ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Porovnání různých nástřiků pro laserové skenování

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Autor: Jiří Hála

Studijní program: Výroba a ekonomika ve strojírenství

Studijní obor: Technologie, materiály a ekonomika strojírenství

Vedoucí práce: Ing. Michal Koptiš

Praha 2021

Zadání

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci „Porovnání různých nástřiků pro laserové skenování“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Michal Koptiše a s použitím podkladů uvedených v seznamu.

V Praze dne …… …….

Jiří Hála

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Michalu Koptišovi za projevenou ochotu, podnětné připomínky a cenné rady při vedení mé práce.

Anotace

Tato práce se zabývá problematikou využívání antireflexních nástřiků pro 3D skenování pomocí laser skenerů. V praxi se dnes využívají antireflexní nástřiky jakožto běžná součást skenovacího procesu. Antireflexní nástřiky však určitým způsobem ovlivňují geometrické tolerance a délkové rozměry. Jelikož jsou kladeny stále vyšší požadavky na přesnost průmyslově vyráběných dílů, vzniká také požadavek na zjištění, jak tyto antireflexní nástřiky ovlivňují výše zmíněné vlastnosti dílů. Tato práce se podrobně zabývá tím, jaký vliv mají čtyři různé zmatňovací nástřiky na tloušťku nanesené vrstvy, geometrické tolerance a nerovnoměrnost nanesené vrstvy.

Annotation

This paper deals with the use of anti-reflective coatings for 3D scanning using laser scanners. In practice, anti-reflection coatings are used today as a common part of the scanning process. However, anti-reflective coatings affect geometric tolerances and length dimensions in some ways. As ever-increasing demands are placed on the accuracy of industrially manufactured parts, there is also a need to find out how the anti-reflective coatings affect the above-mentioned properties of the parts. This work deals in detail with the influence of four different anti-reflective coatings on the thickness of the applied layer, geometric tolerances and unevenness of the applied layer.

Klíčová slova

optická digitalizace, 3D digitalizace, laserový skener, metrologie, antireflexní nástřiky, přesnost měření

Přehled použitých zkratek

1D	Jednodimenzionální, jednorozměrný
2D	Dvoudimenzionální, dvourozměrný
3D	Trojdimenzionální, trojrozměrný
CCD	Charge-Coupled Device – zařízení s vázanými náboji
CMM	Coordinate Measuring Machine – souřadnicový měřicí stroj
MPE_e	Maximum Permissible Erro for length measurement – maximální přípustná chyby pro měření délky

Obsah

Anotace 6

Klíčová slova 7

Přehled použitých zkratek 8

1. Úvod 11

2. Laserové skenování 12

2.1. Princip fungování skeneru 12

2.2. Princip laserového skenování 13

2.2.1. Promítání laserové linie 13

2.2.2. Extrakce bodů z objektu 14

2.2.3. Sledování polohy laser skeneru 15

2.2.3.1. CMM 15

2.2.3.2. Mobilní měřící ramena 15

2.2.3.3. Laser tracker bundle 16

2.2.3.4. Porovnání způsobů sledování polohy skeneru 16

2.3. Kvalita laserového skenování 17

2.4. Obtížně skenovatelné povrchy 18

2.4.1. Antireflexní nástřiky 20

2.4.2. Software 21

3. Popis experimentu 22

3.1. Příprava experimentu 22

3.1.1. Výběr měřených součástí 22

3.1.2. Výběr antireflexních nástřiků 23

3.1.3. Využité měřící stroje 24

3.2. Průběh měření 25

3.2.1.1. Měření prizmatu 26

3.2.1.2. Měření koule 26
3.3. Vyhodnocování naměřených dat 26
3.3.1. Grubbsův test 27
3.3.2. Diagramy stability 28
3.4. Očekávané výsledky 28
4. Vyhodnocení získaných dat 30
4.1. Nominální hodnoty 30
4.2. Tloušťka nanesené vrstvy 32
4.2.1. Prizma 32
4.2.2. Koule 34
4.3. Ovlivnění geometrických specifikací 36
4.3.1. Prizma 36
4.3.1.1. Odchylka rovinnosti 37
4.3.1.2. Úhel 41
4.3.2. Koule 43
4.4. Nerovnoměrnost vrstvy vlivem nanášení nástřiku 45
4.4.1. Grubbsův test 45
4.4.2. Diagramy stability 46
4.4.2.1. Prizma 46
4.4.2.2. Koule 49
5. Vyhodnocení výsledků 52
6. Závěr 54
Citace 55

1. Úvod

Tato práce se zabývá problematikou využívání antireflexních nástřiků pro 3D skenování pomocí laser skenerů. První kapitola popisuje princip laserového skenování, základní rozdělení skenerů a jejich porovnání. Ve druhé kapitole se tato práce věnuje výběru antireflexních nástřiků a jejich popisu. Třetí kapitolu tvoří praktický experiment. Zde je popsán návrh experimentu, výběr měřených objektů, způsob jejich měření, stručný popis naměřených dat a na konec samotné vyhodnocení naměřených dat pomocí statistických postupů.

Přestože se technologie laserového skenování v běžné praxi používá již od počátku nového tisíciletí, žádný výzkum se doposud nevěnoval zkoumání vlivu antireflexních nástřiků na geometrické a rozměrové tolerance. Tato problematika je důležitá z toho důvodu, že nezohlednění druhu antireflexního nástřiku při měření součásti může ovlivnit naměřené hodnoty a tím i přesnost měření. Cílem této práce je zjistit, jaký vliv mají jednotlivé typy nástřiků na:

- tloušťku nanesené vrstvy,
- ovlivnění geometrických specifikací,
- nerovnoměrnost vrstvy vlivem nanášení nástřiku.

Vedlejším cílem mého výzkumu je určení typu antireflexního nástřiku, který nejméně ovlivňuje výsledné naměřené hodnoty a vykazuje tak nejvhodnější vlastnosti pro přesné měření.

Získaná data mohou následně posloužit jako podklad pro výběr vhodného antireflexního nástřiku.

Výsledná data mohou dále posloužit jako podnět pro další zkoumání způsobů nanášení antireflexních nástřiků a případné automatizace tohoto procesu.

2. Laserové skenování

Technologie 3D laserového skenování byla vyvinuta ve druhé polovině 20. století. Ve snaze přesně replikovat různé povrchy využívaly první skenery světla, kamery a projektory. Z důvodu limitovaných technologií 60. let 20. století bylo velmi problematické a časově náročné udělat přesný sken konkrétního objektu. V roce 1994 firma REPLICA uvedla na trh skener, který umožnil rychlé, přesné a detailní skenování. V roce 1996 byly poprvé zkombinovány technologie ručně ovládaného ramena a laserového liniového skeneru.

Laserové skenery se využívají v různých oblastech akademického výzkumu, zpracování a výroby materiálu, strojírenství, restaurátorství, stavebnictví a v mnoha jiných odvětvích.

V dnešní době jsou laserové skenery nejčastěji využívané ve strojírenství. Nezastupitelnou pozici mají především v řízení jakosti, metrologii a reverzním inženýrství. [1]

2.1. Princip fungování skeneru

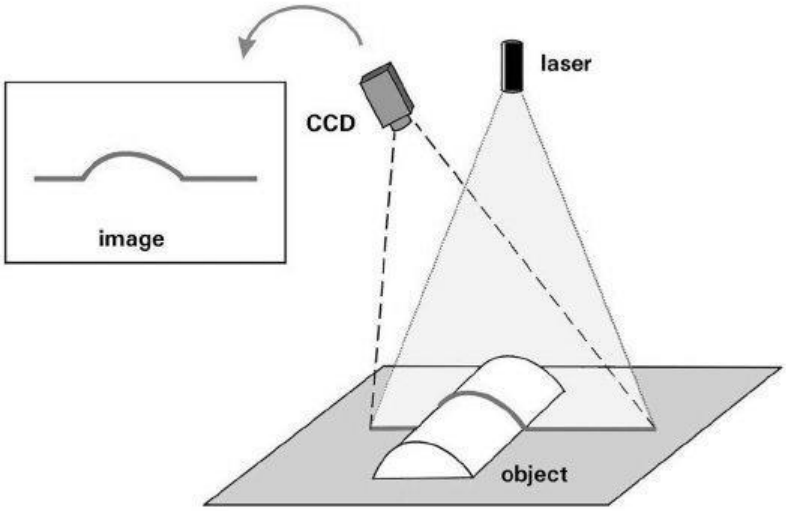
Laserový skener se skládá z laserové diody, cylindrické čočky, objektivu, CCD čipu a elektroniky potřebné pro ovládání laserové diody a CCD čipu.

Laserová dioda emituje bodový laserový paprsek, který po průchodu cylindrickou čočkou změní tvar na laserovou linii. Tato laserová linie dopadá na skenovaný objekt a světlo z něj odražené prochází skrz objektiv do kamery, kde následně snímač toto světlo zaznamená a odešle ke zpracování. Snímač a laserová dioda jsou od sebe fixně vzdáleny. Tato vzdálenost je přesně stanovená pro následnou 1D triangulaci.

Skener určuje pouze vzdálenost objektu od skeneru, pro vytvoření 3D modelu ale je potřeba také zařízení, které je schopné určit polohu skeneru. Výsledný model se nejčastěji využívá pro metrologickou kontrolu součásti a reverzní inženýrství. [1][2]

2.2. Princip laserového skenování

Laser scannery (také nazývané laserové liniové triangulační skenery) k zachycení snímaného objektu jako mračna bodů využívají trigonometrické 1D triangulace. Na skenovaný povrch promítají laserovou čáru a následně zachytávají její odraz na CCD senzoru (Obrázek č. 2 - 1). Jelikož je CCD senzor umístěný ve známé vzdálenosti od zdroje laseru, lze provést přesná bodová měření výpočtem úhlu odrazu laserového paprsku. Se znalostí vzdálenosti skeneru od objektu může skenovací hardware mapovat povrch objektu a tím zaznamenat jeho 1D pozici. Vzdálenost skeneru od objektu je dopočítávána ze znalosti přesných pozic jednotlivých os skenovacího zařízení. [3][4]



Obrázek č. 2 - 1 - Princip fungování laserového skeneru. Objekt zkreslující světelnou čáru vyzařovanou laserem z pohledu CCD kamery [4]

2.2.1. Promítání laserové linie

Pro promítnutí laserové čáry na skenovaný objekt lze využít dva prostředky – kmitající zrcátko nebo cylindrickou čočku.

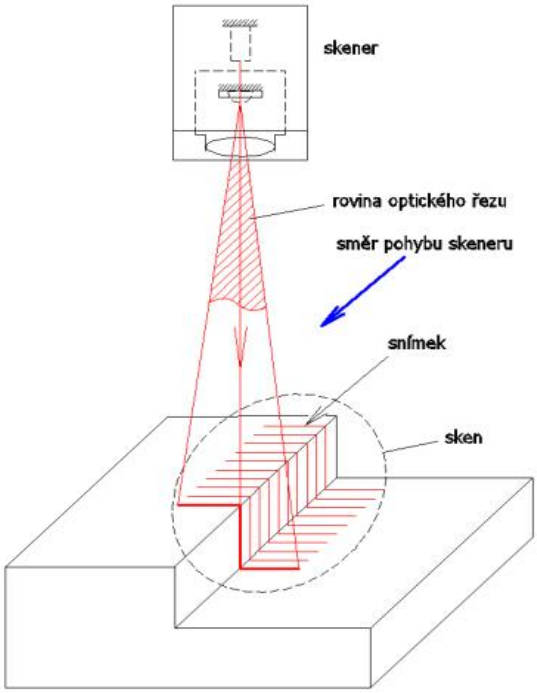
Kmitající zrcátko bylo využíváno spíše v minulosti. Jeho výhodou je relativně jednoduchá konstrukce, ovšem výraznou nevýhodou je náchylnost na otřesy a přehřívání motoru či elektromagnetu, který rozkmitává zrcátko.

V dnešní době se využívá výhradně cylindrická čočka. Oproti kmitajícímu zrcátku je mnohem náročnější na výrobu, tato nevýhoda je ale kompenzována vyšší

mechanickou odolností, absencí zahřívání, relativně vyšší stabilitou při různých teplotách a možností upravovat množství světla v jednotlivých oblastech čáry. [5]

2.2.2. Extrakce bodů z objektu

Při snímání dat vykonává skener nad skenovanou součástí pohyb v určitém rozsahu vzdáleností. Tyto vzdálenosti jsou určeny ohniskovou vzdáleností objektivu a zorným polem CCD čipu. Dalšími podstatnými faktory při skenování objektu jsou snímkovací frekvence a rozlišení kamery. Snímkovací frekvence je závislá na poměru rychlosti pohybu skeneru a frekvenci snímání CCD čipu. Čím nižší je rychlost pohybu skeneru a čím vyšší je frekvence snímání CCD čipu, tím menší je prostor mezi jednotlivými snímky a tím je naskenováno více bodů (Obrázek č. 2 - 2). Rozlišení kamery a ohnisková vzdálenost udávají počet bodů zachycených na jednom snímku. V dnešní době je čip schopný zaznamenat až 250 000 bodů za sekundu.



Obrázek č. 2 - 2 - Princip skenování laserového liniového skeneru [5]

Tímto procesem se získává obrovské množství bodů (řádově desítky milionů), které se nazývají *point cloud* (lze přeložit jako „mračno bodů“). Poloha každého

bodu je v prostoru určena pomocí souřadnic x, y, z a jednotkových vektorů i, j, k. [6][7]

2.2.3. Sledování polohy laser skeneru

Jak již bylo zmíněno výše, laser skener je sám o sobě schopný určit pouze vzdálenost mezi skenerem a skenovaným objektem. Zbývající informace o poloze určuje zařízení, které laserový skener nese.
Jako tato zařízení zpravidla slouží souřadnicové měřicí stroje (CMM).
Nejčastěji se pro fyzické uchycení využívají kartézsky uspořádané CMM nebo z nekartézsky uspořádaná mobilní měřící ramena.
Zvláštním způsobem propojení CMM a laser skeneru je tzv. laser tracker bundle. Toto zařízení umožňuje velice přesně sledovat polohu jiného objektu pomocí laserového paprsku. [6][7]

2.2.3.1. CMM

Základní konstrukce souřadnicového měřicího stroje umožňuje pohyb ve třech osách. Tento pohyb je většinou měřen pomocí skleněných či keramických pravítek, do kterých jsou laserově vypáleny dílky délek, nejčastěji s rozestupy 0,1 μm. Tato pravítka se nacházejí na všech třech osách. Pohyb zařízení zajišťují digitálně řízené servomotory se zpětnou vazbou a vzduchová ložiska zajišťující minimální tření při pohybu stroje. CMM je založeno na kartézském souřadném systému. [3][6]

2.2.3.2. Mobilní měřící ramena

CMM rameno je založeno na sférickém souřadném systému. CMM ramena mívají většinou 6-7 os. Tyto osy jsou spojeny pomocí rotačních spojů. Pohyb v jednotlivých spojích je měřen pomocí rotačních enkodérů. Pohyb zařízení zajišťuje operátor. [3][7]

2.2.3.3. *Laser tracker bundle*

Laser tracker bundle obsahuje 2 přístroje. Laser skener a laser tracker. Laser tracker je zařízení využívající laserový interferometr se systémem servopohonů, který umožňuje sledovat pohybující se cíl a měřit jeho vzdálenost azimut a elevaci od přístroje.[20]

Propojení laser trackeru a laser skeneru je oproti předchozím dvěma možnostem velmi odlišné. V tomto případě totiž není laser skener fyzicky spojen s žádným jiným zařízením určujícím jeho polohu. Místo toho má na sobě koutové odražeče, jejichž poloha je určována pomocí laser trackeru. Výhodou a zároveň nevýhodou této kombinace je relativně neomezený pohyb operátora. Problém vyvstává v okamžiku, kdy operátor zastíní laserový paprsek svým tělem. V ten okamžik laser tracker ztrácí pozici laser skeneru a není možné pokračovat v měření do té doby, než laser tracker obnoví zaměření laser skeneru.[6][7]

2.2.3.4. *Porovnání způsobů sledování polohy skeneru*

Jednotlivé způsoby sledování polohy laser skeneru mají rozdílné parametry, ze kterých se dají vyvodit jejich výhody a nevýhody. Mezi nedůležitější z těchto parametrů patří:

- **Point spacing** – vzdálenost bodů ve snímku*.
- **Cena** – přibližná suma potřebná pro zakoupení nosiče a skeneru.
- **Zajištění pohybu skeneru** – co zajišťuje pohyb skeneru.
- **Mobilita** – zda je možné zařízení jednoduše přemístit.
- **Využití** – pro skenování jakého typu objektů se daný nosič nejčastěji využívá.
- **Pracovní prostor** – jaký prostor je schopný skener naskenovat bez nutnosti přemístit obrobek či skener.
- **Datová frekvence** – kolik bodů za sekundu skener nasnímá*.
- **Náročnost na teplotní podmínky** – v jakém rozmezí teplot je nosič schopen fungovat bez zvýšení nepřesnosti udávané v kalibračním listu.

* Jedná se o vlastnost skeneru, avšak výběr skeneru dle tohoto parametru je determinován způsobem uchycení skeneru.

Porovnání těchto parametrů u různých způsobů zjišťování polohy laser skeneru je shrnuto v tabulce č. 1.

Tabulka č. 1 - Tabulka vlastností nosičů laserového skeneru [6][7][8]

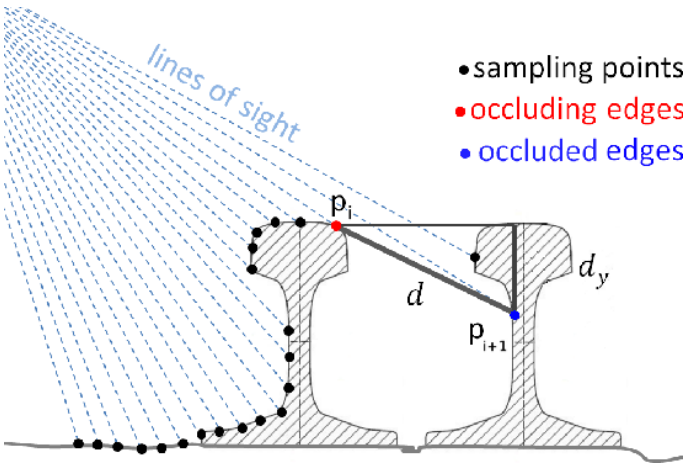
	CMM	mobilní měřící ramena	laser tracker bundle
point spacing	0,02 mm	0,04 mm	0,08 mm
cena	2 000 000 Kč	1 500 000 Kč	7 000 000 Kč
zajištění pohybu skeneru	CNC	operátor	operátor
mobilita	ne	ano	ano
využití	detailní malé součásti	středně detailní součásti	velkooběmové součásti
pracovní prostor	malý	střední	velký
datová frekvence	nízká	střední	vysoká
náročmost na teplotní podmínky	20°C – 22°C	5°C – 40°C	0°C – 40°C

2.3. Kvalita laserového skenování

Výsledná kvalita naskenovaného mraku bodů lze posuzovat na základě těchto parametrů:

- **Šum** – je dán citlivostí senzoru kamery, intenzitou laserové linie, fyzikálními vlastnostmi snímaného povrchu a softwarem, který zpracovává získaná data.

- **Celistvost mraku** – je závislá na tvaru měřeného povrchu (rovinné plochy lze naskenovat celistvě, zatímco tvarové plochy, obzvláště malé díry, celistvě naskenovat nelze, protože jsou laserová linie či CCD senzor zastíněny jinou částí tvarové plochy). (Obrázek č. 2 - 3)
- **Hustota mraku** – je závislá na frekvenci snímkování, rozlišení senzoru a rychlosti pohybu se skenovací hlavou.
- **Přesnost pozice bodů v mraku** – závisí hlavně na parametrech skeneru a nosiče skeneru, vnějších podmínkách (teplota, kvalita osvětlení) a charakteru skenované plochy.
- **Překrytí dat** – jednotlivé skeny stejné plochy na sebe nejsou napojené přesně, ale s určitým přesahem. Tomuto problému se dá relativně předcházet u skenování pomocí CMM, ovšem pokud skenování probíhá za pomoci ramene, nebo laser trackeru, operátor nikdy nedocílí toho, že se jednotlivé skeny nebudou překrývat. Pozice jednoho fyzického bodu v oblasti překrytí dat se může ve výsledku měření lišit, což způsobuje drobné nepřesnosti, které jsou následně zpracovávány softwarem.[8][9]



Obrázek č. 2 - 3 - Problematika zastínění tvarové součásti a odlehlých bodů [8]

2.4. Obtížně skenovatelné povrchy

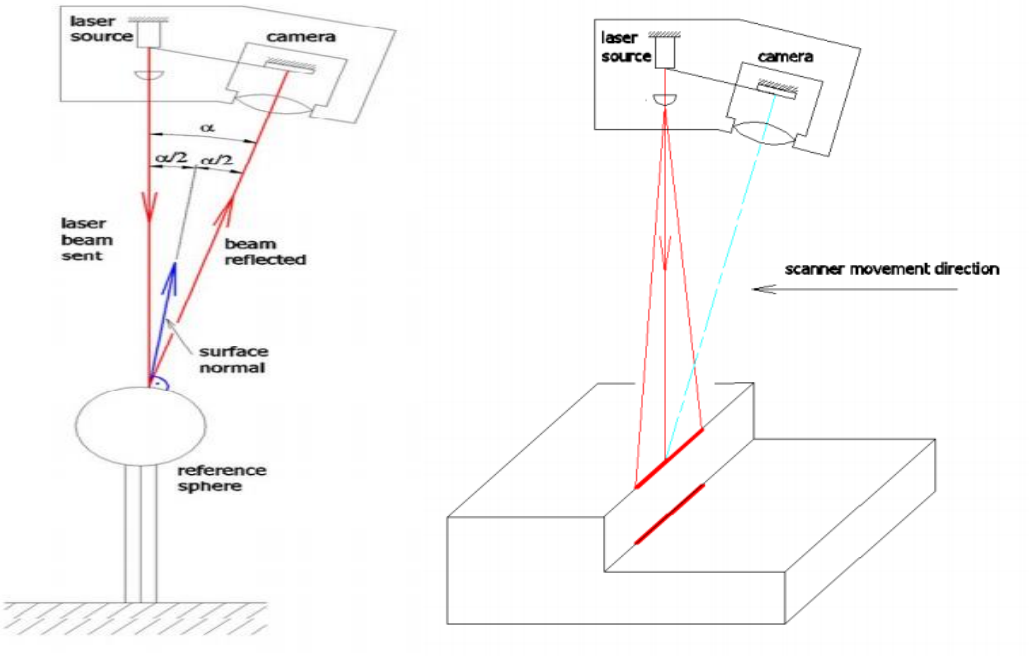
Jak již bylo uvedeno, přesnost měření závisí také na charakteru skenované plochy. Mnoho ploch je obtížné naskenovat. Obtížně skenovatelné povrchy lze definovat jako povrchy, které zanášejí do mračna bodů chyby. Ty jsou způsobené

absencí některých bodů nebo body, které jsou nekorektní (přebytečné či jinak chybné).

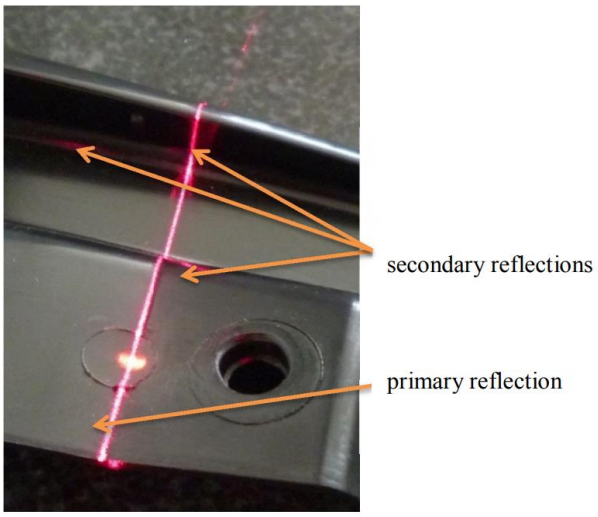
Mezi tyto povrchy patří:

- **Lesklé povrchy** – způsobují odraz laserové linie mimo CCD senzor, body se tím pádem vůbec nezaznamenají, nebo se zaznamenají na špatném místě (Obrázek č. 2 - 4). Při skenování určitých tvarových ploch může lesklost povrchu také způsobit odražení laserové linie od skenovaného povrchu na jinou část povrchu a z té následně do CCD senzoru. Mimo to mohou způsobit také šum, nebo přímý odraz paprsku do osy kamery, při kterém odražená laserová linie způsobuje přesvětlení kamery.
- **Průhledné a průsvitné povrchy** – na těchto površích dochází k úplnému nebo částečnému průchodu laserového paprsku skrz povrch. To pak způsobuje neodražení laserové linie do čočky nebo odraz od spodní strany skenovaného objektu. V krajním případě také může dojít k tzv. dvojitému odrazu, kdy se paprsek odrazí od horní i dolní části objektu zároveň.
- **Specifické tvarové plochy** – obtíže při skenování jsou často způsobeny samotným tvarem součásti. Při skenování hran objektů často dochází ke vzniku odlehlých bodů skenu (Obrázek č. 2 - 5).

Problémy spojené se skenováním ploch s výše zmíněnými vlastnostmi lze částečně eliminovat pomocí antireflexních nástřiků nebo softwaru. [9][10]



Obrázek č. 2 - 4 - Ukázka lesklého povrchu a odlehlých hodnot [5]



Obrázek č. 2 - 5 - Ukázky primárních a sekundárních odrazů [5]

2.4.1. Antireflexní nástřiky

Antireflexní nástřiky se zpravidla aplikují na veškeré skenované objekty za účelem sjednocení vlastností povrchu a předcházení problémům spojeným

s lesklostí, průhledností a průsvitností skenovaného povrchu. Tyto nástřiky mívají většinou podobu práškového spreje. Antireflexní nástřik je na povrch nanášen tak, aby bylo dosaženo rovnoměrného pokrytí skenovaného povrchu tenkou a rovnoměrnou matnou vrstvou. Po naměření součásti prášek sám sublimuje, nebo je potřeba jej setřít.

Existují dva typy antireflexních nástřiků. Prvním a zároveň nejčastěji používaným typem je nástřik, jehož zmatňující složku tvoří křídový prášek. Tento nástřik je třeba po provedení měření mechanicky setřít. Druhý, méně používaný typ je odpařovací sprej, který po měření sám sublimuje.

Pro zmatnění povrchu je ale možné využít i jiné spreje. V praktické části své práce využívám kromě výše zmíněných typů také vývojku pro kapilární zkoušky, kterou je třeba po měření mechanicky setřít, a matný bílý akrylátový lak, jehož hlavní nevýhodou je, že lak už nelze po nanesení odstranit, čímž je měřená součást znehodnocena. [9][10]

2.4.2. Software

Druhou možností je filtrace dat získaných skenováním obtížně skenovatelných povrchů pomocí filtračních algoritmů zabudovaných v softwaru. Tyto algoritmy bývají většinou schopné odfiltrovat problémy způsobené například lesklostí povrchu. Koncový uživatel má ale velmi nízkou kontrolu nad algoritmem, na jehož základě program pracuje. Jednotlivé softwary využívají různé algoritmy a výsledky tak mohou být každým softwarem zpracovány jinak. [5]

3. Popis experimentu

Praktická část této práce se zabývá porovnáním jednotlivých typů antireflexních nástřiků. Konkrétně se pak věnuje tomu, jaký vliv mají vybrané nástřiky na tloušťku nanesené vrstvy, nerovnoměrnost nanesené vrstvy vlivem operátora a jak různé typy nástřiku ovlivňují geometrické specifikace měřeného objektu. Tato data získávám měřením vybraných demonstračních objektů, na které je opakovaně nanášen antireflexní nástřik. Z naměřených hodnot následně vyvozuji, který nástřik nejméně ovlivňuje naměřené hodnoty a vykazuje tím pádem vlastnosti nejvhodnější pro přesné měření.

3.1. Příprava experimentu

Před provedením experimentu bylo potřeba zvolit vhodné měřené součásti, antireflexní nástřiky a měřící stroje. Tímto výběrem se zabývám v následujících podkapitolách.

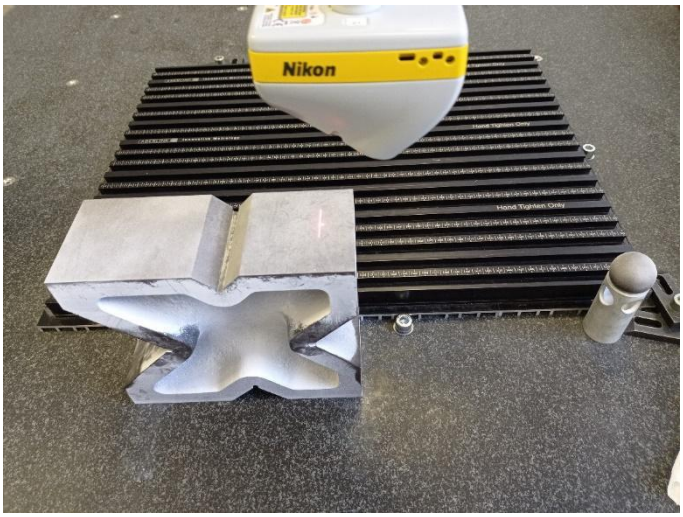
3.1.1. Výběr měřených součástí

Jelikož je většina strojních součástí kombinací rovinných a tvarových ploch, ideálními vzorky jsou prizma reprezentující rovinné plochy a koule reprezentující tvarovou plochu (Obrázek č. 3 - 1).

Prizma jsem zvolil, protože se jedná o relativně dostupný objekt, který má rovné broušené plochy i úhly potřebné pro experiment.

Ložiskovou kouli jsem pro měření tvarových ploch zvolil, protože koule ideálně reprezentuje tvarové plochy. Důležitý je také fakt, že je při výrobě ložiskových koulí kladen veliký důraz na přesnost, a proto mívají malou odchylku kulové plochy. Tato konkrétní ložisková koule byla upravena pomocí alkalického černění, což způsobilo přeměnu jejího lesklého stříbrného povrchu na matně šedý. Alkalické černění sice lehce ovlivňuje geometrické tolerance, oba měřené objekty však byly před samotným experimentem přeměřeny, a proto nemá tento proces na výsledky experimentu žádný vliv.

Oba vybrané předměty byly již pro měření dříve využity v diplomové práci *Využití snímacího systému laser scanneru pro aplikace reverzního inženýrství* [9], jsou mi tedy známy jejich přesné rozměry a geometrické tolerance.



Obrázek č. 3 - 1 - ukázka prizmatu a ložiskové koule při měření

3.1.2. Výběr antireflexních nástřiků

Mým cílem bylo vybrat od každého druhu využívaných zmatňovacích nástřiků používaných při 3D skenování jeden vzorek. Nástřiky B a C reprezentují oba druhy antireflexních nástřiků určených primárně pro potřeby laserového skenování. Zbylé dva nástřiky sice nespadají do kategorie antireflexních nástřiků, přesto jsou však v praxi využívány i za účelem měření. V dalších kapitolách mé práce jsou pro zjednodušení všechny použité nástřiky shrnuty pojmem „antireflexní nástřiky“. Konkrétně byly vybrány následující vzorky:

- **Nástřik A** - D-70 Developer

  Tento sprej běžně slouží jako vývojka pro kapilární zkoušky povrchových vad, trhlin a pórů na různých typech materiálů. Nástřik byl do experimentu vybrán, protože splňuje požadavky na zmatnění povrchu a v praxi je při laserovém skenování využíván.

  Cena s DPH 13,26 € = 337,45 Kč [11]

- **Nástřik B** - 3D Laser scanning Spray

Tento nástřik nejspíše využívá pro zmatnění povrchu křídový prášek (výrobce přesné složení neuvádí, dle vlastností nástřiku lze však tento závěr vyvodit). Aby bylo možné křídový prášek nanášet na skenovaný objekt, je uchováván v suspenzi s propan-butanem, který se po nanesení velmi rychle odpaří.

Cena s DPH 574,75 Kč [12]

- **Nástřik C** - HELLING 3D Laser Scanning Anti-Reflexionsspray MATT

Tento nástřik je specifický tím, že po nanesení sám sublimuje a nezanechá za sebou žádnou vrstvu. Nástřik má tudíž využití zejména v aplikacích, ve kterých je následné omytí výrobku problematické. Je doporučený převážně pro *„archeologii, umělecké výtvory, produkty s hrubým povrchem, dřevěné či dokonce papírové výrobky. Doba sublimace se obvykle pohybuje mezi 0,5 až 2 hodinami“* [15]

Cena s DPH 1448,37 Kč [13]

- **Nástřik D** - RAL 9005 ve spreji 500ml Matný Motip

Tento sprej byl vybrán, protože je v praxi také využíván pro účely laserového skenování i přesto, že je neomyvatelný. Nanesení tohoto nástřiku skenovaný objekt znehodnotí a znemožní opakování celého procesu.

Cena s DPH 229 Kč [14]

3.1.3. Využité měřící stroje

Měření hodnot jsem realizoval ve spolupráci se společností Topmes s.r.o. Měření jsem prováděl na CMM LK Metrology Altera S (Obrázek č. 3 - 2) osazeným laser skenerem Nikon LC15Dx (Obrázek č. 3 - 3). Všechna má měření probíhala metodou laserového skenování popisovanou v teoretické části této práce.

- Vzorec přesnosti CMM: $MPE_E = 1{,}8 \pm \frac{L}{400}\ [\mu m]$ [15]
- Vzorec přesnosti laser skeneru: $MPE_E = 12 \pm \frac{L}{400}\ [\mu m]$ [16]

Obrázek č. 3 - 2 - CMM LK Metrology Altera S [15]

Obrázek č. 3 - 3 – Laser scanner Nikon LC15Dx [16]

3.2. Průběh měření

Předtím, než jsem se začal věnovat měření částí po aplikaci antireflexních nástřiků, jsem změřil oba objekty bez nanesení nástřiku. Toto měření bylo provedeno laserovým skenerem upevněným na CMM LK Metrology Altera S-type. Hodnoty naměřené v tomto měření jsou v práci dále zmiňovány jako nominální hodnoty. Tyto hodnoty byly naměřeny pouze jednou, ale pro přehlednost je v grafech prezentuji tak, jako kdyby byly naměřené 20x.

Dále jsem přešel k hlavní části experimentu. Na obě měřené součásti jsem vždy nanesl vrstvu jednoho z vybraných nástřiků a pomocí laserového skeneru jsem oba objekty změřil. Všechna měření probíhala v jednom natočení laser skeneru, konkrétně A0, B0. Vzhledem k tomu, že jsem chtěl co nejvíce eliminovat vliv softwaru na měření, nebyla využita možnost softwarového filtrování hodnot. Následně jsem otřel nanesenou vrstvu ze součásti pomocí vlhkého ubrousku a povrch objektu jsem osušil suchým ubrouskem. Vlhký ubrousek jsem měnil po každých dvou setřeních.

Tento postup byl kvůli dlouhé době sublimace aplikován i po použití sublimačního nástřiku.

3.2.1.1. Měření prizmatu

Na prizmatu jsem měřil čtyři roviny. Dvě vodorovné roviny jsem pojmenoval rovina 1 a rovina 2. Dvě roviny, které spolu svírají pravý úhel, jsem pojmenoval rovina 3 a rovina 4. Každou rovinu jsem měřil samostatně, přičemž jsem získal čtyři mračna bodů, ze kterých jsem získával hodnoty pro určení rovinnosti a úhlu mezi rovinami. Pro určení prvků rovin jsem ovšem nevyužíval celá mračna bodů, abych nezahrnul přechodové body rovin, při jejichž měření vznikají odlehlé body.

Rovinnost jsem vyhodnocoval na rovinách 1 a 2. Změnu úhlu jsem vyhodnocoval mezi rovinami 1 a 3 a rovinami 2 a 4.

3.2.1.2. Měření koule

Přestože skenování při jedné poloze skeneru není schopné změřit celý povrch koule, reprezentuje tento postup běžnou problematiku měření složitých tvarových ploch. V praxi se často stává, že celou plochu nelze naskenovat najednou. Poloha skeneru nebyla při skenování koule měněna také z důvodu snahy o maximální přesnost měření. Změna polohy skeneru by snížila přesnost přibližně o jeden řád.

3.3. Vyhodnocování naměřených dat

Všechna naměřená data jsem přepsal do MS Excelu, kde jsem je následně zpracovával.

Jako první jsem se zabýval tloušťkou nanesené vrstvy. Tu jsem u rovinných ploch určoval ve směru normálového vektoru od roviny (zvýšení hodnoty na ose z). U kulové plochy jsem tloušťku nanesené vrstvy zjišťoval z rozdílu jejího nominálního a naměřeného průměru. Oba průměry koule byly softwarově vypočteny za pomoci metody nejmenších čtverců (Gaussovy metody). Tato metoda určuje průměr tak, aby součet čtverců všech odchylek od průměru byl minimální.

Při zjišťování ovlivnění geometrických tolerancí jsem u prizmatu určoval hodnotu rovinnosti a u koule odchylku tvaru kulové plochy. Pravoúhlé plochy na prizmatu jsem využil pro zjištění ovlivnění úhlových rozměrů.

Při zkoumání nerovnoměrnosti vrstvy vlivem nanášení nástřiku jsem pro zjištění odlehlých hodnot využil statistické metody Grubbsova testu a pro zjištění stability nanášení antireflexního nástřiku jsem využil diagramy stability. Ze všech naměřených hodnot jsem vždy vybral data relevantní pro vyhodnocení stanovených bodů práce. Ta jsem statisticky zpracoval, vložil do přehledných tabulek a z nich následně vytvořil grafické výstupy.

3.3.1. Grubbsův test

Grubbsův test je ve statistice využíván pro vyloučení odlehlých hodnot ze statistického souboru. Grubbsův test je založený na předpokladu normality, proto je před jeho využitím potřeba ověřit, zda lze data aproximovat normálním rozdělením. Grubbsův test je schopný detekovat a odstranit vždy pouze jednu odlehlou hodnotu najednou. Test a odstranění hodnoty se opakují do chvíle, kdy jsou všechny odlehlé hodnoty odstraněny. Test není vhodné používat pro datové soubory menší než 6, protože pak vycházejí téměř všechny hodnoty jako odlehlé. [18]

Vzorec pro výpočet střední hodnoty: $\overline{X} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} x_i$ [17]

Vzorec pro výpočet směrodatné odchylky: $s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \overline{X})^2}{n}}$ [17]

Vzorce pro výpočet testovacích kritérií T_{min} a T_{max}: $T_{min} = \frac{\overline{X} - x_{min}}{s}$ [18]

$$T_{max} = \frac{x_{max} - \overline{X}}{s} \text{ [18]}$$

3.3.2. Diagramy stability

Diagram stability se využívá pro zjištění stability a způsobilosti výrobního procesu. Diagram stability je konstruován z charakteristiky polohy $(\overline{X})$ a charakteristiky měnlivosti (s). Jako charakteristiku polohy využívám rozdíl mezi nominální a naměřenou hodnotou tloušťky nástřiku. Jako charakteristiku měnlivosti využívám rozdíl mezi nominální a naměřenou hodnotou směrodatné odchylky.

Pokud se křivky polohy a měnlivosti výrazně neodchylují od vodorovné osy, znamená to, že je proces stabilní. Pokud se jedna z křivek od osy odchyluje, je proces nestabilní. [18]

3.4. Očekávané výsledky

Pro tento experiment jsem stanovil tři hypotézy:

1. Tloušťka nanesené vrstvy bude největší u nástřiku D. Druhou největší tloušťku bude vykazovat nástřik A, třetí největší nástřik C a nejmenší nástřik B.
2. Laserové měření po aplikaci nástřiku C bude vykazovat nejmenší změnu geometrických vlastností.
   Měření po aplikaci nástřiku B bude vykazovat druhou nejmenší změnu geometrických vlastností.
   Měření po aplikaci nástřiku A bude vykazovat druhou největší změnu geometrických vlastností.
   Měření po aplikaci nástřiku D bude vykazovat největší změnu geometrických vlastností.
3. Nerovnoměrnost nanášení bude nejnižší u nástřiku D, druhou nejnižší bude vykazovat nástřik C, třetí nejnižší nástřik B a nejvyšší nástřik A.

Hypotéza č. 1 vychází z faktu, že nástřiky A a D nejsou určeny pro 3D skenování. Běžným účelem obou těchto nástřiků je překrytí původního povrchu. U nástřiku C předpokládám, že vzhledem k tomu, že jde o sublimační sprej, bude kvůli nárokům na relativně rychlou sublimaci zanechávat pouze velmi tenkou vrstvu.

Hypotéza č. 2 vychází z předpokladu, že nástřik C bude mít z výše uvedených důvodů nejmenší tloušťku a tudíž bude i nejméně ovlivňovat geometrické tolerance. Nástřik B bude ze stejného důvodu nejspíše také vykazovat nízké odchylky. Jelikož má sprej D formu kapaliny (a nikoliv suspenze jako ostatní vzorky), očekávám, že barva při zasychání vytvoří na prizmatu vrstvu s vodorovnou hladinou. Vzhledem k tomu, že nejsem schopný zaručit, aby byla plocha při nanášení spreje v přesně vodorovné pozici, předpokládám, že barva zaschne v rovnoměrné vrstvě, která však bude na jedné straně silnější než na druhé. U koule a šikmých ploch prizmatu předpokládám, že nanesená barva steče a vytvoří hladkou vrstvu, která nebude všude stejně silná.

Hypotéza č. 3 je založená na tom, že vzhledem k primárnímu účelu nástřiků B, C a D předpokládám, že je při výrobě kladen důraz na kvalitu trysky. Nástřik A slouží pro účel, při němž nehraje rovnoměrnost nanesené vrstvy žádnou roli – proto také očekávám, že bude vykazovat výrazné nerovnosti v nanesené vrstvě. U nástřiků B a C očekávám malé odchylky také kvůli hypotéze, že budou tvořit velmi tenké vrstvy. Vzhledem k tomu, že má nástřik D formu kapaliny, očekávám u něj pouze minimální nerovnoměrnost.

4. Vyhodnocení získaných dat

V této části práce vyhodnocuji veškerá naměřená data. Postupně se věnuji všem bodům výzkumu, které byly stanoveny v úvodu této práce a v kapitole popisující experiment.

4.1. Nominální hodnoty

Nejprve bylo třeba určit nominální hodnoty měřených objektů. Tato data jsou totiž nezbytná pro další vyhodnocování hlavních zkoumaných bodů. Nominální hodnoty byly získány měřením obou objektů bez nanesení nástřiku.

Výsledný protokol měření nominálních hodnot je obsažen v tabulkách č. 2 a 3.

Tabulka č. 2 - Měření nominálních hodnot 1

Plane									
Name	Type	Sigma	Range	Points	Shape Deviation	Y	Z		
Meas_Plane	Measured Plane	0,007	0,092	821793	0,026	258,75	-724,763		
Meas_Plane (2)	Measured Plane	0,007	0,115	613956	0,027	373,306	-724,759		
Meas_Plane (3)	Measured Plane	0,005	0,112	81765	0,021	312,113	-731,449		
Meas_Plane (4)	Measured Plane	0,003	0,032	95774	0,011	329,633	-731,279		
Sphere									
Name	Type	Sigma	Range	Points	Shape Deviation	Diameter	X	Y	Z
Meas_Sphere	Measured Sphere	0,003	0,044	40364	0,01	34,942	1105,866	635,534	-813,745

Tabulka č. 3 - Měření nominálních hodnot 2

Name	
Flyout Angle	44,994
Flyout Angle (2)	45,012
Flyout Angle (3)	90,115

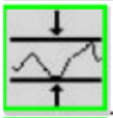
Relevantní položky protokolu jsou:

- **Sigma**: označuje směrodatnou odchylku tvaru měřené plochy
- **Range**: rozdíl mezi minimální a maximální naměřenou hodnotou
- **Z**: udává pozici v ose Z (svislá osa)
- **Diameter**: popisuje průměr měřené koule
- **Flyout Angle**: udává úhel mezi plochami 1 a 3
- **Flyout Angle (2)**: udává úhel mezi plochami 2 a 4

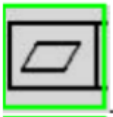
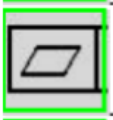
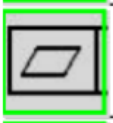
Přesnost mnou naměřených dat byla ověřena pomocí porovnání s daty získanými kontaktním měřením na CMM Carl Zeiss Prismo. Tato data jsem díky použití stejných měřených součástí mohl převzít z diplomové práce *Využití snímacího systému laser scanneru pro aplikace reverzního inženýrství [9]*.

Vzorec přesnosti CMM Carl Zeiss Prismo: $MPE_e = 0{,}5 \pm \frac{L}{500}\ [\mu m]$ [19]

Tabulka č. 4 - Ověření nominálních hodnot na Zeiss Prismo 1 [9]

	Měř.hod.	Jm.hod.	Horní tol.	Dolní tol.	Odchylka
	Tvar1				|---
	0.0014	0.0000	0.0020		0.0014
	Koule1_Průměr				|
	34.9367	34.9367	0.0010	-0.0010	0.0000

Tabulka č. 5 - Ověření nominálních hodnot na Zeiss Prismo 2 [9]

	Měř.hod.	Jm.hod.	Horní tol.	Dolní tol.	Odchylka
	Rovinnost1				|--
	0.0040	0.0000	0.0100		0.0040
	Rovinnost2				|--
	0.0041	0.0000	0.0100		0.0041
	Rovinnost3				|-
	0.0025	0.0000	0.0100		0.0025
	Rovinnost4				|--
	0.0034	0.0000	0.0100		0.0034
	Úhel mezi elementy1				---|
	89.9293	90.0000	0.1000	-0.1000	-0.0707

Při měření nominální hodnoty odchylky tvaru plochy vyšly hodnoty velmi vysoké, což bylo nejspíše způsobené lesklostí povrchu – při skenování vznikaly

odlesky a šum. Nejspíše tak vznikly odlehlé hodnoty, které hodnotu odchylky zvýšily.

I přesto však rozdíl mezi mnou naměřenou nominální hodnotou a daty získanými kontaktním měřením nebyl v žádném z případů větší než 0,01mm a veškerá mnou naměřená data byla po porovnání vyhodnocena jako použitelná.

4.2. Tloušťka nanesené vrstvy

Tato kapitola je věnována zkoumání tloušťky nanesené vrstvy nástřiku. Vyhodnocení je rozděleno na dvě části – první je věnována hodnotám naměřeným na prizmatu a druhá obsahuje data získaná při měření koule.

4.2.1. Prizma

V případě prizmatu byla tloušťka nástřiku určena odečtením nominální hodnoty od hodnoty naměřené po nanesení nástřiku. Obě tyto hodnoty byly měřeny na ose Z. Získané hodnoty tloušťky nástřiku při aplikaci různých druhů nástřiků jsou obsaženy v tabulce č. 6.

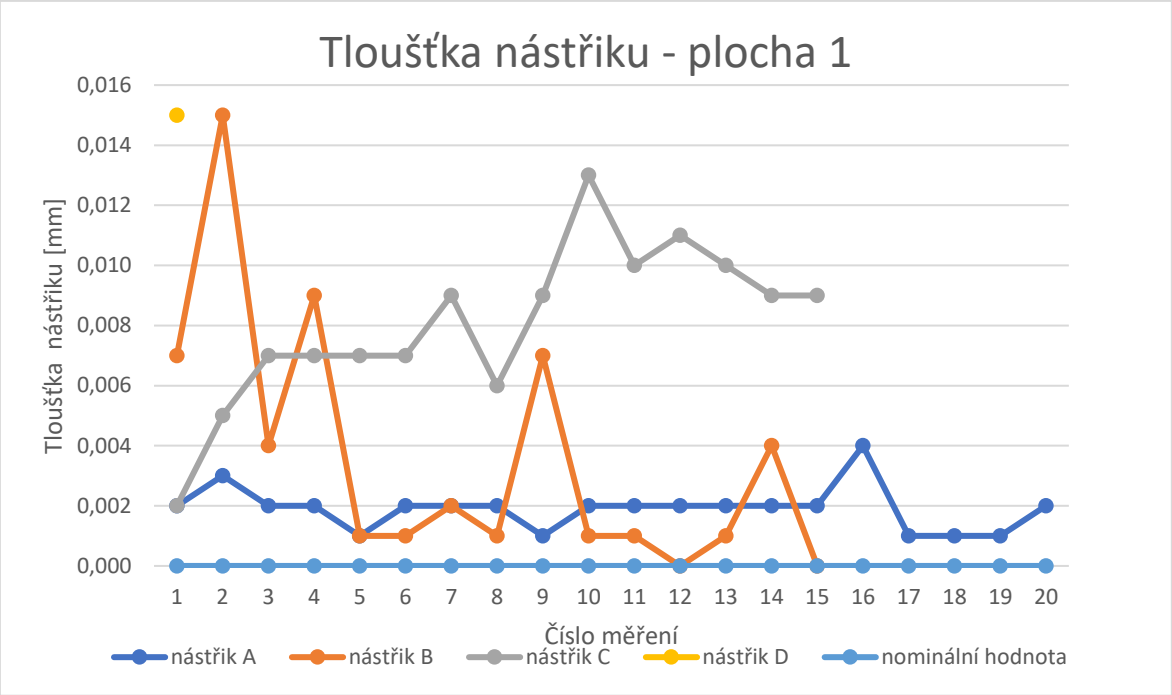
Z této tabulky a z grafů č. 1 a 2 lze vyčíst, že největší průměrnou tloušťku na ploše 1 vykazuje nástřik C (0,008mm). Nástřik C vykazuje nejvyšší průměrnou tloušťku také na ploše 2 (0,008 mm), nástřik B však na ploše 2 vykazuje také velmi vysokou průměrnou hodnotu tloušťky nástřiku (0,007 mm). Nástřik D vykazuje na ploše 1 i 2 nejvyšší hodnotu tloušťky nanesené vrstvy (plocha 1 – 0,015 mm, plocha 2 – 0,019 mm). Vzhledem k tomu, že bylo kvůli neomyvatelnosti nanesené vrstvy nemožné měření opakovat, nelze v tomto případě hovořit o průměrné hodnotě a porovnání s ostatními nástřiky je mírně komplikované.

Z tabulky i grafů je také zřejmé, že se tloušťka nástřiků na jednotlivých plochách prizmatu výrazně liší. Plocha 1 vykazuje větší variabilitu tloušťky u všech typů nástřiků. Tento jev mohl vzniknout tím, že nástřik byl vždy nejprve nanášen na plochu 1 a teprve poté na plochu 2. Při nástřiku plochy 2 tak mohlo dojít také k zasažení plochy 1.

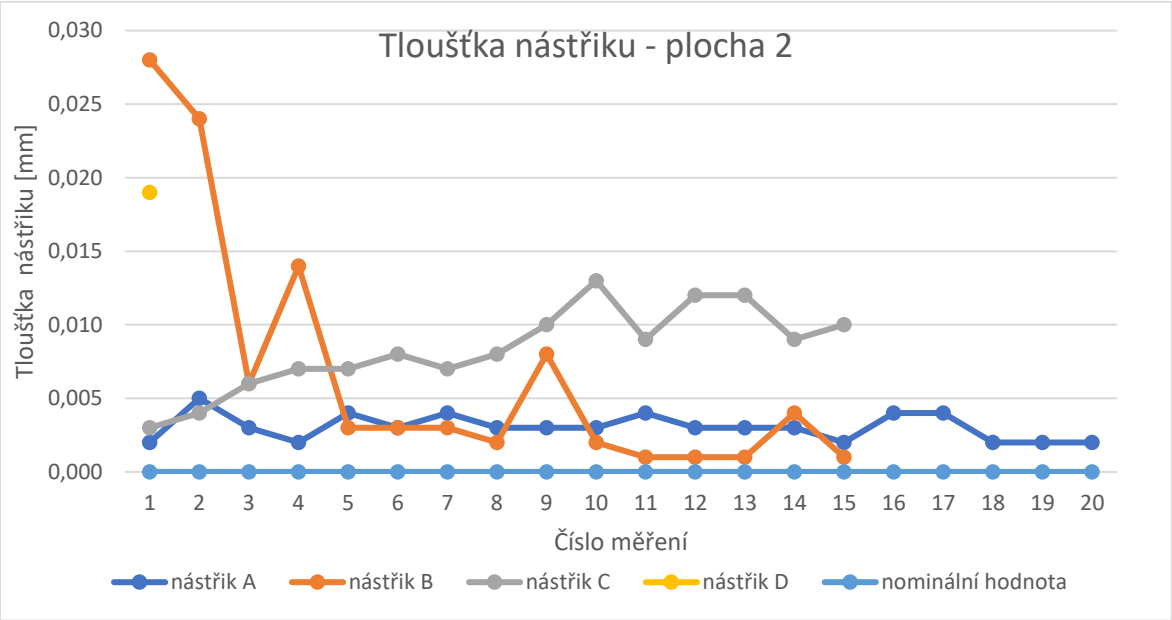
Druhým možným vysvětlením by mohlo být, že při začátku aplikace nástřiku na plochu 1 nebyla ještě ustálena ideální vzdálenost spreje od plochy 1. To mohlo způsobit aplikaci většího či menšího množství spreje na danou plochu.

Tabulka č. 6 - Vyhodnocení tloušťky nanesené vrstvy na prizma

	nástřik A		nástřik B		nástřik C		nástřik D	
	plocha1	plocha2	plocha1	plocha2	plocha1	plocha2	plocha1	plocha2
měření	z	z	z	z	z	z	z	z
nominální hodnota	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,002	0,002	0,007	0,028	0,002	0,003	0,015	0,019
2	0,003	0,005	0,015	0,024	0,005	0,004		
3	0,002	0,003	0,004	0,006	0,007	0,006		
4	0,002	0,002	0,009	0,014	0,007	0,007		
5	0,001	0,004	0,001	0,003	0,007	0,007		
6	0,002	0,003	0,001	0,003	0,007	0,008		
7	0,002	0,004	0,002	0,003	0,009	0,007		
8	0,002	0,003	0,001	0,002	0,006	0,008		
9	0,001	0,003	0,007	0,008	0,009	0,010		
10	0,002	0,003	0,001	0,002	0,013	0,013		
11	0,002	0,004	0,001	0,001	0,010	0,009		
12	0,002	0,003	0,000	0,001	0,011	0,012		
13	0,002	0,003	0,001	0,001	0,010	0,012		
14	0,002	0,003	0,004	0,004	0,009	0,009		
15	0,002	0,002	0,000	0,001	0,009	0,010		
16	0,004	0,004						
17	0,001	0,004						
18	0,001	0,002						
19	0,001	0,002						
20	0,002	0,002						
sm. Odchylka	0,0007	0,0009	0,0041	0,0083	0,0026	0,0027	-	-



Graf č. 1 - Grafické zpracování tloušťky nástřiku na ploše 1 prizmatu



Graf č. 2 - Grafické zpracování tloušťky nástřiku na ploše 2 prizmatu

4.2.2. Koule

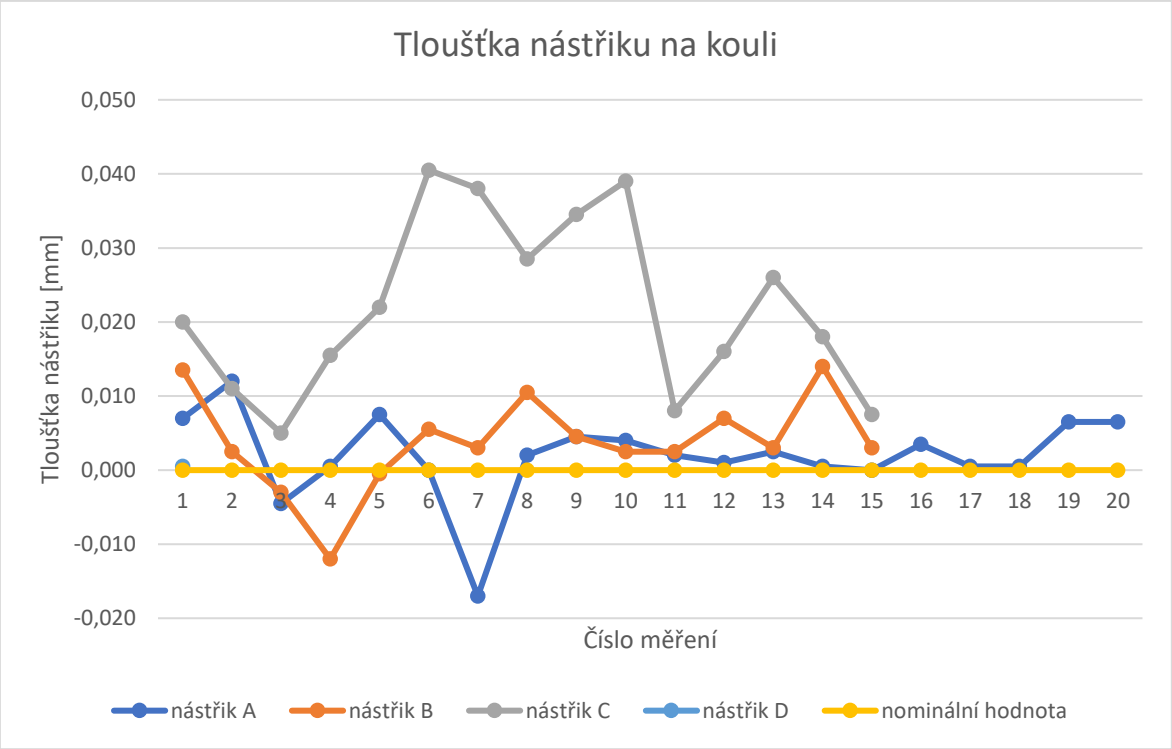
U koule byla tloušťka nástřiku určena odečtením nominální hodnoty průměru od hodnoty průměru naměřené po nanesení nástřiku. Následně byl výsledek vydělen číslem 2, aby tloušťka nástřiku nebyla započítána dvakrát.

Překvapivý je zde hlavně výsledek měření po aplikaci trvalého nástřiku. Naměřená hodnota průměru koule se od základní hodnoty neodchyluje vůbec.

V níže zmíněné tabulce č. 7 a grafu č. 3 lze také pozorovat, že jsou některé naměřené hodnoty nižší než nominální. Tato chyba je nejspíše způsobena tím, že jsem nástřiky na povrch koule nanášel svrchu. Algoritmus, který se ve skenovaném objektu pokouší najít tvar koule tak chybně vyhodnotil polohu skenovaného tělesa a následně chybně určil hodnotu průměru. Tuto chybu by bylo pravděpodobně možné odstranit měřením z více pozic skeneru. Tím bych získal ucelenější data, ze kterých by poté software byl schopen lépe vyhodnotit průměr koule.

Tabulka č. 7 - Vyhodnocení tloušťky naneseného nástřiku na kouli

	nástřik A	nástřik B	nástřik C	nástřik D
měření	průměr	průměr	průměr	průměr
nominální hodnota	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,007	0,014	0,020	0,000
2	0,012	0,003	0,011	
3	-0,005	-0,003	0,005	
4	0,000	-0,012	0,015	
5	0,008	0,000	0,022	
6	0,000	0,006	0,041	
7	-0,017	0,003	0,038	
8	0,002	0,011	0,029	
9	0,005	0,005	0,035	
10	0,004	0,003	0,039	
11	0,002	0,003	0,008	
12	0,001	0,007	0,016	
13	0,003	0,003	0,026	
14	0,000	0,014	0,018	
15	0,000	0,003	0,008	
16	0,003			
17	0,000			
18	0,000			
19	0,006			
20	0,006			
sm. Odchylka	0,0056	0,0062	0,0116	-



Graf č. 3 - Grafické znázornění tloušťky nástřiku na kouli

4.3. Ovlivnění geometrických specifikací

Dalším bodem, kterým se tato práce zabývá, je zkoumání změny geometrických specifikací způsobené zmatňujícím sprejem. Pro vyhodnocení tohoto bodu využívám u prizmatu hodnoty velikostí úhlů (Flyout Angle a Flyout Angle 2), rozdíl mezi minimální a maximální naměřenou hodnotou (Range) a směrodatnou odchylku rovinnosti (Sigma) a u koule rozdíl mezi minimální a maximální naměřenou hodnotou (Range) a směrodatnou odchylku tvaru kulové plochy (Sigma).

Hodnoty Range a Sigma jsou u prizmatu vyhodnocovány z point cloudu přibližně o 800 000 bodech u plochy 1 a 600 000 bodech u plochy 2. U koule byla data vyhodnocována z point cloudu o 40 000 bodech.

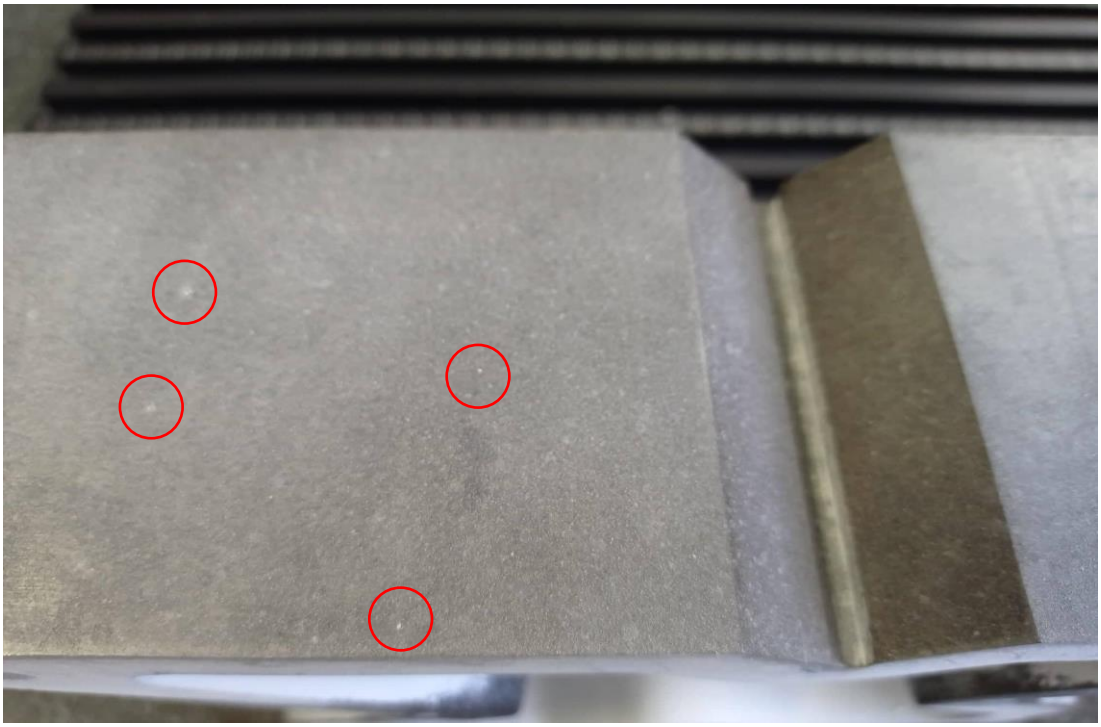
4.3.1. Prizma

V této podkapitole se budu věnovat zkoumání změn rovinnosti a úhlů vlivem nanesení různých druhů nástřiků u prizmatu.

4.3.1.1. Odchylka rovinnosti

Nejprve jsem u prizmatu vyhodnocoval odchylku rovinnosti. V tabulkách č. 8 a 9 a v grafech č. 4,5 a 6,7 lze vidět, že nástřiky A, B a D vykazují hodnoty velmi podobné hodnotě nominální, dokonce pod ni v některých případech klesají. Vyšší a nekonzistentní hodnoty nástřiku C jsou pravděpodobně způsobeny vytvářením nánosu nástřiku na trysce spreje. Tento nános se začal tvořit již po aplikaci třetího nástřiku. Po jeho vytvoření se při aplikaci nástřiku na povrchu objektu začaly tvořit drobné hrudky (Obrázek č. 4-1), které pravděpodobně způsobily takto velký rozsah naměřených hodnot.

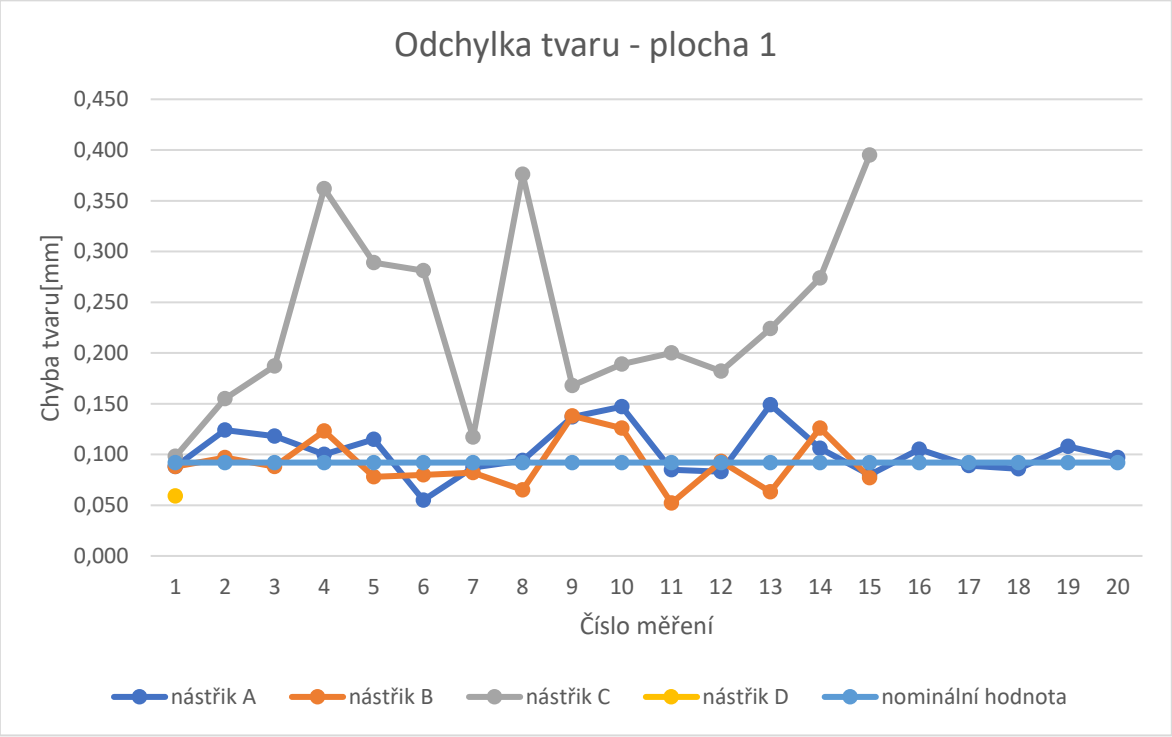
Nejmenší odchylku rovinnosti vykazuje nástřik D, což je vzhledem k tomu, že tento nástřik není primárně určen pro laserové skenování, překvapivý výsledek. U nástřiku B je patrné, že měření 14 a 15 na ploše 2 vykazuje výraznou odchylku od předchozích hodnot. To by mohlo znamenat, že jsou výsledkem těchto dvou měření odlehlé hodnoty.



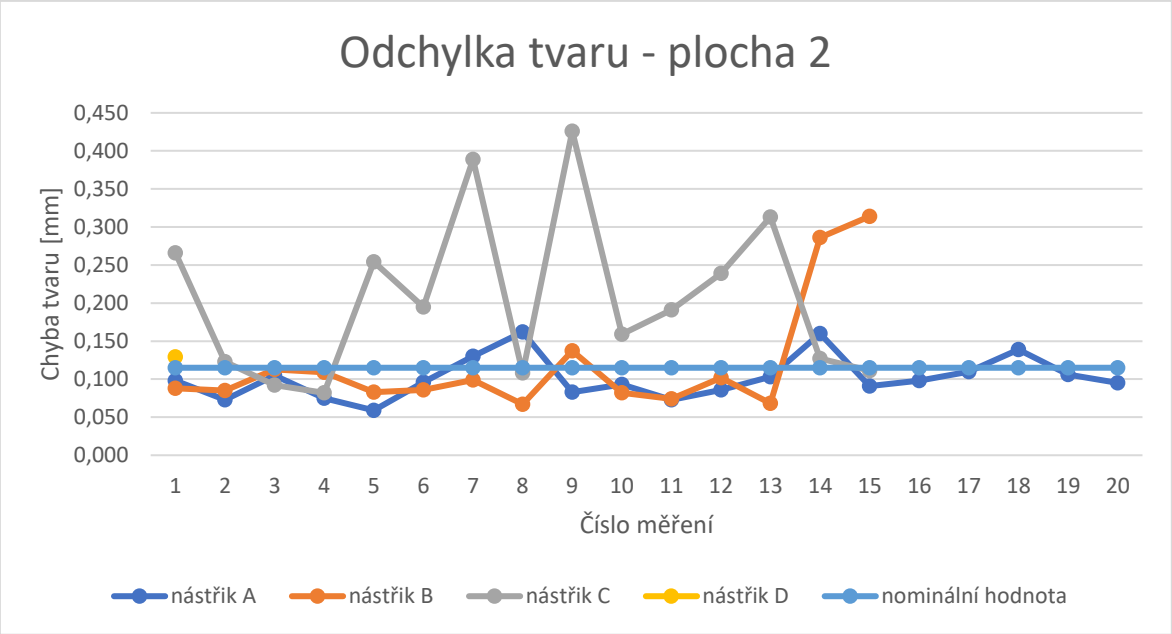
Obrázek č. 4-1 - Hrudky vzniklé při nanášení nástřiku C na prizma

Tabulka č. 8 - Naměřené hodnoty odchylky tvarových ploch na prizmatu

	nástřik A		nástřik B		nástřik C		nástřik D	
	plocha1	plocha2	plocha1	plocha2	plocha1	plocha2	plocha1	plocha2
měření	range	range	range	range	range	range	range	range
nominální hodnota	0,092	0,115	0,092	0,115	0,092	0,115	0,092	0,115
1	0,088	0,098	0,088	0,088	0,098	0,266	0,059	0,129
2	0,124	0,073	0,097	0,085	0,155	0,123		
3	0,118	0,105	0,088	0,113	0,187	0,092		
4	0,100	0,075	0,123	0,109	0,362	0,082		
5	0,115	0,059	0,078	0,083	0,289	0,254		
6	0,055	0,096	0,080	0,086	0,281	0,195		
7	0,087	0,130	0,082	0,099	0,117	0,389		
8	0,094	0,162	0,065	0,067	0,376	0,108		
9	0,137	0,083	0,138	0,137	0,168	0,426		
10	0,147	0,093	0,126	0,082	0,189	0,159		
11	0,085	0,073	0,052	0,074	0,200	0,191		
12	0,083	0,086	0,093	0,102	0,182	0,239		
13	0,149	0,103	0,063	0,068	0,224	0,313		
14	0,106	0,160	0,126	0,286	0,274	0,127		
15	0,080	0,091	0,077	0,314	0,395	0,111		
16	0,105	0,098						
17	0,089	0,110						
18	0,086	0,139						
19	0,108	0,106						
20	0,097	0,095						
sm. Odchylka	0,0231	0,0268	0,0249	0,0731	0,0895	0,1042	-	-



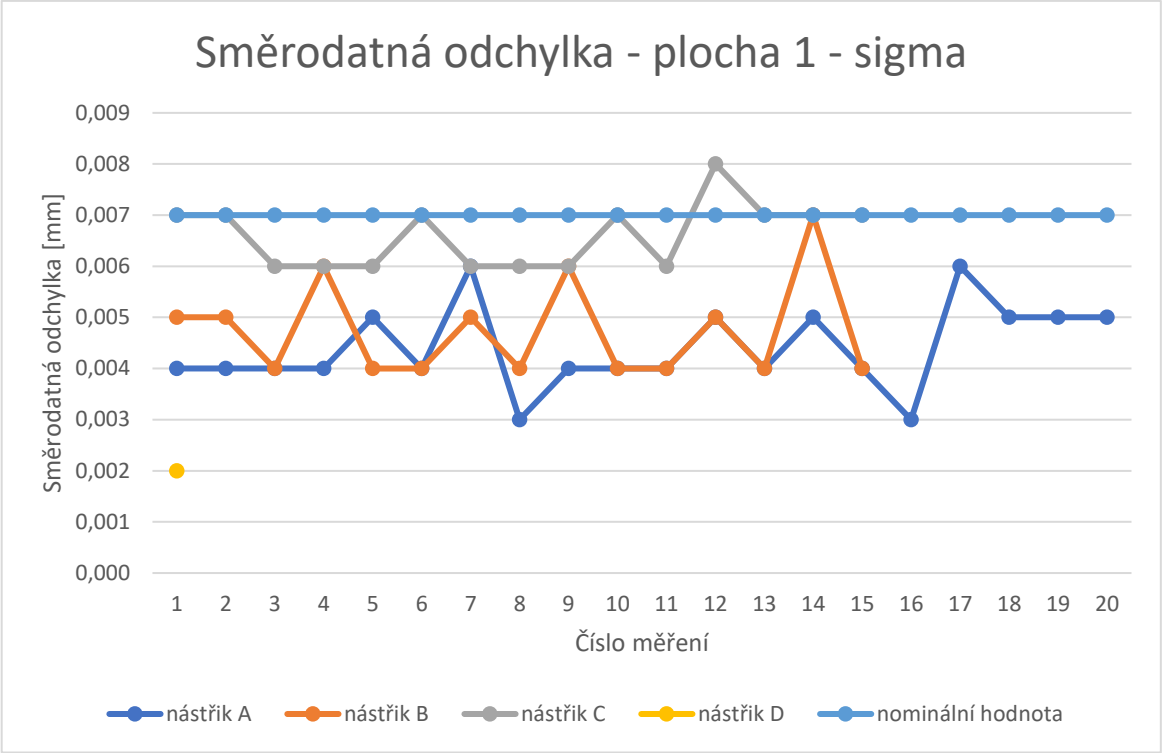
Graf č. 4 - Grafické znázornění odchylky tvaru plochy 1 na prizmatu



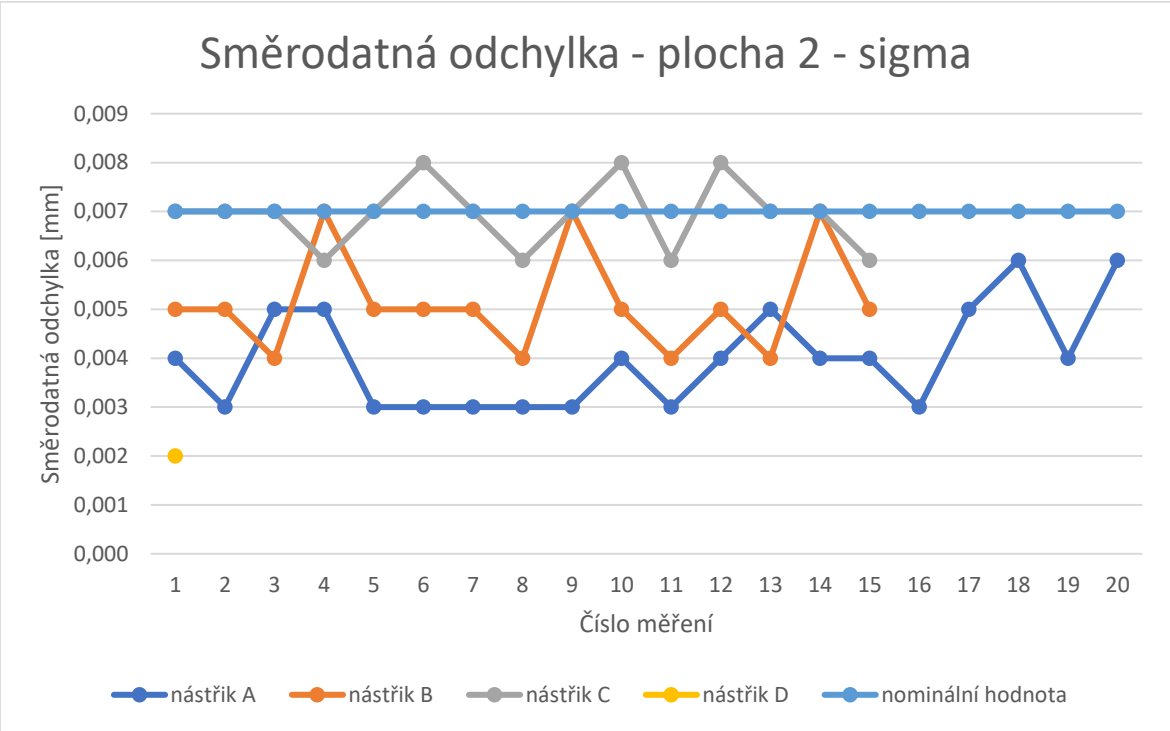
Graf č. 5 - Grafické znázornění odchylky tvaru plochy 2 na prizmatu

Tabulka č. 9 - směrodatné odchylky rovinnosti

	nástřik A		nástřik B		nástřik C		nástřik D	
	plocha1	plocha2	plocha1	plocha2	plocha1	plocha2	plocha1	plocha2
měření	sigma	sigma	sigma	sigma	sigma	sigma	sigma	sigma
nominální hodnota	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007
1	0,004	0,004	0,005	0,005	0,007	0,007	0,002	0,002
2	0,004	0,003	0,005	0,005	0,007	0,007		
3	0,004	0,005	0,004	0,004	0,006	0,007		
4	0,004	0,005	0,006	0,007	0,006	0,006		
5	0,005	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007		
6	0,004	0,003	0,004	0,005	0,007	0,008		
7	0,006	0,003	0,005	0,005	0,006	0,007		
8	0,003	0,003	0,004	0,004	0,006	0,006		
9	0,004	0,003	0,006	0,007	0,006	0,007		
10	0,004	0,004	0,004	0,005	0,007	0,008		
11	0,004	0,003	0,004	0,004	0,006	0,006		
12	0,005	0,004	0,005	0,005	0,008	0,008		
13	0,004	0,005	0,004	0,004	0,007	0,007		
14	0,005	0,004	0,007	0,007	0,007	0,007		
15	0,004	0,004	0,004	0,005	0,007	0,006		
16	0,003	0,003						
17	0,006	0,005						
18	0,005	0,006						
19	0,005	0,004						
20	0,005	0,006						
sm. Odchylka	0,0008	0,0010	0,0009	0,0010	0,0006	0,0007	-	-



Graf č. 10 - Grafické znázornění směrodatné odchylky plochy 1 na prizmatu



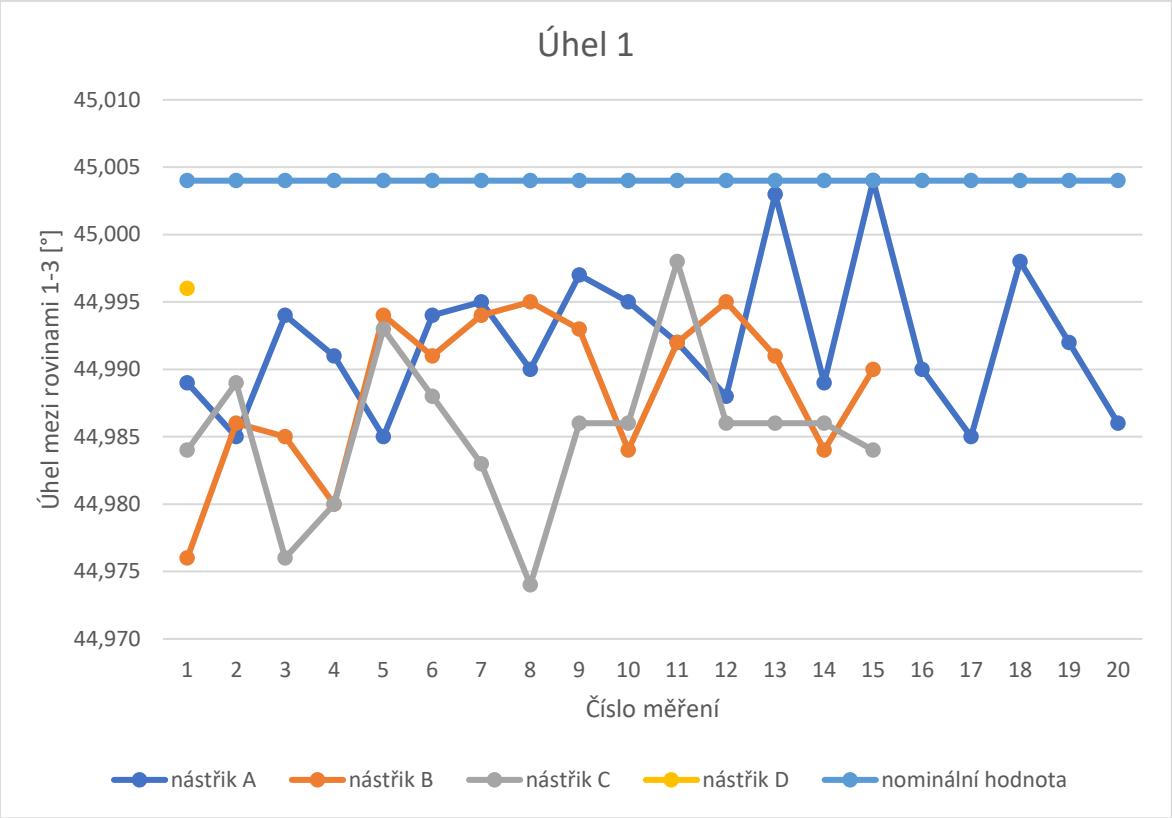
Graf č. 11 - Grafické znázornění směrodatné odchylky plochy 2 na prizmatu

4.3.1.2. *Úhel*

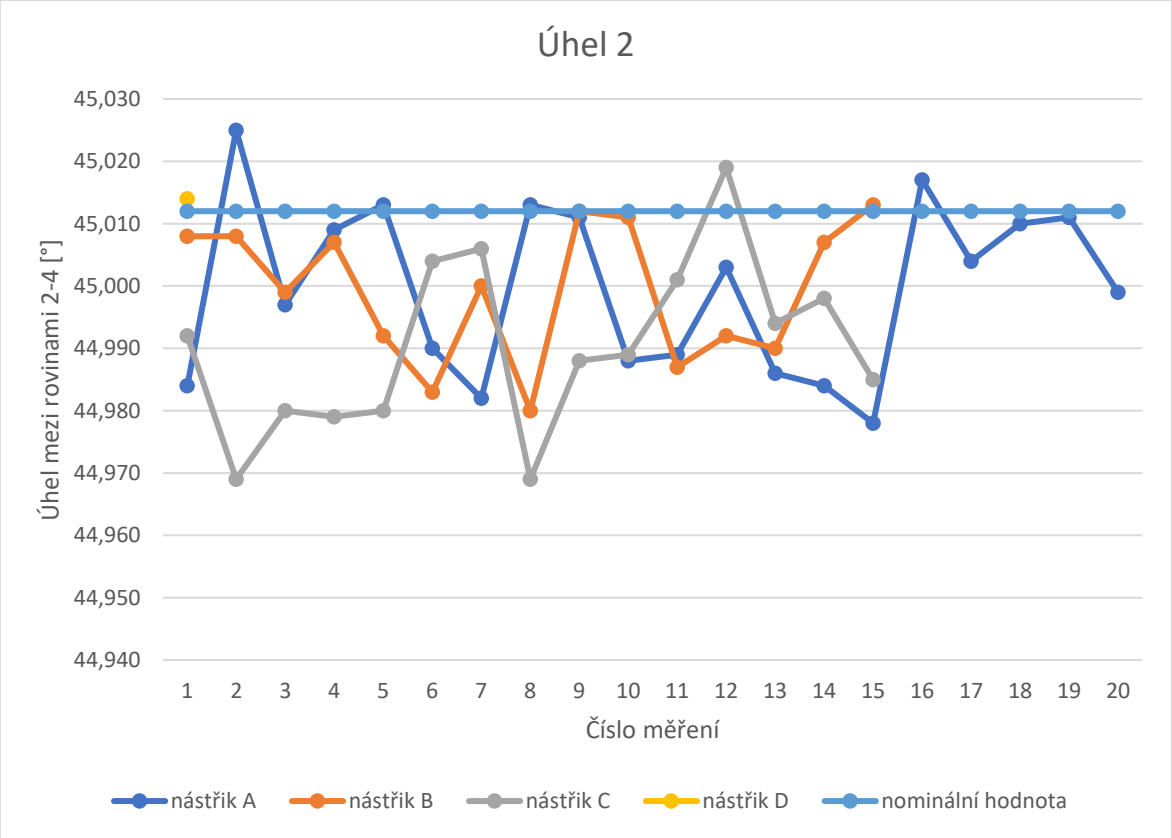
Další geometrickou specifikací, kterou se u prizmatu zabývám, je úhel mezi plochami 1 a 3 (úhel 1) a plochami 2 a 4 (úhel 2). Z tabulky č. 12 a grafů č. 6 a 7 je patrné, že se úhel po nanesení každého nástřiku zmenšil. Nástřik D vykazuje nejmenší změnu naměřené velikosti úhlu. Oproti tomu nástřik C vykazuje průměrnou odchylku 0,03°, což je v porovnání s ostatními nástřiky poměrně vysoká hodnota.

Tabulka č. 12 - vyhodnocení úhlů mezi 1 a 2

	nástřik A		nástřik B		nástřik C		nástřik D	
měření	úhel 1	úhel 2	úhel 1	úhel 2	úhel 1	úhel 2	úhel 1	úhel 2
nominální hodnota	45,004	45,012	45,004	45,012	45,004	45,012	45,004	45,012
1	44,989	44,984	44,976	45,008	44,984	44,992	44,996	45,014
2	44,985	45,025	44,986	45,008	44,989	44,969		
3	44,994	44,997	44,985	44,999	44,976	44,980		
4	44,991	45,009	44,980	45,007	44,980	44,979		
5	44,985	45,013	44,994	44,992	44,993	44,980		
6	44,994	44,990	44,991	44,983	44,988	45,004		
7	44,995	44,982	44,994	45,000	44,983	45,006		
8	44,990	45,013	44,995	44,980	44,974	44,969		
9	44,997	45,011	44,993	45,012	44,986	44,988		
10	44,995	44,988	44,984	45,011	44,986	44,989		
11	44,992	44,989	44,992	44,987	44,998	45,001		
12	44,988	45,003	44,995	44,992	44,986	45,019		
13	45,003	44,986	44,991	44,990	44,986	44,994		
14	44,989	44,984	44,984	45,007	44,986	44,998		
15	45,004	44,978	44,990	45,013	44,984	44,985		
16	44,990	45,017						
17	44,985	45,004						
18	44,998	45,010						
19	44,992	45,011						
20	44,986	44,999						
sm. Odchylka	0,0054	0,0134	0,0057	0,0108	0,0057	0,0135	-	-



Graf č. 6 - Grafické znázornění úhlu 1



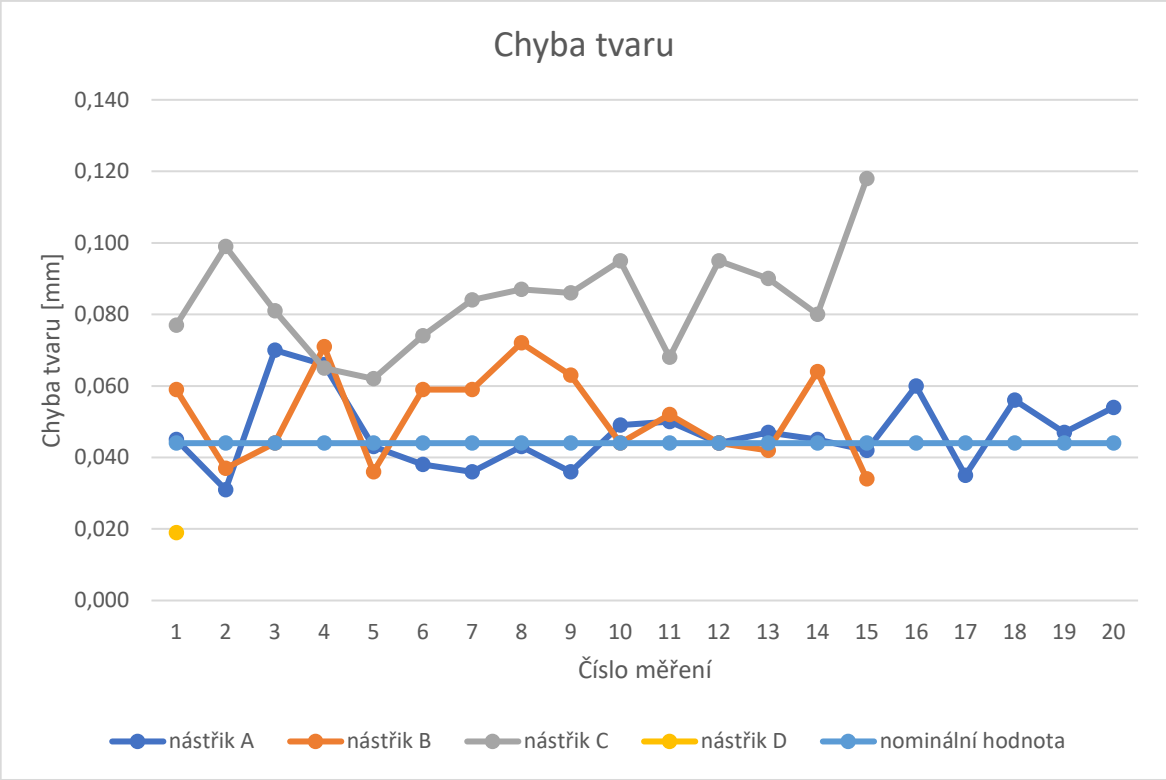
Graf č. 7 - Grafické znázornění úhlu 2

4.3.2. Koule

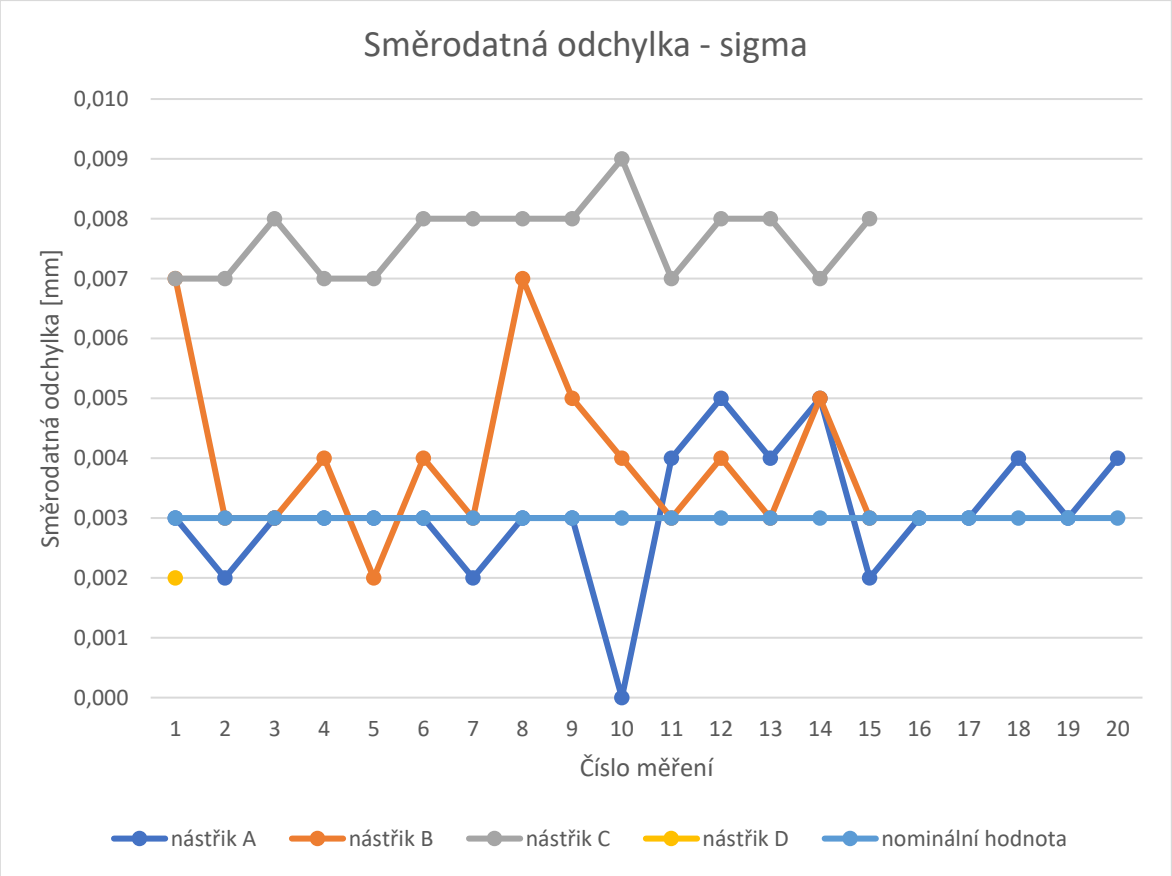
V této podkapitole se budu věnovat zkoumání změn tvaru kulové plochy vlivem nanesení různých druhů nástřiků na skenovaný objekt. Z tabulky č. 13 a grafů č. 8 a 9 je patrné, že odchylka tvaru u nástřiků A a B je velmi podobná nominální hodnotě. Nástřik C opět vykazuje vyšší hodnotu odchylky tvarové plochy. Tento jev má pravděpodobně stejnou příčinu jako uvádím u prizmatu. Trvalý nástřik opět vykazuje nejnižší hodnotu odchylky tvaru ze všech použitých nástřiků.

Tabulka č. 13 - Naměřené hodnoty odchylky kulové plochy a hodnoty sigma

	nástřik A		nástřik B		nástřik C		nástřik D	
měření	range	sigma	range	sigma	range	sigma	range	sigma
nominální hodnota	0,044	0,003	0,044	0,003	0,044	0,003	0,044	0,003
1	0,045	0,003	0,059	0,007	0,077	0,007	0,019	0,002
2	0,031	0,002	0,037	0,003	0,099	0,007		
3	0,070	0,003	0,044	0,003	0,081	0,008		
4	0,066	0,003	0,071	0,004	0,065	0,007		
5	0,043	0,003	0,036	0,002	0,062	0,007		
6	0,038	0,003	0,059	0,004	0,074	0,008		
7	0,036	0,002	0,059	0,003	0,084	0,008		
8	0,043	0,003	0,072	0,007	0,087	0,008		
9	0,036	0,003	0,063	0,005	0,086	0,008		
10	0,049	0,000	0,044	0,004	0,095	0,009		
11	0,050	0,004	0,052	0,003	0,068	0,007		
12	0,044	0,005	0,044	0,004	0,095	0,008		
13	0,047	0,004	0,042	0,003	0,090	0,008		
14	0,045	0,005	0,064	0,005	0,080	0,007		
15	0,042	0,002	0,034	0,003	0,118	0,008		
16	0,060	0,003						
17	0,035	0,003						
18	0,056	0,004						
19	0,047	0,003						
20	0,054	0,004						
sm. Odchylka	0,0100	0,0011	0,0123	0,0014	0,0140	0,0006	-	-



Graf č. 8 - Grafické znázornění odchylky tvaru kulové plochy



Graf č. 9 - Grafické znázornění směrodatné odchylky kulové plochy

4.4. Nerovnoměrnost vrstvy vlivem nanášení nástřiku

Dalším zkoumaným bodem je nerovnoměrnost vrstvy vlivem nanášení nástřiku. Pro vyhodnocení tohoto bodu jsem použil Grubbsův test a diagramy stability.

4.4.1. Grubbsův test

Po vyhodnocení naměřených dat pomocí Grubbsova testu vychází, že většina naměřených dat nespadá do odlehlých hodnot. Ovšem jak lze vyčíst z tabulek č. 14 a 15, je zde pár výjimek. Malé množství hodnot, které jsou výrazně rozdílné od průměru, vykazuje měření všech typů nástřiků. Nejvýraznější odchylku vykazuje měření nástřiku A na tvarové ploše.

Tabulka č. 14 - Výsledky Grubbsova testu část 1

			plocha 1	plocha 2	plocha 1	plocha 2
T min	úhel 1	úhel 2	sigma	sigma	range	range
n19=2,932 nástřik A	1,321	1,616	1,750	1,000	2,060	1,593
n14=2,759 nástřik B	2,241	1,789	0,790	1,107	1,597	0,718
n14=2,759 nástřik C	1,961	1,571	0,982	1,373	1,509	1,180
T max						
n19=2,932 nástřik A	2,214	1,892	2,000	2,000	2,004	2,245
n14=2,759 nástřik B	1,120	1,275	2,441	1,823	1,860	2,659
n14=2,759 nástřik C	2,217	2,135	2,291	1,569	1,808	2,120

Tabulka č. 15 - Výsledky Grubbsova testu část 2

plocha 1	plocha 2	plocha 1	plocha 2	koule	koule	koule	koule
shape	shape	z	z	range	shape	průměr	sigma
2,003	1,345	1,286	1,214	1,586	3,382	3,382	2,842
1,044	1,320	0,879	0,692	1,463	2,535	2,535	1,414
1,229	1,616	2,362	1,940	1,574	1,463	1,463	1,118
2,557	1,915	3,000	2,255	2,316	1,787	1,787	1,742
2,196	2,019	2,784	2,565	1,626	1,654	1,654	2,121
1,682	1,585	1,921	1,698	2,421	1,599	1,599	2,236

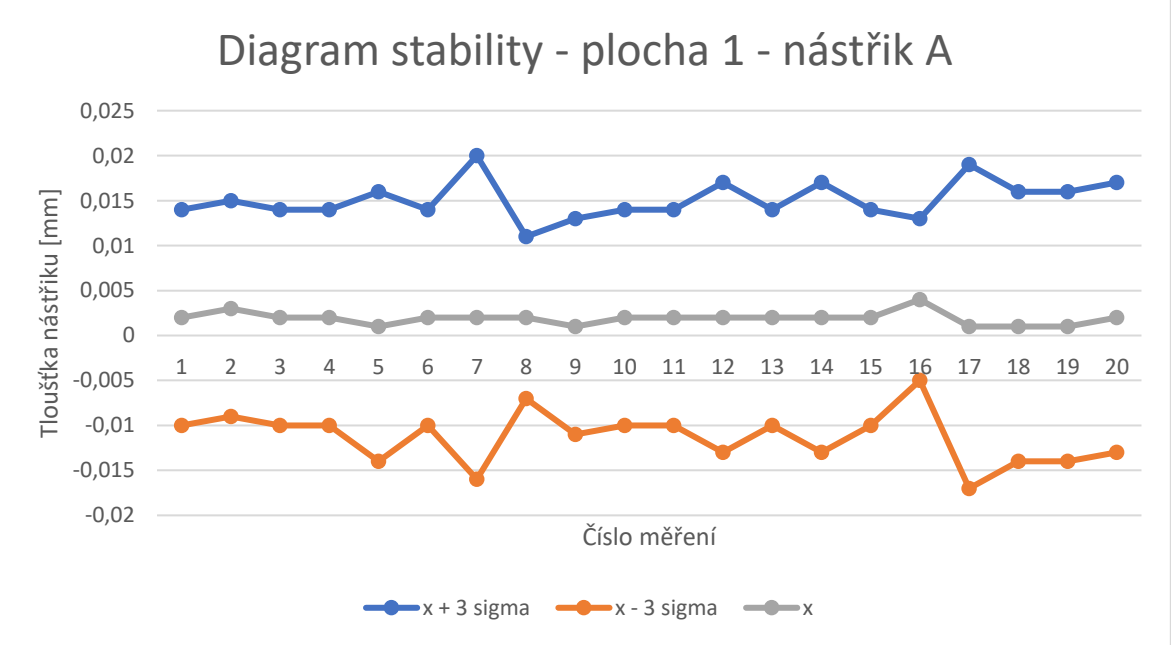
4.4.2. Diagramy stability

Druhou částí zkoumání nerovnoměrnosti vlivem nanášení nástřiku je zhotovení diagramů stability. Tyto diagramy mohly být však vytvořeny pouze pro nástřiky A, B a C. Nástřik D není omyvatelný a neumožňuje tedy opakování měření.

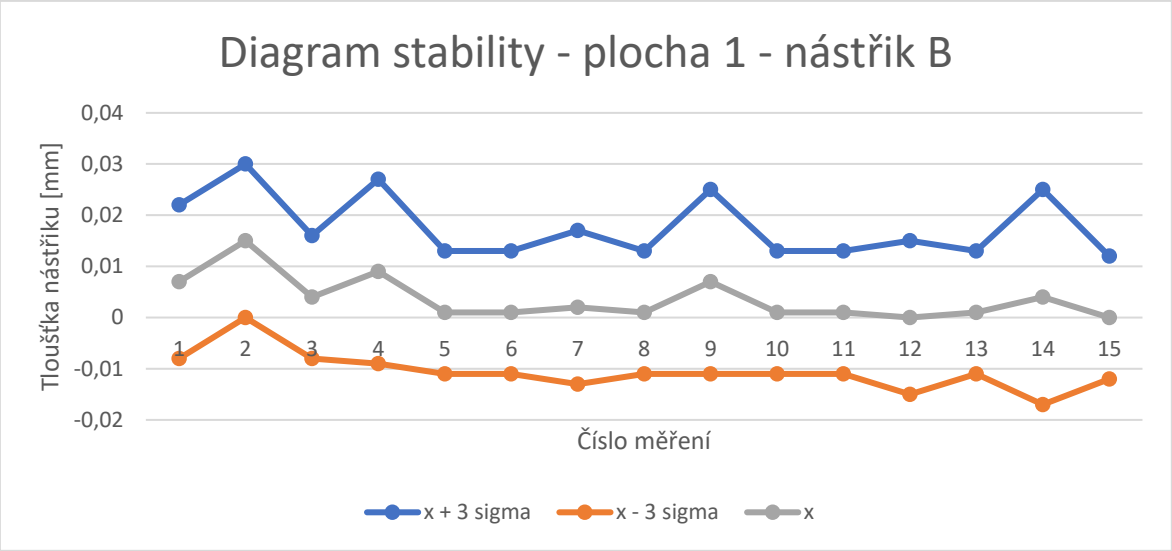
4.4.2.1. Prizma

Nejprve jsem vytvořil diagramy stability pro prizma. Na grafech, které se týkají plochy 1 (Graf č. 10, 11, 12) je patrné, že je aplikace nástřiku A velmi stabilní proces. U ostatních dvou nástřiků je možné ze začátku pozorovat vyšší rozkolísanost naměřených hodnot. To mohlo být způsobeno tím, že jejich nanášení nebylo bez předchozí zkušenosti tak snadné, jako u nástřiku A.

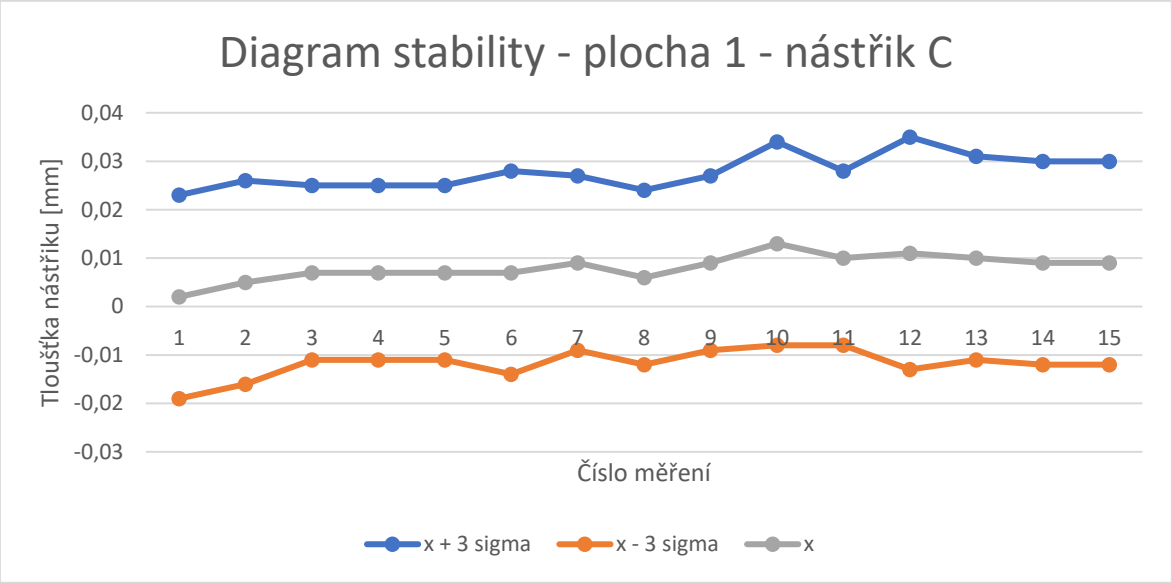
Tentýž jev je možné pozorovat také v grafech týkajících se plochy 2 (Graf č. 13, 14, 15). Například u nástřiku B činí rozdíl mezi tloušťkou první a šesté aplikace téměř 0,03 mm.



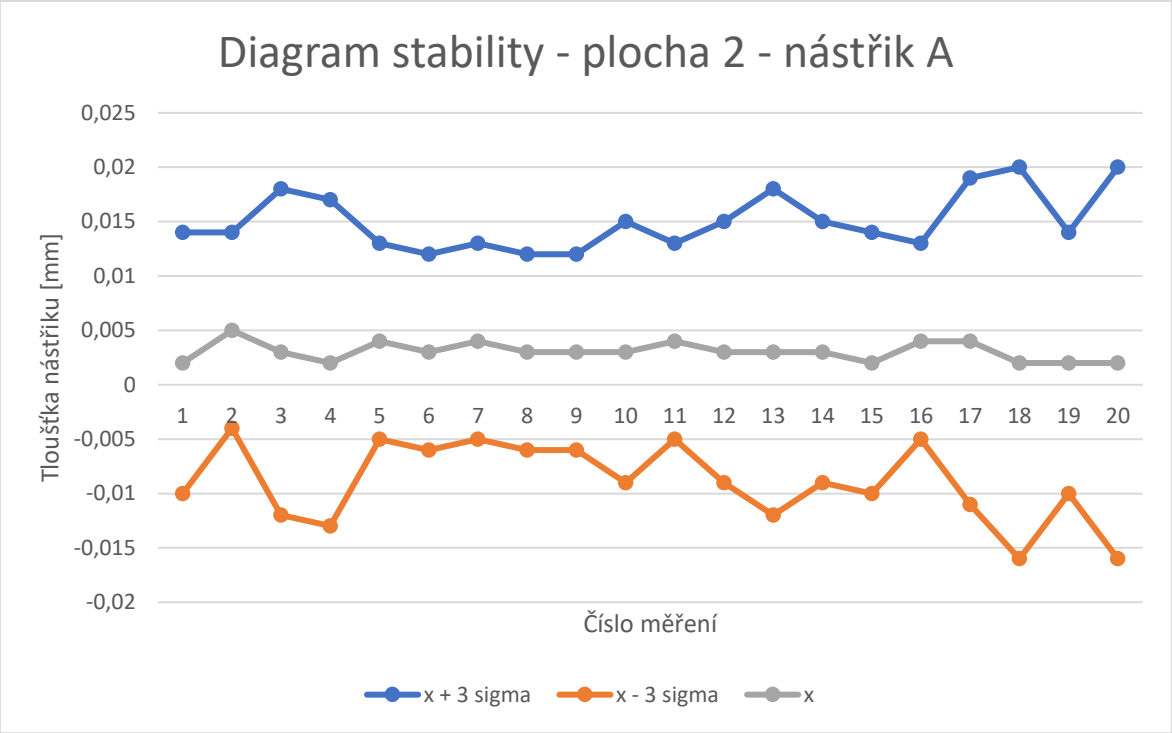
Graf č. 10 - Graf zobrazující diagram stability na ploše 1 pro nástřik A



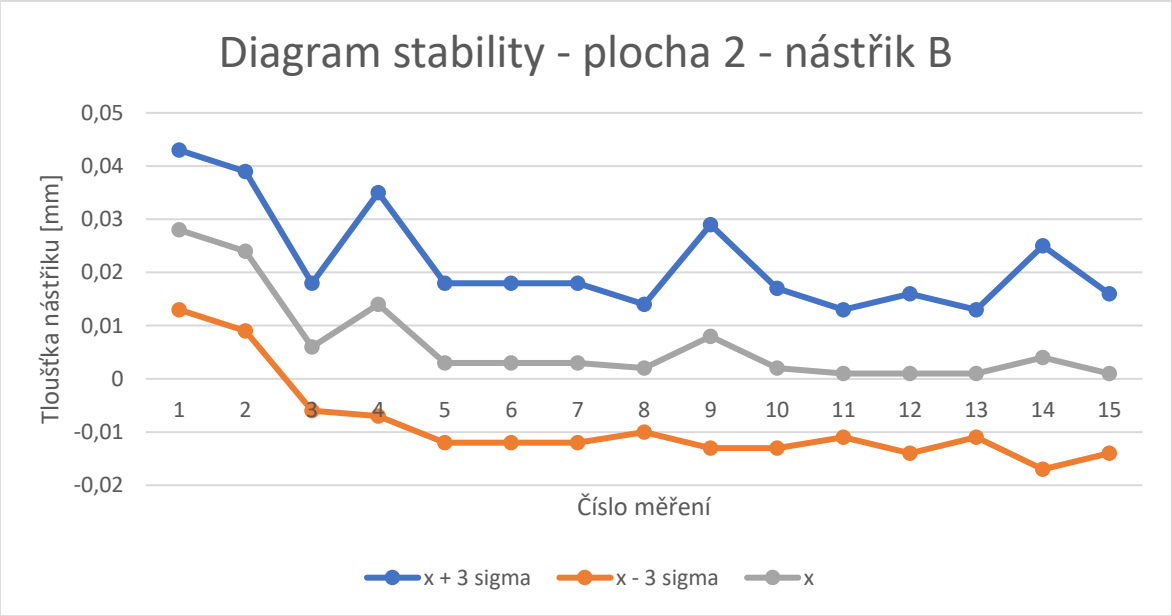
Graf č. 11 - Graf zobrazující diagram stability na ploše 1 pro nástřik B



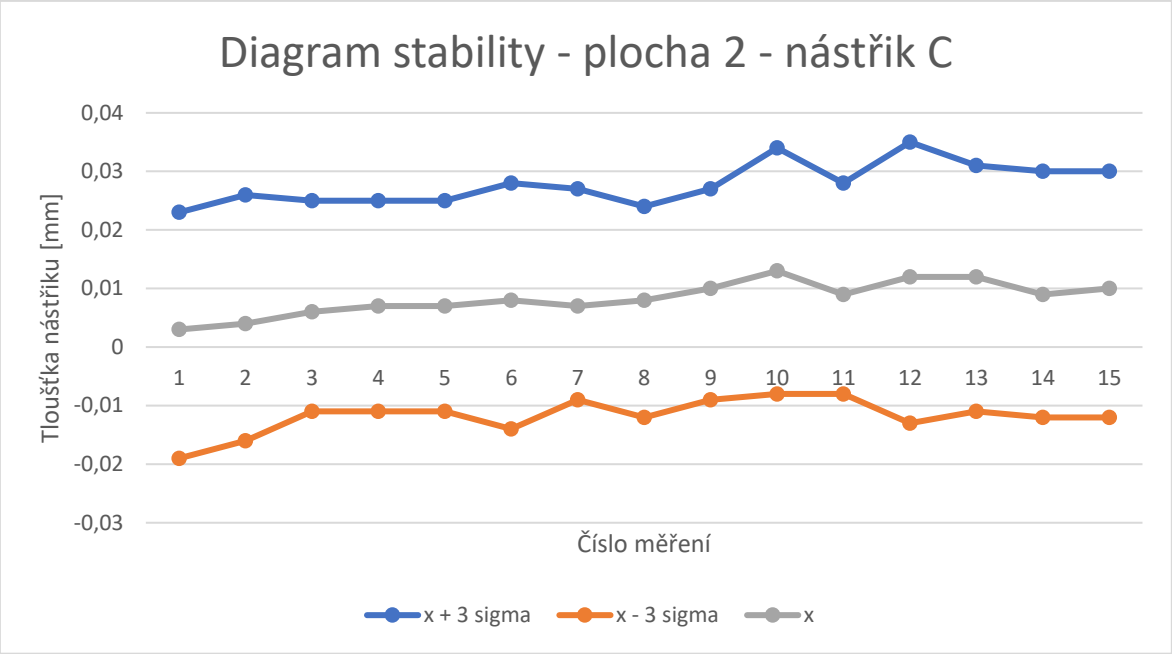
Graf č. 12 - Graf zobrazující diagram stability na ploše 1 pro nástřik C



Graf č. 13 - Graf zobrazující diagram stability na ploše 2 pro nástřik A



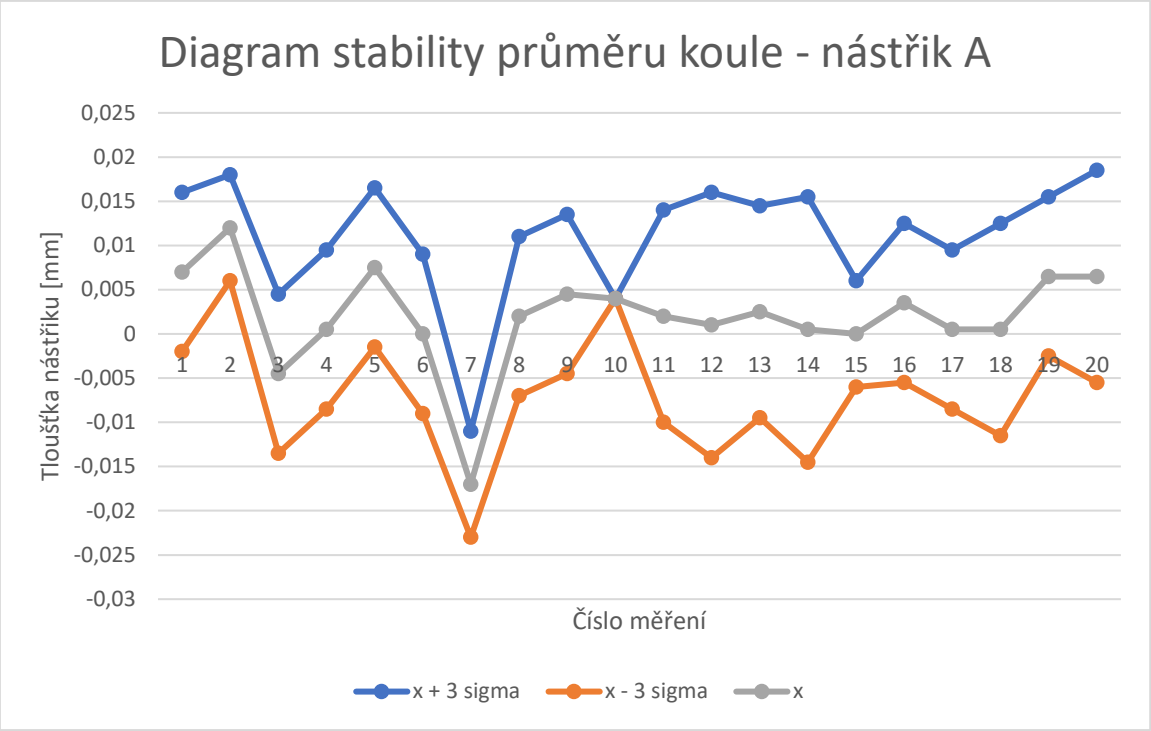
Graf č. 14 - Graf zobrazující diagram stability na ploše 2 pro nástřik B



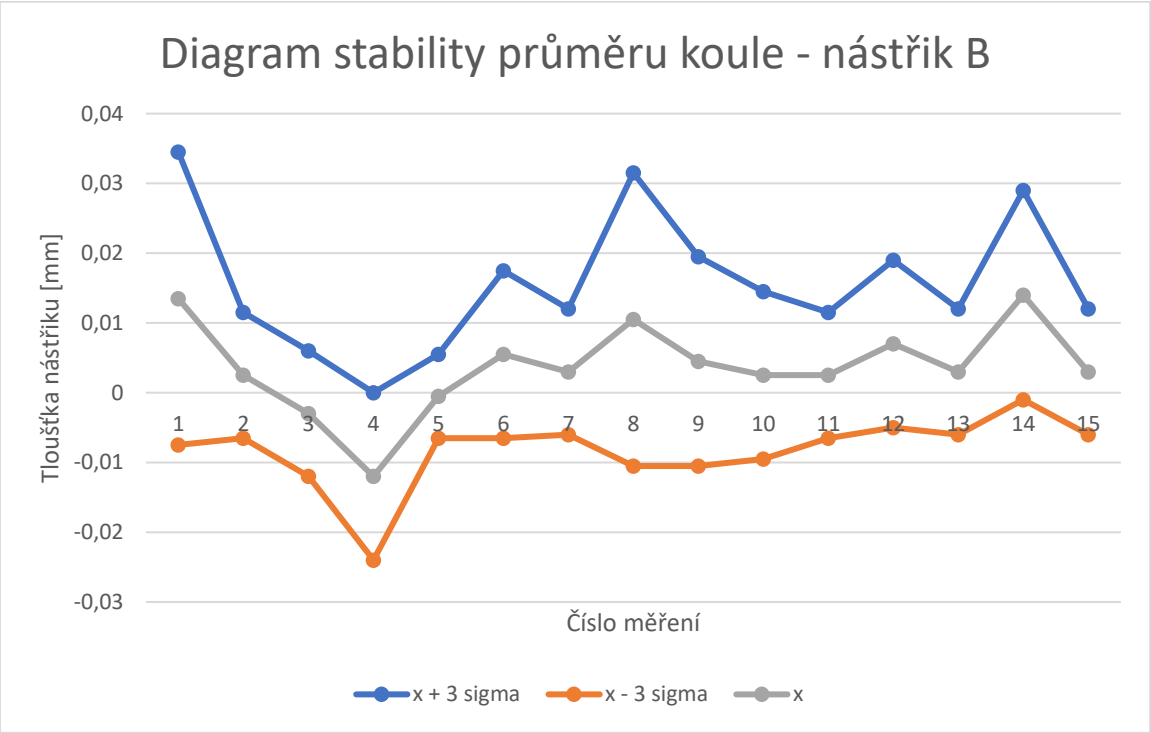
Graf č. 15 - Graf zobrazující diagram stability na ploše 2 pro nástřik C

4.4.2.2. Koule

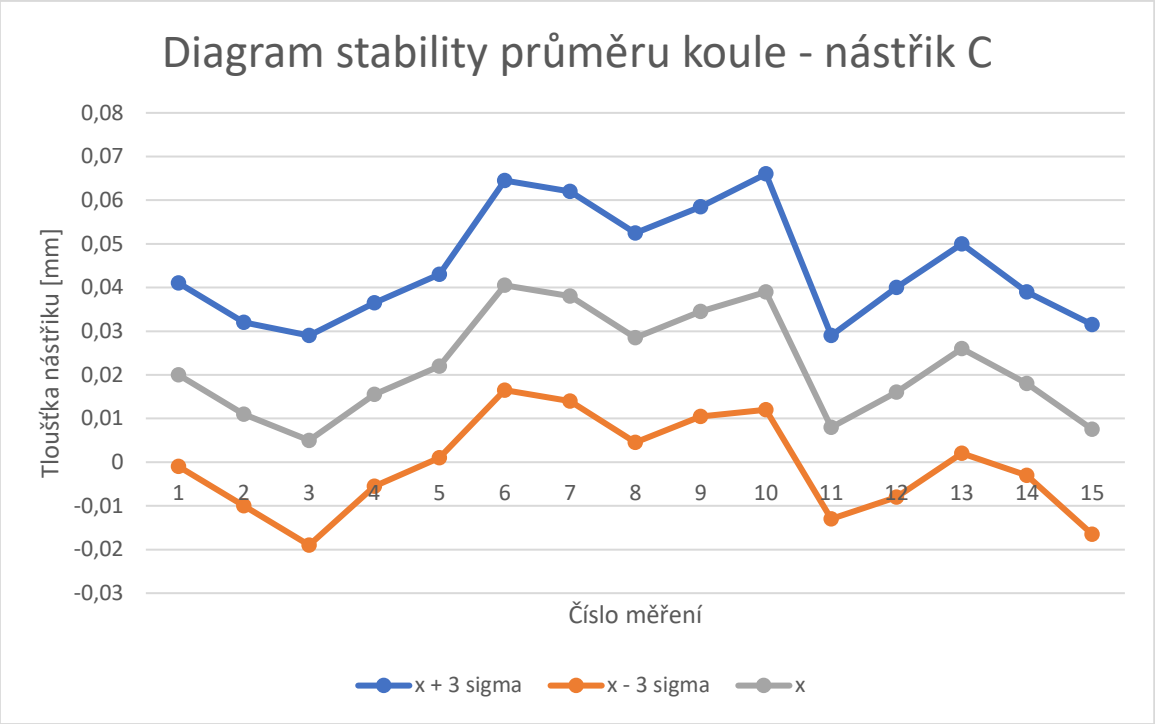
Z grafů, které se věnují kouli (Graf č. 16, 17, 18), je patrné, že je proces nanášení nástřiku na plochu koule velmi nestabilní. Při měření některých nástřiků dokonce docházelo k naměření nižších hodnot průměru než nominálních. Vysvětlení této chyby je již popsáno v kapitole věnující se tloušťce nástřiku u koule (kapitola 4.2.2.).



Graf č. 16 - Graf zobrazující diagram stability koule pro nástřik A



Graf č. 17- Graf zobrazující diagram stability koule pro nástřik B



Graf č. 18 - Graf zobrazující diagram stability koule pro nástřik C

5. Vyhodnocení výsledků

1. Předpoklad, že největší tloušťku nanášeného nástřiku bude mít nástřik D, se potvrdil. Zbývající část hypotézy už pravdivá není. Druhou nejvyšší tloušťku nástřiku má nástřik C, třetí nástřik B a nejnižší tloušťku vykazuje nástřik A
2. Celá druhá hypotéza se nepotvrdila. Nejmenší odchylku po vyhodnocení geometrických vlastností vykazuje nástřik D. Druhého nejlepšího výsledku dosáhl nástřik A, druhého nejhoršího výsledku dosáhl nástřik B a nejhoršího výsledku dosáhl nástřik C
3. Předpoklad, že nejnižší a druhou nejnižší nerovnoměrnost nanášení budou vykazovat nástřiky D a A se potvrdil. Druhého nejhoršího výsledku dosáhl nástřik C a nejhorší výsledek vykazuje nástřik B

Tabulka č. 16 obsahuje číselné hodnocení vhodnosti jednotlivých nástřiků. Každá ze zkoumaných vlastností je vyhodnocena zvlášť. Čím nižším číslem je u dané vlastnosti nástřik ohodnocen, tím vhodnější hodnoty pro přesné měření při zkoumání daného bodu vykazoval.

Při sečtení všech hodnocení každého nástřiku zjistíme, který nástřik má v součtu nejnižší hodnocení a tím pádem obecně vykazuje vlastnosti nejvhodnější pro přesné měření.

Tabulka č. 16 – Vícekriteriální analýza

kritérium	nástřik A	nástřik B	nástřik C	nástřik D
1	1	2	3	4
2	2	3	4	1
3	2	3	4	1
součet	5	8	11	6

Nejnižší hodnotu součtu hodnocení všech bodů vykazuje překvapivě nástřik A i přesto, že není pro tento účel primárně určen. Se sprejem se dobře pracovalo a nepotřeboval jsem žádný čas na zvyknutí si na jeho vlastnosti. Také úroveň překrytí povrchu skenovaného objektu byla lepší než u nástřiků určených pro 3D skenování.

Druhého nejnižšího součtu hodnocení dosáhl nástřik D. I přesto, že tvoří nejsilnější vrstvu, skvělé výsledky při zkoumání zbylých dvou bodů dokazují, že i trvalý nástřik je pro laserové skenování vhodnější než antireflexní nástřiky k tomu určené. Předpoklad, že bude vrstva nástřiku D tvořit rovnoměrnou vrstvu, se potvrdil. Předpoklad týkající se ovlivnění geometrických vlastností však byl vyvrácen – nanesená barva po objektu nestéká.

Nástřiky B a C lze navzdory jejich účelu, vysoké ceně a veškerým předpokladům označit spíše jako nevhodné pro laserové skenování. Oba nástřiky výrazně ovlivňují geometrické tolerance a nanesená vrstva není rovnoměrná. U nástřiku C mohla být důvodem nekvalitní tryska, kvůli které se na povrchu měřeného objektu tvořily hrudky.

6. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo porovnat vliv antireflexních nástřiků na rozměrové a geometrické vlastnosti za použití stroje LK metrology Altera S v kombinaci s laserovým skenerem Nikon LC15Dx.

Postupně byly zkoumány tři hlavní body – tloušťka vrstvy nástřiků, ovlivnění geometrických tolerancí a nerovnoměrnost vrstvy vlivem nanášení nástřiku. Ze získaných dat jsem vyhodnotil, který ze čtyř zkoumaných nástřiků vykazuje vlastnosti nejvhodnější pro nejmenší ovlivnění rozměrových a geometrických specifikací měřených součástí.

Porovnával jsem vlastnosti čtyř různých druhů nástřiků. Dva z nich jsou přímo určeny pro laserové skenování (křídový a sublimační nástřik), zbylé dva (kapilární vývojka a trvalý nástřik) se však pro tento účel v praxi také používají.

Nejvyšší hodnoty tloušťky nástřiku vykazuje trvalý nástřik RAL 9005 ve spreji 500ml Matný Motip. Ve zbývajících dvou kategoriích tento sprej dosahuje nejlepších výsledků.

Největší ovlivnění geometrických tolerancí vykazuje sublimační nástřik HELLING 3D Laser Scanning Anti-Reflexionsspray MATT. Tento sprej také vykazuje nejnižší stabilitu při zkoumání bodu Nerovnoměrnost vrstvy vlivem nanášení nástřiku. V těchto dvou kategoriích je výrazně horší než nástřiky, které pro laserové skenování nejsou primárně určeny.

Nejvhodnějším sprejem pro laserové skenování je vývojka pro kapilární zkoušky D-70 Developer. Tento sprej má nejnižší tloušťku nástřiku a ve zbývajících dvou kategoriích se umístil jako druhý nejlepší.

V celkovém součtu jsou v pořadí od nejvhodnějšího po nejméně vhodný nástřik seřazeny nástřiky takto:

1. Nástřik A D-70 Developer (vývojka pro kapilární zkoušky)
2. Nástřik D RAL 9005 ve spreji 500ml Matný Motip (trvalý nástřik)
3. Nástřik B 3D Laser scanning Spray (křídový nástřik)
4. Nástřik C HELLING 3D Laser Scanning Anti-Reflexionsspray MATT (sublimační nástřik)

Citace

1. EDL, Milan, Marek MIZERÁK a Jozef TROJAN. 3D LASER SCANNERS: HISTORY AND APPLICATIONS. *Acta Simulatio* [online]. 2018, 4(3), 1-5 [cit. 2021-7-31]. ISSN 1339-9640. Dostupné z: doi:10.22306/asim.v4i4.54

2. How Do 3D Scanners Work? [online]. c2021 [cit. 2021-8-5]. Dostupné z: https://hermary.com/learning/principles-of-laser-triangulation/

3. ČERMÁK, Jan. *METODY 3D SKENOVÁNÍ OBJEKTŮ* [online]. Vysoké učení technické v Brně, 2015 [cit. 2021-7-31]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=103850. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Tomáš Marada Ph.D.

4. FONTANA, Raffaella. Three-dimensional modelling of statues: the Minerva of Arezzo. *Journal of Cultural Heritage* [online]. 2002, 3(4) [cit. 2021-7-31]. ISSN 1296-2074. Dostupné z: doi:10.1016/S1296-2074(02)01242-6

5. MACHÁČEK, Pavel, ed. A methodology of measuring geometrical product specifications using three-dimensional scanning. In: MORAVEC, Jiří. *Studentská tvůrčí činnost 2015* [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2015 [cit. 2021-7-31]. ISBN 978-80-01-05727-8. Dostupné z: https://stc.fs.cvut.cz/history/2015/sbornik/papers/pdf/5518.pdf?_=1428525453

6. DOLÁK, David. *Rešerše souřadnicových měřících strojů CMM a měřících ramen CMMs* [online]. Vysoké učení technické v Brně, 2010 [cit. 2021-7-31]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=30059. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing Miroslav Opl.

7. 7osé rameno Absolute Arm. *Hexagon* [online]. Hexagon AB nebo její pobočky., c2021 [cit. 2021-8-5]. Dostupné z: https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/products/portable-measuring-arms/absolute-arm-7-axis

8. T. Hackel, D. Stein, I. Maindorfer, M. Lauer and A. Reiterer, "Track detection in 3D laser scanning data of railway infrastructure," 2015 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings, 2015, pp. 693-698, doi: 10.1109/I2MTC.2015.7151352.

9. KOPTIŠ, Michal. *Využití snímacího systému laser scanneru pro aplikace reverzního inženýrství* [online]. České vysoké učení technické v Praze, 2016 [cit. 2021-7-31]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/66290/F2-DP-2016-Koptis-Michal-diplomovaprace_MichalKoptis.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Libor Beránek, Ph.D.

10. LEVÍNSKÁ, Barbora. *Vliv zmatňujících nástřiků na přesnost optické 3D digitalizace* [online]. Technická univerzita v Liberci, 2017 [cit. 2021-8-5]. Dostupné z: https://dspace.tul.cz/handle/15240/150974. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci, Výrobní systémy a procesy. Vedoucí práce Ing. Radomír Mendřický, Ph.D.

11. *D-70 Developer* [online]. Slovakia: SlovCert spol. s r.o., c2011-2021 [cit. 2021-7-31]. Dostupné z: http://www.shopndt.eu/D-70

12. Antireflexní sprej pro 3D skenování*, 3D Laser scanning Spray* [online]. c2021 [cit. 2021-7-31]. Dostupné z: https://www.nc.cz/sublimacni-odparovaci-antireflexni-sprej-pro-3d-skenovani-helling-3d-laser-scanning-anti-reflexionsspray-matt-500ml_d402724.html

13. *Sublimační (odpařovací) antireflexní sprej pro 3D skenování, HELLING 3D Laser Scanning Anti-Reflexionsspray MATT, 500ml* [online]. c2021 [cit. 2021-7-31]. Dostupné z: https://www.nc.cz/sublimacni-odparovaci-antireflexni-sprej-pro-3d-skenovani-helling-3d-laser-scanning-anti-reflexionsspray-matt-500ml_d402724.html

14. *RAL 9005 ve spreji 500ml Matný Motip* [online]. Barvy Laky Janů, c2021 [cit. 2021-7-31]. Dostupné z: https://www.barvylakyjanu.cz/ral-9005-ve-spreji-500ml-matny-motip?gclid=Cj0KCQjw6NmHBhD2ARIsAI3hrM3nyDy_fhlvpyXQULNqg25FPIBYbsvB90bwYsYqYBij41iw5-lnAWcaAkU0EALw_wcB

15. Altera S. *LK Metrologz* [online]. England: LK Metrology, c2021 [cit. 2021-8-5]. Dostupné z: https://www.lkmetrology.com/lk_newsite/products/cmm/bridge-cmm/altera-s/

16. *LC15Dx - Closing the gap with tactile probe accuracy* [online]. Nikon Metrology NV, c2021 [cit. 2021-7-31]. Dostupné z: https://www.nikonmetrology.com/en-gb/3d-metrology/automated-3d-scanning-lc15dx

17. *Směrodatná odchylka* [online]. 2021 [cit. 2021-8-5]. Dostupné z: https://www.matweb.cz/smerodatna-odchylka

18. GRUBBS, Frank. Sample Criteria for Testing Outlying Observations. *Ann. Math. Statist.* [online]. Institute of Mathematical Statistics, 2007, 1950, 21(1) [cit. 2021-8-5]. Dostupné z: doi:10.1214/aoms/1177729885

19. *ZEISS PRISMO* [online]. USA: Carl Zeiss Industrial Metrology, 2021 [cit. 2021-8-5]. Dostupné z:

https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/systemy/souradnicove-merici-stroje/portalove-souradnicove-merici-stroje/zeiss-prismo.html

20. KLUS, Jakub. *Měření těžkých obrobků* [online]. Vysoké učení technické v Brně, 2019 [cit. 2021-7-31]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=193449. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing., Dipl.-Ing Michal Holub, Ph.D.