zvětšením zvyšují. Pokud je vyžadována vyšší přesnost měření, je potřeba měřit při větších zvětšeních. U metody 3D stitching je, stejně jako u funkce pro měření v ose z, problém se špatnou kvalitou skenu pro zvětšení 20 a 30. Při vyšších zvětšeních můžeme pozorovat lépe naskenovaný povrch bez detekce odlesků a tím i přesnější hodnoty měření.

Hodnoty přesnosti měření pro zvětšení 100 a 200 obou objektivů jsou totožné.

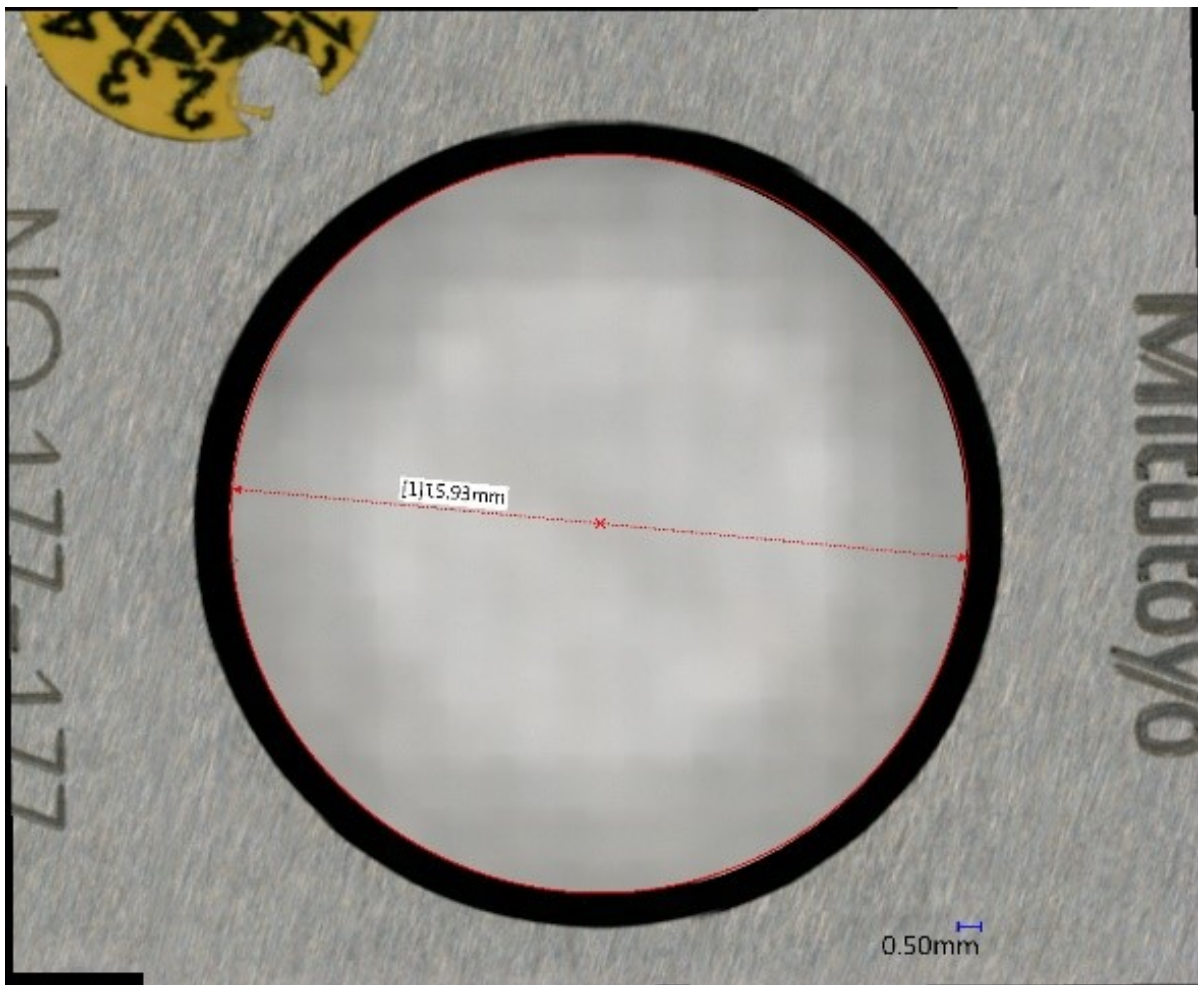
Při porovnání metod 2D a 3D stitching můžeme pozorovat vyšší přesnost při použití 3D metody.

Měřením etalonu, kterým je koncová měrka o rozměru 15 mm, byla zjištěna přesnost měření v rovině z a je možné měřit rozměry v rovině z na kontrolním přípravku.

4.4 Způsobilost měřidla pro měření průměrů děr

Pro hodnocení způsobilosti měřidla pro měření průměrů děr byl vybrán kontrolní kroužek o průměru 16 mm. Hodnota průměru kontrolního kroužku je pouze o 1 mm větší než hodnota průměru menší díry (15 mm). Díra o průměru 20 mm nebude měřena, jelikož její rozměr není možné změřit pro zvětšení větší než 50.

Pro měření průměru díry je možné využít funkce 2D stitching. Tato funkce byla popsána v kapitole 4.3.



Obr. 31: Měření kontrolního kroužku o průměru 16 mm při zvětšení 150

Funkce 2D stitching umožňuje rychlé a snadné měření rozměrů, které je možné provádět na výsledném skenu plochy.

Měřený prvek: Kontrolní kroužek - \varnothing 16 mm

Skutečná hodnota: 16,003 mm

Měřicí metoda: 2D stitching

	Zvětšení	Průměrná naměřená hodnota [mm]	Nejistota měření [mm]	Přesnost měření [mm]
Obj. 1	20	15,78	0,42	$\pm 1,5$
	30	15,86	0,04	$\pm 1,2$
	50	15,925	0,03	$\pm 0,5$
	100	15,841	0,05	$\pm 0,6$
	150	15,97	0	$\pm 0,5$
	200	16,016	0,01	$\pm 0,5$
Obj. 2	100	16,009	0,02	$\pm 0,5$
	200	16,020	0,01	$\pm 0,5$

Tab. 6: Vypočítané přesnosti měření a nejistoty měření pro kontrolní kroužek o průměru 16 mm

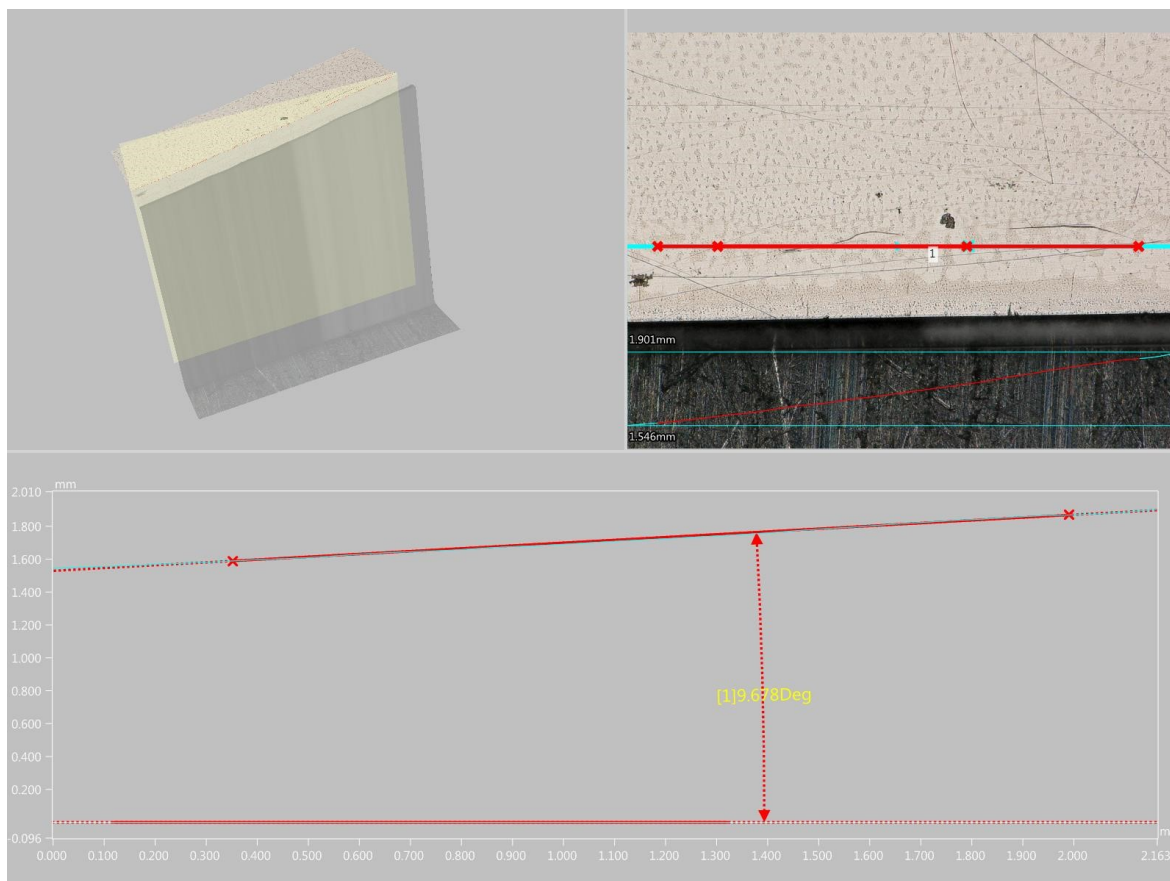
Z výpočtů přesnosti měření je vidět relativně stabilní přesnost pro zvětšení 50 a vyšší.

Hodnoty přesnosti měření obou objektivů jsou totožné pro zvětšení 200, pro zvětšení 100 je rozdíl přesností měření $\pm 0,1$ mm.

Měřením kontrolního kroužku byla zjištěna přesnost měření průměrů děr a je možné měřit průměry na kontrolním přípravku.

4.5 Způsobilost měřidla pro měření úhlů

Pro měření úhlů byla použita metoda 3D depth, popsaná v kapitole 4.2.



Obr. 32: Měření úhlové měrky o rozměru 10° při zvětšení 150

Použití metody 3D depth umožňuje měřit velikost úhlu pomocí přímky, která je rovnoběžná se základnou a přímkou která je totožná s přímkou kopírující povrch šikmé plochy.

Měřený prvek: Úhlová měrka – 10°

Skutečná hodnota: 10°

Měřicí metoda: 3D Depth

	Zvětšení	Průměrná naměřená hodnota [°]	Nejistota měření [°]	Přesnost měření [°]
Obj. 1	20	9,851	0,5	± 3°
	30	9,798	0,4	± 3°
	50	10,000	0,2	± 2°
	100	9,875	0,2	± 2°
	150	9,872	0,2	± 1°
	200	9,892	0,1	± 1,5°
Obj. 2	100	9,926	0,2	± 1°
	200	9,969	0,1	± 1°

Tab. 7: Vypočítané přesnosti měření a nejistoty měření pro úhlovou měrku o velikosti 10°

Hodnoty přesnosti měření vykazují relativně malou přesnost. Důvodem může být metoda měření, která vyžaduje ruční výběr bodů, kterými jsou poté proloženy přímky a je změřen úhel mezi nimi. Přímky proložené mezi dvěma ručně vybranými body často neodpovídají trendu přímky, a tím vzniká největší počet chyb.

Vzhledem k nízkým přesnostem měření je rozdíl mezi zvětšením 100 obou objektivů ± 0,5°, pro zvětšení 200 je rozdíl ± 1°.

V kapitolách 4.2 až 4.5 bylo provedeno hodnocení způsobilosti měřicího zařízení pomocí kalibrovaných etalonů. Pomocí vyhodnocení způsobilosti měření byly zjištěny přesnosti měření, kterých mikroskop u jednotlivých typů měření dosahuje. Nyní bude zhodnocena způsobilost kontrolního přípravku a porovnáním hodnot přesnosti měření etalonů a přesnosti měření prvků kontrolního přípravku bude stanoveno, zda je přípravek způsobilý či nikoliv.

4.6 Způsobilost schodů na kontrolním přípravku

Schody na kontrolním přípravku byly měřeny pomocí funkce 3D depth. Měření výšky schodů bylo u nejnižšího schodu provedeno od základny, výška středního a nejvyššího schodu byla měřena od horní roviny nižšího schodu. Měření byla takto provedena proto, aby výška měřeného schodu odpovídala velikosti koncové měřky 2 mm.

Měřený prvek: Schod o výšce 2 mm

Skutečná hodnota: 2,006 mm

Měřicí metoda: 3D Depth

	Zvětšení	Průměrná naměřená hodnota [mm]	Nejistota měření [mm]	Přesnost měření [mm]
Obj. 1	20	2,403	0,2	± 1
	30	2,113	0,2	± 1
	50	2,006	0,01	± 0,5
	100	2,006	0,01	± 0,3
	150	2,008	0,01	± 0,2
	200	2,006	0,01	± 0,2
Obj. 2	100	2,004	0,01	± 0,2
	200	2,004	0,01	± 0,2

Tab. 8: Vypočítané přesnosti měření a nejistoty měření pro schod o výšce 2 mm

Měřený prvek: Schod o výšce 4 mm

Skutečná hodnota: 1,9995 mm

Měřicí metoda: 3D Depth

	Zvětšení	Průměrná naměřená hodnota [mm]	Nejistota měření [mm]	Přesnost měření [mm]
Obj. 1	20	2,688	0,3	± 1,5
	30	2,197	0,1	± 1
	50	2,002	0,1	± 0,5
	100	2,000	0,1	± 0,2
	150	1,999	0,01	± 0,2
	200	2,001	0,01	± 0,2
Obj. 2	100	2,000	0,02	± 0,3
	200	2,001	0,01	± 0,2

Tab. 9: Vypočítané přesnosti měření a nejistoty měření pro schod o výšce 4 mm

Měřený prvek: Schod o výšce 6 mm

Skutečná hodnota: 2,00175 mm

Měřicí metoda: 3D Depth

	Zvětšení	Průměrná naměřená hodnota [mm]	Nejistota měření [mm]	Přesnost měření [mm]
Obj. 1	20	2,706	0,2	± 1,5
	30	2,058	0,03	± 1
	50	2,005	0,01	± 0,4
	100	2,002	0,01	± 0,2
	150	2,001	0,01	± 0,1
	200	2,001	0,02	± 0,1
Obj. 2	100	2,006	0,01	± 0,2
	200	2,000	0,01	± 0,1

Tab. 10: Vypočítané přesnosti měření a nejistoty měření pro schod o výšce 6 mm

Z vypočtených hodnot přesností měření je možné pozorovat, že přesnosti jsou stejné nebo nižší než při měření etalonu. Je tedy možné říci, že prvek schodů na kontrolním přípravku je způsobilý.

4.7 Způsobilost kostky na kontrolním přípravku

Při hodnocení způsobilosti kostky o rozměrech 15x15 mm bylo provedeno měření zvlášť pro rozměry v ose x a v ose y. Nejprve budou uvedeny tabulky pro 2D, poté pro 3D stitching pro měření rozměrů v ose x, poté v ose y.

Měřený prvek: Kostka 15x15 mm – Rozměr v ose X

Skutečná hodnota: 14,952 mm

Měřicí metoda: 2D stitching

	Zvětšení	Průměrná naměřená hodnota [mm]	Nejistota měření [mm]	Přesnost měření [mm]
Obj. 1	20	14,941	0,2	± 1,5
	30	14,863	0,02	± 1,5
	50	14,935	0,01	± 0,5
	100	14,908	0,02	± 0,6
	150	14,917	0,01	± 0,6
	200	14,905	0,01	± 0,7
Obj. 2	100	14,909	0,01	± 0,6
	200	14,912	0,01	± 0,6

Tab. 11: Vypočítané přesnosti měření a nejistoty měření pro kostku 15x15 mm – Rozměr v ose x (2D stitching)

Měřený prvek: Kostka 15x15 mm – Rozměr v ose X

Skutečná hodnota: 14,952 mm

Měřicí metoda: 3D stitching

	Zvětšení	Průměrná naměřená hodnota [mm]	Nejistota měření [mm]	Přesnost měření [mm]
Obj. 1	20	15,684	0,3	± 1
	30	14,892	0,1	± 1
	50	14,955	0,02	± 0,5
	100	14,959	0,02	± 0,3
	150	14,957	0,01	± 0,3
	200	14,995	0,01	± 0,2
Obj. 2	100	14,985	0,02	± 0,3
	200	14,976	0,01	± 0,3

Tab. 12: Vypočítané přesnosti měření a nejistoty měření pro kostku 15x15 mm – Rozměr v ose x (3D stitching)

Při měření kostky 15x15 mm v ose x můžeme sledovat stejný trend jako při měření měřky, a to nižší přesnost při vyšších zvětšeních při měření pomocí metody 2D stitching, a vyšší přesnost při vyšších zvětšeních při měření metodou 3D stitching. Výpočty přesnosti při použití obou metod vykazují stejné nebo podobné přesnosti jako při měření etalonu, je tedy možné říci, že je kostka v ose x způsobilá.

Měřený prvek: Kostka 15x15 mm – Rozměr v ose Y

Skutečná hodnota: 14,97 mm

Měřicí metoda: 2D stitching

	Zvětšení	Průměrná naměřená hodnota [mm]	Nejistota měření [mm]	Přesnost měření [mm]
Obj. 1	20	14,945	0,2	± 1,5
	30	14,874	0,02	± 1,5
	50	14,945	0,02	± 0,7
	100	14,922	0,01	± 0,7
	150	14,924	0,01	± 0,7
	200	14,913	0,01	± 0,8
Obj. 2	100	14,925	0,01	± 0,7
	200	14,920	0,01	± 0,8

Tab. 13: Vypočítané přesnosti měření a nejistoty měření pro kostku 15x15 mm – Rozměr v ose y (2D stitching)

Měřený prvek: Kostka 15x15 mm – Rozměr v ose Y

Skutečná hodnota: 14,97 mm

Měřicí metoda: 3D stitching

	Zvětšení	Průměrná naměřená hodnota [mm]	Nejistota měření [mm]	Přesnost měření [mm]
Obj. 1	20	14,777	0,3	± 1
	30	14,886	0,03	± 1
	50	14,947	0,01	± 0,5
	100	14,979	0,01	± 0,3
	150	14,973	0,01	± 0,4
	200	14,976	0,01	± 0,3
Obj. 2	100	14,977	0,01	± 0,4
	200	14,974	0,01	± 0,4

Tab. 14: Vypočítané přesnosti měření a nejistoty měření pro kostku 15x15 mm – Rozměr v ose y (3D stitching)

Výpočty přesnosti měření pro kostku 15x15 mm v ose y ukazují stejný trend jako při měření etalonu. Hodnoty přesnosti měření jsou stejné nebo nižší než při měření etalonu a kostka v ose y je způsobilá.

S ohledem na výpočty přesnosti měření kostky 15x15 mm v osách x a y je možné říci, že tento prvek kontrolního přípravku je způsobilý.

4.8 Způsobilost díry o průměru 15 mm na kontrolním přípravku

Pro měření průměru díry byla použita metoda 2D stitching.

Měřený prvek: Díra 15H6

Skutečná hodnota: 15,005 mm

Měřicí metoda: 2D stitching

	Zvětšení	Průměrná naměřená hodnota [mm]	Nejistota měření [mm]	Přesnost měření [mm]
Obj. 1	20	15,684	0,1	± 1
	30	14,892	0,1	± 1
	50	14,955	0,05	± 0,5
	100	14,959	0,08	± 0,5
	150	14,957	0,07	± 0,5
	200	14,995	0,03	± 0,4
Obj. 2	100	14,968	0,05	± 0,5
	200	14,992	0,02	± 0,4

Tab. 15: Vypočítané přesnosti měření a nejistoty měření pro díru 15H6

Po porovnání hodnot přesnosti měření díry 15H6 s hodnotami přesností měření kontrolního kroužku je možné říci že díra 15H6 na kontrolním přípravku je způsobilá.

4.9 Způsobilost úhlů 5° a 10° na kontrolním přípravku

Pro měření úhlů kontrolního přípravku byla použita metoda 3D depth.

Měřený prvek: Úhel 5°

Skutečná hodnota: 15,005 mm

Měřicí metoda: 3D depth

	Zvětšení	Průměrná naměřená hodnota [°]	Nejistota měření [°]	Přesnost měření [°]
Obj. 1	20	5,076	0,053	± 2
	30	4,902	0,049	± 2
	50	4,931	0,037	± 2
	100	5,019	0,016	± 1
	150	5,015	0,016	± 1
	200	5,012	0,006	± 1
Obj. 2	100	4,982	0,020	± 1
	200	5,028	0,024	± 1

Tab. 16: Vypočítané přesnosti měření a nejistoty měření pro úhel 5°

Měřený prvek: Úhel 5°

Skutečná hodnota: 15,005 mm

Měřicí metoda: 3D Depth

	Zvětšení	Průměrná naměřená hodnota [°]	Nejistota měření [°]	Přesnost měření [°]
Obj. 1	20	9,898	0,2	± 4°
	30	9,902	0,2	± 3°
	50	9,902	0,5	± 2°
	100	10,030	0,1	± 1°
	150	10,012	0,05	± 1°
	200	9,988	0,05	± 1°
Obj. 2	100	10,034	0,1	± 0,5°
	200	10,189	0,2	± 1°

Tab. 17: Vypočítané přesnosti měření a nejistoty měření pro úhel 10°

Porovnáním hodnot přesnosti měření bylo zjištěno, že hodnoty přesnosti měření úhlů kontrolního přípravku jsou nižší než hodnoty přesnosti měření etalonu, a proto je možné říci, že jsou oba úhly na kontrolním přípravku způsobilé.

4.10 Způsobilost drážky pro pero 8P9 na kontrolním přípravku

Při měření drážky pro pero byla použita funkce 3D stitching. Při měření drážky byla měřena pouze šířka a hloubka drážky.

Měřený prvek: Drážka 8P9 - hloubka

Skutečná hodnota: 4,08225 mm

Měřicí metoda: 3D stitching

	Zvětšení	Průměrná naměřená hodnota [°]	Nejistota měření [°]	Přesnost měření [°]
Obj. 1	20	4,569	0,2	± 1
	30	4,061	0,04	± 1
	50	4,062	0,01	± 0,5
	100	4,090	0,01	± 0,3
	150	4,076	0,01	± 0,3
	200	4,074	0,02	± 0,2
Obj. 2	100	4,078	0,02	± 0,3
	200	4,076	0,01	± 0,2

Tab. 18: Vypočítané přesnosti měření a nejistoty měření hloubku drážky 8P9

Měřený prvek: Drážka 8P9 - šířka

Skutečná hodnota: 8,479 mm

Měřicí metoda: 3D stitching

	Zvětšení	Průměrná naměřená hodnota [°]	Nejistota měření [°]	Přesnost měření [°]
Obj. 1	20	8,465	0,2	± 1
	30	8,947	0,02	± 1
	50	8,064	0,4	± 0,7
	100	7,945	0,01	± 0,8
	150	7,956	0,02	± 0,8
	200	7,982	0,01	± 0,7
Obj. 2	100	7,989	0,02	± 0,8
	200	7,985	0,01	± 0,8

Tab. 19: Vypočítané přesnosti měření a nejistoty měření pro šířku drážky 8P9

Drážka 8P9 je způsobilá, hodnoty přesnosti měření jsou stejné nebo nižší než při měření etalonu.

5 Zhodnocení výsledků

Hodnocení způsobilosti kontrolního přípravku bylo provedeno tak, že byly změřeny tolerované rozměry kontrolního přípravku. Při měření rozměrů bylo zjištěno že díra 20H6, délky obou drážek pro pero a hloubka drážky pro pero 10P9 jsou mimo rozlišovací schopnosti mikroskopu. Tyto rozměry jsou příliš velké na to, aby mohly být měřeny při zvětšeních větších než 50, tyto prvky tedy nebyly měřeny a nebyla hodnocena jejich způsobilost.

Měřením tolerovaných rozměrů bylo zjištěno, že kontrolní přípravek **je způsobilý**, a je možné ho používat při kontrole správnosti měření mikroskopu.

Způsobilost kontrolního přípravku bylo možné určit díky tomu, že byly nejprve změřeny etalony, pomocí kterých bylo zjištěno, s jakou přesností je mikroskop schopen měřit. Poté byly změřeny jednotlivé rozměry kontrolního přípravku a hodnoty přesnosti měření přípravku byly porovnány s hodnotami přesnosti měření etalonů. V případě, že rozdíly mezi hodnotami přesnosti měření etalonu a přesnosti měření kontrolního přípravku jsou malé, je možné říci, že je přípravek způsobilý.

Při použití zvětšení 20 a 30 byla hodnota akceptovatelného rozdílu mezi přesnostmi měření stanovena na $\pm 2^\circ$ při měření úhlů a ± 1 mm při měření rozměrů v osách x, y a z. Při použití vyšších zvětšení byla tato hodnota stanovena na $\pm 1^\circ$ při měření úhlů a $\pm 0,2$ mm při měření rozměrů v osách x, y a z.

Při hodnocení způsobilosti byly použity základní nástroje jakosti a způsobilost byla hodnocena pomocí indexů způsobilosti.

Při hodnocení byl dodržen následující postup:

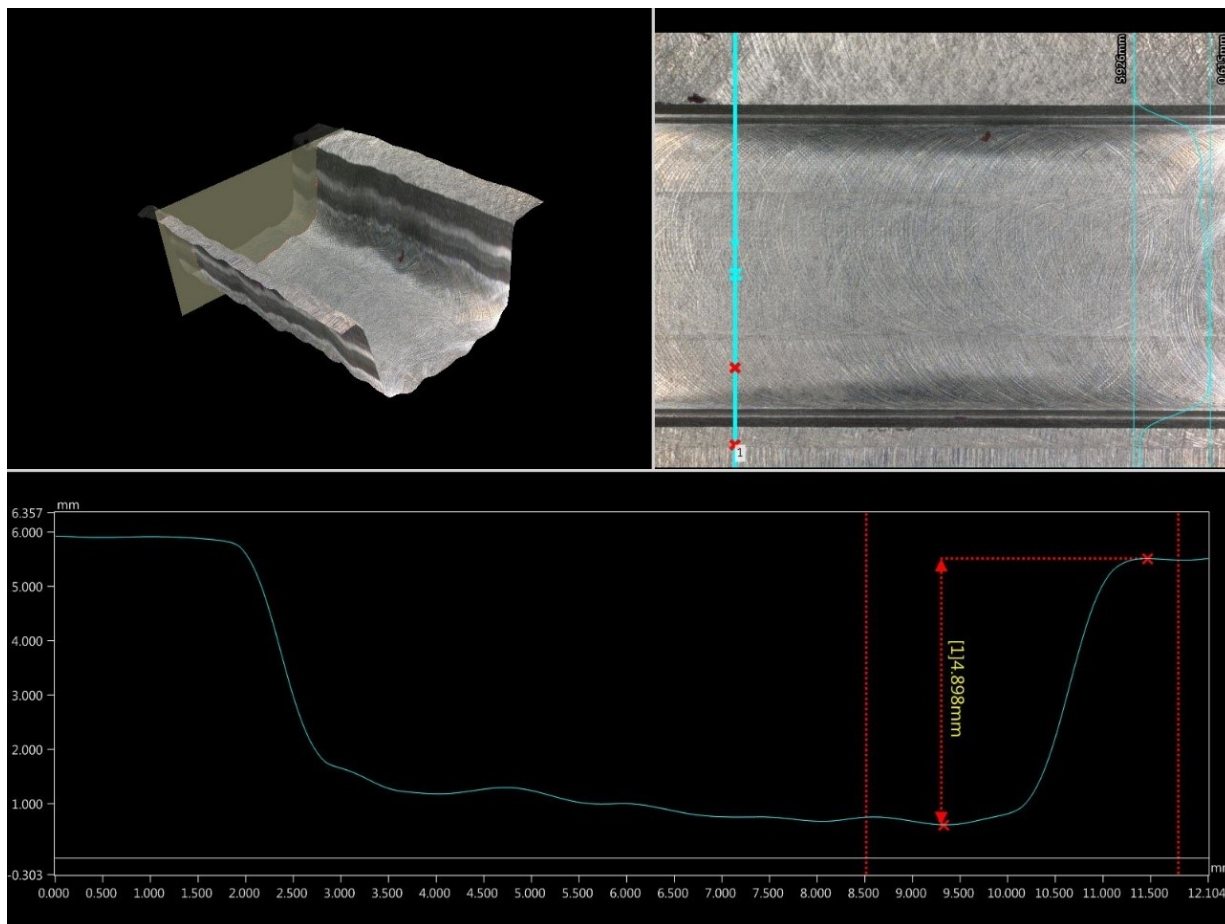
- 1) vytvoření histogramu z naměřených dat
- 2) ověření normality dat
- 3) odstranění hrubé chyby měření
- 4) výpočet nejistoty měření
- 5) hodnocení způsobilosti metodou SPC.

Způsobilost měřicího zařízení byla hodnocena pomocí 4 etalonů. Způsobilost navrženého kontrolního přípravku byla ověřena změřením 10 tolerovaných rozměrů.

5.1 Metoda 3D stitching

Metoda 3D stitching umožňuje skenování povrchu objektu ve 3D. Tato metoda umožňuje měření v ose x, y i z, dále také měření úhlů, průměrů děr a dalších.

Vypočítané hodnoty přesnosti měření pro zvětšení 20 a 30 jsou velmi nízké, dosahují hodnoty až ± 2 mm. Takovýchto hodnot přesnosti měření je dosahováno z důvodu častého zachycování odlesků od skenovaného povrchu v průběhu skenování. Při skenování na menší zvětšení je také menší přesnost zaostření.



Obr. 33: Ukázka měření drážky pro pero při zvětšení 20

Na obrázku číslo 33 je možné vidět naskenovaný povrch při zvětšení 20 při použití metody 3D stitching. Přesnosti pro měření se zvětšením 20 a 30 jsou mezi ± 1 až ± 2 mm, protože variabilita měření je velmi vysoká.

Měření při zvětšeních větších než 30 dosahuje vyšší přesnosti. Pro zvětšení 50 dosahuje mikroskop přesnosti $\pm 0,5$ mm. Při vyšších zvětšeních je dosahováno přesnosti $\pm 0,2$ až $\pm 0,5$ mm.

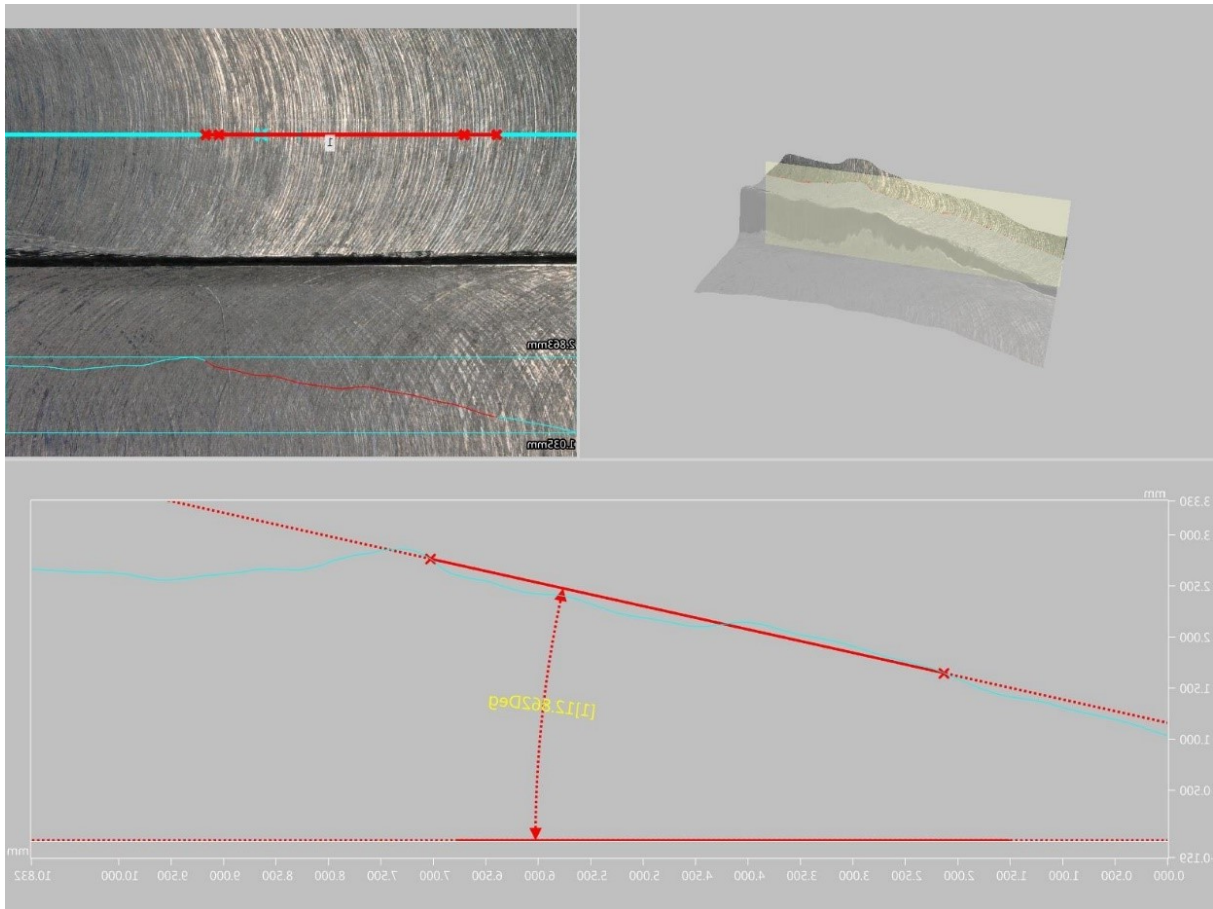
5.2 Metoda 3D depth

Metoda 3D depth umožňuje skenování povrchu v ose z.

Tuto metodu je možné využít pro skenování hloubky, respektive výšky objektu. Skenování při zvětšeních 20 a 30 mají nižší přesnost měření, která se pohybuje mezi ± 1 až $\pm 1,5$ mm. Při těchto zvětšeních nastává stejný problém jako při použití metody 3D stitching, a to špatná kvalita naskenovaného povrchu z důvodu zachycení odlesků a nepřesného zaostření objektivu. Pro zvětšení 50 dosahuje mikroskop přesnosti $\pm 0,5$ mm. Při vyšších zvětšeních je dosahováno přesnosti $\pm 0,1$ až $\pm 0,3$ mm.

Metoda 3D depth se využívá také pro měření úhlů. Při zvětšeních 20 a 30 není objektiv schopen detekovat šikmé plochy. Šikmá plocha je často zachycena jako plocha rovinná. Tato chyba je způsobena především nepřesným zaostřením při nižších zvětšeních. V případě této chyby, je potřeba upravovat zaostření tak, aby mikroskop naskenoval plochu správně. Vypočítané hodnoty přesnosti měření úhlů při zvětšeních 20 a 30 se pohybují mezi $\pm 2^\circ$ až $\pm 4^\circ$. Při zvětšení 50 a vyšších je možné přesnější zaostření objektivu a skenování šikmé

plochy probíhá bez problémů. Vypočítané hodnoty přesnosti měření úhlů při zvětšeních 50 a vyšších se pohybují mezi $\pm 0,5^\circ$ až $\pm 2^\circ$.

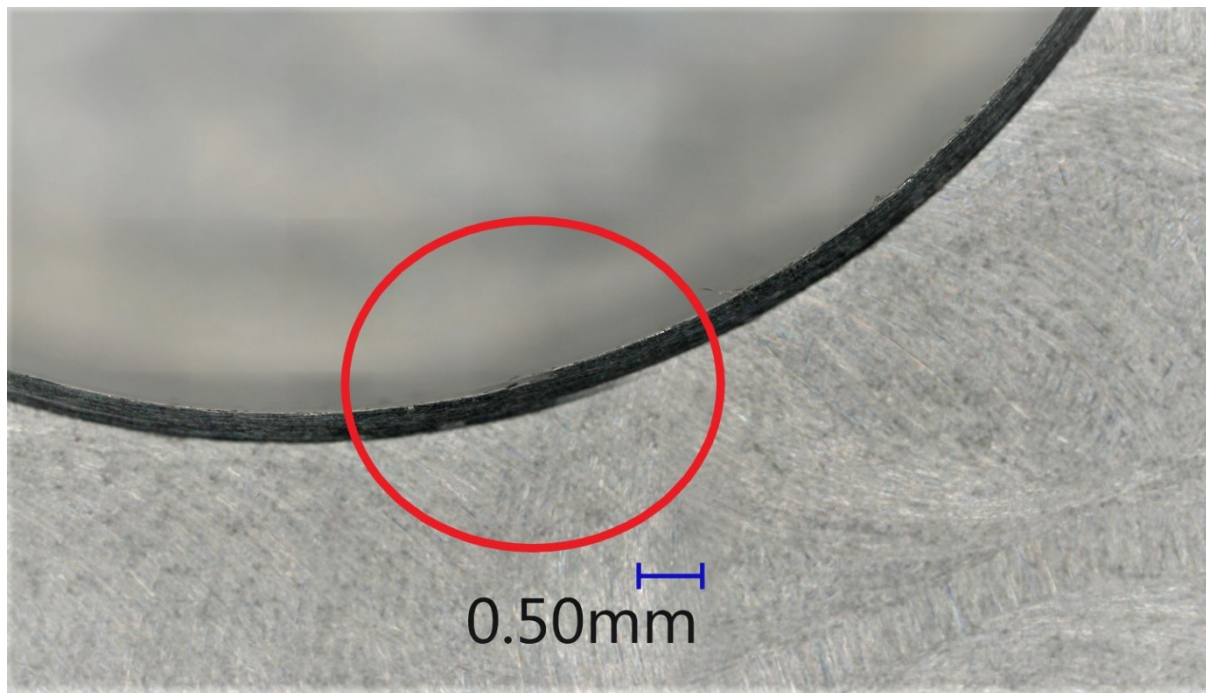


Obr. 34: Ukázka měření úhlu 10° metodou 3D depth při zvětšení 20

Měření úhlů metodou pomocí metody 3D depth vyžaduje vytvoření 2 přímek, mezi kterými je měřen úhel. Jedna z přímek je totožná se základnou. Druhá přímka je spojnicí trendu naskenované šikmé plochy. Přímka je vytvářena ručně a není možné použít automatickou detekci hran. Při vytváření spojnice trendu tedy dochází k chybám. Z tohoto důvodu je přesnost měření úhlů metodou 3D depth relativně nízká.

5.3 Metoda 2D stitching

Metoda 2D stitching funguje na principu skenování povrchu ve 2D. Při skenování je vytvořeno několik obrazů které jsou následně spojeny v jeden výsledný naskenovaný obraz.



Obr. 35: Vliv vibrací na měření metodou 2D stitching

Při zvětšeních 20 a 30 je dosahováno přesnosti měření ± 1 až $\pm 1,5$ mm. Skenování objektu při zvětšení 50 dosahuje přesnosti $\pm 0,5$ až $\pm 0,7$ mm, při vyšších zvětšeních se přesnost snižuje. Při zvětšení 200 je dosahováno přesnosti měření $\pm 0,8$ až $\pm 0,9$ mm. Snižování přesnosti měření je způsobeno vyšším počtem pixelů, tedy vyšším počtem obrazů, ze kterých je složen výsledný sken. Skládání jednotlivých obrazů je zatíženo chybou a vyšší počet obrazů znamená vyšší chybu při složení výsledného skenu. Při skládání obrazů dochází k chybě, která je zachycena na Obr. 35. Zde je zachycena chyba ve složení pixelů, která se projevuje chybným napojením hrany obvodu díry.

5.4 Nedostatky měřicího zařízení

Nejnižších přesností při použití metody 3D stitching dosahuje mikroskop pro zvětšení 20 a 30. Při těchto zvětšeních je kvalita skenovaného povrchu velmi nízká. Při skenování není možné dosáhnout přesného zaostření. Dalším problémem je zachycování odlesků od povrchu objektu, které deformují naskenovanou plochu.

Při vyšších zvětšeních se u 3D metod přesnost zvyšuje. Tento trend je dán především přesnějším zaostřením, které vyšší zvětšení umožňují.

Při použití metody 2D stitching je možné sledovat opět nižší přesnosti pro zvětšení 20 a 30. Při zvyšování zvětšení dochází ke snížení přesnosti měření při vyšších zvětšeních. Tento trend je způsoben chybou skládání jednotlivých obrazů do výsledného skenu (Obr. 35).

Velký vliv na chybu při skládání jednotlivých pixelů skenu má umístění mikroskopu (Obr. 36). Mikroskop je umístěn v laboratoři UF 106, kde se nachází obráběcí centrum, které je zdrojem vibrací. V místnosti se také pohybuje velký počet lidí a na mikroskop je tak přenášeno velké množství otřesů. Při skenování metodou 2D stitching je tento vliv nejlépe

patrný. Na obr. 35 je možné vidět místo, kde došlo k chybnému naskenování obvodu díry. Při skenování došlo k zavření dveří obráběcího centra a na skenu se tento otřes projevil chybným napojením 2 pixelů ze kterých je složen výsledný sken. Takovéto chyby je možné pozorovat u měření všemi metodami. Vliv otřesů se projevuje jako chyba ve skenované ploše.

Pro dosahování vyšších přesností měření by bylo zapotřebí vytvořit vhodnější podmínky pro měření. Měření ovlivňují vibrace obráběcího centra, otřesy při zavírání dveří laboratoře a také pohyb osob po místnosti. Dalším problémem je velká prašnost v místnosti, která neumožňuje přesné měření a má vliv především při vyšších zvětšeních. V místnosti také není udržována konstantní teplota. Tyto vlivy snižují přesnosti měření.

Pro dosažení vyšších přesností měření by bylo vhodné provádět měření v době, kdy obráběcí centrum není v provozu a v místnosti nejsou další osoby. Dále by bylo vhodné umístit mikroskop na stůl tlumící vibrace a otřesy.



Obr. 36: Umístění mikroskopu v laboratoři UF106

5.5 Způsobilost kontrolního přípravku

Způsobilost kontrolního přípravku byla ověřena pomocí indexů způsobilosti. Nejprve byla ověřena způsobilost měřicího zařízení pomocí etalonů. Následně byla ověřena způsobilost kontrolního přípravku. Porovnáním hodnot přesnosti měření etalonů a kontrolního přípravku byly zjištěny odchylky, které jsou v rozmezích uvedených v úvodu kapitoly 5. Pokud jsou odchylky v daných rozmezích hodnot, je možné říci, že je přípravek způsobilý.

Po ověření způsobilosti kontrolního přípravku, je možné používat kontrolní přípravek pro ověření správnosti měření mikroskopu. Po manipulaci s mikroskopem, kalibraci, nebo při požadavku obsluhy bude možné použít kontrolní přípravek a změřením jeho rozměrů zjistit, zda mikroskop měří správně. Přípravek sníží čas, který je potřebný pro ověření správnosti měření mikroskopu. Změřením kontrolního přípravku je možné ověřit několik funkcí a není potřeba používat různé etalony pro měření rozdílných geometrických tvarů jako doposud.

6 Závěr

Cílem diplomové práce bylo vytvořit kontrolní přípravek a ověřit jeho způsobilost.

Kontrolní přípravek by měl sloužit pro kontrolu správnosti měření mikroskopu. Přípravek je navržen tak, aby odpovídal největším rozměrům, které je na mikroskopu možné měřit. Návrh přípravku vychází z možností měření mikroskopu Keyence VHX-6000 a z požadavků obsluhy mikroskopu. Výsledný návrh kontrolního přípravku umožňuje použití několika měřících metod, jejichž přesnost je možné díky přípravku ověřit.

Ověřování způsobilosti kontrolního přípravku bylo provedeno pomocí nástrojů kvality.

Prvním krokem bylo ověření způsobilosti mikroskopu Keyence VHX-6000. Pro ověření způsobilosti měřícího zařízení byly použity koncové měrky o velikosti 2 mm a 15 mm, kontrolní kroužek o průměru 16 mm a úhlová měrka o velikosti 10°. Tyto měrky slouží jako etalony, pomocí kterých je možné určit způsobilost měřícího zařízení.

Z naměřených hodnot byla vypočtena způsobilost. Z výpočtů způsobilosti byla poté zjištěna maximální přesnost měření, která je určena postupným snižováním horní a dolní toleranční meze.

Po vypočítání způsobilosti a přesnosti měření mikroskopu Keyence VHX-6000 byla vypočtena způsobilost navrženého kontrolního přípravku. Pro hodnocení způsobilosti byly vybrány tolerované rozměry kontrolního přípravku, jejich změřením bylo ověřeno několik měřících nástrojů. Z vypočítaných hodnot bylo zjištěno, že přípravek je způsobilý a může být používán k hodnocení správnosti měření mikroskopu Keyence VHX-6000.

Během měření byly zjištěny některé nedostatky mikroskopu. Při měření větších rozměrů dochází k chybám při skenování, během kterého dochází ke skládání jednotlivých pixelů. Pixely jsou často chybně spojeny a měření na výsledném skenu je tedy nepřesné. Velké množství chyb je způsobeno umístěním mikroskopu v laboratoři. V laboratoři UF106 se nachází obráběcí centrum, které je zdrojem vibrací. Další otřesy jsou způsobeny častým pohybem osob v laboratoři. Pro zvýšení přesnosti měření by bylo vhodné provádět měření bez přítomnosti dalších osob a v době, kdy je zastavena výroba na obráběcím centru. Dále by bylo vhodné umístit mikroskop Keyence VHX – 6000 na stůl, který nepřenáší vibrace a otřesy.

Součástí diplomové práce jsou tabulky s vypočítanými přesnostmi měření. Tyto tabulky budou dále sloužit obsluze mikroskopu.

Dalším krokem při vyhodnocování přesnosti měření mikroskopu by bylo vytvoření dalšího kontrolního přípravku s o jeden řád menšími rozměry. Díky hodnocení způsobilosti kontrolního přípravku by byla zjištěna přesnost měření mikroskopu. Cílem hodnocení způsobilosti jednotlivých kontrolních přípravků je vytvoření souhrnné tabulky s přesnostmi měření mikroskopu pro všechny rozměry, které je mikroskop schopen měřit.

Seznam použitých zdrojů

- [1] Analýza systému měření (MSA); 3. vyd. Praha: Česká společnost pro jakost, 2003. 233 s. ISBN 80-02-01562-2
- [2] NĚMEČEK, Pavel. Způsobilost nereplikovatelných procesů kontroly. Druhé přepracované a doplněné vydání. Praha: Česká společnost pro jakost, 2019. ISBN 978-80-02-02843-7.
- [3] BUMBÁLEK, Leoš. Kontrola a měření Praha: Informatorium, 2009. ISBN 978-80-7333-072-9.
- [4] BOHÁČEK, Jaroslav. Metrologie. 3. přepracované vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2019. ISBN 978-80-01-06612-6.
- [5] NENADÁL, Jaroslav. Moderní management jakosti: principy, postupy, metody. Praha: Management Press, 2008. ISBN 978-80-7261-186-7.
- [6] ISO » ISO 9001. ISO [online]. Dostupné z: <http://www.iso.cz/iso-9001>
- [7] ČSN EN ISO 9001 (01 0321) Systémy managementu kvality - Požadavky: ed. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012. Česká technická norma.
- [8] Netolický P. a Mazínová I.: Plánování produktu v předvýrobních etapách, Digitální knihovna ZČU
- [9] Řízení kvality (Quality Management) - ManagementMania.com. [online]. Copyright © 2011 [cit. 28.10.2021]. Dostupné z: <https://managementmania.com/cs/rizeni-kvality>
- [10] [online]. Dostupné z: <https://elearning.tul.cz/mod/book/view.php?id=281075&chapterid=7999>
- [11] NĚMEČEK, Pavel. Způsobilost nereplikovatelných procesů kontroly. Praha: Česká společnost pro jakost, 2015. ISBN 978-80-02-02609-9.
- [12] Ekosoftware s.r.o., nejen software pro hluk a vibrace [online]. Dostupné z: <https://www.ekosoftware.cz/asym>
- [13] Dudáčková, Simona. Ověření způsobilosti výrobního zařízení. Plzeň, 2020. Diplomová práce. Západočeská univerzita, Fakulta strojní, Ústav. Katedra technologie obrábění Vedoucí práce Ing Kateřina Bícová, PhD
- [14] PLURA, Jiří. Plánování jakosti II. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012, 172 s. ISBN 978-80-248-2588-5.
- [15] TŮMOVÁ, Olga. Metrologie a hodnocení procesů. Praha: BEN - technická literatura, 2009. ISBN 978-80-7300-249-7.
- [16] DSpace at University of West Bohemia: NO TITLE [online]. Copyright © [cit. 04.11.2021]. Dostupné z: <https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/14143/1/BP%20Vyuziti%20metody%20MSA%20v%20beznem%20strojirenskem%20podniku%2C%20Ondrej%2>
- [17] [online]. Dostupné z: <https://bazant.wordpress.com/2015/07/04/analza-mericho-systmu-msa/>
- [18] ČVUT DSpace [online]. Copyright © [cit. 07.11.2021]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/72995/F2-BP-2017-Rohlena-Petr-Bakalarska%20prace_Petr%20Rohlena.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- [19] ČVUT DSpace [online]. Copyright © [cit. 07.11.2021]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/75742/F2-BP-2016-Strial-David-David%20Strial%20-%20Bakalarska%20prace.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>
- [20] Normální rozdělení – Wikipedie. [online]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Norm%C3%A1ln%C3%AD_rozd%C4%9Blen%C3%AD#/media/Soubor:Standard_deviation_diagram.svg
- [21] Základní pojmy | Český metrologický institut. Vítá Vás Český metrologický institut | Český metrologický institut [online]. Dostupné z: <https://www.cmi.cz/node/537>
- [22] [online]. Dostupné z: <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:FkHecddixYsJ:https://elearning.tul.cz/mod/resource/view.php%3Fid%3D144133+&cd=6&hl=cs&ct=clnk&gl=cz>
- [23] Histogram. SlidePlayer [online]. [cit. 2020-01-15]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/1899225/>
- [24] Průvodce digitálními mikroskopy [online]. [cit. 2021-10-10]. Dostupné z: <https://www.keyence.eu/cscz/>
- [25] Digitální mikroskop Keyence VHX – 6000 [online]. [cit. 12.1.2022] Dostupné z <https://www.keyence.eu/cscz/>
- [26] Users manual Keyence VHX-600 [online]. [cit. 2021-10-10]. Dostupné z: <https://www.keyence.eu/cscz/>
- [27] EN AW-7075, AlZn5.5MgCu: Vlastnosti | NPS PROAL s.r.o.. Hliníkové profily, tyče, plechy a desky | PROAL Ostrava [online]. Copyright © 2019 NPS PROAL Ostrava. Hliníkové profily, tyče, plechy, desky a systémy. [cit. 25.04.2022]. Dostupné z: <https://proal.cz/hlinik/slitiny-hliniku/en-aw-7075/>

PŘÍLOHA č. 1

Souhrnná tabulka vypočítaných přesností měření pro kontrolní přípravek

měřený prvek	použitá měřicí metoda	Obj. 1										Obj. 2	
		zvětšení 20	zvětšení 30	zvětšení 50	zvětšení 100	zvětšení 150	zvětšení 200	zvětšení 100	zvětšení 200				
schod o výšce 2 mm	3D Depth	±1	±1	±0,5	±0,3	±0,2	±0,2	±0,2	±0,2	±0,2	±0,2	±0,2	±0,2
schod o výšce 4 mm	3D Depth	±1,5	±1	±0,5	±0,2	±0,2	±0,2	±0,2	±0,2	±0,2	±0,2	±0,3	±0,2
schod o výšce 6 mm	3D Depth	±1,5	±1	±0,4	±0,2	±0,1	±0,2	±0,1	±0,1	±0,1	±0,2	±0,2	±0,1
kosta 15x15 mm - osa x	2D Stitching	±1,5	±1,5	±0,5	±0,6	±0,6	±0,6	±0,6	±0,7	±0,6	±0,6	±0,6	±0,6
kosta 15x15 mm - osa x	3D Stitching	±1	±1	±0,5	±0,3	±0,3	±0,3	±0,3	±0,2	±0,2	±0,3	±0,3	±0,3
kosta 15x15 mm - osa y	2D Stitching	±1,5	±1,5	±0,7	±0,7	±0,7	±0,7	±0,7	±0,8	±0,8	±0,7	±0,7	±0,8
kosta 15x15 mm - osa y	3D Stitching	±1	±1	±0,5	±0,3	±0,3	±0,3	±0,4	±0,3	±0,3	±0,4	±0,4	±0,4
díra průměr 15 mm	2D Stitching	±1	±1	±0,5	±0,5	±0,5	±0,5	±0,5	±0,4	±0,4	±0,5	±0,5	±0,4
úhel 5°	3D Depth	±2	±2	±2	±1	±1	±1	±1	±1	±1	±1	±1	±1
úhel 10°	3D Depth	±4°	±3°	±2°	±1°	±1°	±1°	±1°	±1°	±1°	±0,5°	±0,5°	±1°
drážka 8P9 - hloubka	3D Stitching	±1	±1	±0,5	±0,3	±0,3	±0,3	±0,3	±0,2	±0,2	±0,3	±0,3	±0,2
drážka 8P9 - šířka	3D Stitching	±1	±1	±0,7	±0,8	±0,8	±0,8	±0,8	±0,7	±0,7	±0,8	±0,8	±0,8