

Charakterizace polymerních povrchů připravených pomocí 3D tisku

Tomáš Teichmann

Bakalářská práce
2019



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav fyziky a mater. inženýrství

akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Tomáš Teichmann**
Osobní číslo: **T16405**
Studijní program: **B2808 Chemie a technologie materiálů**
Studijní obor: **Materiálové inženýrství**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Charakterizace polymerních povrchů připravených pomocí 3D tisku**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární rešerši na dané téma.
2. Vytiskněte polymerní vzorky pomocí 3D tisku.
3. Povrchy připravených vzorků charakterizujte pomocí, SEM, AFM, goniometrie, profilometrie.
4. Výsledky práce podrobně diskutujte a uveďte hlavní závěry.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

1. Jones R.A.L., *Polymers at Surfaces and Interfaces*, Cambridge University Press, 1999, ISBN-10-521-47965-7.
2. Brundle, C. R., Evans, Ch. A. jr. Wilson, S. *Encyklopedia of Materials Characterization, Surfaces, Interface, Thin Films*. Elsevier, 1992. ISBN 0-7506-9168-9.
3. Kubínek R., *Mikroskopie Senující Sondou*, Univerzita Palackého v Olomouci 2003, ISBN 80-244-0602-0.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Antonín Minařík, Ph.D.

Ústav fyziky a mater. inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

1. února 2019

Termín odevzdání bakalářské práce:

17. května 2019

Ve Zlíně dne 22. února 2019

L.S.

doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

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

Ve Zlíně

.....

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

(1) Vysoká škola nevydělečně 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.

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

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

²³ 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). Odírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

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

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

ABSTRAKT

Byly zkoumány možnosti 3D tisku jemných povrchových rastrů z rozdílných typů polymerních materiálů. Modelové systémy byly tištěny na FDM a SLA tiskárně. S ohledem na dosažení co nejvěrnější reprodukovatelnosti tištěného modelu byl zkoumán vliv materiálu, orientace modelu při tisku a výšky tiskové vrstvy pro vzorky tištěné především na SLA tiskárně. Přípravené vzorky byly charakterizovány skenující elektronovou mikroskopií, mikroskopií atomárních sil, kontaktní profilometrií a goniometrií. Z naměřených dat bylo zjištěno, že v případě SLA tisku hraje dominantní úlohu orientace tištěného modelu vzhledem k tiskové vaničce spolu s výškou tiskové vrstvy a zvoleným tiskovým materiálem. Nejlepších výsledků lze dosáhnout při horizontální orientaci tiskového modelu a výšce tiskové vrstvy 25 μm .

Klíčová slova: 3D tisk, FDM, SLA, pryskyřice, parametry tisku, charakterizace povrchu

ABSTRACT

Possibilities of 3D printing of fine surface rasters from different types of polymer materials were investigated. The model systems were printed on FDM and SLA printers. In order to achieve the most faithful reproducibility of the printed model, the influence of the material, the orientation of the model during printing and the height of the print layer for samples printed primarily on the SLA printer were investigated. Prepared samples were characterized by scanning electron microscopy, atomic force microscopy, contact profilometry and goniometry. From the measured data, it has been found that in the case of SLA printing, the orientation of printed model relative to the printing tray plays a dominant role along with the height of the printing layer and the selected printing material. The best results can be achieved with horizontal orientation of the print model and 25 μm print layer height.

Keywords: 3D printing, FDM, SLA, resins, printing parameters, characterization of surface

Děkuji vedoucímu své bakalářské práce Ing. Antonínu Minaříkovi, Ph.D. za trpělivou přípravu, odborné vedení a čas, který mi věnoval. Rád bych také poděkoval mé rodině, která mě v průběhu studia podporovala.

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

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 TECHNOLOGIE 3D TISKU.....	11
1.1 TYPY 3D TISKU	11
1.2 MODELOVÁNÍ TAVNÝM ULOŽENÍM.....	12
1.2.1 Parametry tisku.....	13
1.2.2 Mechanické vlastnosti.....	13
1.3 STEREOLOGRAFIE	14
1.4 METODY ÚPRAVY POVRCHU	15
1.5 POUŽÍVANÉ MATERIÁLY	15
1.6 KYSELINA POLYMLÉČNÁ	16
1.6.1 Vlastnosti	18
1.6.2 Typy kyseliny polymléčné	19
2 METODY CHARAKTERIZACE POVRCHU	20
2.1 SKENOVACÍ ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE.....	20
2.2 MIKROSKOPIE ATOMÁRNÍCH SIL.....	23
2.2.1 Kontaktní režim	25
2.2.2 Bezkontaktní režim.....	26
2.2.3 Poklepový režim.....	26
2.3 KONTAKTNÍ PROFILOMETR	26
II PRAKTICKÁ ČÁST	28
3 MĚŘENÉ VZORKY	29
3.1 POUŽITÉ MATERIÁLY	29
3.2 PŘÍPRAVA VZORKŮ A JEJICH TISK	30
4 PRŮBĚH MĚŘENÍ.....	33
4.1 POUŽITÉ PŘÍSTROJE	33
4.2 ZPRACOVÁNÍ MĚŘENÍ	35
4.3 VÝSLEDKY	36
5 SOUHR A DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	51
ZÁVĚR.....	54
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	55
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	58
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	59
SEZNAM TABULEK	60

ÚVOD

Pomocí moderních 3D tiskáren jsme schopni rychle a efektivně připravovat prototypy budoucích výrobků nebo přímo tisknout hotové modely. V rámci testování prototypů dokážeme předem odhadnout nedostatky nebo slabá místa a díky tomu upravit výrobu reálných produktů. Tato bakalářská práce se zabývá studiem vlivu vybraných parametrů tisku a tiskových materiálů na možnosti tisku co nejmenších povrchových rastrů pomocí FDM a SLA tiskáren. V první části této práce jsou teoreticky popsány jednotlivé typy 3D tisku. Dále jsou popsány používané materiály a poslední kapitola teoretické části je věnována metodám a procesům charakterizace povrchové topografie.

Praktická část je rozdělena do tří kapitol, kde v první části je popsáno, jak probíhala příprava jednotlivých vzorků, které byly tisknuty z PLA pro FDM metodu a Grey Pro a Clear pryskyřice pro SLA. Druhá část obsahuje průběh měření na jednotlivých zařízeních a zpracování získaných dat, z kterých byly vyvozeny závěry ve třetí části.

Poslední část uvádí a diskutuje získané výsledky z charakterizace tištěných vzorků pomocí FDM a SLA. V rámci této poslední části jsou zkoumány tři typy materiálů. Jeden pro FDM a dva pro SLA. Jako používané vzorky slouží modelové rastry tvořené definovanými pylo-ny. Na těchto modelových systémech je ukázáno, jaké nejvhodnější technologie 3D tisku a parametry je potřeba volit, aby bylo možno co nejlépe reprodukovat požadovaný model pomocí zvolené 3D tiskárny.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 TECHNOLOGIE 3D TISKU

Pojem 3D tisk v dnešní době zahrnuje čím dál širší spektrum možností aditivní výroby (AM). Společnou vlastností těchto procesů výroby je nanášení materiálu vrstvu po vrstvě. V posledních letech se AM začleňuje do průmyslových, výrobních a spotřebitelských oblastí. U tradičních procesů výroby, jako je například obrábění, jsou nevýhodou vysoké pořizovací náklady na nákup speciálních nástrojů a obrovské množství odpadu materiálu. U 3D tisku dochází k minimálním ztrátám materiálu. S obrovským rozšířením dostupnosti komponentů a softwaru na trhu si dnes mohou 3D tiskárnu pořídit i malé firmy, popřípadě široká veřejnost. Základem procesu je vytvořit si 3D digitální model v některém z dostupných softwarů nebo si naskenovat již existující model. Tento model je následně převeden do formátu STL, ve kterém je rozdělen na vrstvy. Následuje nejdůležitější krok, a to nastavení parametrů tisku, které ovlivňuje budoucí vlastnosti výrobku. Po vytisknutí mohou ještě následovat mechanické nebo chemické úpravy povrchu. [1, 2]

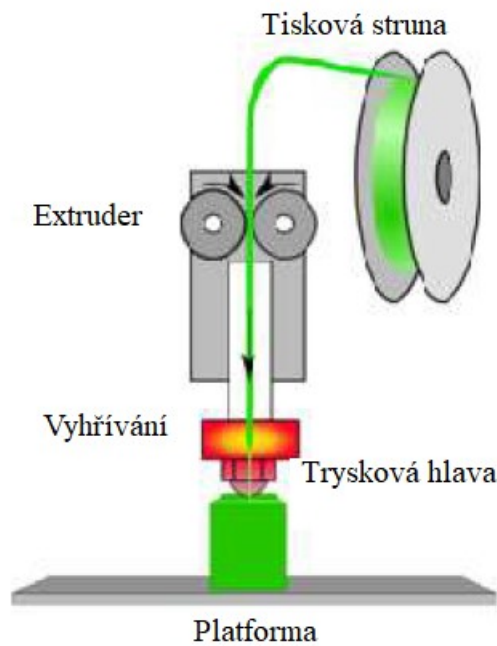
1.1 Typy 3D tisku

Různé typy 3D tiskáren používají odlišné technologie, mimo jiné v závislosti na druhu materiálu. Neexistuje jednotný postup pro všechny metody. Někdy se jako materiál používá prášek (keramika, kov), jindy struna (polymer). Některé tiskárny využívají laser k sinterování a tavení vrstev nebo také k tavení polymerní pryskyřice. K nejrozšířenějším metodám patří vytlačování polymerní struny přes extruder.[1] Jedna z prvních metod 3D tisku byla stereolitografie (SLA), založená na principu síťování fotopolymerní pryskyřice pomocí laserového paprsku. Laser se v případě této technologie pohybuje ve směru os x a y , zatímco pohyblivá platforma s fotopolymerem se po jednotlivých vrstvách posouvá po ose z . Stereolitografie je považována za jednu z nejpřesnějších metod. Mezi její nedostatky ovšem patří nutnost následné úpravy.[1, 3] Další používanou metodou je Selective Laser Sintering (SLS) neboli selektivní laserové spékání. Metoda je podobná SLA, přičemž materiál se zde používá ve formě prášku. Mohou být tedy použity jak polymerní, tak kovové prášky nebo dokonce jejich kombinace, což umožňuje vyrobit produkty s lepšími vlastnostmi. Nejen SLA, ale také metoda digitálního světelného zpracování (DLP) pracuje s fotopolymerem. Rozdíl zde spočívá v použití zdroje světla. DLP využívá místo laseru klasickou obloukovou lampu s panelem s tekutými krystaly nebo digitální mikrozrcadlové zařízení (DMD), které zasahuje celý povrch fotopolymeru. Díky tomu může být DLP rychlejší než SLA. Výroba čistě kovových produktů hraje významnou roli především v oblasti

automobilového, leteckého a zdravotnického průmyslu. Zde je jednou z využívaných metod tavení elektronovým paprskem EBM. Tento proces je patentem švédské společnosti Arcam. Zdrojem tepla je namísto laseru elektronový paprsek. To ovšem vyžaduje výrobu z kovového prášku ve vakuu.[1, 4] Mezi nejnovější procesy 3D tisku patří MELD 3D Printing Technology vyvinutá společností Virginia-based Aeroprobe Corporation. Při této metodě dochází místo k slinování kovu k jeho tavení. MELD nachází své uplatnění především v aditivní výrobě, lze ji však využít i k opravám nebo spojování. Mezi její výhody patří otevřená atmosféra výroby, kdy jako jedna prvních metod nevyžaduje při výrobě kovových produktů vakuum. Dalšími výhodami jsou rychlost výroby a možnosti větších rozměrů produktů než dosud. Materiál ve formě prášku nebo struny není taven laserem, ale extrémním tlakem a třením. Takto je pomocí robotického ramena nanášen na základní desku.[5] Další novinkou v oblasti AM je technologie Cold Spray Additive Manufacturing, která urychluje částice kovového prášku pomocí supersonického proudu na substrátovou vrstvu. Materiál je jednoduše odstřelován nadzvukovou rychlostí, která způsobuje, že částice prášku se při nárazu plastifikují a vytváří pevnou vazbu se substrátem.[6, 7]

1.2 Modelování tavným uložením

Velmi rozšířenou a oblíbenou metodou je FDM, tedy modelování tavným uložením. Jedná se o nejběžnější a snadno dostupnou 3D technologii tisku. Tento proces je založen na vytlačování struny přes extruder, čímž dochází k jejímu tavení, jak je ukázáno na Obr. 1. Obvykle se pracuje se strunami o průměru 1,75 mm nebo 2,85 mm. Teplota tavení závisí na typu použité struny. Rozsah teplot tavení se pohybuje přibližně od 190 °C pro kyselinu polyléčnou (PLA) až po 300 °C pro polykarbonát (PC). Tryska roztavený materiál nanáší ve vrstvách ve směru os x a y . Obvykle se používají trysky o průměru 0,2 mm a 0,4 mm. Průměr tryšky může ovlivnit kvalitu tisku. Po dokončení jedné vrstvy se konstrukční základní deska posune po ose z o vrstvu níže. Technologie FDM se používá pro polymerní, keramické nebo kompozitní materiály. Některé společnosti pracují také s technologií kovového tisku.[8, 9]



Obr. 1 FDM metoda 3D tisku [3]

1.2.1 Parametry tisku

Tloušťka stěny je omezena velikostí vlákna. Nelze vytisknout části tenčí než dvojnásobek průměru vlákna. Takové části by byly nepřesné a tenké. Doporučuje se tisknout nosné stěny o minimální tloušťce (1,2 – 1,5) mm. Průměry otvorů produktu by neměly být menší než 1 mm. Malé detaily nebo text může být pomocí FDM velmi těžké vytisknout. Mezery by měly být větší než 0,5 mm a otvor orientován rovnoběžně s osami x a y . Důležitým prvkem jsou vzpěry. Ty zajišťují konstrukční podporu produktu například u převisů s odklonem větším než 45° . Výplň má obrovský vliv na mechanické vlastnosti produktu. Mezi základní typy výplně patří půdorys čtverce, ten se používá u částí, které nebyvají příliš namáhány. Jejich velkou výhodou jsou nízké nároky na množství materiálu. Dalšími typy jsou půdorysy trojúhelníkové nebo šestihranné. Dále záleží na jejich hustotě a velikosti hran. Od toho všeho se odvíjí nárůst mechanických vlastností, ale i nároků na množství materiálů. Poslední možností je zcela vyplněný objem produktu.

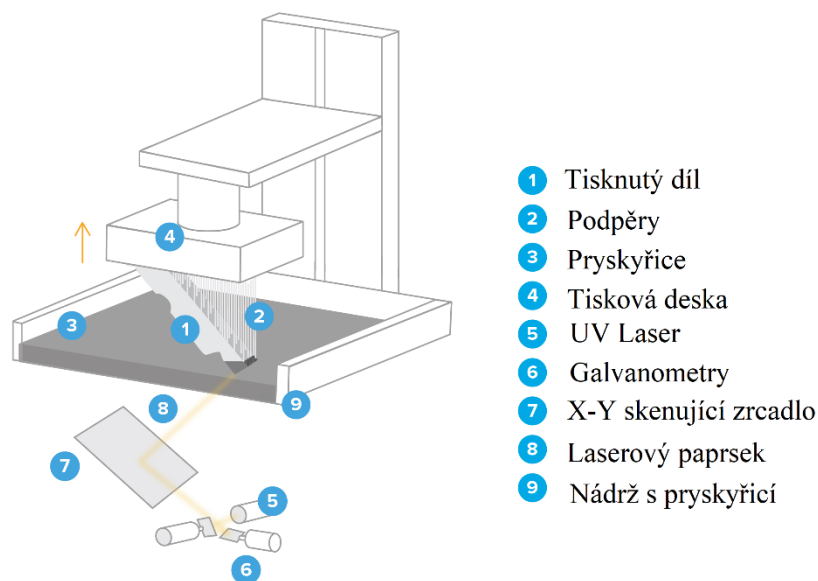
1.2.2 Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti a rozměrová přesnost prvků vyrobených metodou FDM je dána především směrem tisku, tloušťkou vrstev a teplotou pracovní komory. K popsání reologických vlastností slouží reologické modely, které však musí být stanoveny experimentálně. Teoretický popis výsledků zkoušek lze provést pomocí již známých modelů, jakými

jsou Maxwell, Kelvin-Voigt, Standart 1 nebo Burgers.[10, 11] Chování materiálu je sledováno v průběhu času, teploty nebo napětí. Reologické vlastnosti multisystémů jsou silně ovlivněny fázovou morfologií, a to termodynamickými interakcemi a tepelnou historií polymerů. Viskoelasticita polymerů závisí na ohybu polymerních molekul a jejich zapletení v polymerní síti. Popisují ji Youngův modul pružnosti v tahu a ztrátový modul, což jsou reálná a imaginární složky komplexního modulu. [12, 13]

1.3 Stereolitografie

Stereolitografické tiskárny (SLA) se skládají ze čtyř hlavních částí, a to z nádrže s fotopolymerem, tiskové desky, laseru a systému, který vše řídí. Nejprve je na začátku procesu tenká vrstva fotopolymeru (obvykle 0,05–0,15 mm) vystavena záření laseru, který vykresluje zadaný průřez objektu. Pomocí záření laseru dojde k síťování fotopolymeru, a tedy jeho vytvrzení. Když je daná vrstva objektu vytvrzena, dojde k posuvu tiskové desky ve směru osy z a prostor mezi deskou a laserem se opět vyplní tekutým fotopolymerem. Laser začne znovu opisovat průřez tištěného předmětu v dané vrstvě a ihned dochází ke spojení fotopolymeru s předchozí vrstvou. Po vytisknutí kompletního objektu obvykle následují dočišťující a zpevňující procesy, kterými se zabývá kapitola 1.4. Díky svým vlastnostem, jakými jsou vysoká přesnost tisku, trvanlivost materiálů, rychlost a cena, je SLA metoda využívána především k výrobě prototypů. [14, 15] Jako zdroje záření se používají například helium-kadmiové, argonové nebo CO_2 lasery. Ty obvykle využívají UV záření, ale používají se i lasery s tzv. NIR zářením. Tedy záření blízké infračervenému spektru. To je schopné síťovat fotopolymer nejen na povrchu, ale i uvnitř jeho objemu. Tištěné produkty často mají podpěry, které zajišťují stabilitu celého výrobku. Můžeme díky nim nastavit libovolně pozici produktu vůči tiskové desce, protože zde dochází k anizotropii a chceme získat co nejlepší mechanické vlastnosti pro dané použití. [16, 17] Na Obr. 2 můžeme vidět schéma SLA 3D tiskárny, kde je tisková deska vytahována po ose z nahoru.



Obr. 2 Schéma SLA 3D tiskárny [16]

1.4 Metody úpravy povrchu

Vybrat správnou techniku závěrečné úpravy závisí na geometrii a materiálu daného dílu. Mezi nejčastější metody pro závěrečnou úpravu povrchu 3D tištěných výrobků patří broušení, vyhlazování parou nebo pomocí trysky a kuliček. Plastové díly lze brousit ručně nebo pomocí pásové brusky. Při broušení musíme dát pozor, aby nedošlo k porušení vzpěr nebo stěn. Při vyhlazování parou je produkt umístěn v parní nádrži s kapalinou (rozpouštědlem), kterou přivedeme k varu. Pára roztaví asi 2 μm povrchu dílu a po několika sekundách zůstane povrch hladký a lesklý. Tato metoda umožňuje rovnoměrnou povrchovou úpravu a neovlivňuje přesnost dílů. Použití par je ovšem omezeno materiálem dílu. Jednou z nejčastějších metod je čištění pomocí trysky. Jedná se o poměrně rychlou metodu, při které je výsledkem hladký matný povrch. Nevýhodou může být změna barvy nebo odstínu po tryskání. [18]

1.5 Používané materiály

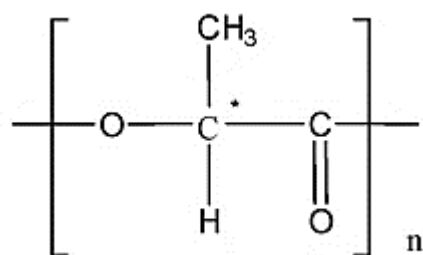
V dnešní době dochází k rozšíření možností používaných materiálů. Při výběru vhodného materiálu hodnotíme jeho mechanické vlastnosti, chování při procesu tisku a finální vzhled produktu. U FDM metody 3D tisku se jedná především o ABS a jeho modifikace, jako například ABSi, ABS-M30 nebo ABS-ESD7. ABS se vyznačuje dobrou tepelnou odolností

a houževnatostí. Snadno se ve fázi závěrečné úpravy vyhladí acetonem a je odolný proti otěru. Dalšími používanými materiály jsou polyethylentereftalát (PET), nylon a termoplastický polyuretan (TPU). Mezi termoplasty s dobrou pevností a tepelnou odolností patří PC nebo Ultem 9085. Jedním z nejvyužívanějších materiálů pro FDM technologii 3D tisku je PLA.[19, 20] Princip metody SLA spočívá v síťování fotopolymeru. Ten se skládá z monomerů a oligomerů, které plní funkci stavebního materiálu. Dále jsou zde přítomny fotoiniciátor a další aditiva, která dodávají polymeru optické, mechanické a tepelné vlastnosti. Fotoiniciátory se používají přírodní nebo syntetické a obvykle reagují se specifickou vlnovou délkou záření. Fotopolymery lze rozdělit do několika skupin podle struktury a mechanických vlastností. Prvním typem jsou akryláty, které bývají velmi smrštivé. Tato vlastnost je příčinou menší přesnosti výrobků. Dalším typem jsou epoxidy, které dosahují menší smrštivosti. Třetím typem jsou plněné pryskyřice, které obsahují různá organická plniva, keramiku nebo kovy. Průběh fotopolymerizace lze rozdělit na dva způsoby, a to fotopolymerizace volných radikálů a katodickou fotopolymerizaci. Při fotopolymerizaci volných radikálů dochází k odbourávání iniciátorů radikály a ionty. Ty poté reagují s monomery a začíná proces polymerizace. Tento způsob reakce patří mezi nejrozšířenější díky svému využití ve směsích obsahující nenasycené polyestery, akryláty, metakryláty nebo polyuretany. Pro tyto směsi jsou dostupné fotoiniciátory ve velkém rozsahu vlnových délek. Katodická fotopolymerizace je způsobena Lewisovými kyselinami, které zde figurují jako fotoiniciátory. Příkladem takovéto fotopolymerace je uvolňování silikonových povlaků pro označování v důsledku UV záření. Fotopolymerní síťování je proces, kdy v důsledku záření působícího na fotopolymer dochází na funkčních skupinách k tvorbě vazeb mezi sousedními řetězci ve všech směrech. Fotopolymerace je vhodný způsob ke zlepšení chemických a mechanických vlastností polymerů.[21] U SLA technologie jsou dostupnými materiály například ABS s modifikacemi Accura 55, Accura 25, Accura Xtreme nebo Accura Bluestone, taktéž VisiJet SL ve variantách Flex, Tough a Black. Fotopolymery založenými na PC jsou rigidní Accura 60 nebo Accura PEAK. Mezi odolné materiály patří také PE Accura 25 nebo flexibilní PE VisiJet SL Flex. Tyto materiály jsou vyráběny například společností Protocom®.[22, 23]

1.6 Kyselina polymléčná

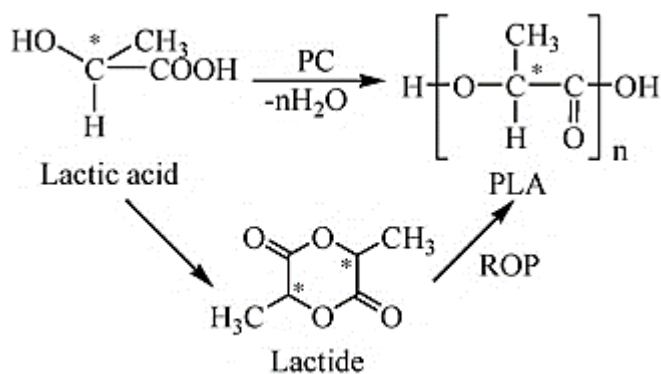
Jedním z materiálů používaných pro technologii FDM je kyselina polymléčná (PLA). Termoplastický polymer, který můžeme získat například z kukuřičného škrobu nebo cuk-

rové třtiny. Jeho základní strukturální jednotkou, kterou můžeme vidět na Obr. 3, je kyselina mléčná. [24]



Obr. 3 Struktura PLA [25]

Mezi jeden z jejích základních způsobů výroby patří tzv. Ring Opening Polymerization (ROP), spočívající v otevření laktidového cyklu. Tato metoda se skládá ze dvou kroků. Nejprve je získána polykondenzací vodného roztoku kyseliny mléčné nízkomolekulární látka ($<5\ 000\ \text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$). Z nízkomolekulárního prepolymeru zvýšením teploty (180–300 °C), snížením tlaku a přidáním vhodného katalyzátoru získáme depolymerizací laktid. Druhým krokem je příprava vysokomolekulární PLA katalytickou polymerací. V závislosti na použitém katalyzátoru rozlišujeme ROP s aniontovým, kationovým nebo koordinačně-inzerčním mechanismem. Dalším možným způsobem výroby je přímá polykondenzace v tavenině. U této metody se musíme nejprve při přípravě nízkomolekulárního prepolymeru zbavit vody z roztoku kyseliny mléčné. Následně probíhá polykondenzace v tavenině a získá výsledné PLA. Ta ovšem tímto způsobem výroby nedosahuje tak vysoké molekulární hmotnosti jako při ROP. U tohoto procesu může nastat problém s oddestilováním vody, která vzniká jako vedlejší produkt. Dalšími nevýhodami této metody mohou být dlouhá doba polymerizace nebo teplota, která ovlivňuje optickou čistotu polymeru a zároveň tedy strukturu.[24] Na Obr. 4 jsou naznačeny dvě zmíněné metody výroby PLA.



Obr. 4 Schéma výroby PLA [25]

1.6.1 Vlastnosti

Kyselina polymléčná je biodegradabilní alifatický polyester. Mechanické vlastnosti polymerů podobných molárních hmotností se příliš neliší. Vlastnosti ovlivňuje například uspořádání struktury, krystalinita nebo velikost a orientace sférolitů.[25, 26] Její vlastnosti mohou být definovány diferenční skenující kalorimetrií (DSC), termogravimetrickou analýzou (TGA) nebo dynamicko-mechanickou analýzou (DMA).[24] Několik vybraných vlastností zjištěných z DCS měření můžeme vidět na Obr. 5.

\overline{M}_v	T_m^a (°C)	ΔH_m^a (J g ⁻¹)	T_g^b (°C)	ΔC_p^b (J g ⁻¹ K ⁻¹)
5,300	156	61	55	0.60
20,000	174	68	59	0.54
691,000	186	59	64	0.54

^a By DSC, 10 K min⁻¹.

^b By DSC, 20 K min⁻¹.

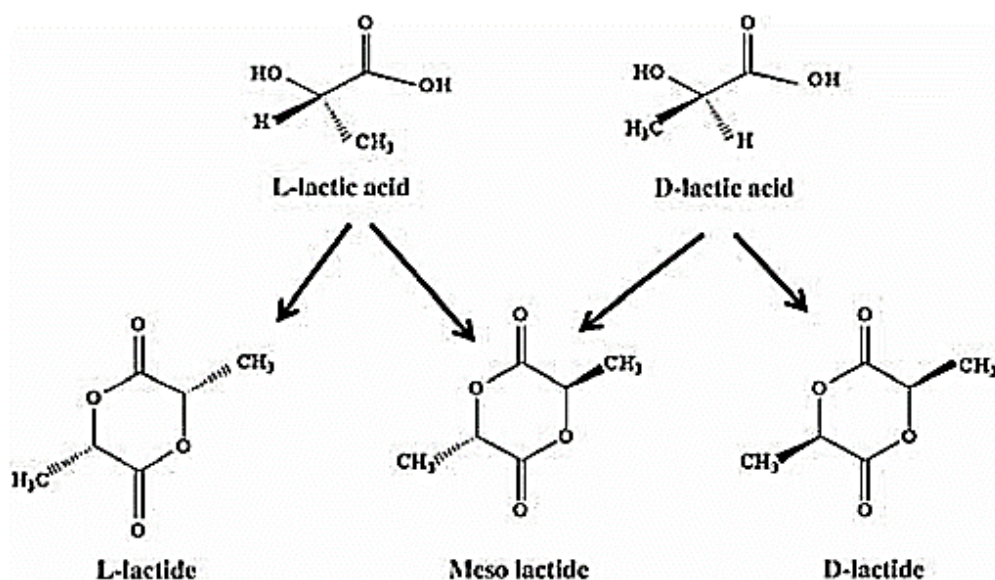
Obr. 5 Fyzikální vlastnosti PLLA [25]

PLA má dobré mechanické vlastnosti srovnatelné se standardními termoplasty. Teplota tání T_m a stupeň krystalinity závisí na molární hmotnosti, tepelné historii materiálu a čistotě polymeru. Svou tvrdostí, tuhostí, pružností a houževnatostí je srovnatelná s polyethylentereftalátem (PET). Specifická hustota PLA 1,25 g.cm⁻³ je vyšší než u standardních polymerů, u kterých se hustota pohybuje v rozmezí (0,8 – 1,1) g.cm⁻³. Optické vlastnosti PLA jsou ovlivněny aditivami a výrobními podmínkami. Tyto vlivy mohou způsobit nižší stupeň krystalinity, a tedy vysokou transparentnost. PLA s vysokou krystalinitou vykazuje špatné optické vlastnosti. K většině degradačních reakcí u PLA dochází u esterových vazeb na hlavním řetězci. Mezi tyto reakce patří termohydrolyza, depolymerizace, cyklická oligomerizace a intermolekulární a intramolekulární transesterifikace. Zvýšené množství polymeračního katalyzátoru zároveň katalyzuje degradační reakce. Mezi další degradační sloučeniny patří voda a přítomnost monomeru a oligomeru. Bylo zjištěno, že tepelná degradace probíhá náhodně štěpením hlavního řetězce. Jedna z možností, které snižují tepelnou degradaci, je benzoylperoxid. Ten stabilizuje polymer deaktivací zbytku katalyzátoru. Teplota tání polymeru se snižuje se vzrůstající koncentrací benzoylperoxidu. [25, 26] Mechanické chování PLA u aditivní výroby (AM) je ovlivněno především rychlostí posuvu trysky, teplotou nanášení, tloušťkou vrstvy, velikostí trysky nebo orientací a vzorem výplně. Další důležitý faktor ovlivňující mechanické chování u objektů vyrobených aditivní výrobou je tloušťka pláště, který hraje roli opěrné stěny. Doporučuje se nastavit tloušťku pláště jako násobek průměru trysky tak, aby vytváření dutin a dalších vý-

robních defektů bylo účinně kontrolováno a omezeno. Obecně je mechanické chování PLA vyrobené AM vnímáno jako křehké. Maximální pevnost v tahu a modul pružnosti v tahu mají tendenci k poklesu jak s nárůstem úhlu vyplnění, tak se snižováním tloušťky pláště. Statická síla závisí na tloušťce jednotlivých vrstev. Tažnost se mění v závislosti na směru tisku.[27]

1.6.2 Typy kyseliny polymléčné

Jedná se o strukturu polymeru s chirálním uhlíkem. Vytváří tři optické izomery a to PLLA, PDLA a PDLLA, které jsou znázorněny na Obr. 6. [25]



Obr. 6 *Enantiomery PLA* [28]

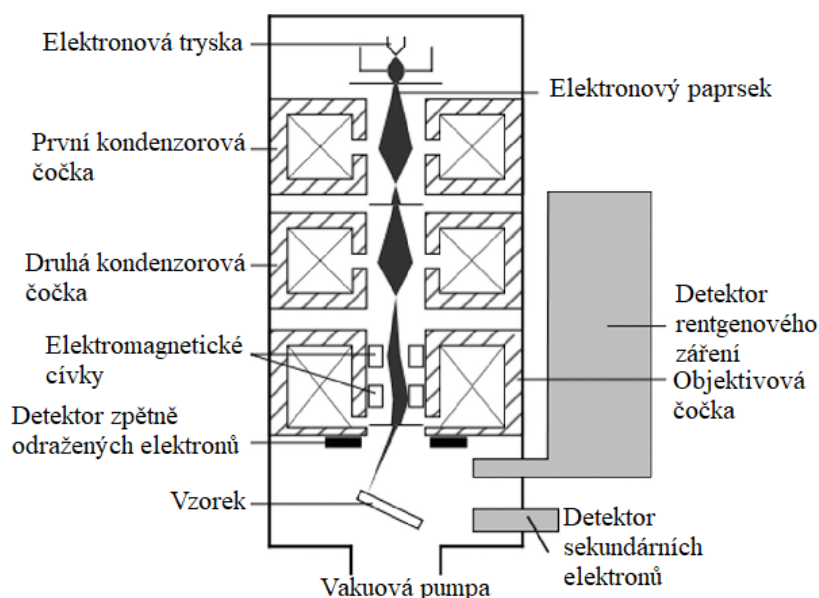
Izotaktické a opticky aktivní PLLA a PDLA jsou krystalické, zatímco ataktické a opticky neaktivní PDLLA je amorfní. Polymerace laktidu při ROP vytváří různé stereopolymery v závislosti na výchozích dimerech PDLLA se získává z PLLA, PDLA a buď mezo-laktidu nebo ekvimolární směsi PLLA a PDLA. Vysoké krystalinity materiálu můžeme dosáhnout, pokud je D-laktidu v materiálu méně než 2 %. Amorfní polymery mohou být vyráběny za použití relativně velkého podílu D-laktidu (více než 15 %). Směs PLLA a PDLA může vést ke stereokomplexu s vyšším bodem tání než samostatný L- nebo D-polymer.[26, 29]

2 METODY CHARAKTERIZACE POVRCHU

Možností, kterými popsat topografii povrchu materiálu, je velké množství. V prvním přiblížení je lze rozdělit na kontaktní a bezkontaktní. Například v elektronových mikroskopických se využívá proud elektronů dopadajících na povrch materiálu. Tento paprsek reaguje s povrchem a vyvolá změnu energie, intenzity nebo úhlové distribuce, kterou zaznamenají čidla měřícího přístroje. [30]

2.1 Skenovací elektronová mikroskopie

Ve 30. letech minulého století bylo v důsledku nedostatečných zobrazovacích možností optických mikroskopů nutno přijít s metodou, která by posunula možnosti výzkumu. Prvním typem elektronového mikroskopu byl transmisní elektronový mikroskop (TEM), který vynalezli němci Max Knoll a Ernst Ruska roku 1931. Jednou z nejrozšířenějších metod elektronové mikroskopie je skenovací metoda. Ta byla představena roku 1937 Manfredem von Ardenem. K technickému rozvoji této metody ovšem hlavně přispěl až rozvoj elektrotechniky v druhé polovině 20. století. S komerčně použitelným přístrojem přišli až roku 1965 vědci z Cambridge. Skenovací elektronový mikroskop (SEM) se skládá z elektronové trysky, série elektromagnetických čoček a detektorů. Jeho struktura je znázorněna na Obr. 7.



Obr. 7 Struktura skenovacího elektronového mikroskopu [31]

Elektronová tryska se skládá ze tří částí, a to katody, Wehneltovy elektrody a anody. Tryska generuje proud elektronů. Ty jsou emitovány z katody vysokým urychlovacím na-

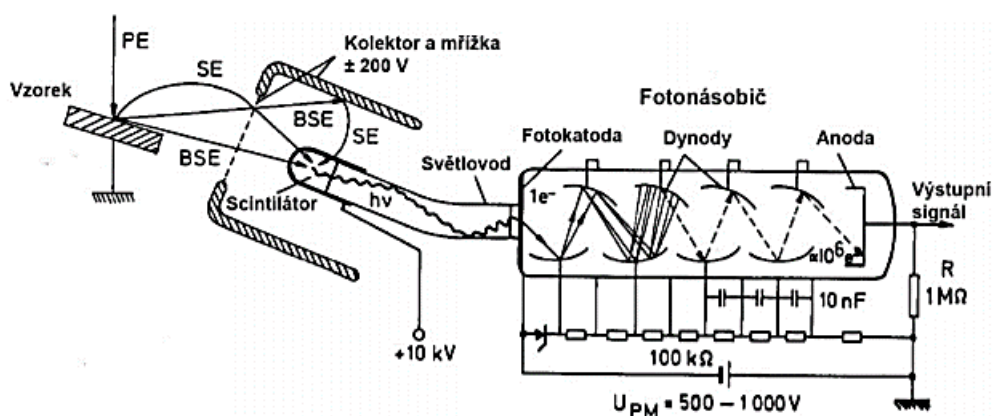
pětím. Urychlovací napětí souvisí s vlnovou délkou, a tedy i zobrazovacími schopnostmi. Tuto souvislost vystihuje Tab. 1 .

Tab. 1 *Vztah mezi urychlovacím napětím a rozlišením u TEM [32]*

Urychlovací napětí (kV)	Vlnová délka elektronu (nm)	Rozlišení (nm)
40	0,00601	0,56
60	0,00487	0,46
80	0,00418	0,39
100	0,00370	0,35
200	0,00251	0,24
500	0,00142	0,13

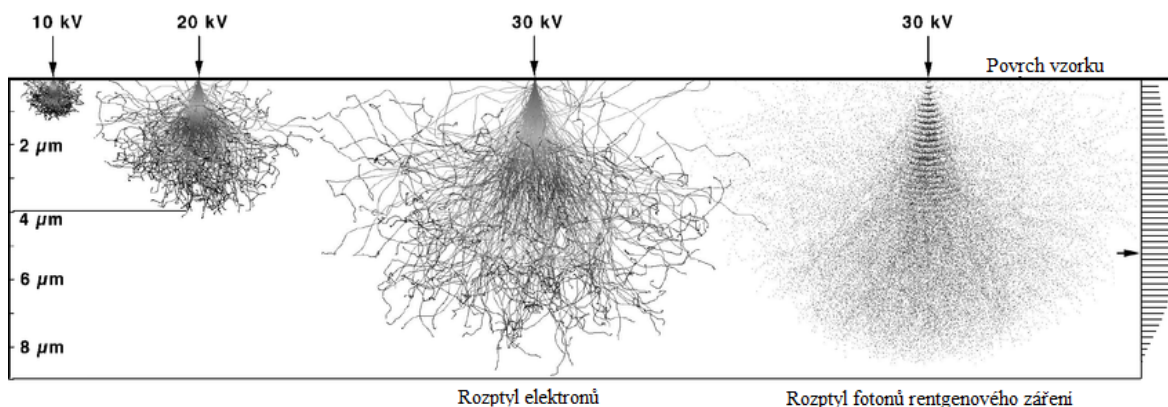
Wehneltova elektroda slouží ke stabilizaci proudu elektronů. Základními typy elektronových trysek jsou termoemisioní, která zahrnuje buď wolframové vlákno jako katodu nebo lanthan hexaboritou katodu. Wolframové vlákno bývá vyhříváno na teplotu přibližně 2 800 K. Tato vysoká teplota poskytuje elektronům dostatečnou kinetickou energii k překonání povrchové energetické bariéry vlákna. Intenzita paprsku elektronů je dána teplotou vlákna a urychlovacím napětím. Urychlovací napětí potřebné při použití wolframu je přibližně 4,5 eV. Více používanou katodou je ovšem lanthan hexaboritá (LaB_6), která potřebuje k uvolnění elektronů nižší teplotu i urychlovací napětí (asi 2 eV). Dalším typem elektronové trysky je Schottkyho emitör. Zde nejsou elektrony uvolňovány tepelnou energií, ale elektrickým polem. Jedná se opět o wolframovou katodu, kde se na hrotu nachází malá vrstvička oxidu zinečnatého. Intenzita elektronového paprsku z této katody je 10^4 x větší než u termoemise wolframu a 100 x větší než u LaB_6 . Elektromagnetické čočky se skládají z pouzdra obsahujícího oba póly jako solenoid. Ty při průchodu paprsku elektronů způsobují podle typu buď sférickou nebo chromatickou odchylku. Za elektronovou tryskou se nachází obvykle první a druhá kondenzorová čočka, která snižuje příčný průřez elektronového paprsku. Díky tomu je schopno měření zvládat rozlišení v nanometrech. Za kondenzorovými čočkami se nachází objektivová čočka. Ta by se dala také považovat za kondenzorovou, protože její funkce je opět zmenšit příčný průřez paprsku elektronů. Celý systém elektromagnetických čoček SEM zařízení zmenšuje počáteční paprsek z termoemisioního zdroje až 10^4 x a u Schottkyho zdroje asi 100 x. Skenování je řízeno podle vychýlení paprsku cívkami rastrů. Systém snímá povrch vzorku po liniích pomocí dvou párů elektromagnetických cívek. První pár ohýbá paprsek z optické dráhy mikroskopu. Druhý pár cívek ohýbá paprsek zpět na osu v bodě otáčení snímání. Elektrony uvolněné z povrchu vzorku jsou snímány detektory, které následně složí obraz povrchu vzorku.

V SEM zařízení se nachází několik druhů detektorů. Ty snímají zpětně odražené elektrony (BSE), sekundární elektrony (SE) a prošlé elektrony (TE). Dále mohou být snímány difrakce zpětně odražených elektronů (EBSD) nebo rentgenové záření (RTG), které slouží k analýze prvkového složení vzorků. Pro snímání se obvykle používá Everhart-Thornley (E-T) detektor. Klíčovou součástí detektoru je scintilátor, který zachycené elektrony pomocí urychlovacího napětí přibližně 12 kV mění na fotony. Ty jsou posílány na snímací disk, který je změněn na signál. Dalšími důležitými prvky detektoru jsou Faradayova klec a fotonásobič, jak můžeme vidět na Obr. 8.



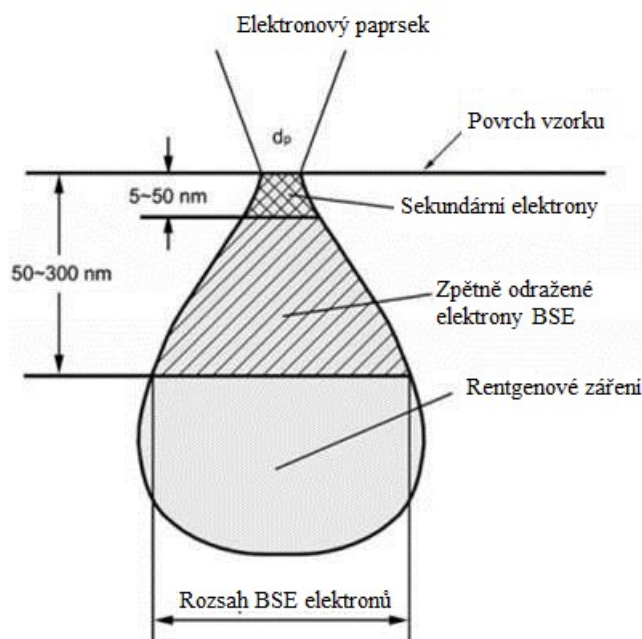
Obr. 8 Náskres struktury Everhart-Thornley detektoru [33]

Při dopadu paprsku elektronů na povrch vzorku jsou elektrony odraženy pod různými úhly v závislosti na struktuře povrchu. Trajektorie elektronu po odrazu je znázorněna na Obr. 9.



Obr. 9 Schéma trajektorie elektronu podle Monte Carlo simulace [34]

Konkrétní interakční hloubku vzorku popisuje Obr. 10, kde vidíme, že sekundární elektrony mají po nepružném odrazu energii pouze několik elektronvoltů a v interakční zóně mohou ze vzorku uniknout pouze z malé hloubky 5–50 nm. Naopak zpětně odražené elektrony mají vyšší energii, která jim umožňuje uniknout z mnohem větší hloubky vzorku.



Obr. 10 Interakční zóna elektronů pod povrchem vzorku [32]

Příprava vzorku není náročná, v mnoha případech musí být nevodivé vzorky potaženy vodivou vrstvičkou. Obvyklými požadavky na testovací vzorek jsou stabilita ve vakuu a pod elektronovým paprskem a absence cizorodých částic. U biologických vzorků se může provést před měřením dehydratace pro zbavení povrchu molekul vody.[32, 33]

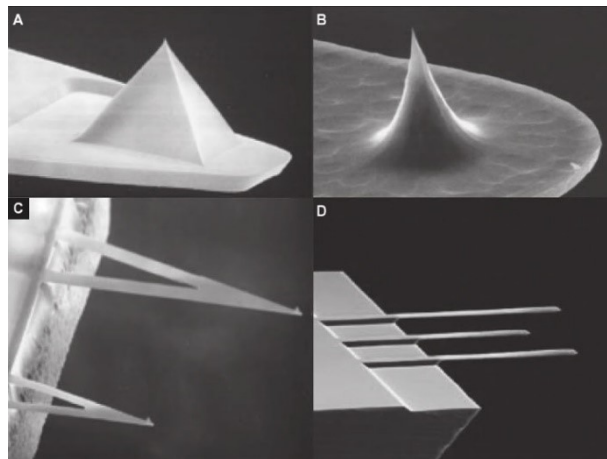
2.2 Mikroskopie atomárních sil

Tato mikroskopická metoda sloužící k trojrozměrnému zobrazení povrchu prostřednictvím působení sil mezi atomy studovaného materiálu a hrotu měřící sondy. Poprvé tuto techniku představili pánové Binning, Quate a Gerber roku 1986. Mikroskopie atomárních sil (*Atomic Force Microscopy* – AFM) používá raménko s hrotem, které rastruje povrch vzorku. U AFM není podmínkou vodivý vzorek, na rozdíl například od skenovací tunelové mikroskopie (STM). Raménko s hrotem tvoří nejpodstatnější část celého měřícího přístroje. Raménko, sloužící jako senzor působící síly. Další požadavky se odvíjí od způsobu použití, zda se jedná o kontaktní nebo bezkontaktní měření. U kontaktní režimu měření by raménko mělo být dostatečně ohebné, a tedy mít malou tuhost, naopak u bezkontaktní režimu se volí tuhá ramínka. Rozměry raménka se liší podle typu rozmezí délek 100–200 μm , šířky 10–40 μm a výšku do 2 μm . Horní strana raménka bývá potažena odrazivým materiálem například zlatem nebo hliníkem. Hroty jsou obvykle vyráběny ze Si_3N_4 nebo SiO_2 , s ohledem na jejich dobré mechanickým vlastnostem. Další důležitým aspektem je tvar hrotu v podobě pyramidy nebo tetraedru. Speciální typy hrotů se připravují například

z uhlíkových nanotrubiček, které zajišťují jemnější detekci změn povrchového reliéfu okolo 0,5 nm.

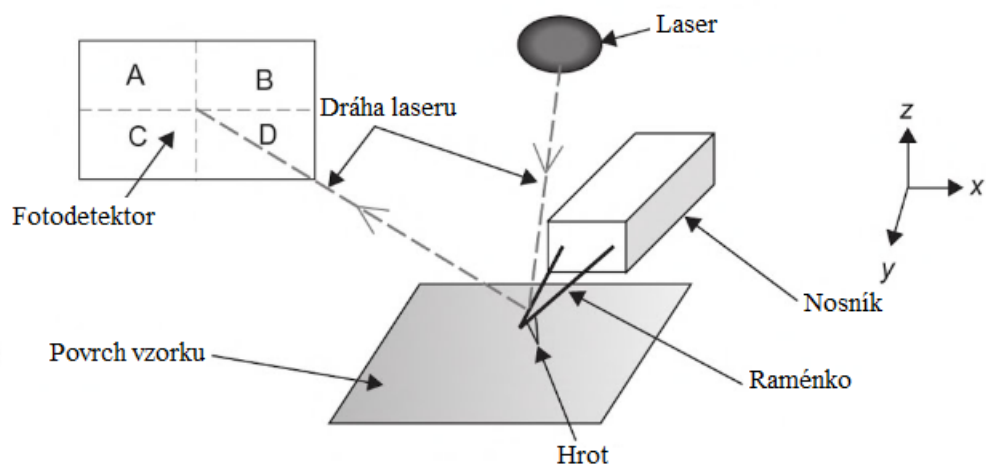
Na Obr. 11 je zobrazeno pomocí SEM několik typů hrotů a ramének.

- A – pyramidální tvar
- B – kuželová sonda s vysokým poměrem stran pro vysoké rozlišení
- C – raménka ve tvaru V pro kontaktní profilometrii
- D – série ramének o různých délkách



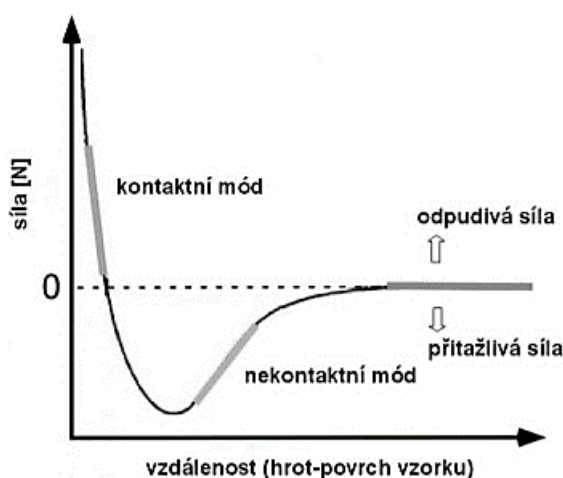
Obr. 11 Příklady typů hrotů a ramének [35]

Jednoduchý popis AFM přístroje je uveden na Obr. 12. Hrot s raménkem je připevněn na pohybujiícím se zařízení rastrujícím povrch vzorku. Výchylka raménka je snímána fotodetektorem. Ten snímá odražený paprsek laseru, namířeného na konec raménka. Z výchylky lze následně vyhodnocovat silové změny mezi hrotem a vzorkem.



Obr. 12 Jednoduchý nákres AFM zařízení [35]

Mezi hrotem, popřípadě raménkem a vzorkem může působit několik druhů sil. Hlavním faktorem určujícím tyto síly je vzdálenost od vzorku. Van der Waalsovy síly jsou nejvýznamnější a působí na sondu ve vzdálenostech již od desítek nanometrů. Kapilární síly se projevují v případě, kdy mezi hrotem a vzorkem dojde k mikrokontaktu způsobujícímu zárodek kondenzace kapaliny. Síly krátkého dosahu (Pauliho síly) jsou podmíněny atomární vzdáleností. Dochází zde k jevům, jako jsou Pauliho a iontové odpuzování, fyzikální sorpce a chemisorpce, kovová adheze, tření, elasticita, popřípadě plastická deformace. Na Obr. 13 můžeme vidět, jak se mění meziatomové síly v závislosti na vzdálenosti hrotu od povrchu vzorku.



Obr. 13 Závislost meziatomových sil na vzdálenosti hrotu od povrchu [35]

AFM zařízení může měřit vzorek několika způsoby, a to v kontaktním, bezkontaktním a v poklepovém režimu. Měření ovlivňuje i prostředí, ve kterém pracujeme. Měření lze provádět v definované atmosféře ve vakuu nebo v kapalině. [35]

2.2.1 Kontaktní režim

Při kontaktním režimu rastruje hrot povrch vzorku s jemným mechanickým kontaktem. Síly působící mezi povrchem a hrotem jsou odpudivé, viz. Obr. 13. Další síly působící na hrot v kontaktním režimu jsou kapilární a síly vycházející z vlastního raménka. Kontaktní režim může pracovat ve dvou módech. Jeden rastruje povrch s konstantní výškou a měří ohyb raménka. Druhý pracuje s konstantní silou a ohnutím raménka a je posunován vzorek nebo hrot ve směru osy z . [35, 36]

2.2.2 Bezkontaktní režim

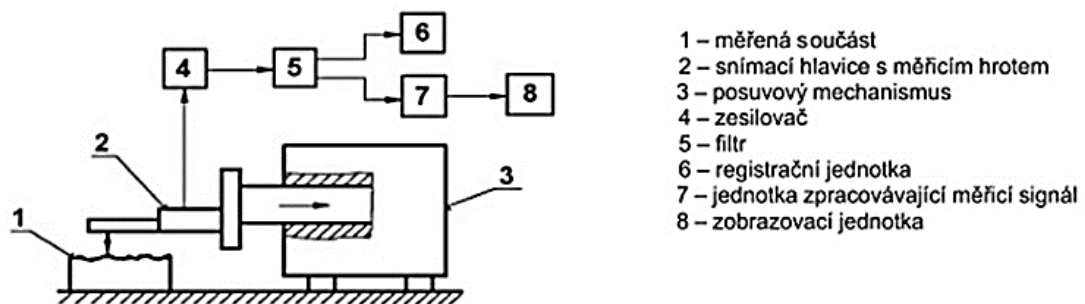
V bezkontaktním režimu kmitá raménko podobně jako v případě poklepového režimu, ale s mnohem menší amplitudou. Kmitání probíhá blízko rezonanční frekvence (50–400) kHz. Na hrot při této metodě působí Van der Waalovy elektrostatické síly. Hlavní výhodou této metody je, že hrot neporušuje povrch vzorku. Ten se pohybuje v řádech nanometrů nad ním. Síly působící v této vzdálenosti mají velikost přibližně 10^{-12} N. Vzdálenost je jedna z klíčových podmínek pro dosažení kvalitního rozlišení. Mezi nevýhody bezkontaktního měření patří náročnější kalibrace a horší rozlišení v porovnání ostatními. [37]

2.2.3 Poklepový režim

Jedná se o režim, při kterém raménko kmitá ve vzdálenosti pár desítek nanometrů nad povrchem vzorku a přerušovaně do něj jemně naráží (klepe). Měření opět probíhá blízko rezonanční frekvence a sledujeme změny amplitudy kmitání. Výhodou tohoto přístupu je, že je snížena pravděpodobnost narušení povrchové vrstvy zkoumaného vzorku a zároveň lze dosáhnout vysokého rozlišení podobně jako v případě kontaktního režimu. [37, 38]

2.3 Kontaktní profilometr

U kontaktní profilometrie dochází k přímému mechanickému kontaktu hrotu s povrchem. Obecné schéma tohoto zařízení můžeme vidět na Obr. 14.



Obr. 14 Schéma kontaktního profilometru [39]

Profilometr se skládá ze dvou hlavních částí. Mechanická část obsahuje rameno se snímacím hrotem a elektronická část převádí mechanické změny na elektrický signál, který je dále vyhodnocen v počítači. Jednou z nevýhod je, že v případě velkých přitlačných sil na hrot může docházet k narušení struktury zkoumaného vzorku, a tedy jeho znehodnocení. Další možnou nevýhodou může být dlouhá doba rastrování při použití velmi jemných hrotů. Urychlení měření při použití větších mezer rastrovaných linií může zase vést

k nepřesným výsledkům, kdy jsou jednotlivé mezery dokreslovány pomocí softwarů daných měřících zařízení. Základními údaji, které můžeme získat při měření jsou vlnitost (P) a drsnost (R) povrchu. Podle normy ČSN EN ISO 4287 je parametr s indexem **a** průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu a index **z** největší výška profilu, tedy součet nejvyššího výstupku a největší prohlubně v rozsahu délky vzorku. Drsnost je definována jako soubor nerovností povrchu s relativně malými vzdálenostmi. R parametry drsnosti jsou posuzovány z profilu drsnosti, který je odvozen ze základního profilu po odfiltrování dlouhovlnných složek profilu. P parametry vlnitosti získáváme ze základního profilu. [39]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

3 MĚŘENÉ VZORKY

Modely pro 3D tisk byly vytvořeny v programu Autodesk Inventor od firmy Autodesk. Tyto modely byly následně exportovány v STL formátu a upraveny ve slicerovacím programu. Pro SLA tisk byl použit program od výrobce použité tiskárny PreForm. Tento program je schopný podle matematických algoritmů navrhnout automaticky podpěry do míst, kde by hrozilo zhroucení tištěného vzorku. Pro FDM tisk byl použit program Cura od firmy Ultimaker.

3.1 Použité materiály

1. Grey Pro resin – tato pryskyřice se nabízí jako jedna ze základních variant použití vzhledem ke svým vlastnostem jako jsou vysoká přesnost, mírné prodloužení a nízké tečení.
2. Clear resin – čirá pryskyřice, která následným leštěním může dosáhnout téměř dokonalé transparentnosti. Využívá se obecně u výrobků pro optické mechanismy nebo části osvětlení. Mechanické vlastnosti a porovnání můžeme vidět v Tab. 2.

Tab. 2 Mechanické vlastnosti pryskyřic Grey Pro a Clear

	Grey Pro		Clear	
	Bez úprav	Po vytvrzení	Bez úprav	Po vytvrzení
Pevnost v tahu (MPa)	35	61	38	65
Modul pružnosti v tahu (GPa)	1,4	2,6	1,6	2,8
Prodloužení (%)	32,5	13	12	6,2
Modul pevnosti v ohybu (GPa)	0,94	2,2	1,25	2,2
Rázová houževnatost ($J.m^{-1}$)	x	18,7	16	25
Teplota tepelného průhybu při 1,82 MPA ($^{\circ}C$)	x	62,4	42,7	58,4
Teplota tepelného průhybu při 0,455 MPA ($^{\circ}C$)	x	77,5	49,7	73,1

(Hodnoty jsou uváděny výrobcem. K vytvrzení byl použit FormCure – 120 minut, 80 $^{\circ}C$).

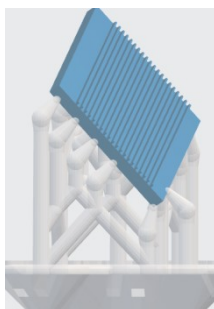
V následující tabulce jsou rozepsány mechanické a tepelné vlastnosti PLA vlákna pro tisk FDM

Tab. 3 *Mechanické a tepelné vlastnosti PLA vlákna od společnosti Ultimaker*

Průměr vlákna	2,85 ± 0,10 mm	Modul pružnosti v ohybu	3150,0 MPa
Maximální odchylka kulatosti	0,10 mm	Skelný přechod	~60 °C
Modul tažnosti	2346,5 MPa	Teplota tání	145–160 °C
Napětí v tahu na mezi kluzu	49,5 MPa	Tvrdost	83 (Shore D)
Protážení na mezi kluzu	3,3 %	Mez pevnosti v ohybu	103,0 MPa

3.2 Příprava vzorků a jejich tisk

Používané liniové rastry byly navrženy v programu Autodesk Inventor v několika různých rozměrech tištěných pylonů a převedeny do STL formátu v programu PreForm. Rozměry základny zůstávaly neměnné 1x1 cm. Měnila se velikosti mezer a výšky pylonů. Konečné rozměry vzorků byly stanoveny na 300 µm pro vysoký a 150 µm široký pylon s mezerami 300 µm. Na Obr. 15 je znázorněn model mřížky pro tisk pod úhlem. Vzorek je podepřen automaticky generovanými podpěrami v programu PreForm.

Obr. 15 *Model mřížky pro tisk pod úhlem*

Poznámky: V textu bude používán pojem „*pylon*“, který má v tomto případě význam liniového výčnělku obdélníkového průřezu.

Tisk probíhal z pryskyřic Grey Pro a Clear v tiskárně Formlabs Form 2, která je zobrazena na Obr. 16. Její specifikace, v nichž můžeme vyčíst jednotlivé parametry, jsou vypsány na Obr. 17.

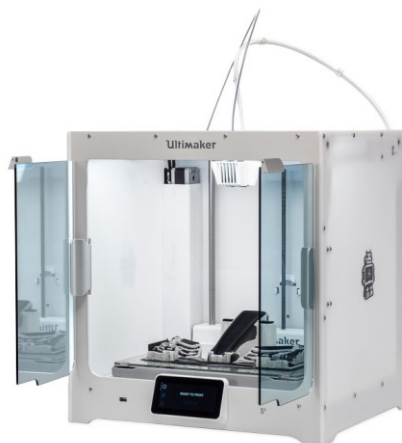


Obr. 16 Formlabs Form 2 s příslušenstvím [40]

Model 3D tiskárny	Formlabs Form 2
Technologie	SLA
Tiskový objem	145 × 145 × 175 mm
Výška vrstvy	25–300 µm (také podle zvoleného materiálu)
Průměr vytvrzovacího bodu	140 µm (laser)
Výkon laseru	250 mW
Ovládání	barevný dotykový displej
Podporované platformy	Windows (7 a vyšší), macOS X (10.6.8 a vyšší)
Podporované formáty dat	STL, OBJ
Přenos dat	WiFi, LAN, USB
Rozměry zařízení	350 × 330 × 520 mm

Obr. 17 Specifikace Formlabs Form 2 [40]

Následná úprava po tisku spočívala v oplachování vzorků od nevytvrzené pryskyřice pomocí isopropylalkoholu. Materiál GreyPro byl vymýván po dobu 15 minut a materiál Clear byl vymýván po dobu 10 minut podle doporučení výrobce. Po vymytí byly tištěné modely umístěny do vytvrzovací jednotky Formlabs Form Cure. GreyPro byl vytvrzován při 80 °C pod dobu 15 minut. Materiál s označením Clear byl vytvrzován při 60 °C po dobu 30 minut. Po vytisknutí byly vzorky vytvrzovány nejprve 15 minut ve FormWash a poté 15 minut ve FormCure při 80 °C. Po vytvrzení byly odstraněny podpěry a byla obroušena zadní strana mřížek pro snazší upevnění při následujících měřeních. Pro porovnání metod tisku, byly připraveny vzorky také na FDM 3D tiskárně Ultimaker S5, viz. Obr. 18.

Obr. 18 *Ultimaker S5* [40]

Na Obr. 19 jsou uvedeny parametry použité FDM tiskárny.

Model 3D tiskárny	Ultimaker S5
Technologie	FFF/FDM
Průměr tiskové struny	2,85 mm
Tiskový objem	330 × 240 × 300 mm
Výška vrstvy	tryska 0,25 mm: 60–150 μm tryska 0,4 mm: 20–200 μm tryska 0,8 mm: 20–600 μm
Počet extruderů	2, snadno vyměnitelné
Počet trysek	2, automatické přizvedávání neaktivní trysky
Průměr trysky	0,25 / 0,4 / 0,8 mm
Pracovní teplota trysky	180–280 °C
Vyhřívání podložky	20–140 °C
Materiál podložky	sklo
Vyrovnání podložky	automatické
Systém materiálů	otevřený i pro externí výrobce materiálů
Přímo podporované materiály	PLA, Tough PLA, Nylon, ABS, CPE, CPE+, PC, TPU 95A, PP, PVA, Breakaway

Obr. 19 *Specifikace Ultimaker S5* [41]

4 PRŮBĚH MĚŘENÍ

Pro charakterizaci povrchu vzorků byla použita skenující elektronová mikroskopie, kontaktní profilometrie, mikroskopie atomárních sil a goniometrie. Naměřená data byla zpracována v programech ImageJ navrženém společností Wayne Rasband, Gwyddion vydané Českým metrologickým institutem a Vision64 od Bruker Corporation.

4.1 Použité přístroje

Jako skenující elektronový mikroskop (SEM) byl použit Phenom Pro od společnosti Phenom World zobrazený na Obr. 20. Vzorky byly upevňovány na terčík v držáku oboustrannou uhlíkovou páskou. Povrch vzorků byl charakterizován při urychlovacím napětí 10 kV. Snímky povrchu byly pořizovány při zvětšení 285x (zobrazovaná oblast 947x947 μm) a 2000x (134x134 μm) v režimu full. Při zvětšení 285x bylo provedeno také topografické snímání povrchu. Na závěr byl každý vzorek snímán ve speciálním nastavci při pohledu z boku, tak aby byl patrný profilový průřez daným vzorkem.



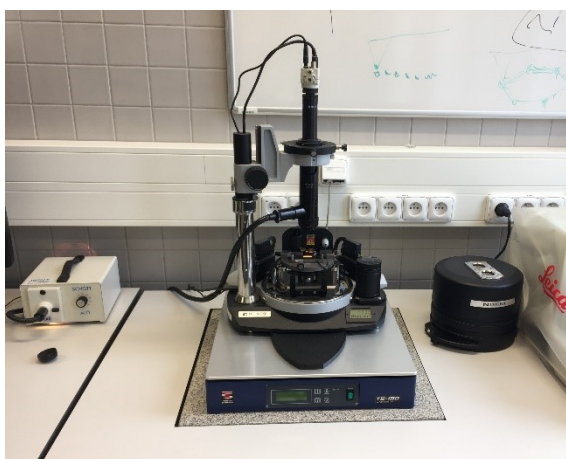
Obr. 20 Použitý elektronový mikroskop Phenom Pro

Kontaktní profilometrie byla měřena pomocí zařízení Dektak XT od společnosti Bruker, viz. Obr. 21. Profilometr snímal povrch hrotem o poloměru křivosti 12,5 μm s přítlakem 1 mg. Měřená délka povrchu byla nastavena na 5 000 μm a rychlost posuvu 100 $\mu\text{m/s}$. Každý vzorek byl měřen třikrát.



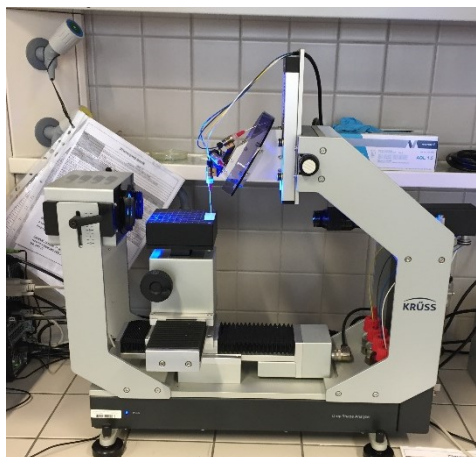
Obr. 21 Použitý kontaktní profilometr DektakXT

K charakterizaci povrchu tištěných vzorků byla použita mikroskopie atomárních sil (AFM). Vzorky byly měřeny pomocí zařízení NTEGRA Prima od společnosti NT-MDT, viz. Obr. 22. Měření probíhalo v poklepovém režimu ve vzduchu na ploše $100 \times 100 \mu\text{m}$ s rozlišením 256×256 dpi. Pro měření byla použita NSG01 silikon nitridová sonda.



Obr. 22 NTEGRA Prima

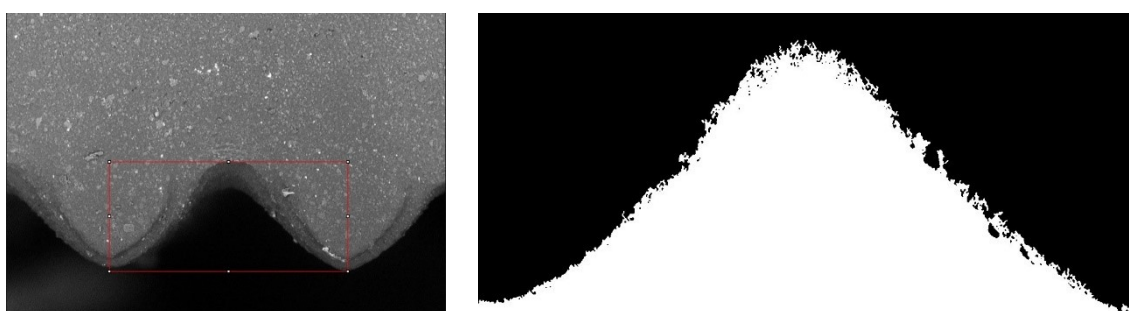
Kontaktní úhel smáčení byl měřen na přístroji Krüss Drop Shape Analyzer DSA30 vyrobený firmou Krüss, viz. Obr. 23. Objem nanášených kapek byl $2 \mu\text{l}$. Měření probíhalo při pokojové teplotě 23°C a relativní vlhkosti vzduchu 50%. Na každém vzorku bylo měřeno 10 kapek ultračisté vody.



Obr. 23 Použité zařízení pro měření kontaktních úhlů smáčení Krüss Drop Shape Analyzer DSA30

4.2 Zpracování měření

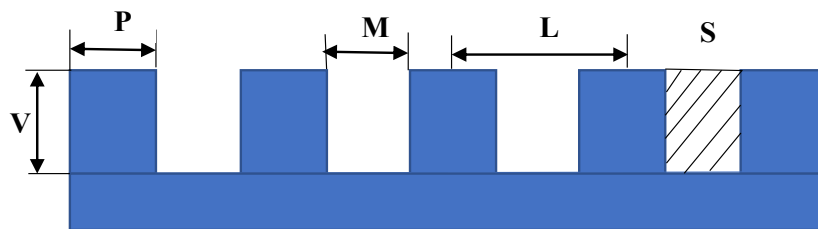
V programu ImageJ byly nejprve ořezány všechny snímky z elektronového mikroskopu a vloženo měřítko. Dále pak byla pomocí tohoto programu provedena obrazová analýza spočívající v určení skutečné volné plochy mezi jednotlivými pylony, mimo to byla měřena vzdálenost středů jednotlivých pylonů, viz. Obr. 24. Vision64 od společnosti Bruker sloužil k nastavení parametrů měření zařízením Dektak XT a poté k vyhodnocení získaných dat. Pro studované vzorky byly sledovány parametry vlnitosti P_a a P_z . U plochých vzorků byly stanoveny hodnoty parametrů drsnosti R_a a P_z z AFM dat pomocí programu Gwyddion Parametry drsnosti byly hodnoceny podle normy ČSN EN ISO 4287. [42]



Obr. 24 Postup stanovování volné plochy mezi pylony a vzdálenosti středu jednotlivých pylonů pomocí programu ImageJ

4.3 Výsledky

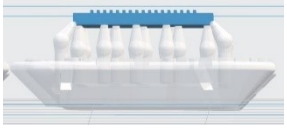
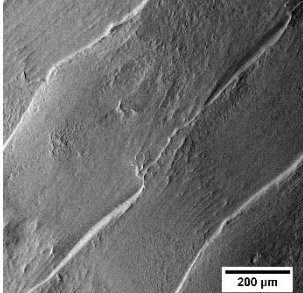
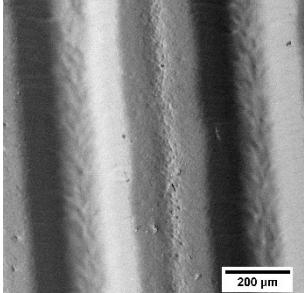
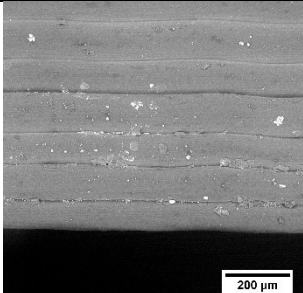
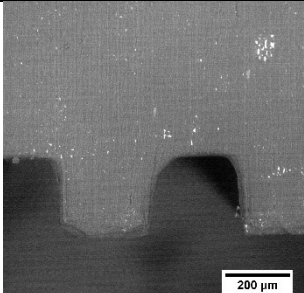
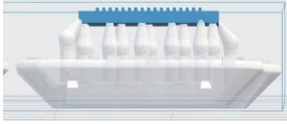
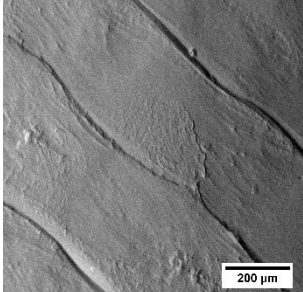
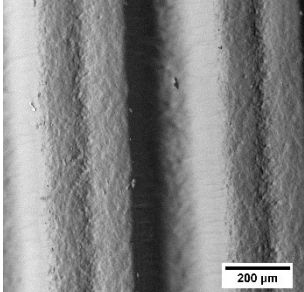
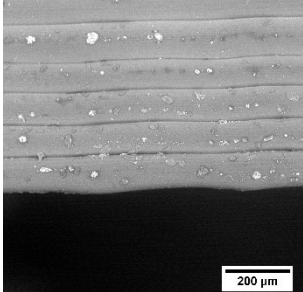
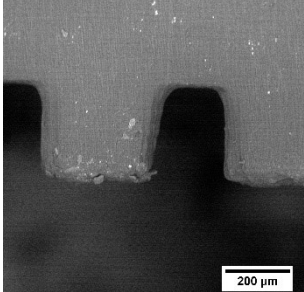
V tabulkách 3 a 4 jsou na snímcích z elektronového mikroskopu porovnány kvality čtyř typů vzorků připravených dvěma různými způsoby tisku (FDM a SLA). V dalších tabulkách jsou shrnuty a porovnány získané výsledky z charakterizace SLA tištěných vzorků z dvou rozdílných materiálů (pryskyřic Grey Pro a Clear). V jednotlivých sloupcích tabulek jsou zobrazeny snímky ze SEM. Z vyhodnocených dat získaných pomocí kontaktní profilometrie byly stanoveny parametry charakterizující maximální převýšení (P_z) a vlnitost povrchu (P_a). Mimo to jsou zde uvedeny výsledky z obrazové analýzy provedené pomocí programu ImageJ, které porovnávají požadovanou (S požadovaná) a skutečnou plochu (S skutečná) mezer mezi výstupky v jejich příčném řezu. Dále je porovnávána pomocí parametru L požadovaná a skutečná vzdálenost mezi středy vytištěných výčnělků. Význam jednotlivých porovnávaných parametrů je uveden na následujícím přehledovém obrázku Obr. 25.



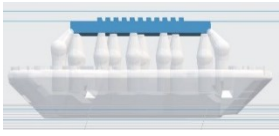
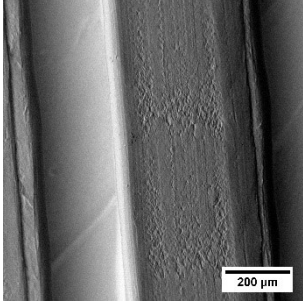
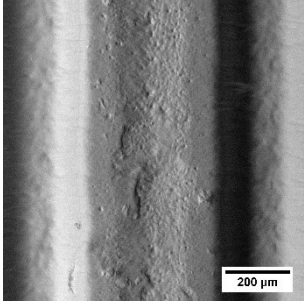
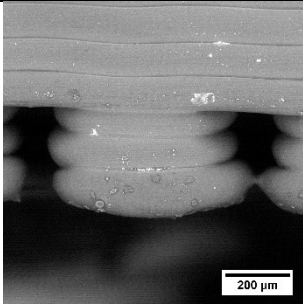
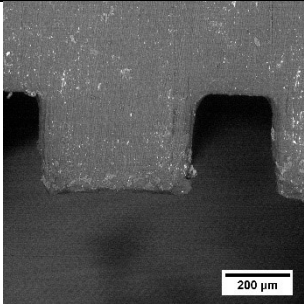
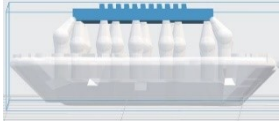
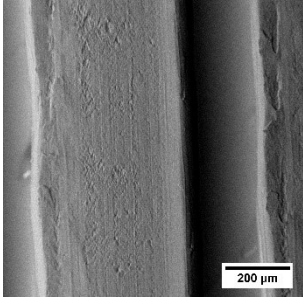
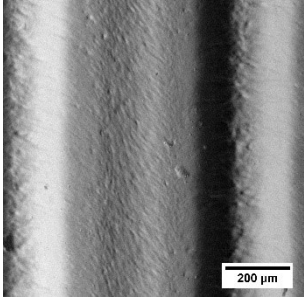
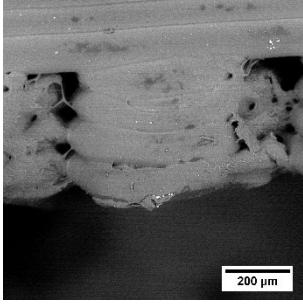
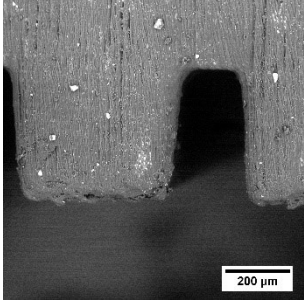
Obr. 25 Význam požadovaných modelových parametrů pro 3D SLA tisk

Z porovnání v tabulkách 4 a 5 je patrné, že pomocí FDM tisku není možné připravit struktury srovnatelné svou kvalitou s těmi, které byly vytištěny pomocí SLA. Z tohoto důvodu byly veškeré další experimenty věnovány právě přípravě a charakterizaci vzorků z SLA tištěných pod různými úhly s rozdílnou výškou tiskové vrstvy. Veškeré vstupní modely pro tisk pomocí SLA měly následující srovnatelné parametry: Výška pylonu $V = 300 \mu\text{m}$, šířka pylonu $P = 150 \mu\text{m}$, šířka mezery $M = 300 \mu\text{m}$ viz. Obr. 25.


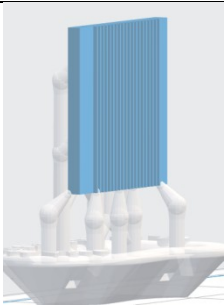
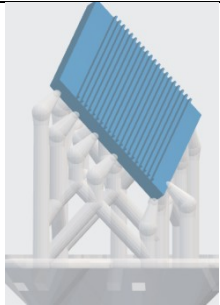
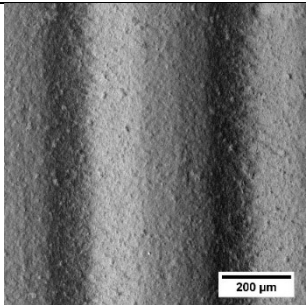
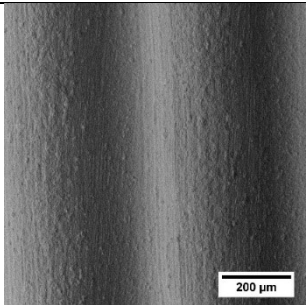
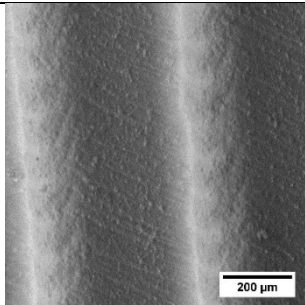
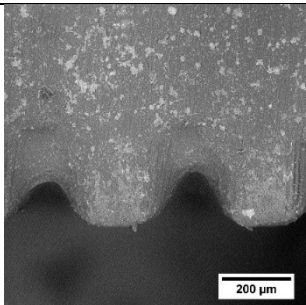
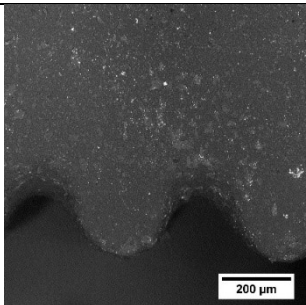
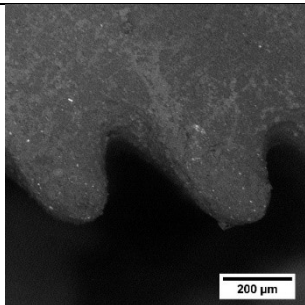
Tab. 4 SEM porovnání vzorků tištěných pomocí FDM a SLA. Pro FDM byl použito PLA a pro SLA pryskyřice s označení Clear, tisková vrstva 25 μm .

 <p>Výška pylonu $V = 300 \mu\text{m}$ Šířka pylonu $P = 250 \mu\text{m}$ Šířka mezery $M = 300 \mu\text{m}$</p>	
 <p>200 μm FDM</p>	 <p>200 μm SLA</p>
 <p>200 μm FDM – pohled z boku</p>	 <p>200 μm SLA pohled z boku</p>
 <p>Výška pylonu $V = 300 \mu\text{m}$ Šířka pylonu $P = 250 \mu\text{m}$ Šířka mezery $M = 300 \mu\text{m}$</p>	
 <p>200 μm FDM</p>	 <p>200 μm SLA</p>
 <p>200 μm FDM pohled z boku</p>	 <p>200 μm SLA pohled z boku</p>


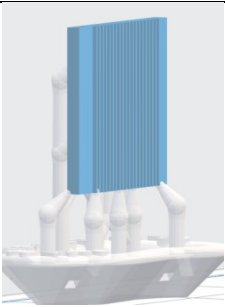
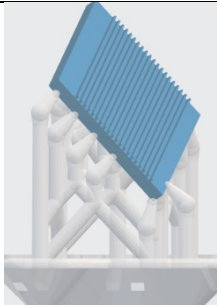
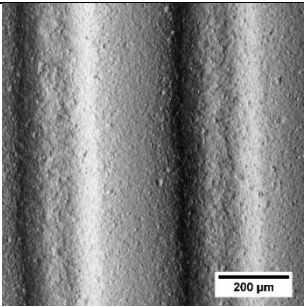
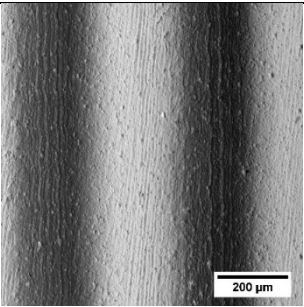
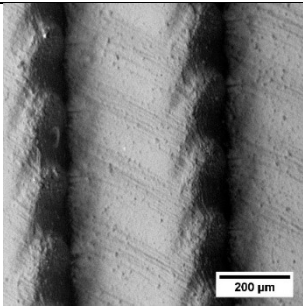
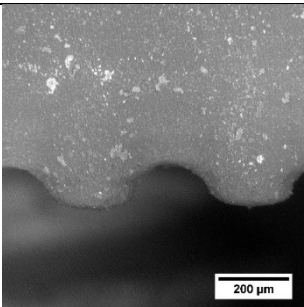
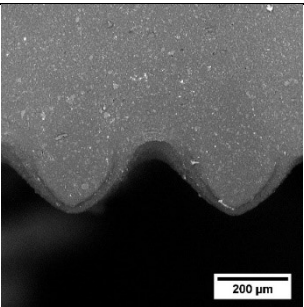
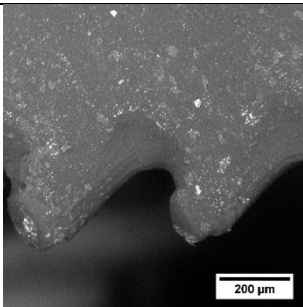
Tab. 5 SEM porovnání vzorků tištěných pomocí FDM a SLA. Pro FDM byl použito PLA a pro SLA pryskyřice s označení Clear, tisková vrstva 25 μm .

 <p>Výška pylonu $V = 300 \mu\text{m}$ Šířka pylonu $P = 400 \mu\text{m}$ Šířka mezery $M = 300 \mu\text{m}$</p>	
 <p>200 μm FDM</p>	 <p>200 μm SLA</p>
 <p>200 μm FDM pohled z boku</p>	 <p>200 μm SLA pohled z boku</p>
 <p>Výška pylonu $V = 400 \mu\text{m}$ Šířka pylonu $P = 400 \mu\text{m}$ Šířka mezery $M = 300 \mu\text{m}$</p>	
 <p>200 μm FDM</p>	 <p>200 μm SLA</p>
 <p>200 μm FDM pohled z boku</p>	 <p>200 μm SLA pohled z boku</p>


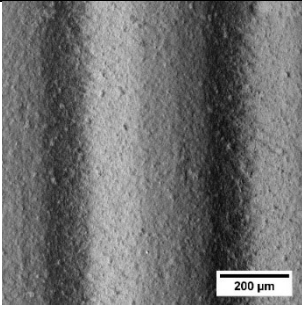
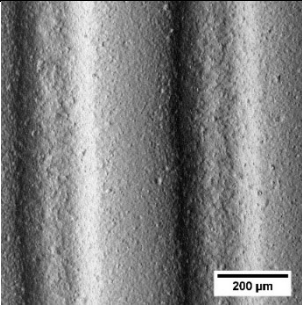
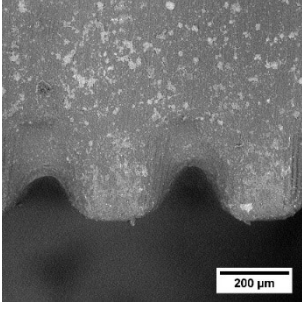
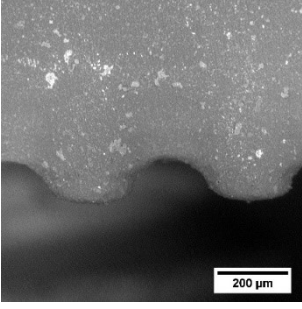
Tab. 6 Naměřené hodnoty pro vzorky vytištěné z Grey Pro resin – 50 μm vrstvení. První řada obrázků ze SEM = pohled ze shora, druhá = pohled z boku. SLA tisk.

Materiál: Grey Pro resin Výška tiskové vrstvy: 50 μm		
Horizontální tisk	Svislý tisk	Tisk pod úhlem
		
		
		
Měřená Pa = $(31,5 \pm 1,7) \mu\text{m}$	Měřená Pa = $(55,3 \pm 0,9) \mu\text{m}$	Měřená Pa = $(61 \pm 2) \mu\text{m}$
Měřené Pz = $(147 \pm 9) \mu\text{m}$ Požadované Pz = 300 μm	Měřené Pz = $(188,9 \pm 1,9) \mu\text{m}$ Požadované Pz = 300 μm	Měřené Pz = $(223 \pm 14) \mu\text{m}$ Požadované Pz = 300 μm
Měřená S = 44 241,02 μm^2 Požadovaná S = 90 000 μm^2	Měřená S = 42 385,63 μm^2 Požadovaná S = 90 000 μm^2	Měřená S = 87 200,13 μm^2 Požadovaná S = 90 000 μm^2
Měřená L = 417,32 μm Požadovaná L = 450 μm	Měřená L = 465,12 μm Požadovaná L = 450 μm	Měřená L = 470,24 μm Požadovaná L = 450 μm

Tab. 7 Naměřené hodnoty pro vzorky vytištěné z Grey Pro resin – 100 μm vrstvení. První řada obrázků ze SEM = pohled ze shora, druhá = pohled z boku. SLA tisk.


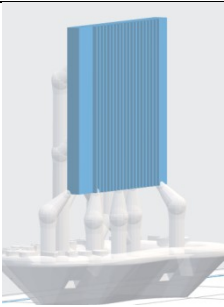
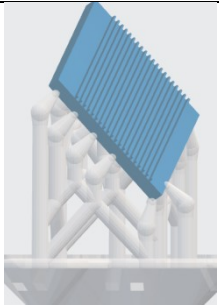
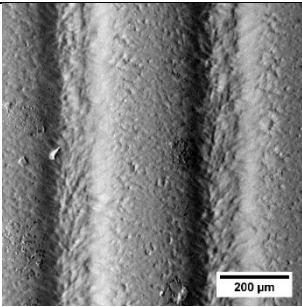
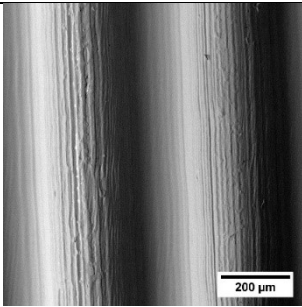
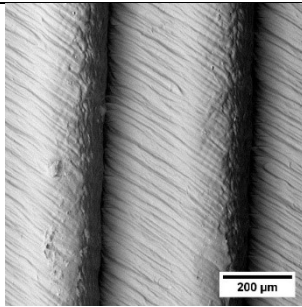
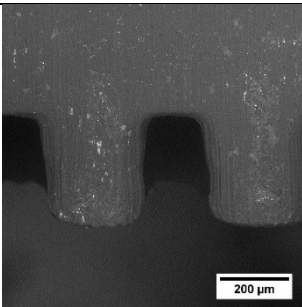
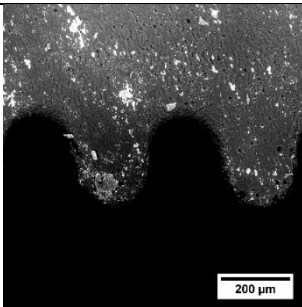
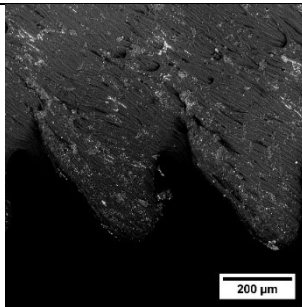
Materiál: Grey Pro resin		
Výška tiskové vrstvy: 100 μm		
Horizontální tisk	Svislý tisk	Tisk pod úhlem
		
		
		
Měřená Pa = (34,9±0,9) μm	Měřená Pa = (43,4±0,8) μm	Měřená Pa = (59,6±0,4) μm
Měřené Pz = (160±6) μm Požadované Pz = 300 μm	Měřené Pz = (181,1±1,6) μm Požadované Pz = 300 μm	Měřené Pz = (225±6) μm Požadované Pz = 300 μm
Měřená S = 32 543,29 μm^2 Požadovaná S = 90 000 μm^2	Měřená S = 58 157,70 μm^2 Požadovaná S = 90 000 μm^2	Měřená S = 62 495,24 μm^2 Požadovaná S = 90 000 μm^2
Měřená L = 451,23 μm Požadovaná L = 450 μm	Měřená L = 435,95 μm Požadovaná L = 450 μm	Měřená L = 412,63 μm Požadovaná L = 450 μm

Tab. 8 Porovnání výsledků pro vzorky vytištěné z Grey Pro resin při horizontálním tisku. První řada obrázků ze SEM = pohled ze shora, druhá = pohled z boku. SLA tisk.


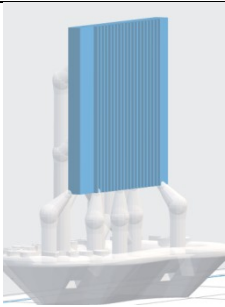
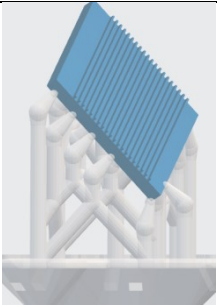
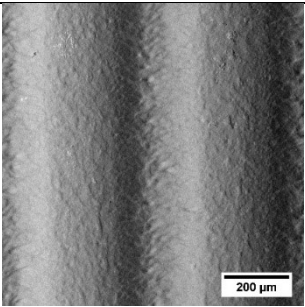
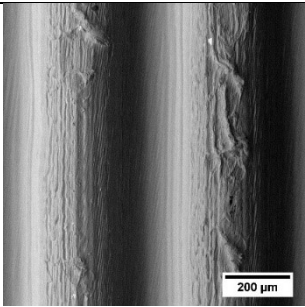
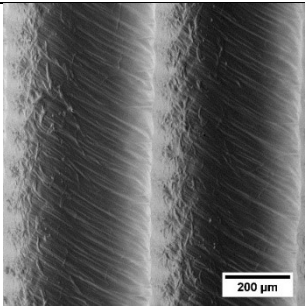
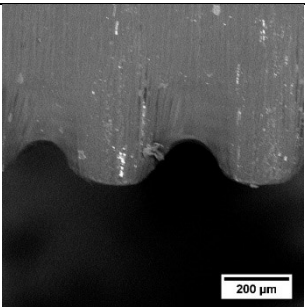
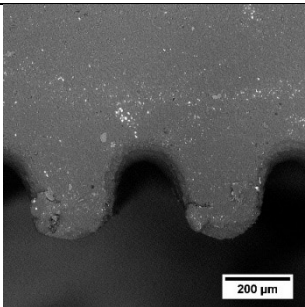
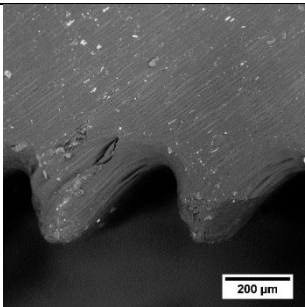
Materiál: Grey Pro resin Směr tisku: Horizontální	
Výška tiskové vrstvy 50 μm	Výška tiskové vrstvy 100 μm
	
	
Měřená Pa = (31,5±1,7) μm	Měřená Pa = (34,9±0,9) μm
Měřené Pz = (147±9) μm Požadované Pz = 300 μm	Měřené Pz = (160±6) μm Požadované Pz = 300 μm
Měřená S = 44 241,02 μm ² Požadovaná S = 90 000 μm ²	Měřená S = 32 543,29 μm ² Požadovaná S = 90 000 μm ²
Měřená L = 417,32 μm Požadovaná L = 450 μm	Měřená L = 451,23 μm Požadovaná L = 450 μm

Souhrnné porovnání vzorků uvedené v tab. 7 bylo provedeno pouze vzorky tištěné v horizontálním směru. Jak bude ukázáno níže, právě v tomto směru se podařilo nejlépe reprodukovat požadovaný tiskový model.


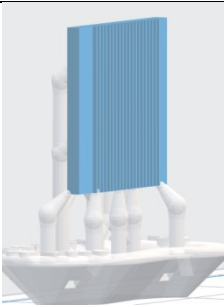
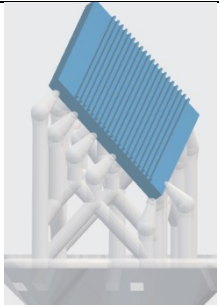
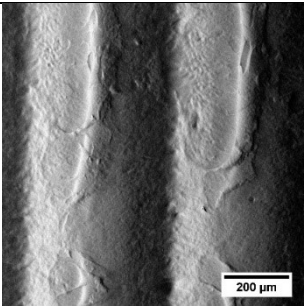
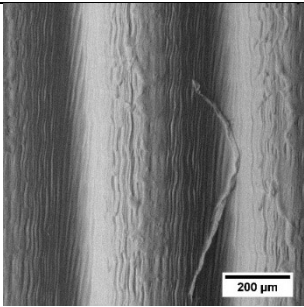
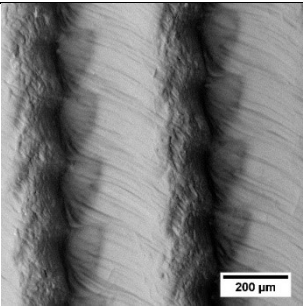
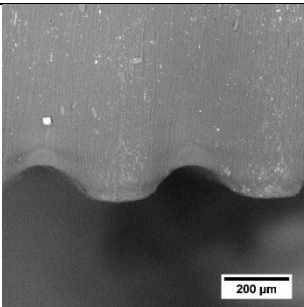
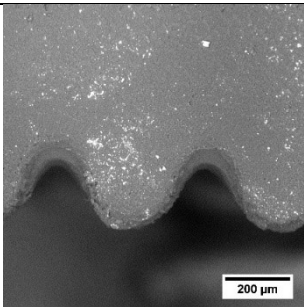
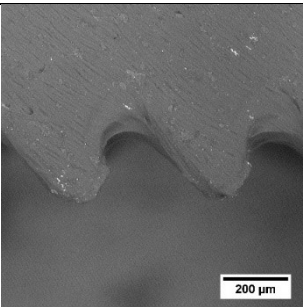
Tab. 9 Naměřené hodnoty pro vzorky vtištěné z Clear resin – 25 μm vrstvení. První řada obrázků ze SEM = pohled ze shora, druhá = pohled z boku. SLA tisk.

Materiál: Clear resin		
Výška tiskové vrstvy: 25 μm		
Horizontální tisk	Svislý tisk	Tisk pod úhlem
		
		
		
Měřená Pa = (27,4 \pm 0,7) μm	Měřená Pa = (82,3 \pm 0,9) μm	Měřená Pa = (65,9 \pm 0,8) μm
Měřené Pz = (127,7 \pm 0,8) μm Požadované Pz = 300 μm	Měřené Pz = (273,4 \pm 1,5) μm Požadované Pz = 300 μm	Měřené Pz = (245 \pm 11) μm Požadované Pz = 300 μm
Měřená S = 96 066,71 μm^2 Požadovaná S = 90 000 μm^2	Měřená S = 66 359,23 μm^2 Požadovaná S = 90 000 μm^2	Měřená S = 83 432,73 μm^2 Požadovaná S = 90 000 μm^2
Měřená L = 492,92 μm Požadovaná L = 450 μm	Měřená L = 427,12 μm Požadovaná L = 450 μm	Měřená L = 426,19 μm Požadovaná L = 450 μm

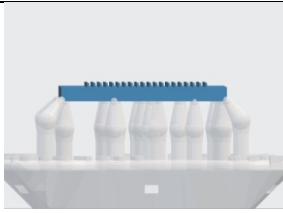
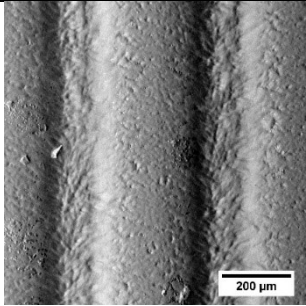
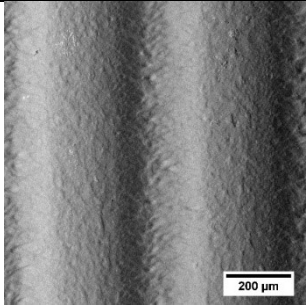
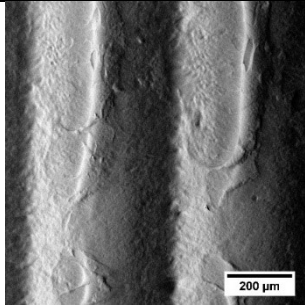
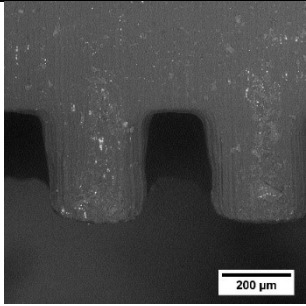
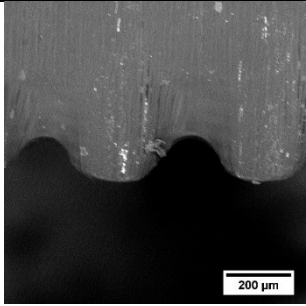
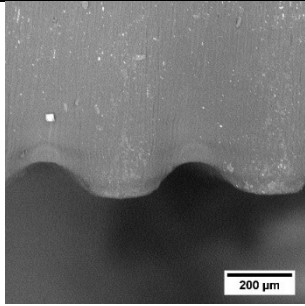
Tab. 10 Naměřené hodnoty pro vzorky vytištěné z Clear resin – 50 μm vrstvení. První řada obrázků ze SEM = pohled ze shora, druhá = pohled z boku. SLA tisk.

Materiál: Clear resin		
Výška tiskové vrstvy: 50 μm		
Horizontální tisk	Svislý tisk	Tisk pod úhlem
		
		
		
Měřená Pa = $(32,8 \pm 0,6) \mu\text{m}$	Měřená Pa = $(78,9 \pm 0,9) \mu\text{m}$	Měřená Pa = $(64,3 \pm 0,8) \mu\text{m}$
Měřené Pz = $(145 \pm 6) \mu\text{m}$ Požadované Pz = 300 μm	Měřené Pz = $(278 \pm 8) \mu\text{m}$ Požadované Pz = 300 μm	Měřené Pz = $(236 \pm 8) \mu\text{m}$ Požadované Pz = 300 μm
Měřená S = 33 386,91 μm^2 Požadovaná S = 90 000 μm^2	Měřená S = 51 111,59 μm^2 Požadovaná S = 90 000 μm^2	Měřená S = 50 782,61 μm^2 Požadovaná S = 90 000 μm^2
Měřená L = 431,26 μm Požadovaná L = 450 μm	Měřená L = 439,09 μm Požadovaná L = 450 μm	Měřená L = 431,38 μm Požadovaná L = 450 μm

Tab. 11 Naměřené hodnoty pro vzorky vytištěné z Clear resin – 100 μm vrstvení. První řada obrázků ze SEM = pohled ze shora, druhá = pohled z boku. SLA tisk.

Materiál: Clear resin		
Výška tiskové vrstvy: 100 μm		
Horizontální tisk	Svislý tisk	Tisk pod úhlem
		
		
		
Měřená Pa = (29±5) μm	Měřená Pa = (54,9±0,6) μm	Měřená Pa = (56,8±0,3) μm
Měřené Pz = (156±29) μm Požadované Pz = 300 μm	Měřené Pz = (210±8) μm Požadované Pz = 300 μm	Měřené Pz = (211±11) μm Požadované Pz = 300 μm
Měřená S = 25 279,49 μm^2 Požadovaná S = 90 000 μm^2	Měřená S = 45 793,34 μm^2 Požadovaná S = 90 000 μm^2	Měřená S = 43 954,37 μm^2 Požadovaná S = 90 000 μm^2
Měřená L = 430,05 μm Požadovaná L = 450 μm	Měřená L = 430,11 μm Požadovaná L = 450 μm	Měřená L = 414,63 μm Požadovaná L = 450 μm

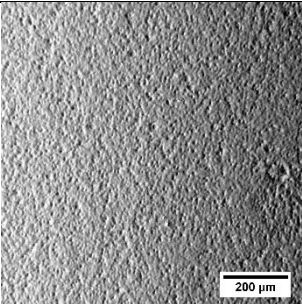
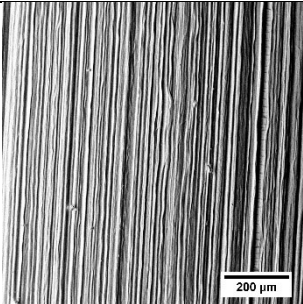
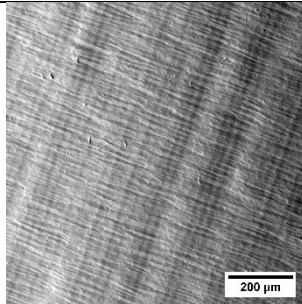
Tab. 12 Porovnání měření mezi vzorky vytištěnými z Clear resin při horizontálním směru SLA tisku. První řada obrázků ze SEM = pohled ze shora, druhá = pohled z boku.

Materiál Clear resin Směr tisku: Horizontální			
Výška tiskové vrstvy 25 μm	Výška tiskové vrstvy 50 μm	Výška tiskové vrstvy 100 μm	
			
			
Měřená Pa = $(27,4 \pm 0,7) \mu\text{m}$	Měřená Pa = $(32,8 \pm 0,6) \mu\text{m}$	Měřená Pa = $(29 \pm 5) \mu\text{m}$	
Měřené Pz = $(127,7 \pm 0,8) \mu\text{m}$ Požadované Pz = 300 μm	Měřené Pz = $(145 \pm 6) \mu\text{m}$ Požadované Pz = 300 μm	Měřené Pz = $(156 \pm 29) \mu\text{m}$ Požadované Pz = 300 μm	
Měřená S = 96 066,71 μm^2 Požadovaná S = 90 000 μm^2	Měřená S = 33 386,91 μm^2 Požadovaná S = 90 000 μm^2	Měřená S = 25 279,49 μm^2 Požadovaná S = 90 000 μm^2	
Měřená L = 492,92 μm Požadovaná L = 450 μm	Měřená L = 431,26 μm Požadovaná L = 450 μm	Měřená L = 430,05 μm Požadovaná L = 450 μm	

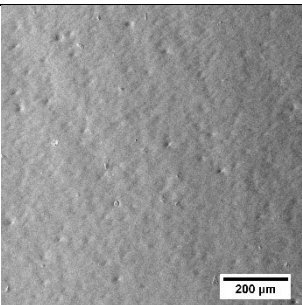
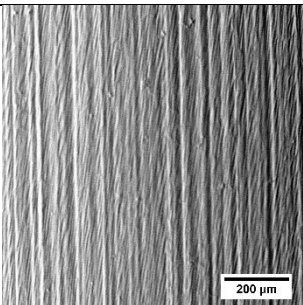
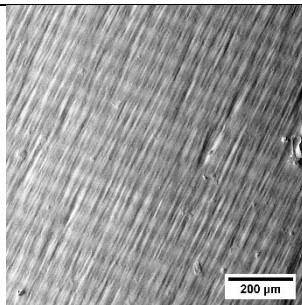
Další tabulky zobrazují snímky plochých vzorků tištěných pomocí SLA ze SEM, výsledky z měření pomocí kontaktní profilometrie a goniometrických měření. Za nimi následují přehledové tabulky s výsledky z měření pomocí AFM. Ze získaných dat měření kontaktním profilometrem byly vyhodnoceny mimo maximálního převýšení Pz rovněž parametry po-

vrchové drsnosti Ra. Ploché vzorky byly tištěny záměrně, za účelem zjištění parametrů drsnosti s následnou možností měření změn smáčecích charakteristik povrchů vodou.

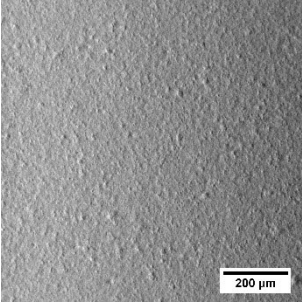
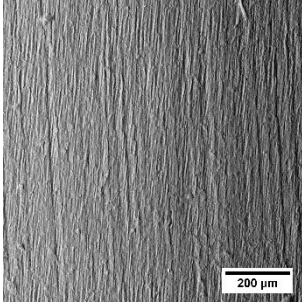
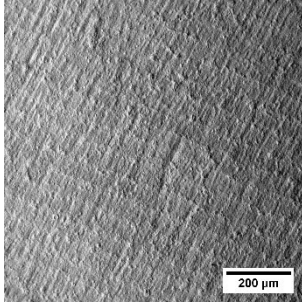
Tab. 13 Porovnání plochých vzorků vytištěných pomocí SLA z Clear resin (vrstva 25 μm). Úhle smáčení vodou. SEM pohled ze shora.

Materiál: Clear resin Výška tiskové vrstvy: 25 μm		
Horizontální tisk	Svislý tisk	Tisk pod úhlem
		
Ra = $(0,5 \pm 0,2) \mu\text{m}$ Pz = $(2,7 \pm 1,3) \mu\text{m}$ Úhel smáčení = $(65 \pm 3)^\circ$	Ra = $(0,67 \pm 0,03) \mu\text{m}$ Pz = $(3,1 \pm 0,3) \mu\text{m}$ Úhel smáčení = $(67 \pm 3)^\circ$	Ra = $(1,31 \pm 0,08) \mu\text{m}$ Pz = $(6,4 \pm 0,3) \mu\text{m}$ Úhel smáčení = $(60 \pm 8)^\circ$

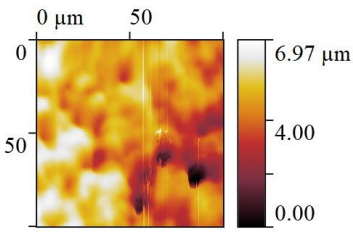
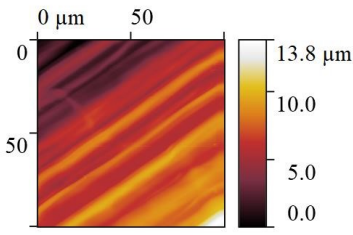
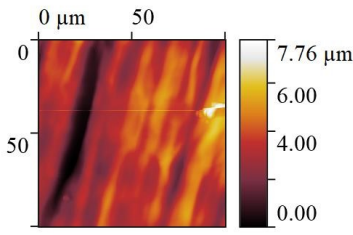
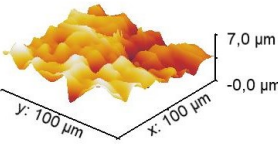
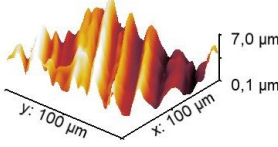
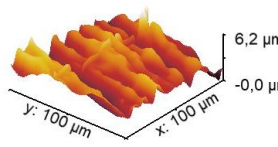
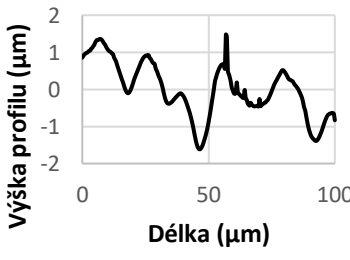
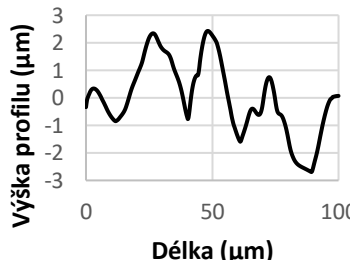
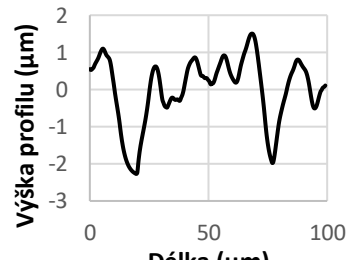
Tab. 14 Porovnání plochých vzorků vytištěných pomocí SLA z Clear resin (vrstva 50 μm). Úhle smáčení vodou. SEM pohled ze shora.

Materiál: Clear resin Výška tiskové vrstvy: 50 μm		
Horizontální tisk	Svislý tisk	Tisk pod úhlem
		
Ra = $(0,86 \pm 0,5) \mu\text{m}$ Pz = $(4,1 \pm 0,4) \mu\text{m}$ Úhel smáčení = $(65 \pm 1)^\circ$	Ra = $(0,81 \pm 0,05) \mu\text{m}$ Pz = $(3,9 \pm 0,4) \mu\text{m}$ Úhel smáčení = $(71 \pm 9)^\circ$	Ra = $(1,32 \pm 0,11) \mu\text{m}$ Pz = $(6,7 \pm 0,3) \mu\text{m}$ Úhel smáčení = $(74 \pm 4)^\circ$

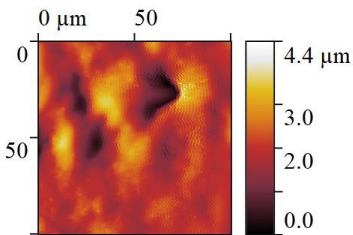
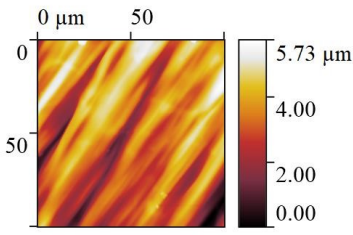
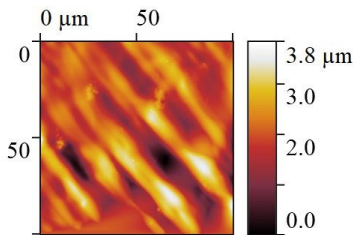
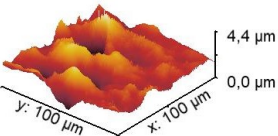
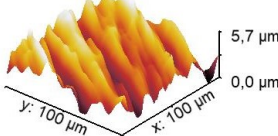
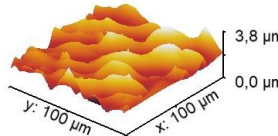
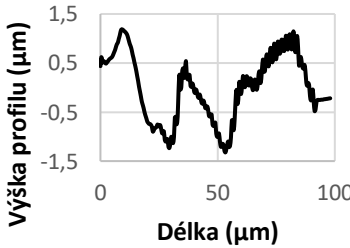
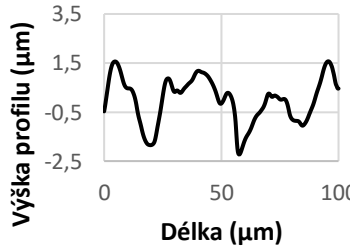
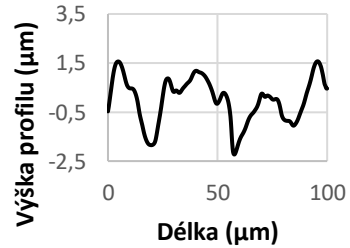
Tab. 15 Porovnání plochých vzorků vytištěných pomocí SLA z Grey Pro resin (vrstva 50 μm). Úhle smáčení vodou. SEM pohled ze shora.

Materiál: Grey Pro resin Výška tiskové vrstvy: 50 μm		
Horizontální tisk	Svislý tisk	Tisk pod úhlem
		
$R_a = (0,67 \pm 0,19) \mu\text{m}$ $P_z = (3,9 \pm 1,3) \mu\text{m}$ Úhel smáčení = $(70 \pm 8)^\circ$	$R_a = (1,08 \pm 0,09) \mu\text{m}$ $P_z = (5,1 \pm 0,3) \mu\text{m}$ Úhel smáčení = $(73 \pm 4)^\circ$	$R_a = (1,7 \pm 0,3) \mu\text{m}$ $P_z = (9 \pm 2) \mu\text{m}$ Úhel smáčení = $(76,9 \pm 1,8)^\circ$

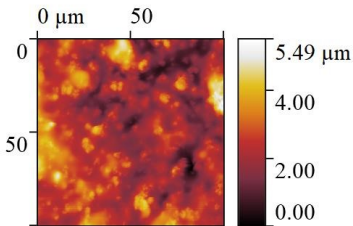
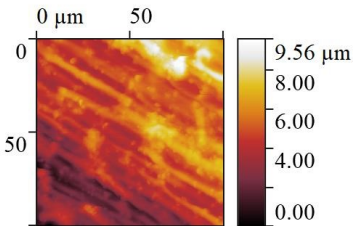
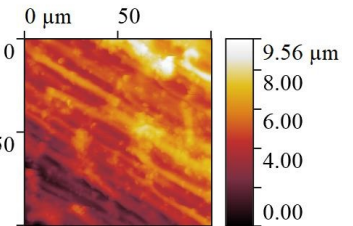
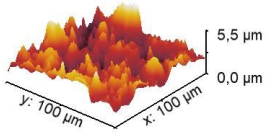
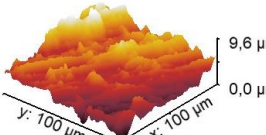
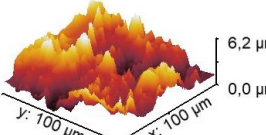
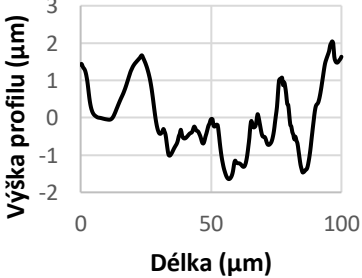
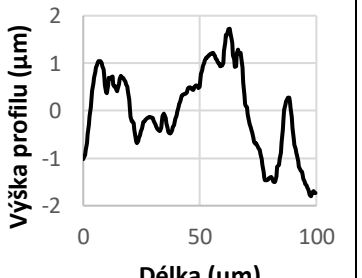
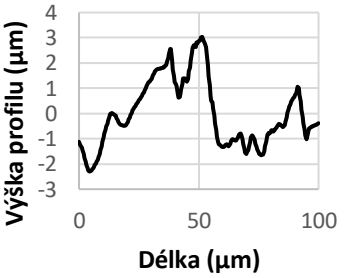
Tab. 16 Zobrazení povrchu plochých vzorků vytištěných z Clear resin pomocí AFM pro tiskovou vrstvu 25 μm. Profilové řezy ze středu vzorku.

Materiál: Clear resin Výška tiskové vrstvy: 25 μm		
Horizontální tisk	Svislý tisk	Tisk pod úhlem
		
		
		
<p>$R_a = (0,24 \pm 0,09) \mu\text{m}$ $P_z = (1,4 \pm 0,6) \mu\text{m}$</p>	<p>$R_a = (0,25 \pm 0,04) \mu\text{m}$ $P_z = (1,85 \pm 0,14) \mu\text{m}$</p>	<p>$R_a = (0,24 \pm 0,05) \mu\text{m}$ $P_z = (1,2 \pm 0,4) \mu\text{m}$</p>

Tab. 17 Zobrazení povrchu plochých vzorků vytištěných z Clear resin pomocí AFM pro tiskovou vrstvu 50 μm. Profilové řezy ze středu vzorku.

Materiál: Clear resin Výška tiskové vrstvy: 50 μm		
Horizontální tisk	Svislý tisk	Tisk pod úhlem
		
		
		
<p>Ra = (0,11 ± 0,03) μm Pz = (0,63 ± 0,06) μm</p>	<p>Ra = (0,21 ± 0,03) μm Pz = (1,55 ± 0,14) μm</p>	<p>Ra = (0,11 ± 0,03) μm Pz = (0,57 ± 0,15) μm</p>

Tab. 18 Zobrazení povrchu plochých vzorků vytištěných z Grey Pro resin pomocí AFM pro tiskovou vrstvu 50 μm. Profilové řezy ze středu vzorku.

Materiál: Grey Pro resin Výška tiskové vrstvy: 50 μm		
Horizontální tisk	Svislý tisk	Tisk pod úhlem
		
		
		
Ra = (0,22 ± 0,04) μm Pz = (1,14 ± 0,11) μm	Ra = (0,20 ± 0,04) μm Pz = (1,6 ± 0,5) μm	Ra = (0,21 ± 0,06) μm Pz = (1,2 ± 0,4) μm

5 SOUHRN A DISKUZE VÝSLEDKŮ

V prvních dvou tabulkách 4 a 5 jsou zobrazeny snímky povrchu pořízené elektronovým mikroskopem pro čtyři srovnávací vzorky připravené dvěma metodami tisku (FDM a SLA). U vzorků připravených FDM metodou tisku nedošlo u prvních dvou vzorků s šířkou pylonu 250 μm k tisku struktury vzhledem k nedostatečnému rozlišení použité tiskové trysky (print core o průměru 400 μm). U šířky pylonu 400 μm byla mřížka vytisknuta, ovšem kvalitou a reprodukovatelností danou tvarem tištěného modelu se stále nemůže srovnávat s technologií SLA. Lepších výsledků v případě FDM by bylo možné dosáhnout při použití menší tiskové trysky o průměru 250 μm , nicméně tato tryska nebyla v době řešení této práce k dispozici pro daný typ materiálu. Z tohoto důvodu tato skutečnost nebyla ověřována. Na základě tohoto porovnání nebyla FDM metoda tisku dále používána a následující vzorky byly připravovány pouze metodou SLA. Vzorky připravované z Grey Pro pryskyřice byly tisknuty ve vrstvách 50 μm a 100 μm . Při tiskové vrstvě 25 μm nebylo možné vzorek vytisknout z důvodu omezení daných výrobcem tohoto materiálu a tiskárny, tj. firmou Formlabs. Clear pryskyřice umožňovala tisk ve všech třech možných vrstveních (25, 50 nebo 100 μm).

V tabulkách 6 a 7 jsou zobrazeny výsledky z charakterizace pryskyřice Grey Pro. Z nich vyplývá, že pozice vzorku při tisku pod úhlem je nejméně vhodná pro dosažení co nejlepší reprodukovatelnosti tištěného modelu. Mnohem lépe se jeví horizontální nebo svislý tisk, což je úzce spojeno s tvarem a průměrem (140 μm) laserového paprsku používaného pro vytvrzování pryskyřice. Laserový paprsek dopadá kolmo vzhledem ke spodní ploše vaničky SLA tiskárny. Jak je dále ukázáno na výsledcích pro materiál s označením Clear, nejlepší reprodukovatelnosti bylo dosaženo v případě horizontálního tisku. Z tohoto důvodu jsou v tabulce 8 porovnány výsledky vzorků tisknutých horizontálně pro obě vrstvení v případě materiálu s označením Grey Pro. Ačkoli při vrstvení 100 μm dosáhly výsledky lepší výšky pylonů, obsah profilu mřížky byl lepší pro vrstvení 50 μm . Nutno poznamenat, že z hlediska obsahu mezery mezi jednotlivými pylony vycházely nejlépe vzorky tištěné pod úhlem, viz. data v tab. 6 a 7.

V tabulkách 9,10 a 11 jsou zobrazeny výsledky pro pryskyřici s označením Clear. Zde můžeme porovnat, že výrobcem doporučený tisk vzorků pod úhlem opět nevychází nejlépe. Profil mřížky ani rozměry neodpovídají požadovanému návrhu tiskového modelu při kterémkoliv z vrstvení. Se zvyšující se tiskovou vrstvou reprodukovatelnost tiskového modelu opět klesala. Při svislém tisku hodnoty největší výšky profilu Pz téměř odpovídaly požado-

vaným hodnotám. U horizontálního tisku byly tyto hodnoty nižší, ačkoli při pohledu na profil mřížky, připravený při 25 μm vrstvení, byla kvalita tisku ještě lepší, viz. tab. 9. Došlo pravděpodobně ke zkreslení výsledků v důsledku velikosti hrotu měření. Ten, jelikož má poloměr 12,5 μm ve vrcholu, nemusel dosáhnout do skutečné hloubky mezer obdélníkového tvaru. Z tohoto důvodu byla v tomto případě zjištěna výška pylonu pomocí SEM o hodnotě $(321,7 \pm 0,9)$ μm pro horizontální tisky z materiálu Clear při vrstvení 25 μm . Tabulka 12 ukazuje porovnání mezi všemi typy vrstvení při horizontálním tisku. Zde můžeme vidět, že nejlépe odpovídajícího obsahu pylonu se dosáhlo při vrstvení 25 μm . Z tohoto porovnání plyne, že nejlepších výsledků reprodukovatelnosti tištěného modelu lze dosáhnout použitím výšky vrstvy 25 μm a horizontálním tisku z transparentního materiálu s označením Clear.

V dalších tabulkách 13, 14 a 15 jsou zobrazeny výsledky z charakterizace plochých vzorků bez pylonu pomocí SEM a kontaktního profilometru. Tyto vzorky byly připravené pro měření pomocí AFM a goniometrie. Z dat v těchto tabulkách plyne, jak se mění vzhled a povrchová drsnost s ohledem na rozdílné úhly tisku, materiály a výšku tiskových vrstev. U těchto vzorků byla sledována drsnost povrchu místo vlnitosti. U vzorků tisknutých horizontálně neměl povrch nijak orientovanou strukturu a hodnoty R_a a P_z byly pravděpodobně ovlivňovány nedokonalostmi povrchu, vzniklými s největší pravděpodobností nerovnoměrným vytvrzováním povrchu vzorku nebo nečistotami (částečně vytvrzenými zbytky tiskové pryskyřice v tiskové vaničce nebo vymývací lázni). U svisle a pod úhlem tisknutých vzorků je struktura povrchu podstatně ovlivněna orientací tištěného modelu a jeho povrchu. Na těchto vzorcích se nachází nedokonalosti v podobě orientovaných vrypů nebo drážek. Pozorovaný široký rozptyl měřených kontaktních úhlů smáčení může být způsoben jednak orientovanou strukturou povrchu vzorku, tak jeho nehomogenním povrchovým vytvrzením, nebo částečnou kontaminací povrchu z čistící lázně, která byla souběžně používána pro oba tištěné materiály v zařízení Formlab Form Wash.

V posledních tabulkách 16, 17 a 18 jsou uvedeny výsledky z měření povrchů bez pylonů pomocí AFM. Z výsledků z měření pomocí AFM byly opět stanoveny hodnoty povrchové drsnosti a maximální převýšení profilu v příčných řezech přes snímanou plochu 100×100 μm . Z porovnání dat z tabulek 13 až 15 a 16 až 18 vyplývá, že hodnoty drsností z kontaktní profilometrie a z AFM si příliš neodpovídají. Tento rozdíl je způsoben diametrálně rozdílnou plochou, jež byla snímána pomocí AFM a kontaktního profilometru. Kon-

taktní profilometr snímá vzorek po daleko delší dráze a tím lépe reflektuje artefakty na povrchu v podobě drážek, prohlubní a jiných nečistot.

ZÁVĚR

V rámci této bakalářské práce byly studovány možnosti 3D tisku povrchových rastrů pomocí FDM a SLA. Z prvotních srovnání vyplynulo, že pomocí dostupného FDM zařízení pro 3D tisk není možné stejně kvalitně reprodukovat tištěný model jako v případě zvolené SLA tiskárny. Z tohoto důvodu byl zbytek práce věnován SLA tisku. V rámci provedených experimentů byly hodnoceny vlivy výšky tiskové vrstvy, použitého materiálu a orientace tištěných vzorků vůči tiskové vaničce se zvolenou pryskyřicí. Na základě prvotních měření byl vybrán model s nejmenšími mezerami mezi pylony, které lze pomocí zvolené tiskárny vytisknout a identifikovat. Zkoumány byly rastry obsahující pylony s šířkou 150 μm , výškou 300 μm a mezerou mezi pylony 300 μm .

Připravené vzorky pomocí SLA 3D tisku byly zkoumány pomocí skenující elektronové mikroskopie, kontaktní profilometrie, mikroskopie atomárních sil a goniometrie.

Ze zmíněných měření vyplynulo, že při tisku modelů o malých rozměrech je vhodné použít co nejmenší možnou výšku tiskové vrstvy, který daný materiál dovoluje. V rámci této práce se jednalo o výšku vrstvy 25 μm z pryskyřice Clear. Takto nastavené vrstvení ovšem znamená několikanásobně delší čas tisku. Dalším důležitým parametrem je poloha tisknutého modelu vzhledem k tiskové podložce, přes kterou prochází laserový paprsek. Bylo zjištěno, že vzorky dosahovaly nejvyšší reprodukovatelnosti zvoleného modelu při horizontálním tisku. Nejhorších výsledků bylo dosaženo při tisku pod úhlem. Tato orientace je výhodná pouze s ohledem na minimalizaci smykových napětí, které je potřeba překonat při odtrhávání každé vytištěné vrstvy od tiskové vaničky. Při vzájemném porovnání použitých materiálů vychází lépe tisková pryskyřice s názvem Clear oproti Grey Pro.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. Petch Michael, Jackson Beau a Haria Rushabh. *The Free Beginner's Guide* [online]. 3D Printing Industry [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide#01-basics>
2. VENUVINOD, Patri K. a Weiyin MA. *Rapid prototyping: laser-based and other technologies*. Boston: Kluwer Academic, 2004. ISBN 14-020-7577-4.
3. Feeney, David. *FFF Vs. SLA Vs. SLS: 3D Printing* [online]. SD3D, 2013 [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <https://www.sd3d.com/fff-vs-sla-vs-sls/>
4. CHUA, Chee Kai a Wai Yee YEONG. *Bioprinting: principles and applications*. New Jersey: World Scientific, [2015]. ISBN 98-146-1210-3. [cit. 2019-05-10]
5. Understanding MELD Metal Additive Manufacturing Technology. *Manufactur3D Magazine on 3D Printing* [online]. MANUFACTUR3D, 2018 [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <https://manufactur3dmag.com/understanding-meld-metal-additive-manufacturing-technology/>
6. MANUFACTUR3D. *Cold Spray 3D Printing to Build Superior Permanent Magnets at Low Costs* [online]. MANUFACTUR3D Magazine on 3D Printing, 2018 [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <https://manufactur3dmag.com/cold-spray-3d-printing-build-superior-permanent-magnets-cheaper-cost/>
7. TURKSEN, Kursad. *Bioprinting in Regenerative Medicine: Stem Cell Biology and Regenerative Medicine*. Ottawa: Humana Press, 2015. ISBN 2196-8993. [cit. 2019-05-10]
8. A Comprehensive List of All 3D Printing Technologies. *Manufactur3D Magazine on 3D Printing*. <https://manufactur3dmag.com/comprehensive-list-all-3d-printing-technologies/>, 2018.
9. FEINBERG, A a MILLER, J. *Progress in three-dimensional bioprinting* [online]. MRS Bulletin, 557-562 [cit. 2019-05-15]. DOI: 10.1557/mrs.2017.166. Dostupné z: <https://www.cambridge.org/core/journals/mrs-bulletin/article/progress-in-three-dimensional-bioprinting/DA193580DBA197354041AE81B2FB2400>
10. Kozior Tomasz, Kundera Czeslaw. *Evaluation of the Influence of Parameters of FDM Technology on the Selected Mechanical Properties of Models* [online]. Procedia Engineering, 2017, 2017, (1877-7058), 463-468 [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.080>
11. OZBOLAT, Ibrahim T, ASHLEY N LEBERFINGER, SHANTANAB DINDA, YANG WU, SRINIVAS V KODURU a VELI OZBOLAT. Bioprinting functional tissues. *Acta Biomaterialia* [online]. Elsevier, 2019 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2019.01.009>
12. Franck Aly. *Viscoelasticity and dynamic mechanical testing* [online]. TA Instruments Germany [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: http://tainstruments.com/pdf/literature/AAN004_Viscoelasticity_and_DMA.pdf
13. Sodefinian Gholamhossein, Ghaseminejad Saghar a Yousefi Ali Akbar. *Preparation of polypropylene/short glass fiber composite as Fused Deposition Modeling (FDM) filament* [online]. ScienceDirect, 2019, , 205-222 [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.11.065>

14. Stereolithography. *3DSystems* [online]. [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <https://www.3dsystems.com/on-demand-manufacturing/stereolithography-sla/materials>
15. Palermo, Elizabeth. What is Stereolithography?. *LiveScience* [online]. 2013, 16.7.2013, [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <https://www.livescience.com/38190-stereolithography.html>
16. FORMLABS. *The Ultimate Guide to Stereolithography (SLA) 3D Printing* [online]. In: . Formlabs, 2017, 28.3.2017 [cit. 2019-04-17]. Dostupné z: <https://formlabs.com/blog/ultimate-guide-to-stereolithography-sla-3d-printing/#sla-systems>
17. STEEN, W. M. *Laser material processing*. 3rd ed. New York: Springer, c2003. ISBN 18-523-3698-6.
18. Lindsey, Frick. How to Smooth 3D-Printed Parts. *MachineDesign* [online]. 2014 [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <https://www.machinedesign.com/3d-printing/how-smooth-3d-printed-parts>
19. 3D Matter. FDM 3D Printing materials compared. *3D HUBS* [online]. 3D HUBS, 2016 [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/fdm-3d-printing-materials-compared>
20. MATERIALISE. *Fused Deposition Modeling (FDM)* [online]. Materialise [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/cs/manufacturing/technologie-materialy-a-dokoncovaci-upravy/fused-deposition-modeling-fdm>
21. JUNGST, Tomasz, Willi SMOLAN, Kristin SCHACHT, Thomas SCHEIBEL a Jürgen GROLL. *Strategies and Molecular Design Criteria for 3D Printable Hydrogels* [online]. *Chemical Reviews*, 23.10.2015 [cit. 2019-05-15]. DOI: 10.1021/acs.chemrev.5b00303. Dostupné z: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.chemrev.5b00303>
22. Protocom s.r.o. *Protocom* [online]. Ostrava, 2019 [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: <http://www.protocom.cz/>
23. Photopolymers. *Photopolymers* [online]. Savla Associates, 2019 [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: <https://photopolymer.com/>
24. Rogers, Tony. *Everything You Need To Know About Polylactic Acid (PLA)*. Warminster: Creative Mechanism, 2015.
25. Maharana, T, B. Mohanty a Y.S. Negi. *Melt–Solid Polycondensation of Lactic Acid and Its Biodegradability*. Roorkee, India: Progress in Polymer Science, 2009. DOI: 10.1016/J.PROGPOLYMSCI.2008.10.001
26. Sin, Lee Tin, Abdul Razak Rahmat A Wan Aizan Wan Abdul Rahman. *Polylactic acid: PLA biopolymer technology and applications*. Amsterdam: Elsevier/William Andrew, 2012. ISBN 978-1-4377-4459-0.
27. Susmel, O. H. and Ezeh L. *On the fatigue strength of 3D-printed polylactide (PLA)* [online]. Sheffield, UK: IGF Workshop “Fracture and Structural Integrity”, 2018 [cit. 2019-03-26]. DOI: 10.1016/j.prostr.2018.06.007.
28. M. Savioli Lopesa, A. L. Jardini a R. Maciel Filho. *Poly (lactic acid) production for tissue engineering* [online]. 20th International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA 2012: ScienceDirect, 2012 [cit. 2019-03-26]

29. *OVERVIEW OF POLY(LACTIC ACID) (PLA) FIBRE Part I: Production, Properties, Performance, Environmental Impact, and End-use Applications of Poly(lactic acid) Fibres*. Fibre Chemistry, 2009. DOI: 10.1007/s10692-010-9213-z.
30. Brundle, C.R, Charles A. Evans a Shaun Wilson. *Encyclopedia of materials characterization: surfaces, interfaces, thin films*. Greenwich, CT: Manning, c1992. ISBN 07-506-9168-9.
31. Hamilton, Andrew & Quail, Francis. *Detailed State of the Art Review for the Different On-Line/In-Line Oil Analysis Techniques in Context of Wind Turbine Gearboxes* [online]. In: . Journal of Tribology [cit. 2019-03-26]. DOI: 10.1115/GT2011-46860. Dostupné z:
https://www.researchgate.net/publication/267503013_Detailed_State_of_the_Art_Review_for_the_Different_On-LineIn-Line_Oil_Analysis_Techniques_in_Context_of_Wind_Turbine_Gearboxes
32. Reimer, Ludwig. *Scanning electron microscopy: physics of image formation and microanalysis*. Second completely revised and updated edition. Berlin: Springer, 1998. Series in optical sciences (Springer). ISBN 978-3-642-08372-3.
33. Leng, Y. *Materials characterization: introduction to microscopic and spectroscopic methods*. Second edition. Weinheim: Wiley-VCH, 2013. ISBN 978-3-527-33463-6.
34. Maletz, Jörg & Steiner, Michael & Fatka, Oldřich. *Middle Cambrian pterobranchs and the Question: What is a graptolite?* [online]. Lethaia, 2005 [cit. 2019-03-26]. DOI: 10.1080/00241160510013204. Dostupné z:
https://www.researchgate.net/publication/227667368_Middle_Cambrian_pterobranchs_and_the_Question_What_is_a_graptolite
35. Kubínek, Roman, Milan Vůjtek a Miroslav Mašláň. *Mikroskopie skenující sondou*. Olomouc: Univerzita Palackého, 2003. ISBN 80-244-0602-0.
36. Bowen, W. Richard a Hilal, Nidal. *Atomic Force Microscopy in Process Engineering - An Introduction to AFM for Improved Processes and Products*. Elsevier, 2009. ISBN 978-1-85617-517-3.
37. KAUPP, Gerd. *Atomic Force Microscopy, Scanning Nearfield Optical Microscopy and Nanoscratching: Application to Rough and Natural Surfaces: NanoScience and Technology*. Springer Science & Business Media, 2006, 2006. ISBN 3540284729.
38. Kai-Chih Chang, Yu-Wei Chiang, Chin-Hao Yang a Je-Wen Liou. *Atomic force microscopy in biology and biomedicine* [online]. 2012, 162-169 [cit. 2019-03-26].
39. ISSN 1016-3190 Měření drsnosti povrchu. *ELUC* [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1103>
40. *3Dwiser - power of 3D printing* [online]. [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://3dwiser.com/>
41. ULTIMAKER. *Technický datový list PLA* [online]. 3.011. Ultimaker, 2017 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z:
<https://ultimaker.com/download/67576/TDS%20PLA%20v3.011-cze.pdf>
42. PEŠIČKA, L. *Geometrická specifikace výrobků strojírenské výroby (GPS) – Textura povrchu – Požadavky na drsnost, vlnitost a základní profil povrchu*. Praha, 2006. [cit. 2019-05-10]

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

AM	Additive Manufacturing (aditivní výroba).
SLA	Stereolitografie
SLS	Selective Laser Sintering (selektivní laserové spékání)
DLP	Digital Light Processing (digitální světelné zpracování)
DMD	Digital Micromirror Device (digitální mikrozrcadlové zařízení)
FDM	Fused Deposition Modeling (modelování tavným uložením)
PLA	Polylactic Acid (kyselina polyléččná)
PC	Polycarbonate (polykarbonát)
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
PET	Polyethylentereftalát
TPU	Termoplastický polyuretan
ROP	Ring-Opening Polymerization (polymerace otevřením kruhu)
DSC	Diferenciální skenovací kalorimetrie
TGA	Termogravimetrie
DMA	Dynamická mechanická analýza
TEM	Transmisní elektronový mikroskop
SEM	Skenovací elektronový mikroskop
AFM	Atomic Force Microscopy (Mikroskopie atomárních sil)
STM	Skenující tunelová mikroskopie
UHV	Ultra vysoké vakuum

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 <i>FDM metoda 3D tisku [3]</i>	13
Obr. 2 <i>Schéma SLA 3D tiskárny [16]</i>	15
Obr. 3 <i>Struktura PLA [25]</i>	17
Obr. 4 <i>Schéma výroby PLA [25]</i>	17
Obr. 5 <i>Fyzikální vlastnosti PLLA [25]</i>	18
Obr. 6 <i>Enantiomery PLA [28]</i>	19
Obr. 7 <i>Struktura skenovacího elektronového mikroskopu [31]</i>	20
Obr. 8 <i>Nákres struktury Evenhart-Thornley detektoru [33]</i>	22
Obr. 9 <i>Schéma trajektorie elektronu podle Monte Carlo simulace [34]</i>	22
Obr. 10 <i>Interakční zóna elektronů pod povrchem vzorku [32]</i>	23
Obr. 11 <i>Příklady typů hrotů a ramének [35]</i>	24
Obr. 12 <i>Jednoduchý nákres AFM zařízení [35]</i>	24
Obr. 13 <i>Závislost meziatomových sil na vzdálenosti hrotu od povrchu [35]</i>	25
Obr. 14 <i>Schéma kontaktního profilometru [39]</i>	26
Obr. 15 <i>Model mřížky pro tisk pod úhlem</i>	30
Obr. 16 <i>Formlabs Form 2 s příslušenstvím [40]</i>	31
Obr. 17 <i>Specifikace Formlabs Form 2 [40]</i>	31
Obr. 18 <i>Ultimaker S5 [40]</i>	32
Obr. 19 <i>Specifikace Ultimaker S5 [41]</i>	32
Obr. 20 <i>Použitý elektronový mikroskop Phenom Pro</i>	33
Obr. 21 <i>Použitý kontaktní profilometr DektakXT</i>	34
Obr. 22 <i>NTEGRA Prima</i>	34
Obr. 23 <i>Použitá zařízení pro měření kontaktních úhlů smáčení Krüss Drop Shape Analyzer DSA30</i>	35
Obr. 24 <i>Postup stanovování volné plochy mezi pylony a vzdálenosti středu jednotlivých pylonů pomocí programu ImageJ</i>	35
Obr. 25 <i>Význam požadovaných modelových parametrů pro 3D SLA tisk</i>	36

SEZNAM TABULEK

Tab. 1	<i>Vztah mezi urychlovacím napětím a rozlišením u TEM [32]</i>	21
Tab. 2	<i>Mechanické vlastnosti pryskyřic Grey Pro a Clear</i>	29
Tab. 3	<i>Mechanické a tepelné vlastnosti PLA vlákna od společnosti Ultimaker</i>	30
Tab. 4	<i>SEM porovnání vzorků tištěných pomocí FDM a SLA. Pro FDM byl použito PVA a pro SLA pryskyřice s označení Clear, tisková vrstva 25 μm.</i>	37
Tab. 5	<i>SEM porovnání vzorků tištěných pomocí FDM a SLA. Pro FDM byl použito PVA a pro SLA pryskyřice s označení Clear, tisková vrstva 25 μm.</i>	38
Tab. 6	<i>Naměřené hodnoty pro vzorky vytištěné z Grey Pro resin – 50 μm vrstvení. První řada obrázků ze SEM = pohled ze shora, druhá = pohled z boku. SLA tisk.</i>	39
Tab. 7	<i>Naměřené hodnoty pro vzorky vytištěné z Grey Pro resin – 100 μm vrstvení. První řada obrázků ze SEM = pohled ze shora, druhá = pohled z boku. SLA tisk.</i>	40
Tab. 8	<i>Porovnání výsledků pro vzorky vytištěné z Grey Pro resin při horizontálním tisku. První řada obrázků ze SEM = pohled ze shora, druhá = pohled z boku. SLA tisk.</i>	41
Tab. 9	<i>Naměřené hodnoty pro vzorky vtištěné z Clear resin – 25 μm vrstvení. První řada obrázků ze SEM = pohled ze shora, druhá = pohled z boku. SLA tisk.</i>	42
Tab. 10	<i>Naměřené hodnoty pro vzorky vytištěné z Clear resin – 50 μm vrstvení. První řada obrázků ze SEM = pohled ze shora, druhá = pohled z boku. SLA tisk.</i>	43
Tab. 11	<i>Naměřené hodnoty pro vzorky vytištěné z Clear resin – 100 μm vrstvení. První řada obrázků ze SEM = pohled ze shora, druhá = pohled z boku. SLA tisk.</i>	44
Tab. 12	<i>Porovnání měření mezi vzorky vytištěnými z Clear resin při horizontálním směru SLA tisku. První řada obrázků ze SEM = pohled ze shora, druhá = pohled z boku.</i>	45
Tab. 13	<i>Porovnání plochých vzorků vytištěných pomocí SLA z Clear resin (vrstva 25 μm). Úhle smáčení vodou. SEM pohled ze shora.</i>	46
Tab. 14	<i>Porovnání plochých vzorků vytištěných pomocí SLA z Clear resin (vrstva 50 μm). Úhle smáčení vodou. SEM pohled ze shora.</i>	46
Tab. 15	<i>Porovnání plochých vzorků vytištěných pomocí SLA z Grey Pro resin (vrstva 50 μm). Úhle smáčení vodou. SEM pohled ze shora.</i>	47

Tab. 16 Zobrazení povrchu plochých vzorků vytištěných z Clear resin pomocí AFM pro tiskovou vrstvu 25 μm . Profilové řezy ze středu vzorku.	48
Tab. 17 Zobrazení povrchu plochých vzorků vytištěných z Clear resin pomocí AFM pro tiskovou vrstvu 50 μm . Profilové řezy ze středu vzorku.	49
Tab. 18 Zobrazení povrchu plochých vzorků vytištěných z Grey Pro resin pomocí AFM pro tiskovou vrstvu 50 μm . Profilové řezy ze středu vzorku.	50