

Charakterizace 3D tištěných polymerních struktur pomocí rentgenové tomografie

Filip Mikulka

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: **Filip Mikulka**
Osobní číslo: **T16778**
Studijní program: **B2808 Chemie a technologie materiálů**
Studijní obor: **Materiálové inženýrství**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Charakterizace 3D tištěných polymerních struktur pomocí rentgenové tomografie**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte rešerši na zadané téma.
2. Připravte vzorky s rozdílným vnitřním rozložením materiálu pomocí 3D tisku.
3. Získané vzorky charakterizujte pomocí rentgenové tomografie.
4. Výsledky měření a obrazových analýz přehledně diskutujte v závěrech bakalářské práce.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

1. Stock, S. R. **MicroComputed Tomography: Methodology and Applications**, CRC Press, 2009. ISBN 13:978-1-4200-5876-5.
2. Sasov, A. Van Dyck, D. **Desktop X-Ray Microscopy na Microtomography**, Antwerpen, 1998.
3. Baruchel, J., Buffière, J.Y., E. Maire, Merle P. a Peix, G., **X-ray tomography in material science**. Paris, Hermes Science, 2000.

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 17. 5. 2019

.....

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 vzdělávacího zařízení (školní dílo).

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

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

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo 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 studovány možnosti 3D tisku polymerních mřížek s otvory o rozměrech v řádech stovek mikrometrů. Studované vzorky byly připravovány pomocí FDM a SLA metody 3D tisku. Vytvořené mřížky byly charakterizovány pomocí rentgenové tomografie a skenovací elektronové mikroskopie. Reprodukovatelnost tištěného modelu pomocí 3D tisku byla hodnocena v závislosti na použitém materiálu, tloušťce tisknuté vrstvy a vlastních rozměrech mřížky. Experimentální výsledky ukazují limity a možnosti použitých tiskových zařízení při tisku daných typů materiálů. V případě FDM metody lze dosáhnout nejlepších výsledků při co nejmenší vzájemné vzdálenosti vytlačovaného materiálu. U metody SLA je nezbytné zvolit co nejmenší tloušťku jednotlivých tištěných struktur.

Klíčová slova: 3D tisk, mřížky, přesnost, materiály, rentgenová tomografie

ABSTRACT

They have been studied options for 3D printing of polymer grids with sizes of holes in hundreds of micrometres. The studied samples were being prepared using FDM and SLA of 3D printing method. Created grids were characterized using roentgen tomography and scanning electron microscopy. Reproducibility of printed model using 3D printing, were evaluated according to used material, the thickness of printed layer and the actual grid dimension. The experimental results show the limits and possibilities of the used printing devices according to types of used materials. In the case of FDM method the best results can be achieved at the lowest possible distance of the extruded material. For the SLA method, it is necessary to choose the lowest possible thickness of the individual printed structures.

Key words: 3D printing, grids, accuracy, materials, roentgen tomography

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Antonínu Minaříkovi, PhD za odborné vedení, trpělivost, věnovaný čas a nedocenitelné rady. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za velkou podporu a trpělivost při studiích.

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 3D TISK	12
1.1 TYPY 3D TISKU	12
1.1.1 Kapalný materiál (SLA).....	12
1.1.2 Pevný materiál (FDM)	13
1.1.3 Práškový materiál (SLS, SLM).....	14
1.2 POUŽITELNÉ MATERIÁLY A JEJICH VLASTNOSTI OVLIVŇUJÍCÍ KVALITU TISKU	15
1.2.1 Materiály pro tisk metodou SLA.....	15
1.2.2 Materiály pro tisk metodou FDM	16
1.2.2.1 ABS (Acrylonitril butadien styren).....	16
1.2.2.2 PLA (Polylactid acid)	17
1.2.2.3 PET	18
1.2.3 Materiály pro tisk metodou SLS	19
2 METODY CHARAKTERIZACE 3D TIŠTĚNÝCH STRUKTUR	20
2.1.1 Rentgenová tomografie	20
2.1.1.1 Rentgenové záření.....	20
Charakteristické záření	22
2.1.1.2 Tomografie.....	23
2.1.2 SEM.....	24
2.1.2.1 Soustava elektronového mikroskopu a jeho popis.....	25
II PRAKTICKÁ ČÁST	27
3 POPIS EXPERIMENTU	28
3.1 POUŽITÉ MATERIÁLY PRO FDM	28
3.2 POUŽITÉ MATERIÁLY PRO SLA	28
3.3 NÁVRHY MODELŮ PRO 3D TISK.....	29
3.3.1 Modely tištěné pomocí FDM	29
3.3.2 Modely tištěné pomocí SLA	30
3.4 POUŽITÉ ZAŘÍZENÍ PRO FDM	30
3.5 POUŽITÉ ZAŘÍZENÍ PRO SLA.....	31
3.6 SKENOVACÍ ELEKTRONOVÝ MIKROSKOP	32
3.7 RENTGENOVÝ TOMOGRAF	32
3.8 PROGRAMY PRO ANALÝZU DAT Z 3D RTG ZOBRAZENÍ.....	33
4 VÝSLEDKY	34
4.1 MŘÍŽKY PŘIPRAVENÉ POMOCÍ FDM.....	34
4.2 MŘÍŽKY PŘIPRAVENÉ POMOCÍ SLA	36
4.2.1 Mřížky z materiálu Clear	36
4.2.1.1 Vrstva tisku 25 μm	37
4.2.1.2 Měření velikosti póru.....	38
4.2.2 Vrstva tisku 50 μm	40
4.2.2.1 Měření velikosti póru.....	41
4.2.3 Vrstva tisku 100 μm	42
4.2.3.1 Měření velikosti póru.....	43

4.3	MŘÍŽKY Z MATERIÁLU GREY PRO.....	44
4.3.1	Vrstva tisku 50 μm	44
4.3.1.1	Měření velikosti póru.....	45
4.3.2	Vrstva tisku 100 μm	46
4.3.2.1	Měření velikosti póru.....	47
4.4	VÝSLEDNÁ CELKOVÁ POROZITA.....	48
4.5	POROVNÁNÍ VZORKŮ NA ZÁKLADĚ ROZDÍLNÉ VRSTVY TISKU.....	48
4.5.1	Materiál Clear s charakteristickou šířkou póru 500 μm	48
4.5.2	Materiál Grey Pro s charakteristickou šířkou póru 600 μm	49
5	DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	50
	ZÁVĚR.....	53
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	54
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	59
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	60
	SEZNAM TABULEK.....	63

ÚVOD

3D tisk je jedna z metod nízko odpadního procesu výroby velmi přesných výrobků. Díky této technice lze bez větších investic a nákladných procesů rychle připravovat složité struktury sloužící k výzkumným účelům nebo přímo pro praktické využití. V rámci této práce jsou studovány možnosti a přesnost tisku 3D porézních struktur. Takovéto struktury je možné použít například pro biologické účely při tisku výplní tkání, kostí a orgánů. Touto problematikou se zabývá bioprinting kombinující tisk biomateriálu s buňkami. [1,2]

Mezi nejznámější metody 3D tisku patří metody FDM, SLA a SLS. Za nejvíce používanou metodu lze považovat FDM a následně SLA. Podstata těchto metod je uvedena v teoretické části práce včetně příkladu používaných materiálů. Každá z prakticky používaných metod (FDM, SLA) umožňuje tisk charakteristických mřížek s rozdílnou přesností a minimální velikostí pórů. Jak bude diskutováno a ukázáno na experimentálních výsledcích práce, reprodukovatelnost požadovaného modelu pro 3D tisk není závislá pouze na vybrané metodě tisku, ale rovněž na typu použitého materiálu a výšce jeho vrstvení.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 3D TISK

Tisk jako takový vznikl již velmi dávno podle historiků v Číně, pro účely rychlého a efektivního množení veškeré literatury, neboť samotné ruční opisování bylo příliš zdlouhavé a zdrojově náročné. Principem tisku je tedy získání primární předlohy, kterou jsme schopni dále množit, aniž bychom ji museli poškodit. Tedy primárně se snažilo množit plošné objekty. [3]

U 3D tisku se již nezaměřujeme pouze na plochu, nýbrž na trojdimenzionální objekt, jež lze popsat v osách x , y a z . Jedná se o aditivní výrobu (*additive manufacturing* - AM), kdy z digitálního souboru (*additive manufacturing file* – AMF) je zkonstruován objekt postupným nanášením jednotlivých vrstev materiálu, dokud není požadovaný objekt zhotoven. Digitální předlohy pro 3D jsou vymodelovány pomocí software např. CAD [4], který je z pohledu uživatelů nejjednodušší a nejrozšířenější, nebo pomocí 3D skenerů a digitálních kamer. [5]

K samotnému tisku jsou využívány tzv. 3D tiskárny, což jsou zařízení vybavená příslušným softwarem pro práci s digitální předlohou a samotným mechanismem k tisku. [6]

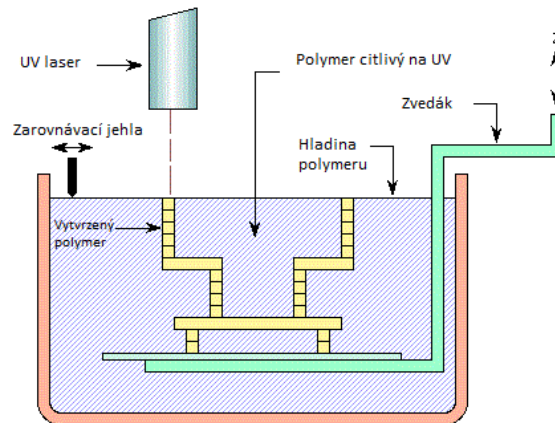
1.1 Typy 3D tisku

Rozdělení typů 3D tisku se dá provést pomocí typu použitého materiálu, tedy zdali se jedná o materiál kapalný, pevný nebo práškový. [7,8]

1.1.1 Kapalný materiál (SLA)

Jednu z prvních metod vynalezl v roce 1984 Charles Hull, jednalo se o metodu stereolitografie (SLA). [7] Tato metoda pracuje na principu vytvářet vrstvy fotopolymeru pomocí UV paprsku, viz. Obr. 1. Další vrstvy objektu vznikají tak, že již zcela vytvrzený polymer je potopen tak, že zvedák sníží svou výšku o požadovaný rozměr pro další vrstvu (mezi 0,025 až 0,3 mm). Při dokončení modelace struktury je objekt vyjmut z polymerní lázně a dochází k jeho dalšímu zpracování (povrchové úpravy a odstranění přebytečného polymeru). Jedná se o metodu, při které se tiskne s přesností mezi 0,05 až 0,2 mm na 100 mm. [8] [11,12]

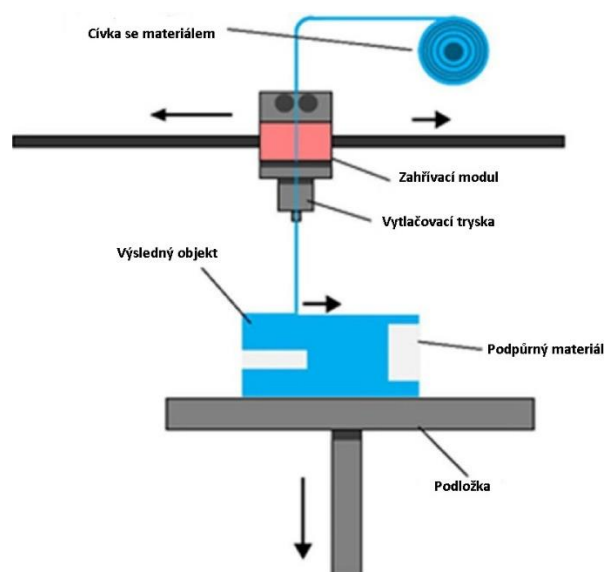
Tloušťka vrstvy tisku se pohybuje mezi 25-300 μm . V závislosti na použité tiskárně se mohou tyto hodnoty lišit. Využití takto přesných modelů je zejména v lékařství. [9]



Obrázek 1 - Metoda SLA [9]

1.1.2 Pevný materiál (FDM)

FDM (*Fused deposition modelling*) je jednou z nejznámější a nejpoužívanější metoda tisku díky své nenáročnosti a ekonomickému provozu. U této metody se užívají termoplastické materiály s nízkým bodem tání, tedy nejčastěji polymery jako PLA nebo ABS, který jsou ve formě struny navinuty na cívky, ze kterých se odvíjí do vyhříváných modulů nad teplotu tání. Takto nahřáté materiály jsou z trysky vytlačeny na podložku, kde následně vytváří požadovanou 3D strukturu, viz. Obr. 2. [9] U této metody jsou často používány stavební podpěry, které slouží jako nosníky výchozího produktu, aby nedošlo během tisku k jeho deformaci způsobenou například příliš velkou hmotností nebo nedostatečnou relaxací polymeru. [10]



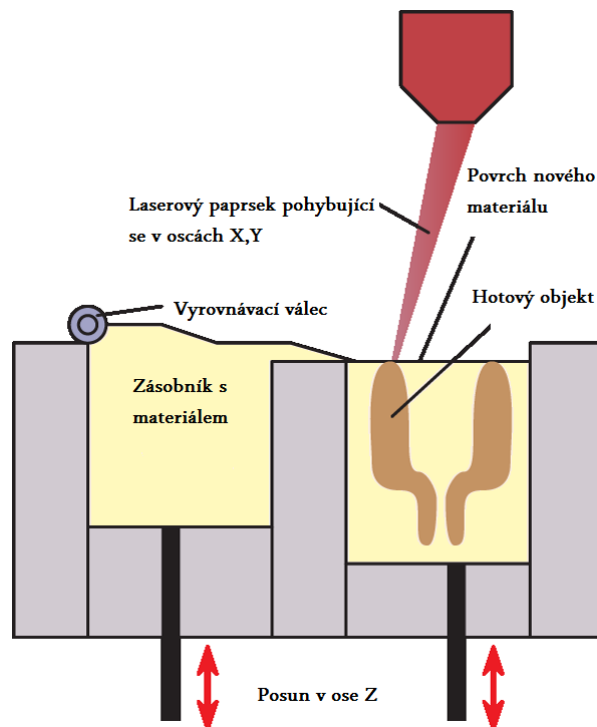
Obrázek 2 - Metoda FDM [6]

1.1.3 Práškový materiál (SLS, SLM)

U práškového materiálu se k tisku využívá velmi výkonného laserového paprsku, zkratka SLS (*selective laser sintering*), kdy dochází k sintrování neboli spékání práškového materiálu, materiál je pouze povrchově nataven (není překročena teplota jeho tání). Oproti tomu u metody SLM (*selective laser melting*) překračuje teplota formovaného materiálu teplotu tání, viz. Obr. 3. Největší rozdíly mezi SLS a SLM jsou v pórovitosti výsledného produktu a typu použitého materiálu.

U SLS jako materiál můžeme použít v podstatě jakékoliv práškové směsi či čisté substance, které však musí být sintrovatelné, a také zde lze dosáhnout jisté pórovitosti. U SLM je však náročnost na užitý materiál mnohem vyšší, převážně pak na čistotu materiálu a nelze dosáhnout pórovité struktury, protože při překročení teploty tání dochází k tečení materiálu a tak je takřka nemožné udržet pórovitost objektu.

Princip následného procesu tisku je podobný jako u SLA, dochází zde k překrývání již vytvrzené vrstvy novým nezpracovaným materiálem. [11]



Obrázek 3 - Metoda SLS [11]

Mimo výše uvedené metody 3D tisku existuje celá řada dalších typů či různých modifikací již zmíněných metod. Například Solid ground curing (SGC), která je podobná metodě SLA

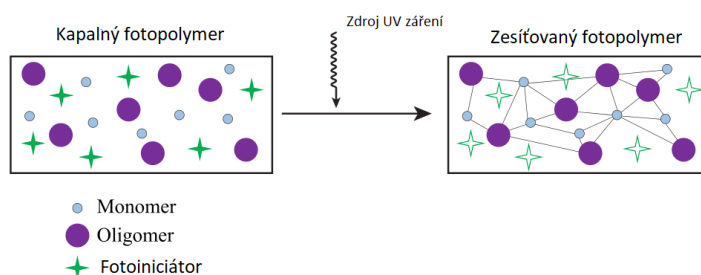
ale liší se vytvrzovací světlem, kde místo laseru se používá silná UV lampa, která ozařuje fotopolymer přes clonu a tím jej vytvrzuje do požadovaného tvaru. Laminated object manufacture (LOM) je metoda pracující na principu vrstvení fólie a následného ořezání na požadovaný tvar. A také například Powder-binder printing (PbP), což je metoda obdobná SLS, ale namísto spékání prášku je zde ke spojení práškového materiálu použito lepidla. [26]

1.2 Použitelné materiály a jejich vlastnosti ovlivňující kvalitu tisku

Materiály pro 3D tisk lze rozdělit podle jejich struktury, vzhledu nebo použití pro různé typy tisku.

1.2.1 Materiály pro tisk metodou SLA

Jedná se o viskózní polymerní materiály, které mají vlastnost reagovat na UV záření tedy tzv. fotopolymery. Tyto fotopolymery jsou nejčastěji ve formě polymerních pryskyřic, což jsou polymery s krátkými řetězci, které nemají vlastnosti plně vytvrzeného polymeru, nejsou síťované. Po kontaktu s UV zářením dojde k sloučení více řetězců dohromady a tedy ke vzniku pevné struktury. Nejčastěji jsou používány kompozitní pryskyřice, které jsou tvořeny ze 3 složek viz. Obr. 4.

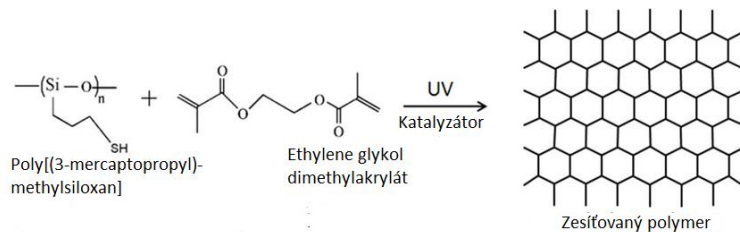


Obrázek 4 - Schématické znázornění reakce fotopolymeru na UV záření

- Jádru z monomeru a oligomeru (ABS, PP, PE, PC)
- Fotoiniciátor (katalyzátor reagující na UV záření pro urychlení nebo začátek reakce)
- Aditiva (látky přidávané dle specifických požadavků na výsledný materiál)

U těchto materiálů lze poměrně dobře měnit jejich požadované vlastnosti jako např. viskozitu, tepelnou odolnost či pigment jednoduchým přidáním různých aditiv, což je činní relativně všestrannými pro použití ke zhotovení různých struktur. [12]

Příkladem takovéto pryskyřice by mohla být směs Poly[(3-mercaptopropyl)methyl siloxan] (PMMS) a Ethyleneglycol dimethylakrylát (EGDMA) viz. Obr. 5, která má vysoký Youngův modul 5,3 GPa po vytvrzení a umožňuje dosáhnout méně než 100 nm rozlišení při tisku objektů. Jako fotoiniciátor i katalyzátor reakce je použit 2,2 – dimethyloxy – phenylacetophenon (DMPA). [31]



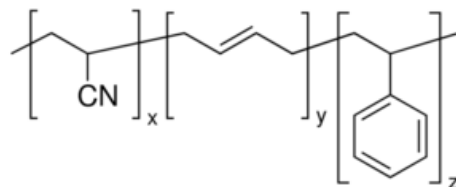
Obrázek 5 - Mechanismus polymerace PMMS a EGDMA [31]

1.2.2 Materiály pro tisk metodou FDM

Nejběžněji používanými materiály pro tisk pomocí FDM jsou ABS a PLA, dále se zde často používají PET, Nylon, TPU a PC. [13]

1.2.2.1 ABS (Acrylonitril butadien styren)

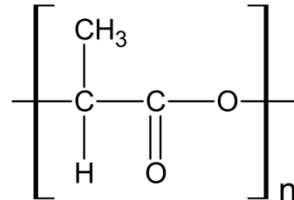
Termoplastický amorfní kopolymer, který vzniká polymerací 15-30 % Acrylonitrilu, 5-30% Butadienu a 40-60% Styrenu, viz. Obr. 6. Mezi jeho nejdůležitější vlastnosti patří dobrá rázová houževnatost a pevnost. Z chemického hlediska odolává roztokům kyselin a zásad. Termický rozklad nastává v oblasti okolo 280 °C. Teplota skelného přechodu je okolo 105°C a jeho vlastnosti mohou být modifikovány změnou poměru mezi jednotlivými složkami. [14]



Obrázek 6 - Acrylonitril butadien styren [14]

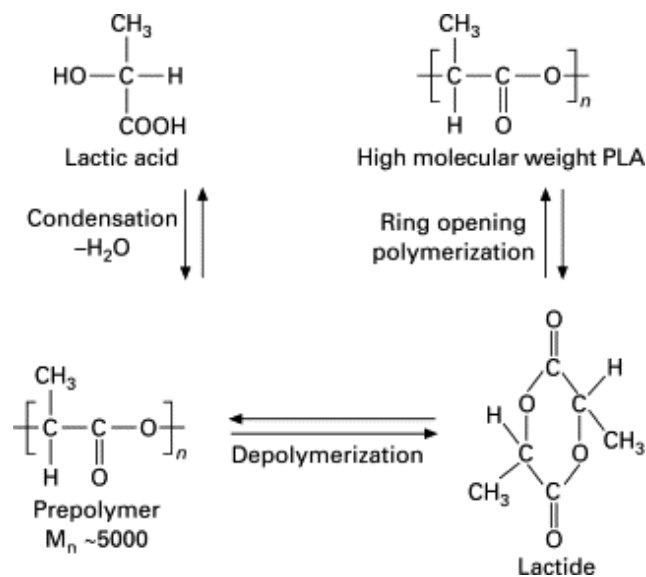
1.2.2.2 PLA (*Poly(lactid acid)*)

Kyselina polymléčná, viz. Obr. 7, je organický polymer, který lze získat z obnovitelných zdrojů jako kukuřice nebo cukrová řepa. Při rostoucí poptávce po biodegradabilních materiálech je PLA velmi oblíben a používá se v širokém spektru aplikací.



Obrázek 7 - Kyselina polymléčná

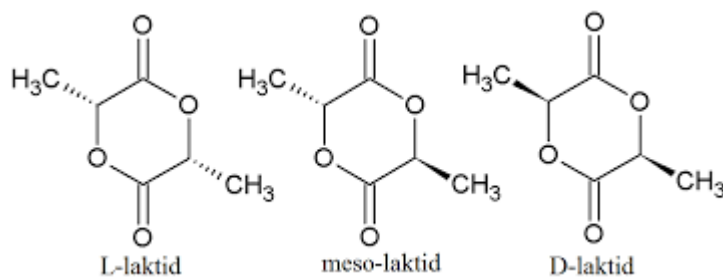
PLA je vyráběno dvěma způsoby, přímou kondenzací nebo kruhovou polymerací, viz. Obr. 8.



Obrázek 8 - Výroba PLA [15]

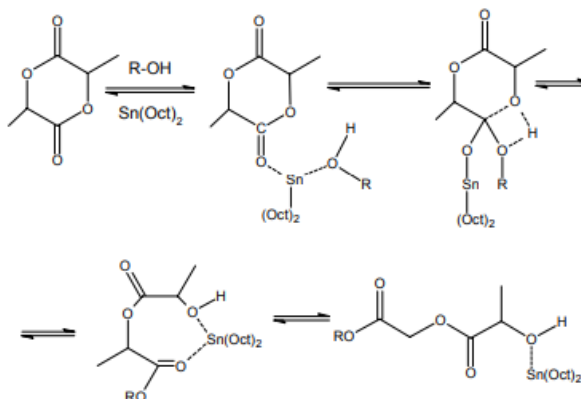
U přímé kondenzace dochází k reakci mezi dvěma monomery, které obsahují funkční skupinu COOH. Vedlejším produktem této reakce je voda. [16]

U procesu otevírání cyklu je jako monomeru využívána Laktidu (D, DL, L), viz. Obr. 9.



Obrázek 9 - Stereoizomery Laktidu

Polymerace probíhá převážně v tavenině za přítomnosti katalyzátorů, viz. Obr. 10. [17]



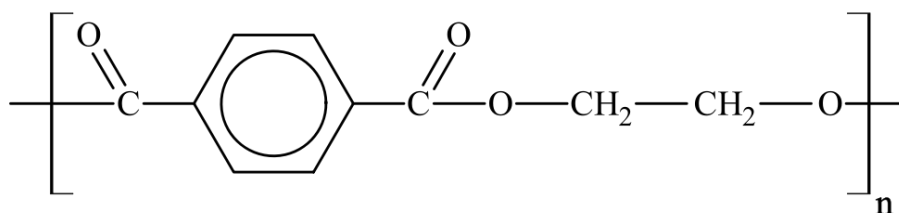
Obrázek 10 - Průběh reakce otevírání cyklu za přítomnosti katalyzátoru (Koordinčně – inzerční mechanismus) [17]

Je to semikrystalický termoplastický polymer z alifatického polyesteru. Teplota skelného přechodu T_g je rozpětí mezi 60 – 65 °C, teplota krystalizace T_c je 110 °C a teplota tání T_m je blízko 165 °C. Materiál PLA má mechanické vlastnosti v rozpětí mezi vlastnostmi polystyrenu a polyethyltereftalátu. [13]

Vyskytuje se však v mnoha různých modifikacích v závislosti na požadavcích. Mezi jeho další výhody patří biodegradabilní schopnost, kdy při vystavení specifickým podmínkám jako je teplota a bakteriální prostředí je zcela rozložen. [16]

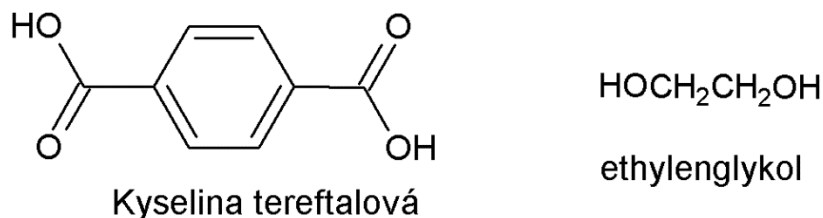
1.2.2.3 PET

Polyethyltereftalát, viz. Obr. 11 označující se zkratkou PET je řazen mezi aromatické polyestery, protože obsahuje esterovou vazbu a benzenové jádro v polymerním řetězci. Polymer je lineární, semikrystalický a s rozsahem svého využitím se řadí k nejrozšířenějším zástupcům polyesterů. [18]



Obrázek 11 - Polyethyltereftalát

Pro výrobu PET se používá polykondenzační polymerace kyseliny tereftalová a ethylen glykolu.



Obrázek 12 - Monomery pro výrobu PET

PET je hydrofobický materiál, tedy má vlastnost absorbovat vodu a proto se musí před každým dalším zpracováním sušit. Používá se nejvíce pro výrobu vláken, lahví a v menším rozsahu pro fólie. [18] Materiál má vysokou mechanickou pevnost a je fyziologicky nezávadný. Materiál se také ve velké míře recykluje tzv. solvolýzou (rozklad pomocí nízkomolekulárních látek) [19]

1.2.3 Materiály pro tisk metodou SLS

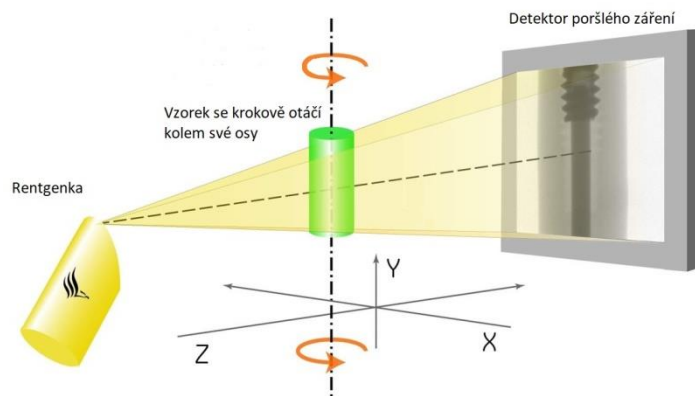
Pro účely tisku pomocí SLS se používají polymerní, kovové či keramické práškové směsi. Jejich jedinou podmínkou je sintrovatelnost při daných podmínkách (zařízení a rozsah jeho pracovních teplot). Jako příklad je možné uvést jemný prášek AlO₃ který se používá např. při výrobě v leteckém průmyslu firmou Boeing. [20]

2 METODY CHARAKTERIZACE 3D TIŠTĚNÝCH STRUKTUR

2.1.1 Rentgenová tomografie

Tato metoda spojuje rentgenové záření a princip tomografie, díky kterému získáváme pomocí skládání RTG snímků celkový obraz 3D vnitřní struktury studovaného vzorku.

U tomografu používaného pro malé vzorky (vzorky o velikosti 10x10x10 cm), se tomograf kolem vzorku neotáčí, ale vzorek sám rotuje kolem své osy na podstavci, a snímací zařízení je v přímé ose z rentgenkou viz. Obr. 13. [21]

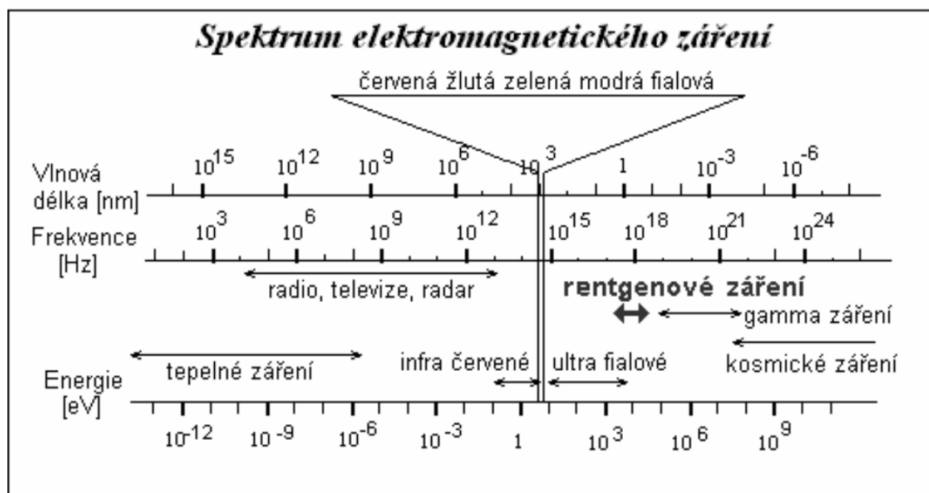


Obrázek 13 - Znázornění principu rentgenového tomografu [29]

2.1.1.1 Rentgenové záření

Mezi objevitele tohoto záření řadíme německého fyzika Wilhelma Conrad Röntgena, který se datuje k roku 1895, kdy zkoumal paprsky procházející katodovou trubicí.

Paprsky rentgenového záření, viz. Obr. 14, jsou paprsky elektromagnetického ionizujícího záření v rozpětí energií od 100 eV, které se označují jako slabé, až k velmi silným paprskům s energií do 200 keV. Můžeme na ně nahlížet jako na fotony s dostatečnou energií, aby vyrazily elektron z elektronového obalu. Toto záření vzniká při přeměně energie rychle se pohybujících elektronů, které dopadají na povrch kovů. [21,22]



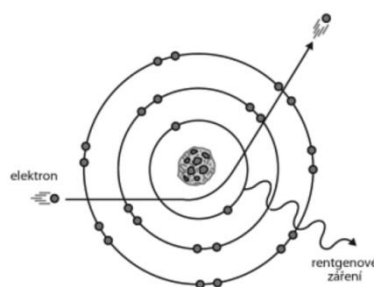
Obrázek 14 - Znázornění spekter elektromagnetického záření [23]

K samotnému uvolnění záření může dojít v průběhu dvou dějů. Tím prvním je ionizace atomu, tedy pokud uvolníme elektrony z vnitřních energetických hladin, budou jejich pozice obsazeny atomy z vyšších hladin, což je doprovázeno vyzářením kvanta RTG záření. Druhým je zbrzdění elektronů v elektrickém poli atomu, přičemž elektron odevzdá část své energie o určité vlnové délce. Rozlišujeme tedy dva základní typy RTG záření brzdné a charakteristické.

Energie fotonu lze popsat rovnicí $E = h \cdot f$ kde h je Planckova konstanta a f je frekvence. Získané spektrum je spojité, protože brzdné záření emituje všechny vlnové délky na rozdíl od charakteristického, které vyzáří pouze určitou délku. Jistou podobnost zde můžeme nalézt, jako u světla, kde brzdné se chová jako viditelné, tedy obsahuje všechny délky a charakteristické je vyzáří pouze v určitém spektru. [21,23]

Brzdné záření

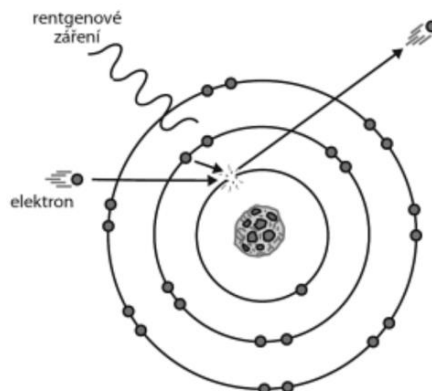
Elektron dopadající na atom začíná brzdit působením elektrického pole v samotném jádru atomu. Záření je pak tedy emitováno ve formě fotonu, viz. Obr.15. [23,24]



Obrázek 15 - Schématické znázornění brzdného záření

Charakteristické záření

Elektron dopadající na atom vyřadí elektron z nižší hladiny a místo něj se přesune elektron z vyšší, přičemž se vyzáří kvantum energie, viz. Obr. 16. Podmínkou je dostatečná energie dopadajícího elektronu. [23,24]



Obrázek 16 - Schématické znázornění charakteristického záření

2.1.1.2 Fotoelektrický jev (FJ)

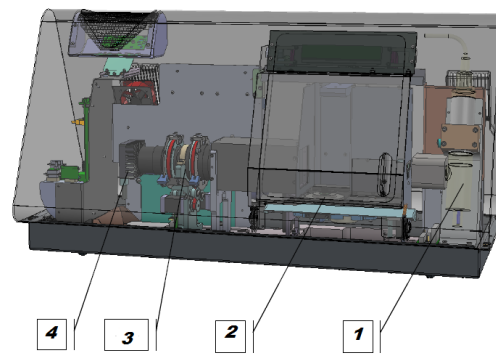
Emise elektronů v důsledku pohlcení dopadajícího elektromag. záření, kde částice foton svou veškerou kinetickou energii předá vybranému elektronu v obalu daného atomu. V případě, kdy vlnová délka bude dostatečně krátká, dojde k vyražení elektronu z obalu atomu. Tento elektron se stává fotoelektronem. Rozlišujeme dva typy fotoelektrického jevu, tedy vnitřní a vnější.

U vnějšího FJ dojde k absorpci dopadajícího záření vnesené fotonem a následně fotoemisi, tedy uvolněním jednoho z elektronů. Takový fotoelektron je následně uvolněn z povrchu materiálu.

Pro vnitřní FJ Uvolněný elektron pouze excituje, a může docházet k přeskoku mezi valenčním a vodivostním pásem, což má za následek zvýšení vodivosti. [24]

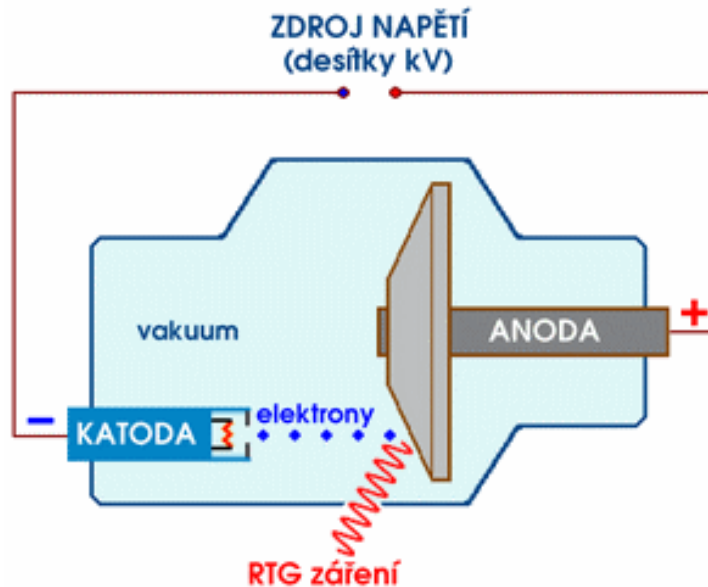
2.1.1.3 Složení rentgenového tomografu

Systematické složení tomografu je velmi jednoduché. Jde o sériové zapojení všech důležitých komponentů. Viz obrázek 17.



Obrázek 17 - Konstrukce RTG Tomografu od společnosti Bruker Skyscan 1174.
1- zdroj rentgeno-vého záření (rentgenka); 2- prostor pro vzorek; 3- detektor; 4- kamera. [25]

Rentgenové zařízení nebo též rentgenka, viz. Obr. 18, je stroj schopný vyprodukovat paprsky rentgenové záření. Mezi takovéto zdroje by se dalo zařadit i např. Slunce (hvězdy obecně). [26] [36]



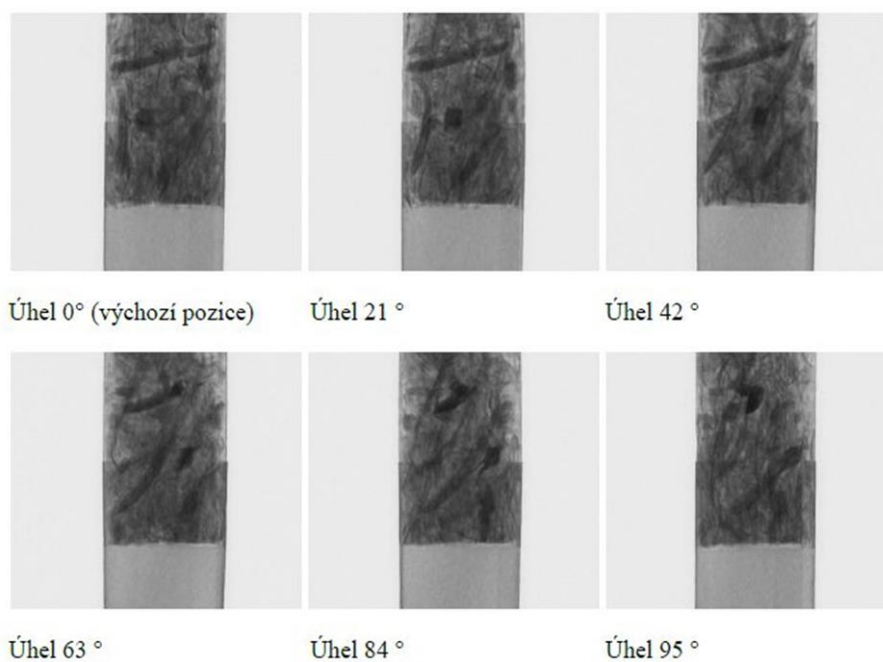
Obrázek 18 - Znáornění principu rentgenového zařízení [20]

2.1.1.4 Tomografie

Tomografie obecně znamená zobrazování struktury v řezech, avšak bez narušení fyzické podstaty zkoumaného objektu. S tímto pojmem se můžeme setkat hned s několika doplňujícími příklady, jako jsou např. rentgenová, výpočetní, seismická atd. tomografie.

Celkový proces je tedy založen na pořizování obrazů při otočení o zvolený úhel v rozmezí 360°. Zvolení úhlu pootočení je závislé na zvoleném počtu snímků, které chceme získat a také na čase vymezeném pro měření.

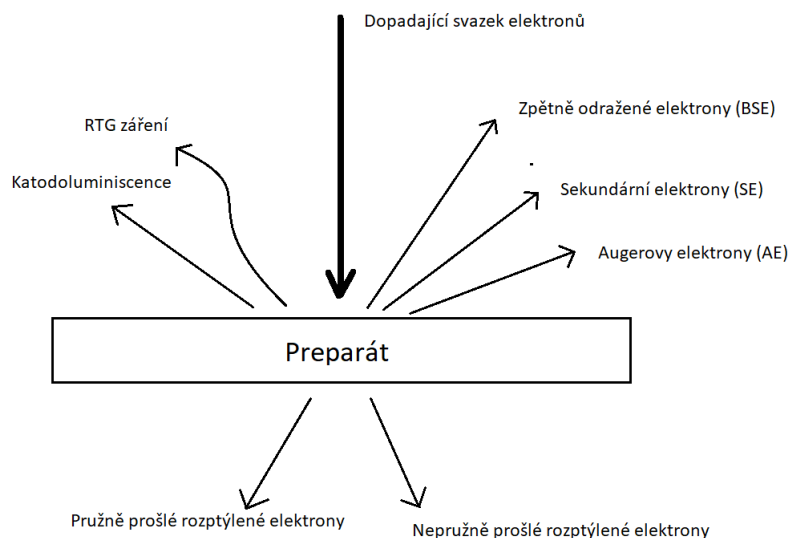
Pomocí rentgenky je objekt ozářen a prošlé paprsky jsou zachyceny na detektoru, který obraz převede do počítače. Postupným otáčením pak získáme ucelený obraz a pomocí vhodného programu jsme s obrazem dále schopni pracovat např. vypočítávat velikosti pórů v materiálu. [26]



Obrázek 19 - Snímky pořízené rentgenovou tomografií vzorku cigarety v různých úhlech pootočení

2.1.2 SEM

SEM je zkratka pro Skenující (Rastrovací) elektronovou mikroskopii. Tato metoda zobrazuje zkoumaný povrch materiálu s velmi vysokým rozlišením, pomocí svazku elektronů dopadajícího na povrch vzorku. Pro detekci změn povrchové topografie se používají na odražené nebo sekundární elektrony snímané pomocí detektoru, viz. Obr. 19. [27,28]



Obrázek 20 - Schéma rozdělení elektronů po dopadu na preparát

2.1.2.1 Soustava elektronového mikroskopu a jeho popis

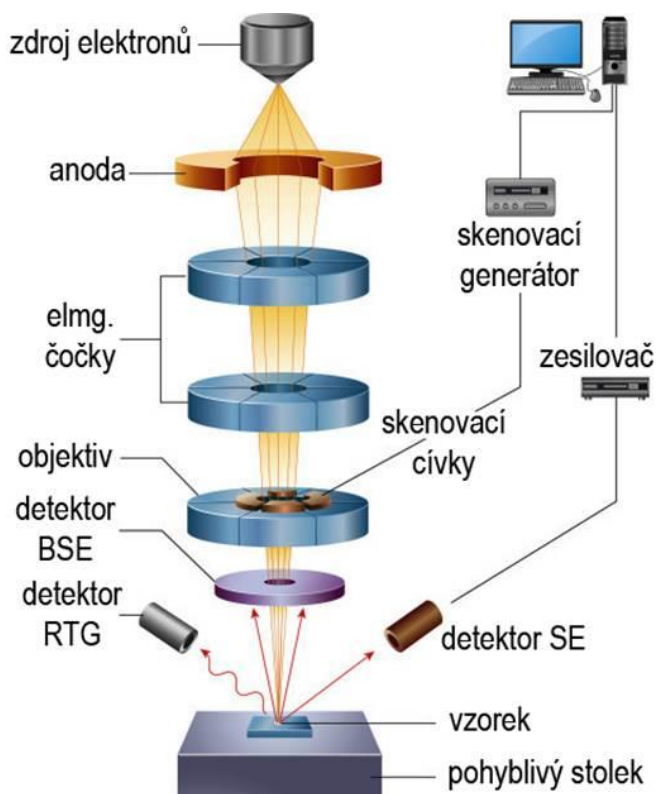
Jako zdroj elektronů se používá tzv. elektronového děla, které obsahuje termoemisní nebo autoemisní zdroj. U termoemisního zdroje je základem žhavená kovová katoda. Nejběžnější bývají katody wolframové a pro profesionálnější zařízení jsou katody různých slitin jako např. LaB₆, které vydrží i rok.

U autoemisní katody jsou zdroje, které nepotřebují k emisi elektronů teplo přivedené elektrickým proudem, mezi takové se řadí katody FEG (*field emission gun*) z wolfram, leptaného do hrotu.

Elektrony vystřelené z děla jsou navíc ještě urychlovány napětím v řádech kV. V závislosti na kvalitě a typu mikroskopu se velikost urychlovacího napětí může lišit.

Mimo to SEM obsahuje kondenzátorové čočky, které jsou určitým typem cívky, která produkuje elektromagnetické pole, čímž dochází k patřičnému usměrnění elektronů vystřelených z elektronového děla.

Příslušný detektor zachytí elektrony, a signál z něj je přenášen do počítače, kde pomocí matematických operací je vymodelován výsledný obraz, viz. Obr. 20. [28,29]



Obrázek 21 – Zobrazení schéma SEM mikroskopu [28]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

3 POPIS EXPERIMENTU

Cílem experimentální části práce bylo připravit pomocí FDM a SLA metody 3D tisku modelové prostorové mřížky. Následně zobrazit jejich povrch pomocí SEM a rekonstruovat vnitřní strukturu těchto modelových mřížek pomocí 3D RTG tomografie.

3.1 Použité materiály pro FDM

Pro metodu FDM byl použit materiál PLA do firmy Ultimaker o průměru tiskového filamentu 2,85 mm. Použitý materiál se vyznačuje následujícími vlastnostmi:

Tabulka 1 - Charakteristické vlastnosti pro materiál PLA [30]

Materiál	Průměr struny	Modul tažnosti	Modul pružnosti v ohybu	Modul pevnosti v ohybu	Teplota tání	Teplota skelného přechodu
PLA	(2,85 ± 0,10) mm	2347 Mpa	3150 Mpa	103 Mpa	145-160 °C	~ 60 °C

3.2 Použité materiály pro SLA

Byly použity dva standardní materiály s označením Clear a Grey Pro.

Tabulka 2 - Charakteristické vlastnosti pro materiály Clear a Grey Pro před a po vytvrzení. [39,40]

Materiál	Pevnost v tahu (MPa)	Modul pružnosti v tahu (Gpa)	Modul pevnosti v ohybu (Gpa)
Clear	38	1,6	1,25
Clear (vytvrzený)	65	2,8	2,20
Grey Pro	35	1,4	0,94
Grey Pro (vytvrzený)	61	2,6	2,20

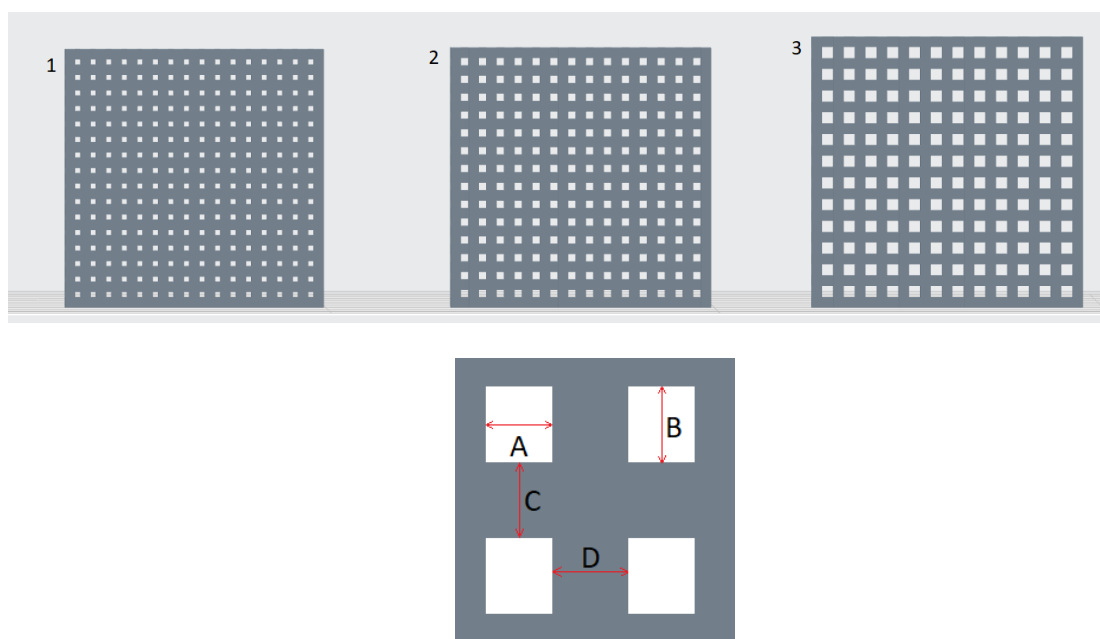
Materiál Clear je charakteristický svou transparentností, je tedy vhodný pro optické aplikace, například kryt uložení pohyblivé části produktu. Grey Pro je materiál šedé barvy, používány pro tisk prototypů s vysokou přesností tisku a možností opakovaného namáhání výsledného produktu, což jej předurčuje k použití při výrobě konstrukčních prvků, kde se počítá s náročným mechanickým pohybem.

3.3 Návrhy modelů pro 3D tisk

Modely tištěných mřížek byly navrženy v programu Autodesk Inventor od firmy Autodesk. Pro tisk byly exportovány v stl formátu a upraveny v příslušném „slicer“ programu. Pro FDM je to Ultimaker Cura od firmy Ultimaker, a PreForm pro SLA od firmy Formlab.

3.3.1 Modely tištěné pomocí FDM

Pomocí FDM byly tištěny následující tři modely, viz. Obrázek 22 a Tabulka.



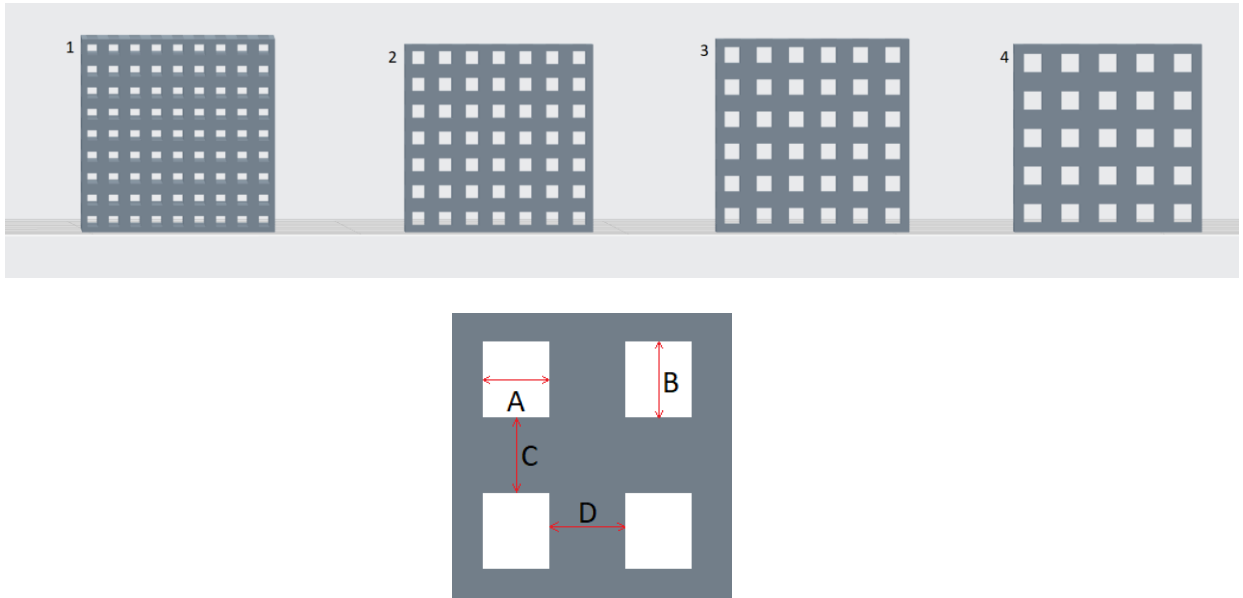
Verze mřížky	A (μm)	B (μm)	C (μm)	D (μm)
FDM-1	140	200	200	260
FDM-2	200	200	200	260
FDM-3	300	200	200	260

Obrázek 22 – Zobrazení prototypů mřížek před pro 3D tisk pomocí FDM

Pozn.: V rámci této bakalářské práce je otvor uvnitř mřížky označován jako pór tak, aby bylo možné porovnávat objem prostoru uvnitř mřížky jako celkovou porositu.

3.3.2 Modely tištěné pomocí SLA

Pomocí SLA byly tištěny následující tři modely, viz. Obrázek 23.



Verze mřížky	A (μm)	B (μm)	C (μm)	D (μm)
SLA-1	400	400	400	400
SLA-2	500	500	500	500
SLA-3	600	600	600	600
SLA-4	700	700	700	700

Obrázek 23 - Zobrazení prototypů mřížek před pro 3D tisk pomocí SLA.

3.4 Použité zařízení pro FDM

Tisk probíhal na tiskárně Ultimaker 2 Extended. Materiál byl vytlačován z trysky o průměru 0,25 mm, viz Obrázek 23. Tato tiskárna umožňuje tisk v objemu 330x240x300 mm i při stálé kvalitě tisku. Je schopna tisknout ze dvou materiálů zároveň, což je výhodné při možné kombinaci materiálů z hlediska jejich barvy nebo mechanických či vlastností. Je vybavena automatickým vyrovnáváním tiskové podložky, má zabudované čidlo pohybu materiálu pro indikaci k navázání vlákna a možnost kontroly tisku zabezpečuje integrovaná kamera.



Obrázek 24 - Použitá 3D tiskárna Ultimaker 2 Extended [37]

3.5 Použité zařízení pro SLA

Pro tisk mřížek technologií SLA byla použita tiskárna FormLabs Form 2, viz Obr. 24. Tato tiskárna umožňuje tisk v objemu $145 \times 145 \times 175$ mm a při vrstvách tisku v rozmezí od 25 do 300 μm . Zařízení je schopno tisknout výrobky s velmi dobrým rozlišením. Výhodou oproti FDM je struktura výrobku, kdy oproti FDM netiskne jednotlivé vrstvy ve směru toku vlákna. Výsledný produkt má tak celistvější charakter. Laser v tiskárně má výkon 250 mW a průměr vytvrzovacího bodu je 140 μm .

Tisková vrstva byla pro materiál GreyPro 50 nebo 100 μm . Pro materiál Clear byla 25, 50 nebo 100 μm .

Po vytištění byly vytištěné vzorky zbaveny nevytvrzené pryskyřice ve vymývací stanici Formlab Form Wash. Pro materiál GreyPro probíhalo vymývání po dobu 15 minut, materiály Clear byl vymýván po dobu 10 minut podle doporučení výrobce. Vymývání probíhalo pomocí isopropylalkoholu. Po vymytí byly tištěné modely umístěny do vytvrzovací jednotky Formlabs Form Cure. GreyPro byl vytvrzován při 80°C po dobu 15 minut. Materiál s označením Clear byl vytvrzován při 60°C po dobu 30 minut. Ve vytvrzovací jednotce byl vzorek kromě zvýšené teploty vystavován působení záření s vlnovou délkou 405 nm.



Obrázek 25 - 3D tiskárna FormLabs Form 2 (vlevo), mycí stanice Formlab Form Wash (uprostřed), vytvrzovací stanice Formlabs Form Cure (vpravo). [31]

3.6 Skenovací elektronový mikroskop

Povrch vytištěných vzorků byl zobrazován pomocí skenovacího elektronového mikroskopu značky Phenom G2 Pro od firmy Phenom World, viz. obr. 26. Vzorky byly zobrazovány při urychlovacím napětí 10 kV bez předešlého pokovení ve speciálním nástavci redukujícím nabíjení povrchu vzorku. Toto zařízení umožňuje pozorovat vzorky při zvětšení 260 až 40 000x.



Obrázek 26 – SEM [38]

3.7 Rentgenový tomograf

Pro rentgenovou tomografii byl použit tomograf od firmy Bruker typ Skyscan 1074. Jedná se o stolní, laboratorní tomograf s následujícími parametry:

- rozměry a hmotnost: 810 × 325 × 420 mm, 54 kg
- rentgenka: urychlovací napětí 1 - 50 kV, maximální výkon 40 W
- rozlišení: 10 - 30 μm

- detektor: CCD kamera 1,3 Megapixel, připojena na scintilátor
- velikost vzorku: 5 - 30 mm v průměru, 50 mm na výšku



Obrázek 27 – Rentgenový tomograf Skyscan 1074

3.8 Programy pro analýzu dat z 3D RTG zobrazení

K analýze výsledného setu snímků naměřeného pomocí rentgenového tomografu slouží v první fázi program NRecon, který je schopen odstranit kruhové fragmenty vzniklé při měření a tak vylepši kvalitu výsledného data setu, který pak použijeme při dalším zpracování.

V dalším kroku je rekonstruovaný soubor otevřen pomocí programu DataViewer. V tomto programu jsme schopni rychle nahlédnout na 3D rekonstruovaný model měřeného vzorku, a tyto náhledy ukládat je v různých pozicích, nebo vytvořit ortogonální obraz složený ze 3 snímků.

Pro analýzu vlastností vzorku je použito programu CTAn, který zanalyzuje vzorek a také dokáže převést data set do binárního zobrazení.

3D model je dále možno vytvořit v programu CTVox z dříve připraveného binárního setu. Všechny tyto programy byla od výrobce použitého tomografu a to společnosti Bruker.

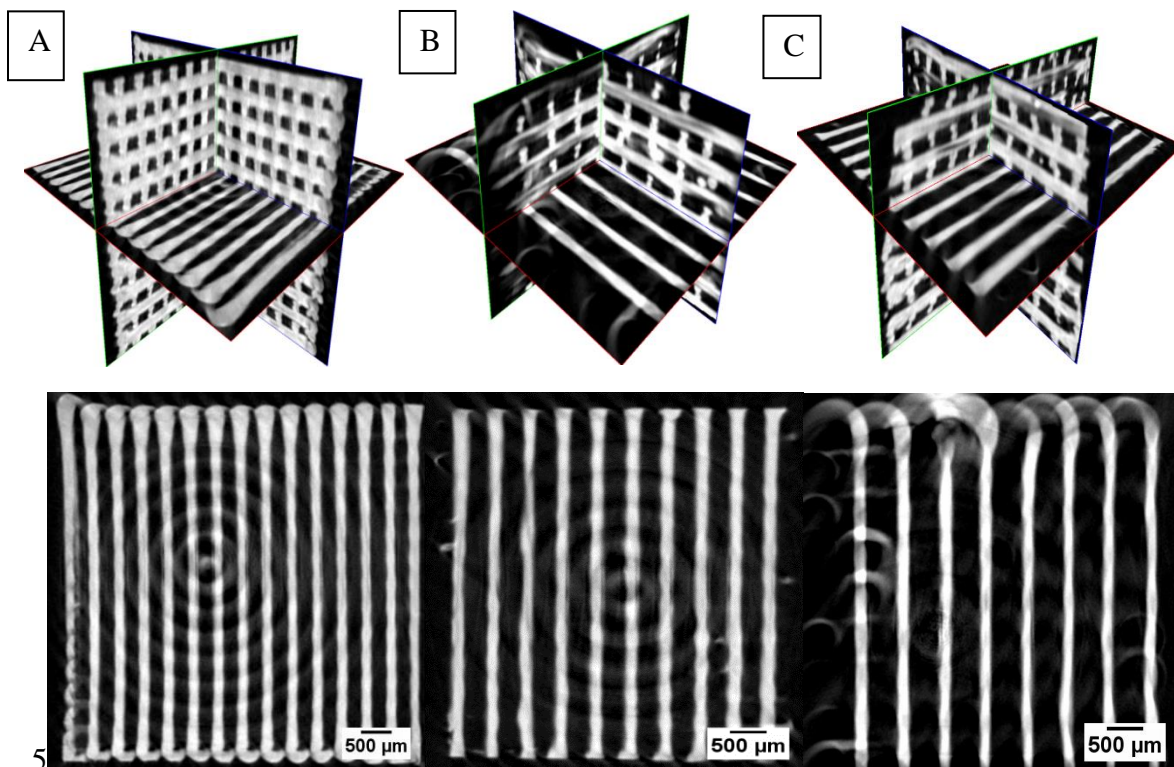
Všechny tyto programy byla od výrobce použitého tomografu a to společnosti Bruker.

4 VÝSLEDKY

První část výsledků této práce je věnována charakterizaci vzorků vytištěných pomocí FDM z jednoho typu materiálu. Následující části se věnují mřížkám připraveným pomocí SLA z dvou typů materiálů vytištěných při rozdílné tiskové vrstvě. Při využití FDM a SLA technologie tisku byly vzorky orientovány rovnoběžně s tiskovou podložkou (neprobíhal tisk pod úhlem).

4.1 Mřížky připravené pomocí FDM

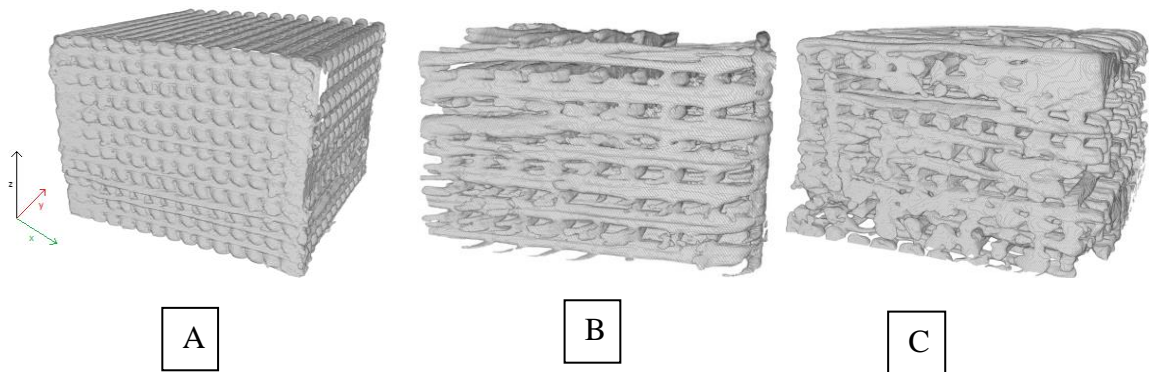
Na obrázku 28 a 29 jsou uvedeny výsledky z 3D rekonstrukce vnitřní struktury zkoumaných mřížek pomocí RTG tomografie. Tyto mřížky byly vytištěny pomocí FDM metod 3D tisku.



Obrázek 28 - Zpracovaná data z 3D-RTG pomocí programu DataViewer. Nahoře osový model mřížek a dole řez mřížkami v osách x a y. A) FDM-1 B) FDM-2 C) FDM-3, podrobnější popis mřížek viz. obr. 22.

Poznámka: Všechny zkoumané mřížky byly skenovány pomocí rentgenového tomogramu s nastaveným krokem pootočení $0,1^\circ$ v rozsahu 180° . Při každém potočení byly průměrovány 4 snímky, z nichž vyšel výsledný, který byl použit pro rekonstrukci 3D struktury

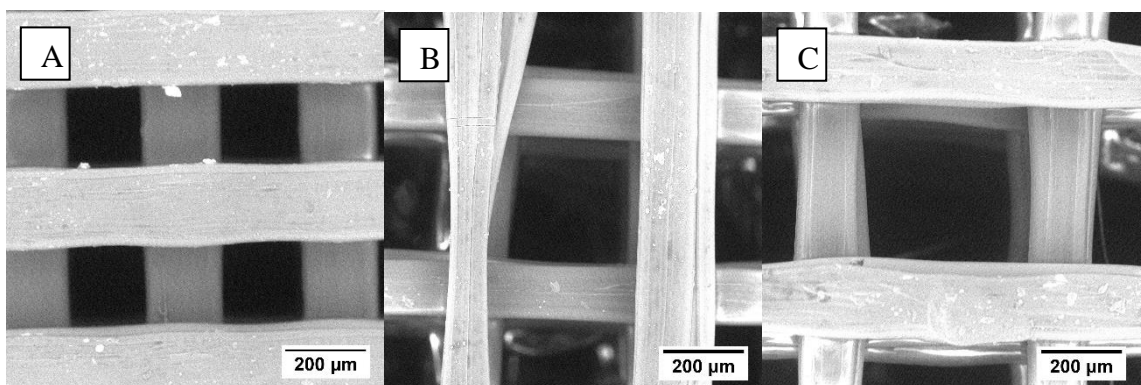
vzorku. Z toho plyne, že pro každý vzorek bylo pořízeno 4 x 1800 snímků, snímání jednoho vzorku na použitém zařízení trvalo okolo 12 hodin.



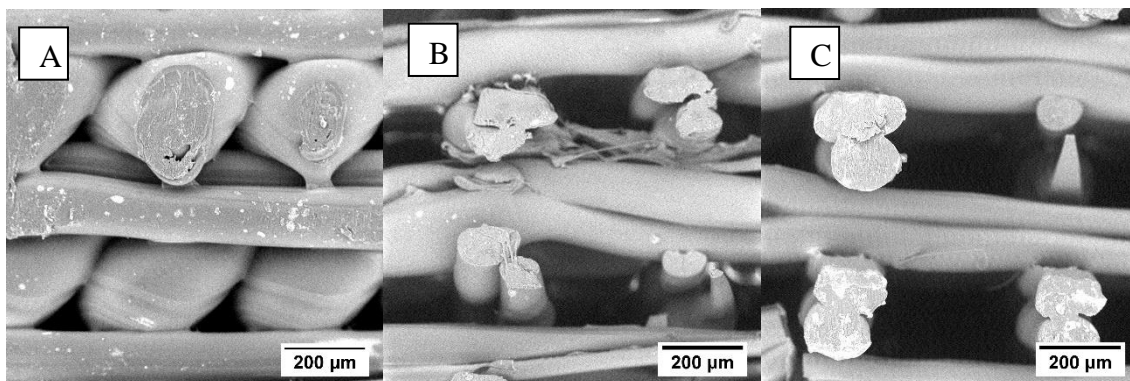
Obrázek 29 – 3D modely sestavené pomocí programu CTVox z binárního data setu, získaného z programu CTAn. A) FDM-1 B) FDM- 2 C) FDM-3, podrobnější popis mřížek viz. obr. 22.

Obrázek 30 uvedený pohled na povrch mřížek připravených pomocí FDM. Připravené mřížky byly zobrazeny pomocí SEM při pohledu ze shora (směr osy z) a při pohledu z bočních stran (směr os x a y). Orientace jednotlivých os je schématicky naznačena na obrázku 29A.

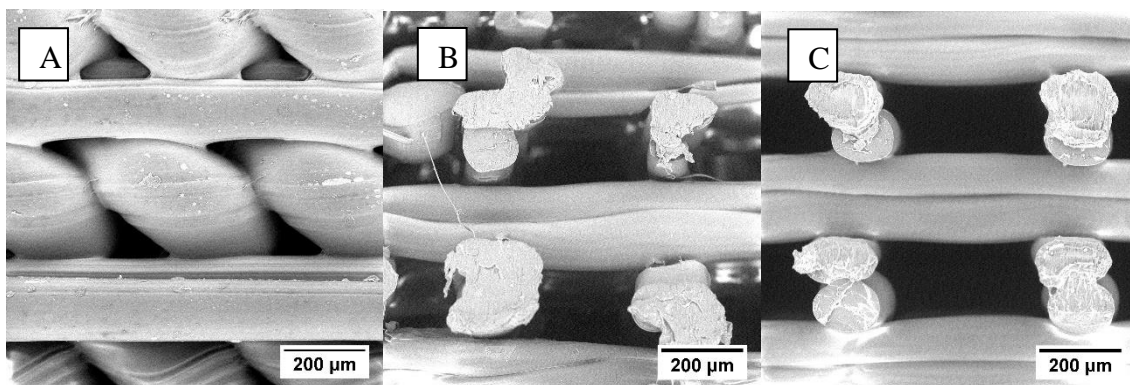
Směr osy z:



Směr osy x:



Směr osy y:



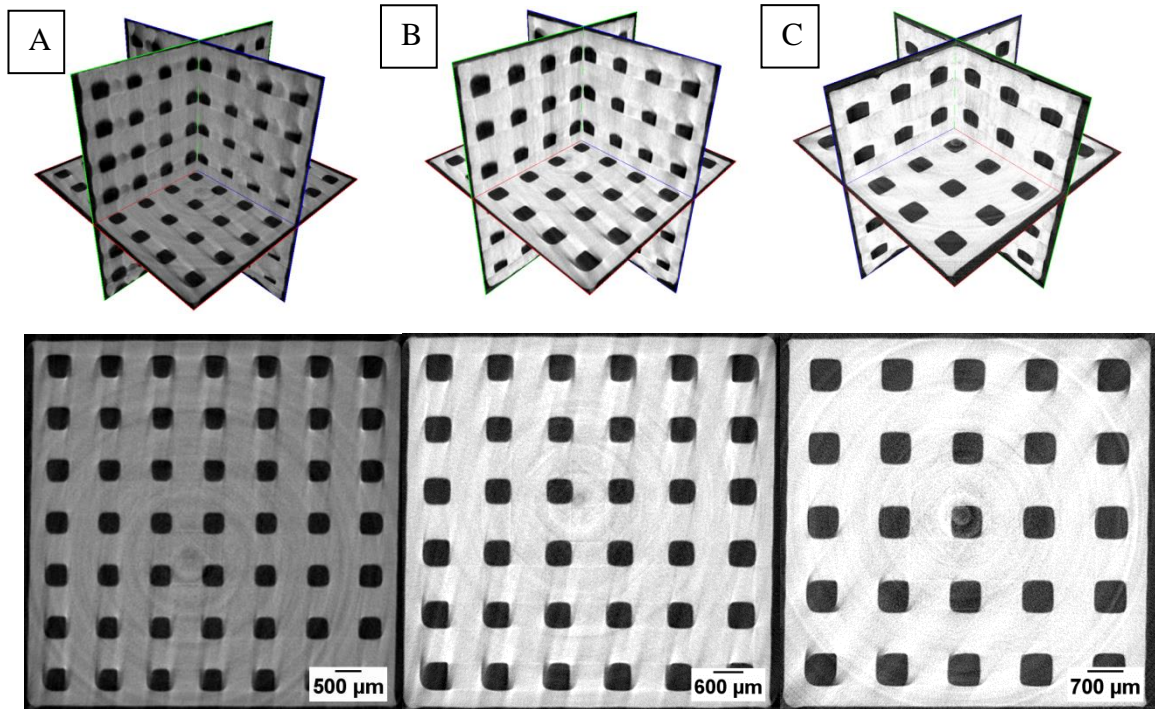
Obrázek 31 - Snímky ze SEM pro rozdílné směry pohledu – 3D tisku. A) FDM-1 B) FDM-2 C) FDM-3, podrobnější popis mřížek viz. obr. 22.

4.2 Mřížky připravené pomocí SLA

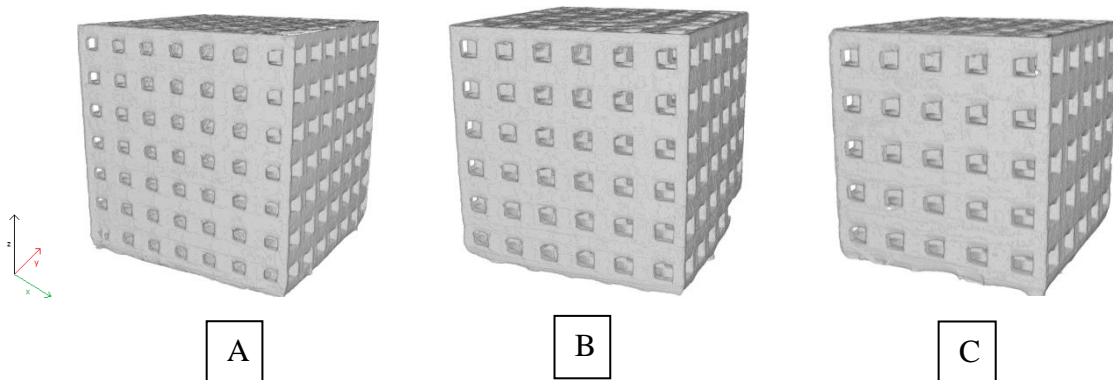
Výsledky pro mřížky připravené pomocí SLA jsou rozděleny podle typu použitého materiálu a výšky tiskové vrstvy. Podrobnější popis modelových rozměrů tištěných mřížek je uveden na obr. 22.

4.2.1 Mřížky z materiálu Clear

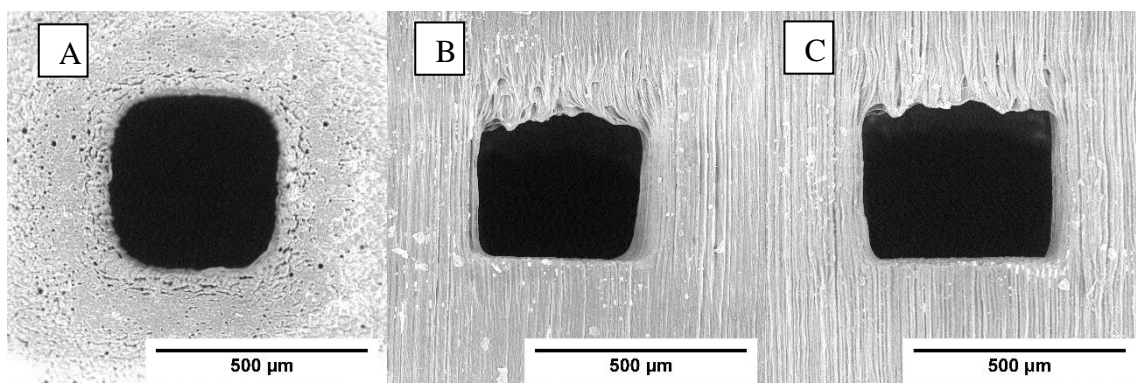
Jak je uvedeno v kapitole věnované materiálům a metodám, pro tisk pomocí SLA byly použity dva typy materiálů. První z prezentovaných typů je materiál s označením Clear. Podle nastavení od výrobce tiskárny a materiálů lze tento materiál při 3D tisku vrstvit po 25, 50 nebo 100 µm.

4.2.1.1 Vrstva tisku 25 μm 

Obrázek 32 - Zpracovaná data z 3D-RTG pomocí programu DataViewer. Nahoře osový model mřížek a dole řez mřížkami v osách x a y. A) SLA-2-500 μm B) SLA-3-600 μm C) SLA-4-700 μm , podrobnější popis mřížek viz. obr. 23.



Obrázek 33 - 3D modely sestavené pomocí programu CTVox z binárního data setu, získaného z programu CTAn. A) SLA-2-500 μm B) SLA-3-600 μm C) SLA-4-700 μm , podrobnější popis mřížek viz. obr. 23.



Obrázek 34 - Snímky ze SEM pro rozdílné směry pohledu – 3D tisku, vzorek – SLA-2-500 µm, tisková vrstva 25 µm, materiál clear. Pohlede ve směru A) osy z B) osy x C) osa y. Orientace os naznačena na Obr. 33A

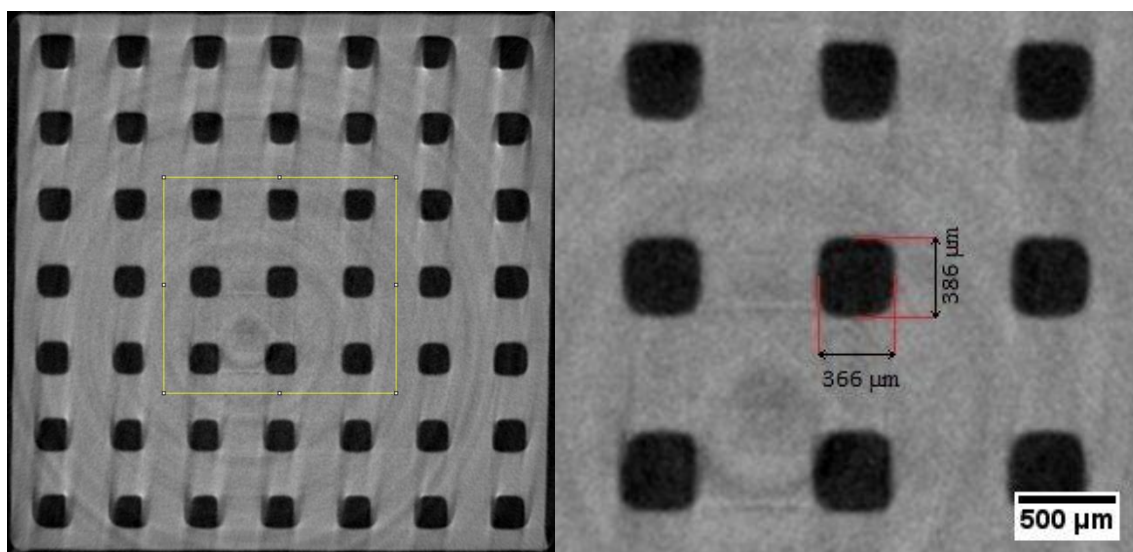
U mřížek pomocí SLA byla pro rekonstrukci pomocí 3D RTG analyzována v programu CTAn celková porozita vzorku, tj. objem volného prostoru uvnitř tištěného objektu. Tento parametr je porovnáván s požadovanou hodnotou porozity v modelu pro tisk. Tabulky 1 uvádí výsledky pro mřížky vytištěné z materiálu Clear s výškou tiskové vrstvy 25 µm.

Tabulka 2 - Výsledky získané z analýzy programem CTAn pro jednotlivé typy mřížek s vrstvou tisku 25 µm.

Typ mřížky	SLA-2-500 µm	SLA-3-600 µm	SLA-4-700 µm
Celková porozita (µm ³)	$6,60 \cdot 10^{10}$	$1,32 \cdot 10^{11}$	$1,04 \cdot 10^{11}$
Požadovaná porozita (µm ³)	$3,00 \cdot 10^{11}$	$2,80 \cdot 10^{11}$	$2,14 \cdot 10^{11}$

4.2.1.2 Měření velikosti póru

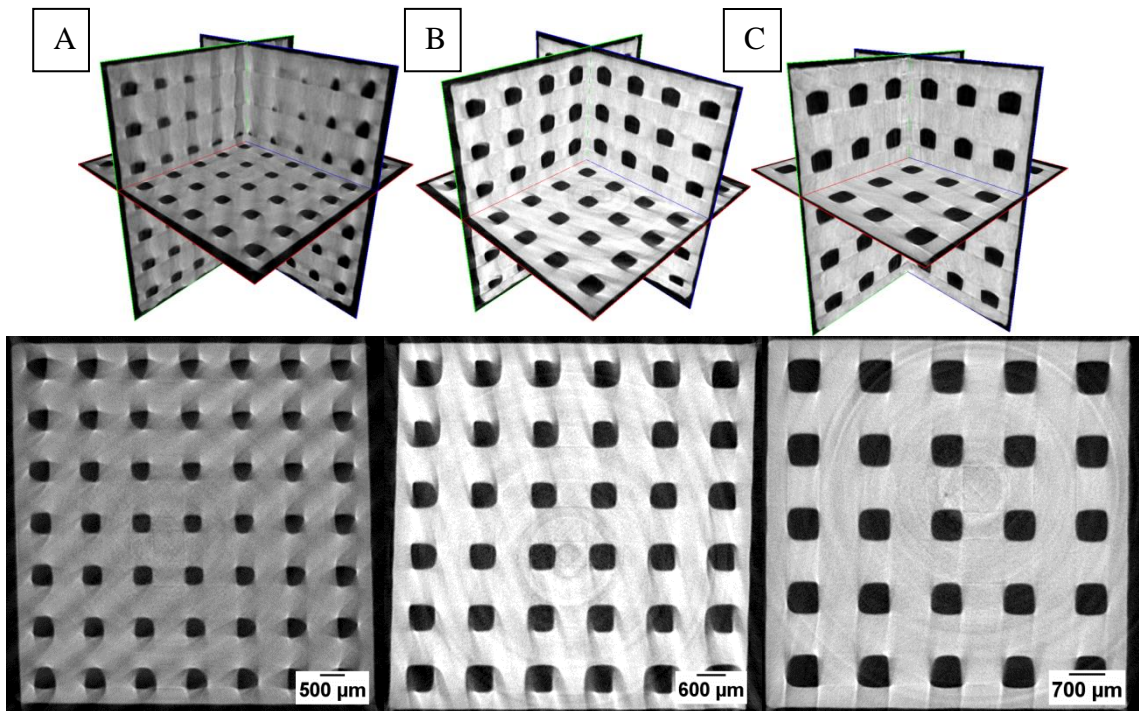
Jak plyne z Obr. 25 příčný průřez tištěnými póry není ve všech tištěných osách stejný. Z tohoto důvodu byly měřeny rozměry vybraných pórů a plocha jejich průřezu. Výsledky z tohoto měření jsou uvedeny na Obr. 26 a v Tabulce 2.



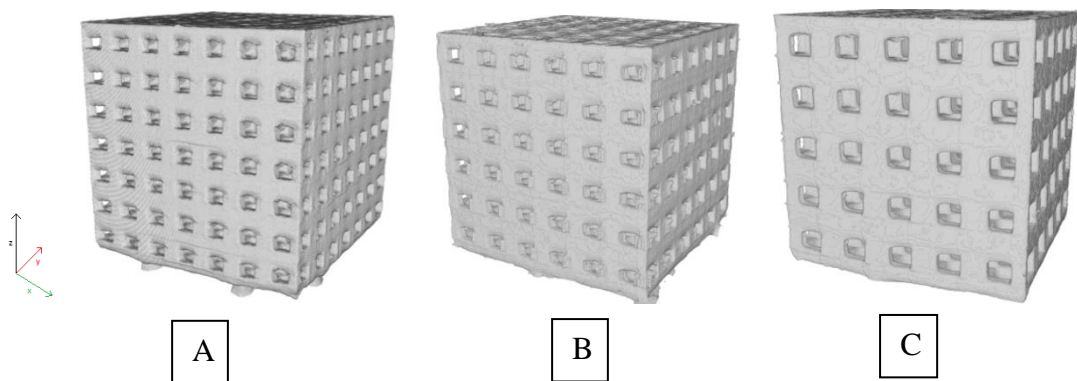
Obrázek 35 - Znázornění měření šířek pórů v programu Image J pro mřížku SLA-2-500 μm . Pro měření byl vybrán vždy jeden z pórů nejbližší středu vzorku.

Tabulka 3 - Porovnání rozměrů a plošných průřezů pórů vůči počítačovému modelu (standardu) pro jednotlivé typy mřížek z materiálu Clear s vrstvou tisku 25 μm . Orientace os pro analýzu pórů je naznačena na Obr. 33A.

Mřížka	Modelové hodnoty	Skutečnost ve směru osy x	Skutečnost ve směru osy y	Skutečnost ve směru osy z
SLA-2 500 μm	(500x500) μm $S=2,50 \cdot 10^5 \mu\text{m}^2$	(346x405) μm $S=1,65 \cdot 10^5 \mu\text{m}^2$	(356x426) μm $S=1,62 \cdot 10^5 \mu\text{m}^2$	(366x386) μm $S=1,46 \cdot 10^5 \mu\text{m}^2$
SLA-3 600 μm	(600x600) μm $S=3,60 \cdot 10^5 \mu\text{m}^2$	(479x568) μm $S=2,61 \cdot 10^5 \mu\text{m}^2$	(449x524) μm $S=2,20 \cdot 10^5 \mu\text{m}^2$	(503x502) μm $S=2,46 \cdot 10^5 \mu\text{m}^2$
SLA-4 700 μm	(700x700) μm $S=4,90 \cdot 10^5 \mu\text{m}^2$	(644x550) μm $S=3,26 \cdot 10^5 \mu\text{m}^2$	(654x560) μm $S=3,66 \cdot 10^5 \mu\text{m}^2$	(587x604) μm $S=3,37 \cdot 10^5 \mu\text{m}^2$

4.2.2 Vrstva tisku 50 μm 

Obrázek 36 - Zpracovaná data z 3D-RTG pomocí programu DataViewer. Nahoře osový model mřížek a dole řez mřížkami v osách x a y. A) SLA-2-500 μm B) SLA-3-600 μm C) SLA-4-700 μm , podrobnější popis mřížek viz. obr. 23.

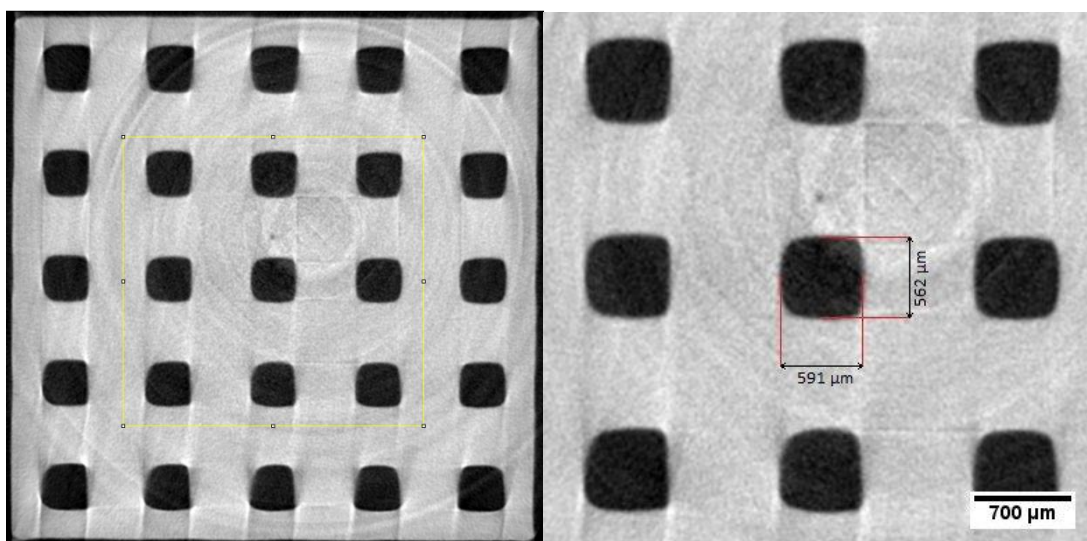


Obrázek 37 - 3D modely sestavené pomocí programu CTVox z binárního data setu, získaného z programu CTAn. A) SLA-2-500 μm B) SLA-3-600 μm C) SLA-4-700 μm , podrobnější popis mřížek viz. obr. 23.

Tabulka 4 - Výsledky získané z analýzy programem CTAn pro jednotlivé typy mřížek s vrstvou tisku 50 μm .

Typ mřížky	SLA-2-500 μm	SLA-3-600 μm	SLA-4-700 μm
Celková porosita (μm^3)	$1,60 \cdot 10^{11}$	$1,49 \cdot 10^{11}$	$9,357 \cdot 10^{10}$
Požadovaná porosita (μm^3)	$3,00 \cdot 10^{11}$	$2,80 \cdot 10^{11}$	$2,14 \cdot 10^{11}$

4.2.2.1 Měření velikosti póru



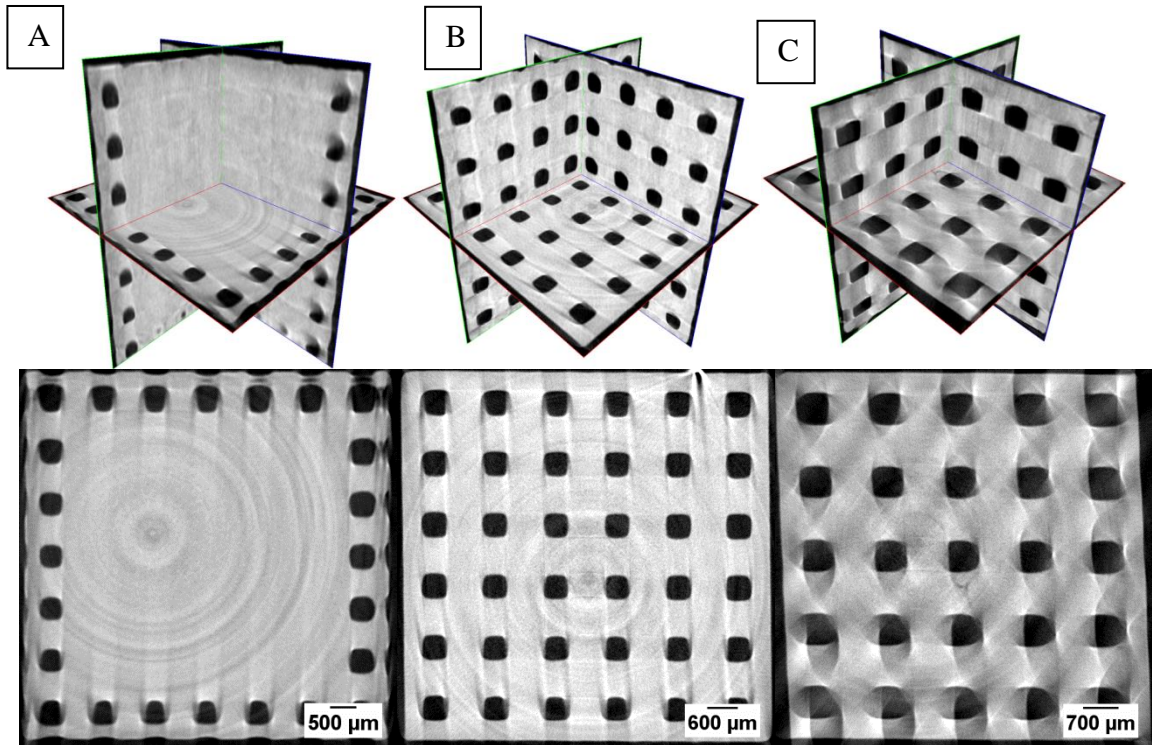
Obrázek 38 - Znázornění měření šířek pórů v programu Image J pro mřížku SLA-4-700 μm . Pro měření byl vybrán vždy jeden z pórů nejbližší středu vzorku.

Tabulka 5 - Porovnání rozměrů a plošných průřezů pórů vůči počítačovému modelu (standardu) pro jednotlivé typy mřížek z materiálu Clear s vrstvou tisku 50 μm . Orientace os pro analýzu pórů je naznačena na Obr. 37A.

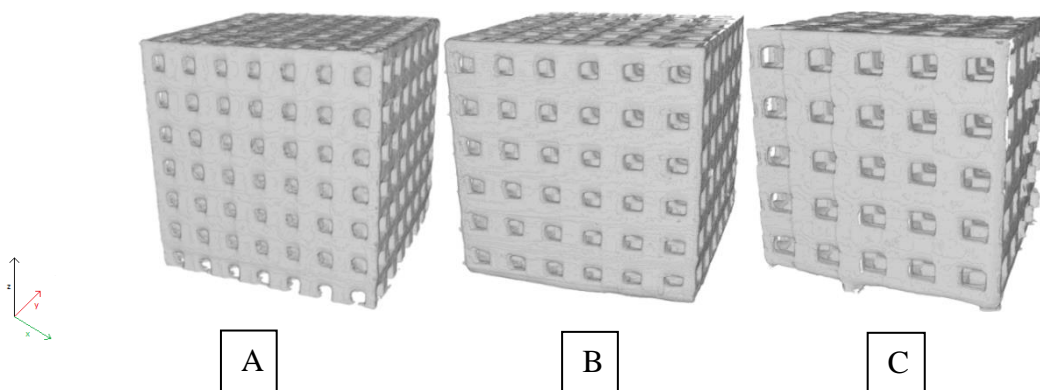
Mřížka	Modelové hodnoty	Skutečnost ve směru osy x	Skutečnost ve směru osy y	Skutečnost ve směru osy z
SLA-2 500 μm	(500x500) μm $S=2,50 \cdot 10^5 \mu\text{m}^2$	(448x247) μm $S=1,25 \cdot 10^5 \mu\text{m}^2$	(396x248) μm $S=8,29 \cdot 10^4 \mu\text{m}^2$	(348x357) μm $S=1,13 \cdot 10^5 \mu\text{m}^2$
SLA-3 600 μm	(600x600) μm $S=3,60 \cdot 10^5 \mu\text{m}^2$	(548x591) μm $S=3,12 \cdot 10^5 \mu\text{m}^2$	(579x572) μm $S=3,00 \cdot 10^5 \mu\text{m}^2$	(535x521) μm $S=2,64 \cdot 10^5 \mu\text{m}^2$

SLA-4	(700x700) μm	(669x580) μm	(645x576) μm	(591x562) μm
700 μm	$S=4,90 \cdot 10^5 \mu\text{m}^2$	$S=3,59 \cdot 10^5 \mu\text{m}^2$	$S=3,47 \cdot 10^5 \mu\text{m}^2$	$S=3,26 \cdot 10^5 \mu\text{m}^2$

4.2.3 Vrstva tisku 100 μm



Obrázek 39 - Zpracovaná data z 3D-RTG pomocí programu DataViewer. Nahoře osový model mřížek a dole řez mřížkami v osách x a y. A) SLA-2-500 μm B) SLA-3-600 μm C) SLA-4-700 μm , podrobnější popis mřížek viz. obr. 23.

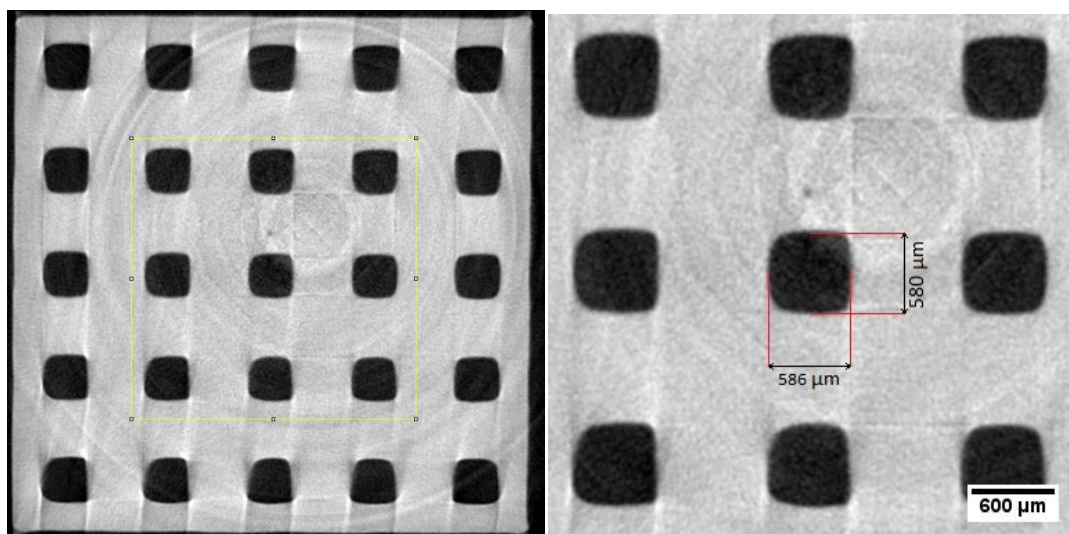


Obrázek 40 - 3D modely sestavené pomocí programu CTVox z binárního data setu, získaného z programu CTAn. A) SLA-2-500 μm B) SLA-3-600 μm C) SLA-4-700 μm , podrobnější popis mřížek viz. obr. 23.

Tabulka 6 - Výsledky získané z analýzy programem CTAn pro jednotlivé typy mřížek s vrstvou tisku 100 μm .

Typ mřížky	SLA-2-500 μm	SLA-3-600 μm	SLA-4-700 μm
Celková porosita (μm^3)	$4,10 \cdot 10^{10}$	$1,31 \cdot 10^{11}$	$1,30 \cdot 10^{11}$
Požadovaná porosita (μm^3)	$3,00 \cdot 10^{11}$	$2,80 \cdot 10^{11}$	$2,14 \cdot 10^{11}$

4.2.3.1 Měření velikosti póru



Obrázek 41 - Znázornění měření šířek pórů v programu Image J pro mřížku SLA-3-600 μm . Pro měření byl vybrán vždy jeden z pórů nejbližší středu vzorku.

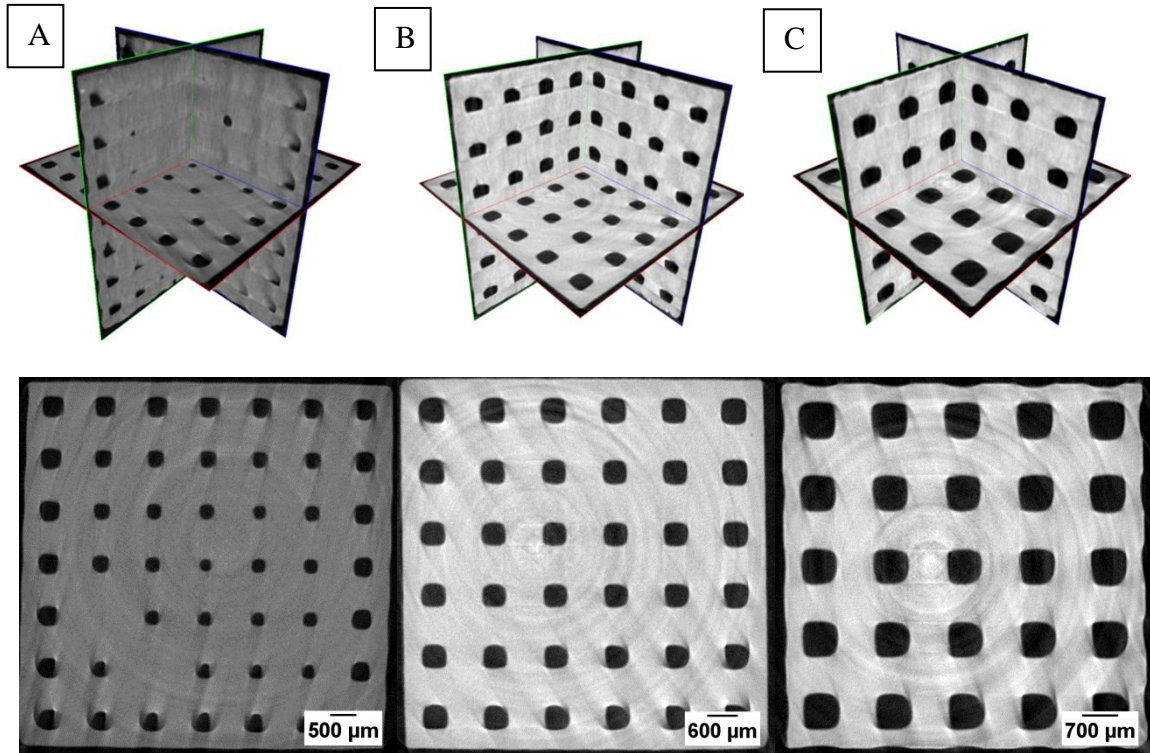
Tabulka 7 - Porovnání rozměrů a plošných průřezů pórů vůči počítačovému modelu (standardu) pro jednotlivé typy mřížek z materiálu Clear s vrstvou tisku 100 μm . Orientace os pro analýzu pórů je naznačena na Obr. 40A.

Mřížka	Modelové hodnoty	Skutečnost ve směru osy x	Skutečnost ve směru osy y	Skutečnost ve směru osy z
SLA-2 500 μm	(500x500) μm $S=2,50 \cdot 10^5 \mu\text{m}^2$	Bez pórů	Bez pórů	(424x434) μm $S=1,61 \cdot 10^5 \mu\text{m}^2$
SLA-3 600 μm	(600x600) μm $S=3,60 \cdot 10^5 \mu\text{m}^2$	(547x543) μm $S=2,74 \cdot 10^5 \mu\text{m}^2$	(533x517) μm $S=2,41 \cdot 10^5 \mu\text{m}^2$	(586x580) μm $S=2,05 \cdot 10^5 \mu\text{m}^2$

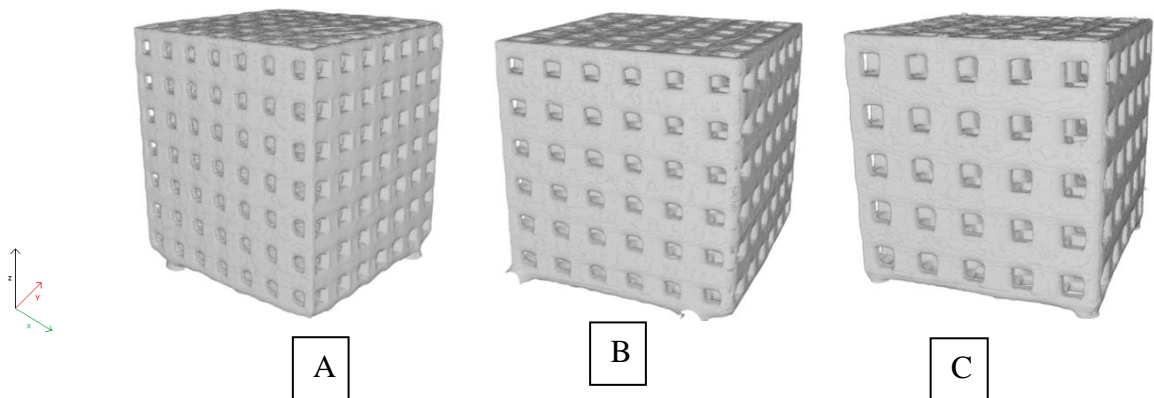
SLA-4	(700x700) μm	(678x583) μm	(703x604) μm	(591x562) μm
700 μm	$S=4,90 \cdot 10^5 \mu\text{m}^2$	$S=3,70 \cdot 10^5 \mu\text{m}^2$	$S=3,96 \cdot 10^5 \mu\text{m}^2$	$S=3,26 \cdot 10^5 \mu\text{m}^2$

4.3 Mřížky z materiálu Grey Pro

4.3.1 Vrstva tisku 50 μm



Obrázek 42 - Zpracovaná data z 3D-RTG pomocí programu DataViewer. Nahoře osový model mřížek a dole řez mřížkami v osách x a y. A) SLA-2-500 μm B) SLA-3-600 μm C) SLA-4-700 μm , podrobnější popis mřížek viz. obr. 22.

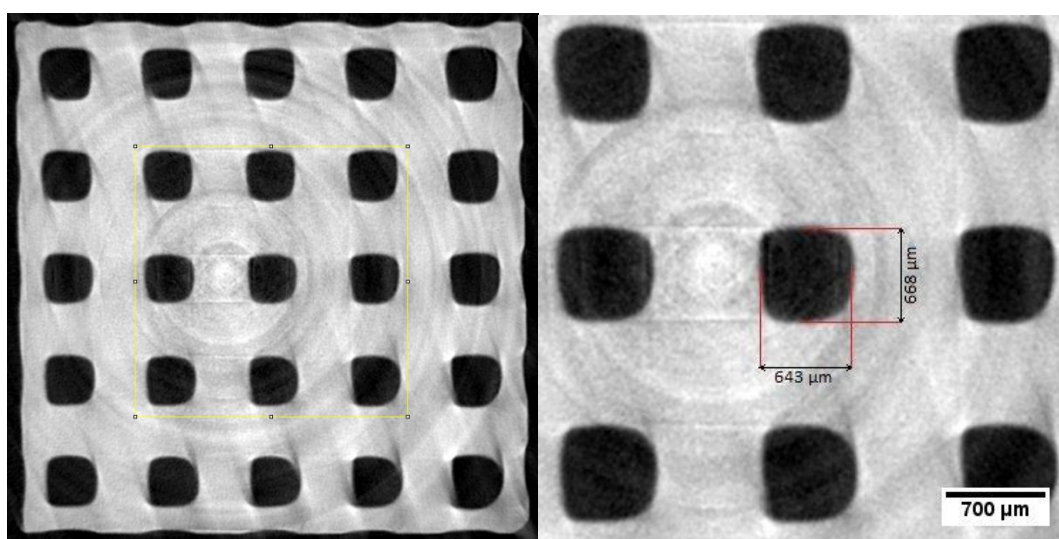


Obrázek 43 - 3D modely sestavené pomocí programu CTVox z binárního data setu, získaného z programu CTAn. A) SLA-2-500 μm B) SLA-3-600 μm C) SLA-4-700 μm , podrobnější popis mřížek viz. obr. 23.

Tabulka 8 - Výsledky získané z analýzy programem CTAn pro jednotlivé typy mřížek s vrstvou tisku 100 μm .

Typ mřížky	SLA-2-500 μm	SLA-3-600 μm	SLA-4-700 μm
Celková porosita (μm^3)	$6,60 \cdot 10^{10}$	$1,17 \cdot 10^{11}$	$3,93 \cdot 10^{10}$
Požadovaná porosita (μm^3)	$3,00 \cdot 10^{11}$	$2,80 \cdot 10^{11}$	$2,14 \cdot 10^{11}$

4.3.1.1 Měření velikosti póru



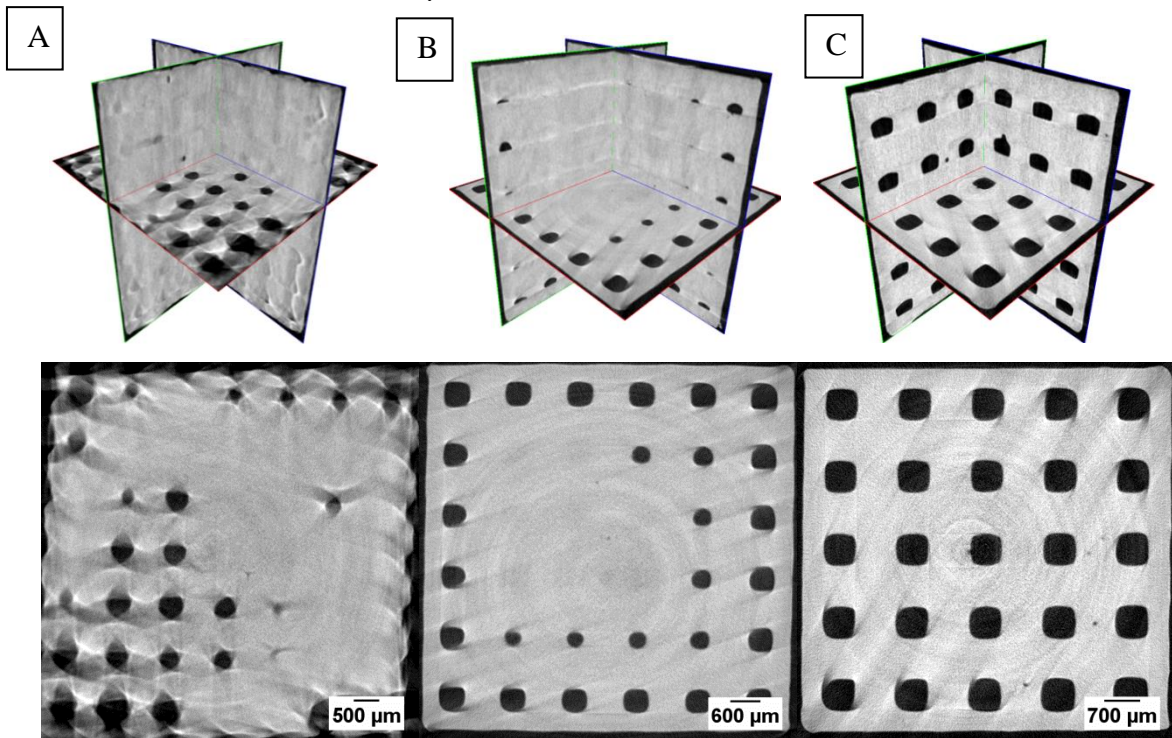
Obrázek 44 - Znázornění měření šířek pórů v programu Image J pro mřížku SLA-2-500 μm . Pro měření byl vybrán vždy jeden z pórů nejbližší středu vzorku.

Tabulka 9 - Porovnání rozměrů a plošných průřezů pórů vůči počítačovému modelu (standardu) pro jednotlivé typy mřížek z materiálu Grey Pro s vrstvou tisku 50 μm . Orientace os pro analýzu pórů je naznačena na Obr. 43A.

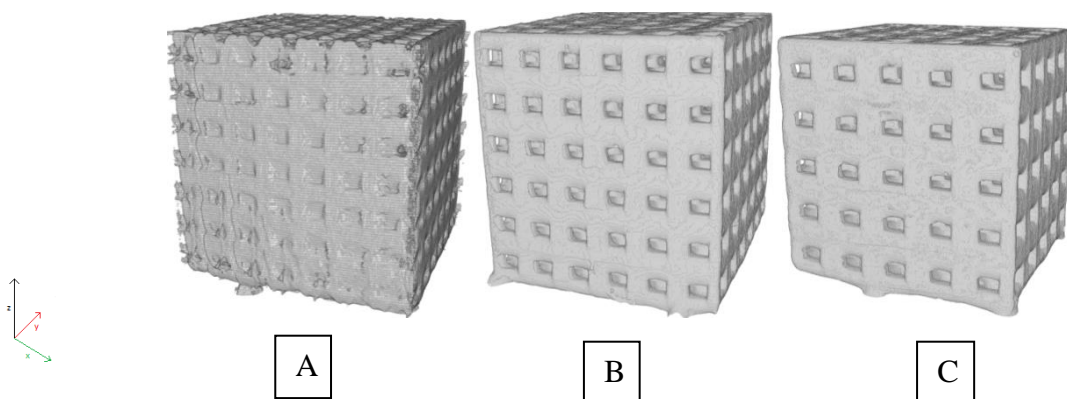
Mřížka	Modelové hodnoty	Skutečnost ve směru osy x	Skutečnost ve směru osy y	Skutečnost ve směru osy z
SLA-2 500 μm	(500x500) μm $S=2,50 \cdot 10^5 \mu\text{m}^2$	(328x354) μm $S=1,12 \cdot 10^5 \mu\text{m}^2$	(286x277) μm $S=6,48 \cdot 10^4 \mu\text{m}^2$	(274x293) μm $S=6,90 \cdot 10^4 \mu\text{m}^2$
SLA-3 600 μm	(600x600) μm $S=3,60 \cdot 10^5 \mu\text{m}^2$	(523x430) μm $S=2,19 \cdot 10^5 \mu\text{m}^2$	(524x470) μm $S=2,19 \cdot 10^5 \mu\text{m}^2$	(465x453) μm $S=1,91 \cdot 10^5 \mu\text{m}^2$

SLA-4	(700x700) μm	(678x637) μm	(620x571) μm	(642x668) μm
700 μm	$S=4,90 \cdot 10^5 \mu\text{m}^2$	$S=3,76 \cdot 10^5 \mu\text{m}^2$	$S=3,10 \cdot 10^5 \mu\text{m}^2$	$S=3,90 \cdot 10^5 \mu\text{m}^2$

4.3.2 Vrstva tisku 100 μm



Obr. 44 – Zpracovaná data z 3D-RTG pomocí programu DataViewer. Nahoře osový model mřížek a dole řez mřížkami v osách x a y. A) SLA-2-500 μm B) SLA-3-600 μm C) SLA-4-700 μm , podrobnější popis mřížek viz. obr. 23.

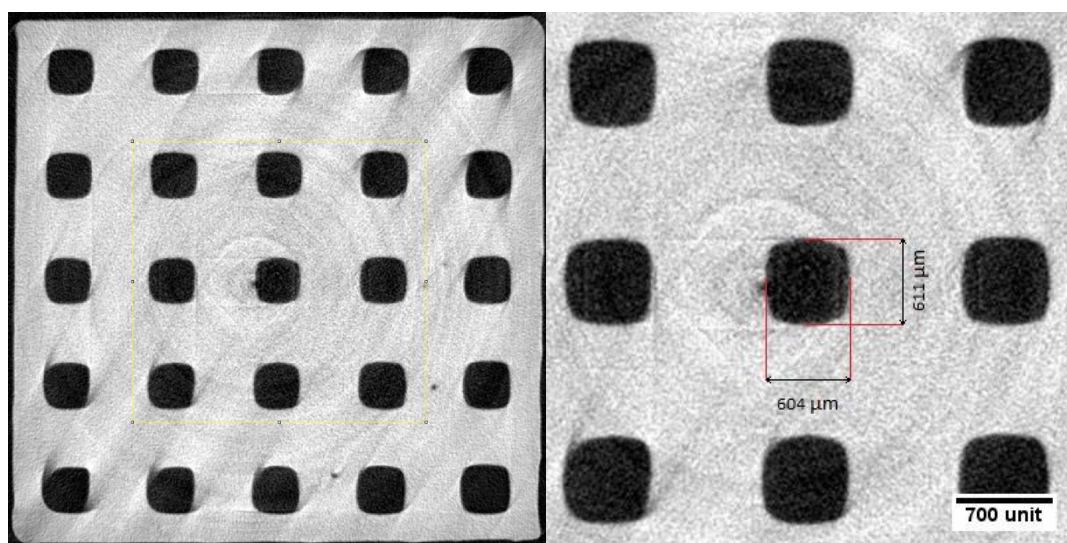


Obrázek 45 - 3D modely sestavené pomocí programu CTVox z binárního data setu, získaného z programu CTAn. A) SLA-2-500 μm B) SLA-3-600 μm C) SLA-4-700 μm , podrobnější popis mřížek viz. obr. 23

Tabulka 10 - Výsledky získané z analýzy programem CTAn pro jednotlivé typy mřížek s vrstvou tisku 100 μm .

Typ mřížky	SLA-2-500 μm	SLA-3-600 μm	SLA-4-700 μm
Celková porosita (μm^3)	$3,93 \cdot 10^{10}$	$8,48 \cdot 10^{10}$	$9,97 \cdot 10^{10}$
Požadovaná porosita (μm^3)	$3,00 \cdot 10^{11}$	$2,80 \cdot 10^{11}$	$2,14 \cdot 10^{11}$

4.3.2.1 Měření velikosti póru



Obrázek 46 - Znázornění měření šířek pórů v programu Image J pro mřížku SLA-4-700 μm . Pro měření byl vybrán vždy jeden z pórů nejbližší středu vzorku.

Tabulka 11 - Porovnání rozměrů a plošných průřezů pórů vůči počítačovému modelu (standardu) pro jednotlivé typy mřížek z materiálu Grey Pro s vrstvou tisku 100 μm . Orientace os pro analýzu pórů je naznačena na Obr. 45A.

Mřížka	Modelové hodnoty	Skutečnost ve směru osy x	Skutečnost ve směru osy y	Skutečnost ve směru osy z
SLA-2 500 μm	(500x500) μm $S=2,50 \cdot 10^5 \mu\text{m}^2$	Bez póru	Bez póru	(441x422) μm $S=1,57 \cdot 10^5 \mu\text{m}^2$
SLA-3 600 μm	(600x600) μm $S=3,60 \cdot 10^5 \mu\text{m}^2$	Bez póru	Bez póru	(355x346) μm $S=1,034 \cdot 10^5 \mu\text{m}^2$

SLA-4	(700x700) μm	(625x630) μm	(648x601) μm	(662x592) μm
700 μm	$S=4,90 \cdot 10^5 \mu\text{m}^2$	$S=3,94 \cdot 10^5 \mu\text{m}^2$	$S=3,90 \cdot 10^5 \mu\text{m}^2$	$S=3,92 \cdot 10^5 \mu\text{m}^2$

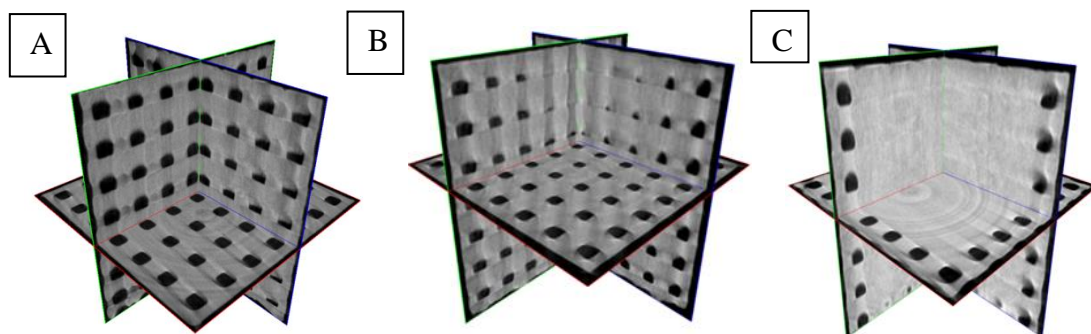
4.4 Výsledná celková porozita

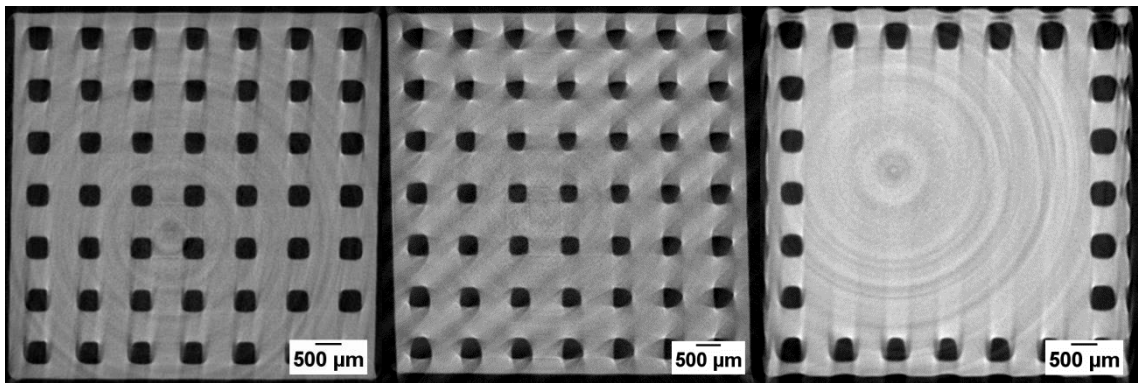
Tabulka 12 - Porovnání poréznosti všech zkoumaných mřížek.

Šířka póru	Modelová předloha	Clear s vrstvou tisku 25 μm	Clear s vrstvou tisku 50 μm	Clear s vrstvou tisku 100 μm	Grey Pro s vrstvou tisku 50 μm	Grey Pro s vrstvou tisku 100 μm
SLA-2 (μm^3)	$3,00 \cdot 10^{11}$	$6,60 \cdot 10^{10}$	$1,60 \cdot 10^{11}$	$4,10 \cdot 10^{10}$	$6,60 \cdot 10^{10}$	$3,93 \cdot 10^{10}$
SLA-3 (μm^3)	$2,80 \cdot 10^{11}$	$1,32 \cdot 10^{11}$	$1,49 \cdot 10^{11}$	$1,31 \cdot 10^{11}$	$1,17 \cdot 10^{11}$	$8,48 \cdot 10^{10}$
SLA-4 (μm^3)	$2,14 \cdot 10^{11}$	$1,04 \cdot 10^{11}$	$9,36 \cdot 10^{10}$	$1,30 \cdot 10^{11}$	$1,10 \cdot 10^{11}$	$9,97 \cdot 10^{10}$

4.5 Porovnání vzorků na základě rozdílné vrstvy tisku

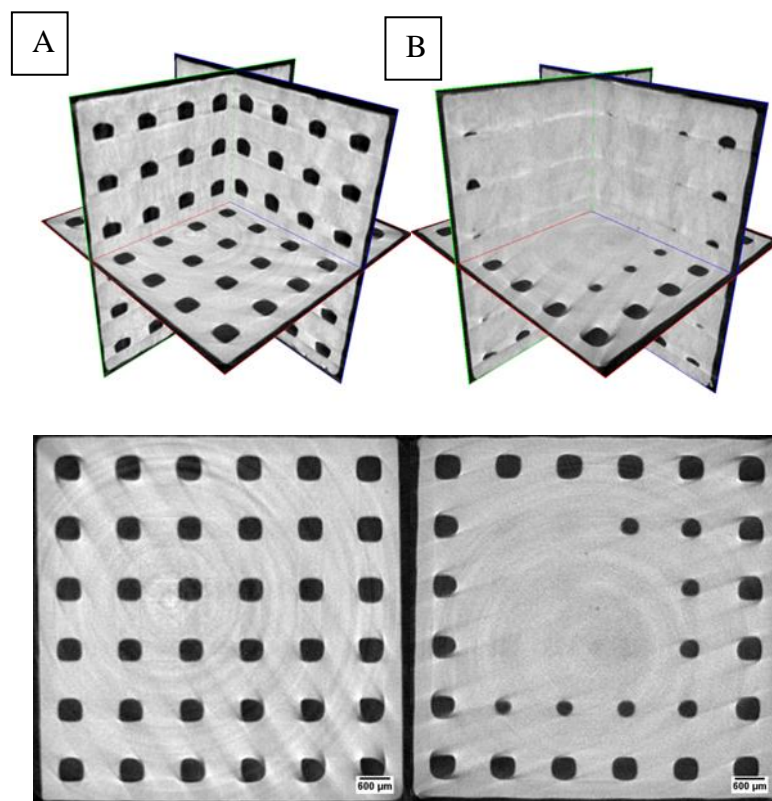
4.5.1 Materiál Clear s charakteristickou šířkou póru 500 μm





Obrázek 47 - Zpracovaná data z 3D-RTG pomocí programu DataViewer. Nahoře osový model mřížek a dole řez mřížkami v osách x a y. Materiál Clear. Vzorek SLA-2. A) 25 µm B) 50 µm C) 100 µm, podrobnější popis mřížek viz. obr. 23.

4.5.2 Materiál Grey Pro s charakteristickou šířkou póru 600 µm



Obrázek 48 - Zpracovaná data z 3D-RTG pomocí programu DataViewer. Nahoře osový model mřížek a dole řez mřížkami v osách x a y. Materiál Grey Pro. Vzorek SLA-3. A) 50 µm B) 100 µm, podrobnější popis mřížek viz. obr. 23.

5 DISKUZE VÝSLEDKŮ

První použitou metodou tisku mřížek byla metoda FDM. Schématické znázornění modelů mřížek je možné vidět na obrázku 22, kde jsou i v tabulce shrnuty charakteristické délky stran pro jednotlivé typy vzorků. Na obrázku 28 jsou vidět patrné rozdíly mezi jednotlivými vzorky, kdy jako nejlepší z nich se jeví vzorek FDM – 1, který byl tištěn s nejmenší vzdáleností mezi vytlačovaným materiálem. U vzorků FDM – 2 a FDM – 3 byly vzdálenosti větší, což zapříčiňuje špatnou výslednou kvalitu vzorků, neboť docházelo k propadání vytlačované struny a deformaci celé mřížky viz. Obrázek 25. Další porovnání těchto vzorků je vidět na obrázku 30, který byl pořízen pomocí SEM. Zde jsou porovnány pohledy ze směru různých os tisku (pohled ze shora a z boků) pro všechny mřížky. I když je vzorek FDM – 1 nejlepší co se týče kvality výtisku, má viditelně slinuté boční strany v osách x a y, které můžeme vidět na obrázku 26, na rozdíl od zbylých dvou vzorků, což bylo způsobeno již samotnou metodou FDM, protože vlákno je tištěno bez možnosti přerušení a opětovného navázání, čímž dochází ke vzniku oblouku na hraně mřížky a při tak stěsnaném tisku se materiál spojí a působí celistvě.

Tisk mřížek pomocí metody FDM se vyznačuje velmi špatnou reprodukovatelností, a nemá zde smysl kvalitativně určovat celkovou porositu vzorků. Z tohoto důvodu byl zbytek této práce věnován metodě SLA.

Parametry mřížek pro tisk metodou SLA jsou viditelné na obrázku 23. Ve výsledcích se však neobjevují mřížky typu SLA – 1, protože nebyl možný jejich tisk pomocí zvolené tiskárny od firmy Formlab Form 2. Pokud jsou tištěny takto navržené modely vnitřní prostor vzorku je plně vyplněn vytvrzenou pryskyřicí. Z tohoto pozorování plyne, že pomocí dostupného zařízení lze tisknout prostorové kanálky s nastaveným průměrem 500 a více mikrometrů. Z tohoto důvodu jsou ve výsledcích diskutovány pouze vzorky SLA-2, SLA-3 a SLA-4 pro dva rozdílné materiály s rozdílnou výškou tiskové vrstvy.

Z materiálu Clear byly vytištěny celkem 3 sady mřížek, které měly charakteristickou výšku tiskové vrstvy 25, 50 a 100 μm .

Vrstva tisku 25 μm má vysokou kvalitu tisku pro všechny 3 typy porovnávaných mřížek viz. obrázek 31 a 3D modely na obrázku 32. Bližší pohled na povrch mřížky je zachycen na obrázku 26. Zde jsou vidět osové pohledy na mřížku SLA-2, ze kterých je patrné, že nejpravdělnější tvar póru byl získán ve směru tisku osy z. Z tohoto pohledu je rovněž vidět, že tvar volného prostoru má v různých směrech rozdílný tvar. Celková porosita mřížek

je porovnána s modelovou v tabulce 3. Zde je vidět, že modelové porositě se přibližuje nejvíce mřížka SLA-4 se šířkou póru 700 μm . Další charakteristickým rysem je skutečná šířka otvorů. Na obrázku 34 je znázorněný postup měření šířky otvorů a celkové shrnutí je uvedeno v tabulce 4. Odtud je možno dojít k závěru, že ani jeden typ mřížky se rozměrově ani celkovou plochou póru výrazně neblíží ke své modelové předloze.

U další vrstvy tisku 50 μm již dochází ke vzniku rozdílů ve velikosti mřížkových otvorů, která je pozorovatelná při porovnání vzorků SLA-2 a SLA-3, viz. obrázek 35. Problém s celkovou porositou a rozměrem pórů je podobný jako u sady vzorků pro šířku tisku 25 μm . Z obrázku 35 A je patrné, že u vzorku SLA-2 ve vrchní části dochází k částečnému slinování materiálu (vytráčení se volného prostoru uvnitř mřížky). Slinování je zřejmě zapříčiněno silnější vrstvou tisku, protože u mřížek s vrstvou 25 μm k podobnému jevu nedocházelo.

Vrstva tisku 100 μm již přinesla zásadní informaci o tisku mřížek typu SLA-2, kde na obrázku 38A vidíme jasné slinutí materiálu. Toto slinutí je zapříčiněno výškou vrstvy tisku a přesností pohybu požitého zařízení což jen potvrzuje naše předešlé tvrzení u vrstvy tisku 50 μm , tedy schopnost tisku otevřených pórů klesá s výškou tištěné vrstvy. V tomto případě se nejbližší své modelové předloze přiblížil vzorek SLA-3, viz Tabulka 7. U vzorku SLA-4 je vidět, že ve směru osy y bylo dosaženo požadovaného rozměru podle modelové předlohy.

Při porovnání všech 3 sad vzorků s různými vrstvami tisku je možné pozorovat trend zhoršující se kvality tisku s rostoucí výškou tiskové vrstvy, dochází ke slinování vytvrzené tiskové pryskyřice.

Pro materiál Grey Pro byly tištěny pouze 2 sady mřížek s vrstvami tisku 50 a 100 μm , protože tento materiál není možné přesně tisknout s dobrým rozlišením vrstvou 25 μm . Tato možnost není dovolena výrobcem tiskárny.

Oproti vzorkům z materiálu Clear a vrstvou tisku 50 μm jsou vzorky s totožnou vrstvou tisku pro materiál Grey Pro u modelu mřížky SLA-2 v horší kvalitě viditelné na obrázku 41, zapříčiněné použitým materiálem, neboť jak již bylo zmíněno, materiál Grey Pro nemá tak dobrou přesnost tisku. Opět se celková porosita jen zdánlivě přibližuje té u modelové předlohy, viz. tabulka 8. Nejvíce se požadované hodnotě plošné porozity blíží model SLA-4 včetně charakteristických rozměrů volného prostoru uvnitř mřížky. Tato pozorování ve-

dou k závěru, že i přes zhoršenou přesnost tisku pro malé rozměry lze získat u tohoto materiálu relativně dobré výsledky při tisku otvorů většími rozměry.

Při nastavení vrstvy 100 μm pro materiál Grey Pro již prokazatelně není možné tisknout modely typu SLA-2 a SLA-3, protože zde dochází ke slinování vytištěného materiálu ve vnitřním prostoru mřížkové struktury, viz Obr. 44A, B. Tato skutečnost má za následek snížení celkové porosity viz. Tabulka 10 a znemožnění charakterizace volného prostoru uvnitř mřížky, viz. Tabulka 11.

Výsledná celková porosita je pro všechny typy mřížek dle tloušťky vrstev a typy materiálů shrnuta v tabulce 12. Odtud můžeme říci, že nejvyšší hodnoty porosity bylo dosaženo pro vzorek SLA-2, SLA-3 u tloušťky vrstvy 50 μm , respektive SLA-4 u tloušťky 100 μm pro materiál Clear .

ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývala studiem kvality a přesnosti 3D tisku pomocí SLA, FDM metod, tj. reprodukovatelností navržených modelů tištěných pomocí dostupných zařízení.

V rámci experimentu byla pomocí FDM metody tištěna jedna série vzorků z materiálu PLA. U metody SLA bylo tištěno celkem 5 sad vzorků, 3 sady pro materiál Clear a 2 sady pro materiál Grey Pro.

V první fázi experimentů byla optimalizována celková velikost tištěných mřížek, tak aby bylo možné jejich skenování při maximálním možném rozlišení dostupného rentgenového tomografu Skyscan 1174 od firmy Bruker. Po zvážení všech možných postupů se nakonec nejlépe prokázaly krychlovité mřížky s pravidelným vrstvením materiálu.

Z výsledků pro mřížky tištěné pomocí FDM vyplynulo, že pomocí této metody tisku nelze kvalitně a reprodukovatelně připravovat široké spektrum mřížek tak jako v případě SLA. Z tohoto důvodu byla většina dalších experimentů věnována tisku a charakterizaci mřížek připravených pomocí SLA.

Na základě výsledků z charakterizace mřížek připravených pomocí metody SLA lze konstatovat, že pomocí použitého zařízení nelze tisknout modely s rozměry volného prostoru o poloměru menším než 500 mikrometrů pro oba dva srovnávané materiály (Clear, Grey Pro).

Při studiu vlivu výšky tiskové vrstvy se ukázalo, že pro tisk průchozí mřížkové struktury s nejmenší velikostí průchozího prostoru se jeví jako nejlepší materiál s označením Clear, s výškou tiskové vrstvy 25 μm . S rostoucí tiskovou vrstvou jak v případě materiálu Clear tak Grey Pro lze u tištěných struktur pozorovat slinování tištěného materiálu, začíná se vytrácet volný prostor uvnitř mřížky a klesá celková porozita. Při takto malých otvorech zřejmě použitý laser není schopen zcela přesně dodržet tloušťku a vrstvy a přesahuje tedy udávaný rozměr, což vede k jejímu slinutí.

Z hlediska reprodukovatelnosti rozměrů vnitřního volného prostoru – pórů uvnitř mřížky lze konstatovat, že nejlepší reprodukovatelnosti dosahují vzorky s modelovým volným prostorem 600x600 nebo 700x700 mikrometrů, tištěné při vrstvě tisku 25 nebo 50 mikrometrů.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KAČAREVIĆ, Željka, Patrick RIDER, Said ALKILDANI, Sujith RETNASINGH, Ralf SMEETS, Ole JUNG, Zrinka IVANIŠEVIĆ a Mike BARBECK. An Introduction to 3D Bioprinting: Possibilities, Challenges and Future Aspects. *Materials* [online]. 2018, 11(11) [cit. 2019-05-16]. DOI: 10.3390/ma11112199. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1996-1944/11/11/2199>
- [2] ZEIN, Iwan, Dietmar W. HUTMACHER, Kim Cheng TAN a Swee Hin TEOH. Fused deposition modeling of novel scaffold architectures for tissue engineering applications. *Biomaterials* [online]. 2002, 23(4), 1169-1185 [cit. 2019-05-16]. DOI: 10.1016/S0142-9612(01)00232-0. ISSN 01429612. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142961201002320>
- [3] EDWARDS, Eiluned a Mohua MITRA. *Imprints of culture: block printed textiles of India*. New Delhi: Niyogi Books, 2016. ISBN 978-93-85285-03-5.
- [4] HAN, Young-Soo, Jaejoon LEE, Jungmin LEE, Wonhyuk LEE a Kyungho LEE. 3D CAD data extraction and conversion for application of augmented/virtual reality to the construction of ships and offshore structures. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* [online]. 2019, , 1-11 [cit. 2019-05-16]. DOI: 10.1080/0951192X.2019.1599440. ISSN 0951-192X. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/0951192X.2019.1599440>
- [5] BANDYOPADHYAY, Amit, Sahar VAHABZADEH, Anish SHIVARAM a Susmita BOSE. Three-dimensional printing of biomaterials and soft materials. *MRS Bulletin* [online]. 2015, 40(12), 1162-1169 [cit. 2019-1-28]. DOI: 10.1557/mrs.2015.274. ISSN 0883-7694. Dostupné z: http://www.journals.cambridge.org/abstract_S0883769415002742
- [6] VALVERDE, Israel, Gorka GOMEZ, Jose Felix COSERRIA, et al. 3D printed models for planning endovascular stenting in transverse aortic arch hypoplasia. *Catheterization and Cardiovascular Interventions* [online]. 2015, 85(6), 1006-1012 [cit. 2019-05-16]. DOI: 10.1002/ccd.25810. ISSN 15221946. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/ccd.25810>

- [7] SHILO, Dekel, Omri EMODI, Ori BLANC, Dani NOY a Adi RACHMIEL. Printing the Future—Updates in 3D Printing for Surgical Applications. *Rambam Maimonides Medical Journal* [online]. 2018, 9(3) [cit. 2018-10-28]. DOI: 10.5041/RMMJ.10343. ISSN 20769172.
Dostupné z: <https://www.rmmj.org.il/issues/38/articles/870>
- [8] PÍŠKA, Miroslav et al. Speciální technologie obrábění. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, 247 s. ISBN 978-80-214-4025-8.
- [9] An, J.; Teoh, J.E.M.; Suntornnond, R.; Chua, C.K. Design and 3D Printing of Scaffolds and Tissues. *Engineering* 2015, 1, 261–268.
- [10] Dizon, John Ryan & Espera, Alejandro & Chen, Qiyi & Advincula, Rigoberto. (2017). Mechanical Characterization of 3D-Printed Polymers. *Additive Manufacturing*. 20. 10.1016/j.ADDMA.2017.12.002.
- [11] www.machinedesign.com [online], [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.machinedesign.com/3d-printing/what-s-difference-between-stereolithography-and-selective-laser-sintering>
- [12] [Formlabs.com](http://formlabs.com) [online], [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://formlabs.com/blog/ultimate-guide-to-stereolithography-sla-3d-printing/>
- [13] www.3dhubs.com [online], [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/fdm-3d-printing-materials-compared>
- [14] MEINCKE, Olaf, Dirk KAEMPFER, Hans WEICKMANN, Christian FRIEDRICH, Marc VATHAUER a Holger WARTH. Mechanical properties and electrical conductivity of carbon-nanotube filled polyamide-6 and its blends with acrylonitrile/butadiene/styrene. *Polymer* [online]. 2004, 45(3), 739-748 [cit. 2019-05-16]. DOI: 10.1016/j.polymer.2003.12.013. ISSN 00323861. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0032386103011583>
- [15] MOCHIZUKI, M. Synthesis, properties and structure of polylactic acid fibres. *Handbook of Textile Fibre Structure* [online]. Elsevier, 2009, 2009, s. 257-275 [cit. 2018-11-18]. DOI: 10.1533/9781845696504.2.257. ISBN 9781845693800. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9781845693800500084>
- [16] Biodegradable and sustainable fibres. Editor R. S. BLACKBURN. Cambridgehead Publishing Limited, 2005. ISBN 185573916x.
- [17] Biopolymers for medical and pharmaceutical applications. Editor Alexander STEINBÜCHEL, editor Robert H. MARCHESSAULT. Weinheim: Wiley-VCH, 2005. ISBN 3-527-31154-8.
- [18] MLEZIVA, Josef. *Polymery - výroba, struktura, vlastnosti a použití*. Praha: Sobotáles, 1993. ISBN 80-901570-4-1.

- [19] KUŘITKA, Ivo, Petr SLOBODIAN a Nabanita SAHA. *Recyklace a zneškodňování tuhých odpadů: laboratorní cvičení*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2006. ISBN 80-7318-490-7.
- [20] BALIMA, Félix a Alain LARGETEAU. Phase transformation of alumina induced by high pressure spark plasma sintering (HP-SPS). *Scripta Materialia* [online]. 2019, 158, 20-23 [cit. 2019-02-21]. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2018.08.016. ISSN 13596462. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359646218304925>
- [21] JOHNSON, K. A., K. R. DAVIS, F. S. BUONANNO, T. J. BRADY, T. J. ROSEN a J. H. GROWDON. Comparison of Magnetic Resonance and Roentgen Ray Computed Tomography in Dementia. *Archives of Neurology* [online]. 1987, 44(10), 1075-1080 [cit. 2019-05-16]. DOI: 10.1001/archneur.1987.00520220071020. ISSN 0003-9942. Dostupné z: <http://archneur.jamanetwork.com/article.aspx?articleid=586908>
- [22] BRENNER, David J. a Eric J. HALL. Computed Tomography — An Increasing Source of Radiation Exposure. *New England Journal of Medicine* [online]. 2007, 357(22), 2277-2284 [cit. 2019-05-16]. DOI: 10.1056/NEJMra072149. ISSN 0028-4793. Dostupné z: <http://www.nejm.org/doi/abs/10.1056/NEJMra072149>
- [23] BENEŠ, Jiří, Jaroslava KYMPLOVÁ a František VÍTEK. *Základy fyziky pro lékařské a zdravotnické obory: pro studium i praxi*. Praha: Grada, 2015. ISBN 978-80-247-4712-5.
- [24] HALLIDAY, David, Jearl WALKER a Robert RESNICK. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Vyd. 1. V Brně: VUTIUM, 2000, vii, s. 890-1064. ISBN 80-214-1868-0.
- [25] Compact X-Ray micro CT, SkyScan 1174, Instruction manual, 2009.
- [26] MOMOSE, Atsushi. Recent Advances in X-ray Phase Imaging. *Japanese Journal of Applied Physics* [online]. 2005, 44(9A), 6355-6367 [cit. 2019-02-25]. DOI: 10.1143/JJAP.44.6355. ISSN 0021-4922. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/1347-4065/44/6355>
- [27] KALINA, Tomáš. *Základy elektronové mikroskopie pro biology*. Praha, 1981.
- [28] Fyzika.JREICHL.CZ [online], [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1675-skenovaci-elektronovy-mikroskop>

- [29] Elektronová mikroskopie transmisní a rastrovací [online], [cit. 2019-02-25]. Dostupné z: http://jointlab.upol.cz/~soubusta/OSYS/El_mikr/El_mikr.html
- [30] 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>
- [31] Www.3Dwiser.cz [online], [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: https://eshop.3dwiser.com/3d-tiskarny/formlabs-form-2/?gclid=EAiaIQobChMI3-Gw786B4gIVwkPTCh1YOwvuEAQYASABEgK8RPD_BwE
- [32] Www.bruker.com [online], [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.bruker.com/products/microtomography/micro-ct-for-sample-scanning/skyscan-1174/overview.html>
- [33] Www.14420.cz [online], [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: <http://www.14220.cz/technologie/3d-tisk-metody>
- [34] Zhang, Man & Deng, Qiling & Shi, Lifang & Pang, Hui & Cao, Axiu & Hu, Song. (2014). Fabrication of nano-pillar with sub-100nm resolution based on thiol-ene. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 9277. 92771U. 10.1117/12.2073892.
- [35] James Lunt, Large-scale production, properties and commercial applications of polylactic acid polymers, Polymer Degradation and Stability, Volume 59, Issues 1–3, 1998, Pages 145-152, ISSN 0141-3910, [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(97\)00148-1](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(97)00148-1). <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014139109700181>)
- [36] Www.pbt.cz [online], [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: <https://www.pbt.cz/cz/clanky/prumyslove-ct-podpora-kvality>
- [37] Ultimaker.com [online], [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://ultimaker.com/en/resources/manuals/ultimaker-3d-printers/ultimaker-2-extended>
- [38] Www.phenom-world.com [online], [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://www.phenom-world.com/desktop-scanning-electron-microscopes/phenom-pro>
- [39] Formlabs.com: formlabs-media.formlabs.com [online], [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: https://formlabs-media.formlabs.com/datasheets/Clear_Resin_Technical.pdf

- [40] Fromlabs.com: formlabs-media.formlabs.com [online], [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: https://formlabs-media.formlabs.com/datasheets/Grey_Pro_Technical.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

AM	Aditive manufacturing
AMF	Aditive manufacturing file
CAD	Computer aided design
SLA	Stereolitography apparatus
FDM	Fused deposition modelling
PLA	Polylactid acid
ABS	Acrylonitrile butadiene styrene
SLS	Selective laser sintering
SLM	Selective laser melting
PP	Polypropylene
PE	Polyethylene
PC	Polycarbonate
PET	Polyethylene tereftalate
TPU	Termoplastick polyurethane
PS	Polystyrene
FJ	Fotoelektrický jev
SEM	Skenovací elektronová mikroskopie
TEM	Transmisní elektronová mikroskopie
FEG	Field emission gun

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - Metoda SLA [4]	13
Obrázek 2 - Metoda FDM [6]	13
Obrázek 3 - Metoda SLS [11]	14
Obrázek 4 - Schématické znázornění reakce fotopolymeru na UV záření	15
Obrázek 5 - Mechanismus polymerace PMMS a EGDMA [31]	16
Obrázek 6 - Acrylonitril butadien styren [14]	16
Obrázek 7 - Kyselina Polymléčná	17
Obrázek 8 - Výroba PLA [15]	17
Obrázek 9 - Stereoizomery Laktidu	18
Obrázek 10 - Průběh reakce otevírání cyklu za přítomnosti katalyzátoru (Koordinačně – inzerční mechanismus) [17]	18
Obrázek 11 - Polyethylenetereftalát	18
Obrázek 12 - Monomery pro výrobu PET	19
Obrázek 13 - Znázornění principu rentgenového tomografu [29]	20
Obrázek 14 - Znázornění spekter elektromagnetického záření [23]	21
Obrázek 15 - Schématické znázornění brzdného záření	21
Obrázek 16 - Schématické znázornění charakteristického záření	22
Obrázek 17 - Konstrukce RTG Tomografu od společnosti Bruker Skyscan 1174. 1- zdroj rentgeno-vého záření (rentgenka); 2- prostor pro vzorek; 3- detektor; 4- kamera. [25]	23
Obrázek 18 - Znázornění principu rentgenového zařízení [20]	23
Obrázek 19 - Snímky pořízené rentgenovou tomografií vzorku cigarety v různých úhlech pootočení	24
Obrázek 20 - Schéma rozdělení elektronů po dopadu na preparát	25
Obrázek 21 – Zobrazení schéma SEM mikroskopu [28]	26
Obrázek 22 – Zobrazení prototypů mřížek před pro 3D tisk pomocí FDM	29
Obrázek 23 - Zobrazení prototypů mřížek před pro 3D tisk pomocí SLA.	30
Obrázek 24 - Použitá 3D tiskárna Ultimaker 2 Extended [37]	31
Obrázek 25 - 3D tiskárna FormLabs Form 2 (vlevo), mycí stanice Formlab Form Wash (uprostřed), vytvrzovací stanice Formlabs Form Cure (vpravo). [31]	32
Obrázek 26 – SEM [38]	32
Obrázek 27 – Rentgenový tomograf Skyscan 1074	33

- Obrázek 28 - Zpracovaná data z 3D-RTG pomocí programu DataViewer. Nahoře osový model mřížek a dole řez mřížkami v osách x a y. A) FDM-1 B) FDM-2 C) FDM-3, podrobnější popis mřížek viz. obr. 22. 34
- Obrázek 29 – 3D modely sestrojené pomocí programu CTVox z binárního data setu, získaného z programu CTAn. A) FDM-1 B) FDM- 2 C) FDM-3, podrobnější popis mřížek viz. obr. 22. 35
- Obrázek 30 uvedení pohled na povrch mřížek připravených pomocí FDM. Připravené mřížky byly zobrazeny pomocí SEM při pohledu ze shora (směr osy z) a při pohledu z bočních stran (směr os x a y). Orientace jednotlivých os je schématicky naznačena na obrázku 29A. 35
- Obrázek 31 - Snímky ze SEM pro rozdílné směry pohledu – 3D tisku. A) FDM-1 B) FDM-2 C) FDM-3, podrobnější popis mřížek viz. obr. 22. 36
- Obrázek 32 - Zpracovaná data z 3D-RTG pomocí programu DataViewer. Nahoře osový model mřížek a dole řez mřížkami v osách x a y. A) SLA-2-500 μm B) SLA-3-600 μm C) SLA-4-700 μm , podrobnější popis mřížek viz. obr. 23. 37
- Obrázek 33 - 3D modely sestrojené pomocí programu CTVox z binárního data setu, získaného z programu CTAn. A) SLA-2-500 μm B) SLA-3-600 μm C) SLA-4-700 μm , podrobnější popis mřížek viz. obr. 23. 37
- Obrázek 34 - Snímky ze SEM pro rozdílné směry pohledu – 3D tisku, vzorek – SLA-2-500 μm , tisková vrstva 25 μm , materiál clear. Pohlede ve směru A) osy z B) osy x C) osa y. Orientace os naznačena na Obr. 33A. 38
- Obrázek 35 - Znázornění měření šířek pórů v programu Image J pro mřížku SLA-2-500 μm . Pro měření byl vybrán vždy jeden z pórů nejbližší středu vzorku. 39
- Obrázek 36 - Zpracovaná data z 3D-RTG pomocí programu DataViewer. Nahoře osový model mřížek a dole řez mřížkami v osách x a y. A) SLA-2-500 μm B) SLA-3-600 μm C) SLA-4-700 μm , podrobnější popis mřížek viz. obr. 23. 40
- Obrázek 37 - 3D modely sestrojené pomocí programu CTVox z binárního data setu, získaného z programu CTAn. A) SLA-2-500 μm B) SLA-3-600 μm C) SLA-4-700 μm , podrobnější popis mřížek viz. obr. 23. 40
- Obrázek 38 - Znázornění měření šířek pórů v programu Image J pro mřížku SLA-4-700 μm . Pro měření byl vybrán vždy jeden z pórů nejbližší středu vzorku. 41

- Obrázek 39 - Zpracovaná data z 3D-RTG pomocí programu DataViewer. Nahoře osový model mřížek a dole řez mřížkami v osách x a y. A) SLA-2-500 μm B) SLA-3-600 μm C) SLA-4-700 μm , podrobnější popis mřížek viz. obr. 23..... 42
- Obrázek 40 - 3D modely sestrojené pomocí programu CTVox z binárního data setu, získaného z programu CTAn. A) SLA-2-500 μm B) SLA-3-600 μm C) SLA-4-700 μm , podrobnější popis mřížek viz. obr. 23..... 42
- Obrázek 41 - Znázornění měření šířek pórů v programu Image J pro mřížku SLA-3-600 μm . Pro měření byl vybrán vždy jeden z pórů nejbližě středu vzorku..... 43
- Obrázek 42 - Zpracovaná data z 3D-RTG pomocí programu DataViewer. Nahoře osový model mřížek a dole řez mřížkami v osách x a y. A) SLA-2-500 μm B) SLA-3-600 μm C) SLA-4-700 μm , podrobnější popis mřížek viz. obr. 22..... 44
- Obrázek 43 - 3D modely sestrojené pomocí programu CTVox z binárního data setu, získaného z programu CTAn. A) SLA-2-500 μm B) SLA-3-600 μm C) SLA-4-700 μm , podrobnější popis mřížek viz. obr. 23..... 44
- Obrázek 44 - Znázornění měření šířek pórů v programu Image J pro mřížku SLA-2-500 μm . Pro měření byl vybrán vždy jeden z pórů nejbližě středu vzorku..... 45
- Obrázek 45 - 3D modely sestrojené pomocí programu CTVox z binárního data setu, získaného z programu CTAn. A) SLA-2-500 μm B) SLA-3-600 μm C) SLA-4-700 μm , podrobnější popis mřížek viz. obr. 23..... 46
- Obrázek 46 - Znázornění měření šířek pórů v programu Image J pro mřížku SLA-4-700 μm . Pro měření byl vybrán vždy jeden z pórů nejbližě středu vzorku..... 47
- Obrázek 47 - Zpracovaná data z 3D-RTG pomocí programu DataViewer. Nahoře osový model mřížek a dole řez mřížkami v osách x a y. Materiál Clear. Vzorek SLA-2. A) 25 μm B) 50 μm C) 100 μm , podrobnější popis mřížek viz. obr. 23..... 49
- Obrázek 48 - Zpracovaná data z 3D-RTG pomocí programu DataViewer. Nahoře osový model mřížek a dole řez mřížkami v osách x a y. Materiál Grey Pro. Vzorek SLA-3. A) 50 μm B) 100 μm , podrobnější popis mřížek viz. obr. 23. 49

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Charakteristické vlastnosti pro materiál PLA [30].....	28
Tabulka 2 - Výsledky získané z analýzy programem CTAn pro jednotlivé typy mřížek s vrstvou tisku 25 μm	38
Tabulka 3 - Porovnání rozměrů a plošných průřezů pórů vůči počítačovému modelu (standardu) pro jednotlivé typy mřížek z materiálu Clear s vrstvou tisku 25 μm . Orientace os pro analýzu pórů je naznačena na Obr. 33A.	39
Tabulka 4 - Výsledky získané z analýzy programem CTAn pro jednotlivé typy mřížek s vrstvou tisku 50 μm	41
Tabulka 5 - Porovnání rozměrů a plošných průřezů pórů vůči počítačovému modelu (standardu) pro jednotlivé typy mřížek z materiálu Clear s vrstvou tisku 50 μm . Orientace os pro analýzu pórů je naznačena na Obr. 37A.	41
Tabulka 6 - Výsledky získané z analýzy programem CTAn pro jednotlivé typy mřížek s vrstvou tisku 100 μm	43
Tabulka 7 - Porovnání rozměrů a plošných průřezů pórů vůči počítačovému modelu (standardu) pro jednotlivé typy mřížek z materiálu Clear s vrstvou tisku 100 μm . Orientace os pro analýzu pórů je naznačena na Obr. 40A.	43
Tabulka 8 - Výsledky získané z analýzy programem CTAn pro jednotlivé typy mřížek s vrstvou tisku 100 μm	45
Tabulka 9 - Porovnání rozměrů a plošných průřezů pórů vůči počítačovému modelu (standardu) pro jednotlivé typy mřížek z materiálu Grey Pro s vrstvou tisku 50 μm . Orientace os pro analýzu pórů je naznačena na Obr. 43A.	45
Tabulka 10 - Výsledky získané z analýzy programem CTAn pro jednotlivé typy mřížek s vrstvou tisku 100 μm	47
Tabulka 11 - Porovnání rozměrů a plošných průřezů pórů vůči počítačovému modelu (standardu) pro jednotlivé typy mřížek z materiálu Grey Pro s vrstvou tisku 100 μm . Orientace os pro analýzu pórů je naznačena na Obr. 45A.	47
Tabulka 12 - Porovnání poréznosti všech zkoumaných mřížek.	48