

# Hodnocení jakosti povrchu výrobku 3D tiskáren

Bc. Lenka Kunertová

---

Diplomová práce  
2015



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2014/2015

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Lenka Kunertova**  
Osobní číslo: **T130000**  
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Řízení jakosti**  
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Hodnocení jakosti povrchu výrobku 3D tiskáren**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracování literární rešerše na dané téma
2. Návrh referenční součástky pro hodnocení
3. Provedte měření povrchu součástí
4. Provedte statistické hodnocení naměřených dat

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. CHUA, C. K., LEONG, K. F., LIM, C. S: **Rapid Prototyping: Principles and Applications**. World Scientific Publishing. USA: World Scientific Publishing, 2010. ISBN 9812778977
2. BARNATT, CH.: **3D Printing: The Next Industrial Revolution**, United Kingdom: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2013. ISBN: 978-1484181768
3. dále dle doporučení vedoucího práce

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Martin Řezníček**  
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

**30. ledna 2015**

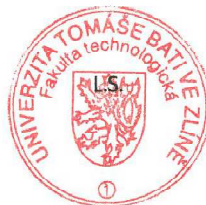
Termín odevzdání diplomové práce:

**13. května 2015**

Ve Zlíně dne 30. ledna 2015



doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.  
*děkan*



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

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

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

Ve Zlíně .....04.05.2015

.....

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## **ABSTRAKT**

Náplňou tejto diplomovej práce je porovnanie povrchov súčiastok vyrobených na dvoch rôznych 3D tlačiarňach s rovnakou technológiou na základe merania kvality povrchu.

V teoretickej časti je vypracovaný rešerš na danú tému. Udáva základné informácie o 3D tlači, kvalite povrchu a možnosti merania povrchov.

Praktická časť popisuje 3D model, výrobu súčiastok, použité zariadenia, meranie povrchu, štatisticky a graficky spracované a následne vyhodnotené namerané hodnoty.

**Kľúčové slová:** 3D tlač, kvalita povrchu, drsnosť povrchu, kontaktné snímanie povrchu.

## **ABSTRACT**

The aim of this thesis is comparison of part surfaces produced on two different 3D printers with the same technology by measuring the surface quality.

The theoretical part includes the research for a given topic. It gives basic information about 3D printing, surface quality, and the possibility of measuring surfaces.

The practical part describes the 3D model, the production of parts, used equipment, the measurement of roughness, statistically and graphically processed and subsequently assessed measured data.

**Keywords:** 3D printing, surface quality, surface roughness, contact sensing surface

Touto cestou by som chcela poďakovať vedúcemu diplomovej práce Ing. Martinovi Řezníčkovi za jeho čas, ochotu, odbornú pomoc a správne nasmerovanie počas vypracovania diplomovej práce.

Prehlasujem, že odovzdaná verzia diplomovej práce a elektronická verzia nahraná do IS/STAG sú totožné.

# OBSAH

|                                                                           |           |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>ÚVOD</b> .....                                                         | <b>11</b> |
| <b>I TEORETICKÁ ČASŤ</b> .....                                            | <b>12</b> |
| <b>1 3D TLAČ</b> .....                                                    | <b>13</b> |
| 1.1 3D MODEL PRE 3D TLAČ.....                                             | 14        |
| 1.2 PROCES 3D TLAČE.....                                                  | 15        |
| 1.3 MATERIÁL PRE 3D TLAČ.....                                             | 16        |
| 1.4 ZÁKLADNÉ TECHNOLOGIE 3D TLAČE.....                                    | 18        |
| 1.4.1 Vytlačanie vlákna polyméru (Material Extrusion).....                | 19        |
| 1.4.2 Laserové vytvrdzovanie fotopolyméru (Vat Photopolymerization).....  | 20        |
| 1.4.3 Nastrekovanie vrstiev tekutého polyméru (Material Jetting).....     | 21        |
| 1.4.4 Spájanie vrstiev prášku nastrekovaním spojiva (Binder Jetting)..... | 22        |
| 1.4.5 Selektívne laserové spekanie prášku (Powder Bed Fusion).....        | 23        |
| 1.4.6 Laminovanie papiera alebo špeciálnej fólie (Sheet Lamination).....  | 24        |
| 1.4.7 Priame spekanie laserom (Directed Energy Deposition).....           | 25        |
| 1.5 APLIKÁCIE 3D TLAČE.....                                               | 26        |
| <b>2 KVALITA POVRCHU VÝROBKU</b> .....                                    | <b>28</b> |
| 2.1 NORMY ZAOBERAJÚCE SA ŠTRUKTÚROU POVRCHU.....                          | 28        |
| 2.1.1 Definície geometrických parametrov.....                             | 29        |
| 2.1.2 Stredné čiary.....                                                  | 31        |
| 2.2 VÝŠKOVÉ PARAMETRE.....                                                | 31        |
| 2.2.1 Rp - výška najväčšieho výstupku profilu.....                        | 31        |
| 2.2.2 Rv - hĺbka najväčšej priehlbiny profilu.....                        | 32        |
| 2.2.3 Rz - najväčšia výška profilu.....                                   | 32        |
| 2.2.4 Rc - stredná výška nerovnosti profilu.....                          | 32        |
| 2.2.5 Rt - celková výška profilu.....                                     | 33        |
| 2.2.6 Ra - stredná aritmetická odchýlka posudzovaného profilu.....        | 33        |
| 2.2.7 Rq - stredná kvadratická odchýlka posudzovaného profilu.....        | 34        |
| 2.2.8 Rsk - koeficient asymetrie profilu.....                             | 34        |
| 2.2.9 Rku - koeficient špicatosti profilu.....                            | 34        |
| 2.3 DÍŽKOVÉ PARAMETRE, RSM - STREDNÁ ŠÍRKA PRVKU PROFILU.....             | 35        |
| 2.4 TVAROVÉ PARAMETRE, RΔQ - PRIEMERNÝ KVADRATICKÝ SKLON.....             | 35        |
| 2.5 KRIVKY A IM ZODPOVEDAJÚCE PARAMETRE.....                              | 35        |
| 2.5.1 Rmr (c) - materiálový podiel profilu drsnosti.....                  | 35        |
| 2.5.2 Krivka materiálového podielu profilu.....                           | 36        |
| 2.5.3 Rdc - rozdiel výšky úseku profilu.....                              | 36        |
| 2.5.4 Rmr - relatívny podiel materiálu.....                               | 36        |
| 2.5.5 Empirické rozdelenie výšok profilu.....                             | 37        |
| <b>3 METÓDY KONTROLY ŠTRUKTÚRY POVRCHU</b> .....                          | <b>38</b> |
| 3.1 KONTAKTNÁ MERACIA METÓDA.....                                         | 38        |
| 3.2 BEZKONTAKTNÁ MERACIA METÓDA.....                                      | 39        |
| <b>II PRAKTICKÁ ČASŤ</b> .....                                            | <b>40</b> |
| <b>4 3D TLAČ NAVRHOVANEJ SÚČIASTKY</b> .....                              | <b>41</b> |



|          |                                                                                                           |           |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.1      | TVAR A ROZMERY NAVRHOVANEJ SÚČIASTKY .....                                                                | 41        |
| 4.2      | ŠPECIFIKÁCIA POUŽITÝCH 3D TLAČIARNÍ.....                                                                  | 42        |
| 4.2.1    | Tlačiareň Stratasys Dimension SST 768.....                                                                | 42        |
| 4.2.2    | Tlačiareň Stratasys Fortus 900mc .....                                                                    | 43        |
| 4.3      | POSTUP 3D TLAČE NAVRHNUTEJ SÚČIASTKY.....                                                                 | 44        |
| 4.4      | MATERIÁL SÚČIASTKY .....                                                                                  | 47        |
| <b>5</b> | <b>MERANIE DRSNOSTI POVRCHU .....</b>                                                                     | <b>48</b> |
| 5.1      | URČENIE POVRCHOV A SMERU MERANIA .....                                                                    | 48        |
| 5.2      | VÝBER OBLASTI PRE MERANIE.....                                                                            | 50        |
| 5.3      | POSTUP MERANIA NA PRÍSTROJI FORM TALYSURF 50.....                                                         | 51        |
| <b>6</b> | <b>ŠTATISTICKÉ SPRACOVANIE VÝSLEDKOV MERANÍ.....</b>                                                      | <b>53</b> |
| 6.1      | KONTROLA DÁT.....                                                                                         | 53        |
| 6.2      | VYHODNOTENIE VYBRANÝCH PARAMETROV.....                                                                    | 53        |
| 6.2.1    | Anderson - Darlingov test .....                                                                           | 54        |
| 6.2.2    | F-test.....                                                                                               | 56        |
| 6.2.3    | T-test .....                                                                                              | 57        |
| 6.2.4    | Výstup zo štatistického spracovania výsledkov meraní.....                                                 | 58        |
| <b>7</b> | <b>VYHODNOTENIE VÝSLEDKOV MERANÍ.....</b>                                                                 | <b>59</b> |
| 7.1      | HODNOTENIE PARAMETROV DRSNOSTI PRE SÚČIASTKY Z 3D TLAČE S<br>HRÚBKOU VRSTVY 0,25 MM.....                  | 59        |
| 7.1.1    | Parameter Ra na stenách súčiastok D_25 a F_25.....                                                        | 60        |
| 7.1.2    | Parameter Rq na stenách súčiastok D_25 a F_25 .....                                                       | 61        |
| 7.1.3    | Parameter Rz na stenách súčiastok D_25 a F_25.....                                                        | 62        |
| 7.1.4    | Parameter RSm na stenách súčiastok D_25 a F_25 .....                                                      | 63        |
| 7.1.5    | Parameter Rmr (c) na stenách súčiastok D_25 a F_25 .....                                                  | 64        |
| 7.2      | VYHODNOTENIE VÝSLEDKOV MERANÍ NA JEDNOTLIVÝCH STENÁCH MEDZI<br>SÚČIASTKAMI S HRÚBKOU VRSTVY 0,25 MM ..... | 64        |
| 7.2.1    | Porovnanie parametrov na vrchnej stene D_25_V vs F_25_V .....                                             | 65        |
| 7.2.2    | Porovnanie parametrov na bočnej stene D_25_B vs F_25_B.....                                               | 65        |
| 7.2.3    | Porovnanie parametrov na spodnej stene D_25_s vs F_25_S .....                                             | 66        |
| 7.3      | ZHRNUTIE HODNOTENIA PARAMETROV DRSNOSTI PRE HRÚBKU VRSTVY 0,25<br>MM .....                                | 67        |
| 7.4      | HODNOTENIE PARAMETROV DRSNOSTI PRE SÚČIASTKY Z 3D TLAČE S<br>HRÚBKOU 0,33 MM .....                        | 68        |
| 7.4.1    | Parameter Ra na stenách súčiastok D_33 a F_33.....                                                        | 69        |
| 7.4.2    | Parameter Rq na stenách súčiastok D_33 a F_33 .....                                                       | 70        |
| 7.4.3    | Parameter Rz na stenách súčiastok D_33 a F_33.....                                                        | 71        |
| 7.4.4    | Parameter RSm na stenách súčiastok D_33 a F_33 .....                                                      | 72        |
| 7.4.5    | Parameter Rmr na stenách súčiastok D_33 a F_33 .....                                                      | 73        |
| 7.5      | VYHODNOTENIE VÝSLEDKOV MERANÍ NA JEDNOTLIVÝCH STENÁCH MEDZI<br>SÚČIASTKAMI S HRÚBKOU VRSTVY 0,33 MM ..... | 73        |
| 7.5.1    | Porovnanie parametrov na vrchnej stene D_33_V vs F_33_V .....                                             | 73        |
| 7.5.2    | Porovnanie parametrov na bočnej stene D_33_B vs F_33_B.....                                               | 74        |
| 7.5.3    | Porovnanie parametrov na spodnej stene D_33_S vs F_33_S.....                                              | 75        |

|                                                   |                                                                            |           |
|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 7.6                                               | ZHRNUTIE HODNOTENIA PARAMETROV DRSNOSTI PRE HRÚBKU VRSTVY 0,33<br>MM ..... | 76        |
| <b>ZÁVER</b> .....                                |                                                                            | <b>78</b> |
| <b>ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY</b> .....           |                                                                            | <b>80</b> |
| <b>ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK</b> ..... |                                                                            | <b>83</b> |
| <b>ZOZNAM OBRÁZKOV</b> .....                      |                                                                            | <b>85</b> |
| <b>ZOZNAM TABULIEK</b> .....                      |                                                                            | <b>88</b> |
| <b>ZOZNAM PRÍLOH</b> .....                        |                                                                            | <b>89</b> |

## ÚVOD

Súčasná doba je charakteristická snahou o zvyšovanie kvality a zefektívňovaním procesov vo všetkých smeroch. V oblasti zhotovenia výrobkov sa významnou metódou, ktorá zefektívnila výrobu rôznych objektov, stala 3D tlač. Metóda 3D tlače predstavuje nové technológie pre výrobu presných dielov priamo z CAD modelu v krátkom čase a s minimálnou potrebou ľudského zásahu, čiže ide o automatizovaný proces. Technológia 3D tlače umožňuje výrazne skrátiť čas a znížiť náklady, ktoré sú potrebné na vyhotovenie nového návrhu, na výrobný proces.

Základný predpoklad pre správnu funkciu a dlhú životnosť súčiastok je vhodná kvalita povrchu, ktorá predstavuje okrem geometrického tvaru povrchu a veľkosti jeho nerovností aj fyzikálny a chemický stav povrchovej vrstvy materiálu. Pri posudzovaní kvality povrchu materiálu sa sleduje najmä drsnosť povrchu. Kvalita povrchu predstavuje závislosť na použitom nástroji, technológii výroby alebo od uskutočnených úprav povrchu. Pri kontrole drsnosti povrchu sa využívajú kvalitatívne a kvantitatívne metódy. Častejšie sú využívané kvantitatívne metódy, ktoré sa vyjadrujú parametrami, ktoré sa zisťujú dotykovými alebo bezdotykovými prístrojmi.

Cieľom tejto diplomovej práce je popísať a ohodnotiť kvalitu povrchov súčiastok vyrobených pomocou 3D tlače. Diplomová práca je po obsahovej aj vecnej stránke rozdelená do siedmych častí.

V teoretickej časti, v prvej kapitole popisujem 3D tlač, jej podstatu, technológie tlače a využitie. V ďalšej kapitole rozoberám kvalitu povrchu výrobku, pričom sa zameriavam na drsnosť povrchu. Vysvetľujem a popisujem parametre drsnosti. V tretej kapitole som sa venovala metódam kontroly štruktúry povrchu.

Praktická časť sa zaoberá hodnotením povrchov súčiastok vyrobených 3D tlačou. Na začiatku sa podľa navrhnutého modelu vyhotovili súčiastky z termoplastu ABS. Použité boli pritom dva typy tlačiarní, a to tlačiareň Stratasys Fortus 900mc a Stratasys Dimension SST 768, obe pracujúce na princípe technológie FDM. Na základe dostupných teoretických poznatkov sme na daných súčiastkach určili vhodný proces merania drsnosti. Tento proces začal prípravou súčiastok, pokračoval vizuálnou kontrolou povrchu pomocou mikroskopu, následne boli vyšpecifikované oblasti pre merania. Na záver prebehol samotný proces merania dotykovým snímačom Form Talysurf 50. Pomocou štatistického spracovania sa uskutočnila kontrola dát a vyhodnotili sa vybrané parametre.

## **I. TEORETICKÁ ČASŤ**

## 1 3D TLAČ

3D tlač z anglického slova three dimensional, trojrozmerný, je proces materializácie 3D predlôh do hmotných 3D objektov. Termín 3D tlač, zahŕňa celý rad procesov a technológií, ktoré ponúkajú celé spektrum možností pre výrobu dielov a výrobkov z rôznych materiálov. Aplikácie 3D tlače sa objavujú čoraz častejšie a táto technológia stále viac preniká od priemyselného cez výrobné až po spotrebiteľské odvetvie. [1] Na obrázku (Obr. 1) je ukážka prvej 3D tlačiarne firmy 3D System, fotografia vznikla v roku 1984. [2]

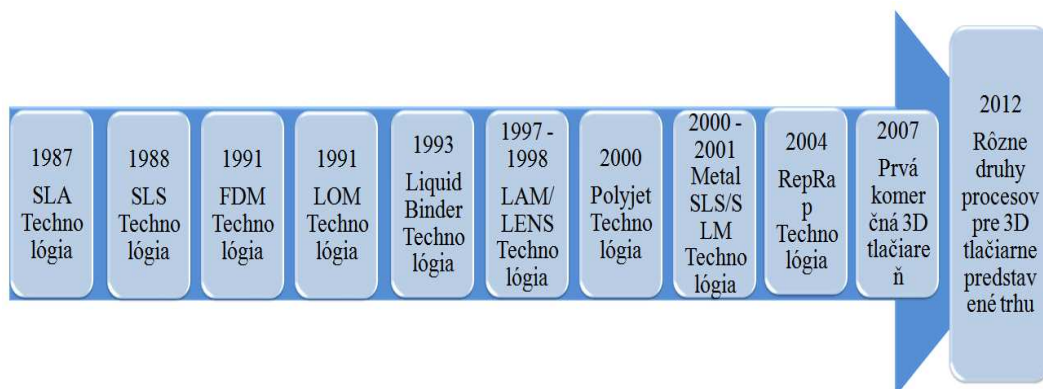


Obr. 1 Prvá 3D tlačiareň [2]

Metóda 3D tlače zahŕňa celý rad nových technológií pre výrobu presných dielov priamo z CAD modelu, a to v pomerne krátkom čase (rádovo hodiny až dni) a minimálnou potrebou ľudského zásahu, t.j. proces výroby prototypu je vysoko automatizovaný. Táto technológia umožňuje výrazne skrátiť čas a znížiť náklady, ktoré sú potrebné na vyhotovenie nového návrhu, znižujú náklady a čas na výrobný proces, stálosť a trvanlivosť vytvorených objektov sa predlžuje. [1] V podstate, čo všetky 3D technológie majú spoločné, je spôsob, akým je výroba vykonávaná. V procese samotnej tlače je pridávaná vrstva po vrstve, čím je táto metóda rozdielna od tradičných metód výroby. Základný rozdiel 3D tlače je to, že je to výrobný proces založený na princípe pridávania materiálu. Je to zásadne odlišná technológia od akýchkoľvek existujúcich tradičných výrobných postupov, pretože 3D tlač je založená na modernej technológii, ktorá buduje diely pridávaním vo vrstvách. Svet výroby sa zmenil, zautomatizované procesy ako je obrábanie, odlievanie, tvárnenie a lisovanie sú zložité procesy, ktoré si vyžadujú stroje, počítače a technológiu robotov. Tradičné technológie ako napr. obrábanie, ktoré je založené na odobratií materiálu z väčšieho bloku, či už k dosiahnutiu samotného konečného produktu alebo pre vytvorenie

nástroja, môže mať za následok až 90% plytvania materiálu z pôvodného bloku. Na rozdiel od 3D tlače, proces, ktorý vytvára objekt priamo, pridaním materiálu po vrstvách mnohými rôznymi spôsobmi, v závislosti na použitej technológii. Technológia sa môže prirovnať k automatickému budovaniu stavby z Lego blokov. [3] Každým dňom sa vyvíjajú, zdokonaľujú a navrhujú nové tlačiarne a objavujú sa nové materiály, ktoré je možné tlačiť. [1]

Pôvod 3D tlače možno zaznamenať začiatkom 80-tich rokov, kedy bol prvýkrát vydaný patent na Stereolithography prístroj - SLA. Tento patent patrí Charles-ovi (Chuck) Hull-ovi, ktorý ako prvý vynašiel SLA stroj. V tejto dobe pracovali na vývoji strojov viacerí ľudia. V rovnakom čase Carl Deckard, ktorý pracoval na univerzite v Texase, podal patent v USA pre Selective Laser Sintering (SLS). Stručný popis histórie je zobrazený na obrázku (Obr. 2). [4]



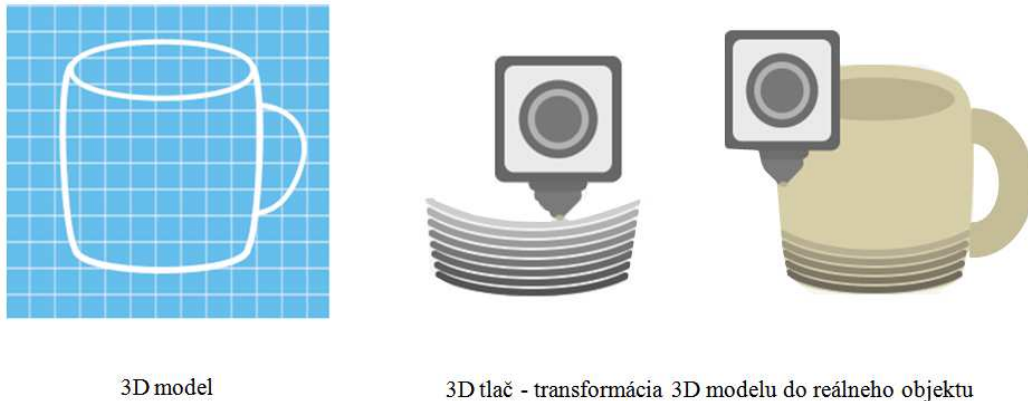
Obr. 2 Vývoj 3D tlače [4]

V deväťdesiatych rokoch nastal rastúci počet konkurenčných spoločností na trhu. V tomto čase vzniká rad nových technológií a aj naďalej sa stále zameriavajú výhradne na priemyselné aplikácie. Technológie sú nazývané aj ako Rapid Prototyping, z anglického slova Rýchla výroba. Postupne sa tieto technológie dostávali k širšiemu publiku. Pojem 3D tlačiareň teda pochádza z 90. rokov. Šírením výrobných aplikácií sa tiež vyvinula terminológia a prijal sa zastrešujúci termín pre všetky procesy RP a 3D tlače a to Additive Manufacturing (AM) z anglického slova Aditívna výroba. [3]

### 1.1 3D model pre 3D tlač

3D tlač je technológia založená na tom, že sa model vytvorí v 3D programe. 3D model je najčastejšie výstupom niektorého CAD (Computer-Aided Design) programu. Dnes existuje aj veľa iných softvérov na vytvorenie 3D modelu napr. Solidworks, AutoCad. [5] Po

vytvorenie 3D modelu vo formáte digitálneho súboru sa skonvertuje na formát, ktorý je akceptovateľný pre 3D tlačiareň. Jedným z najrozšírenejších formátov digitalizácie 3D modelov je Standard Triangulation Language (STL). Tento formát výpočtovým postupom rozloží 3D geometriu na jednotlivé priečne rezy definovanej výšky. Súbor v tomto prípade obsahuje zoznam trojuholníkov definujúcich povrch daného objektu. [6]



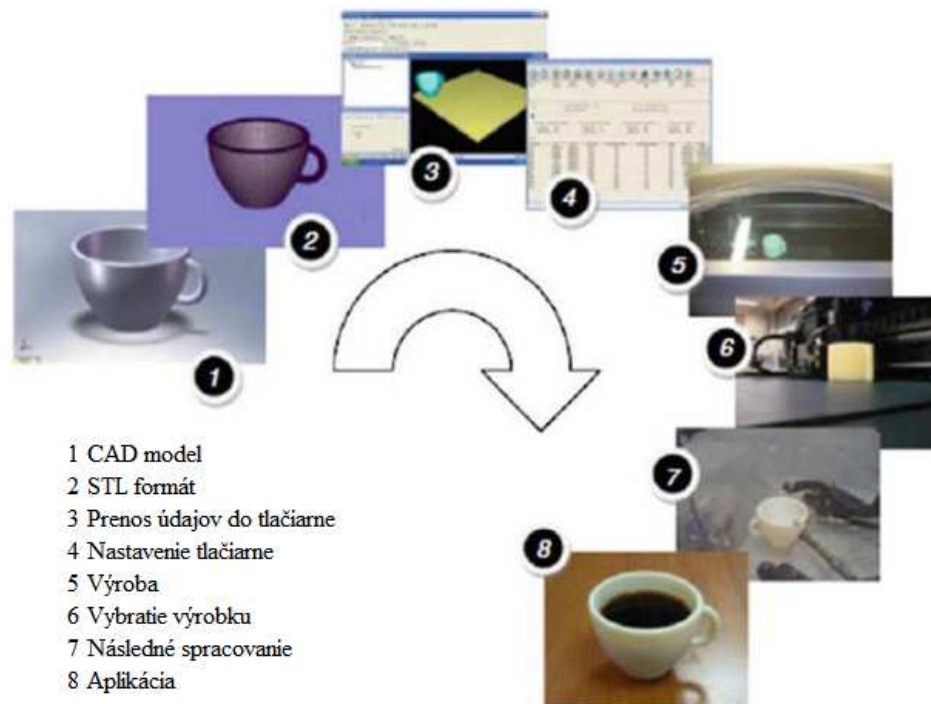
Obr. 3 Princíp 3D tlače [4]

Ďalší spôsob ako získať digitálny 3D model pre 3D tlač je použitie 3D skenera. Skener zhromažďuje pomocou rôznych snímačov údaje o tvare a vzhľade snímaného predmetu. Je to zariadenie pre prenos skutočných priestorových tvarov do virtuálnych 3D modelov. Prevedie 3D objekt do digitálnej podoby. [5]

## 1.2 Proces 3D tlače

Proces výroby modelu pomocou 3D tlačiarne môžeme rozdeliť do ôsmich etáp, znázornené na obrázku (Obr. 4). 3D predmet musí začať od softvérového modelu, ktorý plne popisuje vonkajšiu geometriu. Následne ide o transformáciu 3D modelu do požadovaného formátu vhodnú pre 3D tlačiareň. Toto môže zahŕňať použitie akýchkoľvek CAD softvérov na modelovanie telies, ale výstup zo softvéru musí byť celistvé 3D teleso. Ďalšia etapa je transformovanie údajov modelu do 3D tlačiarne. Tu môže nastať niekoľko všeobecných manipulácií s formátom ako napr. správna veľkosť, poloha a orientácia pre vrstvenie. Stroj musí byť správne nastavený pred procesom. Nastavenia sa týkajú parametrov ako sú materiálové obmedzenia, zdroje energie, hrúbka vrstvy, časovanie a pod. Samotný proces vrstvenia materiálu, čiže kompletizovanie modelu je predovšetkým automatizovaný proces a stroj môže do značnej miery pokračovať bez dozoru. Počas práce

stroja treba zabezpečiť, aby nedošlo k žiadnej chybe ako nedostačujúcemu množstvu materiálu, zastaveniu energie alebo softvérovej poruchy. [7]



Obr. 4 Proces zhotovenia výrobku [7]

Ak stroj ukončil prácu, je potrebné výrobok vybrať. Pred tým sa treba uistiť, že prevádzková teplota v komore je dostatočne nízka. V tejto fáze môžu byť diely slabé alebo môžu mať podporné party, ktoré musia byť odstránené. Výrobky pred používaním môžu vyžadovať dodatočnú úpravu ako napr. penetráciu alebo náter, ktoré dodajú dielu prijateľnú povrchovú štruktúru a úpravu. [7]

### 1.3 Materiál pre 3D tlač

Technológie umožňujú tlačiť z mnohých rozmanitých materiálov, ktorých škála sa rýchlo rozširuje. Dnes poznáme rôzne typy materiálov, ktoré sú dodávané na rôznych bazách (prášok, vlákno, granule, živice, atď.) [4] V súčasnosti sa tlačí hlavne z rôznych typov plastov, ktoré majú veľmi široké využitie v praxi. 3D plastové diely sa využívajú v najrôznejších odvetviach od dizajnu, stavebníctva, architektúry, automobilového priemyslu, vid'. obrázok (Obr. 5), až po elektroinžinierstvo či leteckú techniku. [6] Najpoužívanejšie typy sú PLA (polylactic acid) a ABS. (akrylonitrilbutadién styren) Plast PLA je relatívne nový materiál, ktorého hlavnou výhodou je biologická odbúrateľnosť, je šetrný k životnému prostrediu. Nepotrebný zvyšok možno bez problémov skompostovať.



Plast ABS sa bežne používa v celom rade odvetví od automobilového priemyslu až po výrobu nábytku. Oproti plastu PLA je pružnejší a pri použití v exteriéri tak rýchlo nedegraduje. [4]



Obr. 5 Model otváracej páčky v interiéri auta [8]

Kovový materiál sa väčšinou dodáva vo forme prášku. Dva najbežnejšie a najpoužívannejšie materiály sú hliník a deriváty kobaltu. Jedným z ďalších používaných materiálov je titán. Je to najsilnejší možný kovový materiál, ktorý bol použitý pre priemyselné aplikácie 3D tlače. [9] Na obrázku (Obr. 6). je príklad výrobku noža firmy VictoryKnives z titánových zliatin [10]



Obr. 6 Titánový nôž [10]

Sklo sa používa na tlač esteticky pôsobivých 3D výrobkov. V tomto prípade sa používa sklený prášok, ktorý sa vyrába recykláciou zo starého skla. Zloženie prášku je teda rovnaké ako bežné sklo, aby však model bol celistvý, používa sa pri tlači sklenených modelov špeciálny spojovací materiál. [4] Materiál z piesku sa používa v stavebnom priemysle. Materiál na tlač obsahuje okrem piesku aj vodu a spojivo typu vápna alebo cementu. Výsledný výrobok takejto 3D tlače by mal byť pevný ako betón. Keramika a glazúry sú relatívne nová skupina materiálov pre 3D tlač. Hlava 3D tlačiarne vrství keramickú zmes z oxidu hlinitého a oxidu kremičitého. Hotový produkt je po vybratí z 3D tlačiarne glazovaný a následne vypálený v peci rovnako ako klasické keramické výrobky. [9] Na obrázku (Obr. 7) je ukážka čajovej dózy vyrobenej z keramiky. [11]



Obr. 7 Keramická čajová dóza [11]

Iným zaujímavým materiálom je papier. 3D tlačiareň pracuje s hárkami kancelárskeho papiera, ktorá papier rozreže a zlepi, vytlačené objekty sú tvrdé a výhodou je možnosť použiť farbený papier. [4] V súčasnosti prebieha veľké množstvo výskumov, ktoré sa zaujímajú o potenciál 3D tlače s bio-materiálom pre rôzne lekárske aplikácie. Živé tkanivo je skúmané mnohými vedeckými inštitúciami, ktorých cieľom je vývoj technológie, ktorá umožní tlač ľudských orgánov, či častí ľudského tela. Použitý materiál sú živé bunky a hydrogél s alginátom, ktorý by mal zabezpečiť dostatočnú pružnosť a pevnosť. Ide o materiál vysoko citlivý na vonkajšie vplyvy. V stomatologickej medicínskej oblasti sa 3D tlač používa napr. na dentálne protézy a korunky ako aj pri výrobe implantátov, vid' na obrázku (Obr. 8). [9]



Obr. 8 Model zubov [12]

#### 1.4 Základné technológie 3D tlače

Terminológia dostupných technológií 3D tlače je v súčasnosti rôznorodá. Výrobcovia nazývajú ten istý proces vlastnými názvami. Normalizačný úrad ASTM/ISO definoval terminológiu, podľa ktorej sa technológie delia do siedmych štandardizovaných kategórií. [7]

Ide o nasledovné kategórie technológií:

- Vytlačanie vlákna polyméru (Material Extrusion)
- Laserové vytvrdzovanie fotopolyméru (Vat Photopolymerization)
- Nastrekovanie vrstiev tekutého plastu, vosku alebo fotopolyméru (Material Jetting)
- Spájanie vrstiev prášku nastrekovaním spojiva (Binder Jetting)
- Selektívne laserové spekanie prášku (Powder Bed Fusion)
- Laminovanie papiera alebo špeciálnej fólie (Sheet Lamination)
- Priame spekanie laserom (Directed Energy Deposition) [13]

Matica najčastejších oblastí využitia niektorých uvedených technológií je v tabuľke (Tab. 1.), ktorá popisuje konkrétne technológie a ich využitie v praxi. [1]

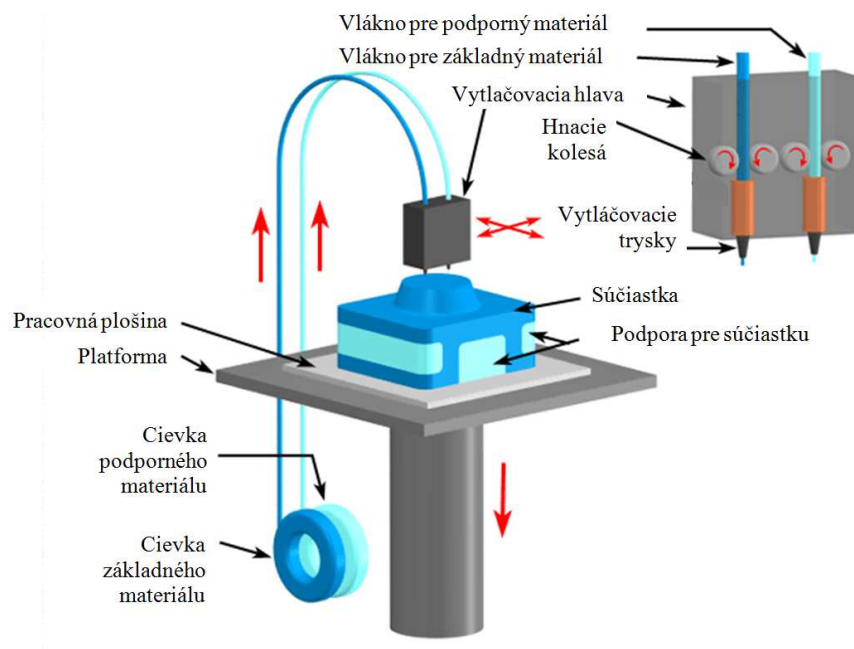
Tab. 1 Aplikácia technológií AM [1]

| Použitie                                           | Technológia |     |     |         |     | Symbol                |
|----------------------------------------------------|-------------|-----|-----|---------|-----|-----------------------|
|                                                    | FDM         | SLA | LOM | PolyJet | SLS |                       |
| Hodnotenie dizajnu                                 | ✓           | ✓   | ✓   | ✓       | ✓   | ✓<br>Vhodné           |
| Testy funkčnosti                                   | Δ           | Δ   |     | Δ       | ★   | Δ                     |
| Testy zmontovateľnosti                             | ✓           | Δ   |     | Δ       | ★   | Obmedzené<br>použitie |
| Výroba foriem pre odlievanie                       | ✓           | ✓   | ✓   | ✓       | ✓   |                       |
| Výroba vytaviteľných modelov                       | ✓           | Δ   |     | ★       | ✓   | ★                     |
| Výroba funkčných súčiastok /<br>Malosériová výroba |             |     |     |         | ✓   | Zvlášť vhodné         |

#### 1.4.1 Vytlačanie vlákna polyméru (Material Extrusion)

Aditívny výrobný proces, pri ktorom je materiál selektívne dávkovaný cez trysku alebo otvor. [13] Príkladom sú technológie Fused Deposition Modeling (FDM) od firmy Stratasys, [12] znázornené na obrázku (Obr. 9), Plastic Jet Printing (PJP) od firmy 3Dsystems. [2] Pri tejto technológii je materiál v polotekutom stave, najčastejšie sú to zahriate termoplasty, nanášané cez tlačovú hlavu na pracovnú plošinu podľa presne definovanej trasy. Pri styku s povrchom sa vlákna materiálu vzájomne spájajú a vytvárajú tenkú vrstvu, ktorá hneď tuhne. Pracovná plošina sa po nanosení vrstvy zníži o hrúbku vrstvy a proces sa opakuje až kým nie je hotová celá súčiastka. Keď je potreba podpory,

tlačová hlava dokáže naniesť podporný materiál, ktorý je ľahko odstrániteľný. [1] Veľkou výhodou je možnosť použitia rôznych druhov materiálov, takisto aj produkčných tried termoplastických materiálov (ABS, PC) a tiež biologicky odbúrateľného plastu PLA. Technológia má budúcnosť aj v stavebníctve, kde môže byť použitá na tlač modelov budov z betónu. [2] Kľúčové vlastnosti pre túto technológiu sú čistá a jednoduchá metóda vhodná na kancelárske použitie, široké spektrum materiálov, možnosť použitia produkčných tried materiálov (ABS, PC), ktoré sú vhodné pre aplikácie s požiadavkou na odolnosť proti vysokým teplotám a chemickej odolnosti. Ďalšie vlastnosti sú vysoká pevnosť, vyššia presnosť, ale nie pre tvorbu malých detailov a tenkých stien. [12]

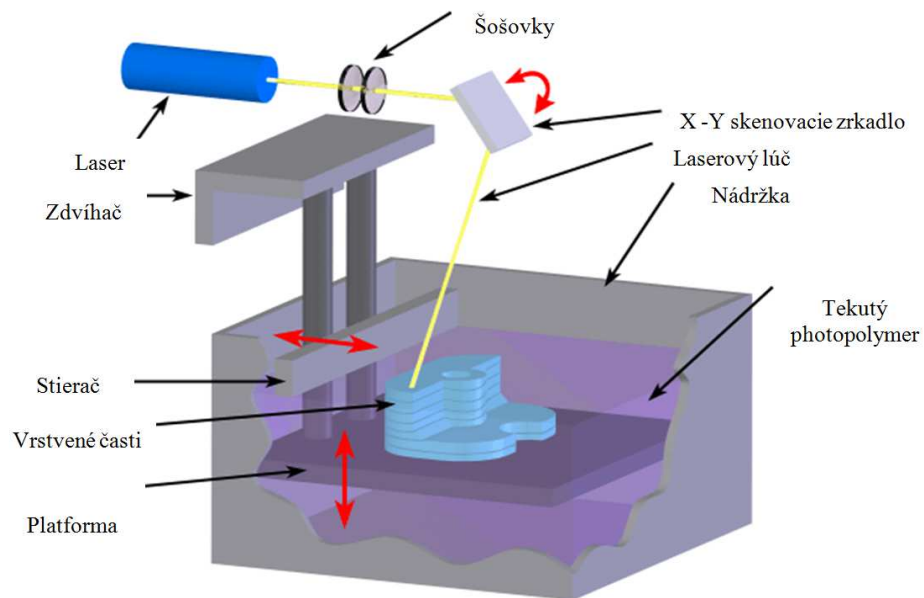


Obr. 9 Metóda výroby spôsobom FDM [15]

#### 1.4.2 Laserové vytvrdzovanie fotopolyméru (Vat Photopolymerization)

Ide o aditívny výrobný proces, pri ktorom je tekutý fotopolymer v nádrži selektívne vytvrdzovaný po jednotlivých vrstvách účinkom ultrafialového žiarenia. [13] Najznámejšia je technológia Stereolithography (SLA) na uvedenom obrázku (Obr. 10). Ide o najstaršiu metódu z technológií RP, ktorá bola vyvinutá spoločnosťou 3D Systems, Inc. [2] Na základe skôr vytvorených informácií o tvare a rozmeroch priečných rezov počítačového priestorového modelu jednotlivými rovinami (vrstvami) sú vypočítavané riadiace údaje, ktoré vedú lúč lasera pomocou počítačom riadeným zrkadlom nad hornou plochou nádoby s polymérom. Súčiastka je vytváraná na nosnej doske, ktorá sa na začiatku procesu nachádza priamo pod hladinou polyméru. Po vytvrdnutí (t.j. po osvetlení) jednej vrstvy sa

nosná doska ponorí o hrúbku vrstvy hlbšie do kúpeľa a začne sa vytvárať ďalšia vrstva. Aby sa vyrovnali nepresnosti vzniknuté nanášaním polyméru, je nutné pred osvietením každej vrstvy prejsť hladinu tzv. stieračom. V prípade komplexných tvarov sú potrebné použiť podporne konštrukcie, aby sa zamedzilo zboreniu modelu. Vytvarovaním tekutého polyméru po vrstvách vzniká trojrozmerné teleso (model). Ten je po ukončení vytiahnutý z nádrže, vysušený, očistený od prebytočného materiálu a finálne vytvrdený v UV peci. Ak je požadované, model ide na ďalšie spracovanie povrchovou úpravou. [14] Kľúčové vlastnosti pre túto technológiu sú vysoká presnosť a dobrá povrchová úprava súčiastok. Takýto výrobok je určený na hodnotenie tvaru a zmontovateľnosti. Má veľmi dobré mechanické vlastnosti. Pri tejto technológií je potreba podporných konštrukcií a nutnosť dodatočného vytvrdzovania. [2]

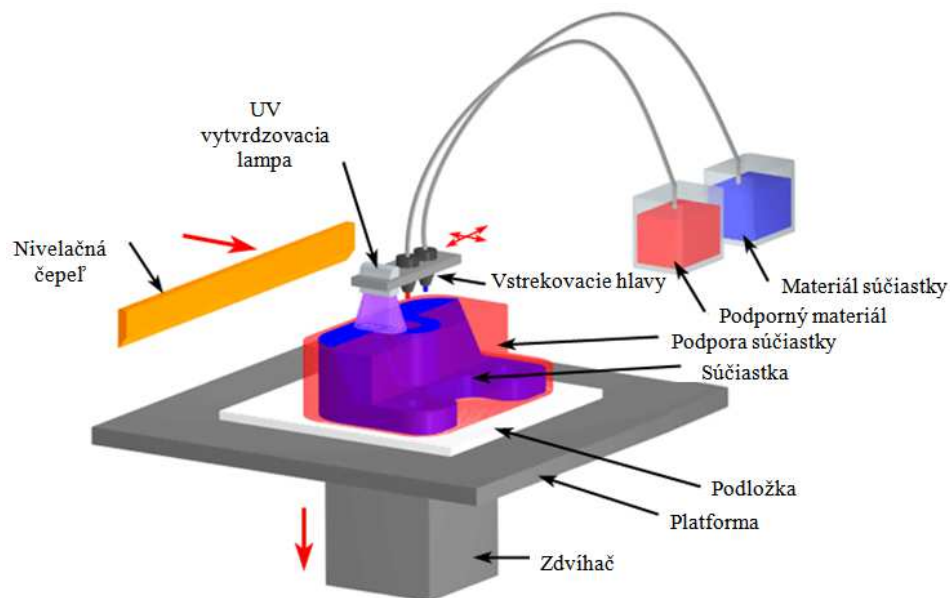


Obr. 10 Metóda výroby spôsobom SLA [15]

#### 1.4.3 Nastrekovanie vrstiev tekutého polyméru (Material Jetting)

Je aditívny výrobný proces, pri ktorom sú kvapôčky stavebného materiálu selektívne nanášané do vrstiev a vytvrdzované UV svetlom (Obr. 11). [13] Príkladom sú technológie PolyJet od firmy Stratasys [12] a Objet / MultiJet Printing (MJP) od firmy 3Dsystems. Technológia PolyJet je podobná technológií atramentových tlačiarní, no namiesto nanášania atramentu na papier sa pri tejto technológii nanáša tekutý svetlo citlivý polymér po vrstvách na pracovnú dosku. Tlačová hlava nanáša a zároveň aj vytvrdzuje malé čiastočky polyméru pomocou ultrafialového žiarenia. V prípade komplexných tvarov vyžadujúcich podporu, tlačová hlava priamo vstrekuje ľahko odstrániteľný podporný

materiál na báze gélu. Takto postupne vznikne finálna súčiastka vhodná na okamžité použitie, ktorá nepotrebuje ďalšie vytvrdzovanie. Pokročilé systémy dokážu súčasne vstrekať viacero materiálov čím sa dosiahnu rozdielne vlastnosti a farby výrobku. Kľúčové vlastnosti pre túto technológiu sú vynikajúce vzhľadové vlastnosti, ktoré vyjadrujú estetiku konečného produktu, hladké a detailné prototypy. Je to jedna z najpresnejších 3D technológií aj pre výrobu zložitých tvarov, zložitých detailov a hladkých povrchov. Sprocesuje začlenenie rôznorodých farebných a materiálových vlastností do jedného modelu. [2]

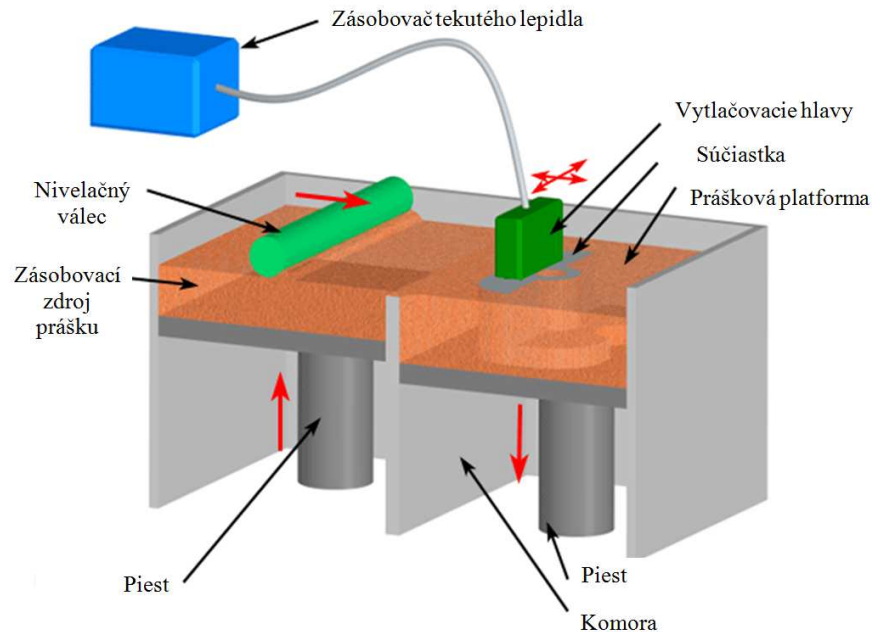


Obr. 11 Metóda výroby spôsobom PolyJet [15]

#### 1.4.4 Spájanie vrstiev prášku nastrekovaním spojiva (Binder Jetting)

Ide o výrobný proces, pri ktorom je tekuté spojivo selektívne nanášané na spojenie za sebou idúcich vrstiev práškoveho stavebného materiálu. [13] Ako materiál sa používajú plastové, pieskové, sklenené a kovové prášky. Základný práškový materiál je nanosený v tenkej vrstve na pracovnú dosku. Následne je na túto vrstvu selektívne nastriekané spojivo, ktoré spôsobí vytvrdnutie materiálu. Vytvrdzovanie vrstiev prebieha na vzduchu alebo za pomoci tepla. Pracovná doska sa posunie o hrúbku vrstvy a proces sa opakuje. Takto vznikne kompletná súčiastka po vrstvách, viď obrázok (Obr. 12). Príkladom je technológia ColorJet Printing (CJP) od firmy 3Dsystems, kde sa používa plastový prášok. Technológia dokáže zároveň nanášať spojivo aj farbu, takže vznikne plne farebná súčiastka. [2] Ďalším príkladom sú technológie Digital Part Materialization od firmy ExOne, ktoré používajú na tlač sklo, piesok a kovy. Pri použití kovových práškov je súčiastka po samotnej 3D tlači

veľmi krehká, preto je potrebné dodatočné vytvrdzovanie spojiva v peci, spekanie a nasycovanie kovovým práškom. [16] Táto technológia sa využíva aj v stavebníctve k výrobe komplexných architektonických prvkov zo syntetického kameňa.[17]

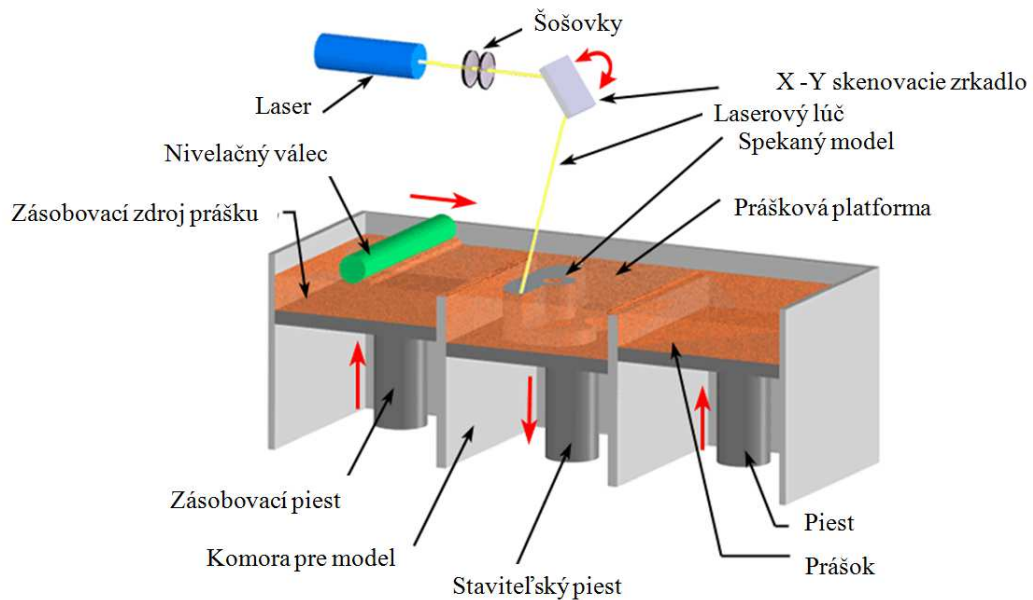


Obr. 12 Metóda výroby spôsobom Binder Jetting [15]

#### 1.4.5 Selektívne laserové spekanie prášku (Powder Bed Fusion)

Powder Bed Fusion predstavuje aditívny výrobný proces, pri ktorom je práškový materiál selektívne spájaný pomocou tepelnej energie. [13] V súčasnosti sa pomocou tejto technológie môžu vyrábať súčiastky z rôznych druhov práškových materiálov a to napr. plastových, keramických, sklenených a rôznych kovových. Najznámejším zástupcom tejto kategórie je technológia Selective Laser Sintering (SLS), vid' obrázok (Obr. 13). Podstatou SLS je počítačom vedený lúč CO<sub>2</sub> lasera, čím je prášok spekaný do požadovaného tvaru. [5] Materiál je nanášaný na nosnú dosku po vrstvách. V mieste pôsobenia lasera sa materiál speče a stuhne. Okolité neosvietené materiáľ slúži väčšinou ako nosná konštrukcia. Po vytvorení jednej vrstvy sa nosná doska zníži o hodnotu zodpovedajúcu hĺbke vrstvy. Takto vznikne celá súčiastka. [1] V prípade, že sa technológia SLS používa na výrobu kovových súčiastok, nazýva sa Direct Metal Laser Sintering (DMLS). Ďalšou veľmi podobnou technológiou ako SLS je Selective Laser Melting (SLM), ktorá namiesto zahriatia práškového materiálu potrebného na spekanie, používa laser na úplné roztavenie prášku. Ďalší variant je technológia Selective Heat Sintering (SHS), ktorá využíva na spájanie práškového materiálu tepelnú tlačovú hlavu namiesto lasera. Technológia, ktorá

využíva na spájanie elektrónový lúč je známa ako Electron Beam Melting (EBM). [2] Kľúčové vlastnosti pre model vytvorený touto technológiou je vysoká pevnosť, odolnosť voči vysokým teplotám a chemikáliám, priemerná presnosť a kvalita povrchu. Táto metóda je vhodná na výrobu konštrukčných a funkčných dielov, pri ktorej nie je nutné dodatočné vytvrdzovanie. [5]



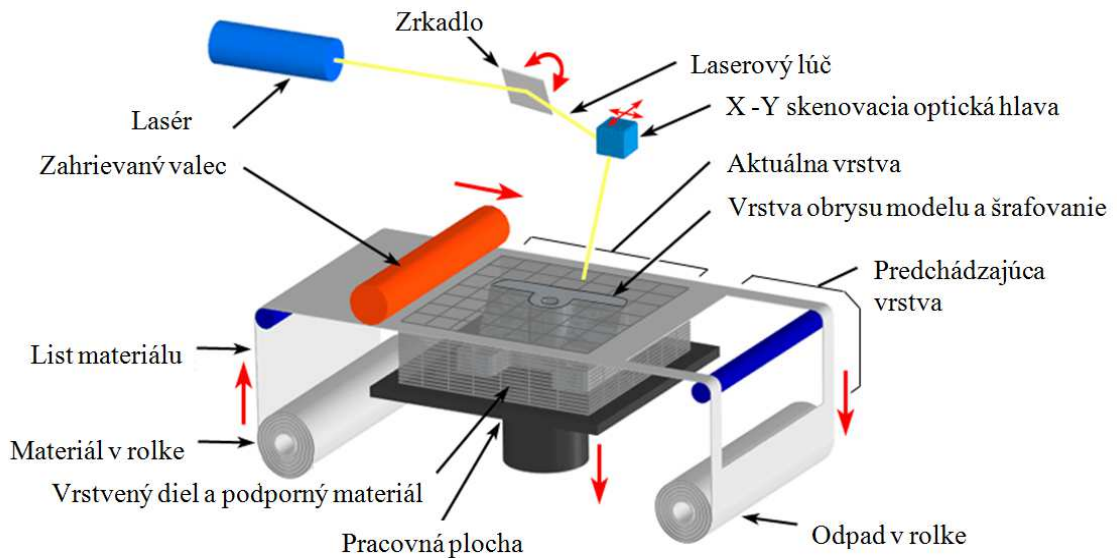
Obr. 13 Metóda výroby spôsobom SLS [15]

#### 1.4.6 Laminovanie papiera alebo špeciálnej fólie (Sheet Lamination)

Laminovanie je výrobný proces, pri ktorom je materiál vo forme listov alebo fólie spájaný do požadovaného tvaru. [13] Príkladom je technológia Laminated Object Manufacturing (LOM) vyvinutá firmou Helysis [18], vid' obrázok (Obr. 14). Súčiastka je vytváraná zo špeciálnych plastových fólií alebo z vrstiev papiera napustených spevňujúcou hmotou. Súčiastka je vytváraná na zvisle sa pohybujúcej nosnej doske. Celý proces prebieha tak, že sa na nanesenú a vyrezanú vrstvu natiahne papierová fólia opatrená vrstvou adhézneho látky. [15] Tá sa potom pritlačí sústavou vyhrievaných valcov, čím nastane zlepenie oboch vrstiev. Lúčom lasera je vyrezaný požadovaný obrys vytváranej vrstvy. Prebytočná odrezaná fólia je laserom rozdelená na štvorce a neskôr odstránená. Po vytvorení vrstvy sa podložka zníži o hrúbku fólie a postup sa opakuje až do vytvorenia celej súčasti. K dosiahnutiu hladkého povrchu je nutné súčiastku opracovať ručne. Metóda je vhodná na výrobu veľkých modelov. [1] Veľmi podobnou technológiou je Selective Deposition Lamination (SDL) zostrojenou firmou Mcor technologies. Technológia využíva pre výrobu štandardný kancelársky papier a lepidlo na báze vody, ktoré je selektívne nanášané medzi



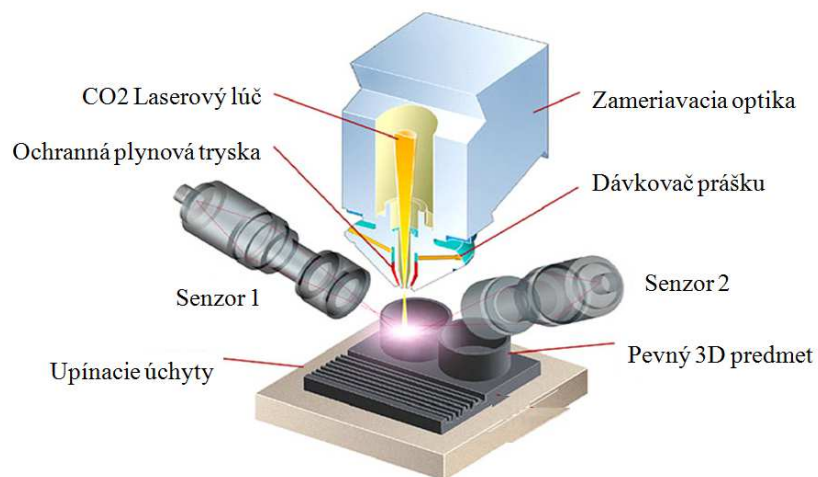
jednotlivé vrstvy papiera. Takisto je možné dosiahnuť celofarebnú tlač predtlačným jednotlivých listov papiera. Technológia je svojou jednoduchou metódou veľmi vhodná na prezentačné a vzdelávacie účely. Umožňuje tlačiť vo farbe. V prípade použitia papiera je možná recyklácia, no v princípe je pri výrobe vyprodukované veľké množstvo odpadu. [19]



Obr. 14 Metóda výroby spôsobom LOM [15]

#### 1.4.7 Priame spekanie laserom (Directed Energy Deposition)

Priame spekanie laserom je technológia, pri ktorej je materiál pri nanášaní spájaný tavením pomocou cielene mierenej tepelnej energie. [13] Príkladom je technológia LENS od firmy Optomec, zobrazené na obrázku (Obr. 15). [20]

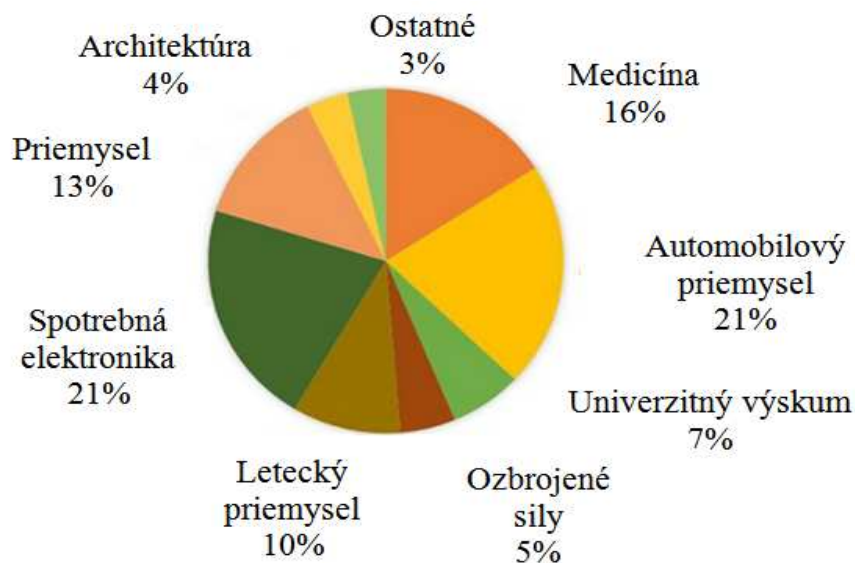


Obr. 15 Metóda výroby spôsobom LENS [15]

Pri tejto technológii je kovový prášok dopravený do tlačovej hlavy a fúkaný do lúča vysokovýkonného lasera, kde sa taví a nanáša po vrstvách na pracovnú dosku. Takto sa vytvorí celá súčiastka a to vrstva po vrstve. Keď je hotová môže sa ďalej spracovať podľa potreby. [15] Podobné technológie s inými názvami sú Laser Powder Deposition (LPD), Laser Powder Forming (LPF). [20]

## 1.5 Aplikácie 3D tlače

3D tlač znamená zníženie nákladov na výrobu foriem a prototypov, rýchlejší vývoj produktov, nižšie náklady na výrobu finálnych produktov vďaka eliminácii materiálového odpadu, jednoduchší výrobný proces a zároveň výrobu tvarov a štruktúr, ktoré bolo v minulosti neekonomické vyrábať a v súčasnosti sa vďaka 3D tlači vyrobia jednoduchšie a za krátky čas. I keď je dnes ešte stále táto technológia len na svojom začiatku, jej možnosti využitia neustále pribúdajú. [1] 3D tlač sa často nazýva aj RP (rýchla tvorba prototypov) alebo AM (aditívna výroba). Využitie 3D tlače v rôznych odvetviach je na obrázku (Obr. 16).[21]



Obr. 16 Priemyselné rozdelenie AM v roku 2013 [21]

Hlavné doterajšie využitie 3D tlače je vo výrobe. Vďaka zdokonaľovaniu technológie a poklesu cien sa čoraz častejšie 3D tlačiarne začínajú objavovať nielen vo výrobe, čím sa otvára nová etapa ich využitia a ďalšieho vývoja. Predstavuje silný a zaujímavý nástroj nielen na optimalizáciu produkcie a vývoja profesionálnych riešení. [5] V závislosti od využitej technológie je možné uspokojiť veľmi rôznorodé potreby a požiadavky v

jednotlivých odvetví a tým uspokojit' konkrétne požiadavky zákazníkov. [1]. Rýchlo sa stáva ekonomicky výhodnou alternatívou k tradičnému spôsobu výroby v čoraz väčšom počte oblastí a aplikácií. Táto technológia môže spôsobiť revolučné zmeny v rôznych odvetviach od spotrebného tovaru cez kovové obrábanie, medicínu až po letecký priemysel. [5]

## 2 KVALITA POVRCHU VÝROBKU

Vhodná kvalita povrchu súčiastok je jedným z predpokladov správnej funkcie zariadení a významne ovplyvňuje životnosť súčiastok. Pod pojmom kvalita povrchu sa rozumie okrem geometrického tvaru povrchu a veľkosti jeho nerovností aj fyzikálny a chemický stav povrchovej vrstvy materiálu. Jedným z hlavných kritérií pri posudzovaní kvality povrchu materiálu je drsnosť. Drsnosť predstavuje výšku nerovností od dokonalej a ideálne hladkej plochy (stupeň hladkosti). Vzniká ako dôsledok buď použitého nástroja alebo uskutočnených úprav povrchu (fyzikálno-mechanický stav). Drsnosť sa chápe ako časť geometrických odchýlok s relatívne malou vzdialenosťou nerovností (ostatné sú vlnitosť a geometrická tolerancia). Chyby materiálu spôsobené náhodným poškodením alebo chybami materiálu (póry, štrbiny, trhliny) sa do drsnosti povrchu nezahŕňajú. [22]

### 2.1 Normy zaoberajúce sa štruktúrou povrchu

Medzinárodná norma ČSN EN ISO 4287, názvom: Geometrické požiadavky na výrobky (GPS) - Štruktúra povrchu: Profilová metóda - Termíny, definície a parametre štruktúry povrchu stanovuje termíny, definície a parametre pre určovanie štruktúry povrchu (drsnosti, vlnitosti a základného profilu) profilovou metódou. Definície parametrov profilu povrchu drsnosti podľa tejto normy sú nasledovné:

- Výškové parametre (kapitola 2.2)
- Dĺžkové parametre (kapitola 2.3)
- Tvarové parametre (kapitola 2.4)
- Krivky a im zodpovedajúce parametre (kapitola 2.5). [23]

Ďalšia medzinárodná norma ČSN EN ISO 4288 a jej presné znenie: Geometrické požiadavky na výrobky (GPS) - Štruktúra povrchu: Profilová metóda - Pravidlá a postupy pre posudzovanie štruktúry povrchu. Stanovuje pravidlá pre porovnávanie meraných hodnôt s tolerančnými medzami pre parametre štruktúry povrchu v ČSN EN ISO 4287, ČSN EN ISO 12085, ČSN EN ISO 13565-2 a ISO 13565-3. Rovnako špecifikuje štandardné pravidlá pre výber medzných vlnových dĺžok cut-off  $\lambda_c$  pre parametre profilu drsnosti podľa ISO 4287, meraných pomocou dotykových (hrotových) prístrojov podľa ČSN EN ISO 3274. [24]

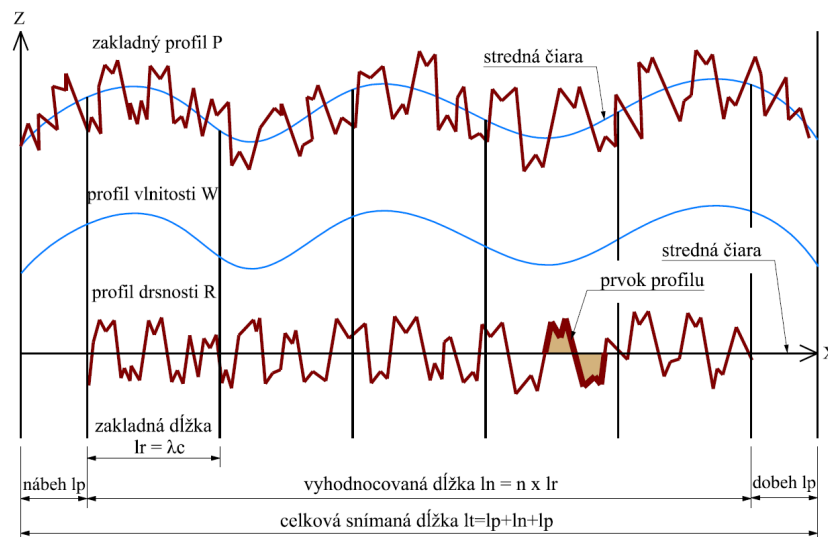
### 2.1.1 Definície geometrických parametrov

Štruktúra povrchu je v uvedenej norme charakterizovaná týmito geometrickými parametrami:

P - parameter vypočítaný zo základného profilu. Základný profil je snímaný neodfiltrovaný profil, ktorý obsahuje zložky drsnosti, vlnitosti a tvaru.

R - parameter vypočítaný z profilu drsnosti. Profil drsnosti je odvodený od základného profilu potlačením dlhových zložiek použitím filtra profilu  $\lambda_c$ .

W - parameter vypočítaný z profilu vlnitosti. Profil vlnitosti je odvodený od základného profilu postupnou aplikáciou filtra profilu  $\lambda_c$  a filtra profilu  $\lambda_f$ . Obr. 17. [23]

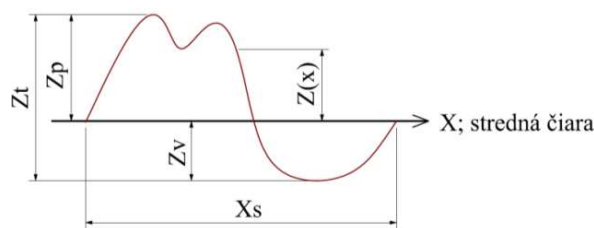


Obr. 17 Profily a parametre P,W a R [25]

Výstupok profilu - z povrchu von smerujúci z materiálu do okolitého prostredia, časť posudzovaného profilu spájajúce dva príslušné body na priesečníku profilu s osou X.

Priehľbeň profilu - dovnútra smerujúci z okolitého prostredia do materiálu, časť posudzovaného profilu spájajúce dva príslušné body na priesečníku profilu s osou X.

Prvok profilu - výstupok profilu a príslušná priehľbeň znázornené na obrázku (Obr. 18.). [23]



Obr. 18 Prvok profilu [23]

Hodnota súradnice,  $Z(x)$  - výška posudzovaného profilu v ľubovoľnej polohe  $x$ .

Miestny sklon  $dZ/dX$  - sklon posudzovaného profilu v polohe  $x_i$ .

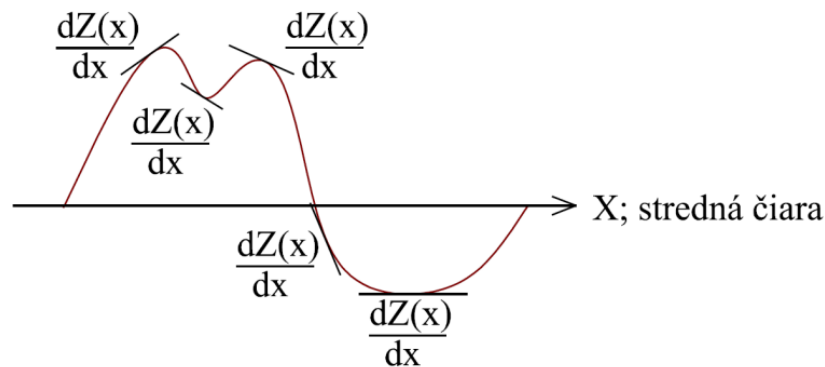
Výška výstupku profilu,  $Z_p$  - vzdialenosť medzi osou  $X$  a najväčším bodom výstupku profilu.

Hĺbka priehlbiny profilu,  $Z_v$  - vzdialenosť medzi osou  $X$  a najnižším bodom priehlbiny profilu.

Výška prvku profilu,  $Z_t$  - súčet výšky výstupku a hĺbky priehlbiny prvku profilu.

Šírka prvku profilu,  $X_s$  - dĺžka úseku osy  $X$  pretínajúca prvok profilu.

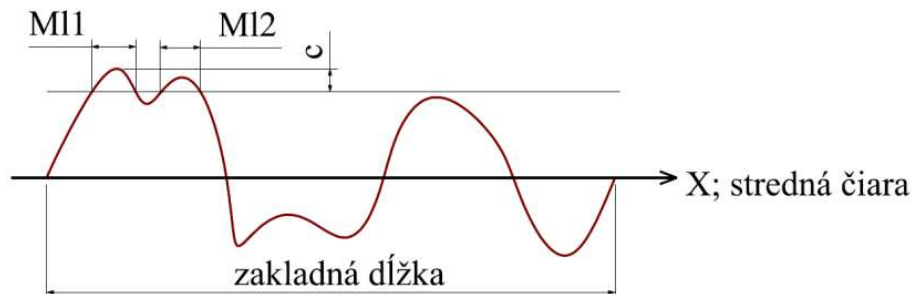
Miestny sklon  $dZ/dX$  - sklon posudzovaného profilu v polohe  $x_i$ . [23]



Obr. 19 Miestny sklon [23]

Materiálová dĺžka profilu na úrovni  $c$ ,  $Ml(c)$  - súčet dĺžok úseku získaných pretínajúcim prvkom profilu čiarou rovnobežnou s osou  $X$  na danej úrovni  $c$ . [23]

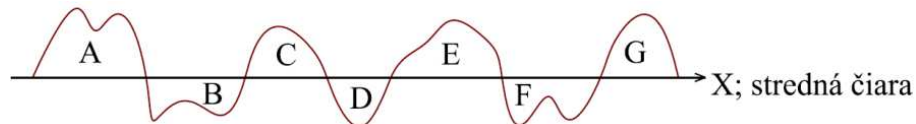
$$Ml(c) = Ml_1 + Ml_2 \quad (1)$$



Obr. 20 Materiálová dĺžka [23]

### 2.1.2 Stredné čiary

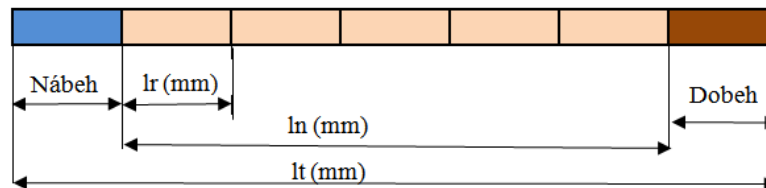
Stredná čiara prebieha stredom vrcholkov a priehlbín, kedy súčet plôch ohraničených profilom nerovnosti nad touto čiarou je rovný súčtu plôch pod touto čiarou. Pre presnejšie určenie strednej čiary sa používa výpočet pomocou metódy najmenších štvorcov. Poloha vzťažnej čiary je určená tak, že súčet štvorcov úchyliet tejto čiary je minimálny. Pre obrázok (Obr. 21) platí Plochy :  $A+C+G+E=B+D+F$ . [26]



Obr. 21 Stredná čiara [26]

Základná dĺžka  $l_r$  (mm) je dĺžka v smere osi  $x$ , použitá pre rozpoznanie nerovnosti charakterizujúcich vyhodnocovaný profil drsnosti.

Vyhodnocovaná dĺžka  $l_n$  (mm) je dĺžka v smere osi  $x$  použitá pre posúdenie vyhodnocovaného profilu.[26]



$l_r$  (mm) - základná dĺžka profilu drsnosti

$l_n$  (mm) - vyhodnocovaná dĺžka profilu

$l_t$  (mm) - celková dĺžka snímania

$n$  (-) - počet základných dĺžok /1;3;5/

Obr. 22 Dĺžky pri meraní [26]

## 2.2 Výškové parametre

Výškové parametre sú určené len výškami výstupkov a priehlbín alebo ich kombináciami bez ohľadu na ich rozmery v horizontálnom smere. [27]

### 2.2.1 $R_p$ - výška najväčšieho výstupku profilu

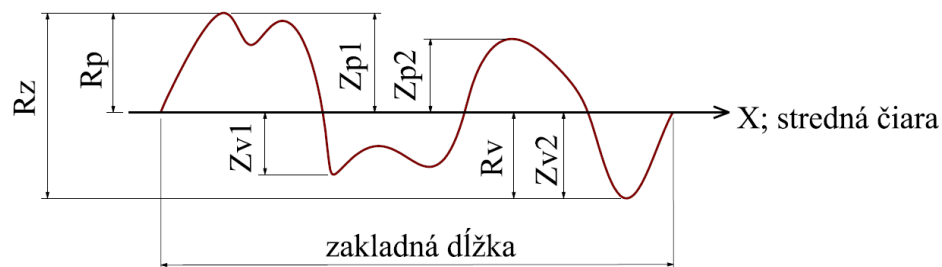
Výška najväčšieho výstupku profilu  $R_p$  ( $\mu\text{m}$ ) je nad strednou čiarou v rozsahu základnej dĺžky znázornená na obrázku (Obr. 23) . Výstupky, tvoriace stykové plochy povrchu, sú dôležité pre hodnotenie procesov trenia a opotrebenia. Výstupky povrchu, ktoré sa v čase používania opotrebovávajú, môžu spôsobiť problémy pri meraní rozmeru. Je treba pripomenúť, že meranie nemusí zahrnúť všetky skutočné extrémne povrchu. [27]

### 2.2.2 $R_v$ - hĺbka najväčšej priehlbyny profilu

Označenie  $R_v$  ( $\mu\text{m}$ ) je hĺbka najväčšej priehlbyny profilu pod strednou čiarou v rozsahu základnej dĺžky, vid' (Obr. 23). Priehlbyny sú dôležité pre udržanie maziva na povrchu. Sú teda v mnohých prípadoch žiaduce i keď priehlbyny často zapríčiňujú, že je to miesto vzniku trhlín a korózie. Aj tu platí, že meranie nemusí zahrnúť všetky extrémne odchýlky povrchu. [27]

### 2.2.3 $R_z$ - najväčšia výška profilu

Najväčšia výška profilu  $R_z$  ( $\mu\text{m}$ ) je súčet najväčšej výšky profilu a najväčšej priehlbyny profilu v rozsahu základnej dĺžky, vid' (Obr. 23). [23]



Obr. 23 Príklad profilu drsnosti povrchu s vyznačením parametrov  $R_p$ ,  $R_v$ ,  $R_z$  [23]

### 2.2.4 $R_c$ - stredná výška nerovnosti profilu

Je stredná hodnota výšok prvkov profilov  $Z_t$  v rozsahu základnej dĺžky  $l_r$ , vid' obrázok (Obr. 24). [23]

$$R_c = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Z_{ti} \quad (\mu\text{m}) \quad (2)$$



Obr. 24 Priemerná výška prvku profilu  $R_c$  [23]



### 2.2.5 Rt - celková výška profilu

Celková výška profilu  $R_t$  ( $\mu\text{m}$ ) je součet výšky největšího výstupku profilu  $Z_p$  a hloubky nejnížší priehlbiny  $Z_v$  profilu na vyhodnocovanej dĺžke  $l_n$ , vid' na obrázku (Obr. 25). Nezávislá hodnota  $R_t$  (ktorá nesúvisí s  $R_z$  alebo  $R_a$ ) predstavuje jeden z najpresnejších požiadaviek na profil drsnosti. [23]

$$R_t = Z_{p_{\max.}} + |Z_{v_{\max.}}| \quad (\mu\text{m}) \quad (3)$$

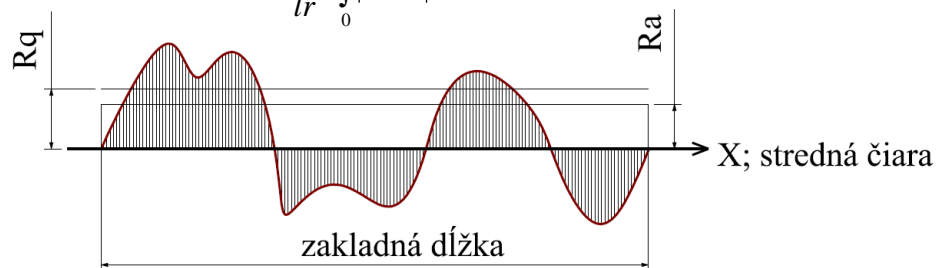


Obr. 25 Celková výška profilu  $R_t$  [25]

### 2.2.6 Ra - stredná aritmetická odchýlka posudzovaného profilu

Stredná aritmetická odchýlka profilu  $R_a$  je stredná hodnota absolútnych odchýlok profilu  $Z(x)$  v rozsahu základnej dĺžky znázornená na obrázku (Obr. 26). Parameter  $R_a$  je ako integrálna veličina, ktorá sa mnohokrát zamieňa so všeobecným pojmom drsnosť. Tu je potrebné uviesť, že tento parameter má informatívnu, málo výstižnú hodnotu, neumožňuje rozlíšenie ostrosti resp. zaoblenosti výstupkov nerovností profilu (veľmi dôležitý faktor pri opotrebovaní), je skresľovaný trhlinami a inými náhodnými chybami povrchu a nezahŕňa v svojej hodnote členitosť povrchu. [23]

$$R_a = \frac{1}{l_r} \cdot \int_0^{l_r} |Z(x)| dx \quad (\mu\text{m}) \quad (4)$$



Obr. 26 Parameter  $R_a$  [25]

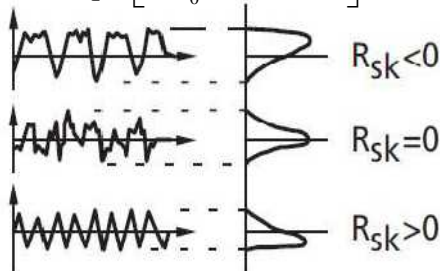
### 2.2.7 Rq - stredná kvadratická odchýlka posudzovaného profilu

Stredná kvadratická odchýlka profilu Rq je stredná kvadratická hodnota odchýlok profilu Z(x) v rozsahu základnej dĺžky. Hodnota Rq je citlivejšia na nežiaduce výstupky a priehlbiny kontrolovaného povrchu a preto spravidla ukazuje vyššie hodnoty ako Ra, uvedené na obrázku (Obr. 26) [23]

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{lr} \cdot \int_0^{lr} |Z^2(x)| dx} \quad (\mu m) \quad (5)$$

### 2.2.8 Rsk - koeficient asymetrie profilu

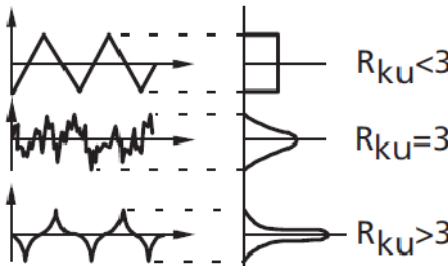
Rsk - koeficient asymetrie profilu je miera asymetrie hustoty rozdelenia odchýlok profilu Z(x) v rozsahu základnej dĺžky, Obr. 27. [23]

$$Rsk = \frac{1}{Rq^3} \cdot \left[ \frac{1}{lr} \cdot \int_0^{lr} |Z^3(x)| dx \right] \quad (\mu m) \quad (6)$$


Obr. 27 Parameter Rsk [25]

### 2.2.9 Rku - koeficient špicatosti profilu

Rku - koeficient špicatosti profilu je miera špicatosti hustoty rozdelenia odchýlok profilu v rozsahu základnej dĺžky. [23]

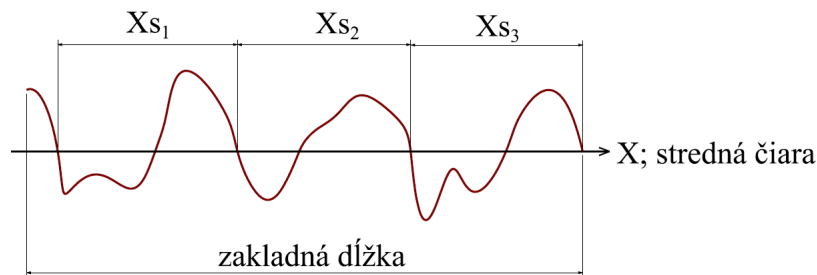
$$Rku = \frac{1}{Rq^4} \cdot \left[ \frac{1}{lr} \cdot \int_0^{lr} |Z^4(x)| dx \right] \quad (\mu m) \quad (7)$$


Obr. 28 Parameter Rku [25]

### 2.3 Dĺžkové parametre , RSm - stredná šírka prvku profilu

Členitosť povrchu je v príslušnej norme identifikovateľná cez strednú šírku prvku profilu RSm. Tento parameter je na rozdiel od výškových závislí od vzdialenosti vrcholkov a priehlbín. RSm je stredná hodnota šírok Xs prvkov profilov v rozsahu základnej dĺžky lr. Vyhodnotenie veličiny požaduje zadanie hladiny rezu C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>. [27]

$$RSm = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m Xs_i \quad (\mu m) \quad (8)$$



Obr. 29 Šírka prvkov profilov RSm [25]

### 2.4 Tvarové parametre, RΔq - priemerný kvadratický sklon

Priemerný kvadratický sklon posudzovaného profilu RΔq je kvadratický priemer sklonu úsekov dZ/dX v rozsahu základnej dĺžky. [23]

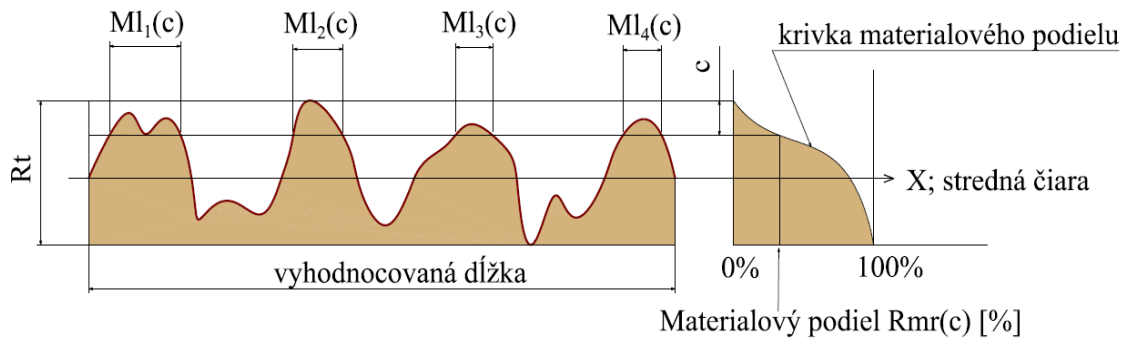
### 2.5 Krivky a im zodpovedajúce parametre

Reprezentujú plošný materiálový pomer topografického povrchu ako funkciu úrovne. Je to kumulatívna suma hustoty pravdepodobnosti amplitúdy. Sú vyhodnocované na vyhodnocovanej dĺžke.[23]

#### 2.5.1 Rmr (c) - materiálový podiel profilu drsnosti

Relatívny podiel materiálu je pomer nosnej dĺžky materiálu profilu MI (c) v danej polohe c k vyhodnocovanej dĺžke. Hodnota Rmr (c) sa udáva v %. Vyhodnotenie materiálového podielu profilu sa uskutočňuje metódou, ktorá umožňuje posúdiť stupeň povrchových chýb, vid'. Obr. 30 [25]

$$Rmr (c) = \frac{MI(c)}{ln} \quad (\%) \quad (9)$$



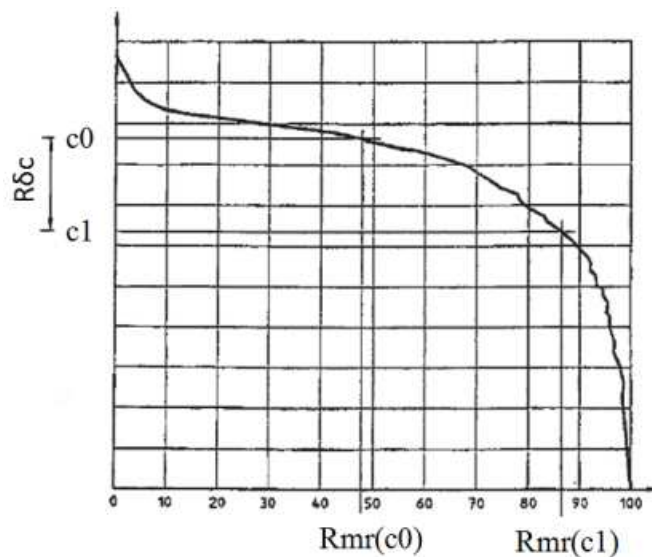
Obr. 30 Materiálový podiel profilu drsnosti [25]

### 2.5.2 Krivka materiálového podielu profilu

Nazývaná Abboty-Firestonova krivka materiálového podielu profilu je grafické znázornenie závislosti hodnôt relatívneho podielu materiálu od polohy rezu profilu, vid' Obr. 30. [23]

### 2.5.3 R<sub>dc</sub> - rozdiel výšky úseku profilu

Rozdiel výšky úseku profilu R<sub>dc</sub> je zvislá vzdialenosť medzi úrovňami dvoch úsekov daného materiálového pomeru. [23]

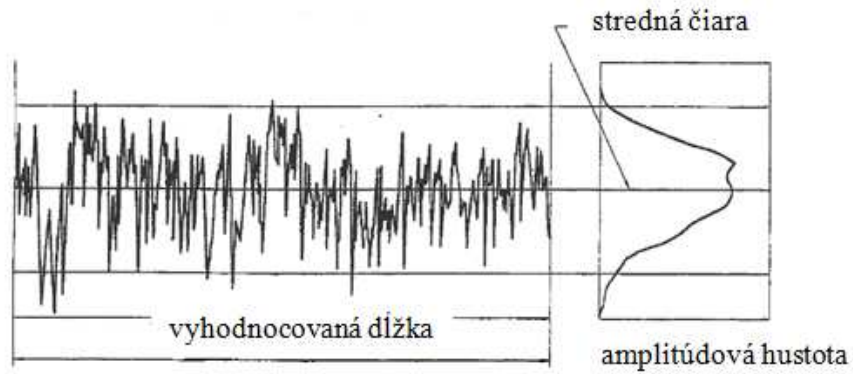
Obr. 31 Rozdiel výšky úseku profilu R<sub>dc</sub> [23]

### 2.5.4 Rmr - relatívny podiel materiálu

Relatívny materiálový podiel profilu je podiel materiálu určený v polohe rezu R<sub>dc</sub> vzhľadom na referenčný materiálový podiel C<sub>0</sub>. [23]

### 2.5.5 Empirické rozdelenie výšok profilu

Empirické rozdelenie výšok profilu je hustota pravdepodobnosti úsekov  $Z(x)$  v rozsahu vyhodnocovanej dĺžky. [23]



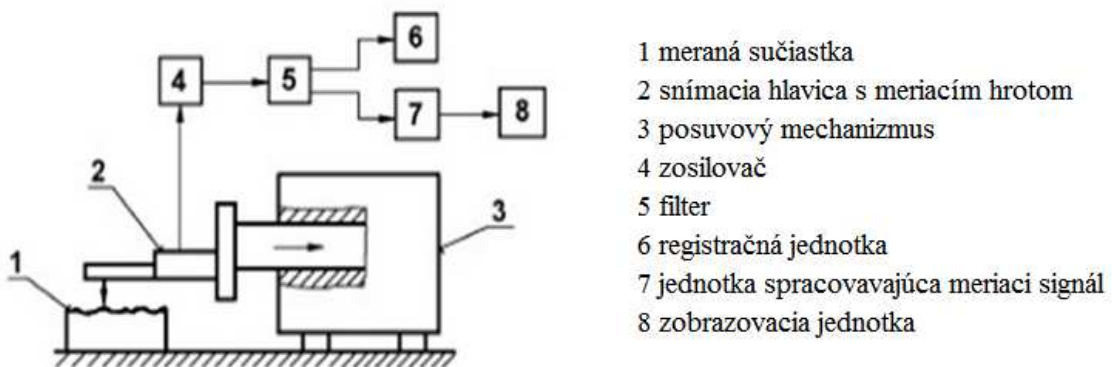
Obr. 32 Empirické rozdelenie výšok profilu [23]

### 3 METÓDY KONTROLY ŠTRUKTÚRY POVRCHU

Pri kontrole drsnosti povrchu sa využívajú metódy, ktoré možno rozdeliť na kvalitatívne (porovnávacie), v ktorých sa využívajú vzorkovnice, mikroskopy a kvantitatívne (parametrické), v ktorých sa používajú profilometre, interferometre. Kvalitatívne metódy sú zastarané. Kvantitatívne metódy pomocou čísel vyjadrujú parametre definované vo vyššie uvedených kapitolách. Prístroje, ktorými sa tieto parametre zisťujú, sú založené buď na optickom (bezdotykovom) alebo dotykovom spôsobe merania. Tieto prístroje dokážu okrem drsnosti merať i vlnitosť a často aj tvar. Pri určovaní štruktúry povrchu určitej plochy je dôležitý smer zisťovania drsnosti, dĺžka meraného úseku, počet opakovaní merania, ako aj výber miesta merania. Pritom je nevyhnutné vylúčiť z merania chyby povrchu. [27]

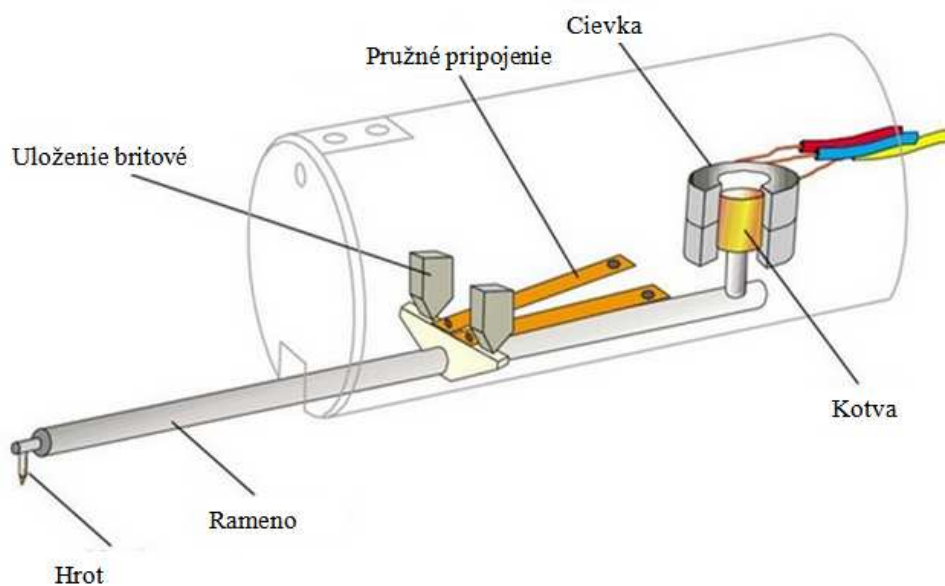
#### 3.1 Kontaktná meracia metóda

Kontaktný prístroj znamená, že špeciálne upravený hrot zaznamenáva súradnice vyhodnocovaného povrchu, ktoré sú potom počítačovo spracované. Kontaktný prístroj sa skladá z mechanickej a elektronickej časti. Mechanická časť je stôl, na ktorom je umiestnený snímač a rameno so snímacím hrotom, tzv. snímacia hlavica, ktorá sa pohybuje určitou konštantnou rýchlosťou a snímací hrot sníma nerovnosti povrchu. Elektronická časť slúži k transformácii mechanického signálu generovaného snímacím hrotom idúcim po nerovnosti povrchu meranej plochy na elektrický signál, ktorý sa spracováva (číselnou hodnotou príslušného parametru drsnosti alebo grafickým záznam nerovnosti povrchu). [28]



Obr. 33 Schéma kontaktného snímania povrchu [28]

Pohyb snímacieho hrotu musí byť veľmi presný čo sa týka priamosti aj rovnomernosti. Rýchlosť hrotu musí byť volená s ohľadom na dynamické vlastnosti snímacieho systému. Vertikálny pohyb hrotu pri prechode výstupku a priehlbín je indukčným meradlom transformovaný na elektrický signál. Tento sa potom ďalej počítačovo spracuje a nasledovne vyhodnotí. Pre tento systém snímania je charakteristická malá meracia sila ( t.j. malá sila pritlačujúca hrot k povrchu), čo minimalizuje nebezpečenstvo poškodenia meracieho povrchu. [28]



Obr. 34 Schéma indukčného systému merania povrchu kontaktným spôsobom [28]

### 3.2 Bezkontaktná meracia metóda

Ide o metódu, ktorá sa v súčasnej praxi ako aj laboratóriách často využíva. Prístroje na hodnotenie sú na bezkontaktnéj báze. Z nich sa najčastejšie využíva snímač CLA (Chromatic Length Aberration) a laserové snímače. Rozlíšiteľnosť snímača CLA je o rád vyššia ako u laserových snímačov. Princíp CLA snímača je taký, že biele svetlo je rozložené a optikou je smerované na kontrolovaný povrch. Optika rozloží svetlo podľa vlnových dĺžok a v každom bode povrchu je zaostrená určitá vlnová dĺžka. Svetlo odrazené z povrchu prechádza otvorom, ktorý prepustí iba svetlom zaostrené vlnové dĺžky. Spektrometer vychýli svetlo na maticový senzor, kde je každému bodu pripravená priestorová poloha, ktorá je následne počítačovo spracovaná a vyhodnotená. Je tu možné použiť aj laserové snímače, ale tie nie sú také presné. Nasnímané priestorové polohy sú potom spracované špeciálnymi softvérmi, kde je možné aj 3D spracovanie, prípadne 3D vizualizácia. [29]

## **II. PRAKTICKÁ ČASŤ**



## 4 3D TLAČ NAVRHOVANEJ SÚČIASTKY

Pre 3D tlač je nevyhnutné mať pripravený digitálny model daného objektu v zodpovedajúcom programe, na základe ktorého vznikne fyzický model. Digitálny model možno získať buď vymodelovaním v 3D modelovacom softvéri alebo využitím 3D skeneru. Dnes je na výber veľa programov, ktoré umožňujú tvorbu 3D modelov. Model súčiastky bol navrhnutý pomocou CAD softvéru Catia. Pre 3D tlač nie je podstatné, v akom programe alebo aplikácii je model vytvorený, k záveru je vždy nutné počítačová predlohu správne vyexportovať pre potreby 3D tlače. Najbežnejším formátom pre tlač, ktorý podporuje väčšina 3D programov, je .STL. Povrch modelov vytvorených v tomto formáte sa skladá z väčších, menších trojuholníkov alebo kosoštvorcov tzv. polygónov. Tie sú poukladané vedľa seba tak, že vytvárajú požadovaný tvar (polygónovú sieť).

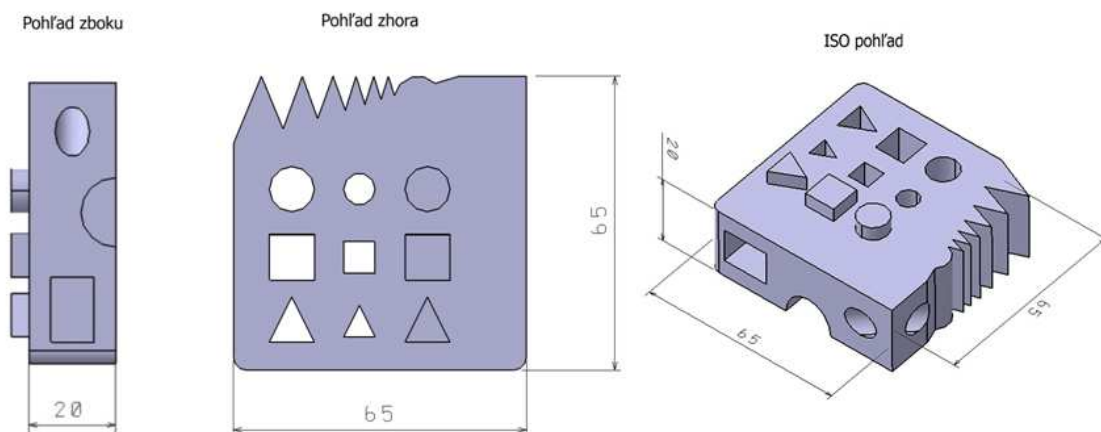
Pri exportovaní výsledného výrobku v rôznych softvéroch vznikajú často chyby v polygónovej sieti, ktoré môžu spôsobiť problémy pri tlači. Preto je nevyhnutné si svoj export ešte skontrolovať, prípadne opraviť. V prvom rade je potrebné vedieť, na čo je model určený a na základe toho zvoliť materiál a technológiu. Každá má totiž svoje výhody, ale aj limity. Niektorá je určená na malé a detailné modely, ktorých čas tlače je dlhý, iné môžu byť väčšie, ale zase nie natoľko presné, alebo pri niektorých sú podstatné vlastnosti zvoleného materiálu.

Dôležité je zohľadniť:

- maximálny rozmer, ktorý je možné tlačiť
- minimálnu hrúbku steny (v závislosti od technológie 1 – 2 mm)
- minimálnu mieru reprodukovateľného detailu (veľmi malé detaily sa môžu stratiť)
- už pri samotnom modelovaní budúceho výrobku je treba si uvedomiť, že veľmi tenké a dlhé časti modelov sú krehké a ľahko sa lámu.

### 4.1 Tvar a rozmery navrhovanej súčiastky

Základným tvarom modelu je hranol s pôdorysom štvorca 65 x 65 mm a výška 20 mm, vid' Obr. 35. Má dve zaoblené hrany, ďalšia hrana je ostrá a ďalšia štvrtá hrana je tvorená profilom v tvare hrebeňa. Na vrchnej stene modelu sú vidieť tri vystúpenia rôzneho tvaru s pôdorysom kruhu, štvorca a trojuholníka, v modeli sú vložené dve sady dutín po troch prvkoch, ktoré sú priechodné po celej výške. Na bočnej hrane je polkruhová a obdĺžniková dutina. V hornej časti je priechodný kruhový otvor smerujúci pod uhlom 45 stupňov do bočnej steny. Súčiastka má objem 71500 mm<sup>3</sup>.



Obr. 35 Popis základných rozmerov modelu

## 4.2 Špecifikácia použitých 3D tlačiarňí

Pri výrobe modelu sme použili zariadenia SRATASYS DIMENSI SST 768, SRATASYS Fortus 900mc. Všetky použité zariadenia sú súčasťou laboratórií Fakulty technologické Univerzity Tomáša Baťu.

### 4.2.1 Tlačiareň Stratasys Dimension SST 768

Tlačiareň Dimension 768 SST od firmy Stratasys sa radí do produktovej skupiny Design, ktorá sa vyznačuje rýchlou a dostupnou tlačou. Pracuje na základe technológie FDM. Pre prezentačné účely, kde sa nevyžaduje veľké rozlíšenie, sa môže zvoliť dvojvrstvé rozlíšenie s rýchlou tlačou alebo jemnejšie nastavenie rozlíšenia pre presnejšie detaily. Základné špecifikácie tlačiarne Stratasys Dimension SST 768 sú uvedené v tabuľke (Tab. 2). [12]



Obr. 36 Dimension SST 768 [12]

Tab. 2 Základné špecifikácie tlačiarne Dimension SST 768

| Materiál súčiastky      | Podporný materiál | Maximálny rozmer súčiastky | Hrúbka vrstvy       | Rozmery tlačiarne   | Hmotnosť tlačiarne |
|-------------------------|-------------------|----------------------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| ABS v deviatich farbách | rozpuštný         | 203 x 203 x 305 mm         | 0.33 mm<br>0.254 mm | 914 x 686 x 1041 mm | 128 kg             |

#### 4.2.2 Tlačiareň Stratasys Fortus 900mc

Tlačiarne Fortus od firmy Stratasys patria do produktovej skupiny zameranej na výkon a nasadenie v priemyselnej výrobe. 900mc je najvýkonnejší model pracujúci s technológiou FDM, prináša mimoriadnu obratnosť a vysokú presnosť, spolu s možnosťou použitia až 12 termoplastických materiálov a obrovského pracovného priestoru. Tlačiareň takisto poskytuje možnosť rýchlej tlače s nastavením až trojvrstvového rozlíšenia alebo jemnejšie nastavenie rozlíšenia pre presnejšie detaily. Základné špecifikácie tlačiarne Fortus 900mc sú popísané v tabuľke (Tab. 3). [12]



Obr. 37 Fortus 900mc [12]

Tab. 3 Základné špecifikácie tlačiarne Fortus 900mc

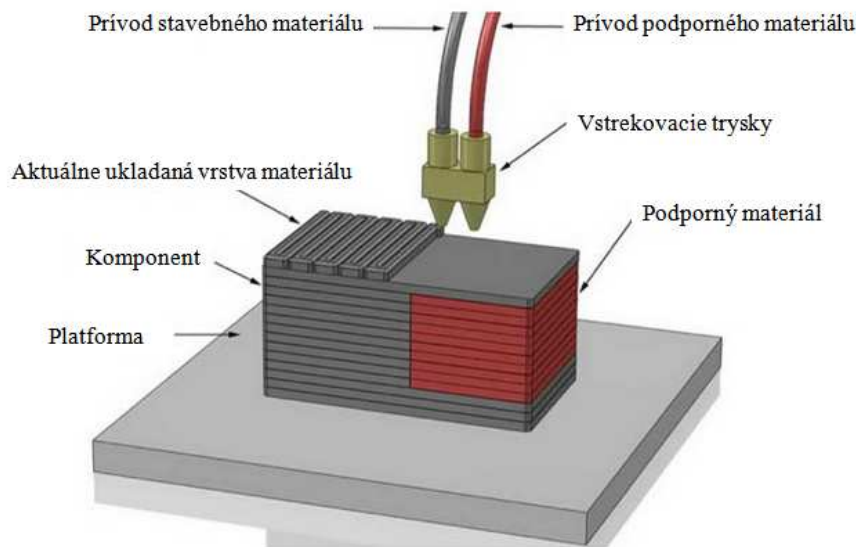
| Materiál súčiastky                                              | Podporný materiál         | Maximálny rozmer súčiastky | Hrúbka vrstvy                   | Rozmery tlačiarne     | Hmotnosť tlačiarne |
|-----------------------------------------------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------------|-----------------------|--------------------|
| ABS, PC, PA<br>12 druhov týchto termoplastov v rôznych farbách. | rozpuštný alebo lámateľný | 914 x 610 x 914 mm         | 0.33 mm<br>0.254 mm<br>0.178 mm | 2772 x 1683 x 2027 mm | 3287 kg            |

### 4.3 Postup 3D tlače navrhutej súčiasťky

Pri tlači boli použité tlačiarne pracujúce s aditívnou technológiou FDM. Postup tlače prebiehal nasledovne:

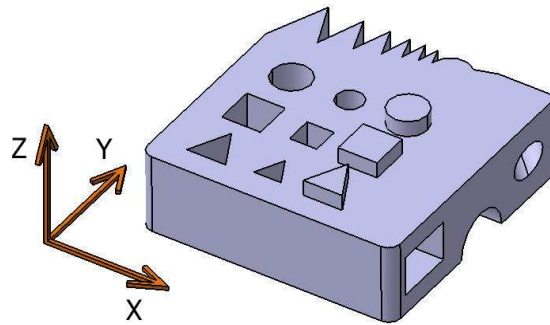
- Nahrať 3D modelu súčiasťky do tlačiarne.
- Nastavenie parametrov tlače a spracovanie modelu tlačovým programom a samotná tlač súčiasťky.
- Odstránenie podporného materiálu.

Softvér tlačiarne automaticky spracoval 3D model navrhutej súčiasťky, rozdelil ho na vrstvy, vypočítal podporne štruktúry a navrhol pohyb tlačovej hlavy. Pri samotnej tlači tlačová hlava naniesla vlákno termoplastu po vypočítanej dráhe v súradniciach x, y a po nanesení jednej vrstvy sa pracovný stôl posunul smerom dole v osi z, aby sa naniesla ďalšia vrstva. Vďaka tepelnej fúzii sa materiál spájal so spodnou vrstvou a tuhol. Tam kde bolo potrebné, bol nanesený podporný materiál, aby nenastal kolaps súčiasťky pri tlači. Podporný materiál bol po vytlačení jednoducho odstránený.



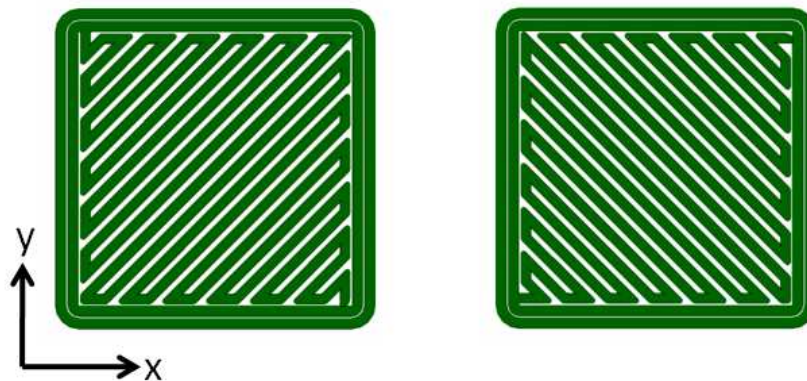
Obr. 38 Princíp kladenia materiálu pri FDM technológii [12]

Navrhovaný model neobsahoval žiadne obmedzenia, samotná tlač nebola problémom pre vybraté tlačiarne.



Obr. 39 Poloha súčiastky pri tlači

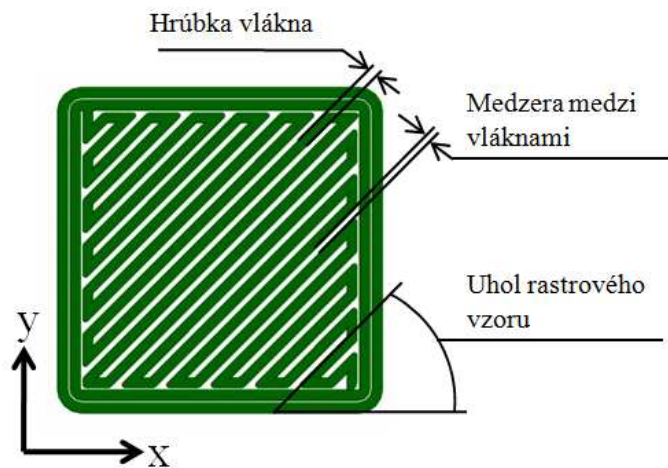
Pri použití FDM technológie sa na vyplnenie jednej vrstvy najčastejšie používa kladenie vlákna v podobe rastrového vzoru. Pri tomto spôsobe sa najprv obvod vrstvy vytvorí obvodovými dráhami a potom sa vnútrajšok vyplní vzorom tam a späť pod 45 stupňovým uhlom k osi  $x$ . Nasledujúca vrstva je vytvorená vzorom pod uhlom  $90^\circ$  k predchádzajúcemu ako je ukázané na obrázku (Obr. 40).



Obr. 40 Smer rastrovej výplne medzi vrstvami nasledujúcimi za sebou

Spôsob nanášania materiálu a výsledné vlastnosti súčiastky sú ovplyvnené dôležitými parametrami a nastaveniami graficky znázornenými na obrázku (Obr. 41).

- Hrúbka vlákna/vrstvy
- Uhol medzi rastrovým vzorom a osou  $x$
- Medzera medzi vláknami



Obr. 41 Prehľad parametrov 3D tlače

Pre účely merania boli nastavené nasledovné parametre tlače, ktoré sú uvedené v tabuľke (Tab. 4).

Tab. 4 Parametre 3D tlačiarní

| Názov súčiastky | Použitá tlačiareň | Hrúbka vlákna/vrstvy [mm] | Uhol vzoru [°] | Medzera medzi vláknami [mm] |
|-----------------|-------------------|---------------------------|----------------|-----------------------------|
| F 25            | Fortus            | 0,25                      | 45             | 0                           |
| F 33            | Fortus            | 0,33                      | 45             | 0                           |
| D 25            | Dimension         | 0,25                      | 45             | 0                           |
| D 33            | Dimension         | 0,33                      | 45             | 0                           |



Obr. 42 Vytlačené súčiastky

#### 4.4 Materiál súčiastky

Pre účely diplomovej práce som zvolila použitie materiálu ABS, ktorý sa radí do termoplastov s vynikajúcimi vlastnosťami, je odolný voči mechanickému poškodeniu, ľahko sa tvaruje a odoláva agresívnym chemickým zlúčeninám. ABS je tuhý, húževnatý, zdravotne nezávadný a je odolný voči vysokým a nízkym teplotám. Nie je vhodný na komplexné modely so zložitou štruktúrou. Zrejme najväčšou nevýhodou je, že počas chladnutia sa plast zmršťuje a mení svoj tvar, čo je najviac viditeľné pri väčších modeloch. Čiastočne sa dá tomu zabrániť pomalším ochladzovaním. Je nevyhnutné, aby model zostal na vyhriatej podložke tlačiarne čo najdlhšiu dobu. Každý výrobca má svoje materiály, ktoré sa používajú pre ich vlastné tlačiarne.

## 5 MERANIE DRSNOSTI POVRCHU

Meranie je snímané na tej časti povrchu, na ktorej môžeme vizuálnym pozorovaním vidieť ako boli ukladané jednotlivé vlákna z tlačovej hlavy. Parametre štruktúry povrchu nie sú použiteľné pre popis chýb na povrchu. Z tohto dôvodu poruchy povrchu, napr. ryhy a póry, nie sú uvažované pri kontrole štruktúry povrchu. Presný postup merania bol nasledovný:

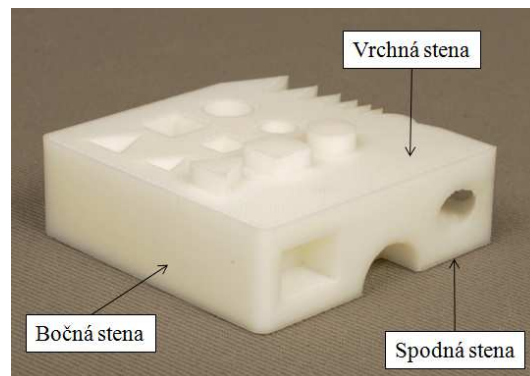
- Príprava štyroch súčiastok vyrobených 3D tlačou.
- Vizuálna kontrola povrchu a určenie povrchov, určenie smeru merania pomocou mikroskopu.
- Bližšia špecifikácia oblastí pre meranie.
- Samotný proces merania dotykovým snímačom Form Talysurf 50.

### 5.1 Určenie povrchov a smeru merania

Už pri prvom vizuálnom pozorovaní vytlačenej súčiastky sme zistili, že povrchy súčiastky sa líšia a môžeme ich rozdeliť na tri základne typy.

- Spodný povrch, ktorý je pri tlači v styku so základovou pracovnou doskou tlačiarne a vytvorený nanesením prvej vrstvy.
- Bočný povrch je rovnobežný s hlavným smerom tlačenia v osi z, kolmý na základnú dosku a vytvorený ukladaním jednotlivých vrstiev na seba.
- Vrchný povrch je kolmý na hlavný smer tlačenia, rovnobežný so základnou doskou a vytvorený nanesením poslednej vrstvy.

Na základe týchto zistení sme vyšpecifikovali tri rôzne oblasti vhodné na meranie drsnosti povrchu na každej súčiastke. Znamená to, že berieme do úvahy všetky typy povrchov, ktoré vznikli pri kladení materiálu 3D tlačou a samotného vrstvenia. Sú to stena vrchná, bočná a spodná, vid' Obr. 43.



Obr. 43 Typy povrchov súčiastky pre meranie

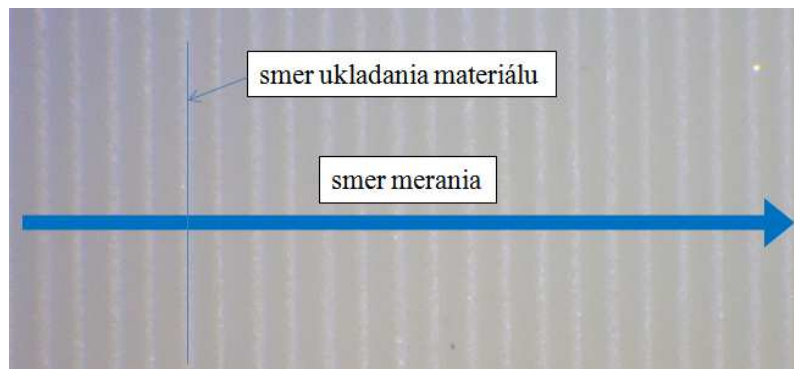


Pre získanie výsledkov budú jednotlivé merania a vyhodnotenia rozdelené na všetky typy povrchov danej súčiastky. Pre označovanie oblastí povrchov jednotlivých súčiastok bol zvolený nasledovný princíp:

Tab. 5 Princíp označovania meraných plôch

| Názov plochy pre meranie | Použitá tlačiareň | Hrúbka vlákna/vrstvy [mm] | Stena  |
|--------------------------|-------------------|---------------------------|--------|
| F_25_V                   | Fortus            | 0,25                      | Vrchná |
| F_25_B                   |                   |                           | Bočná  |
| F_25_S                   |                   |                           | Spodná |
| D_25_V                   | Dimension         | 0,25                      | Vrchná |
| D_25_B                   |                   |                           | Bočná  |
| D_25_S                   |                   |                           | Spodná |
| F_33_V                   | Fortus            | 0,33                      | Vrchná |
| F_33_B                   |                   |                           | Bočná  |
| F_33_S                   |                   |                           | Spodná |
| D_33_V                   | Dimension         | 0,33                      | Vrchná |
| D_33_B                   |                   |                           | Bočná  |
| D_33_S                   |                   |                           | Spodná |

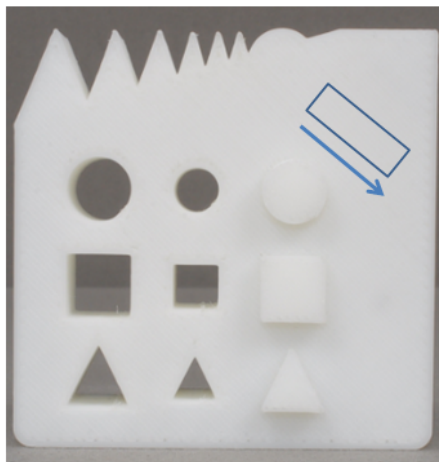
Meranie začíname dielenským mikroskopom Carl Zeiss Jena, ktorý je doplnený digitálnou šošovkou Dinocapture 2.0. Zvolíme správnu veľkosť zväčšenia (10x) pre daný povrch a pozrieme si štruktúru povrchu pre utvrdenie smeru merania. Na obrázku (Obr. 44) je detailná ukážka povrchu a znázornený smer merania. Teda smer dráhy merania sme stanovili kolmo na smer kladenia materiálu.



Obr. 44 Smer merania

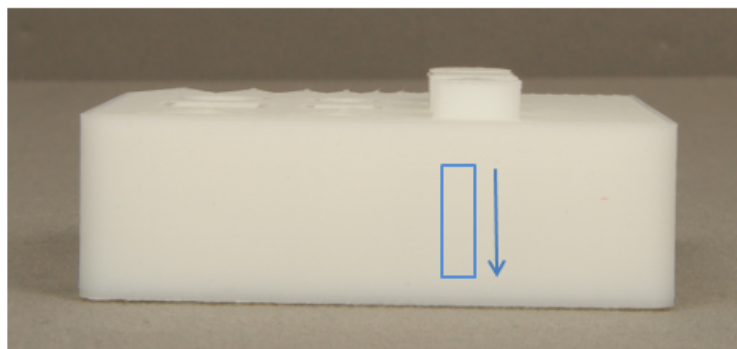
## 5.2 Výber oblasti pre meranie

Určili sme tri oblasti na každej vzorke pre dostatočné množstvo dát, ktoré sa použijú na konečné štatistické vyhodnotenie 3D tlače v oblasti akosti povrchu. Jednu oblasť merania pre každý typ povrchu. Vybrali sme takú oblasť povrchu, ktorá má dostatočnú dĺžku a kde nie sú vizuálne vidieť prípadné chyby. Materiál sa vo vrstve ukladá pod uhlom  $45^\circ$  a orientácia vo vrchnej vrstve závisí od nastavených parametrov tlače, preto je potrebné určiť smer merania pre vrchnú stenu zvlášť na každej súčiastke. Na Obr. 45 je vidieť určenú oblasť a smer pre meranie na povrchu D\_25\_V.



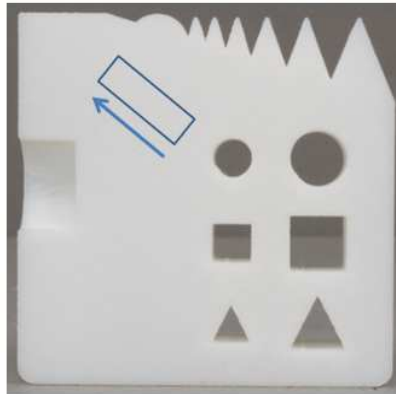
Obr. 45 Určenie oblasti a smer dráhy merania pre vrchnú stenu

Pre bočnú stenu bola zvolená oblasť a smer merania ako je naznačené na Obr. 46.



Obr. 46 Určenie oblasti a smer dráhy merania pre bočnú stenu

Na Obr. 47 vidíme snímky pre spodnú stenu z mikroskopu. V tomto prípade bol povrch v kontakte so základovou doskou a následkom ťažšie došlo ako keby k pretlačeniu vzoru z nasledujúcej vrstvy. Po detailnejšom pozorovaní sme určili správny smer merania aj na spodných stenách.



Obr. 47 Určenie oblasti a smer dráhy merania pre spodnú stenu

### 5.3 Postup merania na prístroji Form Talysurf 50

Kontaktné meranie drsnosti povrchu na pripravených vzorkách sme uskutočnili na prístroji Form Talysurf 50, na ktorom je možné merať všetky parametre drsnosti normované podľa ISO 4287.

Skutočné kalibrovanie prístroja je vykonávané raz ročne príslušným kalibračným strediskom, my iba urobíme kontrolu presnosti kalibrácie, ktorá by sa mala uskutočniť vždy pred každým meraním drsnosti povrchu súčiastok.

Najskôr teda skontrolujeme správne nastavenie prístroja, ktorý sa skladá z vyhodnocovacej jednotky, posuvnej jednotky a snímacieho ramena s hrotom. Podľa materiálu sme zvolili hrot pre plast. Nastavíme všetky potrebné údaje do vyhodnocovacieho zariadenia. Vyhodnocovací program pre dotykový systém Taylor Hobson je Talymap. Program Taylor Hobson Talymap spracováva 2D charakteristiku povrchu z dát získaných dotykovým meracím systémom profilometru. Program Taylor Hobson Talymap umožňuje tiež zobrazenie charakteristických kriviek a diagramov profilu.



Obr. 48 Meranie súčiastky

Uskutočňujeme meranie drsnosti v určených oblastiach na vyhodnocovanej dĺžke  $l_n = 4$  mm, so základnou dĺžkou  $l_r = 0,8$  mm. Na Obr. 49. je vyhodnotený profil drsnosti pre jedno meranie.



Obr. 49 Krivka profilu drsnosti na povrchu súčiastky D\_25\_B

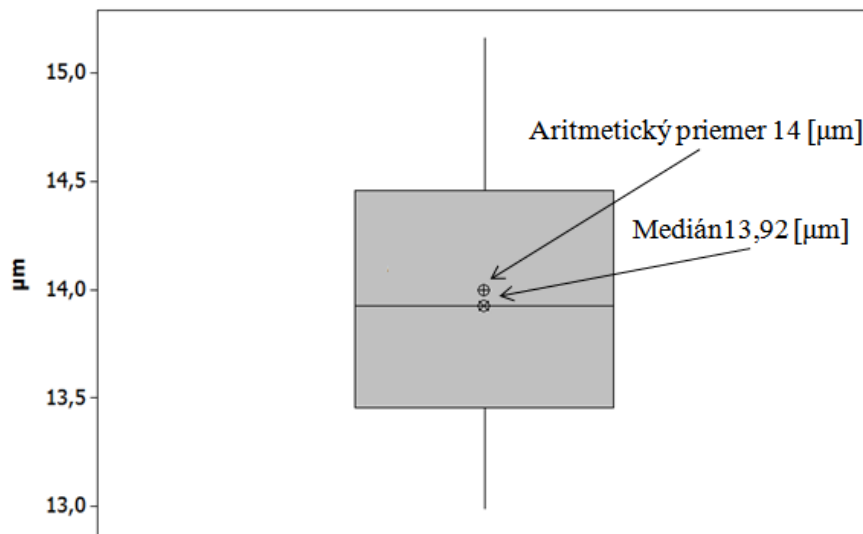
Všetky parametre z analýzy drsnosti boli spracované a vybrané dáta pretransformované do tvaru, ktorý je akceptovateľný štatistickým programom. Zo všetkých zistených dát sme pre nasledujúce hodnotenie vybrali parametre drsnosti  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_z$ ,  $R_{Sm}$  a  $R_{mr}$  (c).

## 6 ŠTATISTICKÉ SPRACOVANIE VÝSLEDKOV MERANÍ

Pre vyhodnotenie výsledkov merania bol použitý štatistický softvér MINITAB verzia 16.

### 6.1 Kontrola dát

Pre kontrolu dát bol použitý krabicový graf, pomocou ktorého boli overené všetky namerané hodnoty. Na obrázku (Obr. 50) je ako príklad uvedený krabicový graf pre parameter Ra, ktorý bol v tomto prípade nameraný na vrchnej stene.



Obr. 50 Krabicový graf pre hodnoty parametra Ra na povrchu D\_25\_V

### 6.2 Vyhodnotenie vybraných parametrov

Nasledujúce hodnotenie bolo robené pre parametre drsnosti Ra, Rq, Rz, RSm a Rmr (c). V tabuľke (Tab. 6) sú umiestnené všetky namerané hodnoty parametrov pre povrchy F\_25\_V a D\_25\_V. Ostatné výsledky meraní pre všetky povrchy súčastok sú v prílohe (PI).

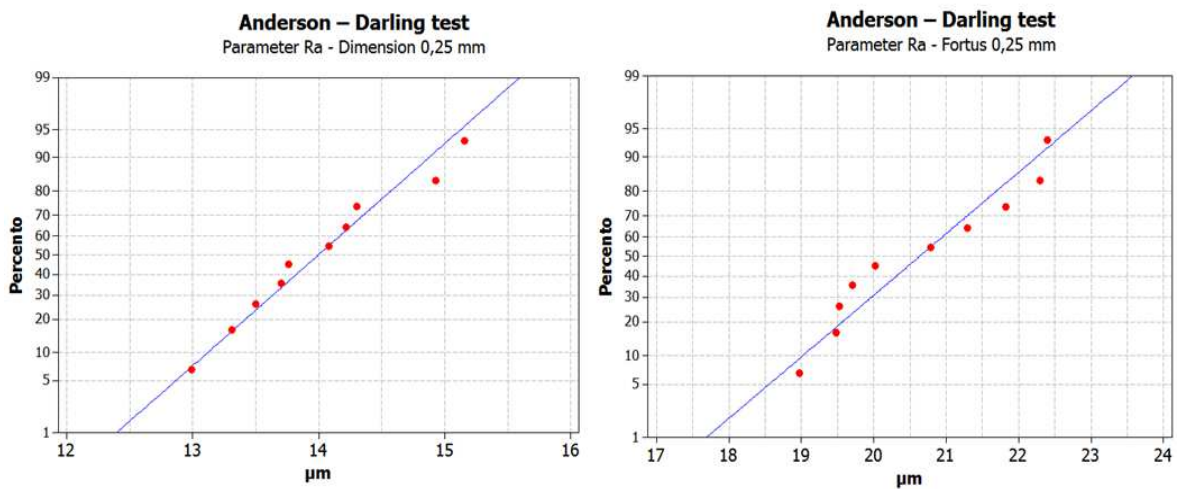
Tab. 6 Výsledky nameraných hodnôt parametrov Ra, Rq, Rz, RSm a Rmr (c) pre D\_25\_V a F\_25\_V

| HRÚBKVA VRSTVY 0,25 mm |       |                      |        |                      |        |                      |        |                       |        |               |        |
|------------------------|-------|----------------------|--------|----------------------|--------|----------------------|--------|-----------------------|--------|---------------|--------|
| Parameter              |       | Ra [ $\mu\text{m}$ ] |        | Rq [ $\mu\text{m}$ ] |        | Rz [ $\mu\text{m}$ ] |        | RSm [ $\mu\text{m}$ ] |        | Rmr ( c ) [%] |        |
| Stena                  | č. m. | D                    | F      | D                    | F      | D                    | F      | D                     | F      | D             | F      |
| VRCHNÁ                 | 1     | 14,22                | 22,30  | 19,72                | 28,35  | 90,76                | 106,10 | 780,35                | 508,03 | 70,72         | 67,51  |
|                        | 2     | 14,93                | 20,02  | 19,30                | 26,26  | 85,23                | 103,84 | 771,08                | 511,67 | 73,18         | 67,84  |
|                        | 3     | 13,70                | 20,78  | 20,22                | 25,77  | 90,74                | 96,22  | 767,97                | 509,74 | 72,11         | 65,61  |
|                        | 4     | 12,99                | 22,40  | 19,77                | 28,55  | 86,43                | 107,22 | 771,44                | 509,30 | 72,82         | 67,23  |
|                        | 5     | 15,16                | 21,83  | 19,72                | 26,57  | 83,80                | 94,02  | 770,27                | 507,50 | 70,34         | 65,32  |
|                        | 6     | 14,08                | 19,52  | 18,72                | 23,72  | 86,16                | 79,68  | 760,35                | 510,49 | 71,21         | 66,23  |
|                        | 7     | 14,30                | 21,29  | 18,96                | 26,48  | 85,92                | 96,47  | 757,70                | 507,90 | 73,93         | 66,69  |
|                        | 8     | 13,31                | 19,48  | 18,97                | 24,57  | 90,63                | 90,73  | 756,80                | 511,70 | 71,34         | 66,89  |
|                        | 9     | 13,50                | 18,97  | 19,29                | 23,16  | 82,61                | 80,44  | 757,38                | 508,09 | 70,43         | 65,67  |
|                        | 10    | 13,76                | 19,71  | 20,65                | 25,85  | 84,18                | 103,76 | 770,40                | 508,63 | 73,24         | 66,39  |
| Priemer                |       | 14,00                | 20,63  | 19,53                | 25,93  | 86,65                | 95,85  | 766,37                | 509,31 | 71,93         | 66,54  |
| Výberová s.o.          |       | 0,6858               | 1,2613 | 0,6024               | 1,7636 | 3,0333               | 9,9427 | 7,8962                | 1,5532 | 1,3001        | 0,8486 |

### 6.2.1 Anderson - Darlingov test

V prvom kroku nás zaujíma, či dáta pochádzajú z normálneho rozdelenia. Na zistenie sme použili Anderson - Darling test pomocou ktorého je vyhodnotená P-hodnota.

Na obrázku (Obr. 51) je ukážka Anderson - Darling testu pre parameter Ra na súčiastkach s hrúbkou 0,25 mm. Zisťovanie P-hodnoty bolo uskutočnené pre každý parameter zvlášť.



Obr. 51 Anderson – Darling test parametra Ra na vrchnej stene

Hypotézy pri tomto teste sú:

- $H_0$ - dáta pochádzajú z normálneho rozdelenia
- $H_A$ - dáta nepochádzajú z normálneho rozdelenia

Týmto testom sme zistili, že pre všetky povrchy vyrobené s hrúbkou vrstvy 0.25 mm nezamietame hypotézu  $H_0$ , t.j., nezamietame, že namerané hodnoty parametrov sú z normálneho rozdelenia, vid' tabuľka (Tab. 7) pre povrchy D\_25\_V, F\_25\_V.

Tab. 7 Výsledky Anderson - Darlingovho testu pre parametre povrchu D\_25\_V, F\_25\_V

| Hrúbka vrstvy 0.25 mm |              |                       |           |            |          |
|-----------------------|--------------|-----------------------|-----------|------------|----------|
| Stena                 | 3D tlačiareň | Parameter             | P-hodnota | $H_0$      |          |
|                       |              |                       |           | Nezamietam | Zamietam |
| VRCHNÁ                | D            | Ra [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,868     | x          |          |
|                       |              | Rq [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,622     | x          |          |
|                       |              | Rz [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,102     | x          |          |
|                       |              | RSm [ $\mu\text{m}$ ] | 0,118     | x          |          |
|                       |              | Rmr ( c ) [%]         | 0,403     | x          |          |
|                       | F            | Ra [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,326     | x          |          |
|                       |              | Rq [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,597     | x          |          |
|                       |              | Rz [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,274     | x          |          |
|                       |              | RSm [ $\mu\text{m}$ ] | 0,252     | x          |          |
|                       |              | Rmr ( c ) [%]         | 0,898     | x          |          |

To platí aj pre namerané hodnoty parametrov všetkých povrchov súčiastok vyrobených s hrúbkou vrstvy 0,33 mm. V tabuľke (Tab. 8) sú uvedené P-hodnoty pre povrchy D\_33\_V, F\_33\_V. Ostatné výsledky sú uvedené v prílohe (PII).

Tab. 8 Výsledky Anderson - Darlingovho testu pre parametre povrchu D\_33\_V, F\_33\_V

| Hrúbka vrstvy 0.33 mm |              |                       |           |            |          |
|-----------------------|--------------|-----------------------|-----------|------------|----------|
| Stena                 | 3D tlačiareň | Parameter             | P-hodnota | $H_0$      |          |
|                       |              |                       |           | Nezamietam | Zamietam |
| VRCHNÁ                | D            | Ra [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,148     | x          |          |
|                       |              | Rq [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,221     | x          |          |
|                       |              | Rz [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,832     | x          |          |
|                       |              | RSm [ $\mu\text{m}$ ] | 0,582     | x          |          |
|                       |              | Rmr ( c ) [%]         | 0,73      | x          |          |
|                       | F            | Ra [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,412     | x          |          |
|                       |              | Rq [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,477     | x          |          |
|                       |              | Rz [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,641     | x          |          |
|                       |              | RSm [ $\mu\text{m}$ ] | 0,366     | x          |          |
|                       |              | Rmr ( c ) [%]         | 0,392     | x          |          |

Anderson - Darling testom vieme povedať, že sme overili predpoklad normálneho rozdelenia dát.

### 6.2.2 F-test

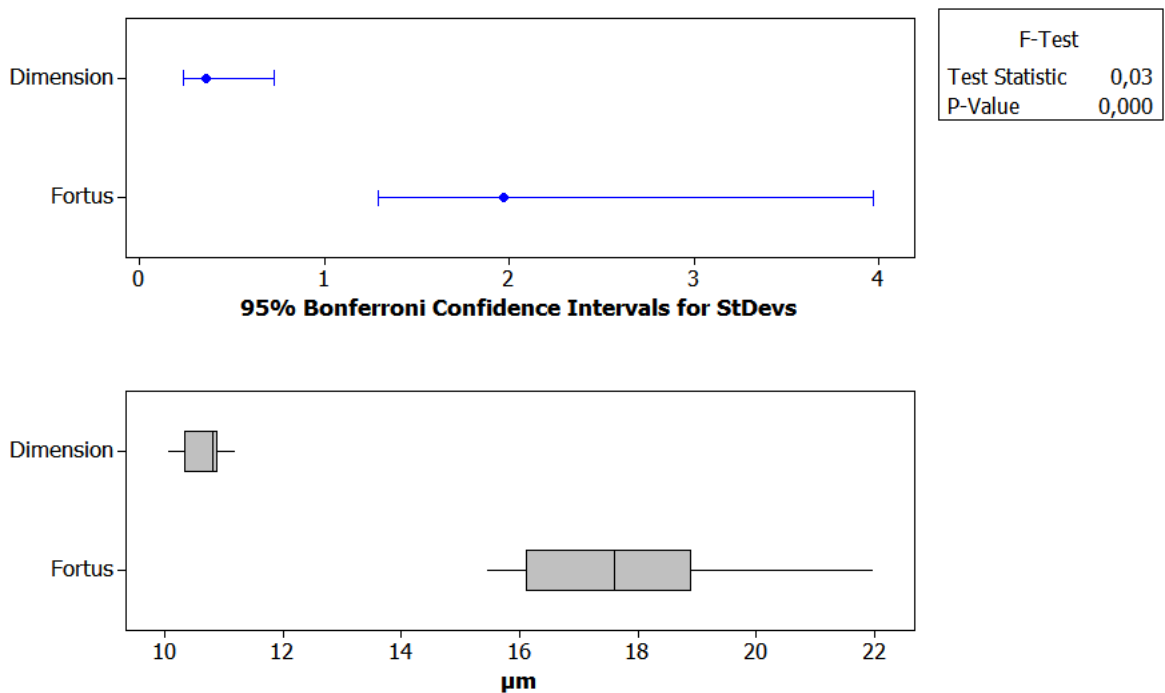
Pre použitie parametrických testov je nutné splniť predpoklad, že dáta pochádzajú z normálneho rozdelenia. Tento predpoklad sme overili pomocou Anderson - Darlingovho testu. Pri F-teste zisťujeme významnosť rozdielu dvoch rozptylov t.j. či výberové súbory pochádzajú z rovnakých základných súborov s rovnakým rozptylom. Porovnávam medzi sebou dve tlačiarne s rovnakým typom vrstvy a to nasledovným pravidlom:

Tab. 9 Princíp porovnávania nameraných hodnôt parametrov

|        |        |        |        |        |        |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| D_25_V | D_25_B | D_25_S | D_33_V | D_33_B | D_33_S |
| a      | a      | a      | a      | a      | a      |
| F_25_V | F_25_B | F_25_S | F_33_V | F_33_B | F_33_S |

Pre test sme zvolili hladinu významnosti 95%. Ak P-hodnota je  $> 0,05 \Rightarrow H_0$ , ak je P-hodnota  $< 0,05$  zamietam  $H_0$  v prospech  $H_A$ . Pre hypotézy platí:

- $H_0$ : rozptyly sú rovnaké
- $H_A$ : rozptyly sú rôzne.



Obr. 52 F-test parametra Ra na vrchnej stene F\_33\_V a D\_33\_V



Všetky parametre boli vyhodnocované ako je uvedené na Obr. 52, tento konkrétny prípad opisuje parameter Ra nameraný na vrchnej stene súčiastok s hrúbkou vrstvy 0,33 mm. V tabuľkách (Tab. 10 , Tab. 11) sú uvedené hodnoty P-hodnoty F-testu pre parametre, ktoré boli namerané na vrchnej stene. V prílohe (PII) sú uvedené všetky hodnoty pre F-test.

Tab. 10 Výsledky F-testu súčiastok F\_25\_V a D\_25\_V

| Hrúbka vrstvy 0.25 mm |                       |           |            |          |
|-----------------------|-----------------------|-----------|------------|----------|
| VRCHNÁ STENA          | PARAMETER             | P-hodnota | H0         |          |
|                       |                       |           | NEZAMIETAM | ZAMIETAM |
|                       | Ra [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,08      | x          |          |
|                       | Rq [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,00      |            | x        |
|                       | Rz [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,00      |            | x        |
|                       | RSm [ $\mu\text{m}$ ] | 0,00      |            | x        |
|                       | Rmr (c) [%]           | 0,22      | x          |          |

Tab. 11 Výsledky F-testu súčiastok F\_33\_V a D\_33\_V

| Hrúbka vrstvy 0.33 mm |                       |           |            |          |
|-----------------------|-----------------------|-----------|------------|----------|
| VRCHNÁ STENA          | PARAMETER             | P-hodnota | H0         |          |
|                       |                       |           | NEZAMIETAM | ZAMIETAM |
|                       | Ra [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,00      |            | x        |
|                       | Rq [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,00      |            | x        |
|                       | Rz [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,00      |            | x        |
|                       | RSm [ $\mu\text{m}$ ] | 0,00      |            | x        |
|                       | Rmr (c) [%]           | 0,00      |            | x        |

### 6.2.3 T-test

Pre hodnotenie, či stredne hodnoty výberových súborov pochádzajú z rovnakého základneho súboru, resp. či rozdiel medzi nimi je spôsobený len náhodnou chybou, bol použitý T-test. Pre hypotézy platí:

- $H_0$ : výberové priemery sú rovnaké
- $H_A$ : výberové priemery sú rôzne.

Pre tento test vo všetkých kontrolovaných parametroch vyšla P-hodnota nula, tým sme zamietli nulovú hypotézu v prospech alternatívnej a bol zistený štatisticky významný rozdiel medzi porovnávanými výberovými súbormi a ich priemerami. Všetky parametre boli

vyhodnocované ako je uvedené na Obr. 53, tento konkrétny prípad opisuje parameter Ra nameraný na vrchnej stene súčiastok s hrúbkou vrstvy 0,25 mm.

```
Difference = mu (Ra D_25_V) - mu (Ra F_25_V)
95% CI for difference
T-Test of difference = P-Value = 0,000
```

Obr. 53 Výsledok T-testu pre parameter Ra súčiastok F\_25\_V a D\_25\_V

V tabuľke (Tab. 12) sú uvedené hodnoty P-hodnoty T-testu pre parametre, ktoré boli namerané na vrchnej stene. V prílohe (PIV) sú uvedené všetky hodnoty pre T-test.

Tab. 12 Výsledky T-testu pre parametre súčiastok F\_25\_V a D\_25\_V

| VRCHNÁ STENA | Parameter   | P hodnota | H <sub>0</sub> |          |
|--------------|-------------|-----------|----------------|----------|
|              |             |           | Nezamietam     | Zamietam |
|              | Ra [μm]     | 0         |                | x        |
|              | Rq [μm]     | 0         |                | x        |
|              | Rz [μm]     | 0         |                | x        |
|              | RSm [μm]    | 0         |                | x        |
|              | Rmr (c) [%] | 0         |                | x        |

#### 6.2.4 Výstup zo štatistického spracovania výsledkov meraní

Anderson - Darlingov test nezamietol normálne rozdelenie výberových súborov, čo je podmienka pre testovanie T-testom a F-testom. F-test otestoval významnosť rozdielov dvoch rozptylov. Na základe výsledku rovnosti alebo odlišnosti rozptylov závisí spôsob výpočtu T-testu. Výsledok T-testu nám ukázal, že hodnoty priemerov dvoch výberových súborov sa štatističky významne líšia pre všetky parametre. Na základe toho môžeme tvrdiť, že hodnoty testovaných parametrov drsnosti povrchu nameraných na rovnakých stenách s rovnakou hrúbkou vrstvy, vytlačených na tlačiarňach Fortus a Dimension, sa líšia.

## 7 VYHODNOTENIE VÝSLEDKOV MERANÍ

V tejto kapitole budú hodnotené výsledky meraní vybraných parametrov drsnosti profilu Ra, Rq, Rz, RSm a Rmr (c). Pri vyhodnotení beriem do úvahy dva typy 3D tlačiarň Dimension a Fortus a dve hrúbky vlákien materiálu a to hrúbku 0,25 mm a 0,33 mm. Budem hodnotiť súčiastku z tlačiarne Fortus proti súčiastke z tlačiarne Dimension vyrobené s rovnakou hrúbkou vrstvy. Do úvahy takisto beriem, že namerané hodnoty pochádzajú z troch rôznych povrchov, resp. že každý meraný povrch má inú štruktúru v dôsledku technológie. Preto budem porovnávať parametre drsnosti v rámci rovnakých povrchov.

Tab. 13 Princíp porovnávania súčiastok 3D tlačiarň

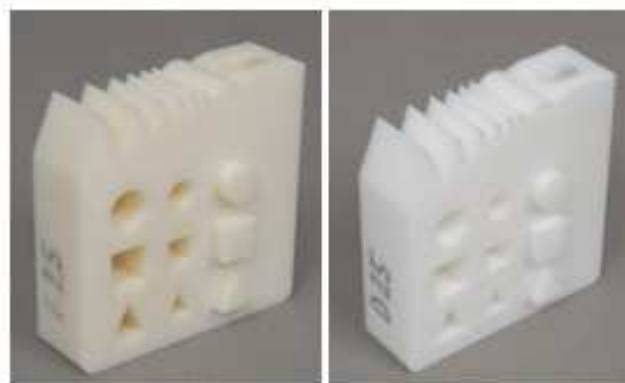
|        |        |        |        |        |        |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| D_25_V | D_25_B | D_25_S | D_33_V | D_33_B | D_33_S |
| verzus | verzus | verzus | verzus | verzus | verzus |
| F_25_V | F_25_B | F_25_S | F_33_V | F_33_B | F_33_S |

Vo vyhodnotení sú uvedené najväčšie a najmenšie hodnoty jednotlivých parametrov pre jednotlivé hrúbky vlákien.

Výsledkom merania pre jednotlivé parametre drsnosti sú odhadované hodnoty aritmetických priemerov spolu s neistotou merania.

### 7.1 Hodnotenie parametrov drsnosti pre súčiastky z 3D tlače s hrúbkou vrstvy 0,25 mm

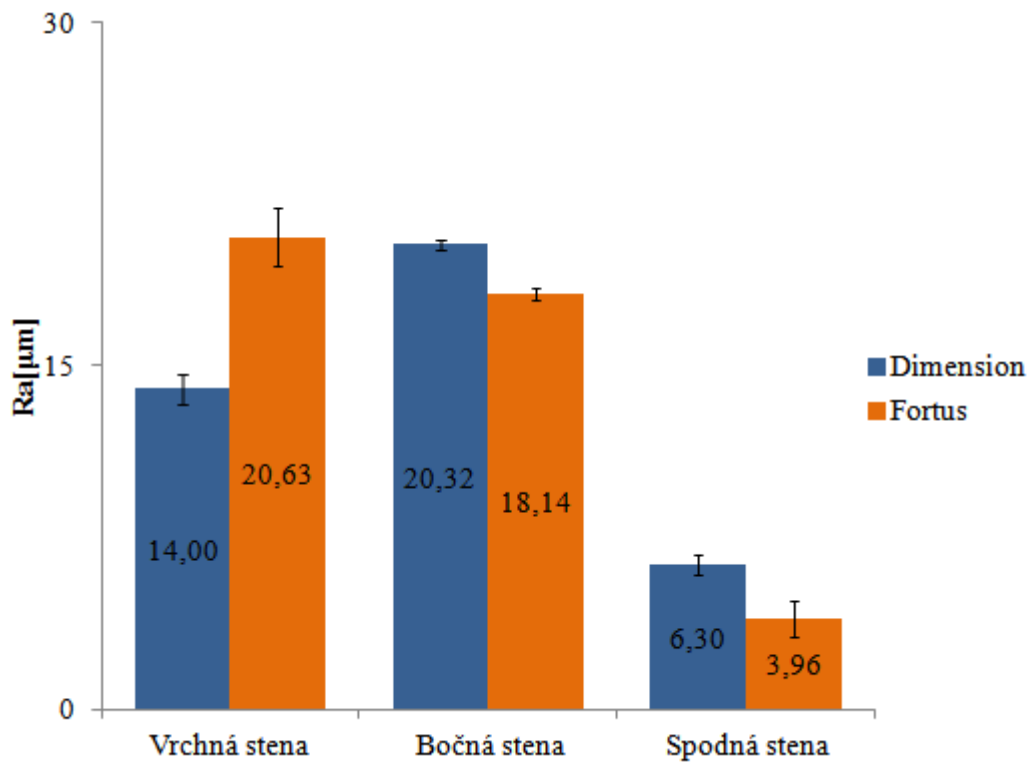
Hodnotím súčiastky z 3D tlačiarň Dimesion a Fortus vytlačené s hrúbkou vrstvy 0,25 mm, zobrazené na obrázku (Obr. 54).



Obr. 54 Súčiastky s hrúbkou vrstvy 0,25 mm

### 7.1.1 Parameter Ra na stenách súčiastok D\_25 a F\_25

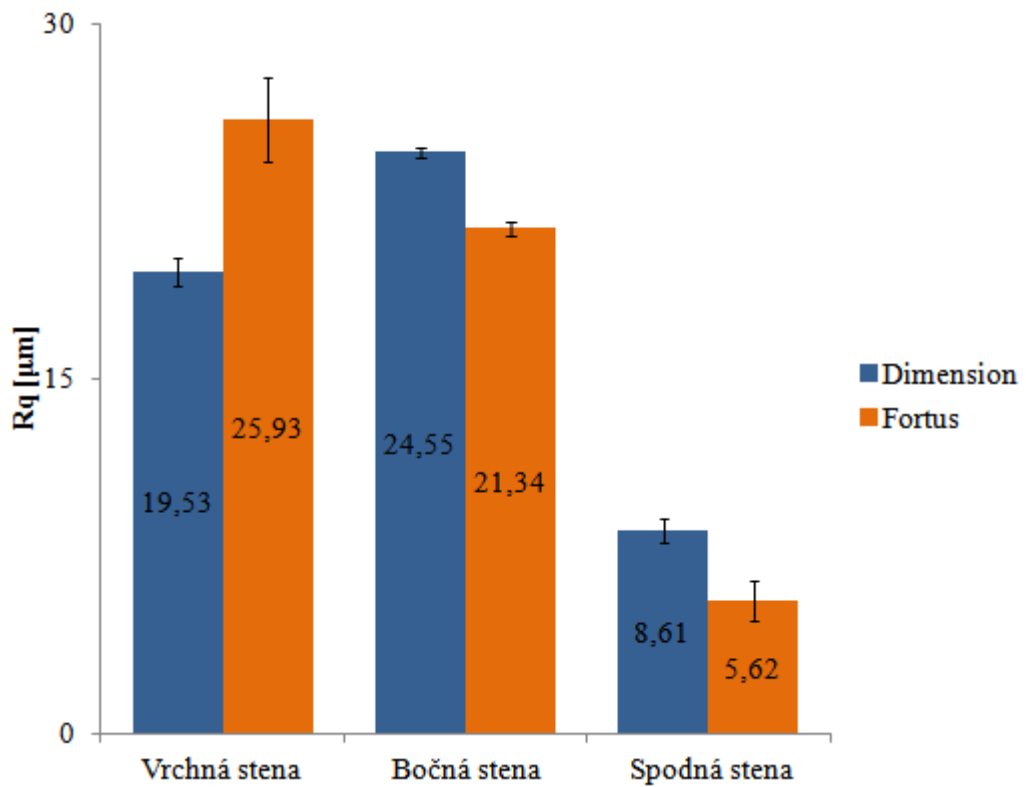
Výškový parameter drsnosti profilu Ra, stredná aritmetická odchýlka posudzovaného profilu je integrálna veličina, ktorá sa mnohokrát zamieňa so všeobecným pojmom drsnosť. Pri vyhodnotení a analýze výsledkov možno konštatovať, že stredná aritmetická odchýlka Ra je významnou výškovou charakteristikou drsnosti. Ako vyplýva z grafického znázornenia na obrázku (Obr. 55) parameter Ra pri hrúbke vrstvy 0,25 mm dosiahol najmenšiu hodnotu 3,96  $\mu\text{m}$  na spodnej stene súčiastky z 3D tlačiarne Fortus (F\_25\_S) a najväčšiu hodnotu 20,63  $\mu\text{m}$  na vrchnej stene súčiastky z 3D tlačiarne Fortus (F\_25\_V).



Obr. 55 Parameter Ra pre hrúbku vrstvy 0,25mm

### 7.1.2 Parameter Rq na stenách súčastok D\_25 a F\_25

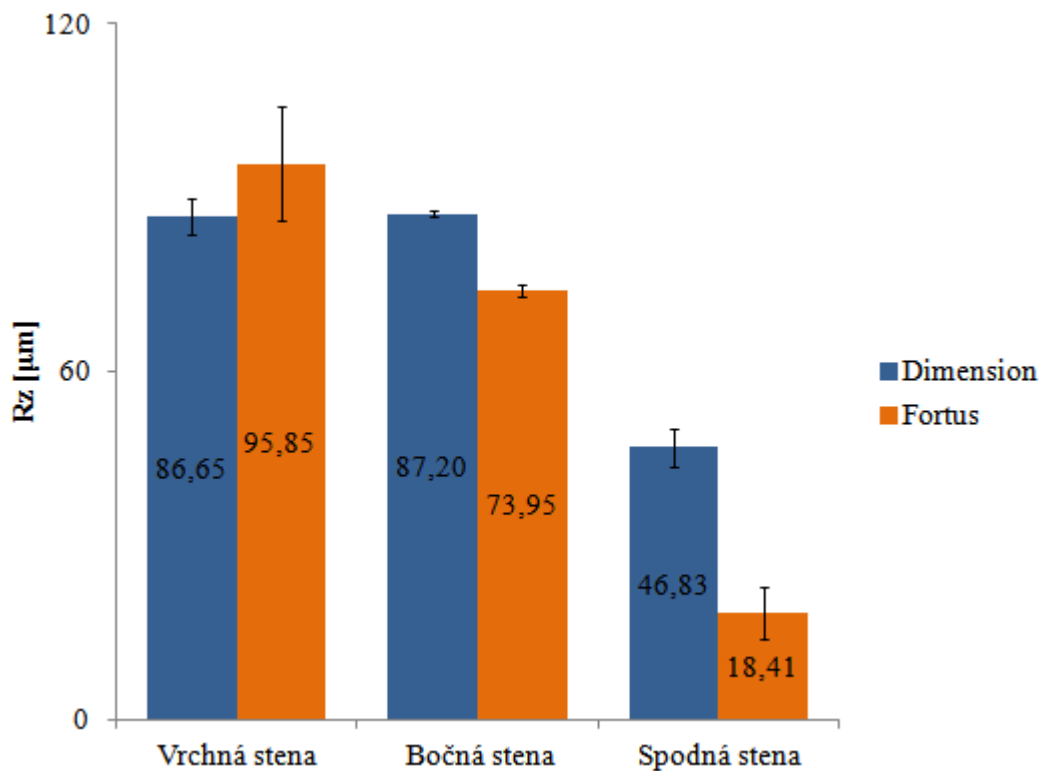
Výškový parameter drsnosti profilu Rq je stredná kvadratická hodnota odchýlok profilu v rozsahu základnej dĺžky. Rq je citlivejší parameter na nežiaduce výstupky a priehlbiny kontrolovaného povrchu a preto spravidla ukazuje vyššie hodnoty ako Ra. Výsledky merania sú graficky znázornené na (Obr. 56), pričom parameter Rq pri hrúbke vrstvy 0,25 mm dosiahol najmenšiu hodnotu 5,62  $\mu\text{m}$  na spodnej stene súčastky z 3D tlačiarne Fortus (F\_25\_S) a najväčšiu hodnotu 25,93  $\mu\text{m}$  na vrchnej stene súčastky z 3D tlačiarne Fortus (F\_25\_V). Pri konkrétnom meraní sme potvrdili, že parameter Rq udáva vyššie hodnoty ako Ra.



Obr. 56 Parameter Rq pre hrúbku vrstvy 0,25mm

### 7.1.3 Parameter Rz na stenách súčiastok D\_25 a F\_25

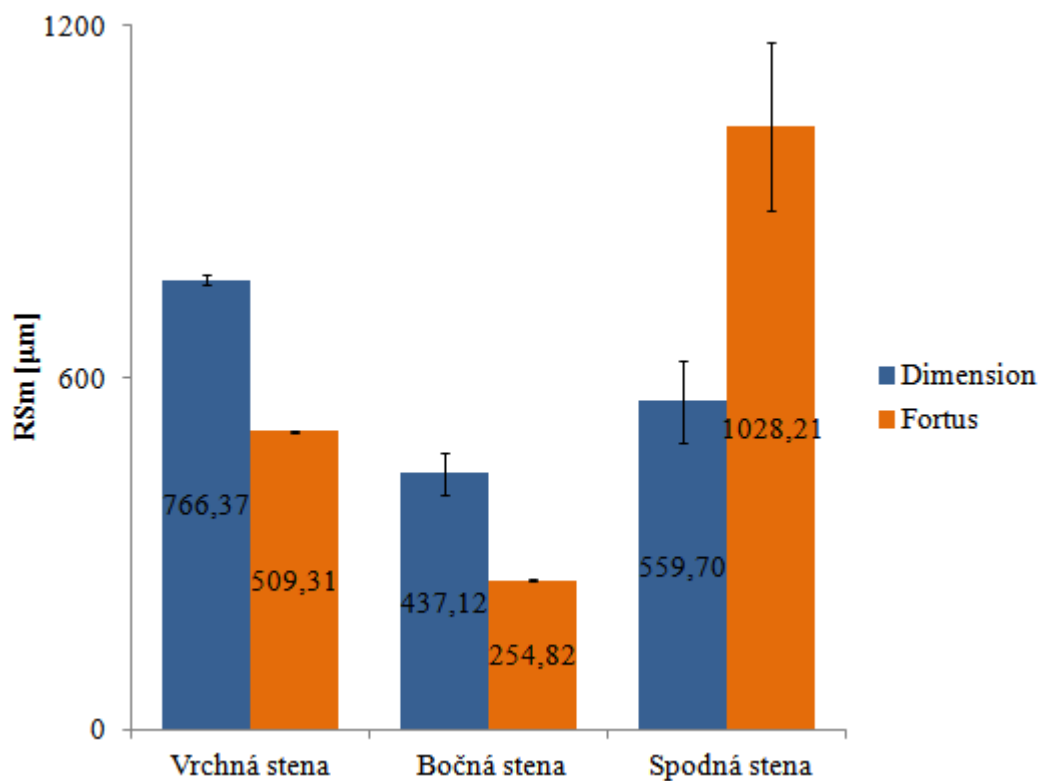
Výškový parameter drsnosti profilu Rz je súčet najväčšej výšky profilu a najväčšej priehlbiny profilu v rozsahu základnej dĺžky. Graficky vyjadrené výsledky merania na (Obr. 57) ukazujú, že parameter Rz pri hrúbke vrstvy 0,25 mm dosiahol najmenšiu hodnotu 18,41  $\mu\text{m}$  na spodnej stene súčiastky z 3D tlačiarne Fortus (F\_25\_S) a najväčšiu hodnotu 95,85  $\mu\text{m}$  na vrchnej stene súčiastky z 3D tlačiarne Fortus (F\_25\_V).



Obr. 57 Parameter Rz pre hrúbku vrstvy 0,25mm

#### 7.1.4 Parameter RSm na stenách súčiastok D\_25 a F\_25

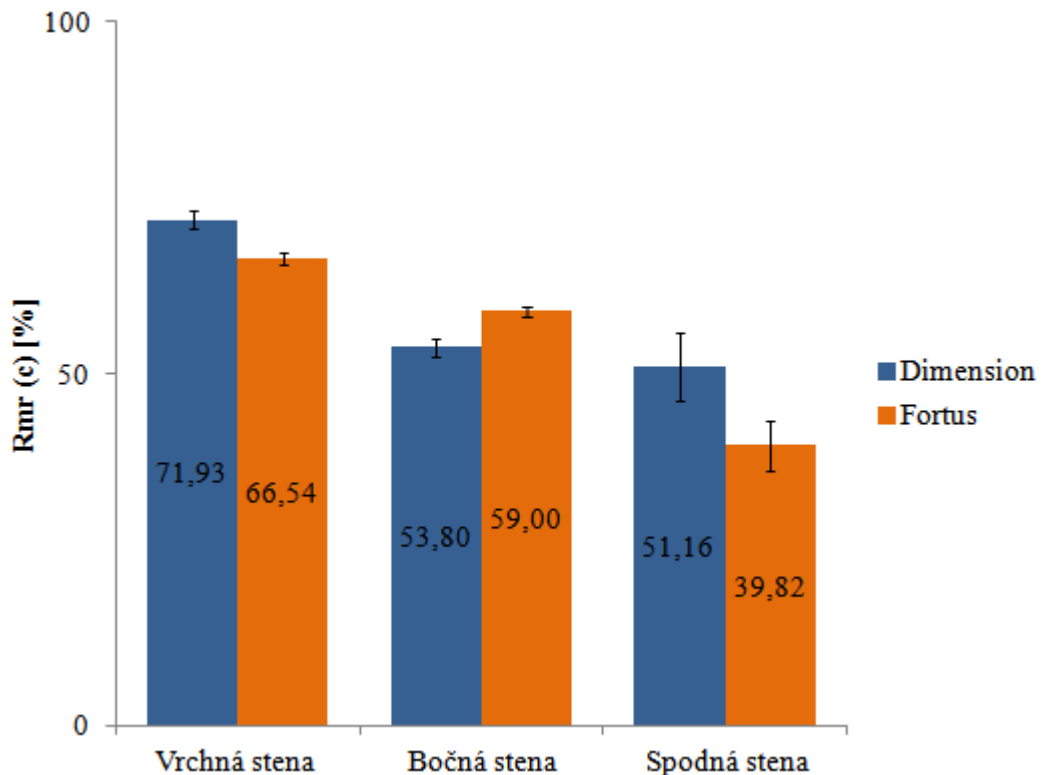
Dĺžkový parameter drsnosti profilu RSm je závislý od vzdialenosti vrcholkov a priehlbín. RSm je aritmetická dĺžka širok prvkov profilov v rozsahu základnej dĺžky. Ako vyplýva z grafického znázornenia na obrázku (Obr. 58), parameter RSm pri hrúbke vrstvy 0,25 mm dosiahol najmenšiu hodnotu 254,82  $\mu\text{m}$  na bočnej stene súčiastky z 3D tlačiarne Fortus (F\_25\_B) a najväčšiu hodnotu 1028,21  $\mu\text{m}$  na spodnej stene súčiastky z 3D tlačiarne Fortus (F\_25\_S).



Obr. 58 Parameter RSm pre hrúbku vrstvy 0,25mm

### 7.1.5 Parameter Rmr (c) na stenách súčiastok D\_25 a F\_25

Parameter Rmr (c) je pomer dĺžky materiálu elementov profilu na danej úrovni k vyhodnocovanej dĺžke. Výsledok merania na obrázku (Obr. 59) poukazuje, že parameter Rmr(c) pri hrúbke vrstvy 0,25 mm dosiahol najmenšiu hodnotu 39,82 % na spodnej stene súčiastky z 3D tlačiarne Fortus (F\_25\_S) a najväčšiu hodnotu 71,93 % na vrchnej stene súčiastky z 3D tlačiarne Dimension (D\_25\_V).



Obr. 59 Parameter Rmr (c) pre hrúbku vrstvy 0,25 mm

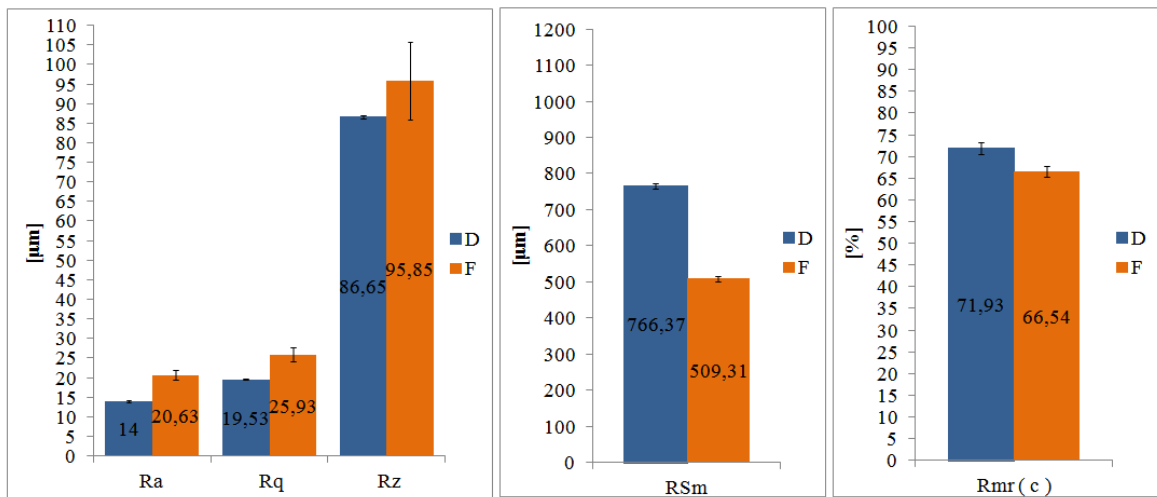
## 7.2 Vyhodnotenie výsledkov meraní na jednotlivých stenách medzi súčiastkami s hrúbkou vrstvy 0,25 mm

V tomto vyhodnotení porovnávam parametre drsnosti pre steny, vrchnú, bočnú, spodnú, podľa tabuľky (Tab. 13). V grafoch sú zobrazené všetky amplitúdové výškové parametre Ra, Rz, Rq, výsledný parameter strednej šírky prvku profilu RSm a parameter materiálového podielu profilu Rmr (c).



### 7.2.1 Porovnanie parametrov na vrchnej stene D\_25\_V vs F\_25\_V

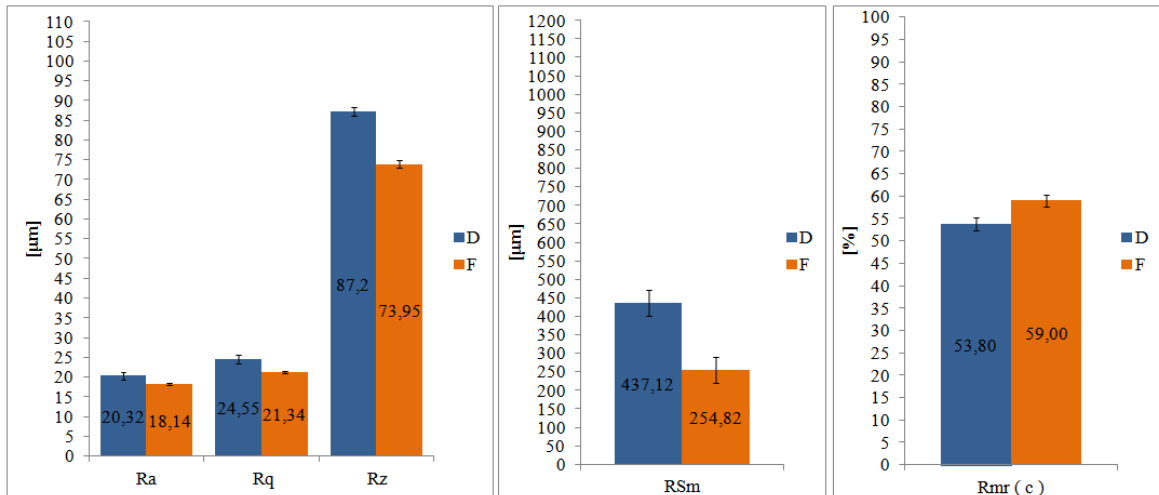
Ako vidieť z obrázka (Obr. 60) pri meraní výškových parametrov drsnosti povrchu Ra, Rq, Rz boli na vrchnej stene namerané menšie hodnoty parametrov na súčiastke vytlačenej na 3D tlačiarňi Dimension (D\_25\_V), parameter Ra je menší o 32,1%, parameter Rq je menší o 24,7%, parameter Rz je menší o 9,6%. Pre dĺžkový parameter RSm bola nameraná menšia hodnota na súčiastke vytlačenej na 3D tlačiarňi Fortus (F\_25\_V), parameter RSm je menší o 33,5%. Nameraná hodnota parametra materiálového podielu profilu drsnosti Rmr(c) je väčšia na súčiastke vytlačenej na 3D tlačiarňi Dimension (D\_25\_V), parameter Rmr(c) je väčší o 8,1%.



Obr. 60 Parametre pre vrchnú stenu (D\_25\_V vs F\_25\_V) 0,25 mm

### 7.2.2 Porovnanie parametrov na bočnej stene D\_25\_B vs F\_25\_B

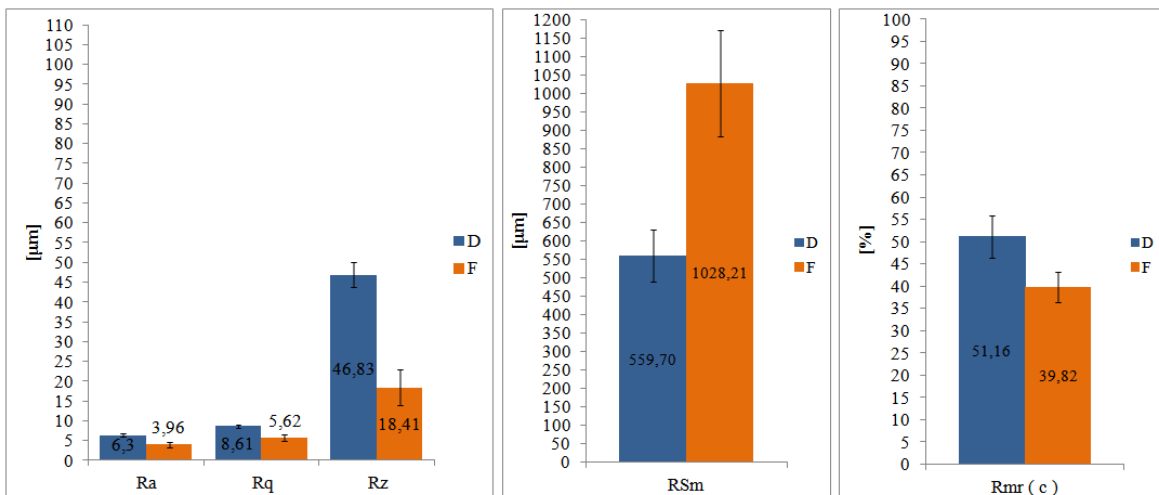
Na obrázku (Obr. 61) sú zobrazené výsledky merania pre parametre Ra, Rq, Rz, RSm a Rmr(c) merané na bočnej stene. Pri meraní výškových parametrov drsnosti povrchu Ra, Rq, Rz, boli na bočnej stene namerané menšie hodnoty parametrov na súčiastke vytlačenej na 3D tlačiarňi Fortus (F\_25\_B), parameter Ra je menší o 10,7%, parameter Rq je menší o 13%, parameter Rz je menší o 15,2%. Pre dĺžkový parameter RSm bola nameraná menšia hodnota na súčiastke vytlačenej na 3D tlačiarňi Fortus (F\_25\_B), parameter RSm je menší o 41,7%. Nameraná hodnota parametra materiálového podielu profilu drsnosti Rmr(c) je väčšia na súčiastke vytlačenej na 3D tlačiarňi Fortus (F\_25\_B), parameter Rmr(c) je väčší o 9,7%.



Obr. 61 Parametre pre bočnú stenu (D\_25\_B vs F\_25\_B) 0,25 mm

### 7.2.3 Porovnanie parametrov na spodnej stene D\_25\_s vs F\_25\_S

Na obrázku (Obr. 62) sú zobrazené výsledky merania pre parametre Ra, Rq, Rz, RSm a Rmr(c) merané na spodnej stene. Pri meraní výškových parametrov drsnosti povrchu Ra, Rq, Rz, boli na spodnej stene namerané menšie hodnoty parametrov na súčiastke vytlačenej na 3D tlačiarňi Fortus (F\_25\_S), parameter Ra je menší o 37,1%, parameter Rq je menší o 34,7%, parameter Rz je menší o 60,7%. Pre dĺžkový parameter RSm bola nameraná menšia hodnota na súčiastke vytlačenej na 3D tlačiarňi Dimension (D\_25\_S), parameter RSm je menší o 45,6%. Nameraná hodnota parametra materiálového podielu profilu drsnosti Rmr(c) je väčšia na súčiastke vytlačenej na tlačiarňi Dimension (D\_25\_S), parameter Rmr(c) je väčší o 28,5%.



Obr. 62 Parametre pre spodnú stenu (D\_25\_S vs F\_25\_S) 0,25 mm

### 7.3 Zhrnutie hodnotenia parametrov drsnosti pre hrúbku vrstvy 0,25 mm

V tabuľke (Tab. 14) je vidieť zhrnutie vzájomného porovnania medzi tlačiarňami Fortus a Dimension na jednotlivých stenách. Porovnanie vychádza z hodnotenia lepšej výslednej nameranej hodnoty jednotlivých parametrov z hľadiska kvality povrchu. Pre výškové parametre drsnosti profilu Ra, Rq, Rz a pre dĺžkový parameter drsnosti profilu RSm je lepšia menšia hodnota, pre parameter materiálového podielu profilu drsnosti Rmr (c) je lepšia väčšia hodnota.

Tab. 14 Porovnanie parametrov drsnosti z hľadiska kvality povrchu pre hrúbku vrstvy 0,25 mm

| Parameter             | Vrchná stena |        | Bočná stena |        | Spodná stena |         |
|-----------------------|--------------|--------|-------------|--------|--------------|---------|
|                       | D            | F      | D           | F      | D            | F       |
| Ra [ $\mu\text{m}$ ]  | 14           | 20,63  | 20,32       | 18,14  | 6,3          | 3,96    |
| Rq [ $\mu\text{m}$ ]  | 19,53        | 25,93  | 24,55       | 21,34  | 8,61         | 5,62    |
| Rz [ $\mu\text{m}$ ]  | 86,65        | 95,85  | 87,2        | 73,95  | 46,83        | 18,41   |
| RSm [ $\mu\text{m}$ ] | 766,37       | 509,31 | 437,12      | 254,82 | 559,7        | 1028,21 |
| Rmr (c) [%]           | 71,93        | 66,54  | 53,8        | 59     | 51,16        | 39,82   |
|                       | 4            | 1      | 0           | 5      | 2            | 3       |

Z výsledkov vzájomného porovnania medzi 3D tlačiarňami je zrejmé, že pre výškové parametre Ra, Rq, Rz sú z hľadiska kvality drsnosti povrchu namerané hodnoty lepšie (menšie) pre 3D tlačiareň Dimension na vrchnej stene a lepšie pre 3D tlačiareň Fortus na bočnej a spodnej stene. Percentuálne vyjadrené, sú hodnoty parametrov lepšie o 32,1 % pre Ra, 24,7 % pre Rq, 9,6 % pre Rz v prospech 3D tlačiarne Dimension na vrchnej stene. Na bočnej stene sú hodnoty lepšie v prospech 3D tlačiarne Fortus o 10,7 % pre Ra, 13% pre Rq, 15,2 % pre Rz a na spodnej stene lepšie v prospech 3D tlačiarne Fortus a to o 37,1 % pre Ra, 34,7 % pre Rq, 60,7% pre Rz.

Najmenšie hodnoty výškových parametrov Ra, Rq, Rz boli namerané na spodných stenách súčastok, pričom celkovo najmenšie výsledné hodnoty výškových parametrov boli na spodnej stene z 3D tlačiarne Fortus: Ra 3,96  $\mu\text{m}$ , Rq 5,62  $\mu\text{m}$ , Rz 18,41  $\mu\text{m}$ .

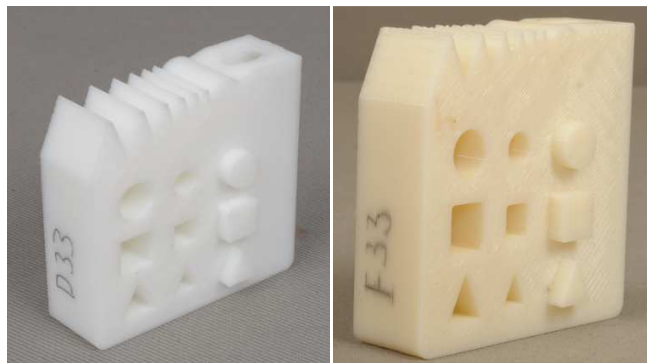
Pre dĺžkový parameter RSm vyplýva z porovnania výsledkov merania, že z hľadiska kvality drsnosti povrchu sú namerané hodnoty lepšie (menšie) pre 3D tlačiareň Fortus na

vrchnej a bočnej stene a lepšie pre 3D tlačiareň Dimension na spodnej stene. Pri percentuálnom vyjadrení sú hodnoty parametra RSm lepšie o 33,5 / 41,7 % v prospech 3D tlačiarne Fortus na vrchnej / bočnej stene a o 45,6 % lepšie v prospech 3D tlačiarne Dimension na spodnej stene. Najmenšie hodnoty dĺžkového parametra RSm boli namerané na bočných stenách súčiastok, pričom celkovo najmenšia výsledná hodnota parametra RSm bola na bočnej stene z 3D tlačiarne Fortus a to RSm 254,82  $\mu\text{m}$ .

Pre parameter materiálového podielu profilu drsnosti Rmr (c) je z porovnania výsledkov vidieť, že namerané hodnoty sú lepšie (väčšie) pre 3D tlačiareň Dimension na vrchnej a spodnej stene a lepšie pre tlačiareň Fortus na bočnej stene. Percentuálne vyjadrené sú hodnoty parametra Rmr (c) lepšie o 8,1 / 28,5 % v prospech 3D tlačiarne Dimension na vrchnej / spodnej stene a o 9,7 % lepšie v prospech tlačiarne Fortus na bočnej stene. Najväčšie hodnoty parametra Rmr (c) boli namerané na vrchných stenách súčiastok, pričom celkovo najväčšia výsledná hodnota parametra RSm bola na vrchnej stene z 3D tlačiarne Dimension a to Rmr (c) 71,93 %.

#### **7.4 Hodnotenie parametrov drsnosti pre súčiastky z 3D tlače s hrúbkou 0,33 mm**

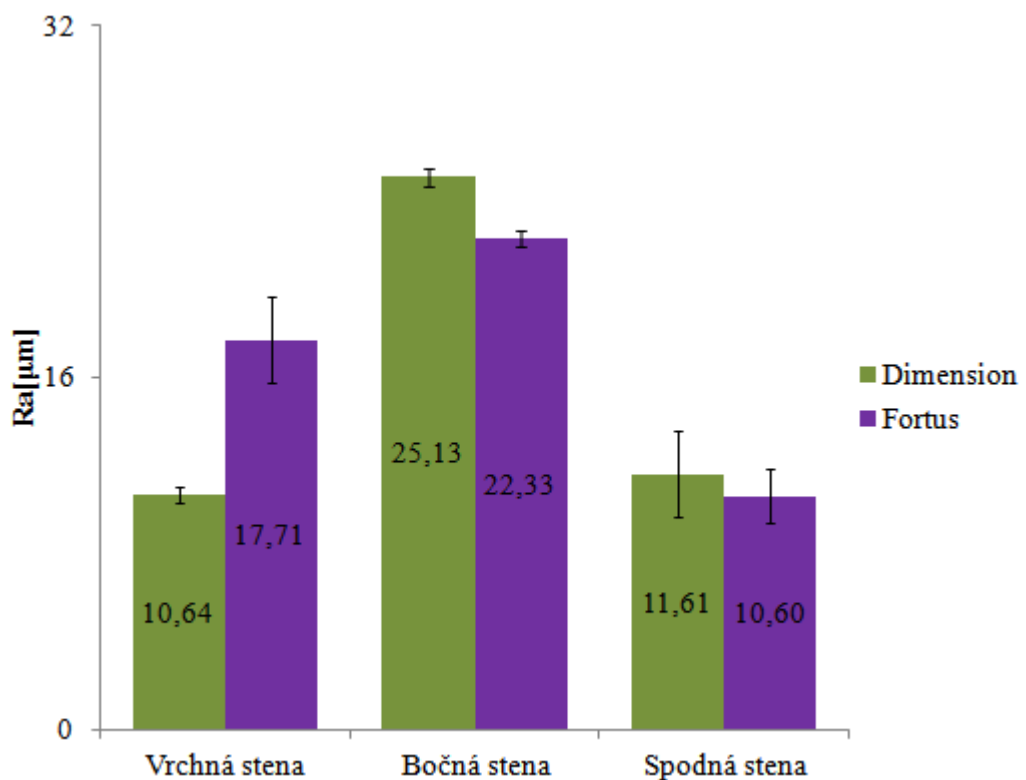
Ďalej budem porovnávať súčiastky z tlačiarne Dimension a Fortus vytlačené s hrúbkou vrstvy 0,33 mm, ukážka je na obrázku (Obr. 63).



Obr. 63 Súčiastky s hrúbkou vrstvy 0,33 mm

#### 7.4.1 Parameter Ra na stenách súčiastok D\_33 a F\_33

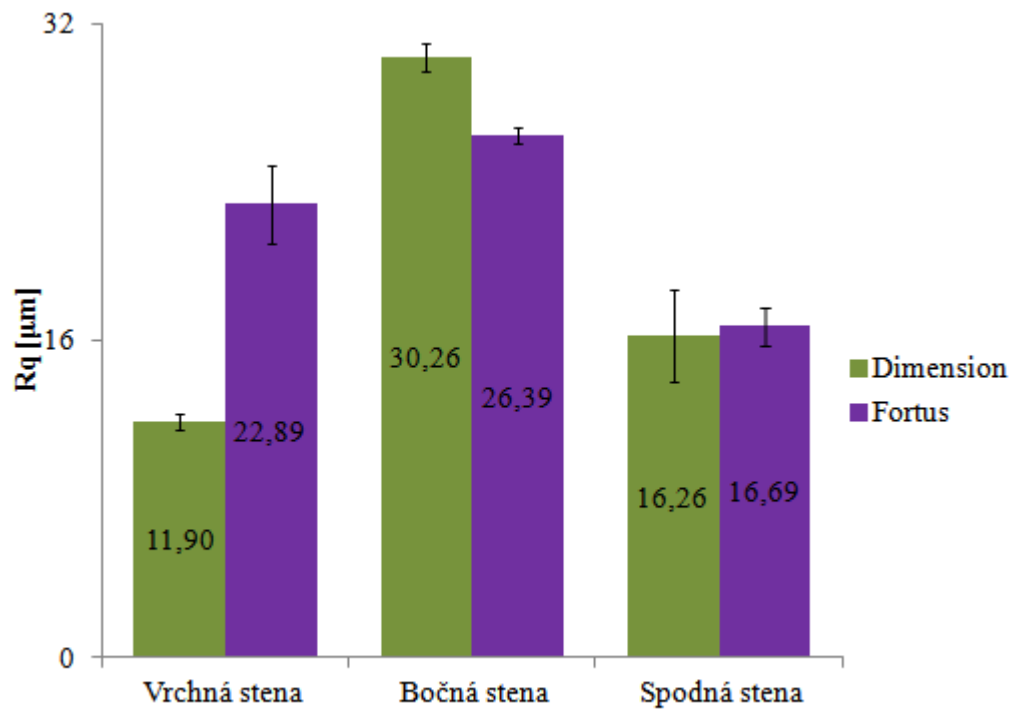
Ako vyplýva z grafického znázornenia na (Obr. 64), parameter Ra pri hrúbke vrstvy 0,33 mm dosiahol najmenšiu hodnotu 10,60  $\mu\text{m}$  na spodnej stene súčiastky z 3D tlačiarne Fortus (F\_33\_S), no pri zohľadnení nepresnosti merania je zrovnateľná s výslednou hodnotou 10,64  $\mu\text{m}$ , nameranou na vrchnej stene súčiastky z 3D tlačiarne Dimension (D\_33\_V). Najväčšiu nameranú hodnotu 25,13  $\mu\text{m}$  dosiahol na bočnej stene súčiastky z 3D tlačiarne Dimension (D\_33\_B).



Obr. 64 Parameter Ra pre hrúbku vrstvy 0,33mm

#### 7.4.2 Parameter Rq na stenách súčiastok D\_33 a F\_33

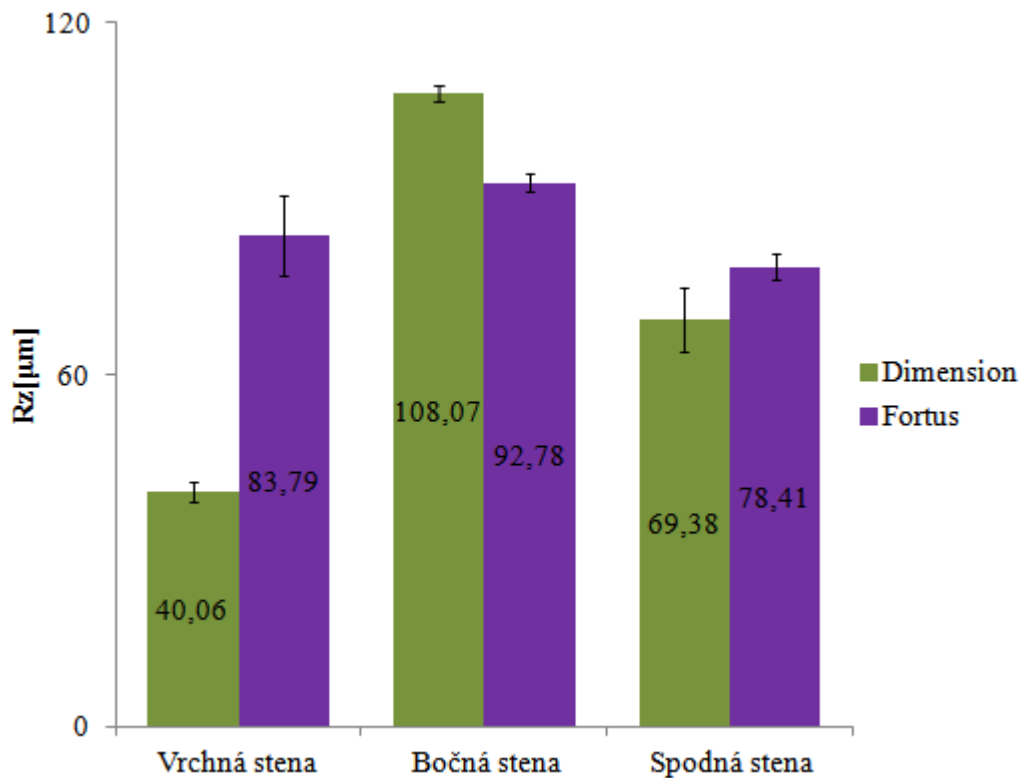
Výsledky merania sú graficky znázornené na obrázku (Obr. 65), pričom parameter Rq pri hrúbke vrstvy 0,33 mm dosiahol najmenšiu hodnotu 11,90  $\mu\text{m}$  na vrchnej stene súčiastky z 3D tlačiarne Dimension (D\_33\_V) a najväčšiu hodnotu 30,26  $\mu\text{m}$  na bočnej stene súčiastky z 3D tlačiarne Dimension (D\_33\_B). Pri konkrétnom meraní sme potvrdili, že parameter Rq udáva vyššie hodnoty ako Ra.



Obr. 65 Parameter Rq pre hrúbku vrstvy 0,33mm

### 7.4.3 Parameter Rz na stenách súčiastok D\_33 a F\_33

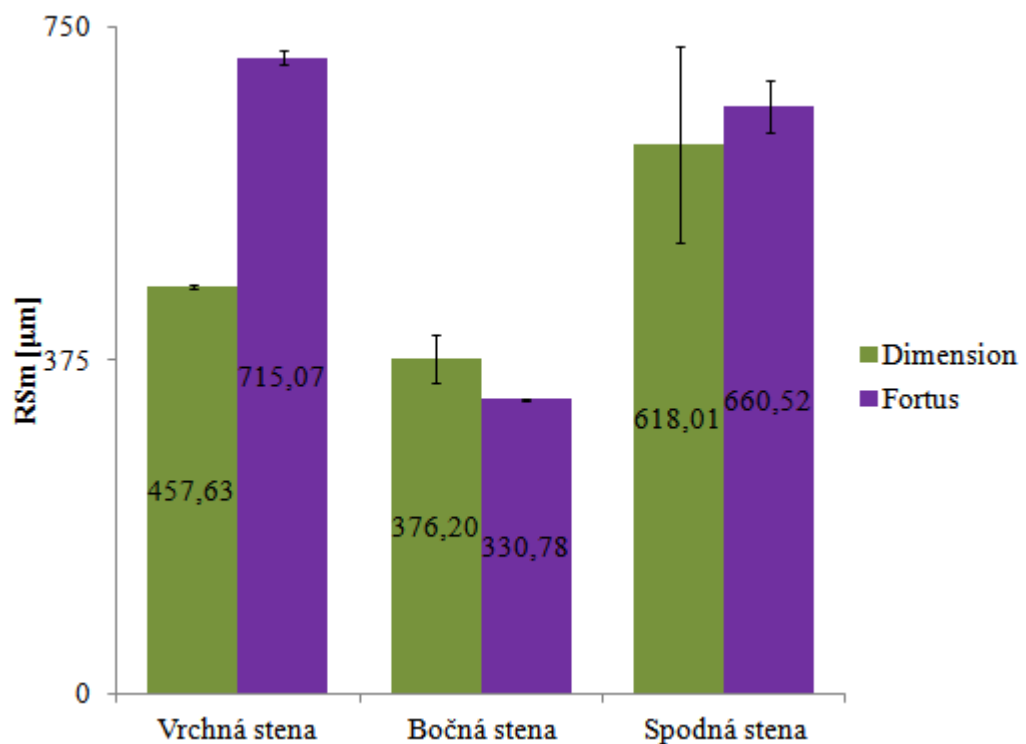
Graficky vyjadrené výsledky merania na obrázku (Obr. 66) ukazujú, že parameter Rz pri hrúbke vrstvy 0,33 mm dosiahol najmenšiu hodnotu 40,06  $\mu\text{m}$  na vrchnej stene súčiastky z 3D tlačiarne Dimension (D\_33\_V) a najväčšiu hodnotu 108,07  $\mu\text{m}$  na bočnej stene súčiastky z 3D tlačiarne Dimension (D\_33\_B).



Obr. 66 Parameter Rz pre hrúbku vrstvy 0,33mm

#### 7.4.4 Parameter RSm na stenách súčiastok D\_33 a F\_33

Ako je vidieť z grafického znázornenia na obrázku (Obr. 67) parameter RSm pri hrúbke vrstvy 0,33 mm dosiahol najmenšiu hodnotu 330,78  $\mu\text{m}$  na bočnej stene súčiastky z 3D tlačiarne Fortus (F\_33\_B) a najväčšiu hodnotu 715,07  $\mu\text{m}$  na vrchnej stene súčiastky z 3D tlačiarne Fortus (F\_33\_V).

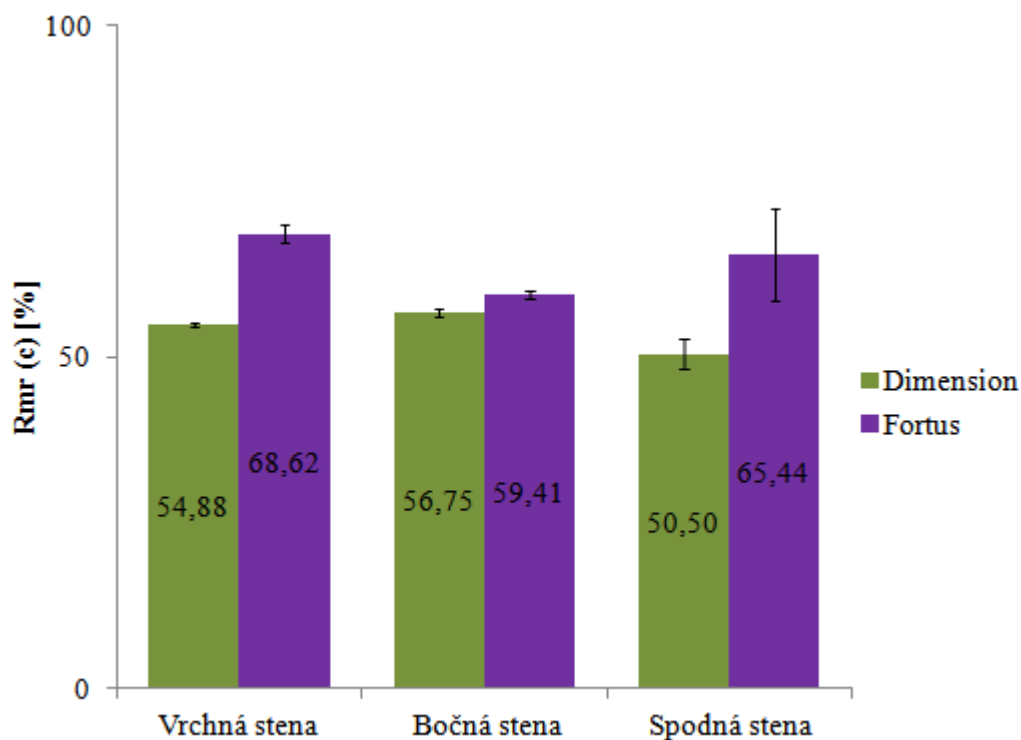


Obr. 67 Parameter RSm pre hrúbku vrstvy 0,33mm



#### 7.4.5 Parameter Rmr na stenách súčiastok D\_33 a F\_33

Výsledok merania na obrázku (Obr. 68) poukazuje, že parameter Rmr (c) pri hrúbke vrstvy 0,33 mm dosiahol najmenšiu hodnotu 50,50 % na spodnej stene súčiastky z 3D tlačiarne Dimension (D\_33\_S) a najväčšiu hodnotu 68,62 % na vrchnej stene súčiastky z 3D tlačiarne Fortus (F\_33\_V).



Obr. 68 Parameter Rmr (c) pre hrúbku vrstvy 0,33mm

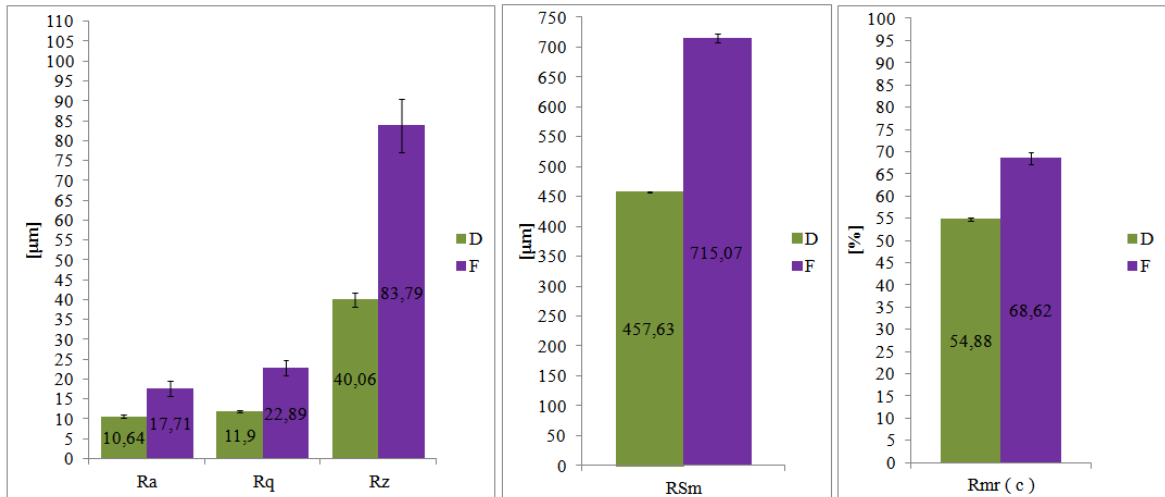
### 7.5 Vyhodnotenie výsledkov meraní na jednotlivých stenách medzi súčiastkami s hrúbkou vrstvy 0,33 mm

Parametre drsnosti budú vyhodnotené pre steny vrchnú, bočnú, spodnú podľa tabuľky (Tab. 13).

#### 7.5.1 Porovnanie parametrov na vrchnej stene D\_33\_V vs F\_33\_V

Na obrázku (Obr. 69) sú zobrazené výsledky merania pre parametre Ra, Rq, Rz, RSm a Rmr (c) merané na vrchnej stene. Pri meraní výškových parametrov drsnosti povrchu Ra, Rq, Rz boli na vrchnej stene namerané menšie hodnoty parametrov na súčiastke vytlačenej na 3D tlačiarne Dimension (D\_33\_V), parameter Ra je menší o 40%, parameter Rq je menší o 48%, parameter Rz je menší o 52,2%. Aj pre dĺžkový parameter RSm bola

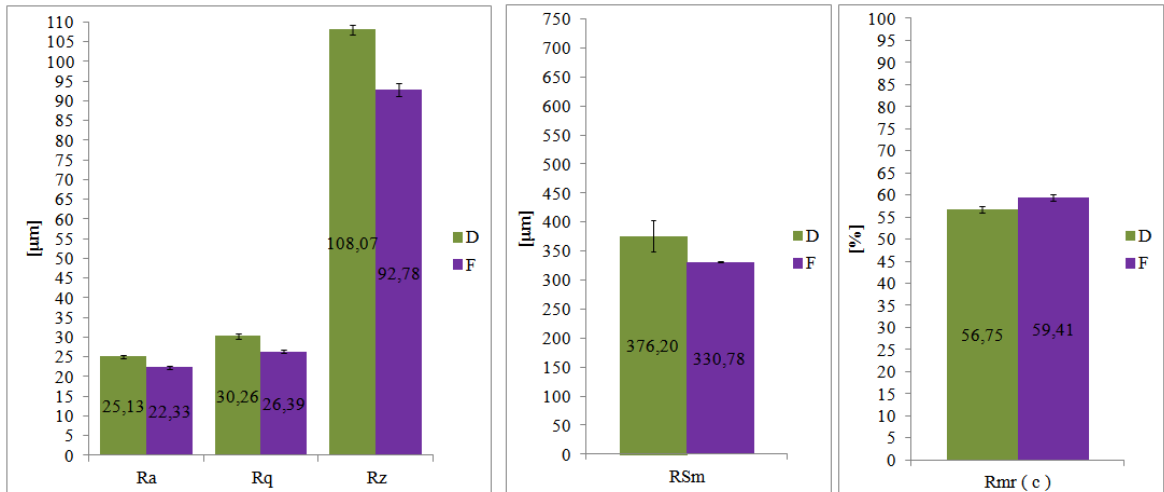
nameraná menšia hodnota na Dimension (D\_33\_V), parameter RSm je menší o 36%. Nameraná hodnota parametra materiálového podielu profilu drsnosti Rmr (c) je väčšia na súčiastke vytlačenej na 3D tlačiarňi Fortus (F\_33\_V), parameter Rmr (c) je väčší o 25%.



Obr. 69 Parametre pre vrchnú stenu (D\_33\_V vs F\_33\_V) 0,33mm

### 7.5.2 Porovnanie parametrov na bočnej stene D\_33\_B vs F\_33\_B

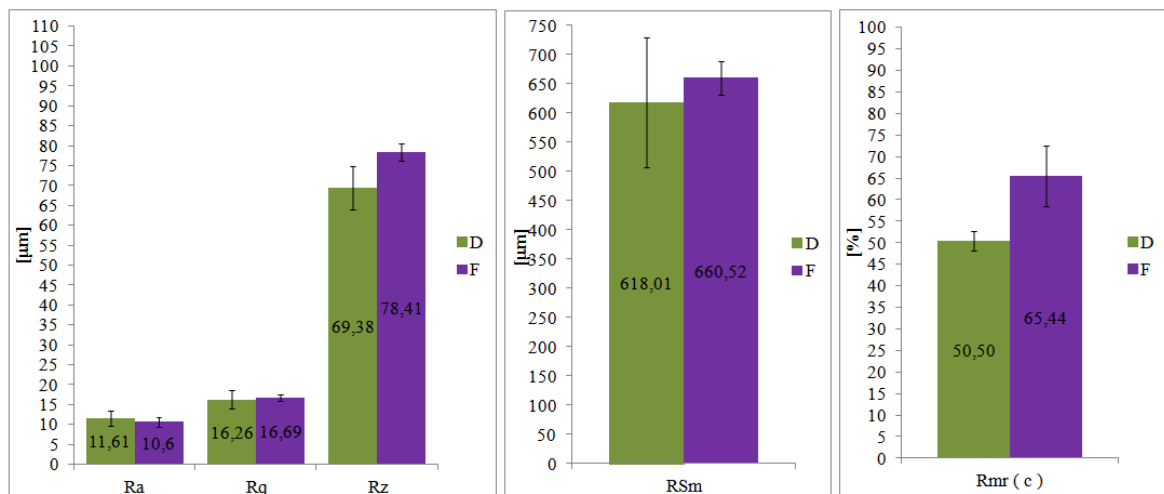
Na obrázku (Obr. 70) sú zobrazené výsledky merania pre parametre Ra, Rq, Rz, RSm a Rmr (c) merané na bočnej stene. Pri meraní výškových parametrov drsnosti povrchu Ra, Rq, Rz boli na bočnej stene namerané menšie hodnoty parametrov na súčiastke vytlačenej na 3D tlačiarňi Fortus (F\_33\_B), parameter Ra je menší o 11,1%, parameter Rq je menší o 12,8%, parameter Rz je menší o 14,1%. Pre dĺžkový parameter RSm bola nameraná menšia hodnota na súčiastke vytlačenej na 3D tlačiarňi Fortus (F\_33\_B), parameter RSm je menší o 12,1%. Nameraná hodnota parametra materiálového podielu profilu drsnosti Rmr (c) je väčšia na súčiastke vytlačenej na 3D tlačiarňi Fortus (F\_33\_B), parameter Rmr (c) je väčší o 4,7%.



Obr. 70 Parametre pre bočnú stenu (D\_33\_B vs F\_33\_B) 0,33 mm

### 7.5.3 Porovnanie parametrov na spodnej stene D\_33\_S vs F\_33\_S

Na obrázku (Obr. 71) sú zobrazené výsledky merania pre parametre Ra, Rq, Rz, RSm a Rmr (c) merané na spodnej stene. Pri meraní výškových parametrov drsnosti povrchu Rq, Rz, boli na spodnej stene namerané menšie hodnoty parametrov na súčiastke vytlačenej na 3D tlačiarňi Dimension (D\_33\_S), parameter Rq je menší o 2,6%, parameter Rz je menší o 11,5%. Nameraná hodnota parametra Ra je menšia na súčiastke vytlačenej na tlačiarňi Fortus o 8,7%. Pre dĺžkový parameter RSm bola nameraná menšia hodnota na súčiastke vytlačenej na 3D tlačiarňi Dimension (D\_33\_S), parameter RSm je menší o 6,4%. Nameraná hodnota parametra materiálového podielu profilu drsnosti Rmr (c) je väčšia na súčiastke vytlačenej na tlačiarňi Fortus (F\_33\_S), parameter Rmr (c) je väčší o 29,6%.



Obr. 71 Parametre pre spodnú stenu (D\_33\_S vs F\_33\_S) 0,33 mm

## 7.6 Zhrnutie hodnotenia parametrov drsnosti pre hrúbku vrstvy 0,33 mm

V tabuľke (Tab. 15) je vidieť zhrnutie vzájomného porovnania medzi tlačiarňami Fortus a Dimension na jednotlivých stenách. Porovnanie vychádza z hodnotenia lepšej výslednej nameranej hodnoty jednotlivých parametrov z hľadiska kvality povrchu. Pre výškové parametre drsnosti profilu Ra, Rq, Rz a pre dĺžkový parameter drsnosti profilu RSm je lepšia menšia hodnota, pre parameter materiálového podielu profilu drsnosti Rmr (c) je lepšia väčšia hodnota.

Tab. 15 Porovnanie parametrov drsnosti z hľadiska kvality povrchu pre hrúbku vrstvy 0,33 mm

| Parameter             | Vrchná stena |        | Bočná stena |        | Spodná stena |        |
|-----------------------|--------------|--------|-------------|--------|--------------|--------|
|                       | D            | F      | D           | F      | D            | F      |
| Ra [ $\mu\text{m}$ ]  | 10,64        | 17,71  | 25,13       | 22,33  | 11,61        | 10,6   |
| Rq [ $\mu\text{m}$ ]  | 11,9         | 22,89  | 30,26       | 26,39  | 16,26        | 16,69  |
| Rz [ $\mu\text{m}$ ]  | 40,06        | 83,79  | 108,07      | 92,78  | 69,38        | 78,41  |
| RSm [ $\mu\text{m}$ ] | 457,63       | 715,07 | 376,2       | 330,78 | 618,01       | 660,52 |
| Rmr (c) [%]           | 54,88        | 68,62  | 56,75       | 59,41  | 50,5         | 65,44  |
|                       | 4            | 1      | 0           | 5      | 3            | 2      |

Z výsledkov vzájomného porovnania medzi 3D tlačiarňami je zrejmé pre parameter Ra sú namerané hodnoty lepšie (menšie) pre 3D tlačiareň Dimension na vrchnej stene a lepšie pre 3D tlačiareň Fortus na bočnej a spodnej stene. Percentuálne vyjadrené, sú hodnoty parametra Ra lepšie o 40 % v prospech 3D tlačiarne Dimension na vrchnej stene a lepšie o 11,1 / 8,7 % v prospech 3D tlačiarne Fortus na bočnej / spodnej stene.

Pre ďalšie výškové parametre Rq, Rz sú z hľadiska kvality drsnosti povrchu namerané hodnoty lepšie (menšie) pre 3D tlačiareň Dimension na vrchnej stene a spodnej stene a pre 3D tlačiareň Fortus lepšie na bočnej stene. Percentuálne vyjadrené, sú hodnoty parametrov lepšie o 48 % pre Rq, 52,2 % pre Rz v prospech 3D tlačiarne Dimension na vrchnej stene, lepšie o 12,8% pre Rq, 14,1 % pre Rz v prospech 3D tlačiarne Fortus na bočnej stene, a lepšie o 2,6 % pre Rq, 11,5% pre Rz v prospech 3D tlačiarne Dimension na spodnej stene. Celkovo najmenšie výsledné hodnoty výškových parametrov Ra, Rq, Rz boli na vrchnej stene z 3D tlačiarne Dimension a to Ra 10,64  $\mu\text{m}$ , Rq 11,90  $\mu\text{m}$ , Rz 40,06  $\mu\text{m}$ .

Pre dĺžkový parameter RSm vyplýva z porovnania výsledkov merania, že z hľadiska kvality drsnosti povrchu sú namerané hodnoty lepšie (menšie) pre 3D tlačiareň Fortus na bočnej stene a lepšie pre 3D tlačiareň Dimension na vrchnej a spodnej stene. Pri percentuálnom vyjadrení sú hodnoty parametra RSm lepšie o 12,1 % v prospech 3D tlačiarne Fortus na bočnej stene a lepšie o 36 / 6,4 % v prospech 3D tlačiarne Dimension na vrchnej / spodnej stene. Najmenšie hodnoty dĺžkového parametra RSm boli namerané na bočných stenách súčiastok, pričom celkovo najmenšia výsledná hodnota parametra RSm bola na bočnej stene z tlačiarne Fortus a to RSm 330,78  $\mu\text{m}$ .

Pre parameter materiálového podielu profilu drsnosti Rmr (c) je z porovnania výsledkov vidieť, že namerané hodnoty sú lepšie (väčšie) pre 3D tlačiareň Fortus na všetkých stenách. Percentuálne vyjadrené, sú hodnoty parametra Rmr (c) lepšie o 25 / 4,7 / 29,6 % v prospech 3D tlačiarne Fortus na vrchnej / bočnej / spodnej stene. Celkovo najväčšia výsledná hodnota parametra Rmr (c) bola na vrchnej stene súčiastky z 3D tlačiarne Fortus a to Rmr (c) 68,62 %.

## ZÁVER

Diplomová práca je rozdelená na dve časti. Teoretická časť, ktorá je rešeršom nazbieraných informácií o technológiách 3D tlače, zahŕňa poznatky o štruktúre povrchu, drsnosti a parametroch drsnosti. Ďalej sú popísané metódy snímania povrchu.

Cieľom tejto diplomovej práce bolo hodnotenie kvality povrchu súčiastok vyrobených 3D tlačou. Praktická časť vyhodnocuje hodnoty parametrov drsnosti, ktoré boli namerané pomocou dotykovej metódy na povrchoch navrhnutých súčiastok. Navrhnutý model súčiastky bol vytlačený dvoma 3D tlačiarňami Stratasys Fortus 900mc a Stratasys Dimension SST 768, pracujúcich na princípe technológie FDM. Pre účel hodnotenia boli vytlačené dve súčiastky na každej 3D tlačiarňi, dve súčiastky s nastavením hrúbky vlákna 0,25 mm a ďalšie dve súčiastky s nastavením hrúbky vlákna 0,33 mm. V princípe sa medzi sebou porovnali súčiastky s rovnakou hrúbkou vlákna. Pri porovnávaní boli zohľadnené aj rôzne typy povrchov, ktoré vznikli v dôsledku tlače.

Pre vytlačené súčiastky z 3D tlačiarňi Dimension a Fortus bolo zistené, že aj keď používajú rovnakú technológiu 3D tlače s rovnakou hrúbkou vlákna, z pohľadu kvality povrchu sú výsledky hodnôt pre vybrané parametre drsnosti rozdielne.

Z výsledných hodnôt parametrov drsnosti povrchu vieme pre súčiastky z 3D tlačiarňi s hrúbkou vlákna 0,25 mm konštatovať:

Pre vrchnú stenu – 3D tlačiareň Dimension je lepšia z pohľadu nameraných hodnôt pre výškové parametre a to pre Ra o 32,1 % , pre Rq o 24,7 % a pre Rz o 9,6 %. Lepšia je aj z pohľadu parametra materiálového podielu profilu drsnosti Rmr (c) o 8,1%. Z pohľadu dĺžkového parametra RSm je lepšia 3D tlačiareň Fortus a to o 33,5 %.

Pre bočnú stenu – z pohľadu všetkých vyhodnocovaných parametrov je lepšia 3D tlačiareň Fortus.

Pre spodnú stenu – z pohľadu výškových parametrov drsnosti je lepšia 3D tlačiareň Fortus a to o 37,1 % pre Ra, o 34,7 % pre Rq, o 60,7% pre Rz. 3D tlačiareň Dimension je lepšia z pohľadu parametra materiálového podielu profilu drsnosti Rmr (c) o 28,5 % a dĺžkového parametra RSm o 45,6 %.

Z výsledných hodnôt parametrov drsnosti povrchu vieme pre súčiastky z 3D tlačiarní s hrúbkou vlákna 0,33 mm konštatovať:

Pre vrchnú stenu – 3D tlačiareň Dimension je lepšia z pohľadu výškových parametrov drsnosti, pre Ra o 40 %, pre Rq o 48 %, pre Rz o 52,2 % a takisto z pohľadu dĺžkového parametra RSm o 36 %. Z pohľadu parametra materiálového podielu profilu drsnosti Rmr (c) je lepšia 3D tlačiareň Fortus o 25%.

Pre bočnú stenu – z pohľadu všetkých vyhodnocovaných parametrov je lepšia 3D tlačiareň Fortus.

Pre spodnú stenu – z pohľadu výškového parametra Ra je lepšia 3D tlačiareň Fortus o 8,7%. Pre parametre Rq a Rz je lepšia 3D tlačiareň Dimension a to o 2,6 % pre Rq a 11,5% pre Rz. Pre dĺžkový parameter RSm je lepšia 3D tlačiareň Dimension o 6,4 % a pre parameter Rmr (c) je lepšia 3D tlačiareň Fortus o 29,6 %.

Zaujímavý výsledok je medzi súčiastkami vyrobenými rôznymi hrúbkami vlákien. Toto zistenie sa týka výsledných hodnôt výškových parametrov Ra, Rq, Rz na vrchných stenách. Výsledné hodnoty boli menšie na súčiastkach vyrobených s hrúbkou vrstvy 0,33 mm a to pre obe tlačiarne. Tento výsledok je otázkou pre ďalšie meranie, rovnako ako ďalšie skúmanie rôznych typov povrchov vzniknutých pri 3D tlači.

**ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY**

- [1] BARNATT, CH.: 3D Printing: The Next Industrial Revolution, United Kingdom: Crea Space Independent Publishing Platform, 2013. ISBN: 9781484181768.
- [2] 3D Systems. Rapid Prototyping [online]. 2015 [cit. 2015-01-25]. Dostupné z: <http://www.3dsystems.com/>
- [3] CHUA, C. K., LEONG, K. F., LIM, C. S: Rapid Prototyping: Principles and Applications. World Scientific Publishing. USA: World Scientific Publishing, 2010. ISBN 9812778977.
- [4] 3D Printing Industry. 3D Printing Basics [online]. 2014 [cit. 2015-01-25]. Dostupné z: <http://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/>
- [5] BARNATT, CH.: 3D Printing: Second Edition. United Kingdom: Explaining Computers, 2014. ISBN 978-1502879790.
- [6] PROCHÁZKA, Juraj. 3D tlač a tlačiarne - tvrdá virtuálna realita. ČASOPIS TECHBOX [online]. 2012, 11-12 [cit. 2015-01-25]. DOI: 1338-1210. Dostupné z: <http://www.techbox.sk/temy/c6299/3d-tlac-a-tlaciarne-tvrda-virtualna-realita.html>
- [7] GIBSON, I., ROSEN, D, STUCKER B.: Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. Springer. USA, 2014. ISBN: 978149392112-6.
- [8] Interné dokumenty Johnson Controls.
- [9] RYBA, ALBERT. Nové materiály sľubujú žiarivú budúcnosť 3D tlače. 2013, č. 8. DOI: 1335-0226. Dostupné z: <http://www.itnews.sk/spravy/technologie/2013-08-21/c158256-nove-materialy-slubuju-ziarivu-buducnost-3d-tlace>
- [10] QIAN, M. New Zealand leads the way in Titanium Additive Manufacturing. Metal Additive Manufacturing. 2014, č. 5. Dostupné z: <http://www.metal-am.com/articles/002735.html#sthash.H9cOL3xu.dpuf>
- [11] MANN, Geoff. 3D Agents: Agents of the 3D Revolution. Design in daba [online]. 2013 [cit. 2015-01-25]. Dostupné z: <http://www.designindaba.com/articles/creative-work/3d-agents>
- [12] STRATASYS LTD. [online]. 2015 [cit. 2015-01-25]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/>



- [13] NEWMAN, John. RAPID READY. Standardizing Additive Manufacturing Process Terminology [online]. Peerless Media, 2012 [cit. 2015-01-25]. Dostupné z: <http://www.rapidreadytech.com/2012/06/the-art-of-simplicity-standardized-process-terminology/>
- [14] ŘASA, J a Z KEREČANINOVÁ. Nekonvenční metody obrábění. Rapid Prototyping. Nekonvenční technologie. 2008, č. 9.
- [15] University of Twente. Design, Production & Management: Overview of major RP Processes [online]. 2013 [cit. 2015-03-19]. Dostupné z: [http://www.utwente.nl/ctw/opm/research/design\\_engineering/rm/RM%20processes/](http://www.utwente.nl/ctw/opm/research/design_engineering/rm/RM%20processes/)
- [16] EXONE [online]. 2015 [cit. 2015-01-25]. Dostupné z: <http://exone.com/>
- [17] D-SHAPE [online]. 2015 [cit. 2015-01-25]. Dostupné z: <http://www.d-shape.com/>
- [18] Helysis [online]. 2015 [cit. 2015-01-25]. Dostupné z: <http://www.helysis.com/>
- [19] MCOR TECHNOLOGIES. 3D Printing and Rapid Prototyping [online]. 2013 [cit. 2015-01-25]. Dostupné z: <http://mcortechnologies.com/>
- [20] OPTOMECH. Production Grade 3D Printing [online]. 2014 [cit. 2015-01-25]. Dostupné z: <http://www.optomech.com/3d-printed-metals/lens-technology/>
- [21] WINKLESS, Laurie. Reinforced 3D printing for biomedical applications: Overview And Opportunities. Materials Today [online]. 2015, vol. 18, issue 1 [cit. 2015-03-19]. DOI: 10.1002/9781119041337.ch8. Dostupné z: <http://www.meddeviceonline.com/doc/d-printing-in-biomedical-applications-overview-and-opportunities-0001>
- [22] PERNIKÁŘ, Jiří, Miroslav TYKAL a Josef VAČKÁŘ. Jakost' a metrológie: Metrológie. Brno: Akademické nakladatel'stvo CERM, s. r. o., 2001. ISBN 80-214-1997-0.
- [23] ČSN EN ISO 4287. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu. 1999.
- [24] ČSN EN ISO 4288. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu. 1999.

- [25] Drsnost povrchu dle DIN EN ISO. JENOPTIK [online]. 2013 [cit. 2015-04-11]. Dostupné z: <http://www.hommel-etamic.cz/cz/technicke-informace/drsnost-povrchu-dle-din-en-iso/>
- [26] PEŠIČKA, Ladislav. Geometrická specifikace výrobků strojírenské výroby (GPS). Praha: ČNI, 2006. 49 s.
- [27] NOVÁK, Z. Zvýšení kvality hodnocení textury povrchu. Metrologie/ kontrola jakosti [online]. 2011, č. 11 [cit. 2015-04-11]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/zvyseni-kvality-hodnoceni-textury-povrchu.html>
- [28] PATA, V.: Měření jakosti povrchu [online]. [cit. 2015-03-02]. Dostupné z: [http://uvp3d.cz/drtic/?page\\_id=1985](http://uvp3d.cz/drtic/?page_id=1985)
- [29] NOVÁK, Z. Prostorové měření a hodnocení textury povrchu přístroji Taylor Hobson [online]. 2006. [cit.2015-04-11] Dostupné z: [http://gps.fmw.vutbr.cz/STAH\\_INFO/2\\_NOVAK\\_3D\\_mereni\\_textury.pdf](http://gps.fmw.vutbr.cz/STAH_INFO/2_NOVAK_3D_mereni_textury.pdf)

**ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK**

|                 |                                           |
|-----------------|-------------------------------------------|
| 2D              | Dvojmerný                                 |
| 3D              | Trojmerný                                 |
| ABS             | Akrylonitrilbutadiénstyrén                |
| AM              | Aditívna výroba                           |
| ASTM/ISO        | Medzinárodná organizácia pre normalizáciu |
| Atď             | A tak ďalej                               |
| CAD             | Počítačový softvér Computer-aided design  |
| CJP             | ColorJet Printing                         |
| CLA             | Chromatic Lenght Aberration               |
| CO <sub>2</sub> | Oxid uhličitéy                            |
| DMLS            | Direct Metal Laser Sintering              |
| EBM             | Electron Beam Melting                     |
| FDM             | Fused Deposition Modeling                 |
| FFF             | Fused Filament Fabrication                |
| LENS            | Directed Energy Deposition                |
| LOM             | Laminated Object Manufacturing            |
| LPD             | Laser Powder Deposition                   |
| LPF             | Laser Powder Forming                      |
| LS              | Laser Sintering                           |
| MJP             | MultiJet Printing                         |
| mm              | milimeter                                 |
| Napr.           | Napríklad                                 |
| PC              | Polykarbonát                              |
| PJP             | Plastic Jet Printing                      |

---

|      |                                 |
|------|---------------------------------|
| PJP  | Plastic Jet Printing            |
| PLA  | Polylactic acid                 |
| Pod. | podobne                         |
| RP   | Rýchle Prototypovanie           |
| SDL  | Selective Deposition Lamination |
| SHS  | Selective Heat Sintering        |
| SLA  | Stereolithography               |
| SLM  | Selective Laser Melting         |
| SLS  | Selective Laser Sintering       |
| STL  | Standard Triangulation Language |
| t.j. | To jest                         |
| tvz. | Tak povediac                    |
| UV   | Ultrafialové žiarenie           |
| µm   | mikrometer                      |

**ZOZNAM OBRÁZKOV**

|                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obr. 1 Prvá 3D tlačiareň [2].....                                                            | 13 |
| Obr. 2 Vývoj 3D tlače [4] .....                                                              | 14 |
| Obr. 3 Princíp 3D tlače [4].....                                                             | 15 |
| Obr. 4 Proces zhotovenia výrobku [7] .....                                                   | 16 |
| Obr. 5 Model otváracej páčky v interiéri auta [8].....                                       | 17 |
| Obr. 6 Titánový nôž [10] .....                                                               | 17 |
| Obr. 7 Keramická čajová dóza [11] .....                                                      | 18 |
| Obr. 8 Model zubov [12] .....                                                                | 18 |
| Obr. 9 Metóda výroby spôsobom FDM [15] .....                                                 | 20 |
| Obr. 10 Metóda výroby spôsobom SLA [15] .....                                                | 21 |
| Obr. 11 Metóda výroby spôsobom PolyJet [15] .....                                            | 22 |
| Obr. 12 Metóda výroby spôsobom Binder Jetting [15] .....                                     | 23 |
| Obr. 13 Metóda výroby spôsobom SLS [15].....                                                 | 24 |
| Obr. 14 Metóda výroby spôsobom LOM [15].....                                                 | 25 |
| Obr. 15 Metóda výroby spôsobom LENS [15].....                                                | 25 |
| Obr. 16 Priemyselné rozdelenie AM v roku 2013 [21] .....                                     | 26 |
| Obr. 17 Profily a parametre P,W a R [25] .....                                               | 29 |
| Obr. 18 Prvok profilu [23] .....                                                             | 29 |
| Obr. 19 Miestny sklon [23].....                                                              | 30 |
| Obr. 20 Materiálová dĺžka [23].....                                                          | 30 |
| Obr. 21 Stredná čiara [26].....                                                              | 31 |
| Obr. 22 Dĺžky pri meraní [26] .....                                                          | 31 |
| Obr. 23 Príklad profilu drsnosti povrchu s vyznačením parametrov $R_p$ , $R_v$ , $R_z$ ..... | 32 |
| Obr. 24 Priemerná výška prvku profilu $R_c$ [23] .....                                       | 32 |
| Obr. 25 Celková výška profilu $R_t$ [25] .....                                               | 33 |
| Obr. 26 Parameter $R_a$ [25].....                                                            | 33 |
| Obr. 27 Parameter $R_{sk}$ [25] .....                                                        | 34 |
| Obr. 28 Parameter $R_{ku}$ [25].....                                                         | 34 |
| Obr. 29 Šírka prvkov profilov $R_{Sm}$ [25].....                                             | 35 |
| Obr. 30 Materiálový podiel profilu drsnosti [25] .....                                       | 36 |
| Obr. 31 Rozdiel výšky úseku profilu $R_{dc}$ [23] .....                                      | 36 |
| Obr. 32 Empirické rozdelenie výšok profilu [23].....                                         | 37 |

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obr. 33 Schéma kontaktného snímania povrchu [28].....                           | 38 |
| Obr. 34 Schéma indukčného systému merania povrchu kontaktným spôsobom [28]..... | 39 |
| Obr. 35 Popis základných rozmerov modelu.....                                   | 42 |
| Obr. 36 Dimension SST 768 [12] .....                                            | 42 |
| Obr. 37 Fortus 900mc [12] .....                                                 | 43 |
| Obr. 38 Princíp kladenia materiálu pri FDM technológii [12] .....               | 44 |
| Obr. 39 Poloha súčiastky pri tlači.....                                         | 45 |
| Obr. 40 Smer rastrovej výplne medzi vrstvami nasledujúcimi.....                 | 45 |
| Obr. 41 Prehľad parametrov 3D tlače.....                                        | 46 |
| Obr. 42 Vytlačené súčiastky .....                                               | 46 |
| Obr. 43 Typy povrchov súčiastky pre meranie.....                                | 48 |
| Obr. 44 Smer merania.....                                                       | 49 |
| Obr. 45 Určenie oblasti a smer dráhy merania pre vrchnú stenu.....              | 50 |
| Obr. 46 Určenie oblasti a smer dráhy merania pre bočnú stenu.....               | 50 |
| Obr. 47 Určenie oblasti a smer dráhy merania pre spodnú stenu .....             | 51 |
| Obr. 48 Meranie súčiastky .....                                                 | 51 |
| Obr. 49 Krivka profilu drsnosti na povrchu súčiastky D_25_B .....               | 52 |
| Obr. 50 Krabicový graf pre hodnoty parametra Ra na povrchu D_25_V.....          | 53 |
| Obr. 51 Anderson – Darling test parametra Ra na vrchnej stene .....             | 54 |
| Obr. 52 F-test parametra Ra na vrchnej stene F_33_V a D_33_V .....              | 56 |
| Obr. 53 Výsledok T-testu pre parameter Ra súčiastok F_25_V a D_25_V .....       | 58 |
| Obr. 54 Súčiastky s hrúbkou vrstvy 0,25 mm.....                                 | 59 |
| Obr. 55 Parameter Ra pre hrúbku vrstvy 0,25mm.....                              | 60 |
| Obr. 56 Parameter Rq pre hrúbku vrstvy 0,25mm.....                              | 61 |
| Obr. 57 Parameter Rz pre hrúbku vrstvy 0,25mm.....                              | 62 |
| Obr. 58 Parameter RSm pre hrúbku vrstvy 0,25mm .....                            | 63 |
| Obr. 59 Parameter Rmr (c) pre hrúbku vrstvy 0,25 mm.....                        | 64 |
| Obr. 60 Parametre pre vrchnú stenu (D_25_V vs F_25_V) 0,25 mm.....              | 65 |
| Obr. 61 Parametre pre bočnú stenu (D_25_B vs F_25_B) 0,25 mm.....               | 66 |
| Obr. 62 Parametre pre spodnú stenu (D_25_S vs F_25_S) 0,25 mm.....              | 66 |
| Obr. 63 Súčiastky s hrúbkou vrstvy 0,33 mm.....                                 | 68 |
| Obr. 64 Parameter Ra pre hrúbku vrstvy 0,33mm.....                              | 69 |
| Obr. 65 Parameter Rq pre hrúbku vrstvy 0,33mm.....                              | 70 |

---

|                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------|----|
| Obr. 66 Parameter Rz pre hrúbku vrstvy 0,33mm.....                 | 71 |
| Obr. 67 Parameter RSm pre hrúbku vrstvy 0,33mm .....               | 72 |
| Obr. 68 Parameter Rmr (c) pre hrúbku vrstvy 0,33mm.....            | 73 |
| Obr. 69 Parametre pre vrchnú stenu (D_33_V vs F_33_V) 0,33mm.....  | 74 |
| Obr. 70 Parametre pre bočnú stenu (D_33_B vs F_33_B) 0,33 mm.....  | 75 |
| Obr. 71 Parametre pre spodnú stenu (D_33_S vs F_33_S) 0,33 mm..... | 75 |

**ZOZNAM TABULIEK**

|                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tab. 1 Aplikácia technológií AM [1].....                                                             | 19 |
| Tab. 2 Základné špecifikácie tlačiarne Dimension SST 768 .....                                       | 43 |
| Tab. 3 Základné špecifikácie tlačiarne Fortus 900mc .....                                            | 43 |
| Tab. 4 Parametre 3D tlačiarní .....                                                                  | 46 |
| Tab. 5 Princíp označovania meraných plôch .....                                                      | 49 |
| Tab. 6 Výsledky nameraných hodnôt parametrov Ra, Rq, Rz, RSm a Rmr (c) pre<br>D_25_V a F_25_V .....  | 54 |
| Tab. 7 Výsledky Anderson - Darlingovho testu pre parametre povrchu D_25_V,<br>F_25_V .....           | 55 |
| Tab. 8 Výsledky Anderson - Darlingovho testu pre parametre povrchu D_33_V,<br>F_33_V .....           | 55 |
| Tab. 9 Princíp porovnávania nameraných hodnôt parametrov .....                                       | 56 |
| Tab. 10 Výsledky F-testu súčastok F_25_V a D_25_V .....                                              | 57 |
| Tab. 11 Výsledky F-testu súčastok F_33_V a D_33_V .....                                              | 57 |
| Tab. 12 Výsledky T-testu pre parametre súčastok F_25_V a D_25_V .....                                | 58 |
| Tab. 13 Princíp porovnávania súčastok 3D tlačiarní .....                                             | 59 |
| Tab. 14 Porovnanie parametrov drsnosti z hľadiska kvality povrchu pre hrúbku<br>vrstvy 0,25 mm ..... | 67 |
| Tab. 15 Porovnanie parametrov drsnosti z hľadiska kvality povrchu pre hrúbku<br>vrstvy 0,33 mm ..... | 76 |



## ZOZNAM PRÍLOH

- PI Hodnoty merania
- PII Výsledky podľa Anderson – Darlingovho testu
- PIII Výsledky F-testu
- PIV Výsledky T-testu

## PRÍLOHA P I: HODNOTY MERANIA

| HRÚBKA VRSTVY 0,25 mm |       |                      |       |                      |       |                      |        |                       |         |               |       |
|-----------------------|-------|----------------------|-------|----------------------|-------|----------------------|--------|-----------------------|---------|---------------|-------|
| Parameter             |       | Ra [ $\mu\text{m}$ ] |       | Rq [ $\mu\text{m}$ ] |       | Rz [ $\mu\text{m}$ ] |        | RSm [ $\mu\text{m}$ ] |         | Rmr ( c ) [%] |       |
| Stena                 | č. m. | D                    | F     | D                    | F     | D                    | F      | D                     | F       | D             | F     |
| VRCHNÁ                | 1     | 14,22                | 22,30 | 19,72                | 28,35 | 90,76                | 106,10 | 780,35                | 508,03  | 70,72         | 67,51 |
|                       | 2     | 14,93                | 20,02 | 19,30                | 26,26 | 85,23                | 103,84 | 771,08                | 511,67  | 73,18         | 67,84 |
|                       | 3     | 13,70                | 20,78 | 20,22                | 25,77 | 90,74                | 96,22  | 767,97                | 509,74  | 72,11         | 65,61 |
|                       | 4     | 12,99                | 22,40 | 19,77                | 28,55 | 86,43                | 107,22 | 771,44                | 509,30  | 72,82         | 67,23 |
|                       | 5     | 15,16                | 21,83 | 19,72                | 26,57 | 83,80                | 94,02  | 770,27                | 507,50  | 70,34         | 65,32 |
|                       | 6     | 14,08                | 19,52 | 18,72                | 23,72 | 86,16                | 79,68  | 760,35                | 510,49  | 71,21         | 66,23 |
|                       | 7     | 14,30                | 21,29 | 18,96                | 26,48 | 85,92                | 96,47  | 757,70                | 507,90  | 73,93         | 66,69 |
|                       | 8     | 13,31                | 19,48 | 18,97                | 24,57 | 90,63                | 90,73  | 756,80                | 511,70  | 71,34         | 66,89 |
|                       | 9     | 13,50                | 18,97 | 19,29                | 23,16 | 82,61                | 80,44  | 757,38                | 508,09  | 70,43         | 65,67 |
|                       | 10    | 13,76                | 19,71 | 20,65                | 25,85 | 84,18                | 103,76 | 770,40                | 508,63  | 73,24         | 66,39 |
| Priemer               |       | 14,00                | 20,63 | 19,53                | 25,93 | 86,65                | 95,85  | 766,37                | 509,31  | 71,93         | 66,54 |
| Výberová s.o.         |       | 0,69                 | 1,26  | 0,60                 | 1,76  | 3,03                 | 9,94   | 7,90                  | 1,55    | 1,30          | 0,85  |
| Parameter             |       | Ra [ $\mu\text{m}$ ] |       | Rq [ $\mu\text{m}$ ] |       | Rz [ $\mu\text{m}$ ] |        | RSm [ $\mu\text{m}$ ] |         | Rmr ( c ) [%] |       |
| Stena                 | č. m. | D                    | F     | D                    | F     | D                    | F      | D                     | F       | D             | F     |
| BOČNÁ                 | 1     | 20,61                | 18,08 | 24,81                | 21,09 | 87,43                | 73,01  | 435,25                | 254,91  | 52,28         | 58,31 |
|                       | 2     | 20,24                | 18,02 | 24,54                | 21,02 | 87,44                | 73,27  | 407,78                | 255,30  | 54,37         | 58,71 |
|                       | 3     | 20,35                | 17,69 | 24,83                | 21,00 | 86,90                | 72,37  | 384,33                | 254,85  | 53,83         | 59,17 |
|                       | 4     | 20,59                | 17,98 | 24,59                | 21,53 | 87,44                | 73,78  | 435,29                | 255,54  | 53,13         | 57,95 |
|                       | 5     | 20,35                | 18,44 | 24,13                | 21,16 | 87,33                | 75,34  | 435,25                | 255,35  | 55,79         | 58,52 |
|                       | 6     | 20,15                | 18,06 | 24,38                | 21,63 | 86,33                | 73,10  | 436,90                | 253,91  | 55,65         | 59,53 |
|                       | 7     | 20,18                | 18,51 | 24,52                | 21,48 | 87,18                | 75,50  | 437,25                | 254,28  | 54,98         | 58,63 |
|                       | 8     | 20,27                | 18,29 | 24,64                | 21,17 | 86,50                | 74,77  | 508,58                | 254,29  | 53,01         | 59,39 |
|                       | 9     | 20,42                | 17,95 | 24,49                | 21,60 | 87,50                | 73,55  | 479,95                | 254,49  | 53,18         | 60,49 |
|                       | 10    | 19,98                | 18,41 | 24,59                | 21,70 | 87,89                | 74,85  | 410,60                | 255,26  | 51,77         | 59,25 |
| Priemer               |       | 20,32                | 18,14 | 24,55                | 21,34 | 87,20                | 73,95  | 437,12                | 254,82  | 53,80         | 59,00 |
| Výberová s.o.         |       | 0,20                 | 0,26  | 0,20                 | 0,27  | 0,48                 | 1,08   | 35,44                 | 0,55    | 1,37          | 0,73  |
| Parameter             |       | Ra [ $\mu\text{m}$ ] |       | Rq [ $\mu\text{m}$ ] |       | Rz [ $\mu\text{m}$ ] |        | RSm [ $\mu\text{m}$ ] |         | Rmr ( c ) [%] |       |
| Stena                 | č. m. | D                    | F     | D                    | F     | D                    | F      | D                     | F       | D             | F     |
| SPODNÁ                | 1     | 6,69                 | 3,71  | 9,29                 | 4,86  | 50,83                | 13,51  | 601,08                | 844,97  | 60,11         | 33,85 |
|                       | 2     | 6,11                 | 2,78  | 8,83                 | 4,07  | 48,62                | 13,99  | 532,19                | 1131,23 | 49,39         | 34,29 |
|                       | 3     | 6,34                 | 3,59  | 9,00                 | 5,14  | 47,71                | 18,43  | 506,52                | 1125,74 | 53,67         | 42,34 |
|                       | 4     | 6,14                 | 4,09  | 8,57                 | 5,79  | 43,36                | 14,75  | 466,95                | 1097,93 | 49,59         | 38,59 |
|                       | 5     | 6,14                 | 3,45  | 8,25                 | 5,63  | 45,37                | 15,98  | 652,71                | 1285,64 | 53,87         | 40,28 |
|                       | 6     | 6,56                 | 3,26  | 9,05                 | 5,33  | 45,65                | 18,02  | 598,00                | 858,63  | 52,76         | 44,33 |
|                       | 7     | 5,31                 | 4,28  | 7,51                 | 6,81  | 43,19                | 28,56  | 639,99                | 1043,87 | 49,35         | 40,90 |
|                       | 8     | 6,31                 | 5,56  | 8,61                 | 6,02  | 50,07                | 20,72  | 546,46                | 1082,36 | 43,41         | 39,59 |
|                       | 9     | 6,45                 | 4,50  | 8,43                 | 5,88  | 50,70                | 18,77  | 603,06                | 910,43  | 54,06         | 40,52 |
|                       | 10    | 6,96                 | 4,34  | 8,55                 | 6,62  | 42,78                | 21,40  | 449,99                | 901,33  | 45,34         | 43,54 |
| Priemer               |       | 6,30                 | 3,96  | 8,61                 | 5,62  | 46,83                | 18,41  | 559,70                | 1028,21 | 51,16         | 39,82 |
| Výberová s.o.         |       | 0,44                 | 0,78  | 0,50                 | 0,81  | 3,17                 | 4,48   | 70,36                 | 144,04  | 4,80          | 3,50  |

| HRÚBKA VRSTVY 0,33 mm |       |         |       |         |       |         |       |          |        |               |       |
|-----------------------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|----------|--------|---------------|-------|
| Parameter             |       | Ra [µm] |       | Rq [µm] |       | Rz [µm] |       | RSm [µm] |        | Rmr ( c ) [%] |       |
| Stena                 | č. m. | D       | F     | D       | F     | D       | F     | D        | F      | D             | F     |
| VRCHNÁ                | 1     | 10,42   | 16,24 | 11,81   | 20,73 | 43,38   | 75,20 | 455,70   | 708,23 | 54,37         | 70,28 |
|                       | 2     | 11,16   | 15,67 | 12,48   | 21,47 | 40,00   | 78,47 | 455,96   | 725,97 | 54,77         | 68,27 |
|                       | 3     | 10,88   | 21,96 | 12,19   | 27,21 | 41,18   | 97,24 | 456,81   | 713,67 | 55,16         | 67,40 |
|                       | 4     | 10,82   | 18,85 | 12,01   | 23,45 | 41,69   | 80,93 | 457,59   | 719,92 | 55,03         | 69,05 |
|                       | 5     | 10,78   | 17,66 | 12,06   | 22,78 | 39,37   | 86,79 | 458,55   | 704,88 | 54,66         | 70,25 |
|                       | 6     | 10,81   | 16,30 | 12,04   | 21,82 | 39,22   | 84,44 | 456,94   | 709,32 | 55,12         | 68,09 |
|                       | 7     | 10,53   | 17,54 | 11,77   | 22,98 | 39,07   | 84,16 | 458,72   | 722,95 | 55,03         | 67,75 |
|                       | 8     | 10,88   | 18,39 | 12,16   | 23,37 | 38,58   | 81,76 | 456,73   | 705,32 | 54,43         | 70,36 |
|                       | 9     | 10,08   | 15,46 | 11,28   | 20,50 | 41,06   | 77,51 | 458,92   | 718,72 | 55,53         | 66,37 |
|                       | 10    | 10,05   | 19,03 | 11,21   | 24,57 | 37,08   | 91,43 | 460,41   | 721,71 | 54,69         | 68,37 |
| Priemer               |       | 10,64   | 17,71 | 11,90   | 22,89 | 40,06   | 83,79 | 457,63   | 715,07 | 54,88         | 68,62 |
| Výberová s.o.         |       | 0,36    | 1,97  | 0,40    | 1,99  | 1,80    | 6,69  | 1,49     | 7,76   | 0,36          | 1,35  |
| Parameter             |       | Ra [µm] |       | Rq [µm] |       | Rz [µm] |       | RSm [µm] |        | Rmr ( c ) [%] |       |
| Stena                 | č. m. | D       | F     | D       | F     | D       | F     | D        | F      | D             | F     |
| BOČNÁ                 | 1     | 24,67   | 22,45 | 29,05   | 26,26 | 106,65  | 90,61 | 350,52   | 329,78 | 56,29         | 58,76 |
|                       | 2     | 25,21   | 22,47 | 30,09   | 26,32 | 106,90  | 93,01 | 338,31   | 329,33 | 57,64         | 58,90 |
|                       | 3     | 24,51   | 22,01 | 29,52   | 26,04 | 107,27  | 92,68 | 416,96   | 331,94 | 56,90         | 59,74 |
|                       | 4     | 25,06   | 21,77 | 30,10   | 25,93 | 108,99  | 95,23 | 348,74   | 329,86 | 55,98         | 60,21 |
|                       | 5     | 25,31   | 22,78 | 30,38   | 26,82 | 109,31  | 92,15 | 381,96   | 331,78 | 56,21         | 59,42 |
|                       | 6     | 25,78   | 21,83 | 30,90   | 25,91 | 109,85  | 93,60 | 365,01   | 330,32 | 56,20         | 60,21 |
|                       | 7     | 25,54   | 22,75 | 30,63   | 26,75 | 108,59  | 92,12 | 382,66   | 331,88 | 56,55         | 58,97 |
|                       | 8     | 25,49   | 22,05 | 30,55   | 26,15 | 109,59  | 94,84 | 380,51   | 331,84 | 57,33         | 60,17 |
|                       | 9     | 24,81   | 22,64 | 31,44   | 26,63 | 106,56  | 93,00 | 417,75   | 330,58 | 58,08         | 58,44 |
|                       | 10    | 24,89   | 22,56 | 29,97   | 27,07 | 106,99  | 90,50 | 379,59   | 330,49 | 56,34         | 59,27 |
| Priemer               |       | 25,13   | 22,33 | 30,26   | 26,39 | 108,07  | 92,78 | 376,20   | 330,78 | 56,75         | 59,41 |
| Výberová s.o.         |       | 0,41    | 0,38  | 0,68    | 0,41  | 1,32    | 1,56  | 26,81    | 1,00   | 0,71          | 0,65  |
| Parameter             |       | Ra [µm] |       | Rq [µm] |       | Rz [µm] |       | RSm [µm] |        | Rmr ( c ) [%] |       |
| Stena                 | č. m. | D       | F     | D       | F     | D       | F     | D        | F      | D             | F     |
| SPODNÁ                | 1     | 9,79    | 11,99 | 15,01   | 17,50 | 63,21   | 81,54 | 659,53   | 644,81 | 50,97         | 63,42 |
|                       | 2     | 10,27   | 11,41 | 14,82   | 17,72 | 62,34   | 79,12 | 481,05   | 690,37 | 49,22         | 55,64 |
|                       | 3     | 11,97   | 10,99 | 15,94   | 16,54 | 67,09   | 78,25 | 510,87   | 650,15 | 53,58         | 70,25 |
|                       | 4     | 10,07   | 9,04  | 17,03   | 15,40 | 78,11   | 79,89 | 592,37   | 611,43 | 51,12         | 57,72 |
|                       | 5     | 13,22   | 10,60 | 17,25   | 17,05 | 68,26   | 74,01 | 593,35   | 618,33 | 49,16         | 56,79 |
|                       | 6     | 12,92   | 10,22 | 18,18   | 16,82 | 78,23   | 76,40 | 702,17   | 664,51 | 51,39         | 73,30 |
|                       | 7     | 8,41    | 11,09 | 10,77   | 17,39 | 71,80   | 80,34 | 617,10   | 671,59 | 49,94         | 69,15 |
|                       | 8     | 11,97   | 9,07  | 17,00   | 15,21 | 67,32   | 79,65 | 510,02   | 695,70 | 54,52         | 65,82 |
|                       | 9     | 14,87   | 9,22  | 18,56   | 15,72 | 65,95   | 76,26 | 656,22   | 675,17 | 47,67         | 66,28 |
|                       | 10    | 12,61   | 12,36 | 18,01   | 17,55 | 71,49   | 78,66 | 857,46   | 683,14 | 47,44         | 76,02 |
| Priemer               |       | 11,61   | 10,60 | 16,26   | 16,69 | 69,38   | 78,41 | 618,01   | 660,52 | 50,50         | 65,44 |
| Výberová s.o.         |       | 1,94    | 1,20  | 2,31    | 0,94  | 5,53    | 2,26  | 110,94   | 28,94  | 2,31          | 7,04  |

## PRÍLOHA P II: VÝSLEDKY ANDERSON-DARLING TESTU

| Hrúbka vrstvy 0.25 mm |                 |                       |           |            |          |
|-----------------------|-----------------|-----------------------|-----------|------------|----------|
| Stena                 | 3D<br>tlačiareň | Parameter             | P-hodnota | H0         |          |
|                       |                 |                       |           | NEZAMIETAM | ZAMIETAM |
| VRCHNÁ                | D               | Ra [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,868     | x          |          |
|                       |                 | Rq [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,622     | x          |          |
|                       |                 | Rz [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,102     | x          |          |
|                       |                 | RSm [ $\mu\text{m}$ ] | 0,118     | x          |          |
|                       |                 | Rmr ( c ) [%]         | 0,403     | x          |          |
|                       | F               | Ra [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,326     | x          |          |
|                       |                 | Rq [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,597     | x          |          |
|                       |                 | Rz [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,274     | x          |          |
|                       |                 | RSm [ $\mu\text{m}$ ] | 0,252     | x          |          |
|                       |                 | Rmr ( c ) [%]         | 0,898     | x          |          |
| BOČNÁ                 | D               | Ra [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,827     | x          |          |
|                       |                 | Rq [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,39      | x          |          |
|                       |                 | Rz [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,131     | x          |          |
|                       |                 | RSm [ $\mu\text{m}$ ] | 0,092     | x          |          |
|                       |                 | Rmr ( c ) [%]         | 0,713     | x          |          |
|                       | F               | Ra [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,448     | x          |          |
|                       |                 | Rq [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,107     | x          |          |
|                       |                 | Rz [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,377     | x          |          |
|                       |                 | RSm [ $\mu\text{m}$ ] | 0,467     | x          |          |
|                       |                 | Rmr ( c ) [%]         | 0,715     | x          |          |
| SPODNÁ                | D               | Ra [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,295     | x          |          |
|                       |                 | Rq [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,439     | x          |          |
|                       |                 | Rz [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,303     | x          |          |
|                       |                 | RSm [ $\mu\text{m}$ ] | 0,554     | x          |          |
|                       |                 | Rmr ( c ) [%]         | 0,507     | x          |          |
|                       | F               | Ra [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,769     | x          |          |
|                       |                 | Rq [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,924     | x          |          |
|                       |                 | Rz [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,296     | x          |          |
|                       |                 | RSm [ $\mu\text{m}$ ] | 0,325     | x          |          |
|                       |                 | Rmr ( c ) [%]         | 0,304     | x          |          |

| Hrúbka vrstvy 0.33 mm |                 |                       |           |            |          |
|-----------------------|-----------------|-----------------------|-----------|------------|----------|
| Stena                 | 3D<br>tlačiareň | Parameter             | P-hodnota | H0         |          |
|                       |                 |                       |           | Nezamietam | Zamietam |
| VRCHNÁ                | D               | Ra [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,148     | x          |          |
|                       |                 | Rq [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,221     | x          |          |
|                       |                 | Rz [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,832     | x          |          |
|                       |                 | RSm [ $\mu\text{m}$ ] | 0,582     | x          |          |
|                       |                 | Rmr ( c ) [%]         | 0,73      | x          |          |
|                       | F               | Ra [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,412     | x          |          |
|                       |                 | Rq [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,477     | x          |          |
|                       |                 | Rz [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,641     | x          |          |
|                       |                 | RSm [ $\mu\text{m}$ ] | 0,366     | x          |          |
|                       |                 | Rmr ( c ) [%]         | 0,392     | x          |          |
| BOČNÁ                 | D               | Ra [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,953     | x          |          |
|                       |                 | Rq [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,94      | x          |          |
|                       |                 | Rz [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,092     | x          |          |
|                       |                 | RSm [ $\mu\text{m}$ ] | 0,311     | x          |          |
|                       |                 | Rmr ( c ) [%]         | 0,128     | x          |          |
|                       | F               | Ra [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,207     | x          |          |
|                       |                 | Rq [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,502     | x          |          |
|                       |                 | Rz [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,646     | x          |          |
|                       |                 | RSm [ $\mu\text{m}$ ] | 0,106     | x          |          |
|                       |                 | Rmr ( c ) [%]         | 0,406     | x          |          |
| SPODNÁ                | D               | Ra [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,712     | x          |          |
|                       |                 | Rq [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,091     | x          |          |
|                       |                 | Rz [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,355     | x          |          |
|                       |                 | RSm [ $\mu\text{m}$ ] | 0,436     | x          |          |
|                       |                 | Rmr ( c ) [%]         | 0,689     | x          |          |
|                       | F               | Ra [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,514     | x          |          |
|                       |                 | Rq [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,167     | x          |          |
|                       |                 | Rz [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,538     | x          |          |
|                       |                 | RSm [ $\mu\text{m}$ ] | 0,507     | x          |          |
|                       |                 | Rmr ( c ) [%]         | 0,683     | x          |          |

## PRÍLOHA P III: VÝSLEDKY F-TESTU

| Tabuľka výsledkov pre F – Test - Hrúbka vrstvy 0.25 mm |                 |           |                       |
|--------------------------------------------------------|-----------------|-----------|-----------------------|
| VRCHNÁ STENA                                           | PARAMETER       | P-hodnota | H0                    |
|                                                        |                 |           | NEZAMIETAM   ZAMIETAM |
|                                                        | Ra [µm]         | 0,08      | X                     |
|                                                        | Rq [µm]         | 0,00      | X                     |
|                                                        | Rz [µm]         | 0,00      | X                     |
|                                                        | RSm [µm]        | 0,00      | X                     |
|                                                        | Rmr ( c ) [%]   | 0,22      | X                     |
| BOČNÁ STENA                                            | PARAMETER F + D | P HODNOTA | H0                    |
|                                                        |                 |           | NEZAMIETAM   ZAMIETAM |
|                                                        | Ra [µm]         | 0,42      | X                     |
|                                                        | Rq [µm]         | 0,37      | X                     |
|                                                        | Rz [µm]         | 0,95      | X                     |
|                                                        | RSm [µm]        | 0,00      | X                     |
|                                                        | Rmr ( c ) [%]   | 0,07      | X                     |
| SPODNÁ STENA                                           | PARAMETER F + D | P HODNOTA | H0                    |
|                                                        |                 |           | NEZAMIETAM   ZAMIETAM |
|                                                        | Ra [µm]         | 0,01      | X                     |
|                                                        | Rq [µm]         | 0,16      | X                     |
|                                                        | Rz [µm]         | 0,32      | X                     |
|                                                        | RSm [µm]        | 0,04      | X                     |
|                                                        | Rmr ( c ) [%]   | 0,36      | X                     |

Tabuľka výsledkov pre F – Test - Hrúbka vrstvy 0.33 mm

| VRCHNÁ STENA | PARAMETER             | P-hodnota | H0         |          |
|--------------|-----------------------|-----------|------------|----------|
|              |                       |           | NEZAMIETAM | ZAMIETAM |
|              | Ra [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,00      |            | X        |
|              | Rq [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,00      |            | X        |
|              | Rz [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,00      |            | X        |
|              | RSm [ $\mu\text{m}$ ] | 0,00      |            | X        |
|              | Rmr ( c ) [%]         | 0,00      |            | X        |
| BOČNÁ STENA  | PARAMETER F + D       | P HODNOTA | H0         |          |
|              |                       |           | NEZAMIETAM | ZAMIETAM |
|              | Ra [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,82      | X          |          |
|              | Rq [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,14      | X          |          |
|              | Rz [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,63      | X          |          |
|              | RSm [ $\mu\text{m}$ ] | 0,00      |            | X        |
|              | Rmr ( c ) [%]         | 0,80      | X          |          |
| SPODNÁ STENA | PARAMETER F + D       | P HODNOTA | H0         |          |
|              |                       |           | NEZAMIETAM | ZAMIETAM |
|              | Ra [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,17      | X          |          |
|              | Rq [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,01      |            | X        |
|              | Rz [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,06      | X          |          |
|              | RSm [ $\mu\text{m}$ ] | 0,53      | X          |          |
|              | Rmr ( c ) [%]         | 0,00      |            | X        |

## PRÍLOHA P IV: VÝSLEDKY T-TESTU

| Tabuľka výsledkov pre T – Test - Hrúbka vrstvy 0.25 mm |                       |           |            |          |
|--------------------------------------------------------|-----------------------|-----------|------------|----------|
| VRCHNÁ STENA                                           | PARAMETER F + D       | P HODNOTA | H0         |          |
|                                                        |                       |           | NEZAMIETAM | ZAMIETAM |
|                                                        | Ra [ $\mu\text{m}$ ]  | 0         |            | X        |
|                                                        | Rq [ $\mu\text{m}$ ]  | 0         |            | X        |
|                                                        | Rz [ $\mu\text{m}$ ]  | 0         |            | X        |
|                                                        | RSm [ $\mu\text{m}$ ] | 0         |            | X        |
|                                                        | Rmr ( c ) [%]         | 0         |            | X        |
| BOČNÁ STENA                                            | PARAMETER F + D       | P HODNOTA | H0         |          |
|                                                        |                       |           | NEZAMIETAM | ZAMIETAM |
|                                                        | Ra [ $\mu\text{m}$ ]  | 0         |            | X        |
|                                                        | Rq [ $\mu\text{m}$ ]  | 0         |            | X        |
|                                                        | Rz [ $\mu\text{m}$ ]  | 0         |            | X        |
|                                                        | RSm [ $\mu\text{m}$ ] | 0         |            | X        |
|                                                        | Rmr ( c ) [%]         | 0         |            | X        |
| SPODNÁ STENA                                           | PARAMETER F + D       | P HODNOTA | H0         |          |
|                                                        |                       |           | NEZAMIETAM | ZAMIETAM |
|                                                        | Ra [ $\mu\text{m}$ ]  | 0         |            | X        |
|                                                        | Rq [ $\mu\text{m}$ ]  | 0         |            | X        |
|                                                        | Rz [ $\mu\text{m}$ ]  | 0         |            | X        |
|                                                        | RSm [ $\mu\text{m}$ ] | 0         |            | X        |
|                                                        | Rmr ( c ) [%]         | 0         |            | X        |



Tabuľka výsledkov pre T – Test - Hrúbka vrstvy 0.33 mm

| VRCHNÁ STENA | PARAMETER F + D       | P HODNOTA | H0         |          |
|--------------|-----------------------|-----------|------------|----------|
|              |                       |           | NEZAMIETAM | ZAMIETAM |
|              | Ra [ $\mu\text{m}$ ]  | 0         |            | X        |
|              | Rq [ $\mu\text{m}$ ]  | 0         |            | X        |
|              | Rz [ $\mu\text{m}$ ]  | 0         |            | X        |
|              | RSm [ $\mu\text{m}$ ] | 0         |            | X        |
|              | Rmr ( c ) [%]         | 0         |            | X        |
| BOČNÁ STENA  | PARAMETER F + D       | P HODNOTA | H0         |          |
|              |                       |           | NEZAMIETAM | ZAMIETAM |
|              | Ra [ $\mu\text{m}$ ]  | 0         |            | X        |
|              | Rq [ $\mu\text{m}$ ]  | 0         |            | X        |
|              | Rz [ $\mu\text{m}$ ]  | 0         |            | X        |
|              | RSm [ $\mu\text{m}$ ] | 0         |            | X        |
|              | Rmr ( c ) [%]         | 0         |            | X        |
| SPODNÁ STENA | PARAMETER F + D       | P HODNOTA | H0         |          |
|              |                       |           | NEZAMIETAM | ZAMIETAM |
|              | Ra [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,179     |            | X        |
|              | Rq [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,591     |            | X        |
|              | Rz [ $\mu\text{m}$ ]  | 0,003     |            | X        |
|              | RSm [ $\mu\text{m}$ ] | 0,029     |            | X        |
|              | Rmr ( c ) [%]         | 0         |            | X        |