



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

3D SKENOVÁNÍ LESKLÝCH POVRCHŮ

3D SCANNING OF GLOSSY SURFACES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Zeman

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Koutecký, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Jakub Zeman**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Tomáš Koutecký, Ph.D.**
Akademický rok: 2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

3D skenování lesklých povrchů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je experimentálním způsobem posoudit vliv nástřiku skenovaného povrchu titanovým práškem na schopnost 3D skeneru zachytit tento povrch při skenování.

Cíle bakalářské práce:

Bakalářská práce musí obsahovat: (odpovídá názvům jednotlivých kapitol v práci)

1. Úvod
2. Přehled současného stavu poznání
3. Analýza problému a cíl práce
4. Materiál a metody
5. Výsledky
6. Diskuze
7. Závěr
8. Seznam použitých zdrojů

Forma práce: průvodní zpráva, digitální data

Typ práce: experimentální

Účel práce: výzkum a vývoj

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 - 20 stran textu bez obrázků).

Zásady pro vypracování práce: http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2016.pdf

Šablona práce: http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/UK_sablona_praci.zip

Seznam literatury:

Paloušek, D., Omasta, M., Koutný, D., Bednář, J., Koutecký, T. and Dokoupil, F. (2015): Effect of matte coating on 3D optical measurement accuracy, Optical Materials, vol. 40, February 2015, pp. 1-9, DOI: 10.1016/j.optmat.2014.11.020

Brajlih, T., Tasic, T., Drstvensek, I., Valentan, B., Hadzistevec, M. (2011): Possibilities of Using Three-Dimensional Optical Scanning in Complex Geometrical Inspection, Journal of Mechanical Engineering, vol. 57, no. 11, pp. 826-833, DOI: 10.5545/sv-jme.2010.152

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je experimentálně posoudit, jak koncentrace titanového prášku v matném nástriku ovlivňuje vlastnosti matné vrstvy lesklého povrchu určeného pro 3D skenování. Teoretická část práce nastiňuje téma 3D digitalizace reálných objektů, dále podrobněji popisuje použitou metodu projekce strukturovaného světla, možné chyby při skenování a shrnuje dosavadní poznatky týkající se matných nástriků. Praktická část se zabývá ošetřením vzorků vybranými koncentracemi matné suspenze oxidu titaničitého a ethanolu pomocí automatizovaného nástrikového zařízení zajišťujícího konstantní podmínky pro všechny nástriky. Následuje porovnání jednotlivých koncentrací na 3D skeneru a optickém profilometru a na základě výsledků měření je vybrána optimální koncentrace nástriku poskytující matnou vrstvu s nejlepšími vlastnostmi.

KLÍČOVÁ SLOVA

Titanový matný prášek, lesklý povrch, 3D skener, optický profilometr

ABSTRACT

The goal of this bachelor thesis is to experimentally determine the impact of different concentrations of titanium matte coating on the properties of matte film covering glossy surface intended for 3D scanning. Theoretical part of the thesis contains brief introduction to the 3D digitization of real objects as well as more detailed description of the particular scanning method used in this thesis and summary of possible digitizing errors and existing knowledge about matte coatings. The practical part composes of applying the titanium matte coating on specimens using automated coating device thus maintaining the exact same conditions for all concentrations. Following measurement of specimens using 3D scanner and optical profilometer results in determining the optimal concentration of titanium coating providing the best properties of the matte film.

KEYWORDS

Titanium matte coating, glossy surface, 3D scanner, optical profilometer

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ZEMAN, J. *3D skenování lesklých povrchů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 58 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Tomáš Koutecký, Ph.D..

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval především svému vedoucímu práce, Ing. Tomáši Kouteckému, Ph.D. za cenné rady, ochotnou pomoc a poskytnuté materiály, které mi umožnili zpracování této bakalářské práce.

Také bych rád poděkoval rodině a přátelům za podporu během celého studia.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma 3D skenování lesklých povrchů vypracoval samostatně pod odborným vedením Ing. Tomáše Kouteckého, Ph.D. s využitím informací a zdrojů, které řádně cituji v seznamu použité literatury.

V Brně dne

.....
Podpis

OBSAH

OBSAH	11
ÚVOD	13
1. PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
1.1 3D model a 3D skener	14
1.2 Kontaktní metody 3D skenování	15
1.2.1 Destruktivní metody	15
1.2.2 Nedestruktivní metody	15
1.3 Bezkontaktní metody 3D skenování	16
1.3.1 Aktivní optické metody	17
1.3.2 Pasivní optické metody	18
1.3.3 Průmyslový rentgen	18
1.4 3D skener strukturovaného světla	19
1.4.1 Princip	19
1.4.2 Vzory	20
1.5 Chyby při 3D skenování	21
1.5.1 Systematické chyby	21
1.5.2 Náhodné chyby	21
1.5.3 Způsoby potlačení náhodných chyb	22
1.6 Matnicí nástřiky	22
1.6.1 Titanový prášek	22
1.6.2 Křídový prášek	22
1.6.3 Cyklododekanový prášek	22
1.6.4 Dosavadní práce zabývající se matnicími nástřiky	23
2. ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	24
3. MATERIÁL A METODY	25
3.1 Použité vzorky a materiály	25
3.1.1 Vzorky	25
3.1.2 Matnicí prášek	25
3.2 Přípravky	26
3.3 Aparatura pro nástřik	27
3.3.1 Zařízení pro nanášení zmatňujícího nástřiku	27
3.3.2 Stříkací pistole	27
3.4 Měřicí aparatury	28
3.4.1 Optický 3D skener	28
3.4.2 Optický profilometr	29
3.5 Průběh měření	29
3.5.1 Nástřik vzorků	29
3.5.2 Skenování vzorků na 3D skeneru	30
3.5.3 Měření křemíkové destičky na profilometru	32
4. VÝSLEDKY	36
4.1 Proveditelnost matnicího nástřiku u vysokých koncentrací TiO_2	36
4.2 Překrytí povrchu matnicím nástřikem a vzhled matnicí vrstvy	36
4.3 Dostatečnost zmatnění pro 3D skenování a kvalita povrchu matnicí vrstvy	38
4.4 Tloušťka matnicí vrstvy	40
5. DISKUZE	42
6. ZÁVĚR	43

7. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	44
8. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	47
9. SEZNAM OBRÁZKŮ	48
10. SEZNAM TABULEK	49
11. SEZNAM PŘÍLOH	50

ÚVOD

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou matnicích nástřiků, které se používají při 3D skenování lesklých povrchů. Cílem práce je experimentálně posoudit vliv koncentrace titanového prášku v nástřiku na parametry matnicí vrstvy a na schopnost 3D skeneru zachytit tento povrch při skenování metodou aktivní proužkové projekce.

Metoda proužkové projekce je nekontaktní aktivní metoda 3D skenování povrchu pracující na základě projekce proužkového vzoru na povrch, snímání povrchu a následné triangulace souřadnic reálného povrchu z pořízených snímků. Tato metoda má díky svým přednostem široké uplatnění v mnoha různých oblastech ať již se jedná o průmyslové aplikace, vědu nebo biomedicínu. Je však možné se s ní setkat i v poměrně nových oborech jako je virtuální realita nebo herní průmysl. Problém nastává při skenování vysoce lesklých povrchů, kde vzniká množství náhodných chyb znemožňujících kvalitní digitalizaci objektu.

Způsobů, jak se s těmito chybami způsobenými odlesky vypořádat, je několik. Jednoduchým a častým řešením je překrytí lesklého povrchu vrstvou titanového prášku, který má silné matnicí účinky. Výstupem práce je vedle obecného zhodnocení dané problematiky také výběr optimální koncentrace nástřiku pro dosažení co nejlepší kvality výsledného 3D skenu.

1. PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

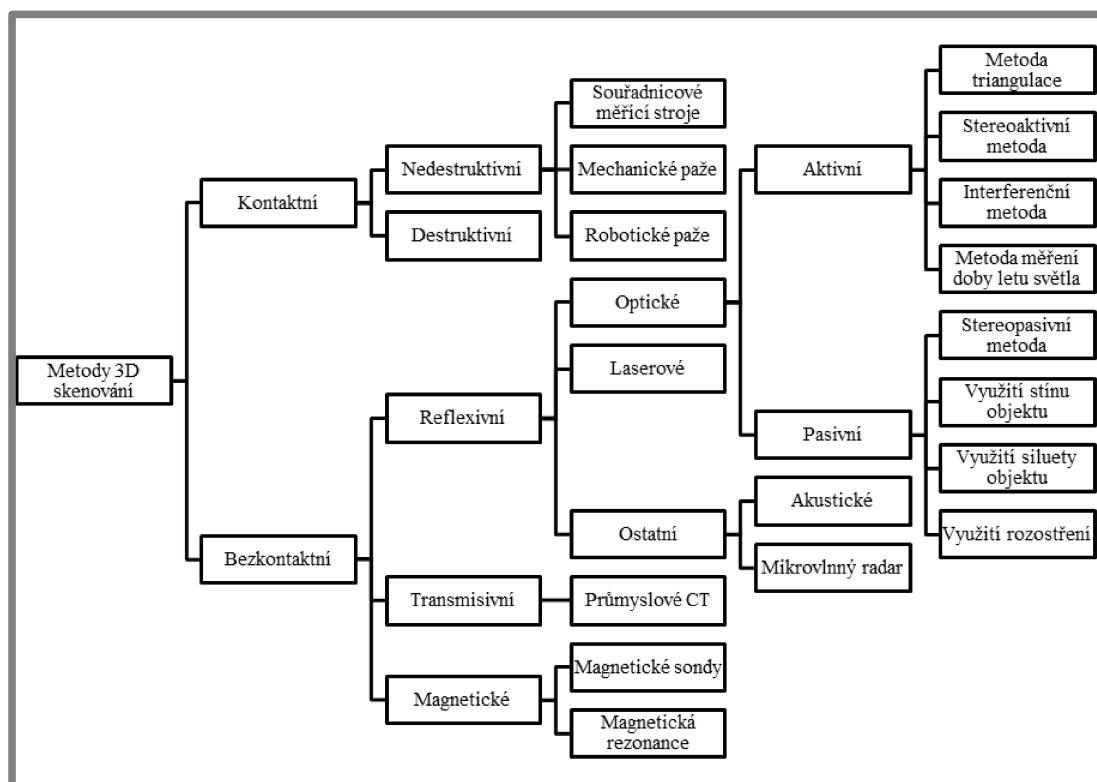
1.1 3D model a 3D skener

Podstatou 3D skenování je vytvoření tří-dimenzionálního digitálního modelu, jakožto číslcového vyjádření skutečného objektu. Obecně existují dvě skupiny těchto modelů: 3D objemová tělesa a 3D modely v povrchové reprezentaci. Objemová tělesa popisují vlastnosti skutečného objektu ve všech jeho bodech na povrchu i uvnitř tělesa. Naproti tomu povrchová reprezentace objektu zahrnuje pouze povrch tělesa a neobsahuje žádnou informaci o jeho vnitřních bodech. Pro tuto práci jsou důležité povrchové reprezentace, dále proto budou popsány podrobněji než objemové modely. [1]

3D povrchové modely nalézají uplatnění v nejrůznějších oblastech zejména díky tomu, že existuje mnoho způsobů jak s nimi dále pracovat v nejrůznějších softwarových nástrojích. Jejich vizualizaci lze libovolně upravovat, doplňovat, měřit různé parametry nebo ji nechat interagovat s dalšími digitálními objekty. S povrchovými modely se tak setkáváme například v oblasti archeologie, architektury a umění, kde slouží k uchování citlivých historických památek. V medicíně se v posledních letech rozšiřuje využití zejména proužkových metod při diagnostice deformací páteře nebo při neinvazivním vyšetření cév. 3D modely jsou s výhodou použitelné i pro účely tréningu mediků prostřednictvím virtuálních operací. Velice rozmanité uplatnění 3D skenování nalezneme ve strojírenství a průmyslu. Ať se jedná o kontrolu kvality součástí včetně měření struktury povrchu, analýzu vibrací a deformací za provozu nebo četné aplikace v oboru tribologie. V oboru reverzního inženýrství pak 3D skenování tvoří jeden ze základních pilířů a velkou měrou usnadňuje proces reprodukce součástí. V neposlední řadě pronikají 3D vizualizační technologie i do zábavního průmyslu ve formě virtuální reality.

[1; 2; 3]

Prvním krokem, nutným pro vytvoření 3D modelu je snímání tvarů a textur fyzického objektu a jejich převedení do digitální podoby, která umožní následné softwarové zpracování. K tomuto účelu slouží 3D skenery, snímající pomocí nejrůznějších metod velké množství bodů povrchu tělesa, které se následně převádějí na tzv. mračno bodů. S tímto mračnem bodů lze dále pracovat v softwarovém prostředí. 3D skenery je možno klasifikovat například z hlediska konstrukce na přenosné a pevné skenery, podstatně podrobnější rozdělení uvedené na Obr. 1-1 je potom založeno na tom, zda je snímání povrchu tělesa zprostředkováno fyzickým kontaktem senzoru skeneru s objektem, nebo je realizováno prostřednictvím interakce určitého druhu záření emitovaného skenerem s povrchem objektu. [1; 4; 5]



Obr. 1-1 Rozdělení metod 3D skenování [1; 4; 6]

1.2 Kontaktní metody 3D skenování

1.2

Principem kontaktních metod 3D skenování je fyzický kontakt senzoru skeneru a povrchu skenovaného objektu. Tyto metody lze dále dělit na destruktivní, při kterých objekt zničen a nedestruktivní, kdy nedochází k poškození objektu. [1]

1.2.1 Destruktivní metody

1.2.1

3D skenery pracující destruktivní metodou jsou schopné zachytit nejen povrch, ale i vnitřní geometrii objektu. Před vlastní digitalizací je třeba pokrýt a vyplnit součást speciálním materiálem, díky kterému vzniká při skenování zřetelný kontrast mezi materiálem součásti a výplňovým materiálem. Dokonalého vyplnění vnitřních dutin se dosahuje použitím vakuové komory. [7]

Takto upravená součást se upne na stůl frézy, postupně se vždy odfrézuje ultratenká vrstva materiálu a následně se vzniklá plocha skenuje optickým 2D skenerem. Naskenované snímky se odesílají k softwarovému zpracování, kde se z nich po vrstvách poskládá 3D model součásti. Těto metody se využívá v případech, kdy vyžadujeme digitalizaci objektu se složitou vnitřní strukturou, která je nedestruktivními metodami nezachytitelná. [7; 8]

1.2.2 Nedestruktivní metody

1.2.2

Jak napovídá název, při skenování nedestruktivními metodami nedochází k žádnému poškození objektu. Tento objekt je pevně připevněn k referenční podložce a následně jsou pomocí pohybu bodové nebo kuličkové sondy (Obr. 1-2) po povrchu objektu získávána 3D data pro následnou digitalizaci. Pro zajištění lepší přesnosti digitálního

obrazu je vhodné před skenováním vyznačit na tělese důležité body, které je nutné snímat. Nedestruktivní metody lze rozdělit na 3 hlavní kategorie a to na souřadnicové měřicí stroje (CMM), skenery na mechanické paži a skenery na robotické paži. [4]



Obr. 1-2 Kuličková dotyková sonda [29]

Souřadnicové měřicí stroje

Měřicí stroje této kategorie mají dotykovou sondu připevněnou na vertikálním rameni, které je uchyceno portálovém pojezdu. Tímto způsobem je zajištěn pohyb ve třech osách pravoúhlého souřadnicového systému a každý dotyk sondy je tak popsán trojicí souřadnic. Díky výborné přesnosti jsou tyto stroje používány nejen k digitalizaci ale běžně i k měření součástí při kontrole kvality. Hlavním omezením souřadnicových měřicích strojů je jejich samotná konstrukce, která značně limituje maximální rozměry skenovaného objektu. Druhou nevýhodou je fakt, že vlastní snímání probíhá pouze ve svislé ose, což může u členitých objektů představovat problém. [1; 4]

Skenery na mechanické a robotické paži

Hlavním rozdílem oproti souřadnicovým měřicím strojům je konstrukce, která je tvořena otevřeným kinematickým řetězcem několika ramen spojených rotačními vazbami se sondou jako koncovým efektem a je tak velmi podobná průmyslovému robotu. Vlastní skenování probíhá tak, že operátor sondou obvykle manuálně navádí po povrchu objektu a snímá žádané body, křivky nebo polygony. Souřadnice jednotlivých bodů následně vznikají složením rotací v jednotlivých rotačních vazbách měřených optickými senzory. Tyto skenery mají oproti předchozí kategorii více stupňů volnosti. Jsou proto flexibilnější a použitelné i pro rozměrnější objekty. Skenery na mechanické paži nedisponují vlastními pohony a vyžadují přímou obsluhu, skenery na robotické paži je díky vlastním pohonům možné řídit dálkově, případně proces skenování automatizovat. [1; 4]

1.3 Bezkontaktní metody 3D skenování

Kontaktní metody jsou sice přesné, na druhé straně jsou však relativně pomalé a vzhledem k tomu, že souřadnice povrchu objektu se získávají přímo z polohy snímacího mechanismu, jsou kontaktní skenery citlivé ke změnám teploty a vlhkosti. Problematické je také skenování křehkých objektů (například uměleckých děl), kde

fyzický kontakt sondy může způsobit poškození. Tyto nevýhody eliminují bezkontaktní metody 3D skenování, které využívají interakce specifického druhu záření s povrchem objektu. Dle druhu použitého záření lze bezkontaktní skenery rozdělit do tří základních kategorií. Těmi jsou transmisivní skenery, kde záření objektem prochází, reflexivní skenery, kde se záření od povrchu objektu odráží a specifická kategorie magnetických skenerů, do které náleží magnetické sondy a magnetická rezonance. V současné době je nejrozšířenější kategorie reflexivních skenerů, do které spadá i použitá metoda proužkové projekce a triangulace. [1; 4; 7]

1.3.1 Aktivní optické metody

1.3.1

Aktivní optické metody patří do kategorie reflexivních metod 3D skenování. Optické metody využívají ke snímání část elektromagnetického spektra o vlnových délkách 100 nm až 300 μm . Principem aktivních optických metod je ozáření objektu elektromagnetickým zářením ve formě světelného paprsku, světelného pruhu nebo strukturovaného světla a následné odrazení záření od povrchu objektu do snímáče. Pro následnou digitalizaci je třeba skenováním získat tři souřadnice. Z-ová souřadnice (vzdálenost bodu od snímáče) se získá pomocí některé z následujících metod. [1; 4]

Měření doby letu světla

Tato metoda vychází ze známé rychlosti šíření záření v prostoru. Měří se doba mezi vysláním záření a zaznamenáním odraženého záření na snímáči, tato doba je následně přepočítána na vzdálenost bodu objektu od referenčního bodu zpravidla umístěného v místě snímáče. Metoda klade kvůli enormní rychlosti letu světla vysoké nároky na přesnost senzoru (přesnost na 1mm vyžaduje rozpoznávací schopnost v řádu pikosekund). [1; 9]

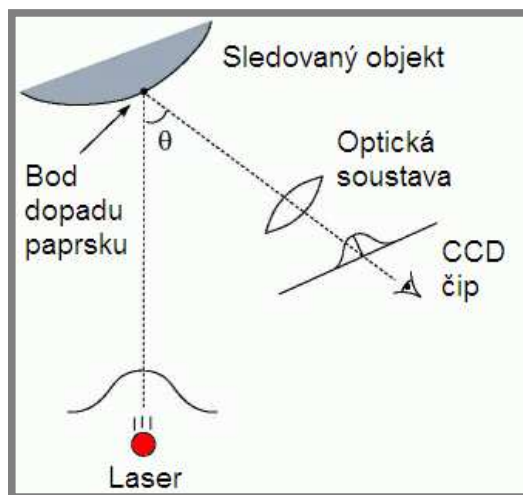
Optická interferometrie

Podstatou této metody je promítání pravidelného mřížkového nebo proužkového vzoru na povrch objektu, kde dojde k jeho deformaci. K promítání dochází přes polarizační dělič, ze kterého je veden referenční nedeformovaný vzor přes odražeče zpět do snímáče. Zde potom interferuje s deformovaným vzorem odraženým od povrchu objektu. Vyhodnocením interference těchto dvou vzorů se typicky získá informace o relativní vzdálenosti skenovaných bodů, pro absolutní vzdálenosti je potom nutná kalibrace. [1; 9]

Aktivní triangulace

Metoda aktivní triangulace je založena na tzv. triangulačním trojúhelníku mezi zdrojem záření, bodem povrchu tělesa a snímáčem (obvykle CCD nebo CMOS čip). V tomto trojúhelníku je známa spojnice mezi zdrojem záření a snímáčem (triangulační báze) a neměnný úhel mezi triangulační bází a emitovaným paprskem. Úhel mezi bází a odraženým paprskem je určen z pozice osvětleného bodu na snímáči. Z těchto údajů je triangulací dopočítána Z-ová souřadnice ozářeného bodu povrchu tělesa. V závislosti na druhu použitého záření rozlišujeme 1D 2D nebo 3D triangulaci. 1D triangulace využívá světelný paprsek. V rámci jednoho snímku je tedy digitalizován pouze jeden bod objektu. Při 2D triangulaci se využívá světelný pruh a při 3D triangulaci strukturované světlo ve formě proužků, mřížky, nebo komplikovanějšího vzoru. Princip 1D triangulace je ukázán na Obr. 1-3. 2D a 3D

triangulace potom probíhají stejným způsobem jako 1D bod po bodu. Limitujícím faktorem je pro triangulaci členitost povrchu objektu. U velmi členitých objektů se vzor nepromítne do prohlubní v povrchu, případně mohou část povrchu zastínit různé výstupky. [1; 4; 9]



Obr. 1-3 Princip 1D triangulace [9]

1.3.2 Pasivní optické metody

Pasivní metody využívají stejné snímače jako aktivní metody (CCD). Na rozdíl od nich zde ale není skenerem emitován žádný druh energie. Objekt je snímán postupně z několika úhlů a porovnáním snímků se získávají souřadnice určitých bodů objektu. Pasivní 3D skenery jsou levnější než aktivní ale nedosahují takové přesnosti. [10]

Mezi hlavní pasivní metody patří:

- Stereopasivní metoda
- Využití stínu objektu
- Využití siluety objektu
- Využití rozostření

1.3.3 Průmyslový rentgen

Typickým zástupcem transmisivních metod skenování je průmyslový rentgen. Skenovaný objekt je umístěn mezi emitorem rentgenového záření a zobrazovacím zařízením. Rentgenové záření z emitoru prochází objektem a je jím částečně pohlcováno. Nepohlcená část záření potom na zobrazovacím zařízení vytvoří 2D snímek objektu. Složením snímků z různých úhlů pohledu vzniká 3D model součásti včetně vnitřní struktury. Oproti rentgenům ve zdravotnictví nehrozí u průmyslových rentgenů poškození živých tkání, mohou tak pracovat s vyšší intenzitou záření. Výhodou těchto skenerů je, že povrchové charakteristiky objektu neovlivňují skenovací schopnosti, jsou však citlivé na náhodné změny hustoty materiálu, které mohou zkreslovat naměřená data. [1; 4]

1.4 3D skener strukturovaného světla

1.4

Metoda 3D skenování za pomoci projekce strukturovaného světla je v poslední době jednou z nejrychleji se rozvíjejících metod na poli 3D skenování. Skenery strukturovaného světla jsou relativně levné, nabízejí vynikající rozlišení a proces skenování je velice rychlý. Navíc jsou kompaktní a mají široké využití při skenování drobných i rozměrných objektů a to nejen v průmyslu, ale i jiných oblastech. Příklad skeneru strukturovaného světla je na Obr. 1-4. [2]



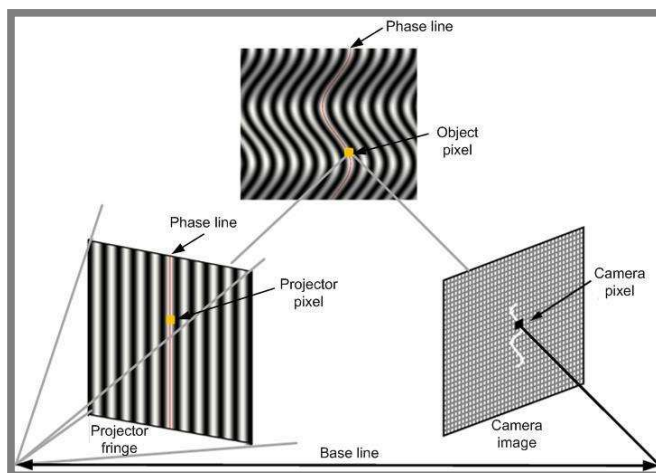
Obr. 1-4 3D skener GOM ATOS III [30]

1.4.1 Princip

1.4.1

Soustava pro skenování se skládá z projektoru strukturovaného světla, snímače a počítače se softwarem pro digitalizaci. Princip snímání je schematicky naznačen na Obr. 1-5. Promítaný vzor se na povrchu předmětu deformuje a je snímán CCD nebo CMOS kamerou. Deformovaný vzor na snímku je porovnán s referenčním (nedeformovaným) vzorem za pomoci aktivní 3D triangulace nebo optické interferometrie. Jsou tak zjištěny 3D souřadnice jednotlivých bodů a vytvořeno tzv. mračno bodů, reprezentující naskenovaný povrch. Toto mračno bodů slouží pro digitalizaci objektu ale i pro případné srovnání objektu se svým CAD modelem. [2; 11; 12]

Případy, kdy úplný 3D model vznikne pomocí jediného snímku, jsou spíše výjimečné. Ve většině případů je nutno pořídit sadu snímků z různých úhlů. S výhodou se zde využívá otočný stolek umožňující automatizované natáčení objektu o zadaný úhel. Na povrch objektu je vhodné umístit tzv. referenční značky, které se při kompletování snímků překryjí a usnadní tak složení modelu. [11; 13]



Obr. 1-5 Princip 3D skeneru strukturovaného světla [31]

1.4.2 Vzory

Nejrozšířenějším způsobem projekce strukturovaného světla jsou v současné době LCD projektory, které nahradily starší diaprojektory. Promítaných vzorů existuje celá řada, každý má svá specifika a je vhodný pro určitou aplikaci. Neustále také probíhá výzkum a hledání nových vzorů kvůli stupňujícím se nárokům na přesnost měření a rychlost zpracování. Podstatou vzoru je rozdělení povrchu na skupiny pixelů, každá tato skupina je reprezentována tzv. kódovým slovem, obsahujícím informace o všech pixelech skupiny. Vzory je možné rozdělit podle způsobu, jakým jsou kódovány jednotlivé pixely do tří základních skupin na temporální, prostorovou a přímou kodifikaci. [14; 15]

Temporální kodifikace

Jedná se o jednu z nejpoužívanějších metod kódování, která je založena na promítání a snímání sledu nejčastěji proužkových vzorů s postupným fázovým posuvem na měřený povrch. Každý pixel je potom kódován posloupností údajů o svém osvětlení z jednotlivých snímků. Tato metoda nabízí vynikající rozlišení a je dobře použitelná pro barevné objekty. Přesnost je ale přímo úměrná na počtu promítnutých vzorů, což znamená delší čas skenování a omezení metody pouze pro statické objekty. [14]

Prostorová kodifikace

Na rozdíl od temporální kodifikace se ke kompletnímu zakódování pixelu při prostorové kodifikaci využívá jediný vzor. Pixel je popsán pomocí naměřených parametrů okolních pixelů, jako je barva nebo intenzita odraženého světla. Jako vzory jsou používány nejčastěji různé formy proužků, mřížek, případně pseudonáhodných vzorů. Vzhledem k tomu, že k digitalizaci stačí jediný snímek, je tato metoda vhodná i pro pohybující se předměty, avšak případné nespojitosti a stíny na povrchu objektu mohou vytvářet rozsáhlé chyby při digitalizaci. [14; 15]

Přímá kodifikace

Při kódování metodou přímé kodifikace se na objekt promítá škála odstínů šedé, případně barevné spektrum. Každý pixel je potom kódován vlastní barvou nebo intenzitou osvětlení. Při širokém spektru je tak teoreticky možné dosáhnout výborných přesností, ale v praxi je metoda velmi náchylná vůči šumu ambientního

osvětlení což přesnost může degradovat až do řádu milimetrů. Metoda není vhodná pro vícebarevné povrchy, navíc v promítaném vzoru se při větším skenovaném povrchu zavádí periodicitu, což může vést k chybám při digitalizaci. [14; 15]

1.5 Chyby při 3D skenování

1.5

Při 3D skenování a následné digitalizaci se setkáváme s různými chybami, které snižují autenticitu výsledného 3D objektu, případně jej úplně znehodnotí. Je proto žádoucí je v co největší míře eliminovat. Tyto chyby je možné rozdělit na systematické a náhodné. [16]

1.5.1 Systematické chyby

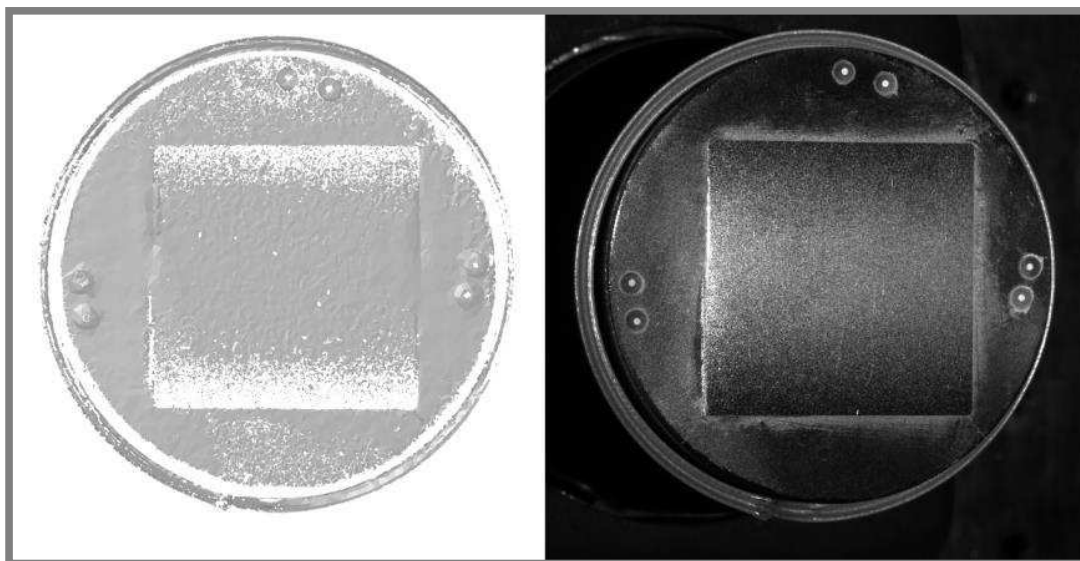
1.5.1

Systematické chyby vznikají obecně nedokonalostí měřicího přístroje, či metody. V případě 3D skenerů například přesnost naměřené vzdálenosti bodu povrchu objektu od čidla vykazuje závislost na konkrétním umístění objektu ve skenovaném prostoru či na orientaci povrchu vůči čidlu. Tyto chyby se při jednotlivých měřeních opakují, lze je proto kompenzovat například vhodným matematickým modelem. [16; 17]

1.5.2 Náhodné chyby

1.5.2

Náhodné chyby vznikají vlivem rušivých vlivů. V oblasti 3D skenování se jedná hlavně o šum ambientního osvětlení a o nevyhovující optické vlastnosti povrchu předmětu. Problematické jsou materiály lesklé, průhledné nebo velmi tmavé. Lesklé povrchy způsobují přesvětlení senzoru, průhledné a tmavé povrchy potom záření neodrážejí v dostatečné míře. Příklad těchto chyb je na Obr. 1-6 z průběhu měření této práce. Zmatněná střední část čtvercové destičky je naskenována dobře s minimem chyb, naproti tomu nezmatněné okraje vykazují velké množství nenaskenovaných bodů. Náhodné chyby vznikají také v souvislosti s nepřímým osvětlením. Například pokud se promítané záření odráží od lesklé části objektu zpět na jiné místo povrchu, kde interferuje s promítaným zářením (problém zejména u strukturovaného světla) nebo pokud dochází k podpovrchovému rozptylu. [17; 18]



Obr. 1-6 Chyby skenování na lesklé destičce (koncentrace 1:16, natočení 0°)

1.5.3 Způsoby potlačení náhodných chyb

Existuje několik způsobů jak zamezit vzniku náhodných chyb. Vhodnost jejich použití záleží na konkrétní situaci. Pokud to situace dovoluje, je možné na povrch nanést dočasný matnicí nástřík, například křídový sprej nebo suspenzi titanového prášku a ethanolu. Při nehybné scéně je pro lesklé povrchy možné použít další metody: snímání s různými expozičními časy, snímání z různých úhlů s různými barvami osvětlení nebo metodu HDRFA. Všechny tyto metody jsou schopné poskytnout kvalitní výsledek, mají však i své nevýhody. Metoda různých expozic vyžaduje naprosto neměnné ambientní osvětlení. Metoda snímání z různých úhlů je časově náročná kvůli přemísťování skeneru v průběhu skenování. Metoda HDRFA (High dynamic range fringe acquisition) využívající více vzorů o různých intenzitách osvětlení je nejkomplexnější a při použití speciálních vzorů si poradí i s podpovrchovým rozptylem, kvůli značnému množství snímků však produkuje velký datový tok, který klade zvýšené nároky na výpočetní techniku. [19]

1.6 Matnicí nástříky

Aplikování matnicího nástříku na skenovaný povrch představuje jednu z nejjednodušších možností, jak se vypořádat s obtížně skenovatelnými povrchy a to nejen s povrchy lesklými ale i velmi tmavými či průhlednými. Nevýhodou je velká závislost kvality výsledného 3D skenu na parametrech vrstvy. Příliš tenká vrstva může vykazovat nedostatečné zmatnění povrchu objektu a nepřípustné množství náhodných chyb. Naopak vrstva příliš silná negativně ovlivňuje přesnost skenování, protože zkresluje reálné rozměry a mění strukturu povrchu skenovaného objektu. Rozlišujeme tři základní matnicí prostředky: prášek oxidu titanu, křídový prášek a cyklododekanový prášek.

1.6.1 Titanový prášek

Využívá se oxid titaničitý (TiO_2) ve formě prášku s velikostí částic obvykle menší než $1\mu\text{m}$. Titanový prášek se používá ve směsi s vhodným rozpouštědlem, typicky s ethanolem. TiO_2 je sám o sobě schopný poskytnout velmi tenkou matnicí vrstvu, dle výrobců dokonce pod $0,001\text{ mm}$. O to více je však její výsledná tloušťka a kvalita ovlivněna použitým poměrem prášku a rozpouštědla a způsobem provedení nástříku. Jistou nevýhodou je také vyšší cena titanového prášku. [20]

1.6.2 Křídový prášek

Křídový prášek ve formě uhličitanu vápenatého (CaCO_3) patří k nejpoužívanějším matnicím prostředkům díky jednoduchosti použití a cenové dostupnosti. Kromě samotného prášku je k dostání přímo ve formě spreje díky čemuž odpadá zdoluhavá příprava matnicí směsi. Nevýhodou je pak v porovnání s TiO_2 řádově větší tloušťka matnicí vrstvy. [17]

1.6.3 Cyklododekanový prášek

Pro matnicí nástřík lze využít i cyklododekanový prášek ($\text{C}_{12}\text{H}_{24}$). Tato organická sloučenina má pro účely matnění povrchu zajímavou vlastnost samovolné sublimace. Samovolné odpaření nanesené vrstvy trvá řádově hodiny až dny, a odpadá díky němu nutnost čištění naskenovaného předmětu. V případě objektu tvořeného více materiály ale sublimace probíhá nerovnoměrně, což může ovlivňovat přesnost skenování.

Případné čištění vzorku před samovolným odpařením vrstvy je také obtížnější než u předchozích prášků. [21; 22]

1.6.4 Dosavadní práce zabývající se matnicími nástřiky

1.6.4

Vlivem nástřiku titanovým a křídovým práškem na přesnost 3D skenování a rozdíly mezi těmito dvěma materiály se zabývali *Paloušek (a kol.)* [17]. Byly zjištěny podstatné rozdíly zejména v tloušťce matnicí vrstvy kde titanový prášek poskytoval zhruba desetinásobně tenčí vrstvu než křídový sprej. *Brajlih (a kol.)* [23] podotýkají, že pro zmatnění titanovým práškem neexistuje žádný jednotný postup a množství naneseného prášku a s tím související tloušťka vrstvy tak z velké části záleží na subjektivním dojmu osoby provádějící nástřik. *Dokoupil* [24] pak zjistil u křídového prášku dvojnásobnou nejistotu měření oproti prášku titanovému. Autoři dosavadních prací při zkoumání vlastností a parametrů matnicích nástřiků doposud vždy prováděli nástřik ručně, do výsledků se tak promítá lidský faktor a je možné že opakování měření by kvůli tomu přineslo jisté odchylky.

2. ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

Pro matnění lesklého povrchu za pomoci titanového prášku je možné namíchat prakticky libovolnou koncentraci suspenze TiO_2 a ethanolu. Limitujícím faktorem je v praxi pouze průchodnost trysky zvolené stříkací pistole při vysokých koncentracích. Díky tomu vyvstává otázka, jakým způsobem a do jaké míry ovlivňuje koncentrace použité suspenze výsledný naskenovaný zmatněný povrch.

Cílem této práce je na vhodném koncentračním rozsahu provést nástřiky tří různých vzorků. Důležitým faktorem je, že nástřik nebude proveden ručně jako tomu je v předchozích pracích zaměřených na matnění nástřiky. Místo toho bude realizován na speciálním nástřikovém zařízení, díky kterému budou zajištěny konstantní podmínky jako rychlost přejezdu, vzdálenost trysky pistole od vzorků či natočení vzorku vzhledem k pistoli pro všechny nástřiky. Jednotlivé nástřiky budou následně mezi sebou porovnány z těchto hledisek:

- Kvalita naskenovaného povrchu z hlediska jeho struktury a náhodných chyb skenování v důsledku nedostatečného zmatnění
- Tloušťka vrstvy matněního nástřiku
- Vzhled a homogenita matnění vrstvy
- Procentuální zastoupení zcela plochy zcela překryté matnění vrstvou
- Proveditelnost nástřiku u velkých koncentrací TiO_2

Na základě porovnání jednotlivých parametrů bude vybrána optimální koncentrace TiO_2 pro matnění nástřik, vykazující dostatečné překrytí a zmatnění povrchu vzorků pro účely 3D skenování při co nejtenčí a nejrovnoměrnější vrstvě.

3. MATERIÁL A METODY

3

3.1 Použité vzorky a materiály

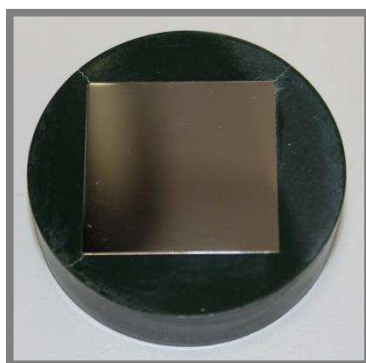
3.1

3.1.1 Vzorky

3.1.1

Vzhledem ke sledovaným parametrům byly vybrány tři vzorky s rozdílnými vlastnostmi:

- **Nerezová destička** čtvercového tvaru o hraně 30 mm vyleštěná na strukturu povrchu Ra 0,1 zalitá do pryskyřice (Obr. 3-1)
- **Johannsonova měrka** o nominální délce 50 mm (tolerance DIN EN ISO 3650)
- **Destička z křemíkového monokrystalu** o rozměrech 13x15 mm



Obr. 3-1 Nerezová destička

Nerezová destička byla vybrána pro snadné dosažení vysokého lesku povrchu. Johanssonova měrka byla zvolena pro svoji garantovanou rozměrovou stálost a jednoduchou manipulaci. Křemíkový monokrystal potom zajišťuje dokonale homogenní a hladký povrch nutný pro měření na profilometru. Všechny vzorky také splňují požadavek na odolnost povrchu vůči poškrábání následkem opakovaného přelešťování v průběhu měření. Přehled jednotlivých měření provedených na vzorcích je uveden v Tab. 1.

Tab. 1 Přehled měření

Vzorek	Aparatura	Měřené parametry
Nerezová destička	3D skener	Kvalita povrchu a výskyt náhodných chyb
Johannsonova měrka	3D skener	Tloušťka matnicí vrstvy
Křemíková destička	Profilometr	Překrytí povrchu a vzhled matnicí vrstvy

3.1.2 Matnicí prášek

3.1.2

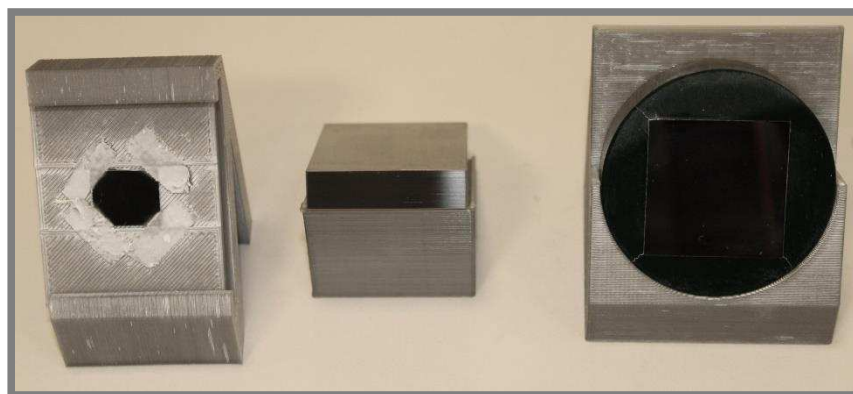
Pro měření byl použit titanový prášek od výrobce Kronos ve směsi s technickým ethanolem. Protokol z analýzy statistického rozložení velikostí částic tohoto prášku je v Příloze 4. Bylo připraveno celkem 10 koncentrací uvedených v Tab. 2, každá do skleněné nádoby s kapátkem, které umožňovaly důkladné rozmíchání suspenze v ultrazvukové čističce a dávkování do nádoby stříkací pistole.

Tab. 2 Přehled měřených koncentrací

Matnicí nástřiky (vyjádřené hmotnostním poměrem TiO ₂ :ethanol)									
1:1	1:2	1:3	1:5	1:8	1:12	1:16	1:20	1:25	1:30

3.2 Přípravky

Pro rovnoměrný nástřik vzorků a zajištění konstantních podmínek pro všechny koncentrace bylo nutné zajistit, aby povrchy vzorků byly kolmé vzhledem k ose stříkácí pistole a vždy ve stejné vzdálenosti od trysky pistole. K tomuto účelu byly vymodelovány a na 3D tiskárně (Průša i3, PLA filament) vytisknuty přípravky pro nástřik tak, aby při nejmenším možném sklonění pistole vzhledem k desce nástřikové aparatury (35°) byla vzdálenost od trysky k povrchu vzorku 10 cm. Přípravky jsou zobrazeny na Obr. 3-2. Přípravek pro křemíkovou destičku se skládal ze stojanu a výsuvné podkladové desky, která usnadňovala manipulaci s drobnou destičkou. Na Johannsonovu měрку byl pro zafixování na přípravku umístěn magnet, zapadající do otvoru v přípravku.



Obr. 3-2 Přípravky pro nástřik s příslušnými vzorky

Vzhledem k dvojímu skenování pod různým úhlem a požadavku, aby skenovaný povrch ležel v ose rotace otočného stolku skeneru, byl vymodelován a vytisknut jednoduchý přípravek pro upevnění vzorku, který je zobrazen na Obr. 3-3. Využit byl distanční válec, který obvykle slouží k upnutí kalibrační desky skeneru vzhledem k jeho vhodným rozměrům a M3 vnitřním závitům usnadňujícím upnutí.



Obr. 3-3 Přípravek pro ATOS

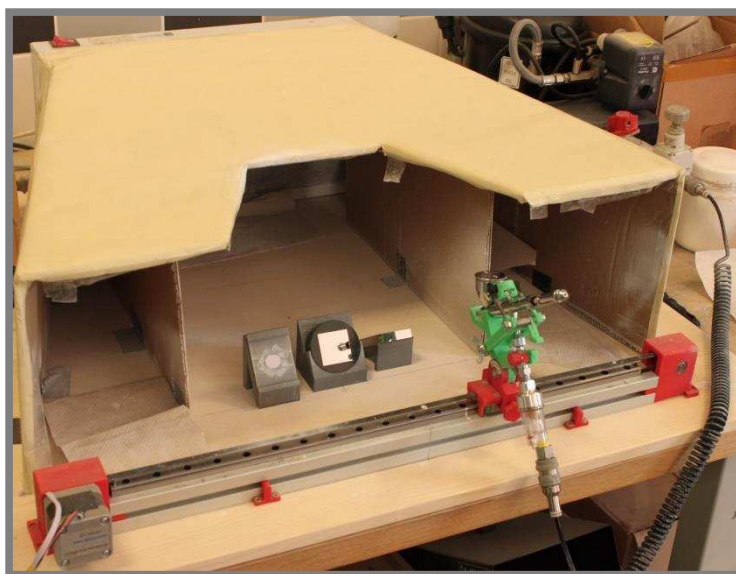
3.3 Aparatura pro nástřik

3.3

3.3.1 Zařízení pro nanášení zmatňujícího nástřiku

3.3.1

Nástřik všech vzorků byl realizován na *Zařízení pro nanášení zmatňujícího nástřiku*, které vzniklo jako semestrální práce studentů ÚK. Základem zařízení na Obr. 3-4 je lineární pojezd s krokovým motorem a koncovým spínačem ovládaný pomocí platformy Arduino UNO Rev3. Na pojezdu je připevněno nosné rameno nesoucí stříkací pistoli Iwata HP-C Plus Japan LC, které obsahuje i aretaci dvoufázové spouště pistole. Za prostorem pro umístění vzorků je pak umístěno odsávání přebytečného nástřiku. Řídící jednotka umožňuje nastavení počtu přejezdů pistole v rozmezí 1-40 a také nastavení rychlosti přejezdů v rozmezí 18 hodnot.



Obr. 3-4 Zařízení pro nanášení zmatňujícího nástřiku

3.3.2 Stříkací pistole

3.3.2

Nosné rameno je navrženo specificky pro airbrushovou stříkací pistoli Iwata HP-C Plus osazenou 0,3mm tryskou pro větší rozptyl paprsku. Tato pistole, zobrazená na Obr. 3-5, disponuje vrchním plněním z nádrčky o objemu 7 ml, které je vzhledem k omezenému množství namíchaných suspenzí velmi výhodné. Umožňuje totiž použít i malé množství náplně bez vlivu na kvalitu nástřiku.



Obr. 3-5 Iwata HP-C Plus [32]

3.4 Měřicí aparatury

3.4.1 Optický 3D skener

3D skenování a vyhodnocení matricích účinků a výskytu náhodných chyb probíhalo na skenovacím systému ATOS Triple Scan 8M s využitím technologie projekce strukturovaného světla GOM Blue Light. Tato technologie výrazně zlepšuje nezávislost měření na okolních světelných podmínkách. Skener využívá pro zvýšení kvality několikanásobného snímkování s fázovým posuvem a změnou vlnové délky promítaného vzoru. Pro účely experimentu byl skener umístěn na vertikální posuvnou jednotku a vzorek v přípravku byl upnut na dvouosém rotačním stole. Použitá konfigurace je na Obr. 3-6. [11]



Obr. 3-6 Konfigurace 3D skeneru pro měření [33]

Obě polohovací zařízení byla seřizena tak, aby se střed měřicího objemu skeneru nacházel ve středu povrchu nerezové destičky. Tato konfigurace umožnila automatizovat proces skenování pomocí skriptu (detailněji popsáno v kapitole 3.5 Průběh měření). Základní údaje o nastavení systému ATOS Triple Scan a parametry měřicího objemu jsou uvedeny v Tab. 3. Údaje jsou převzaty z manuálu *ATOS III user manual*. [25]

Tab. 3 Použitá konfigurace skeneru [25]

Konfigurace optiky a měřicího objemu	
Senzor	ATOS III Rev. 02
Vzdálenost kamer	SO (small objects)
Ohniskové vzdálenosti kamer	40 mm
Ohnisková vzdálenost projektoru	60 mm
Doporučené referenční body	Ø0,8mm
Měřicí vzdálenost	490 mm
Úhel kamer	28°
Měřicí objem (výška, šířka, délka)	170x130x130 mm ³

3.4.2 Optický profilometr

Překrytí a vzhled krycí vrstvy byly vyhodnocovány na 3D optickém mikroskopu Bruker Contour GT-X. Jedná se o vysoce přesný, pneumaticky tlumený profilometr s duálním LED osvětlením o rozlišovací schopnosti až 0,05nm vertikálně a 0,38μm laterálně. Profilometr je vybaven revolverovou hlavou se čtyřmi pozicemi pro objektivy se zvětšením 2,5X – 115X. Při experimentu byly využity objektivy s 5X a 50X zvětšením, jejichž parametry jsou uvedeny v Tab. 4. Osvětlení bylo ponecháno jako výchozí, bílé. Profilometr je ovládán přes software Vision64 který umožňuje snímky rovnou podrobit analýze, čehož bylo využito při experimentu. [26; 27]

Tab. 4 Parametry použitých objektivů [27]

5X objektiv	
Pracovní vzdálenost	6,7 mm
Numerická apertura	0,12
Optické rozlišení	2,2 μm
Vertikální rozlišení	<0,1 nm
Zorné pole (1,0x zoom)	1,3 x 1,0 mm ²
Prostorové vzorkování	2,0 μm
50X objektiv	
Pracovní vzdálenost	3,4 mm
Numerická apertura	0,55
Optické rozlišení	0,5 μm
Vertikální rozlišení	<0,1 nm
Zorné pole (1,0x zoom)	0,13 x 0,10 mm ²
Prostorové vzorkování	0,2 μm

3.5 Průběh měření

3.5.1 Nástřik vzorků

Před vlastním nástřikem bylo třeba vzorky vždy vyleštit tak, aby byl povrch všech vzorků dokonale čistý. Byla použita jemná utěrka určená pro čištění optiky, aby se minimalizovalo nebezpečí poškrábání povrchu. Po vyčištění povrchu byly vzorky vsazeny do přípravků umístěných na desce zařízení pro nástřik tak, aby pistole mířila na střed vzorků a byla dodržena vždy stejná vzdálenost mezi tryskou pistole a povrchem vzorku. Rozmístění vzorků pro nástřik je na Obr. 3-7.



Obr. 3-7 Vzorky připravené na nástřik

Parametry pro nástřik a nastavení řídicí jednotky nástřikového zařízení jsou uvedeny v Tab. 5. Matnicí suspenze byla vždy rozmíchána v ultrazvukové čističce, což zajistilo rovnoměrné rozptýlení titanového prášku v ethanolu. Hned po rozmíchání byla suspenze nadávkována do pistole, zapnut kompresor pistole a odsávání na zařízení a proveden nástřik. Na Johannsonově měrce byl poté nástřik proveden ještě na druhé stěně nominálního rozměru, aby bylo možné provést skenování celkové geometrie měrky. Po provedení nástřiku byla pistole vždy propláchnuta ethanolom a vzorky neprodleně dále zpracovány.

Tab. 5 Parametry nástřiku a nastavení zařízení pro nástřik [28]

Parametry nástřiku	
Vzdálenost od trysky pistole ke vzorku	100 mm
Otevření trysky	1 otočka
Tlak kompresoru	1 bar
Promíchání suspenze v ultrazvukové čističce	5 min
Příhřev	ne
Nastavení řídicí jednotky zařízení	
Počet přejezdů	1
Nastavená rychlost	10
Rychlost přejezdu	0,224 ms ⁻¹
Doba přejezdu	1,8 s

3.5.2 Skenování vzorků na 3D skeneru

Na systému ATOS Triple Scan byla skenována a vyhodnocována nerezová destička a Johannsonova měrka. V obou případech byl proces skenování automatizován pomocí skriptů. Jelikož byly oba vzorky skenovány ze dvou pohledů, bylo nutné je dostatečně připevnit k otočnému stolku. Pro nerezovou destičku byl použit speciální přípravek, popsáný v kapitole 3.2. Johannsonova měrka byla fixována na místě pomocí magnetu na distančním válci, který obvykle slouží k připevnění kalibrační desky skeneru.

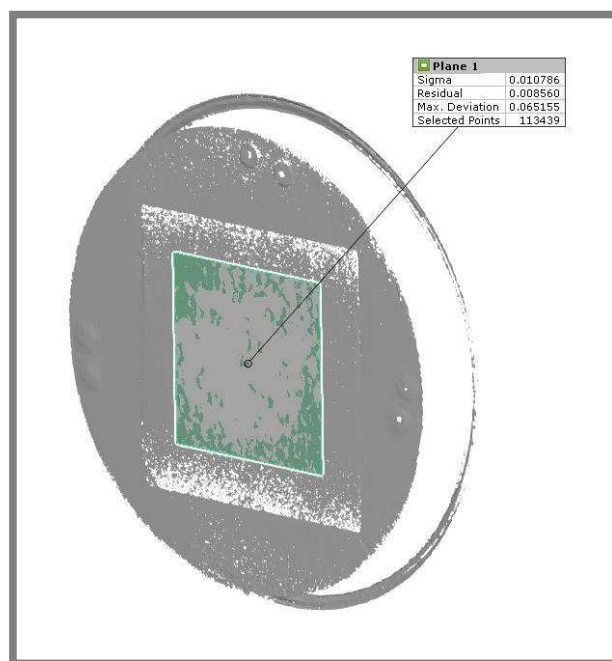
Nerezový vzorek

Nerezový vzorek byl na skeneru vyhodnocován z hlediska kvality povrchu matnicí vrstvy a množství náhodných chyb. Otočný stolek byl před začátkem skenování nastaven do horizontální polohy. Vzorek byl opatřen 3 referenčními body velikosti

0,8 mm. V průběhu měření potom byla přidána druhá sada bodů, protože první tři body kvůli častému přešťování již nebyly skenerem rozpoznávány. Pomocí těchto bodů byla potom ustavena výška skeneru nad vzorkem tak, aby se střed povrchu destičky nacházel ve středu měřicího objemu skeneru. Toto nastavení bylo nutné pro správnou funkci skriptu, kde byl střed souřadného systému definován jako střed měřicího objemu a skript se podle něj orientoval. Poté byl spuštěn skript, který provedl tyto kroky:

- Nastavení času expozice na 50 ms (konstantní pro všechny vzorky)
- Naskenování vzorku
- Polygonizace při vypnutém postprocesingu
- Vyhlazení skenu na hodnotu *Surface tolerance* 0,005 mm
- Vložení krychle o hraně 20 mm do středu měřeného objemu a vymazání naskenovaných dat vně krychle
- Proložení roviny metodou *Gaussian best fit*
- Zapsání údajů o odchylkách naskenovaného povrchu od proložené roviny do textového souboru
- Vychýlení otočného stolku o 45° a opakování předešlých kroků

Skenování bylo provedeno pro vodorovné umístění vzorku i pro vychýlení o 45° proto, aby byly prověřeny matnící účinky vrstvy pro případ, kdy odlesky směřují přímo do snímače (vodorovné umístění) i pro případ že jsou odlesky vychýleny mimo optiku snímače. Údaje o odchylkách byly převedeny do Excelového souboru a jsou součástí Přílohy 1. Příklad výsledných naskenovaných dat je potom na Obr. 3-8.



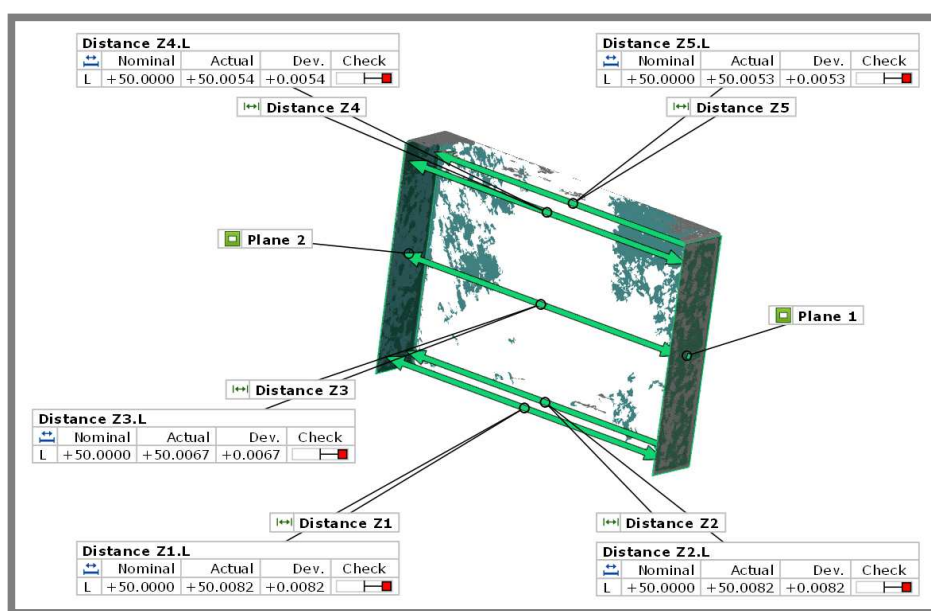
Obr. 3-8 Výsledný snímek nerezové destičky (1:5, 0°)

Johannsonova měrka

Na Johannsonově měrce bylo provedeno měření tloušťky matnicí vrstvy. Měrka s aplikovaným nástřikem byla umístěna na magnet rotačního stolku a to vždy tak aby magnet směřoval stejným směrem. Toto umožnilo v následném vyhodnocení porovnávat vždy téměř identické snímky. Na stěnu směřující vzhůru byly aplikovány 4 referenční body velikosti 0,8mm. Poté byla spuštěna naskriptovaná část skenování. Skript zajistil naskenování ze dvou pohledů, ze kterých byl složen výsledný 3D snímek. Další zpracování snímku bylo prováděno ručně v těchto krocích:

- Polygonizace při vypnutém postprocesingu
- Vyhlazení celého snímku funkcí *Smooth* s hodnotou *Surface tolerance* určující maximální odchylky povrchu, které budou srovnány, nastavenou na 0,005 mm (tímto krokem byl na snímku potlačen vliv šumu)
- Proložení naskenovaných protilehlých stěn nominálního rozměru rovinami metodou *Gaussian best fit*.
- Změření kolmých vzdáleností mezi proloženými rovinami pomocí funkce *Projected point distance* v celkem 5 bodech

Vynesené vzdálenosti jsou na Obr. 3-9. Shodná orientace všech vzorků zajistila u všech vzorků stejné rozmístění těchto 5 bodů a umožnila následné porovnání jednotlivých vzdáleností nejen vzhledem k nominálnímu rozměru měrky ale i napříč koncentracemi. Tabulky s kolmými vzdálenostmi a přepočtem tloušťky matnicí vrstvy v jednotlivých bodech jsou součástí Přílohy 1.



Obr. 3-9 Měření kolmých vzdáleností mezi stěnami nominálního rozměru měrky

3.5.3 Měření křemíkové destičky na profilometru

Křemíková destička byla na profilometru zkoumána z hlediska absolutního překrytí povrchu matnicí vrstvou a z hlediska vzhledu samotné matnicí vrstvy.

Snímání vzorku

Po provedení automatické kalibrace optiky profilometru byla křemíková destička i s podpůrnou deskou umístěna na konzolu profilometru a nastavena tak, aby optika mířila na střed křemíkové destičky (Obr. 3-10). Optika byla rychloposuvem přiblížena na svoji pracovní vzdálenost. Následně byl vzorek snímán 5X objektivem pro detailní zachycení reliéfu matnicí vrstvy a 50X objektivem pro získání grayscale snímku sloužícího k vyhodnocení překrytí povrchu a vzhledu matnicí vrstvy. Parametry pro snímání jsou uvedeny v Tab. 6. Po nasnímání byly snímky analyzovány pomocí vestavěných nástrojů softwaru Vision64.

Tab. 6 Parametry profilometru

Parametry pro snímání na profilometru (shodné pro oba objektivy)	
Rychlost skenování	1X
Zoom	1X
Threshold	2%
Osvětlení	Bílá (výchozí)
Metoda zpracování	VSI/VXI

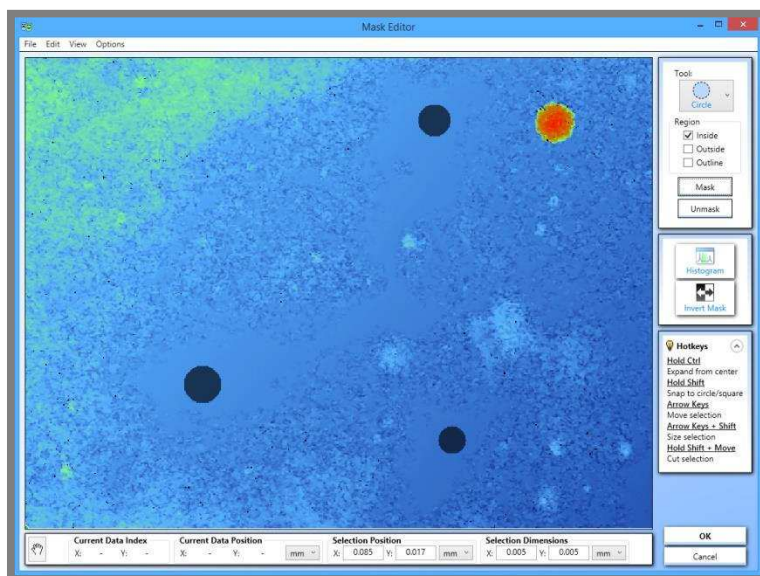


Obr. 3-10 Měření křemíkové destičky na profilometru

Analýza vzorku

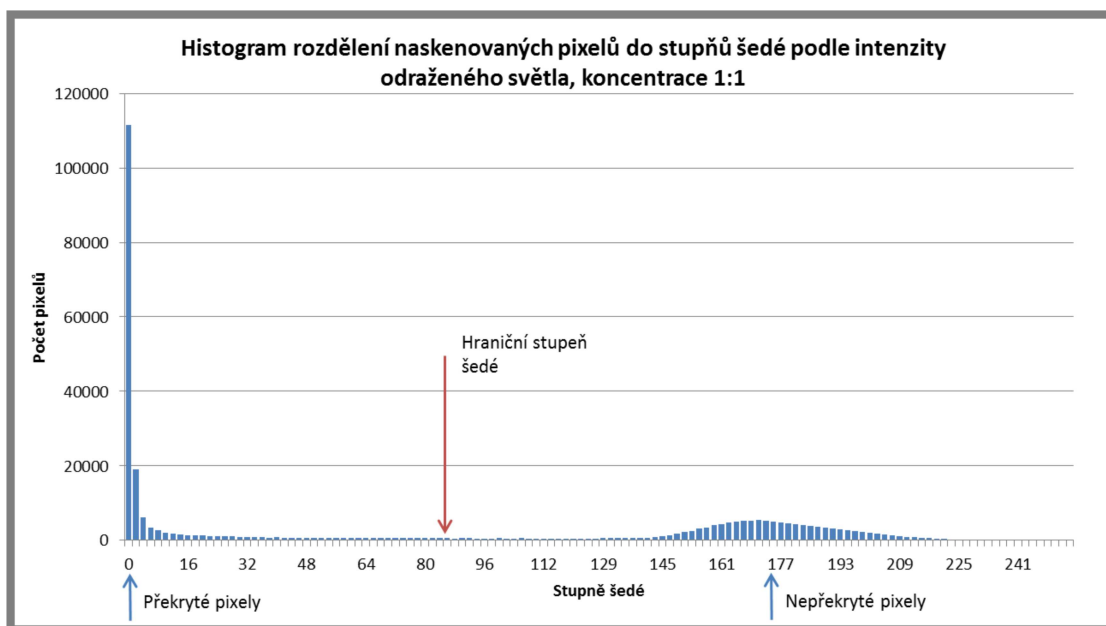
Pro správné zobrazení reliéfu krycí vrstvy bylo nutné snímky z 50X objektivu nejdříve vyrovnat, protože se 3D tiskem nepodařilo docílit ideálně rovné podkladové destičky přípravku. K vyrovnání byl použit nástroj *Terms Removal (F-Operator)*, který za pomoci vybraných bodů (které nebyly překryty matnicí vrstvou) zvolených do masky (Obr. 3-11) odstranil naklonění vzorku.

Na vyrovnaný snímek byla aplikována funkce *Data Restore*, která vyplnila většinu ojedinělých špatně naskenovaných pixelů. Použitím této funkce byl dosažen nízký poměr špatně naskenovaných pixelů, který byl ve všech případech nižší než 0,5%



Obr. 3-11 Vytváření masky pro vyrovnání snímku ve Vision64

Pro snímek z 5X objektivu byla využita funkce *Grayscale Data* která převádí data o intenzitě osvětlení odraženého z povrchu vzorku do objektivu do 256 stupňů šedé. Z počtů pixelů v jednotlivých stupních byl vytvořen pro každý vzorek histogram. Na snímcích nejhustší koncentrace (1:1) byly názorně vidět oblasti zcela zmatněné a oblasti zcela bez matnicí vrstvy. Odpovídající histogram tak vykazoval dva jasně oddělené vrcholky reprezentující počet pixelů zmatněných a nezmatněných. Dle tohoto histogramu byl zvolen hraniční stupeň šedé pro celou sadu vzorků jako stupeň šedé uprostřed mezi těmito vrcholky, konkrétně 85 stupeň v pořadí. Tento postup se běžně aplikuje při CT měření pro rozlišení materiálů jednotlivých voxelů na základě míry pohlcení záření materiálem. Určení hraničního stupně šedé na histogramu je na Obr. 3-12.



Obr. 3-12 Výběr hraničního stupně šedé

Vytvoření jednotné hranice rozdělující histogramy na oblast překrytých pixelů a oblast pixelů nepřekrytých umožnilo vypočítat procentuální zastoupení zmatněných pixelů vůči celkovému počtu pixelů a tím i celkový procentuální podíl úplného překrytí i u vzorků, kde histogramy nevykazovaly zřetelnou hranici mezi těmito dvěma oblastmi. Kompletní sada histogramů je uvedena v Příloze 2.

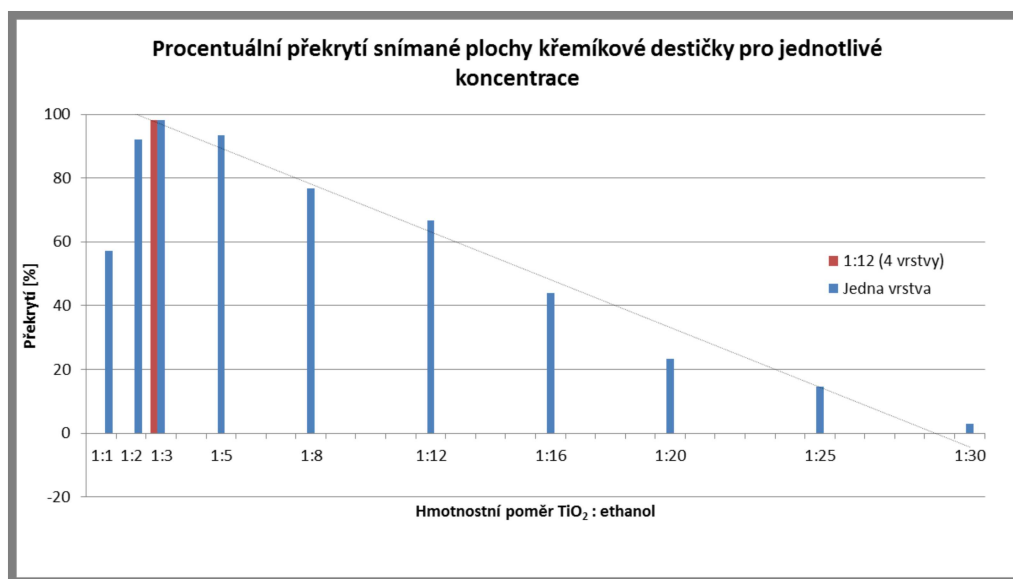
4. VÝSLEDKY

4.1 Proveditelnost matnicího nástřiku u vysokých koncentrací TiO_2

Při provádění nástřiků bylo zjištěno, že extrémní koncentrace TiO_2 1:1 a 1:2 nejsou pro matnění příliš dobře použitelné. Při koncentraci 1:1 se začala ucpávat prakticky okamžitě tryska pistole, při koncentraci 1:2 potom k ucpání došlo v řádu sekund. V obou případech se pistole zanesla do takové míry, že její vyčištění vyžadovalo část pistole rozebrat. Koncentrace 1:3 a nižší toto chování nevykazovaly a pistole fungovala bez problému po celou dobu experimentu.

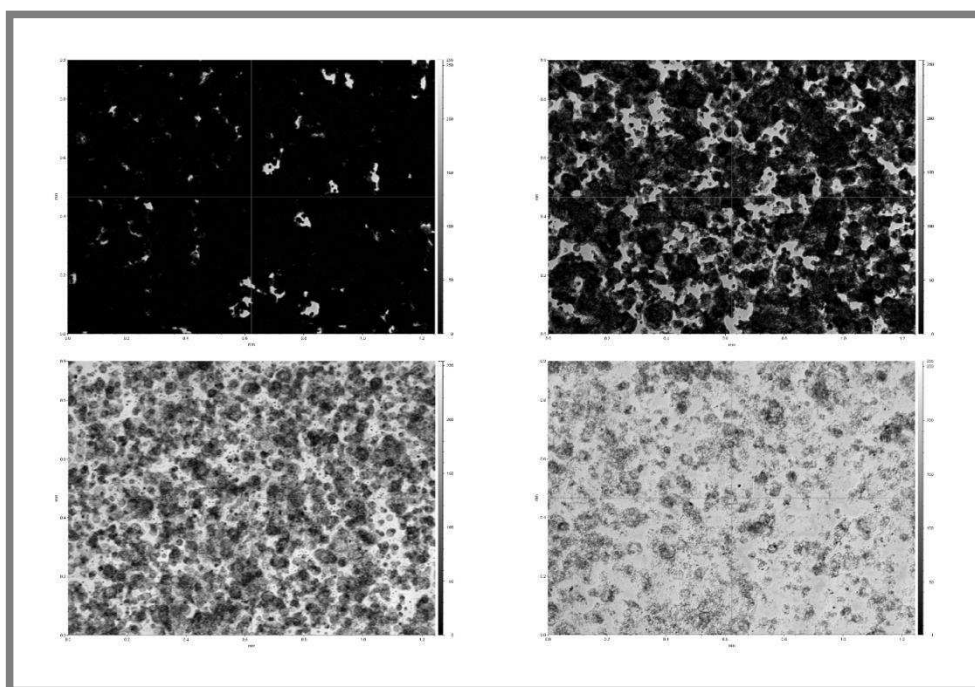
4.2 Překrytí povrchu matnicím nástřikem a vzhled matnicí vrstvy

Pozorování křemíkové destičky na profilometru potvrdilo nevhodnost použití koncentrací 1:1 a 1:2. V prvním případě má matnicí vrstva podobu relativně řídkce roztroušených hrudek, v případě koncentrace 1:2 je sice překrytí lepší ale nedosahuje kvality překrytí koncentrace 1:3. Ta se s procentuálním překrytím 98,04% ukázala jako optimální z hlediska překrytí povrchu. Další koncentrace vykazují očekávaný lineární klesající trend překrytí povrchu. Procentuální překrytí snímané plochy křemíkové destičky na profilometru pro všechny koncentrace nástřiku jsou obsaženy v grafu na Obr. 4-1, kde je také naznačen lineární klesající trend překrytí pro koncentrace 1:3 až 1:30.



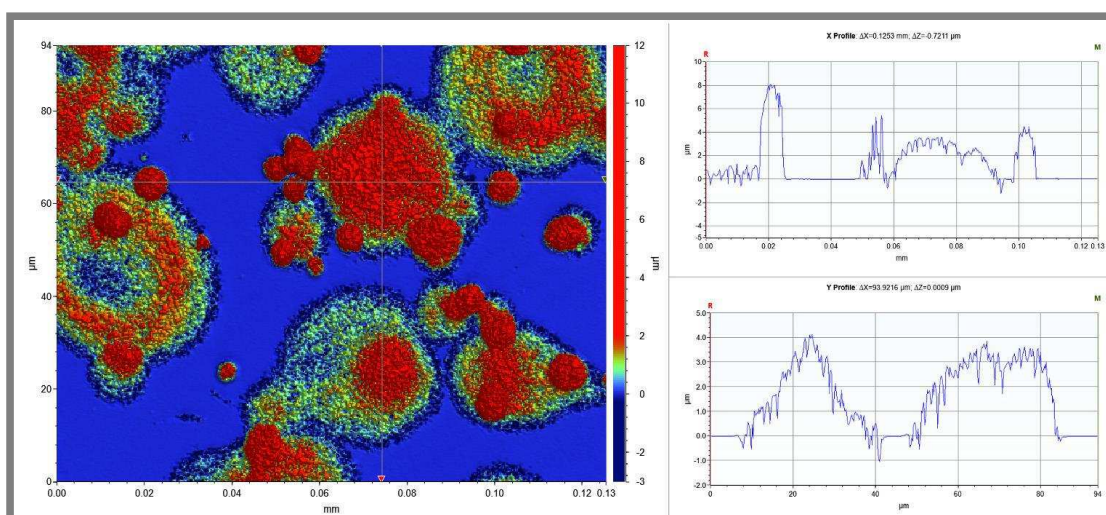
Obr. 4-1 Procentuální překrytí křemíkové destičky pro jednotlivé koncentrace

Na Obr. 4-2 je na vybraných koncentracích vidět jak s klesající koncentrací TiO_2 a tím i klesající hustotou matnicího nástřiku dochází k zeslabování krycích účinků a k zvyšující se intenzitě odraženého světla až k velmi malému překrytí u koncentrace 1:30. Kompletní sada snímků překrytí spolu s odpovídajícími histogramy překrytí je obsažena v Příloze 2.



Obr. 4-2 Grayscale snímky matricí vrstvy (po řadě 1:3 1:8 1:20 1:30)

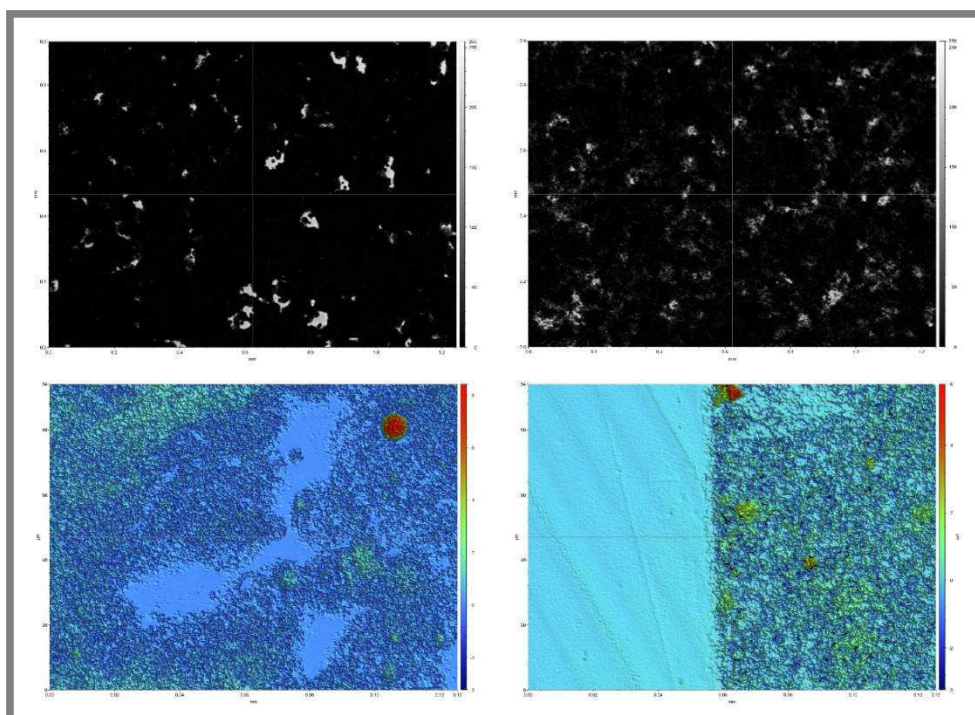
Reliéf matricí vrstvy byl na profilometru dobře viditelný pouze pro vysoké koncentrace 1:1 až 1:3 (znázorněno na Obr. 4-3). U zbytku koncentrací se vyskytují oblasti kde dochází k částečnému odrazu světla a tyto částečně překryté oblasti profilometr vyhodnocoval chybně jako oblasti pod povrchem destičky. Z tohoto důvodu nebylo na profilometru možné stanovit celkový průběh profilu matricí vrstvy pro všechny koncentrace.



Obr. 4-3 Reliéf matricí vrstvy (koncentrace 1:1) a profily řezů ve dvou osách

Čtyřvrstvý nástřík

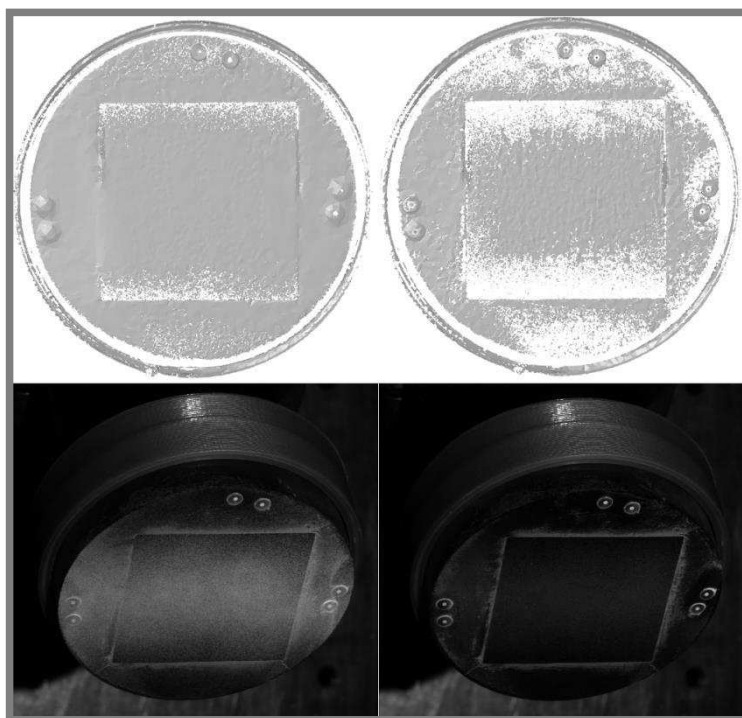
Pro otestování, zda má na parametry matnicí vrstvy vliv počet kroků, ve kterých je na povrch vzorku nanášeno určité množství TiO_2 byl proveden nástřík čtyřmi vrstvami matnicí suspenze o koncentraci 1:12. Tato koncentrace byla zvolena proto, že při jejím čtyřvrstevném nástříku je teoreticky nanášeno stejné množství TiO_2 jako obsahuje jedna vrstva nástříku 1:3, která na profilometru vykazala nejlepší překrytí povrchu vzorku. Oba nástříky dosáhly srovnatelného krycího efektu, což je zaneseno v grafu na obr. 4-1. Vzhledově je pak matnicí vrstva čtyřvrstvého nástříku nepatrně rovnoměrnější. Porovnání obou nástříků je na Obr. 4- 4. Na snímku profilu čtyřnásobného nástříku je vidět setření části matnicí vrstvy pro vyrovnání snímku. Z tohoto porovnání vyplývá, že počet kroků, ve kterých je na povrch vzorku nanášeno určité množství TiO_2 , nemá zásadní vliv na překrytí povrchu.



Obr. 4- 4 Porovnání jedné vrstvy nástříku 1:3 (vlevo) a čtyř vrstev 1:12 (vpravo)

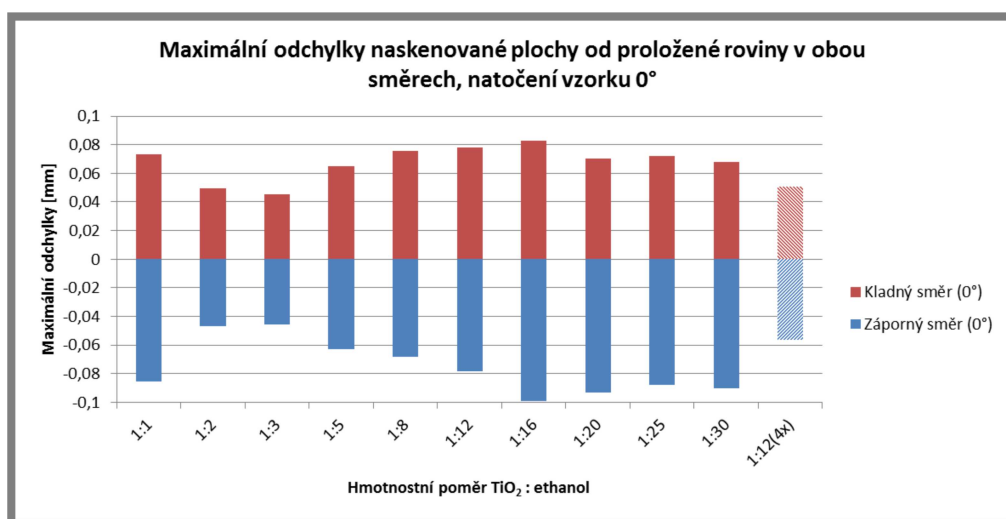
4.3 Dostatečnost zmatnění pro 3D skenování a kvalita povrchu matnicí vrstvy

Porovnáním naskenovaných povrchů nerezové destičky zmatněných jednotlivými koncentracemi suspenze bylo poněkud nečekaně zjištěno, že z hlediska potlačení náhodných chyb způsobených odlesky postačuje i nejmenší testovaná koncentrace TiO_2 . Z Obr. 4-5 je patrný výrazný rozdíl v množství nanášeného prášku mezi koncentracemi s nejlepším překrytím (1:3) a nejnižším obsahem TiO_2 (1:30). Výskyt náhodných chyb však nebyl ve větší míře pozorován ani u nejnižší koncentrace, kde jediným rozdílem byla na snímku poněkud užší zmatněná oblast. Kompletní sada snímků nerezové destičky je obsažena v Příloze 3.

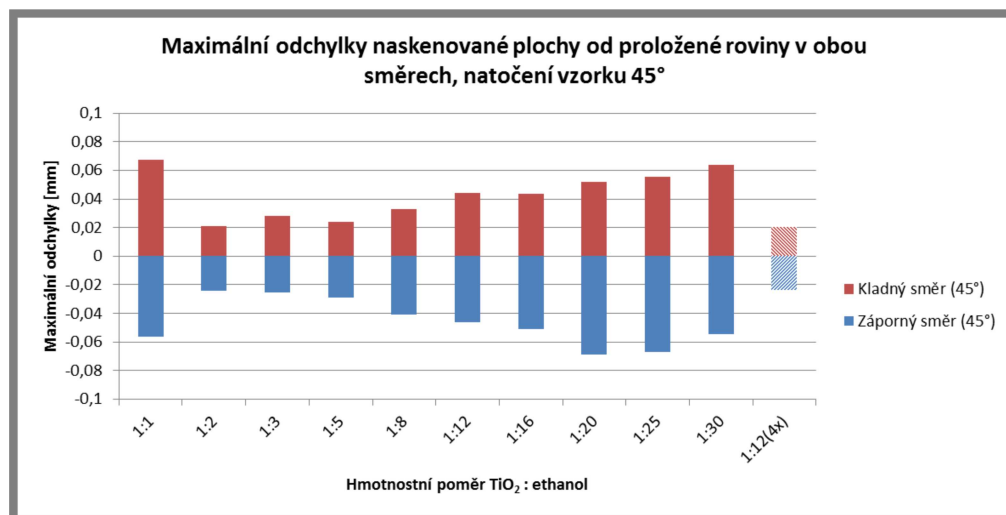


Obr. 4-5 Rozdíly mezi koncentracemi 1:3 (vlevo) a 1:30 (vpravo)

Při vyhodnocování jednotlivých koncentrací matnicího prášku z hlediska kvality struktury zmatněného povrchu byly rozhodujícím parametrem odchylky naskenovaného povrchu nerezové destičky od proložené roviny v kladném a záporném směru. V grafech na Obr. 4-6 a Obr. 4-7 jsou zobrazeny maximální odchylky pro dva úhly natočení vzorku vzhledem k optice skeneru.



Obr. 4-6 Max. odchylky naskenované plochy od proložené roviny (natočení 0°)



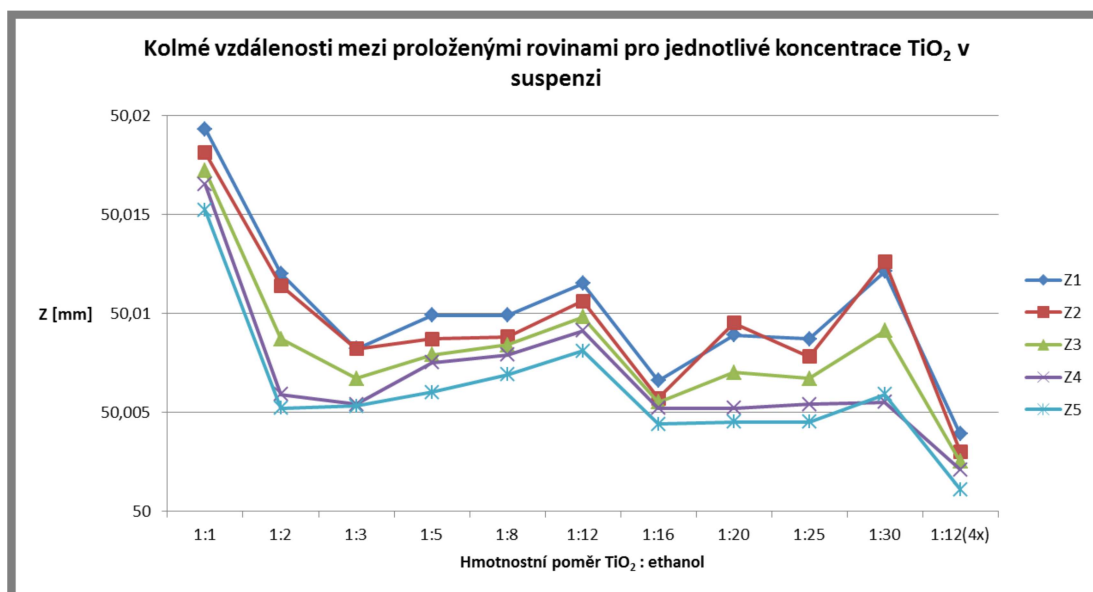
Obr. 4-7 Max. odchylky naskenované plochy od proložené roviny (natočení 45°)

Z těchto grafů vyplývá, že nejmenší odchylky naskenovaného povrchu od proložené roviny poskytují vysoké koncentrace 1:2 až 1:5. Z porovnání grafů je také viditelné, že při nulovém vychýlení vzorku jsou celkově odchylky větší, protože v tomto případě většina odlesků směřuje přímo do kamery skeneru, což zhoršuje optické vlastnosti povrchu. Při vychýlení vzorku většina odlesků směřuje mimo kameru, což znamená že matnicí vrstva tu má lepší efekt.

Čtyřvrstvý nástriek koncentrací 1:12 doměřený po zjištění, že koncentrace 1:3 poskytuje nejlepší překrytí, vykazoval z hlediska odchylek obdobné vlastnosti jako jedna vrstva nástriku koncentrací 1:3. Kvalita vrstvy se tak jeví jako nezávislá na tom, zda je určité množství prášku na vzorek naneseno v jedné nebo více vrstvách.

4.4 Tloušťka matnicí vrstvy

Skenování Johannsonovy měrky ukázalo, že očekávaný pokles tloušťky vrstvy se snižující se koncentrací TiO_2 končí poměrně záhy u koncentrace 1:3. I přesto, že bylo měření prováděno pro dvě vrstvy nástriku (jedna vrstva na obou stěnách jmenovitého rozměru měrky), tak jsou rozdíly u ostatních koncentrací minimální a blízké rozlišovací schopnosti skeneru. Přepočtené tloušťky matnicí vrstvy se pak v této oblasti pohybují v rozmezí 2,5 až 6 μm (Příloha 1). Zajímavý je viditelný pokles tloušťky vrstvy u čtyřvrstvého nástriku koncentrací 1:12 oproti jedné vrstvě koncentrace 1:3. To mohlo být způsobeno tím, že část naneseného TiO_2 byla vždy při dalším přejezdu pistole z velmi hladkého povrchu měrky sfouknuta. Dalším důvodem mohlo být vtlačování částic TiO_2 mezi již nanesené částice z předchozích přejezdů a vytvoření celistvější tenčí vrstvy. Pro průkazné ověření vlivu více vrstev nástriku na tloušťku matnicí vrstvy by však bylo nutné provést další experimenty. Naměřené kolmé vzdálenosti mezi rovinami proloženými zmatněnými plochami měrky jsou zobrazeny v grafu na Obr. 4-8.



Obr. 4-8 Kolmé vzdálenosti mezi stěnami nominálního rozměru měřky

5. DISKUZE

Díky použití *Zařízení pro nástřik matnicího prášku* byly z měření oproti dosavadním pracím zabývajícím se skenováním zmatněných objektů odstraněny chyby související s lidským faktorem při ručním nástřiku. Tento fakt umožnil porovnávat jednotlivé koncentrace nástřiku mezi sebou s relevantními výsledky. Chyby lidského faktoru sice mohly být přítomny při přípravě matnicích suspenzí, ale jejich vliv je zanedbatelný oproti chybám které by lidský faktor do měření vnesl při ručním nástřiku a které by výsledky měření znehodnotily.

Také během automatizovaného nástřiku byla pozorována značná závislost parametrů matnicí vrstvy na nastavení pistole a zařízení. Ukázalo se, že největší vliv má poloha aretačního šroubu regulující zasunutí jehly do trysky. I malé pootočení zásadně ovlivnilo množství naneseného TiO_2 . Celé měření z tohoto důvodu bylo provedeno bez rozebírání pistole a manipulace s regulačním šroubem.

Původně zamýšlený koncentrační rozsah byl inspirován experimentem firmy MCAE Systems s.r.o., při kterém se prováděly nástřiky deseti koncentracemi TiO_2 od 1:1 do 1:10 a matnicí vrstvy byly pozorovány pouze vizuálně. Při tomto experimentu však byl nástřik prováděn ručně a nastavení pistole nebylo konstantní. Pro účely této práce se takovýto rozsah ukázal jako nedostatečný, i nejmenší koncentrace totiž poskytovala značné překrytí. Rozsah byl proto zvětšen až do koncentrace 1:30, při které již bylo překrytí minimální.

Měření celkově ukázalo, že zatímco překrytí povrchu vykazuje očividnou závislost na koncentraci matnicího roztoku a u nejnižší koncentrace již je téměř zanedbatelné, tak matnicí účinky nástřiku byly z hlediska potlačení odlesků a náhodných chyb na koncentraci závislé podstatně méně. S klesající koncentrací TiO_2 se však zhoršovala kvalita naskenovaného povrchu z důvodu nedostatečného překrytí povrchu matnicí vrstvou.

U nerezového vzorku byla zjištěna nedostačující odolnost vůči poškrábání. I přes to, že bylo leštění prováděno jemnou utěrkou na čištění optiky a minimální silou, tak se ke konci experimentu začaly na vzorku objevovat jemné škrábance. V tomto případě se tyto škrábance nacházely pod rozlišovací schopností skeneru a měření tak neovlivňovaly. Pro podobné experimenty na přesnějších přístrojích jako je například profilometr je však vhodné použít tvrdší materiál vzorku. Při měření se v tomto směru osvědčil křemíkový monokrystal.

Během provádění experimentu se také ukázalo, že dosavadní důkladné čištění pistole v ultrazvukové čističce po každém použití pistole je spíše škodlivé. Vlivem častého rozebírání a skládání pistole roste riziko poškození pistole. Například bylo v rámci měření odhaleno naštípnutí trysky, které dlouhodobě způsobovalo nestandardní chování pistole. Bylo zjištěno, že je po použití zcela dostačující pistolí propláchnout ethanolom, případně otřít jehlu od usazené suspenze.

6. ZÁVĚR

Cílem této práce bylo provést za konstantních podmínek zmatnění tří vzorků pro různé koncentrace matnicího nástřiku TiO_2 a na základě porovnání jednotlivých parametrů vzorků vybrat optimální hmotnostní poměr TiO_2 a ethanolu pro přípravu matnicího nástřiku. Stanovený cíl práce byl úspěšně splněn.

Z měření překrytí povrchu křemíkové destičky matnicí vrstvou na profilometru vyplývá, že nejlepších výsledků dosahují velké koncentrace suspenze 1:2, 1:3 a 1:5. Použití koncentrace 1:2 je však spolu s koncentrací 1:1 nevhodné z důvodu ucpávání trysky pistole. Ostatní koncentrace problémy s ucpáváním nevykazovaly.

Měření nerezové destičky na 3D skeneru ukázalo, že nejlepší kvalitu naskenovaného povrchu poskytují nástřiky 1:3 a 1:5. Tyto koncentrace vykazují nejmenší odchylky naskenovaného povrchu od rovinného profilu. Z hlediska zmatnění postačí i koncentrace menší ale na úkor kvality povrchu.

Porovnáním vlivu jednotlivých koncentrací nástřiku na nominální rozměr Johannsonovy měrky ukázalo, že pro účely skenování jsou viditelné rozdíly v tloušťce vrstvy pouze pro koncentrace 1:1, 1:2 a 1:3. Zmenšování hmotnostního poměru TiO_2 k ethanolu pod hodnotu 1:3 nepřináší už žádné výrazné rozdíly v naskenované tloušťce matnicí vrstvy.

Z výsledků celkově vyplývá, že pro účely zmatnění lesklého povrchu je vhodné volit matnicí suspenzi o hmotnostním poměru TiO_2 : ethanol v rozmezí 1:3-1:5. Suspenze v tomto rozmezí poskytují v jedné vrstvě nejlepší překrytí povrchu s nejmenšími odchylkami povrchu od rovinného profilu. Jejich vliv na rozměry skenovaného objektu je minimální a při jejich použití nehrozí nebezpečí ucpání pistole.

Všechny matnicí nástřiky provedené v této práci byly realizovány s použitím titanového prášku Kronos. Další práce z této oblasti by se mohly zabývat titanovými prášky jiných výrobců, které vykazují jiné statistické rozdělení velikosti částic, případně je možné se detailně zaměřit na vícevrstvé provedení nástřiků.

7. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BELLOCCHIO, Francesco. *3D surface reconstruction: multi-scale hierarchical approaches*. New York: Springer, 2013. ISBN 9781461456322.
- [2] GORTHI, Sai a Pramod RASTOGI. Fringe projection techniques: Whither we are?. *Optics and Lasers in Engineering* [online]. 2010, **48**(2), 133-140 [cit. 2016-01-25]. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2009.09.001. ISSN 01438166. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0143816609002164>
- [3] PRZYBILLA, H.-J. a J. PEIPE 3D Modeling of heritage objects by fringe projection and laser scanning systems. *CIPA Heritage documentation: Best practices and appliances Series 1, 2007 & 2009* [online]. 2009, , 35-39 [cit. 2016-02-22]. ISSN 1682-1750.
- [4] ČERMÁK, J. *Metody 3D skenování objektů*. Brno, 2015. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Tomáš Marada, Ph.D.
- [5] *3d-skenovani.cz* [online]. 2013 [cit. 2016-02-25]. Dostupné z: <http://www.3d-skenovani.cz/>
- [6] GANOVELI, F. a M. CORSINI *Acquiring 3D shape* [online prezentace]. In: . Istituto di Scienza e Tecnologie dell'Informazione "A. Faedo" an Institute of the National Research Council of Italy, [cit. 2016-02-06].
- [7] ŠIMONÍK, M. Digitalizace - její princip a rozdělení. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2004 [cit. 2016-02-20].
- [8] *Počítačová grafika - teorie, vstupní a výstupní zařízení, aplikace vývoje výrobků* [online prezentace]. In: . Liberec: Technická univerzita v Liberci, Katedra oděvnictví, [cit. 2016-1-25].
- [9] TIŠNOVSKÝ, P. Bezkontaktní digitalizace předmětů pomocí 3D scanneru Minolta Vivid VI-700. *Elektrorevue* [online]. 2003 [cit. 2016-02-07].
- [10] MADA, S.K., M.L. SMITH, L.N. SMITH a P.S. MIDHA Overview of passive and active vision techniques for hand-held 3D data acquisition. *Optical Metrology, Imaging, and Machine Vision* [online]. Opto-Ireland, 2002, **4877**, 16-28 [cit. 2016-02-24]. DOI: 10.1117/12.463773.
- [11] *ATOS Triple Scan* [online]. 2008 [cit. 2016-02-15]. Dostupné z: <http://www.gom.com/metrology-systems/system-overview/atos-triple-scan.html>
- [12] TALEBI, R., A. ABDEL-DAYEM a J. JOHNSON 3-D Reconstruction of Objects Using Digital Fringe Projection: Survey and Experimental Study. *International Journal of Mathematical, Computational, Physical, Electrical and Computer Engineering* [online]. 2013, **7**(6) [cit. 2016-02-22].
- [13] ŠVEHLA, A. *3D skenery aneb tvorba objektů do virtuálního světa* [online]. 2014 [cit. 2016-02-22]. Dostupné z: <http://spomocnik.rvp.cz/clanek/19153/3D-SKENERY-ANEB-TVORBA-OBJEKTU-DO-VIRTUALNIHO-SVETA.html>
- [14] SALVI, Joaquim, Jordi PAGÈS a Joan BATLLE. Pattern codification strategies in structured light systems. *Pattern Recognition* [online]. 2004, **37**(4), 827-849 [cit. 2016-02-24]. DOI: 10.1016/j.patcog.2003.10.002. ISSN 00313203. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0031320303003303>
- [15] PAGÈS, J. a J. SALVI Coded light projection techniques for 3D reconstruction.

- J3eA* [online]. 2005, 4(3), - [cit. 2016-02-25]. DOI: 10.1051/bib-j3ea:2005801. ISSN 16385705. Dostupné z: <http://www.j3ea.org/10.1051/bib-j3ea:2005801>
- [16] FENG, Hsi-Yung, Yixin LIU a Fengfeng XI. Analysis of digitizing errors of a laser scanning system. *Precision Engineering* [online]. 2001, 25(3), 185-191 [cit. 2016-04-18]. DOI: 10.1016/S0141-6359(00)00071-4. ISSN 01416359. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141635900000714>
- [17] PALOUSEK, David, Milan OMASTA, Daniel KOUTNY, Josef BEDNAR, Tomas KOUTECKY a Filip DOKOUPIL. Effect of matte coating on 3D optical measurement accuracy. *Optical Materials* [online]. 2015, 40, 1-9 [cit. 2016-04-18]. DOI: 10.1016/j.optmat.2014.11.020. ISSN 09253467. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925346714005606>
- [18] GUPTA, Mohit, Amit AGRAWAL, Ashok VEERARAGHAVAN a Srinivasa NARASIMHAN A Practical Approach to 3D Scanning in the Presence of Interreflections, Subsurface Scattering and Defocus. *International Journal of Computer Vision* [online]. 2013, 102(1-3), 33-55 [cit. 2016-04-18]. DOI: 10.1007/s11263-012-0554-3. ISSN 09205691. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11263-012-0554-3>
- [19] ZHAO, Huijie, Xiaoyue LIANG, Xiaochun DIAO a Hongzhi JIANG. Rapid in-situ 3D measurement of shiny object based on fast and high dynamic range digital fringe projector. *Optics and Lasers in Engineering* [online]. 2014, 54, 170-174 [cit. 2016-04-18]. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2013.08.002. ISSN 01438166. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0143816613002455>
- [20] GUSEL, A., B. ACKO a V. MUDRONJA Measurement Uncertainty in Calibration of Measurement Surface Plates Flatness. *Strojniški vestnik* [online]. 2009, 55(5), 286-292 [cit. 2016-05-15]. ISSN 0039-2480.
- [21] How to prepare an object for scanning: Incredibly Low-Cost 3D Scanner for Everyone.... In: *DAVID-Laserscanner Forum* [online]. 2010 [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://forum.david-3d.com/viewtopic.php?p=12756#p12757>
- [22] Cyclododecane Spray. *Kremer Pigmente* [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: http://www.kremer-pigmente.com/media/files_public/87099e.pdf
- [23] BRAJLIH, T., T. TASIC, I. DRSTVENSEK, V. HADZISTEVIC, J. POGACAR, B. BALIC a B. ACKO. Possibilities of Using Three-Dimensional Optical Scanning in Complex Geometrical Inspection. *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering* [online]. 2011, 57(11), 826-833 [cit. 2016-05-03]. DOI: 10.5545/sv-jme.2010.152. ISSN 00392480.
- [24] DOKOUPIL, F. *Stanovení odchylek měření 3D optického skeneru*. Brno, 2013. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. David Paloušek, Ph.D.
- [25] *ATOS III Triple Scan: User manual – Hardware*. Německo, 2012.
- [26] *Bruker ContourGT-X Datasheet* [online]. 2013 [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: <https://www.bruker.com/products/surface-and-dimensional-analysis/3d-optical-microscopes/contourgt-x/learn-more.html>
- [27] *Bruker ContourGT Objectives Chart* [online]. 2013 [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: <https://www.bruker.com/products/surface-and-dimensional-analysis/3d->

- optical-microscopes/contourgt-x/learn-more.html
- [28] HÁLA, O., D. KVARDA, R. NOHEL a J. ŠKOVIERA *Technická zpráva: Zařízení pro nanášení zmatňovacího nástřiku při 3D skenování*. Brno: Vysoké učení technické v Brně Ústav konstruování, 2015.
- [29] *Inspekční dotyková kuličková sonda* [online]. [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/media/img/gen/d4d341fa3018444c8d4a3c02846b7972.jpg>
- [30] *3D skener GOM ATOS III* [online]. b.r. [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: http://www.vision.fraunhofer.de/de/files/T923/sonderschau_gom_bild_2_gross.jpg
- [31] *Princip metody proužkové projekce* [online]. b.r. [cit. 2016-05-13]. Dostupné z: <https://engineering.purdue.edu/ZhangLab/publications/figures/2009-ole-review.png>
- [32] *Iwata HP-C PLUS* [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://www.iwata-medea.com/products/iwata-airbrushes/high-performance-plus/hp-c-plus/>
- [33] *ATOS Tripple Scan: vertikální posuvná jednotka a dvouosý rotační stůl* [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://www.mcae.cz/atos>

8. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN**8**

Zkratka	Význam
1D	jednodimenzionální
2D	dvojdimenzionální
3D	trojdimenzionální
C ₁₂ H ₂₄	cyklododekan
CaCO ₃	uhličitan vápenatý
CAD	Computer Aided Design
CCD	Charge-Coupled Device
CMM	Coordinate-Measuring Machine
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
CT	Computed Tomography
DIN	Deutsches Institut für Normung
EN	Europäischen Normen
GOM	Gessellschaft für Optische Messtechnik
HDRFA	High dynamic range fringe acquisition
ISO	International Organization for Standardization
LCD	Liquid Crystal Display
LED	Light-Emitting Diode
TiO ₂	oxid titaničitý
VSI	Vertical Scanning Interferometry
VSI/VXI	VSI v režimu vysokého rozlišení

9. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1-1 Rozdělení metod 3D skenování [1; 4; 6]	15
Obr. 1-2 Kuličková dotyková sonda [29]	16
Obr. 1-3 Princip 1D triangulace [9]	18
Obr. 1-4 3D skener GOM ATOS III [30]	19
Obr. 1-5 Princip 3D skeneru strukturovaného světla [31]	20
Obr. 1-6 Chyby skenování na lesklé destičce (koncentrace 1:16, natočení 0°)	21
Obr. 3-1 Nerezová destička	25
Obr. 3-2 Přípravky pro nástřík s příslušnými vzorky	26
Obr. 3-3 Přípravek pro ATOS	26
Obr. 3-4 Zařízení pro nanášení zmatňujícího nástříku	27
Obr. 3-5 Iwata HP-C Plus [32]	27
Obr. 3-6 Konfigurace 3D skeneru pro měření [33]	28
Obr. 3-7 Vzorky připravené na nástřík	30
Obr. 3-8 Výsledný snímek nerezové destičky (1:5, 0°)	31
Obr. 3-9 Měření kolmých vzdáleností mezi stěnami nominálního rozměru měřky	32
Obr. 3-10 Měření křemíkové destičky na profilometru	33
Obr. 3-11 Vytváření masky pro vyrovnání snímku ve Vision64	34
Obr. 3-12 Výběr hraničního stupně šedé	34
Obr. 4-1 Procentuální překrytí křemíkové destičky pro jednotlivé koncentrace	36
Obr. 4-2 Grayscale snímky matnicí vrstvy (po řadě 1:3 1:8 1:20 1:30)	37
Obr. 4-3 Reliéf matnicí vrstvy (koncentrace 1:1) a profily řezů ve dvou osách	37
Obr. 4-4 Porovnání jedné vrstvy nástříku 1:3 (vlevo) a čtyř vrstev 1:12 (vpravo)	38
Obr. 4-5 Rozdíly mezi koncentracemi 1:3 (vlevo) a 1:30 (vpravo)	39
Obr. 4-6 Max. odchylky naskenované plochy od proložené roviny (natočení 0°)	39
Obr. 4-7 Max. odchylky naskenované plochy od proložené roviny (natočení 45°)	40
Obr. 4-8 Kolmé vzdálenosti mezi stěnami nominálního rozměru měřky	41

10. SEZNAM TABULEK**10**

Tab. 1 Přehled měření	25
Tab. 2 Přehled měřených koncentrací	26
Tab. 3 Použitá konfigurace skeneru [25]	28
Tab. 4 Parametry použitých objektivů [27]	29
Tab. 5 Parametry nástřiku a nastavení zařízení pro nástřik [28]	30
Tab. 6 Parametry profilometru	33

11. SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1:** Tabulky s výsledky měření nerezové destičky a Johanssonovy měrky
Příloha 2: Histogramy překrytí a grayscale snímky křemíkové destičky
Příloha 3: Fotky a 3D skeny nerezové destičky
Příloha 4: Protokol z analýzy statistického rozložení velikostí částic titanového prášku Kronos

Příloha 1: Tabulky s výsledky měření nerezové destičky a Johannsonovy měřky

Výsledky měření nerezové destičky, natočení vzorku 0°				
TiO ₂ :ethanol	Naskenovaná plocha	Max. odchylka (záporný směr)	Max. odchylka (kladný směr)	Max. absolutní odchylka
(hm. poměr)	[mm ²]	[mm]	[mm]	[mm]
1:1	362,243	-0,08522	0,07345	0,08522
1:2	402,692	-0,04689	0,04962	0,04962
1:3	402,750	-0,04559	0,04562	0,04562
1:5	402,566	-0,06268	0,06515	0,06515
1:8	401,263	-0,06829	0,07538	0,07538
1:12	397,092	-0,07853	0,07812	0,07853
1:16	394,306	-0,09907	0,08253	0,09907
1:20	381,663	-0,09296	0,07051	0,09296
1:25	359,739	-0,08777	0,07185	0,08777
1:30	370,862	-0,09005	0,06791	0,09005
1:12 (4x)	402,559	-0,05653	0,05088	0,05653

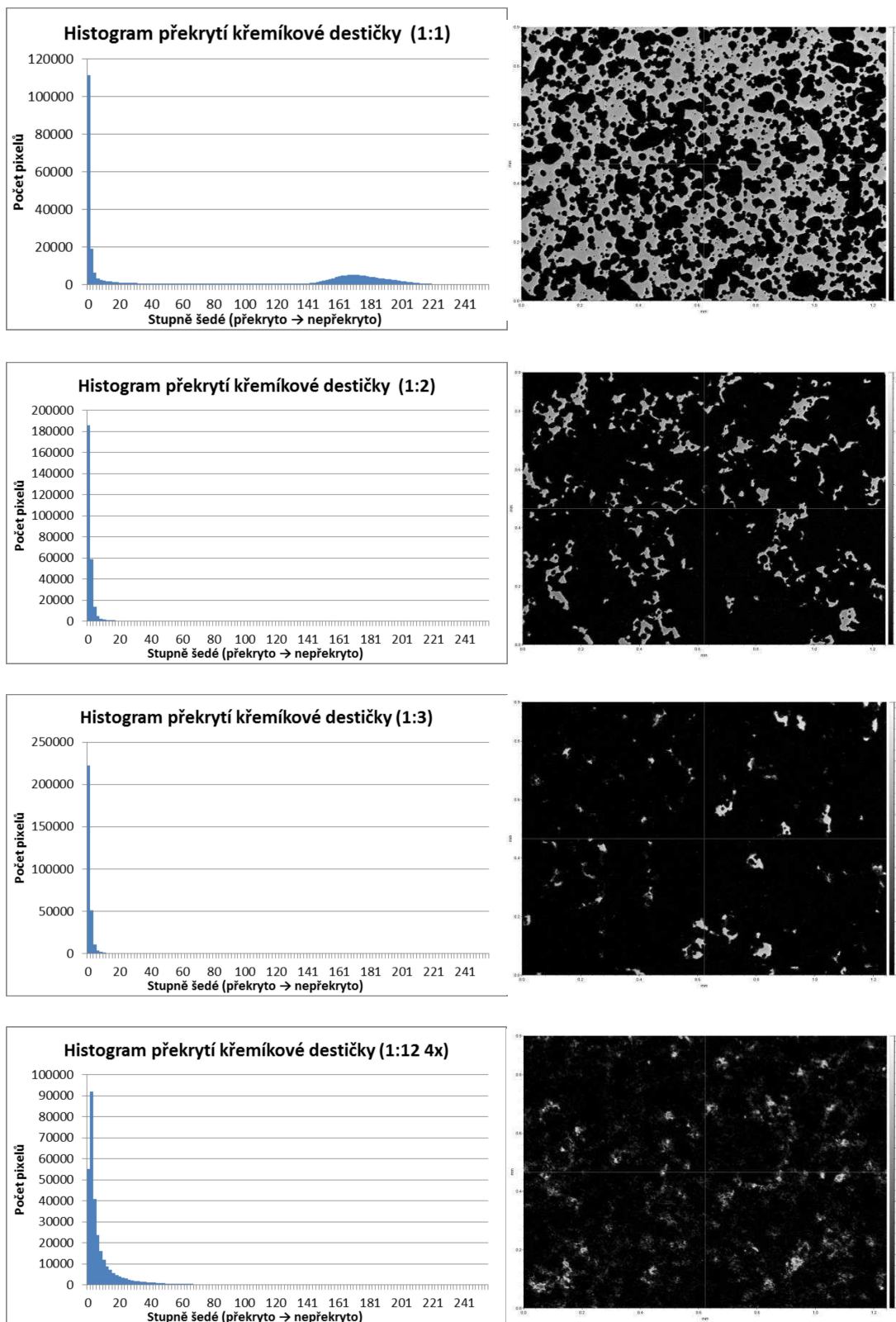
Výsledky měření nerezové destičky, natočení vzorku 45°				
TiO ₂ :ethanol	Naskenovaná plocha	Max. odchylka (záporný směr)	Max. odchylka (kladný směr)	Max. absolutní odchylka
(hm. poměr)	[mm ²]	[mm]	[mm]	[mm]
1:1	374,418	-0,05637	0,06744	0,06744
1:2	403,491	-0,02439	0,02109	0,02439
1:3	403,720	-0,02549	0,02835	0,02835
1:5	403,338	-0,02905	0,02425	0,02905
1:8	402,815	-0,04072	0,03302	0,04072
1:12	402,491	-0,04639	0,04413	0,04639
1:16	399,847	-0,05124	0,04350	0,05124
1:20	378,907	-0,06881	0,05216	0,06881
1:25	348,827	-0,06698	0,05555	0,06698
1:30	340,815	-0,05439	0,06383	0,06383
1:12 (4x)	403,782	-0,02348	0,02050	0,02348

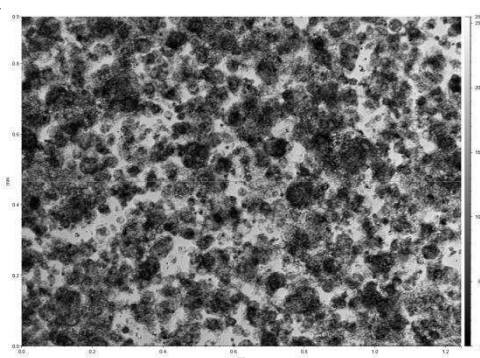
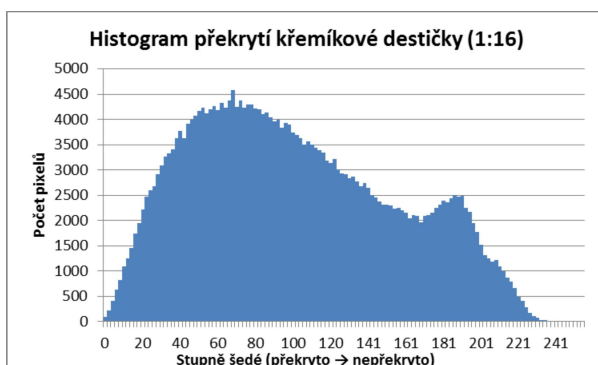
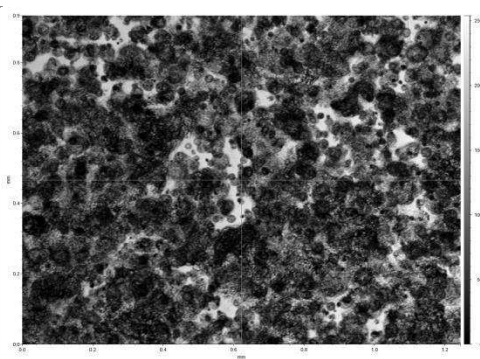
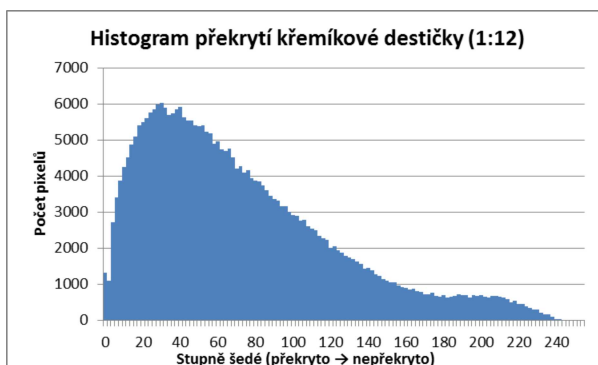
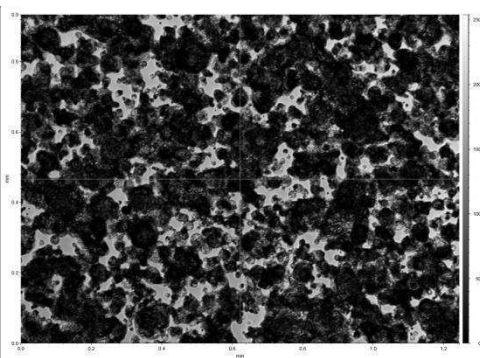
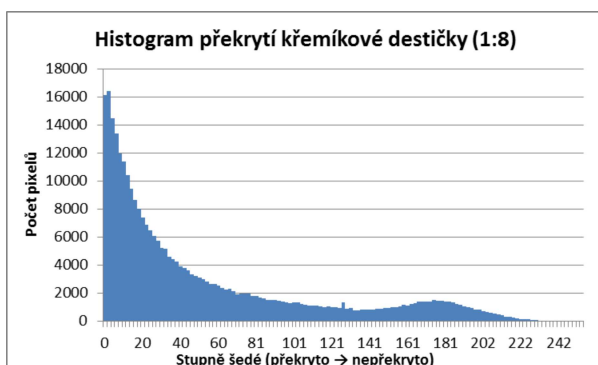
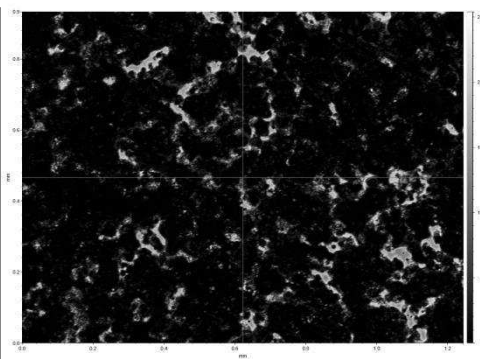
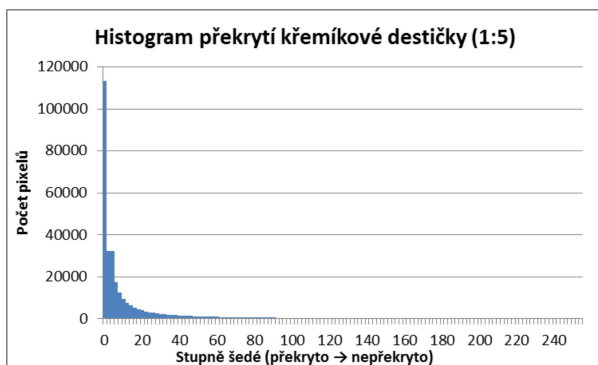
Výsledky měření kolmých vzdáleností na Johannsonově měrce					
TiO ₂ :ethanol	Vzdálenost Z1	Vzdálenost Z2	Vzdálenost Z3	Vzdálenost Z4	Vzdálenost Z5
(hm. poměr)	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1:1	50,0193	50,0181	50,0172	50,0165	50,0152
1:2	50,0120	50,0114	50,0087	50,0059	50,0052
1:3	50,0082	50,0082	50,0067	50,0054	50,0053
1:5	50,0099	50,0087	50,0079	50,0075	50,0060
1:8	50,0099	50,0088	50,0084	50,0079	50,0069
1:12	50,0115	50,0106	50,0098	50,0091	50,0081
1:16	50,0066	50,0057	50,0055	50,0052	50,0044
1:20	50,0089	50,0095	50,0070	50,0052	50,0045
1:25	50,0087	50,0078	50,0067	50,0054	50,0045
1:30	50,0121	50,0126	50,0091	50,0055	50,0059
1:12 (4x)	50,0039	50,0030	50,0025	50,0021	50,0011

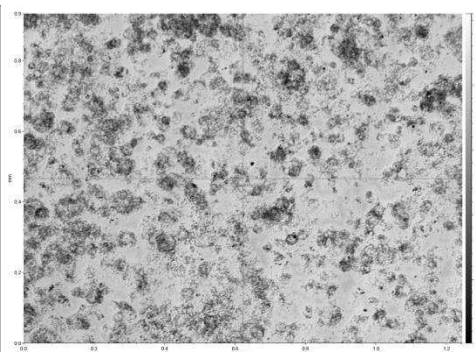
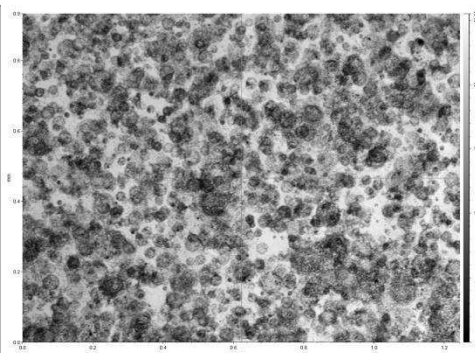
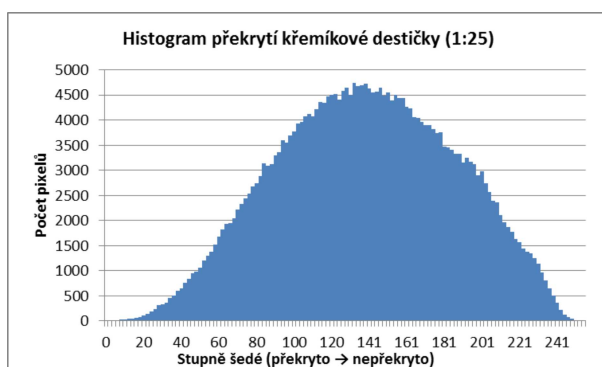
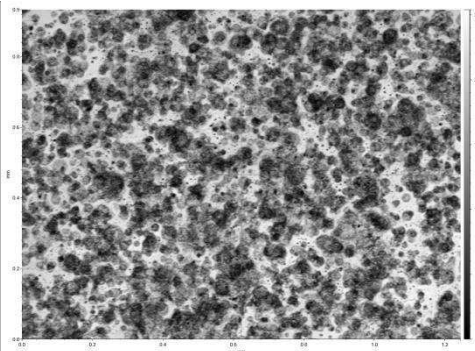
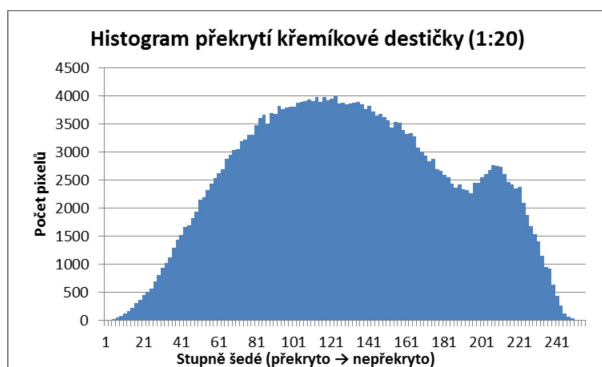
Přepočtené tloušťky matnicí vrstvy ve změřených bodech Johannsonovy měrky					
TiO ₂ :ethanol	Tloušťka vrstvy Z1	Tloušťka vrstvy Z2	Tloušťka vrstvy Z3	Tloušťka vrstvy Z4	Tloušťka vrstvy Z5
(hm. poměr)	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]
1:1	9,65	9,05	8,60	8,25	7,60
1:2	6,00	5,70	4,35	2,95	2,60
1:3	4,10	4,10	3,35	2,70	2,65
1:5	4,95	4,35	3,95	3,75	3,00
1:8	4,95	4,40	4,20	3,95	3,45
1:12	5,75	5,30	4,90	4,55	4,05
1:16	3,30	2,85	2,75	2,60	2,20
1:20	4,45	4,75	3,50	2,60	2,25
1:25	4,35	3,90	3,35	2,70	2,25
1:30	6,05	6,30	4,55	2,75	2,95
1:12 (4x)	1,95	1,50	1,25	1,05	0,55

Tloušťka vrstvy v místě $Z_n \dots Z_{tln}$

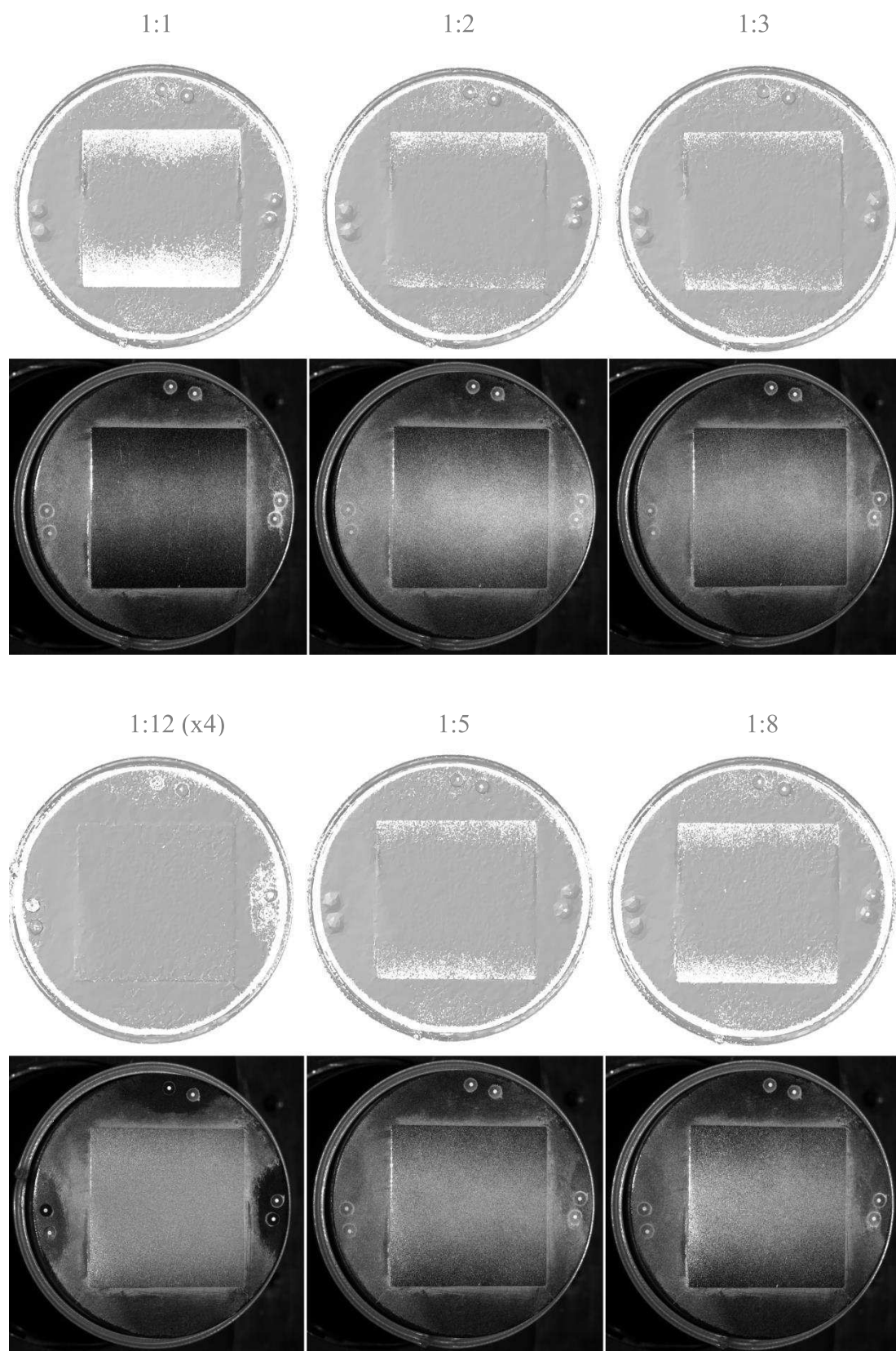
$$Z_{tln} = \frac{Z_n[mm] - 50}{2} \cdot 10^3[\mu m]$$

Příloha 2: Histogramy překrytí a grayscale snímky pro jednotlivé koncentrace nástríku křemíkové destičky

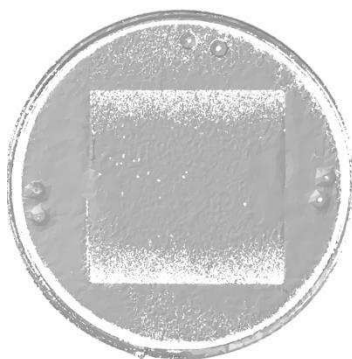




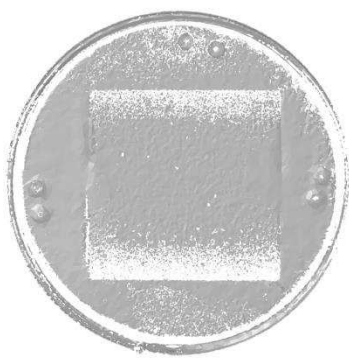
Příloha 3: Fotky a 3D skeny nerezové destičky pro jednotlivé koncentrace



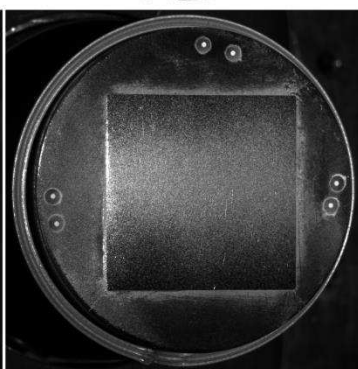
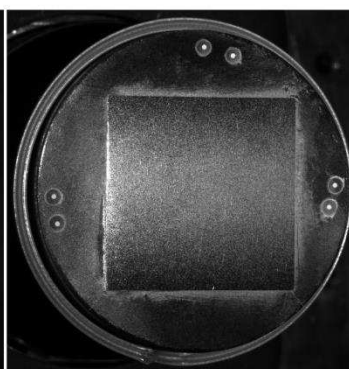
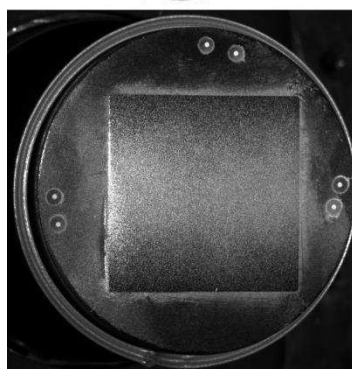
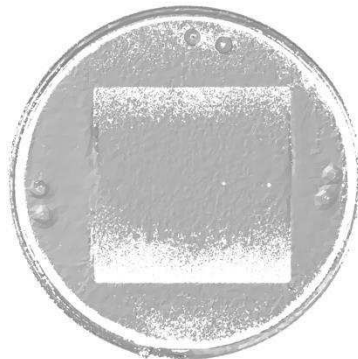
1:12



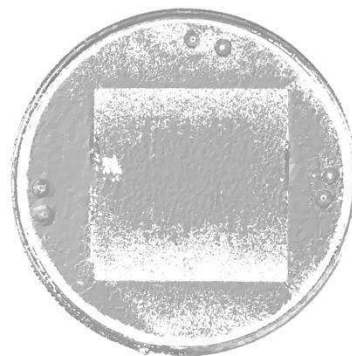
1:16



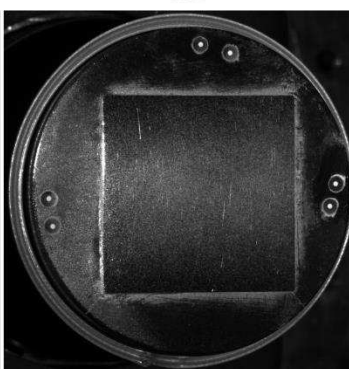
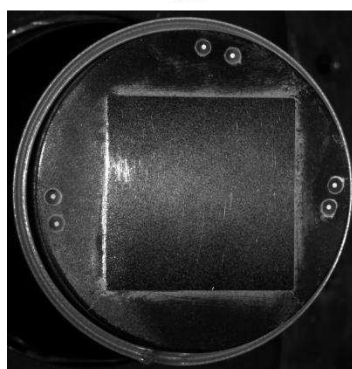
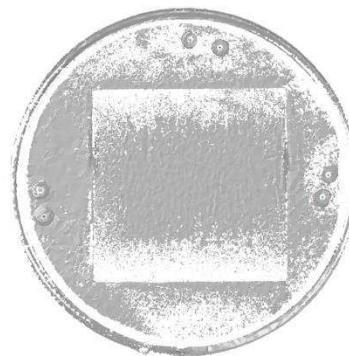
1:20



1:25



1:30



Příloha 4: Protokol z analýzy statistického rozložení velikostí částic titanového prášku Kronos

