

# **Materiály na bázi polymerů využitelné pro bio 3D-tisk**

Bc. Linda Wagnerová

---

Diplomová práce  
2018



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav fyziky a mater. inženýrství

akademický rok: 2017/2018

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Linda Wagnerová**  
Osobní číslo: **T16603**  
Studijní program: **N2808 Chemie a technologie materiálů**  
Studijní obor: **Materiálové inženýrství**  
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Materiály na bázi polymerů využitelné pro bio 3D-tisk**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte rešerši na zadané téma s využitím doporučené literatury a databázových informačních zdrojů.
2. Seznamte se s obsluhou přístrojového vybavení používaného pro přípravu 3D struktur metodou přímého tisku polymerní taveniny (3D tiskárna) a pro hodnocení vlastností vstupních materiálů i hotových výrobků (termická analýza, skenovací elektronový mikroskop, optický mikroskop, optický goniometr, atd.)
3. Charakterizujte vybrané polymerní materiály pro 3D tisk z pohledu termických metod a povrchové energie.
4. Pokuste se o přípravu prostorových struktur použitelných jako scaffoldy pomocí 3D tiskárny.
5. Získané výsledky diskutujte v závěrečných kapitolách diplomové práce.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

1. **Forgacs, G and Sun, W, Biofabrication: Micro- and Nano-fabrication, Printing, Patterning and Assemblies. Elsevier Science, (2013).**
2. **Chua, CK and Yeong, WY, Bioprinting: Principles and Applications. World Scientific Publishing Company, (2014).**
3. **Saltzman, WM, Tissue Engineering: Engineering Principles for the Design of Replacement Organs and Tissues. Oxford University Press, (2004).**
4. **Turksen, K, Bioprinting in Regenerative Medicine. Springer International Publishing, (2015).**
5. **Zhang, LG, Fisher, JP and Leong, K, 3D Bioprinting and Nanotechnology in Tissue Engineering and Regenerative Medicine. Elsevier Science, (2015).**
6. **Pashley, RM, Karaman, ME, Applied colloid and surface chemistry. John Wiley and Sons, (2004).**

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Petr Smolka, Ph.D.**

Ústav fyziky a mater. inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

**2. února 2018**

Termín odevzdání diplomové práce:

**18. května 2018**

Ve Zlíně dne 12. února 2018



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.  
*děkan*




doc. Mgr. Aleš Mráček, Ph.D.  
*ředitel ústavu*

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby <sup>1)</sup>;
- beru na vědomí, že diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byla jsem seznámena s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 <sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou 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 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 práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové 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. 2018

  
.....

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

(1) Vysoká škola nevydávalečně 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 nahlázení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

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

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

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, 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).

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

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

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo 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**

Cílem této diplomové práce bylo studium materiálů na bázi polymerů s aplikačním potenciálem v medicíně a tkáňovém inženýrství pro přípravu scaffoldů pomocí technologie 3D tisku. Pro přípravu vzorků byly použity dvě 3D tiskárny technologie FDM. Byly studovány dva materiály (PLA, ABS), u nichž byl sledován vliv orientace tisku a následné plazmatické úpravy na povrchovou energii. Ta byla stanovována nepřímo ve formě kontaktního úhlu smáčení. Povrchy byly dále hodnoceny pomocí skenovací elektronové mikroskopie a kontaktní a bezkontaktní profilometrie. Bylo zjištěno, že i povrchy s výraznou texturou lze úspěšně hodnotit metodou sedící kapky za předpokladu, že je zvolena správná orientace kamery vůči vzorku, potažmo směru tisku. Pokud je možno stanovit i hybridní parametr drsnosti  $S_{dr}$ , lze u takových povrchů přepočítat zdánlivý kontaktní úhel na skutečný, který mnohem lépe vypovídá o reálných vlastnostech povrchů.

Klíčová slova: 3D tisk, bio-3D tisk, biomateriály, polymery, PLA, ABS

## **ABSTRACT**

The aim of the diploma thesis was to study the materials with application potential in medicine and tissue engineering for the preparation of scaffolds with the 3D printing technology. Two different 3D printers were used. Two polymers, PLA and ABS, were studied with respect to the effect of printing orientation and subsequent plasma treatment on the surface free energy, that was evaluated indirectly with the contact angle measurement. The surfaces were further examined with scanning electron microscopy, contact and noncontact profilometry. It was found that even surfaces with substantial surface texture can be successfully evaluated with the sessile drop method, once the correct orientation of camera with respect to printing direction is chosen. Also, when the hybrid roughness parameter  $S_{dr}$  is calculated, one can convert the apparent contact angle to the real one, that describes real surface properties much better.

Keywords: 3D Printing, Bio-3D Printing, Biomaterials, Polymers, PLA, ABS

*Tímto bych ráda poděkovala Ing. Petru Smolkovi, Ph.D. za vedení diplomové práce, odbornou pomoc a jeho cenné rady v průběhu mé práce. Také bych ráda poděkovala Ing. Eriku Wrzecionkovi za pořízení SEM snímků, doc. Dr. Ing. Vladimíru Patovi za pořízení snímků na optickém povrchovém profilometru a Mgr. Ivetě Michňákové za jazykovou korekturu. Dále děkuji celému Ústavu fyziky a materiálového inženýrství FT UTB ve Zlíně za umožnění vypracování této práce. V neposlední řadě děkuji svým rodičům za podporu při mém studiu.*

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>12</b>
<b>1 3D TISK</b> .....	<b>13</b>
1.1 HISTORIE.....	13
1.2 SOUČASNÝ STAV .....	14
1.3 BUDOUCNOST 3D-TISKU .....	15
<b>2 TECHNOLOGIE 3D TISKU</b> .....	<b>16</b>
2.1 STEREOLITOGRAFIE (SLA).....	16
2.2 POLYJET.....	16
2.3 MULTIJET MODELING (MJM) .....	17
2.4 SELEKTIVNÍ LASEROVÉ SPÉKÁNÍ (SLS).....	17
2.5 TECHNOLOGIE TROJROZMĚRNÝCH TISKAŘSKÝCH TECHNIK (3DP) .....	18
2.6 LAMINATED OBJECT MANUFACTURING (LOM).....	18
2.7 SELECTIVE LASER MELTING (SLM).....	19
2.8 DIGITAL LIGHT PROCESSING (DLP) .....	20
2.9 MODELOVÁNÍ DEPOZICÍ TAVENINY (FDM) .....	21
2.9.1 3D tiskárna FDM.....	22
2.9.2 Kvalita 3D tisku (stupně rozlišení) FDM tiskáren .....	23
2.9.3 Nevýhody FDM tiskáren.....	23
<b>3 MATERIÁLY PRO 3D TISK METODOU FDM</b> .....	<b>24</b>
3.1 ABS .....	25
3.2 ASA.....	25
3.3 FLEX .....	25
3.4 PET, PETG .....	25
3.5 PLA .....	26
<b>4 POVRCHOVÉ VLASTNOSTI MATERIÁLU</b> .....	<b>28</b>
4.1 POVRCHOVÉ NAPĚTÍ KAPALIN .....	28
4.2 POVRCHOVÁ ENERGIE PEVNÝCH LÁTEK .....	29
4.3 KONTAKTNÍ ÚHEL SMÁČENÍ .....	30
4.3.1 Modifikace Youngovy rovnice .....	31
4.3.2 Hystereze kontaktního úhlu smáčení .....	32
4.4 GEOMETRIE POVRCHU .....	34
4.4.1 Hodnocení drsnosti povrchu .....	35
4.4.2 Měření drsnosti povrchu .....	35
<b>5 METODY MODIFIKACE POVRCHOVÝCH VLASTNOSTÍ</b> .....	<b>36</b>
5.1 POVRCHOVÉ ÚPRAVY POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ .....	36
5.1.1 Chemické metody.....	36
5.1.2 Termické metody .....	36
5.1.3 Nízkoteplotní plazmové modifikace .....	37
5.1.3.1 Definice plazmatu .....	38
5.1.3.2 Změna povrchu polymeru pomocí nízkoteplotního plazmatu .....	39



<b>6</b>	<b>BIO 3D TISK, NANO VÝROBA A TKÁŇOVÉ INŽENÝRSTVÍ .....</b>	<b>41</b>
6.1	ÚVOD K PROBLEMATICE BIO 3D-TISKU .....	41
6.2	VÝZKUM A VÝVOJ BIO 3D-TISKU.....	42
6.3	TECHNIKY BIO 3D-TISKU A NANO VÝROBY .....	43
6.3.1	Selective Laser Sintering (SLS) .....	44
6.3.2	Laser-guided direct writing .....	45
6.3.3	Laser-induced forward transfer .....	46
6.3.4	Matrix-assisted pulsed laser evaporation direct writing.....	48
6.3.5	Biological laser printing (BioLP).....	48
6.3.6	Stereolitografické techniky .....	49
6.4	MATERIÁLY PRO BIO 3D TISK – SOUČASNÝ STAV .....	51
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>56</b>
<b>7</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....</b>	<b>57</b>
7.1	CHEMIKÁLIE.....	57
7.2	POUŽITÉ PŘÍSTROJE .....	57
7.3	POUŽITÉ METODY .....	58
7.3.1	Příprava 3D modelu a výroba vzorků pomocí 3D tiskárny.....	58
7.3.2	Hodnocení povrchu materiálu .....	63
<b>8</b>	<b>VÝSLEDKY A DISKUZE .....</b>	<b>65</b>
8.1	PŘÍPRAVA VZORKŮ PLA POMOCÍ 3D TISKÁRNY ORIGINAL PRUSA I3 MK3.....	66
8.1.1	Horizontální tisk (PLA, Prusa i3 MK3) .....	67
8.1.2	Vertikální tisk (PLA, Prusa i3 MK3) .....	75
8.2	PŘÍPRAVA VZORKŮ PLA POMOCÍ 3D TISKÁRNY ULTIMAKER 2+.....	79
8.2.1	Horizontální tisk (PLA, Ultimaker 2+) .....	80
8.2.2	Vertikální tisk (PLA, Ultimaker 2+) .....	88
8.3	VÝROBA VZORKŮ ABS POMOCÍ 3D TISKÁRNY ORIGINAL PRUSA I3 MK3.....	92
8.3.1	Horizontální tisk (ABS, Prusa i3 MK3).....	94
8.3.2	Vertikální tisk (ABS, Prusa i3 MK3).....	104
8.4	VÝROBA VZORKŮ ABS POMOCÍ 3D TISKÁRNY ULTIMAKER 2+.....	109
8.4.1	Horizontální tisk (ABS, Ultimaker 2+).....	110
8.4.2	Vertikální tisk (ABS, Ultimaker 2+).....	120
8.5	DISKUZE VLIVU POVRCHOVÉ DRSNOSTI NA HODNOTU KONTAKTNÍHO ÚHLU SMÁČENÍ.....	125
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>126</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>127</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>139</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>141</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>148</b>

## ÚVOD

V minulosti proběhly již tři průmyslové revoluce. Ta první započala v Anglii v 18. století, kdy Edmund Cartwright vynalezl první mechanický tkací stav. V 19. století se dokončoval přechod od ruční výroby v manufakturách ke strojní velkovýrobě. Masově se v té době začaly využívat nové zdroje energie, především uhlí (resp. pára, parní stroj). Klíčovým pojmem tohoto období je industrializace.<sup>1</sup> Druhá průmyslová revoluce je charakteristická elektrifikací a vznikem montážních linek. Toto období je datováno do roku 1879, kdy T. A. Edison vynalezl žárovku a také do roku 1870, kdy společnost Cincinnati instalovala ve svém závodě první montážní linku a začala s dělbou práce, později elektrifikovanou, která přinesla další prudký rozvoj masové výroby.<sup>1</sup> Třetí průmyslová revoluce, za jejíž počátek se nejčastěji uvádí rok 1969, kdy byl vyroben první programovatelný logický automat neboli PLC, bývá nejčastěji spojována s automatizací, elektronikou a rozmachem informačních technologií.<sup>1</sup> Čtvrtá průmyslová revoluce probíhá právě teď a tady, a měla by trvat dalších minimálně 10 – 30 let. Jedná se masové rozšíření internetu a jeho průnik doslova do všech oblastí lidské činnosti.<sup>1</sup> Současný trend digitalizace a s ní související automatizace výroby a vznik „chytrých továren“ využívajících autonomní kyberneticko-fyzické systémy, jež převezmou opakující se a jednoduché činnosti, které do té doby vykonávali lidé, je proto nazýván pojmem *Průmysl 4.0*.<sup>1</sup>

Do popředí se také dostává tzv. reverzní inženýrství (RE), které je procesem opačným proti běžnému inženýrskému procesu, neboť z fyzického objektu získá pomocí 3D digitalizace 3D CAD model, který může být využit k optimalizaci designu, k odstranění problémů originálního dílu, analýzám, inspekcím nebo pro další softwarové aplikace.<sup>2</sup>

Jedním z nejvýznamnějších pojmů současnosti je nová a rychle se rozšiřující technologie 3D-tisku, jehož možnosti jsou nepředstavitelné. Jsme svědky výrazného nárůstu využití 3D technologií ve všech oblastech lidského činění, a to jak v oblasti strojírenství, architektury, automobilového a leteckého průmyslu, gastronomie, módy a designu, tak i v oblasti zdravotnictví a medicíny.<sup>3,4</sup>

3D tisk, 3D skenování a reverzní inženýrství jsou technologie, které vedou k revoluci vědeckého výzkumu hlavně v oblasti zdravotnických věd a medicíny. Širší využívání těchto technologií způsobuje rozvoj různých zdravotnických prostředků (včetně přístrojů a léčiv) a snižuje náklady na design a výrobu.<sup>5,6</sup> Proto také nabývá nemalého významu pojem „personalizovaná medicína“ (PM), označující individuální strategie při vyhodnocení

a postupu léčby daného onemocnění nebo zranění u daného pacienta, čímž se zvyšuje pravděpodobnost příznivých výsledků léčby pacienta.<sup>7</sup> V praxi to znamená například individuální výrobu dané kloubní náhrady doslova „na zakázku“ pro daného pacienta s individuálním a personalizovaným výběrem materiálu, který musí splňovat nejen podmínku biokompatibility, ale také podmínku vhodnosti pro daného pacienta s ohledem na jeho věk, zdravotní stav, alergie atd. V případě onemocnění nebo zranění právě kloubu vzniká velký problém, neboť podmínkou přirozené obnovy a náhrady pojivových tkání je přítomnost cév (perichondria) neboli přítomnost krevního oběhu. Tato podmínka je u chrupavek zčásti splněna jen v dětství, jinak jen výjimečně. Z klinického hlediska je u hojení chrupavek určitým paradoxem, že se lépe hojí defekty zasahující až do kostěného podkladu chrupavek, např. do kloubních konců kostí, jež jsou u těchto typů zranění zdrojem cév, které zahajují reparativní pochody poškozené chrupavky.<sup>8</sup> V současnosti je v medicíně 3D-tisk již využíván, a to například v kraniofaciální chirurgii nebo pro geometricky přesnější a individualizovanou výrobu náhrad kloubů (kolena a kyčle).<sup>9</sup>

Revoluce pokračuje i v oblasti biomedicíny. Vznikají nové vědní obory jako je tkáňové inženýrství a regenerativní medicína, které otevírají nové a vzrušující možnosti pro zcela revoluční léčebné modalities a technologie využívající aplikace vývojové biologie a kmenových buněk.<sup>10</sup> Užitečnost této slibné technologie vede k jejímu výzkumu a aplikaci v různých oblastech regenerativní medicíny jako je transplantace kůže a léčba ran pacientů s kožními poraněními nebo popáleninami.<sup>11</sup>

Technologie 3D tisku se tak možná již v blízké budoucnosti bude využívat k „výrobě“ lidských orgánů vhodných k transplantaci, což způsobuje revoluci v moderní medicíně.<sup>6</sup> 3D-tisk proto lze nazvat jako počátek skutečné technické revoluce.<sup>3</sup> Z tohoto důvodu je nanejvýš důležitý a cenný výzkum a vývoj biokompatibilních materiálů a bio 3D-tisku pro budoucí aplikace v medicíně.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

# 1 3D TISK

## 1.1 Historie

3D-tisk je velmi mladé odvětví. Jeho počátky sahají do druhé poloviny 20. století, ve kterém si Charles W. Hull nechal patentovat technologii stereolitografie. Tímto krokem se v roce 1986 začala oficiálně psát první kapitola 3D tisku. Hull pod hlavičkou firmy *3D Systems* vytvořil první zařízení tisknoucí ve 3D formátu, tzv. stereolitografický aparát (SLA-1), jehož technika spočívala v tisku pomocí UV laseru a tekutého fotopolymeru. Název 3D tiskárna se ale ujmul až pro zařízení další generace pracující na stejném principu. Technologie SLA se tak stala základem vývoje dnešních 3D tiskáren. Do roku 1996 se prodalo více než 600 různých přístrojů SLA.<sup>3,12</sup>

Do vývoje v této oblasti byla rychle zapojena i početná konkurence. Postupně se tak objevovaly nové technologie, které umožnily dramatický vývoj. V roce 1987 byl patentován vynález Michaela Feygina, tzv. Laminated Object Manufacturing (LOM). V následujícím roce byla v Austinu na Texaské univerzitě patentována technika selektivního laserového spékání (SLS), která je založena na principu CO<sub>2</sub> laseru a práškového materiálu. Současně vznikla například i technologie modelování depozicí taveniny (FDM), technologie využívající termoplasty.<sup>3</sup>

V roce 1993 došlo k dalšímu mezníku ve vývoji 3D technologií, neboť byla patentována technologie trojrozměrných tiskařských technik (3DP), která byla založená na principu spojování práškového materiálu tekutým spojovačem (pojídlem). Patent byl tentokrát podán Massachusettským technologickým institutem (MIT), od něhož poté koupila licenci společnost *Z Corporation*, která započala s vývojem 3D tiskáren jako takových. A právě v této době, v roce 1996, byl poprvé použit termín 3D tiskárna.<sup>3,12</sup>

Dalším mezníkem v oblasti vývoje 3D tiskáren se stal rok 2006, ve kterém byl zahájen revoluční projekt „Rep Rap“ (*Replicating Rapid Prototyper*), jenž byl založen na tzv. open source, což znamená, že uživatel si již nekupuje celý hotový produkt ve fyzické podobě, nýbrž pouze licenci a 3D tiskárnu si sestaví z běžných součástek sám doma. Jednotlivé návody na sestavení jsou volně dostupné na internetu. Tento projekt rapidně snížil cenu 3D tiskáren do přijatelných rovin i pro širokou veřejnost. V České Republice se v souvislosti s pojmem Rep Rap nejčastěji objevuje jméno *Josefa Průši*, který svou firmu založil právě na open source projektu 3D tiskárny jakožto „domácí skládačky“.<sup>3</sup>

## 1.2 Současný stav

V současnosti umožňuje trojrozměrný (3D) tisk vytvářet pevné objekty přímo z digitálního souboru. Stal se proto atraktivní metodou pro výrobu přesných a v současnosti dokonce i vícebarevných výrobků, a jeho aplikace se za posledních 20 let výrazně rozšířily v nejrůznějších oblastech.<sup>13,14</sup> Na americký trh se dostala 3D tiskárna Cube od firmy *3D Systems* s intuitivním ovládáním a dvoubarevným tiskem. Vizí nejbližší budoucnosti je 3D tiskárna, jež si bude moci pořídit téměř každá domácnost.<sup>3</sup> Technologie 3D tisku je v současnosti orientována nejčastěji do sféry průmyslu, a to v oblasti strojírenství, automobilovém (plastové součásti interiéru jako jsou stínítka, součásti palubní desky a volantů atd.) a leteckém průmyslu (jedinečné součástky letadla), dále také ve stavebnictví, medicíně, módě a umění. V jednotlivých odvětvích dochází k rychlému vývoji možností využití těchto technologií a 3D tisk se tak pomalu dostává do všech oblastí lidského zájmu.<sup>3</sup>

Zejména revoluční jsou aplikace aditivní výroby v oblasti medicíny, která přináší mnoho výhod. Příkladem je společnost *Invisalign*<sup>15</sup> zabývající se výrobou nejpokročilejšího systému průhledných zubních rovnátek na světě, která jsou díky 3D skenu dokonale přizpůsobena tvaru chrupu konkrétního pacienta. Další společnosti vyvíjí pomocí 3D tisku nové zdravotnické pomůcky jako jsou například kloubní náhrady nebo speciální ortotika, např. vložky do bot.<sup>12,15,16</sup>

Současný stav vývoje materiálů pro 3D tisk zahrnuje nejrůznější materiály, a to včetně slitin kovů, polymerních kompozitů, keramiky a betonu.<sup>14</sup> V oblasti stavebnictví již existuje tzv. „betonová tiskárna“, vyvinutá vědci na univerzitě v Loughborough v Anglii. Může vyrábět betonové komponenty do velikosti 2 m x 2,5 m x 5 m a to tak, že vytlačuje mokrou betonovou suspenzi tryskou a vytváří tak vrstvy o tloušťce asi 5 mm. Jakmile je jedna vrstva dokončena, postupuje k vrstvě další a tento proces se opakuje, dokud se nevyplní celá forma.<sup>17</sup> Dodnes většina využití aditivní výroby v oblasti stavebnictví zahrnovala 3D tisk základů staveb, stěn a jiných betonových prvků. To ale neznamená, že zde končí hranice 3D tisku v architektuře. Dle nejnovějších informací může být využit i pro interiérový design. Například australská společnost *Select 3D* vyvíjí nové aplikace 3D tisku pro interiérový design. V rámci studie společnost testuje tisknutelnost materiálu, který se podobá sádře.<sup>18</sup> 3D tisk nachází své využití i v architektuře. Součástí architektonických projektů jsou dnes již běžnou součástí 3D modely, jejichž cílem je přemostit komunikační propast mezi architektem a zákazníkem a představit myšlenky přímým zhmotněním ve 3D rozměru.<sup>19</sup>

### 1.3 Budoucnost 3D-tisku

S výhledem do budoucna lze předpokládat masivní rozšíření těchto technologií jak do oblastí konzumního využití běžnými spotřebiteli čili domácnostmi, tak do oblastí vědy a techniky. Počítá se s 3D tiskárnou do každé domácnosti i s tiskem běžných součástek a drobných předmětů pro běžnou potřebu, ale také s 3D-tiskem celé architektonické stavby nebo jejich prefabrikovaných částí (tvárnic). 3D-tisk dramaticky změní způsob, jakým se budou vyrábět nejrůznější předměty od léčivých přípravků až po nářadí, a také se pravděpodobně rozšíří možnost virtuálního nákupu věcí. Obchody v budoucnu nebudou mít všechny předměty dostupné skladem, ale místo toho budou pouze vlastnit a archivovat příslušné CAD soubory (dokonce i pro výrobky, které se již nevyrábějí), aby bylo možné si je vytisknout doma nebo si vyzvednout 3D vytištěné kopie v obchodě, a samozřejmostí bude i možnost vlastní modifikace daného výrobku. V praxi to například znamená, že v případě poruchy myčky bude možné si z webu výrobce stáhnout CAD soubor dané součástky a pomocí 3D tiskárny jej vytisknout samostatně doma, a to dokonce třeba i ve tři hodiny ráno, kdy jsou obchody a servisy zavřeny. Tento revoluční přístup znamená zkrácení čekací doby na dodání náhradního dílu a jeho opravu.<sup>3,12</sup>

Tato technologie promění dodavatelský řetězec, změní spotřebitele ve výrobce a organizacím zvýší ziskovost a umožní optimalizaci výrobních nákladů, což bude mít vliv na omezení dopadu výroby na životní prostředí, neboť organizace budou produkovat jen tolik výrobků, kolik bude právě potřeba a v době, kdy to bude potřeba. A pokud se ukáže, že návrh produktu má vadu, bude možné ihned provést úpravy s mnohem nižšími náklady než u tradičního způsobu výroby. Organizace, které budou mít dispozici více CAD souborů než fyzických výrobků, budou moci redukovat množství zbytečně uskladněných produktů, které by jinak skončili na skládce. Začnou se stírat rozdíly mezi nakupováním *online* a nakupováním v kamenných obchodech, neboť obchody nejrůznějších oblastí od zahradnických potřeb až po lékárny začnou svůj dosavadní sortiment v regálech rozšiřovat i o CAD soubory.<sup>12</sup> 3D-tisk je stále mladou a rychle se rozšiřující technologií a má potenciál umožnit výrobu přizpůsobených výrobků s inovativními materiály a originálním designem. Bude se nadále rozvíjet a posilovat, protože jeho ekosystém budou rozšiřovat nové společnosti a aplikace. Na budoucnost 3D tisku a nově vznikajících technologií a jejich další aplikací budou mít vliv také důsledky právního a duševního vlastnictví a etické otázky, které představují budoucí a vznikající technologie.<sup>12,20–22</sup>

## 2 TECHNOLOGIE 3D TISKU

Jednotlivé technologie 3D tisku lze rozdělit do tří kategorií. První je kategorie technologií založených na tekuté bázi, do které patří stereolitografie (SLA), PolyJet a MultiJet Modeling (MM). Technologie trojrozměrných tiskařských technik (3DP) a selektivního laserového spékání (SLS) patří do kategorie technologií založených na práškové bázi. V poslední kategorii technologií založených na pevné bázi jsou například technologie Laminated Object Manufacturing (LOM) a modelování depozicí taveniny (FDM).<sup>3</sup>

Všechna zařízení na výrobu 3D modelů a výrobků pracují na principu rozložení modelu, který byl vytvořený na počítači, do tenkých vrstev a jejich následném sestavení do reálného modelu v pracovní části 3D tiskárny. Na rozdíl od klasického obrábění se materiál neubírá, ale naopak je po vrstvách přidáván, proto se pro označení používá pojem aditivní výroba.<sup>9</sup>

### 2.1 Stereolitografie (SLA)

Stereolitografie je nejstarší technologií používanou od roku 1986. Její princip je podobný technologii SLS. Dochází k vytvrzování tekutého kompozitu laserovým paprskem.<sup>23</sup> 3D objekt vyrobený touto metodou vzniká postupným vytvrzováním tekutého fotopolymeru. Fotopolymer je vytvrzován pomocí UV laseru, jenž je formou paprsku promítán do jednotlivých vrstev tekutého polymeru. Odebrané vzniklé těleso je nutné vytvrdit následným dopečením nebo UV zářením. Výhodou je přesnost tisku. Na jednotlivých objektech lze docílit milimetrových detailů, otvorů či prvků. Konečný proces tvrzení, jenž probíhá v UV komoře, umožňuje také tvořit integrovaný povrch či barevnou úpravu tělesa, která je jinak omezená. Nevýhodou zůstává nutnost stavby podpěr, aby během tisku nedošlo ke zborcení modelu. Stereolitografie je využívána především k výrobě prototypů.<sup>3,23</sup>

### 2.2 PolyJet

U této technologie je možnost tisknout z velké škály tekutých materiálů (od průsvitných až po zářivě barevné a neprůhledné). UV lampou je nutné vytvrdit každou vytištěnou vrstvu. I zde je nutné složitějším tvarům stavět podpory, které pak lze odstranit pomocí vody, v níž se rozpustí. Velkou předností je možnost tisknout z několika různých materiálů odlišných fyzikálních vlastností a široké barevné škály. Jde o velmi přesnou technologii, která umožňuje vytisknout objekt vypadající jako konečný výrobek.<sup>3</sup>

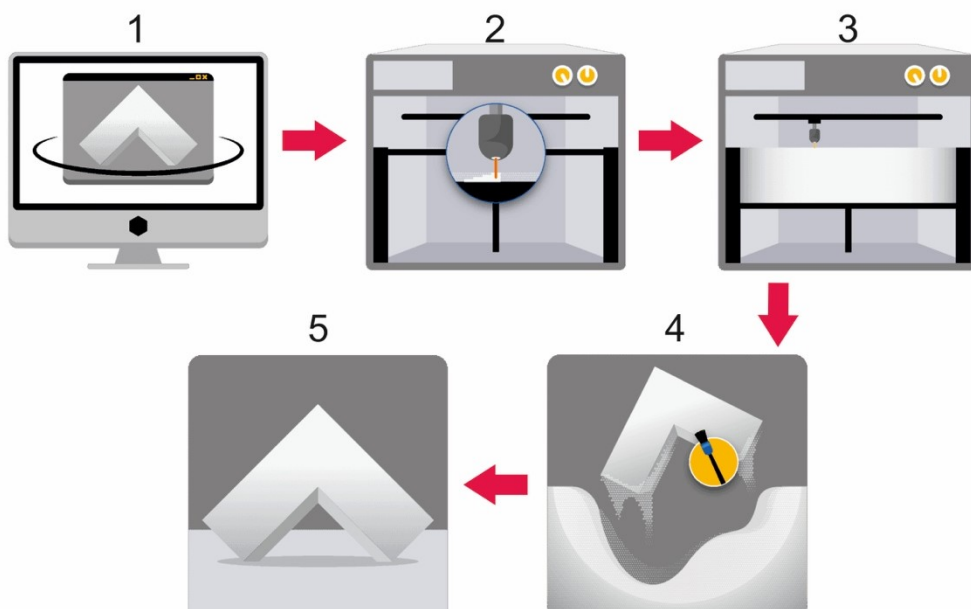


### 2.3 MultiJet Modeling (MJM)

Velké množství trysek umístěných v jedné rovině tvoří tiskovou hlavu. Z těchto trysek vychází termopolymer, a ten je tvrzen UV lampou. Tisk probíhá opět po vrstvách. Tisková hlava se pohybuje pouze po ose X. Podobně jako u klasické 2D tiskárny je pohyb po ose Y a Z zajištěn nosnou deskou. I u tohoto typu tisku jsou v případě složitějších konstrukcí vyžadovány podpěry.<sup>3</sup>

### 2.4 Selektivní Laserové spékání (SLS)

Do oblasti technologií založených na práškové bázi patří i technologie selektivního laserového spékání. Laser postupně po jednotlivých vrstvách spéká do požadovaného tvaru práškový materiál (plastový, kovový či keramický prášek nebo také slévárenský písek). Výhodou této techniky je skutečnost, že vyráběný objekt nepotřebuje žádné opory. Důvodem je fakt, že je po celou dobu procesu držen hmotou nespečeného práškového materiálu, který je z výrobní vany odstraněn až po dotisknutí. Díky tomu lze tisknout i složitější tvary a struktury. Nejčastěji jsou používány přírodní barvy. Vyšší pevnost a s ní související trvanlivost jsou dalšími výhodami této technologie. Tato technologie je využívána pro výrobu průmyslových prototypů.<sup>3,24</sup>



Obrázek 1. Schéma výrobního procesu SLS<sup>24</sup>

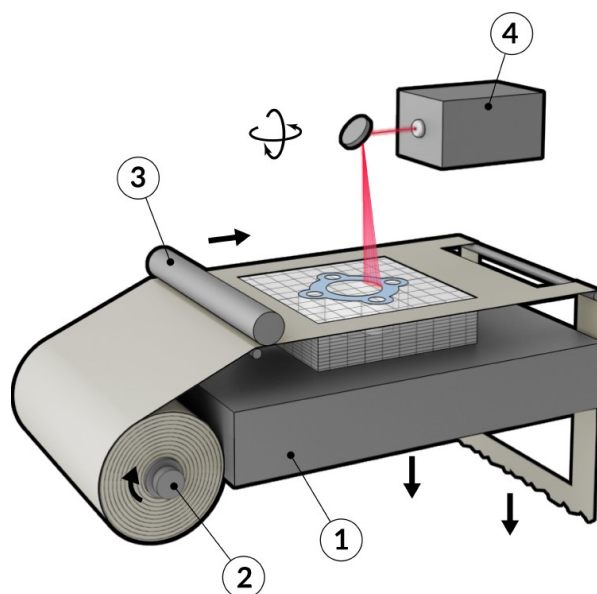
(1) 3D soubor, (2) laser speče částičky dohromady, (3) jednotlivé vrstvy prášky jsou na sebe nanášeny postupně, zatímco laser selektivně spéká částičky prášku do daného tvaru výrobku, (4) odstranění zbytkového prášku a dokončení, (5) díl je dokončen.<sup>24</sup>

## 2.5 Technologie trojrozměrných tiskařských technik (3DP)

Tato technologie je také založená na práškové bázi. Postupuje se opět po jednotlivých vrstvách, jež se k sobě lepí. Velkou výhodou této technologie je možnost v rámci jednoho tisku kombinování více materiálů, například i kovy, různé kompozitní materiály či polymery. Výhodou je také možnost plnobarevného tisku. Pomocí této technologie lze docílit plnobarevných, tvarově a barevně až fotorealistických objektů. Proto je velmi vhodná k tisku portrétů a figurek. Stejně jako u všech technologií založených na práškové bázi, i u této technologie není nutné stavět podpory. Podobně jako u SLS hmota prášku udrží i složitý tvar. Tato metoda je hojně využívána k výrobě prototypů a také k experimentům (např. tisk skla nebo keramiky). Nevýhodou je fakt, že nelze docílit lesklého povrchu.<sup>3</sup>

## 2.6 Laminated Object Manufacturing (LOM)

Principem této technologie je vrstvení jednotlivých fólií (z papíru, plastu nebo kovu) na sebe. Ty jsou po jednotlivých vrstvách k sobě přilehlovány a laserem se do nich vyřezává požadovaný tvar. Tento proces je opakován, dokud nevznikne požadovaný tvar. Pomocí této metody lze tisknout i velké modely, jejichž struktura připomíná dřevo. Výsledný tvar je nutno ručně opracovat, avšak nevýhodou je velké množství odpadu.<sup>3,25</sup>



Obrázek 2. Schéma výrobního procesu technologie LOM<sup>25</sup>

Jednotlivými částmi zařízení technologie LOM je tisková deska (1), podavač (2), tepelně aktivované lepidlo a vyhřívaný válec (3) a laserový nebo řezací plotr (4). Jako materiál je obvykle používána fólie z papíru, plastu nebo kovu.

## 2.7 Selective Laser Melting (SLM)

Pomocí technologie Selective Laser Melting (SLM) je umožněna výroba unikátních dílů, prototypů a testovacích vzorků s komplikovanou geometrií nebo vnitřní strukturou, které jsou obtížně vyrobitelné konvenčními technologiemi. Selektivní tavení laserem je výrobní technika, která může tisknout kovové části. Laser se používá k roztavení a spékání kovového prášku v místech po sobě jdoucích vrstev. Pomocí tohoto procesu jsou produkovány kovové díly přímo na základě 3D CAD dat. Velkou výhodou je možnost deklarace čistoty zpracovávaného materiálu, a to díky tomu, že stavba dílu probíhá v inertní atmosféře dusíku.<sup>23,26,27</sup>



Obrázek 3. SLM 280 HL systém<sup>28</sup>

Při výrobě jednotlivých vrstev výrobku je dosahována hustota až 99,9 %, a to díky plnému protavení materiálu. SLM 280 HL systém umožňuje zpracování široké škály kovových materiálů, jako jsou nerezové oceli, nástrojové oceli, kobalt-chrom nebo super slitiny a reaktivní kovové prášky, jako jsou hliníkové a titanové slitiny, a to díky využití inertní atmosféry argonu.<sup>26</sup>Tuto technologii využívá například i německá automobilka *Audi*, která koupila univerzální tiskárnu SLM 280HL 3D (*SLM Solutions*) k výrobě hliníkových dílů.<sup>29</sup> Potenciál SLM jako lékařské výrobní techniky je již prokázán vyvinutým postupem při výrobě rámců pro komplexní zubní protézy.<sup>27-29</sup>

## 2.8 Digital Light Processing (DLP)

Technologie DLP (Digital Light Processing) používá stejný princip tisku jako SLA tiskárny, tedy laserem (UV zářením) postupně vytvrzuje vrstvy vybraného tekutého polymeru do požadovaného tvaru. Díky postupnému tvrzení tenkých vrstviček polymeru tak lze dosáhnout i těch nejmenších detailů, neboť nevznikají jako celek, ale jako shluk velmi tenkých nánosů daného materiálu. Z tohoto důvodu pro tuto technologii není problém vytvrdit ani ty nejsložitější konstrukce a duté tvary takovým způsobem, jenž konkuruje jiným a běžným 3D tiskárnám.<sup>30</sup>

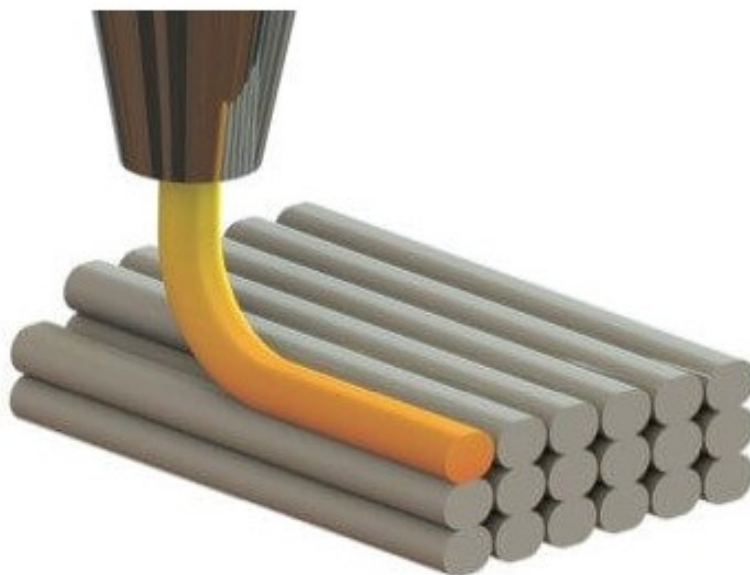
Tato technologie je na rozdíl od FDM technologie mnohem více přesná, a přitom dosahuje vyšší rychlosti tisku. Výrobky, jež jsou vyrobeny pomocí technologie DLP, jsou v zásadě zcela hladké a nejsou na něm patrné vrstvy materiálu, neboť standardní tloušťka vrstvy je 0,05 mm. Díky tomu je 3D tiskárna DLP vyhovující technologií i pro výrobu šperků (plastových), zubních protéz a dalších výrobků s jemnými detaily.<sup>31,32</sup>



Obrázek 4. Příklad 3D tiskárny technologie DLP<sup>32</sup>

## 2.9 Modelování depozicí taveniny (FDM)

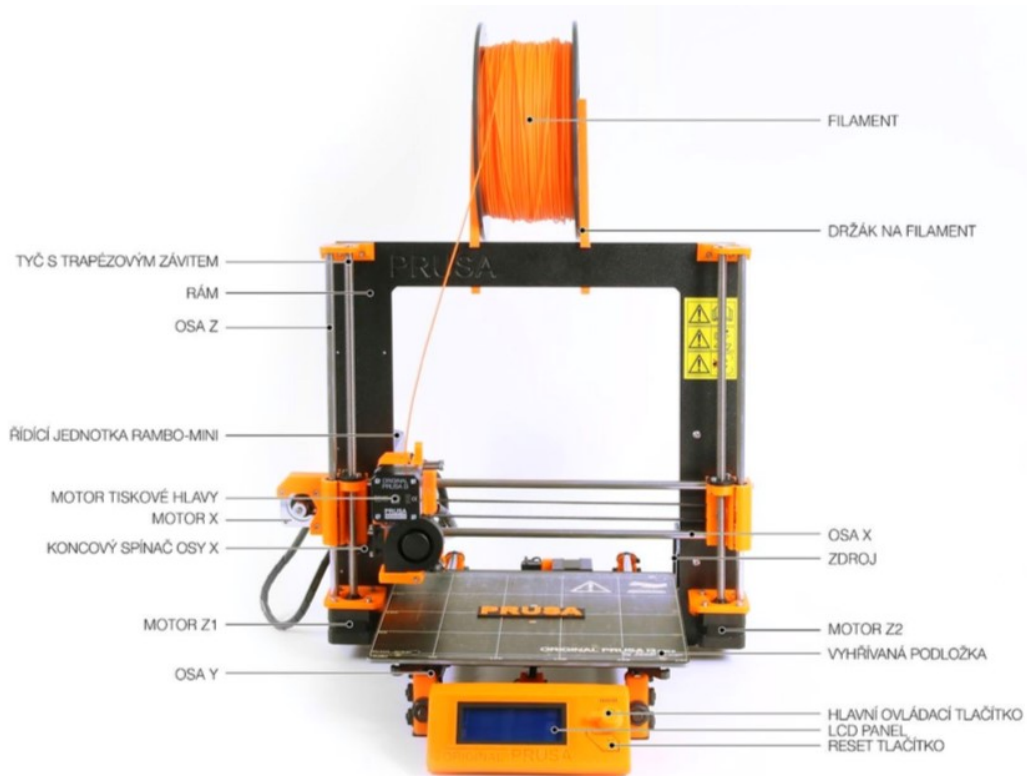
Technologie Fused Deposition Modeling (FDM) je technologií aditivní výroby, kterou na konci osmdesátých let dvacátého století vyvinul a v roce 1989 patentoval S. Scott Crump, pozdější zakladatel společnosti Stratasys, jež má tento pojem zajištěn ochrannou známkou. FDM patří mezi technologie založené na pevné bázi a je jednou z nejrozšířenějších metod profesionálního 3D tisku a rychlého prototypování pro nejrůznější aplikace. FDM stála u zrodu celého systému levných 3D tiskáren, jež využívají její odvozeniny, které byly rozšířeny po expiraci původního patentu na FDM v roce 2009. Princip FDM využívá struny různých materiálů namotané na cívkách, které jsou protlačovány vyhřívanou tryskou, v níž je materiál nahříván na teplotu o málo vyšší, než je teplota tání daného materiálu. Průměr tlačeného vlákna za tryskou není stejný jako výška nanášené vrstvy a je dán vždy tloušťkou trysky, která bývá nejčastěji pouze 0,4 mm. Každá takto vytlačená vrstva se přilepí ke spodní vrstvě a okamžitě tuhne. Výrobek se tiskne po jednotlivých vrstvách. Tryska, z níž je materiál vytlačován se pohybuje naprogramovaným pohybem, který je dán pokyny počítače a postupně po jednotlivých vrstvách tiskne konečný výrobek. 3D tiskárna přesně „ví“, kam má jednotlivé vrstvy materiálu umístit, a to díky pokynům z digitálního souboru, jež přijímá z počítače. I u této technologie je zapotřebí podpěr u převisů vyšších než 45 stupňů. Tyto podpěry je nutné po dokončení tisku ručně odstranit.<sup>3,12,33–35</sup>



Obrázek 5. Princip technologie FDM v detailu<sup>35</sup>

### 2.9.1 3D tiskárna FDM

3D tiskárna je definována jako zařízení, ve kterém je stavěn fyzický výrobek pomocí některého z postupů tzv. aditivní výroby. Zdrojem pro tvorbu výrobku je virtuální počítačový model vytvořený v grafickém 3D softwaru (např. CAD) uložený nejčastěji do datového formátu STL.<sup>36</sup>



Obrázek 6. Tiskárna Original Prusa i3 MK2<sup>37</sup>

FDM tiskárna má tyto komponenty: vlákno, extrudér nebo soustava extrudéru, tisková deska (tisková oblast), komponenty lineárního pohybu, rám/šasi a jednotka řadiče.<sup>12</sup>

Rám 3D tiskárny (1) může být vyroben například z kovu nebo překližky; tisková deska (neboli tisková oblast) je rovná a plochá deska, kde začíná 3D tisk; na cívku (3) je navinuto tenké vlákno (tzv. filament) o průměru 1,75 mm nebo 2,85 mm, které je obvykle vyrobeno z termoplastu, z něhož 3D tiskárna vyrábí předměty; extrudér (4) je soustava podávající vlákno, které je dále posouváno topným blokem; pomocí krokových motorů (5) jsou pásy a extrudér posouvány ve směru nahoru a dolů, doleva a doprava a dopředu a dozadu. Jednou z částí extrudéru je tzv. horký konec, který zahřívá vlákno na vhodnou teplotu pro daný materiál, a ve spodní části se nachází tryska, kterou může roztavená hmota vytékat. Pomocí ventilátoru (6) je řízena teplota tuhnutí každé vrstvy, a zlepšuje tak úspěšnost ukládání a propojení jednotlivých vrstev.<sup>12</sup>

### 2.9.2 Kvalita 3D tisku (stupně rozlišení) FDM tiskáren

Zatímco ve sféře běžného 3D tisku je uváděno rozlišení „600 dpi“ či „1200 dpi“, což je údaj označující počet „bodů na palec“ při ukládání inkoustu na papír, kvalita 3D tisku je definována podobně. Všechny 3D tiskárny technologie FDM a SLA se vyznačují dvěma odlišnými typy rozlišení. První typ, tzv. *layer Z*, udává výškové rozlišení ve směru shora dolů neboli v ose Z. Druhý typ, tzv. *XY*, představuje poziční rozlišení (ve směru zleva doprava a zepředu dozadu neboli v rovině XY). Všechny míry jsou uváděny v „mikronech“, což jsou zlomky milimetru. 1 milimetr obsahuje 1000 mikronů. FDM tiskárny většinou používají trysky průměru 0,4 mm (400 mikronů), z tohoto důvodu jsou na okrajích každé vrstvy omezeny na prvky velikosti přibližně 250 mikronů. Jedná se o velmi dobré rozlišení. Pro získání mimořádně jemných detailů lze využít přesnější technologie.<sup>12,38,39</sup>

### 2.9.3 Nevýhody FDM tiskáren

3D tiskárny se stávají stále více běžnou součástí téměř každé domácnosti. Z takovýchto 3D tiskáren vznikají emise nanočástic, což vyvolává otázku, zda taková emise jemných částic může mít nepříznivý vliv na zdraví člověka.<sup>40</sup> Gümperlein, I. a kol.<sup>40</sup> v březnu roku 2018 publikovali studii, ve které se zabývali účinky FDM 3D tiskáren na zdraví člověka. Provedli experimentální studii, kdy vystavili 26 zdravých dospělých dobrovolníků emisím 3D tiskárny (technologie FDM) po dobu 1 hodiny. V svém výzkumu použili 2 materiály, a to akrylonitrilbutadienstyren (ABS) s vysokými emisemi, a kyselinu polymléčnou (PLA) s nízkými emisemi. Tato studie<sup>40</sup> potvrdila, že vdechované částice mají vliv na zdraví člověka a že mohou mít souvislosti s eozinofilním zánětem. Tento vliv by proto měl být zkoumán v dalších studiích s použitím dalších biomarkerů a delších pozorovacích období.

### 3 MATERIÁLY PRO 3D TISK METODOU FDM

S příchodem aditivní výroby se v polovině osmdesátých let urychlilo zpracování výrobků a vznikly nové aplikace výroby, a to bez nutnosti použití speciálních strojů nebo nástrojů. Aplikace takových technologií v oblasti biomedicínských přístrojů je pomalá, a to především kvůli přísným kritériím nejen na přístroje, ale i na použité materiály a také kvůli obavám z reprodukovatelnosti a kvality výrobků.<sup>41</sup> 3D tisk založený na technologii FDM je slibnou metodou nejen pro výrobu scaffoldů k využití v tkáňovém inženýrství.<sup>42</sup> 3D tiskárny umožňují tisknout se stále větší škálou různých materiálů.<sup>12</sup> V současnosti existuje velké množství materiálů jak přírodních, tak syntetických. V posledních letech jsou v průmyslu nejvíce používané polymerní materiály a tento trend přechází i do odvětví jako je stavebnictví, tkáňové inženýrství, medicína, nebo farmaceutický průmysl.

Jednou z klíčových součástí tiskárny FDM je tenké vlákno materiálu (filament), ze kterého nakonec vznikají vytištěné modely.<sup>12</sup> 3D tiskárny využívají pro tisk objektů různé typy filamentů, které jsou dodávány na cívce, a to obvykle o dvou různých průměrech vlákna (2,85 mm a 1,75 mm).<sup>3,12,37</sup>



Obrázek 7. Filamenty materiálů pro FDM 3D tiskárnu a příklady výrobků<sup>43-45</sup>



### 3.1 ABS

Akrylonitrilbutadienstyren (ABS) je stejným materiálem, ze kterého se vyrábějí kostky Lego®. Tento materiál je trvanlivý, odolný proti nízkým i vysokým teplotám a chemikáliím (kyseliny, uhlovodíky, oleje), zdravotně nezávadný a dobře snáší zatížení. Díly z ABS je možno lepit rozpouštědlovými a polyakrylátovými lepidly. Jedná se o jeden z nejpoužívanějších materiálů pro 3D tisk metodou extruze polymeru, včetně technologie FDM. Při tisku vydává zápach podobný hořícímu polystyrenu.<sup>12,46</sup>

### 3.2 ASA

Akrylonitril-styren-akryl (ASA) byl vytvořen jako alternativa k ABS. Je to vysoce kvalitní konstrukční termoplast, který má dobrou mechanickou odolnost, tuhost, odolnost proti teplotě, jednoduchou zpracovatelnost na 3D tiskárnách, kvalitu tisku i při náročných detailech i v případě malých objektů a výborné vrstevním tisknutého objektu. ASA vyniká nízkou hladinou žloutnutí, což je velmi důležité pro aplikace s dlouhodobým důrazem na vzhled. Dalšími výhodami jsou dobrá rozměrová stabilita, zachování fyzikálních vlastností a vynikající odolnost vůči povětrnostním vlivům a UV záření. Jedná se o materiál vhodný pro výrobu prototypů, strojírenských nástrojů i koncových výrobků pro běžné použití včetně využití pro výrobu dílů pro venkovní aplikace. Vyrobený objekt z ASA je lesklý.<sup>47</sup>

### 3.3 Flex

Materiál FLEX je elastický filament na bázi polyuretanů (PUR), který je odolný vůči působení vody (hydrolýze) a vzduchu (oxidaci). Je používán v obuvním designu, na součástky pro automobily, modely, kryty telefonů atd. Pro svou tvrdost 93A vykazuje vynikající vlastnosti. Jedná se o materiál vhodný pro tisk na většině typů tiskáren.<sup>48</sup>

### 3.4 PET, PETG

Polyetylentereftalát (PET) je termoplastický polyester proslavený díky plastovým lahvám. Ve svém původním stavu je PET vlákno bezbarvé a křišťálově čistý materiál, a když se zahřeje nebo ochladí, změní svou transparentnost. Vykazuje poměrně velkou tvrdost a odolnost proti otřesům. Proto je tento materiál ideální pro výrobu lehkých předmětů. Polyetylentereftalát – glykol (PET-G) je na rozdíl od jiných materiálů mnohem více odolný vůči kyselinám a rozpouštědlům a také vysokým i nízkým teplotám. Z něj vyrobený předmět je možno tepelně tvarovat nebo jej leštit ohněm.<sup>49</sup>

### 3.5 PLA

Kyselina polylactická (z anglického *polylactic acid*) neboli polylaktid (PLA) je organický, biologicky rozložitelný polymer, vyráběný z kukuřičného škrobu nebo cukrové třtiny. Je pružný, tvrdý, odolný a rozpustný v hydroxidu sodném. Do plastické konzistence se dostává při teplotách, jakých dosahuje interiér zavřeného auta na přímém letním slunci. Na trhu je k dostání nemalé množství různých variant vláken PLA, z nichž některé ve tmě světélkují, zatímco jiné obsahují až 70 % kovu. Tento materiál je nejuniverzálnějším a nejpoužívanějším materiálem pro technologii FDM, a to i pro tisk velkých předmětů. Je stále více průmyslově využíván a je běžně používán v technologii FDM při tvorbě biomedicínských scaffoldů, jež jsou biologicky kompatibilní a imunologicky inertní.<sup>12,50-52</sup>

V posledních letech materiál PLA získal velký zájem, protože je ekologický a vykazuje dobré materiálové vlastnosti.<sup>21</sup> Cuiffo, M. a kol.<sup>51</sup> zkoumali u technologie FDM vliv procesu tisku na PLA a na její chemické vlastnosti a strukturu. Jejich analýza poskytla důkaz hygroskopické povahy materiálu a také odhalila přísady na bázi uhličitanu vápenatého, jejichž výskyt byl koncentrován v dutinách tištěné struktury. Takováto zjištění jsou důležitá pro biomedicínské aplikace, protože uhličitan bude mít vliv na růst buněk v tištěných tkáňových scaffoldech. Agarwal M. a kol.<sup>13</sup> uvedli možnosti výroby urologického retraktorového systému, který se používá při urologických operacích. Využili technologii FDM a za použití nízkonákladové stolní tiskárny a vlákna PLA vyrobili kruhový retraktor. Optimalizované výrobky testovalo pět urologů, kteří neprokázali žádnou inferioritu ve funkčnosti a výkonu ve srovnání s komerčním nástrojem z nerezové oceli. Zjistili, že proces *in situ* vytváření funkčních 3D tištěných chirurgických nástrojů je snadný. Mezi výhody patří nízké náklady, rychlá konstrukce a výrobní časy. Vlastnosti výrobku splňovaly nároky, které jsou na operačním sále. Vzhledem k bezprecedentní dostupnosti technologie 3D tisku po celém světě, efektivnosti a nízkým nákladům takto vyrobených nástrojů existují dalekosáhlé důsledky pro chirurgii i v méně rozvinutých a rozvojových částech světa. Albu S.<sup>53</sup> publikoval studii, ve které uvedl možnost provedení nového typu extrudéru používaného v 3D technologiích FDM. Použitým materiálem pro tiskárny vyrobené s novým extrudérem budou opět materiály, jako je ABS, PLA a další.

3D tiskárny technologie FDM se obvykle používají k výrobě nestrukturálních objektů. V posledních letech se současní autoři snažili tuto technologii využít i při výrobě konstrukčních prvků používaných při konstrukci malých bezpilotních letounů (Unmanned

Aerial Vehicles).<sup>54</sup> U malých multifunkčních UAV není příliš velké mechanické namáhání. Proto pro jejich výrobu může být úspěšně použita technologie FDM spolu při využití polymerů, jako je ABS a PLA,<sup>55</sup> za účelem výroby strukturních komponentů.<sup>54</sup>

Brischetto, S. a kol.<sup>54</sup> se věnovali výrobě a úvodní strukturní analýze sendvičových konfigurací. Konstatovali, že tyto nové vrstvené systémy by mohly vést k významnému snížení hmotnosti bez výrazného snížení mechanických vlastností. Proto by pro navrhovanou aplikaci (např. multifunkční malé UAV vyrobené prostřednictvím technologie FDM) mohly být snadno vyráběny tužší a lehčí struktury s nízkými výrobními náklady. Tyto struktury, které navrhli, jsou například sendvičové vzorky materiálu PLA, které obsahují voštinové jádro PLA vyrobené pomocí stejného extrudéru, anebo vícevrstvé vzorky s vnějšími vrstvami ABS a vnitřním homogenním jádrem PLA za použití různých extruderů pro dva materiály. Li, X. a kol.<sup>56</sup> vylepšili struny PLA. Smíchali speciálně připravenou celulózu, skleněná vlákna a PLA, a tuto směs posléze zvlákňovali do strun. Zda lze takto připravený tiskový filament považovat za vhodný pro tisk technologií FDM, provedli různé testy, aby zjistili jeho kvalitu. Výsledky jejich studie ukázaly, že takto vyztužené vlákno PLA vykazovalo o 34–60 % vyšší odolnost u rázové zkoušky, zatímco u tahové zkoušky o 43–52 % vyšší odolnost než vlákno pouze z čisté PLA.

Dle nejnovějších studií nachází materiál PLA využití i v odvětví stavebnictví. Corcione, C. E. a kol.<sup>21</sup> se zabývali návrhem nového kompozitního materiálu, který se skládal z PLA a z kamenného odpadu LS. Tzv. Lecce Stone (LS) je jedním z typů vápence. Je to krásný a cenný přírodní materiál s širokým využitím ve stavebnictví. Jedná se ale o neobnovitelný zdroj a jeho využití vedlo k trvalé produkci mnoha odpadů, které mají významný vliv na životní prostředí. Z tohoto důvodu je možnost opětovného využití odpadů z oblastí tohoto kamene velmi důležitým vědeckým a průmyslovým tématem. Proto byla nedávno ve stavebnictví experimentálně použita technologie 3D tisku FDM s využitím kompozitu z biopolymeru PLA a kamenného odpadu, který byl využit jako plnivo. Tímto způsobem lze vytvořit stavební a konstrukční prvky libovolného tvaru za méně času a bez odpadu.

## 4 POVRCHOVÉ VLASTNOSTI MATERIÁLU

### 4.1 Povrchové napětí kapalin

Kapaliny se snaží zaujmout tvar minimalizující jejich povrch, neboť potom se maximální množství molekul nachází v objemové fázi a je tak obklopeno molekulami, ke kterým je ze všech stran přitahováno. Proto malé kapky kapaliny mají sférický tvar. Důvodem je fakt, že koule je těleso s nejmenším poměrem povrchu k objemu. Snaze kapaliny zaujmout tento ideální tvar mohou bránit různé vnější síly. Například tíhová síla může zploštit koule na loužičky či oceány.<sup>57</sup> Povrchové jevy lze popsat jazykem Helmholtzovy a Gibbsovy energie. Spojníkem mezi těmito veličinami a velikostí povrchu je práce potřebná ke změně povrchu o určitý kousek spolu s poznatkem, že  $dA$  a  $dG$  jsou rovny (za různých podmínek) vratně vykonané práci potřebné ke změně energie systému.<sup>57</sup> Práce  $dw$  potřebná ke změně plochy  $\sigma$  povrchu vzorku o nekonečně malý kousek  $d\sigma$  je úměrná  $d\sigma$ , a proto:

$$dw = \gamma d\sigma \quad (1)$$

Konstanta úměrnosti  $\gamma$  se nazývá *povrchové napětí*.<sup>57</sup> Tato veličina charakterizuje povrch kapalin a má rozměr energie / povrch a její jednotka je  $\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$ . Hodnoty  $\gamma$  se však obvykle udávají v  $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ , což je totéž, protože platí  $1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}$ .<sup>57,58</sup> Práce potřebná k vytvoření povrchu za konstantního objemu a teploty je rovna změně Helmholtzovy energie, a proto:

$$dA = \gamma d\sigma \quad (2)$$

Povrchy mají přirozenou tendenci ke smršťování, protože Helmholtzova energie se snižuje ( $dA < 0$ ) se snižující se plochou povrchu ( $d\sigma < 0$ ). Povrchové napětí je ovlivňováno složením kapalně fáze, teplotou a v malé míře i tlakem, případně elektrickým nábojem fázového rozhraní a u velmi malých částic i jejich zakřivením.<sup>57,58</sup>

Tabulka 1. Povrchová napětí kapalin při 293 K<sup>57</sup>

Látka	$\gamma / (\text{mN} \cdot \text{m}^{-1})$
benzen	28,88
rtuť	472
methanol	22,6
voda	72,75

Pozn.:  $1 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1} = 1 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$

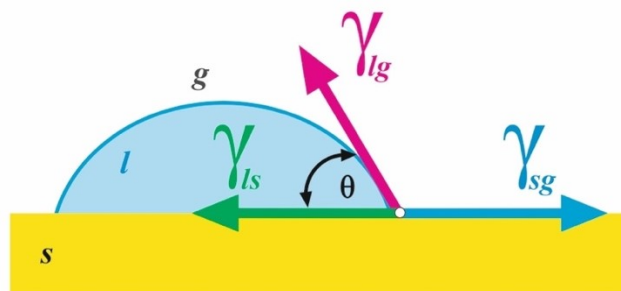
## 4.2 Povrchová energie pevných látek

Vzhledem k velmi odlišné struktuře a povaze samotných pevných látek, jsou pevné povrchy velmi rozdílné. I u monokrystalu, nejjednodušší možné formy pevné látky, existují krystalové roviny, hrany a rohy vzájemně se lišící od sebe *povrchovou energií*. U běžných pevných látek se nejedná o monokrystaly, ale o agregáty malých krystalů v různých orientacích s amorfním materiálem v mezerách. Rozmístění nepravidelností, a tím i povrchová energie a jiné fyzikální vlastnosti povrchu, je závislé nejen na druhu, ale i na předchozí historii materiálu (např. čerstvě odštípnutý povrch krystalu bude mít jinou strukturu i energii než povrch rovnovážný). Pevné povrchy bývají obvykle analyzovány při pokojových teplotách, tedy často hluboko pod bodem tání, protože povrchové atomy jsou za daných podmínek relativně nepohyblivé a jen vibrují kolem svých rovnovážných poloh. Z tohoto důvodu, na rozdíl od kapalin, bývá povrch pevných látek nerovný v mikroměřítku i v makroměřítku.<sup>58,59</sup>

Povrchová energie ( $\gamma$ ) je u kapalin definována jako energie potřebná k vytvoření jednotkové plochy nového povrchu a je dobře měřitelná. U pevných látek není vyhovující koncepce povrchového napětí, jako tečné síly, stejné ve všech směrech a ve všech místech povrchu, jak tomu bylo v případě kapalin, poněvadž povrch pevných látek není homogenní, a síla působící v rovině povrchu je různá v různých místech i různých směrech. Rozdíl mezi povrchovou energií pevné látky a mezifázovou energií kapalina-pevná látka je možné zjistit z výpočtu z tzv. *Youngovy rovnice*, a to z experimentálních hodnot úhlů smáčení a hodnot povrchového napětí kapaliny.<sup>58-60</sup>

$$\gamma_{sg} - \gamma_{ls} = \gamma_{lg} \cdot \cos\theta \quad (3)$$

Podmínku rovnováhy na rozhraní tří fází pak vyjadřuje vztah mezi jednotlivými mezifázovými energiemi a úhlem smáčení, ustavujícím se na rozhraní tří fází, pevné ( $s$ ), kapalné ( $l$ ) a plynné ( $g$ ).<sup>61</sup>



Obrázek 8. Rovnovážný tvar kapky na tuhém povrchu<sup>61</sup>

### 4.3 Kontaktní úhel smáčení

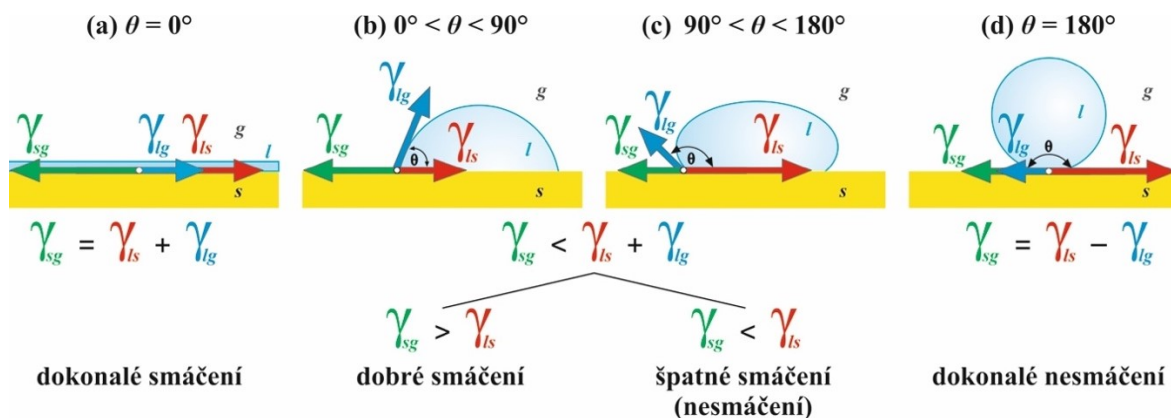
Je-li kapka kapaliny umístěna na povrch pevné látky, mohou nastat dva případy:

1. Pokud bude povrchová energie pevné látky větší než součet povrchové energie kapaliny a mezifázové energie *pevná látka-kapalina*,  $\gamma_{sg} > \gamma_{sl} + \gamma_{lg}$ , kapalina bude do povrchu pevné látky rozestřena do kontinuální vrstvy. Fázové rozhraní *pevná látka-plyn* tak bude nahrazeno dvěma rozhraními, *pevná látka-kapalina* a *kapalina-plyn* (každé z nich o stejné ploše jako původní rozhraní) a výsledná energie systému bude nižší.<sup>58</sup>

2. Jestliže naopak bude platit  $\gamma_{sg} < \gamma_{sl} + \gamma_{lg}$ , k rozestírání nedojde a kapka kapaliny zaujme na povrchu pevné látky rovnovážný tvar vyjádřený tzv. *kontaktním úhlem smáčení*  $\theta$ , tedy úhlem, jež svírá tečna k povrchu kapky kapaliny s rozhraním *pevná látka-kapalina* v bodě linie smáčení. Podmínka rovnováhy, kterou lze vyjádřit jako vektorový součet mezifázových napětí, vede k tzv. *Youngově rovnici*.<sup>58,62</sup>

$$\gamma_{sg} = \gamma_{sl} + \gamma_{lg} \cos\theta \quad (4)$$

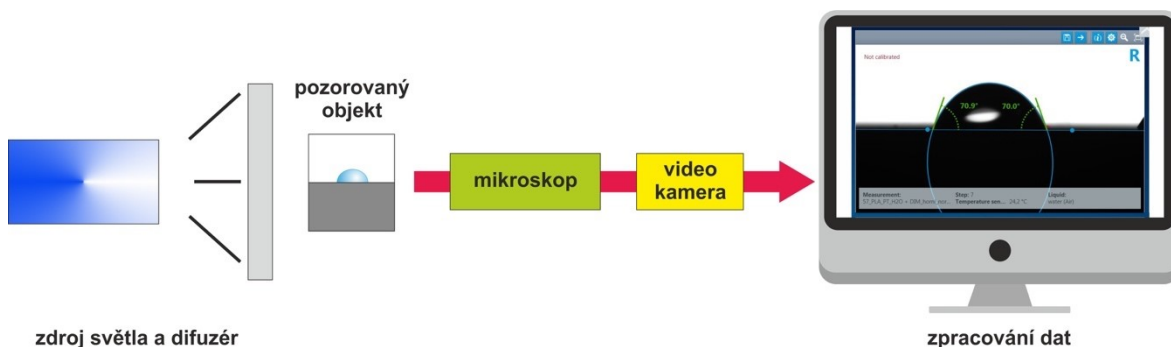
Tzv. *linie smáčení* označuje křivku, kde se stýká kapalina, pevná látka a plyn. Podle velikosti hodnoty kontaktního úhlu smáčení může dojít k těmto případům:



Obrázek 9. Kapka kapaliny na povrchu pevné látky<sup>58</sup>

Schopnost kapaliny smáčet daný povrch bývá označována jako smáčivost. Jako tzv. *lyofilní* jsou označovány povrchy, které jsou kapalinami smáčeny. V případě, že je kapalinou voda, je tento typ povrchu nazýván jako *hydrofilní*. Jako tzv. *lyofobní* jsou označovány povrchy, které jsou naopak kapalinami špatně smáčené. Je-li kapalinou voda, je tento typ povrchu nazýván jako *hydrofobní*.<sup>58,60,62</sup> Jako tzv. *dokonalé smáčení* je nazýván mezní případ smáčení ( $\theta = 0^\circ$ ,  $\gamma_{sg} = \gamma_{sl} + \gamma_{lg}$ ) a jako tzv. *dokonalé nesmáčení* je označován případ špatného smáčení ( $\theta = 180^\circ$ ).<sup>58,62</sup>

Metoda měření kontaktního úhlu smáčení neboli tzv. *metoda sedící kapky* na pevném podkladu je velmi přesnou, rychlou a levnou metodou charakterizace pevných materiálů. Při snímání obrazu kapky za použití videokamery a počítače pro jeho vyhodnocení lze očekávat stanovení hodnoty kontaktního úhlu smáčení s přesností okolo 1°. <sup>58,60,62,63</sup>



Obrázek 10. Schéma uspořádání při měření kontaktního úhlu smáčení<sup>63</sup>

#### 4.3.1 Modifikace Youngovy rovnice

V případě, že se mezifázové napětí *pevná látka-plyn* změní kvůli adsorpci z plynné fáze, je třeba Youngovu rovnici modifikovat. Zavedení tzv. *smáčecího tlaku* může pomoci tuto situaci vyřešit. Interakce tří fází v místě kontaktu na molekulární úrovni je ovšem značně komplikovaná a dosud nebylo podloženo odpovídající řešení.<sup>64</sup>

Koncept smáčecího tlaku uvádí dva odlišné extrémní případy: tzv. *suché* a *mokrý smáčení*. První je pozorován v případě netěkavých kapalin, kde molekuly kapaliny absorbované na pevném povrchu nemají významný vliv na proces smáčení. Naopak ve druhém případě je kapka kapaliny v rovnováze s parami kapaliny a obvykle se na pevný povrch absorbuje tenký film kapaliny. Mezifázové napětí povrchu upraveného touto absorpcí může být vyjádřeno jako:

$$\gamma_{sv} = \gamma_{sv}^0 - \pi_{e(sv)} \quad (5)$$

kde  $\gamma_{sv}^0$  je povrchové napětí samotného substrátu a  $\pi_{e(sv)}$  je smáčecí tlak. Protože adsorpce je spontánní proces, mezifázové napětí  $\gamma_{sv}$  je nižší než to samotného substrátu. Účinek smáčecího tlaku je obvykle považován za nevýznamný pro nesmáčivé kapaliny, ale může mít určitý vliv, když povrchové napětí substrátu má hodnotu blízkou hodnotě kapaliny, tj. z nízkých kontaktních úhlů smáčení. Je však velmi obtížné rozlišit vliv adsorpce páry na kontaktní úhel od jiných vlivů.<sup>64</sup>

#### 4.3.2 Hystereze kontaktního úhlu smáčení

Na reálných površích, tj. těch, které nejsou dokonale hladké, homogenní, nerozpustné, nereaktivní, nedeformovatelné, a vykazují různé vlastnosti v různých směrech, existuje více než jedna hodnota kontaktního úhlu. Rovnovážná hodnota kontaktního úhlu odpovídá globálnímu energetickému minimu, tedy nejnižší energii všech metastabilních stavů.<sup>65</sup>

Metastabilní rovnováha je energetický stav oddělený od jiných stavů energetickou bariérou; je dosažen na skutečných površích vzhledem k drsnosti povrchu, heterogenitě atd. Metastabilní kontaktní úhel se může lišit podle objemu kapaliny, vnější mechanické energie (např. vibrace) a způsobu jeho dosažení. Maximální hodnota se nazývá *postupující kontaktní úhel*  $\theta_a$  a minimální *ustupující kontaktní úhel*  $\theta_r$ . Jejich rozdíl je označován jako *hystereze kontaktního úhlu* označovaná symbolem  $H$ :

$$H = \theta_a - \theta_r \quad (6)$$

Hystereze kontaktního úhlu může být použita jako měřítko drsnosti povrchu a jeho heterogenity. Nicméně jak uvádí Hiemenz<sup>66</sup>, může existovat pouze jedna hodnota mikroskopického kontaktního úhlu, což vede k rozdílným hodnotám metastabilního makroskopického kontaktního úhlu.<sup>66</sup>

Povrch pevné látky může být charakterizován postupujícím nebo ustupujícím kontaktním úhlem smáčení nebo střední hodnotou obou. Takový postup je spíše empirický, vzhledem k tomu, že teorie vztahující se k těmto měřením ideálními kontaktními úhly nebyla dosud prezentována. Ideální kontaktní úhel může být pravděpodobně odvozen ze zdánlivého makroskopického kontaktního úhlu pomocí *Wenzelovy rovnice*:

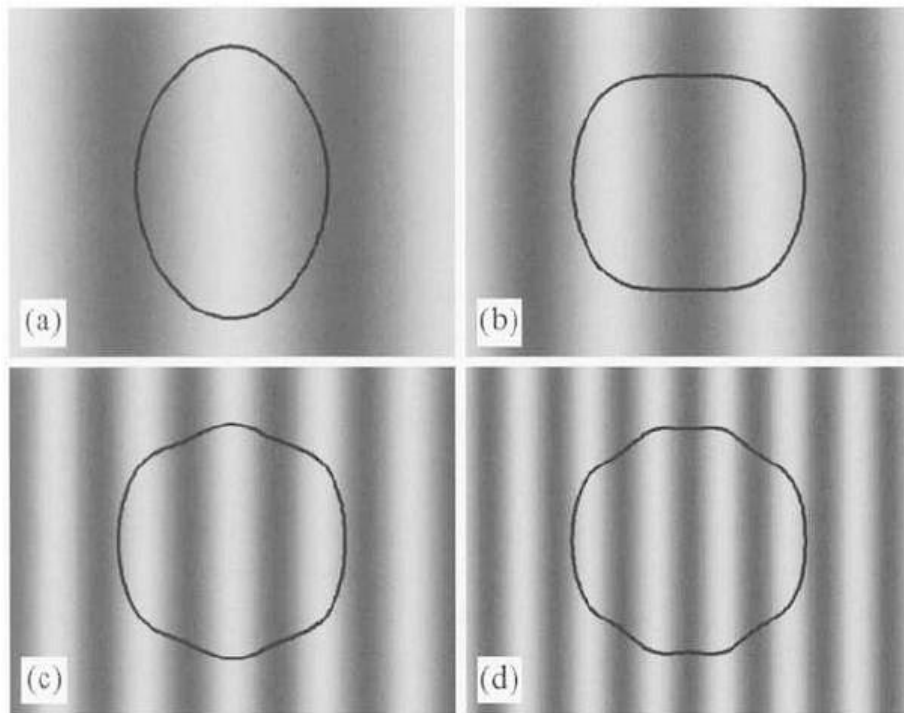
$$\cos\theta_W = r \cdot \cos\theta \quad (7)$$

kde  $\theta_W$  je Wenzelův kontaktní úhel, tj. zdánlivý kontaktní úhel, a  $r$  je koeficient drsnosti definovaný jako:

$$r = \frac{\text{reálná plocha povrchu}}{\text{geometrická (zdánlivá) plocha povrchu}} \quad (8)$$

Rovnice (7) může popsat pouze jevy spojené s drsností povrchu, zatímco reálné povrchy projevují jiné nepravidelnosti, jako chemická heterogenita. To je také v rozporu s experimentálním pozorováním, že tento vztah nepopisuje hysterezi kontaktního úhlu, a proto nelze vyvodit závěry o vlivu drsnosti povrchu na hysterezi. Navíc koeficient drsnosti se vztahuje pouze na samotný povrch, nikoliv na drsnost ve smyslu hloubky profilu.<sup>64</sup>





Obrázek 11. Kapky smáčeující hydrofilní (světlé) a hydrofobní (tmavé) pruhy materiálu<sup>67</sup>

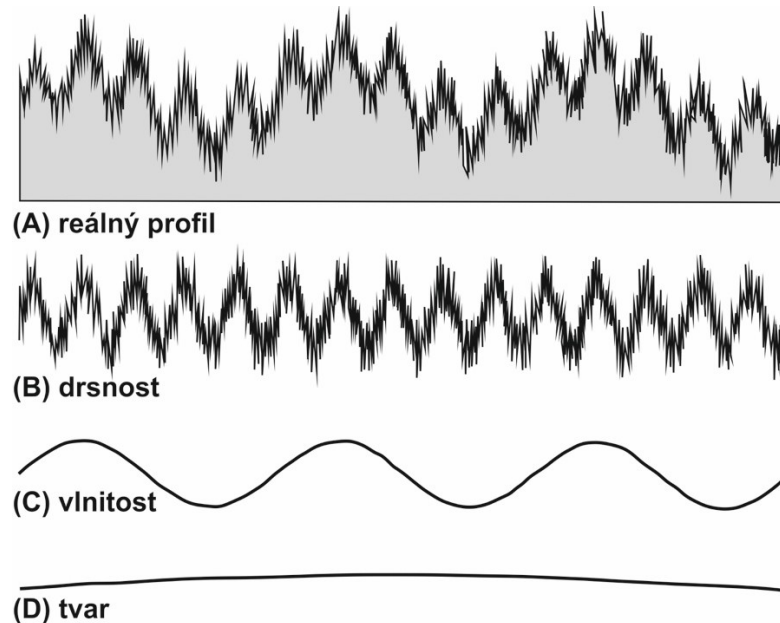
Na základě vyhodnocení kontaktního úhlu chemicky heterogenních povrchů byla odvozena *Cassieho rovnice*. Byly učiněny tyto předpoklady: povrch sestává ze dvou chemicky heterogenních domén s kontaktními úhly  $\theta_1$  a  $\theta_2$ , které by měly představovat příslušné kontaktní úhly pro každou doménu,  $f_1$  a  $f_2$  jsou dílčí podíly obou složek ( $f_1 + f_2 = 1$ ) a  $\theta_c$  je *Cassieho kontaktní úhel*:

$$\cos\theta_c = f_1\cos\theta_1 + f_2\cos\theta_2 \quad (9)$$

Cassieho kontaktní úhel je termodynamická rovnováha kontaktního složeného povrchu. Oblasti chemické domény mají často na reálném povrchu náhodné hodnoty, proto je obvykle Cassieho kontaktní úhel experimentálně nepřístupný.<sup>68</sup>

#### 4.4 Geometrie povrchu

Přestože je drsnost definovaná především pro kovové materiály, je tato materiálová charakteristika již běžně užívanou metodou hodnocení povrchu i u jiných (nekovových) materiálů, jako jsou například polymery.



Obrázek 12. 2D profil představující kombinované efekty drsnosti, vlnitosti a tvaru

Jak je znázorněno na obrázku, topografie povrchu je kombinací tří vlastností, a to konkrétně:

1. **Drsnost povrchu** se vztahuje na vysoce četné nepravidelnosti na povrchu způsobené interakcí mikrostruktury materiálu s řezným nástrojem. To se týká přímo události výrobní jednotky (vlastních generačních mechanismů) a popisuje nesrovnalosti způsobené rychlostí posuvu, zrnitostí abraziva atd.<sup>69</sup>

2. **Vlnitost povrchu** se týká středně četných nepravidelností (textury) na povrchu, na kterých je posazena již zmíněná drsnost povrchu. Vlnitost je způsobena takovými faktory, jako je například nestabilita řezného nástroje, vychylování obrobku a chyby šroubových pohonů obráběcího stroje.<sup>69</sup>

3. **Tvar povrchu** je obecný tvar povrchu bez drsnosti a vlnitosti. Je způsoben především tepelnými deformacemi, odchylkami pojezdu stroje, opotřebením nebo ohybem rozhraní stroj – obrobek.<sup>69</sup>

V praxi nejsou drsnost, vlnitost a tvar nikdy oddělené, ale většina povrchů je výsledkem kombinace těchto tří charakteristik. Nicméně drsnost vyplývá spíše ze samotného výrobního procesu a vlnitost závisí naopak na konkrétním obráběcím stroji a jeho nedokonalostech.<sup>69</sup>

#### 4.4.1 Hodnocení drsnosti povrchu

Makroskopickou nerovnost povrchu pevných látek (*drsnost*) lze charakterizovat různými veličinami, např. rozdílem nejvyššího a nejnižšího bodu povrchu, střední odchylkou nebo střední kvadratickou odchylkou výšky povrchu v daném bodě od průměrného povrchu.<sup>58,70</sup>

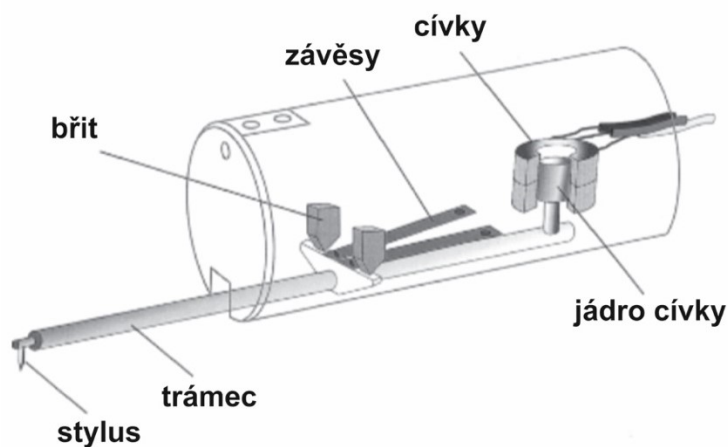
Tabulka 2. Seznam parametrů drsnosti povrchu 2D podle ISO 4287<sup>69</sup>

Parametry výšky profilu		
$R_a$	Aritmetická průměrná výška	SL
$R_q$	Průměrná kvadratická úchylka profilu	SL
$R_v$	Maximální hloubka prohlubní	SL
$R_p$	Maximální výška píků	SL
$R_t$	Celková výška profilu ( $R_v + R_t$ )	EL
$R_z$	Maximální výška profilu	SL

Pozn.: *SL* je označení pro tzv. vyhodnocovací délku, *EL* pro tzv. charakteristickou délku

#### 4.4.2 Měření drsnosti povrchu

Povrchové úpravy a textury povrchu lze měřit velkým počtem způsobů, od jednoduché dotykové sondy skenující povrch v jednom směru až po skenovací elektronový mikroskop (SEM). Rozsah zařízení pro měření topografie povrchu lze obecně rozdělit na dvě kategorie. Ty, které se používají ve výrobním procesu a ty, které se používají v laboratoři. První jsou založeny na typické 2D profilometrii, zatímco druhá skupina využívá 3D profilometrii a mikroskopů SEM a AFM.<sup>69</sup>



Obrázek 13. Příklad drsnoměru fungujícího na principu indukčnosti

## 5 METODY MODIFIKACE POVRCHOVÝCH VLASTNOSTÍ

### 5.1 Povrchové úpravy polymerních materiálů

Povrchy polymerů mohou často způsobit problémy, pokud je třeba materiály lepit nebo pokud je na ně aplikován nátěr. Hlavní příčinou je jejich nízká povrchová energie, nekompatibilita, povrchová kontaminace a slabě vázané povrchové vrstvy. Pro změnu povrchového chemického složení a topografie, zvýšení povrchové energie, odstranění nečistot a slabě vázaných vrstev se používají různé metody povrchových úprav. Vlastnosti materiálu jako takové (pevnost, modul pružnosti atd.) zůstávají nezměněny, mění se pouze povrch. Nejběžnějšími průmyslovými postupy jsou chemické, tepelné úpravy a zejména využití nízkoteplotního plazmatu. Pevnost adhezního spojení může být také zvýšena pomocí tzv. primerů, i když se tento způsob nepovažuje za povrchovou úpravu v pravém slova smyslu.<sup>71</sup>

#### 5.1.1 Chemické metody

Povrchy polymerů jsou vystaveny působení různých chemických sloučenin nebo jejich směsí, což může vést k fyzikálním a/nebo chemickým změnám povrchu. Změny mohou zahrnovat leptání amorfních oblastí, zvýšení drsnosti povrchu nebo implantaci polárních (karbonylových nebo karboxylových) skupin. Komplexy sodíku se často používají pro fluoroplasty, kyselina sírová a kyselina chromsírová pro leptání, a různé detergenty pro odstraňování nečistot. Hlavním nedostatkem chemických metod je dlouhá doba aplikace, potřeba vyčistit a vysušit modifikované povrchy a následně likvidovat toxický odpad. Proto se tato metoda používá především pro malé části s vysokou přidanou hodnotou.<sup>71</sup>

#### 5.1.2 Termické metody

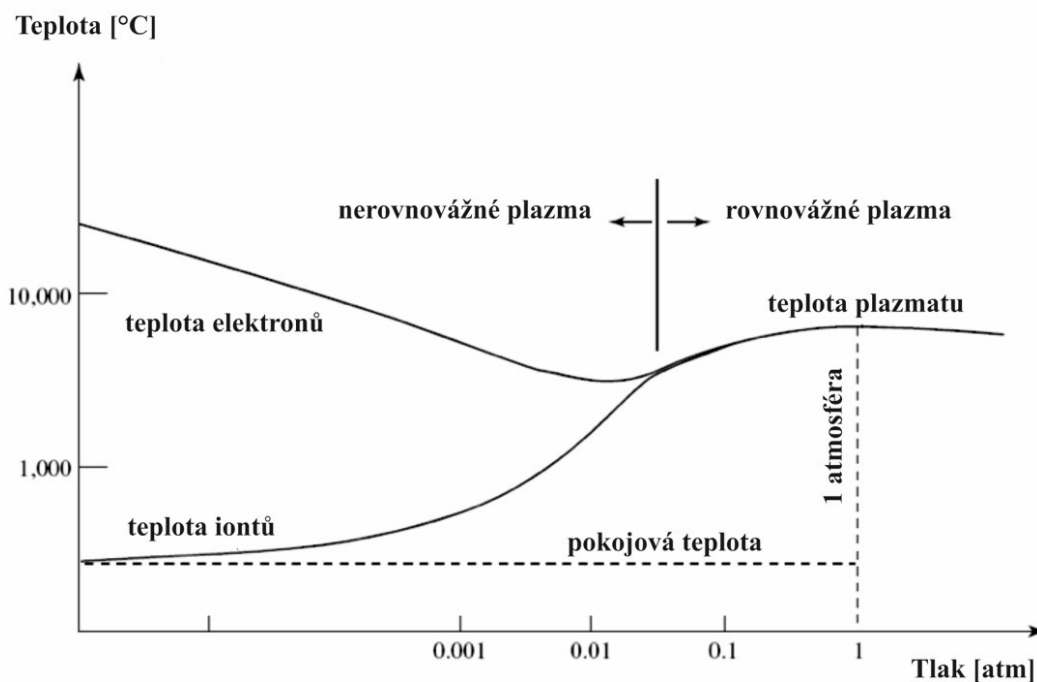
Termické metody zahrnují především plamen a horkovzdušnou úpravu. Výsledek je velmi podobný chemickým metodám: povrchová oxidace, odstranění volně vázaných vrstev a povrchové kontaminace. Oxidace je poháněna mechanismem volných radikálů a je doprovázena porušováním polymerních řetězců. Plamen se aplikuje na ošetření polyolefinů, polyacetátů a poly(ethyltereftalátu) před potiskem nebo spojením lepenými spoji. Plamen obsahuje excitované formy skupin ( $-O$ ,  $-NO$ ,  $-OH$  a  $-NH$ ) schopné oddělit vodík od povrchu polymeru, čímž tvoří volné radikály. Aktivace plamenem (stejně jako plazma) není v materiálu ovlivněna antioxidanty, protože je iniciována radikály přítomnými

v plamenu ve vysoké koncentraci. Aktivace horkým vzduchem (přibližně 500 °C) je na druhé straně zpomalována antioxidanty, protože radikály se vytvářejí pomalu přenosem tepla.<sup>71</sup>

### 5.1.3 Nízkoteplotní plazmové modifikace

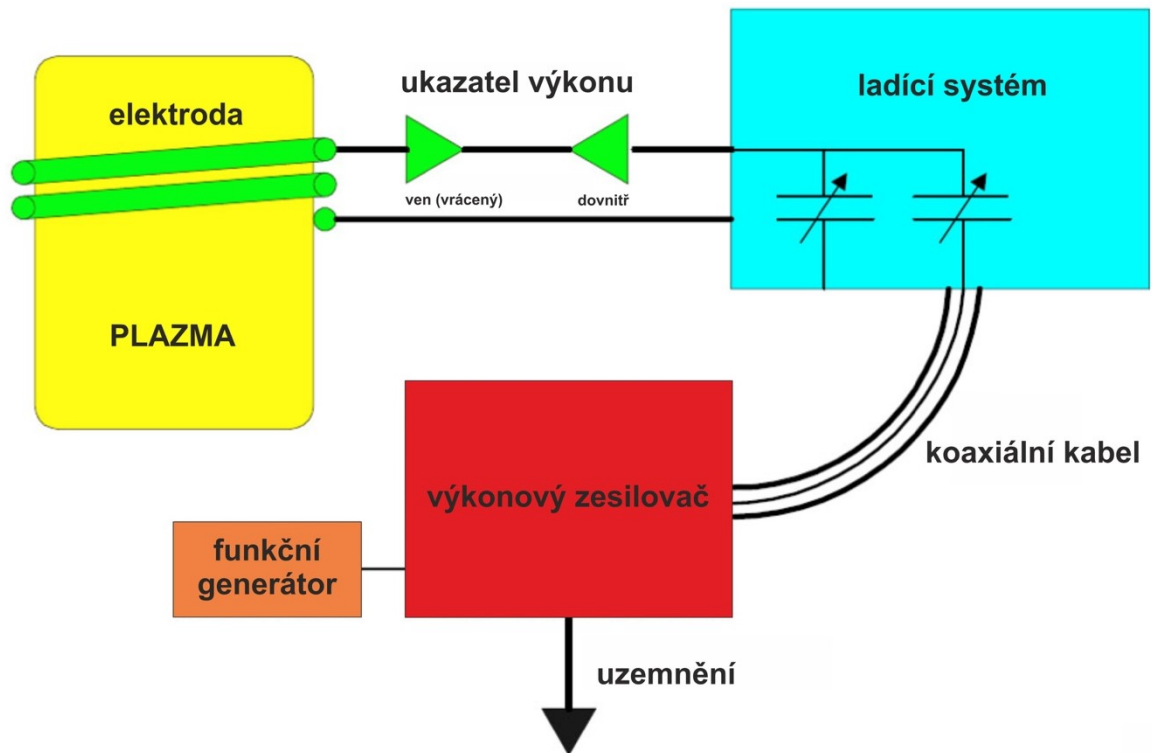
Plazmatu bylo často používáno ke zlepšení smáčivosti a adhezivních vlastností polyolefinů, polyesterů a mnoha dalších polymerů. To je důležité zejména v obalovém průmyslu pro tisk a lepené spoje, v lékařských aplikacích pro bio-kompatibilizaci syntetických substrátů, při aplikaci nátěrových hmot apod. Nízkoteplotní plazma je velmi vhodným nástrojem pro výše uvedené procesy, protože nízká teplota iontů zaručuje minimální poškození povrchu, zatímco teplota elektronů (přibližně 5000 K a více) je dostatečně vysoká, aby způsobila mnoho žádaných změn v povrchových vrstvách. Tato nerovnost může být často dosažena pouze při nízkých tlacích.<sup>72,73</sup>

Plazmatu je také využíváno ve výrobě mikroelektronických přístrojů při fotolitografickém procesu pro anizotropní leptání nevodivých vrstev a odstraňování fotorezistu. Používají se především reaktory RIE (Reactive Ion Etching), ECR (Electron Cyclotron Resonance) a reaktory založené na typu helicon.<sup>72</sup>



Obrázek 14. Závislost teploty na tlaku u rovnovážného a nerovnovážného plazmatu<sup>74</sup>

Pro povrchovou modifikaci, včetně povrchové oxidace, implantaci funkčních skupin a odstranění biologické kontaminace, jsou vhodným řešením radiofrekvenční (RF) výboje. Mohou být buzeny induktivně nebo kapacitně a pracují převážně na frekvenci 13,56 MHz.<sup>72</sup> Hlavní části tohoto zařízení (s výjimkou vakuového systému) jsou znázorněny na Obr.15.



Obrázek 15. Komponenty radiofrekvenčního plazmatického systému<sup>74</sup>

### 5.1.3.1 Definice plazmatu

Plazma je nazýváno čtvrtým stavem hmoty. Je to částečně nebo zcela ionizovaný plyn, který se skládá z iontů, elektronů, volných radikálů, excitovaných molekul a atomů, přičemž množství kladných nábojů se rovná množství záporných nábojů. Celkově tak může být plazma považováno za elektricky neutrální objekt. Kromě toho plazma vykazuje kolektivní chování, kdy pohyby v plazmě nezávisí pouze na místních podmínkách, ale také na podmínkách ve vzdálených oblastech.<sup>75</sup> Plazma je směs atomových a iontových plynů; každá z nich je v rovnováze a může mít odlišnou teplotu, definovanou jako míra energie. Díky odlišné hmotnosti elektronů a jiných částic se energie mezi těmito dvěma fázemi při nízkém tlaku nepřevádí a teplotní rozdíl zůstává konstantní. Z termodynamického hlediska může být plazma v termodynamické rovnováze, místní termodynamické rovnováze nebo nerovnováze.<sup>72</sup> Základní charakteristiky plazmatu jsou stupeň ionizace, frekvence

kolektivních oscilací, hustota elektronů, distribuce energií částic a tzv. *Debyeova stínící délka*, definovaná jako:

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\varepsilon_0 k}{e^2 n_0} \cdot \frac{T_+ T_-}{T_+ + T_-}} \quad (10)$$

kde  $\varepsilon_0$  je permitivita vakua,  $k$  Boltzmannova konstanta,  $n_0$  označuje koncentraci nabitých částic,  $T_+, T_-$  označuje teplotu kladně nabitých iontů a teplotu elektronů. Je třeba poznamenat, že směs nabitých částic může být považována za plazma pouze tehdy, jsou-li rozměry reaktoru (nebo obecně plazma) větší než  $\lambda_D$ , produkt kmitočtu kolektivních hmitů  $\omega$  a průměrná rychlost srážek  $\tau$  je vyšší než jednota a počet nabitých druhů uvnitř oblasti „Debyeovy koule“ (koule s poloměrem  $\lambda_D$ ) je mnohem vyšší než jedna. Poslední požadavek je velmi důležitý, protože odráží schopnost plazmy účinně stínit aplikovaná vnější pole elektrického pole.<sup>72,75</sup>

### 5.1.3.2 Změna povrchu polymeru pomocí nízkoteplotního plazmatu

Tři hlavní faktory ovlivňují povrch polymeru: elektrony s energií v rozmezí od 4 do 10 eV, ultrafialové (UV) záření s vlnovými délkami pod 300 nm a těžké částice (atomy, molekuly, ionty). Jak uvádí Yasuda a kol.<sup>76</sup>, existují dva způsoby, jak může plazma modifikovat polymer: povrchový efekt (změna materiálu do 5 nm pod povrchem) a hluboký efekt (až  $5 \cdot 10^3$  nm). První je výsledkem bombardování ionty a elektrony; druhý je způsoben ultrafialovým zářením pocházejícím z deexcitace a rekombinace excitovaných atomů.<sup>71,76</sup> Polymery vystavené nízkoteplotnímu plazmatu obvykle vykazují ztrátu hmotnosti; rychlost procesu závisí na dodané energii, povaze plazmatického plynu (chemickém složení), tlaku plynu, struktuře polymeru a jeho krystalinitě. Morfologické změny povrchu jsou poměrně komplikované díky povrchovým reakcím, degradaci, větvení a zesíťování, rekrytalizaci a lokálnímu tavení.<sup>71,72</sup> Chemické povrchové reakce jsou vyvolány především UV zářením, excitovanými atomy a molekulami a radikály. Reakce mezi plazmatem a povrchem polymeru probíhají radikálovým mechanismem.<sup>71</sup>

Začlenění polárních funkčních skupin do povrchu polymeru má zásadní význam pro zvýšení smáčivosti a potiskovatelnosti. Kyslíkové skupiny (–CO, –COOH a –OH) mohou být implantovány pomocí plazmatu na bázi argonu, dusíkaté skupiny pomocí plazmatu na bázi dusíku do povrchových vrstev polyethylenu (PE), polypropylenu (PP), polystyrenu (PS), polyoxymethylenu (POM), acetátu celulózy (CA), polyakrylonitrilu (PAN) a mnoho dalších.

Plazma na bázi kyslíku a vzduchu vytváří velkou oxidaci povrchu. Množství nově vytvořených polárních skupin je tak vysoké, že mohou být občas detekovány i infračervenou spektroskopií.<sup>71</sup> Plocha ošetřená plazmatem se po určité době opět stává hydrofobní. Tento jev je známý jako stárnutí povrchu a je vysvětlován reorientací a migrací polárních skupin generovaných během expozice v plazmatu. Stárnutí je ovlivněno také teplotou, která může zvýšit pohyblivost povrchových vrstev polymeru a usnadnit přeorientování, a také vlhkostí. Kim a kol.<sup>77</sup> ve svém výzkumu usilovali o zpomalení stárnutí nízkohustotního polyethylenu (LDPE) ošetřeného plazmatem obsahujícím směs argonu a kyslíku. Jejich výsledky ukazují, že povrchové zesíťování indukované argonem stabilizuje pohyby povrchových vrstev a zpomaluje stárnutí.<sup>77</sup>

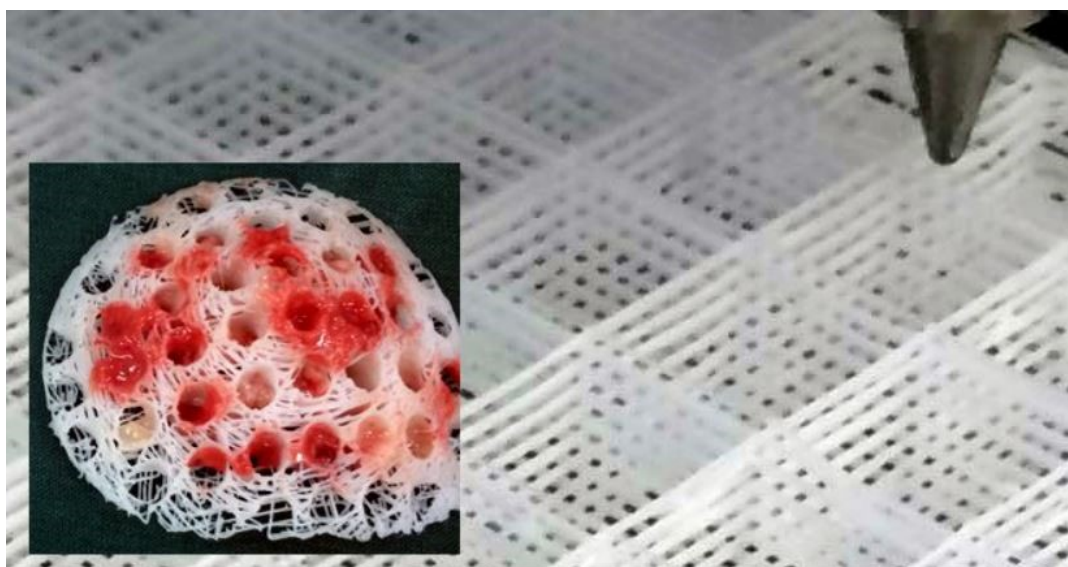


## 6 BIO 3D TISK, NANO VÝROBA A TKÁŇOVÉ INŽENÝRSTVÍ

### 6.1 Úvod k problematice bio 3D-tisku

V posledních letech je také v popředí tzv. bio 3D-tisk. Lékařská zařízení integrovaná s biomimetickými 3D mikroarchitekturami znamenají revoluci pro tradiční zdravotnický výzkum a průmysl.<sup>78</sup> Schopnost používat biologické náhrady k opravě nebo náhradě poškozených tkání vede k rozvoji tkáňového inženýrství (TE), oboru, který se rozšiřuje v oblasti biomedicínského inženýrství.<sup>79</sup>

Tzv. scaffold je nosná konstrukce pro pěstování buněk a tkání.<sup>80</sup> Model scaffoldů je navržen počítačem a následně je využita 3D tiskárna pro vytvoření vlastního scaffoldů, ale místo inkoustu je použit polymerní roztok nebo tavenina.<sup>80</sup> Typy buněk závislých na ukotvení se často spoléhají na použití dočasných trojrozměrných scaffoldů pro vedení buněčné proliferace.<sup>79</sup> Například pro optimální regeneraci kostní hmoty musí scaffold anatomicky zasahovat do daných kostních defektů a v ideálním případě má zvýšit růst a diferenciaci buněk.<sup>81</sup>

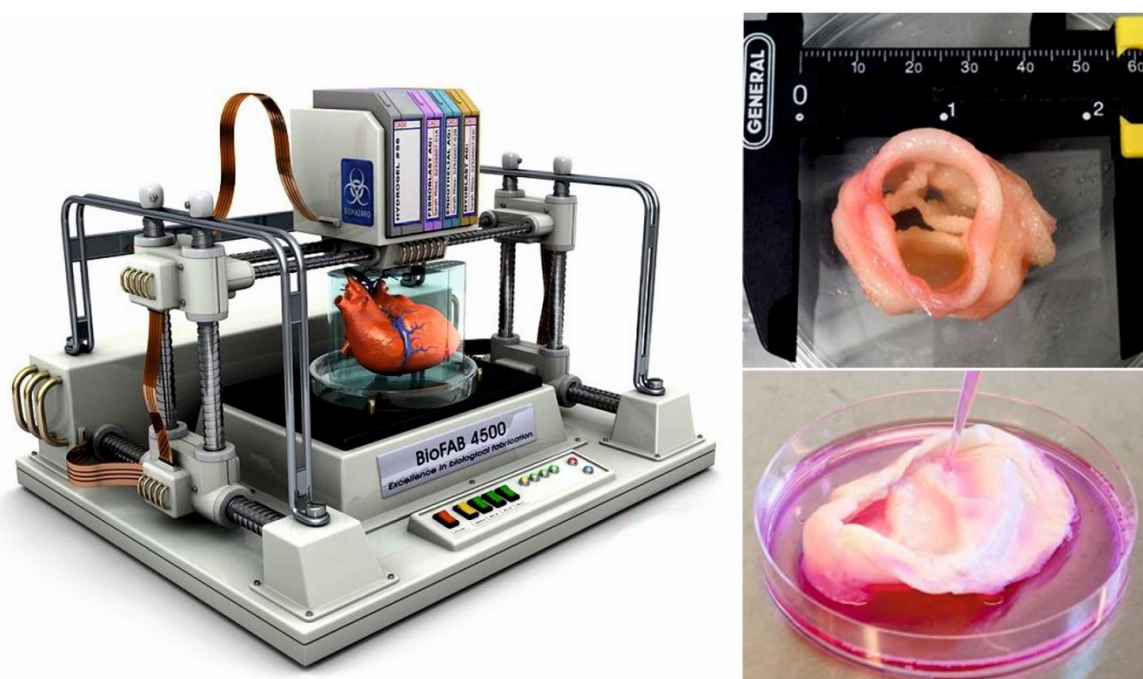


Obrázek 16. Příklad scaffoldu<sup>82</sup>

V současné době existuje nejméně pět technik využívaných pro výrobu scaffoldů založených na technice Rapid prototyping, a to Stereolitografie, SLS, Modelování laminovaných objektů, FDM a trojrozměrný tisk.<sup>80</sup> Mezi různými technologiemi 3D-tisku je v této oblasti oblíbená technologie 3DP, a to díky schopnosti tisknout přímo porézní scaffoldy s navrženým tvarem, chemickou strukturou a porézností.<sup>41</sup> Bose S. a kol.<sup>41</sup> se zabývali tzv. inženýrstvím kostní tkáně a objevili, že některé z těchto anorganických scaffoldů jsou

biologicky odbouratelné a v některých případech dokonce se specifickým růstovým faktorem. Zatímco konečný cíl 3D tisku funkčních lidských orgánů se zdá být dosud nedosažitelný vzhledem k omezením výrobního procesu materiálu, buněčných linek a 3D technologie, vývoj technik Bio-3D tisku se bude dále rozšiřovat s potenciálními aplikacemi v tkáňovém inženýrství a regenerační medicíně.<sup>78</sup>

Například centrum regenerativní medicíny na Univerzitě v anglickém Brightonu (Brighton Centre for Regenerative Medicine, BCRM) se zabývá interdisciplinárním výzkumem řízení buněčných procesů prostřednictvím pokročilých, biomimetických a bioresponsivních materiálů, které jsou vhodné pro minimálně invazivní chirurgii. Povrchy implantátů a nosičů (tzv. scaffoldů) jsou modifikovány makromolekulami, tenkými filmy a polymerními povlaky, které regulují buněčnou aktivitu na rozhraní mezi implantátem a okolním biologickým prostředím a podporují tak integraci implantátu do hostitelské tkáně.<sup>83</sup>



Obrázek 17. Příklad komerční bio-tiskárny a příklady „orgánů“ vyrobených pomocí bio 3D-tisku<sup>84</sup>

## 6.2 Výzkum a vývoj bio 3D-tisku

Příprava biomimetického mikroprostředí podobného přirozeným tkáňovým strukturám a kompozicím, vývoj trojrozměrných (3D) konstrukcí, které obsahují sofistikované vzorové komponenty extracelulárních matic (ECM), biomolekuly, a dokonce buňky, byla hlavním výzkumným zaměřením studií biologické problematiky a tkáňového inženýrství.<sup>85–87</sup>

Nicméně konvenční způsoby výroby používané pro výrobu 3D scaffoldů, jako je elektrospinning<sup>88</sup>, depozice vláken<sup>89</sup>, vymrazování<sup>90</sup>, zpěňování plynem<sup>91,92</sup>, vymývání částic<sup>93</sup> a rozpouštění porogenů<sup>94</sup>, neumožňují přesné ovládání vnitřních strukturních vlastností a topologie.<sup>78</sup>

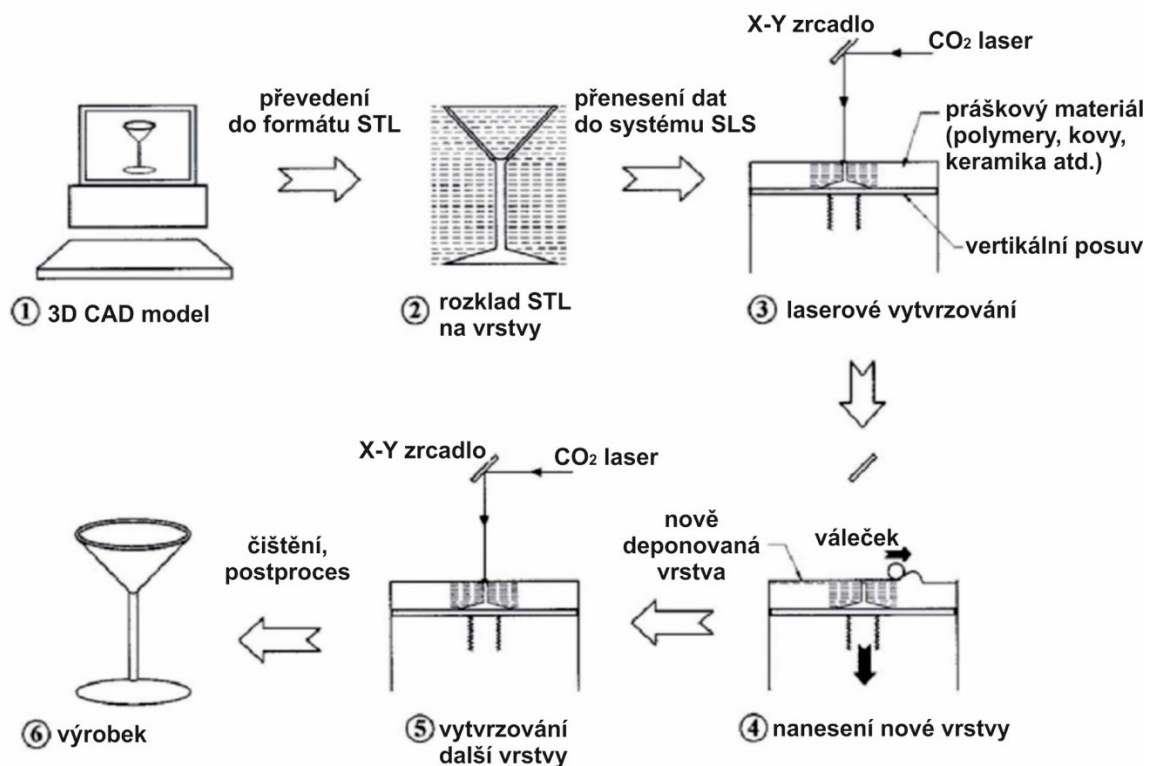
U mnoha současných 3D systémů scaffoldů je možno dosáhnout pouze hromadného začlenění biomolekul do matrice scaffoldu nebo exogenní dodání potřebných chemikálií, hormonů nebo růstových faktorů prostřednictvím kultivačního média.<sup>78,95</sup> Důležitým krokem k dosažení cíle vytvoření přesných prostorově uspořádaných 3D mikroenvironmentů v rámci jediného scaffoldu pro aplikace tkáňového inženýrství je vývoj nových technik výroby scaffoldu, pomocí kterých mohou být distribuované faktory prostředí integrovány jednoduše, avšak přesně a konzistentně.<sup>78</sup> 3D tisk a nanotechnologie, zejména laserové techniky přímého zápisu a stereolitografie, jsou schopny efektivně vyrábět komplexní 3D scaffold s přesnou mikroarchitekturou.<sup>96</sup> Takové výrobní systémy poskytují možnosti zabudování buněk uvnitř stěn scaffoldu při výrobě 3D konstrukcí nebo naočkování buněk na již vzorovaném scaffoldu. Jako slibný přístup k vývoji uživatelsky definovaných 3D mikroenvironmentů s komplexními biologickými komponenty se 3D tisk používal v řadě aplikací od scaffoldu pro tkáňové inženýrství až po studium migrace rakovinných buněk a kultivace neurálních kmenových buněk s potenciálem vzorování více buněčných typů v přesných 3D polohách.<sup>78</sup>

### 6.3 Techniky bio 3D-tisku a nanovýroby

S vývojem technologie CAD (z angličtiny *Computer-aided design*) neboli počítačem podporovaného projektování a automatizační techniky byly v posledních několika desetiletích vyvinuty systémy pro rychlou a automatickou aditivní výrobu komplikovaných trojrozměrných struktur. Obecně platí, že trojrozměrný (3D) model, který má být vyroben, je nejprve navržen pomocí softwaru CAD modelování, jako je například *Solidworks* nebo *AutoCAD*. Generovaná 3D CAD data jsou pak zpracována a rozložena na vrstvy stejné tloušťky (myšlené řezy, tzv. *slicing*), z nichž každá je průřez 3D modelu na určité úrovni. Tyto vrstvy jsou pak importovány do systému pro výrobu trojrozměrných objektů metodou „vrstva po vrstvě“. V tomto procesu výroby jsou vrstvy vertikálně kumulovány a spojeny tak, aby vytvořili fyzický objekt.<sup>78,97</sup>

### 6.3.1 Selective Laser Sintering (SLS)

Selective Laser Sintering (SLS) neboli tzv. selektivní laserové sintrování bylo vyvinuto a patentováno v polovině osmdesátých let 20. století.<sup>98</sup> Tato technika využívá laserový paprsek (obvykle CO<sub>2</sub> laser) ke spékání vrstev práškových materiálů opakovaným zpracováním vrstev a selektivně ohřívá a spéká každou práškovou vrstvu za účelem výroby trojrozměrných struktur. Objekty jsou tudíž formovány vrstvu po vrstvě z digitálních CAD dat. Během procesu působí volný nespečený prášek jako podpora pro finální objekt.<sup>78</sup>



Obrázek 18. Schématické uspořádání procesu SLS<sup>79</sup>

Tan, K. H. a kol.<sup>79</sup> se ve své studii zabývali parametry procesu výroby scaffoldu pomocí SLS. Jako materiál pro připravované scaffoldy použili několik biokompatibilních polymerů, jako je polyetheretherketon (PEEK), polyvinylalkohol (PVA), polykaprolakton (PCL), kyselina poly-L-mléčná (PLLA) a biokeramtický hydroxyapatit (HA). Duan, B. a kol.<sup>99</sup> pomocí SLS připravili scaffoldy z bionanokompozitu tvořené kombinací biologicky odbouratelných polymerů a osteokonduktivních anorganických pevných látek. Takové systémy mají mnohem lepší strukturální a funkční vlastnosti při regeneraci kostních tkání a mají velký potenciál v oblasti tkáňového inženýrství kostní tkáně. Kanczler, J. M. a kol.<sup>81</sup> a Bagratashvili, V. a kol.<sup>100</sup> použili novou techniku povrchového selektivního laserového

sintrování (SSLS) pro vývoj a výzkum navržených scaffoldů a vyhodnotili ji pro její biologickou kompatibilitu jako šablonu *in vitro* a *in vivo* pro životaschopnost, růst a osteogenezi lidských fetálních buněk femuru<sup>81</sup> a kostní dřevě<sup>100</sup>. Prokázali, že technologie SSLS umožňuje výrobu biokompatibilních a biologicky odbouratelných scaffoldů, které jsou navrženy tak, aby vyhovovaly jakémukoli poškození, a poskytovaly „šablonu“ pro buněčnou osteogenezi *in vitro* a *in vivo*. Liu, F. H. a kol.<sup>101</sup> ve své studii popsali výrobní proces modelu kostního scaffoldu, který byl z titanového biomedicínského materiálu (směs titanového prášku a silikagelu). Výhodou scaffoldu z kovu je především vysoká mechanická pevnost.

### 6.3.2 Laser-guided direct writing

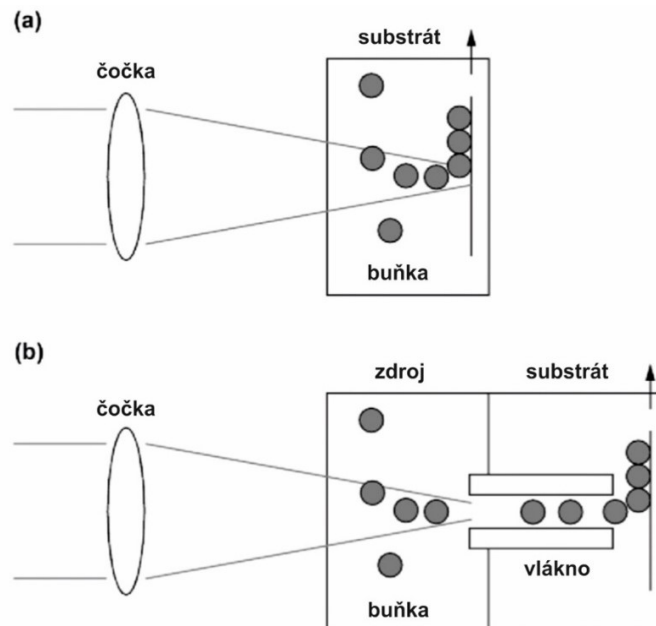
Metoda tzv. přímého laserového psaní (LGDW) byla poprvé použita pro tzv. mikrostrukturování embryonálních buněk míchy kuřete.<sup>102</sup> Hnací silou metody LGDW je rozptýlení laserového světla mikročásticemi nebo buňkami. Na rozdíl od čoček s vysokým clonovým číslem používaných v systémech s optickým zachycovačem, systém LGDW používá čočky s nízkým clonovým číslem, aby poskytl axiální sílu pohánění částic namísto jejich zachycení v blízkosti ohniska. Jakmile částice nebo buňka interaguje s laserem, je přitahována ke středu paprsku, kde je intenzita maximální a současně tlačena podél axiálního směru laserového paprsku radiačním tlakem. Přemísťovaný objekt je posléze uložen na cílové ploše, která je umístěna svisle v určitém bodě podél optické osy. Pohybem cílového povrchu vzhledem k paprsku laseru lze na cílový povrch kreslit trojrozměrné vzory částic.<sup>78</sup>

Nahmias, Y. a kol.<sup>103</sup> prokázali, že technika LGDW může modelovat několik typů buněk s rozlišením mikrometru na libovolných površích, a to včetně biologických gelů. Ve své studii konstatovali, že pomocí techniky LGDW lze modelovat endoteliální buňky lidské umbilikální žíly s přesností mikrometru, a to jak dvourozměrně, tak třírozměrně. Výsledky jejich dalších studií prokázaly, že technika LGDW je jednoznačně vhodná pro studium role tkáňové „architektury“ a mechanických vlastností na úrovni jednotlivých buněk a pro studium účinků interakcí buněk, které jsou základem procesů jako je morfogeneze jater, diference a angiogeneze.<sup>104</sup>

Narasimhan, Sriram V. a kol.<sup>105</sup> použili také tzv. mikro-vzorkování neboli systém pro vzorování buněk, a to za pomoci vývoje tzv. vícebodového laseru. Technika využívá slabě zaostřený laserový paprsek.<sup>106</sup> Takový systém umožňuje postupné vytváření „šablony“

zahrnující více typů buněk ve specifických relativních pozicích. Jako příklady vytvořili různé „šablony“ fibroblastů na krycích sklíčkách pokrytých kolagenem.

Rosenbalm, T. N. a kol.<sup>106</sup> tzv. micropatterning použili také, a to ke studiu interakce buněk v tzv. kokultuře, neboli kultivaci více typů buněk dohromady, aby mohli přesně „řídít“ pozici různých typů buněk. Jejich výzkum potvrdil, že tzv. laserové vedení je slibnou metodou pro manipulaci s buňkami.



Obrázek 19. Schéma systému LGDW<sup>102</sup>

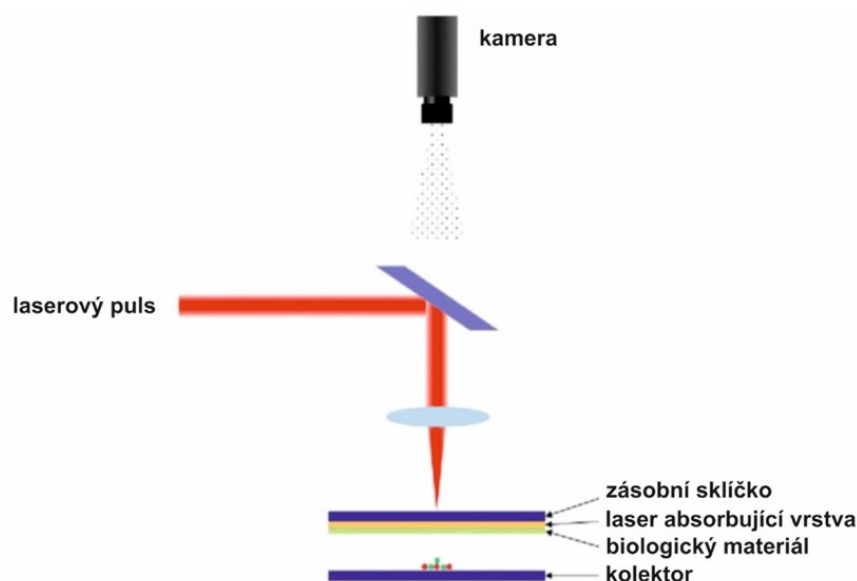
(a) laserové světlo se slabě zaostří na suspenzi částic, částice jsou poháněny světlem přes tekutinu a deponovány na cílovém substrátu, pohyb substrátu vzhledem k laserovému paprsku vede depozici řady částic; (b) světlo je nasměrováno do tekutého optického vlákna a částice jsou unášeny vláknem na cílový substrát, proces lze sledovat v reálném čase pomocí optické mikroskopie.<sup>78</sup>

### 6.3.3 Laser-induced forward transfer

Laserem indukovaný dopředný transfer (LIFT) využívá zejména vysoce výkonný pulsní laser a dvě koplanární sklíčka. Horní sklíčko, nazývané „donor-slide“, je potaženo kovovou vrstvou absorbující energii a vrstvou materiálu obsahující buňky. Laserové impulzy jsou zaměřeny na kovovou vrstvu přes skleněnou desku a lokálně tak odpařují laser absorbující vrstvu. Během procesu vytváří laserový puls vysoký tlak plynu, který přenáší základní směs buněk směrem k dolnímu sklíčku, označovanému jako „kolektorové sklíčko“. Biologické materiály obsahující buňky jsou obvykle kultivační médium nebo hydrogel, který poskytuje

vlhké prostředí, čímž zabraňuje dehydrataci buněk. Hydrogel má dodatečnou funkci v podobě udržení buněčné struktury v životaschopných podmínkách.<sup>78</sup>

Koch, L. a kol.<sup>107</sup> ve své studii využili buněčnou linii lidských kožních fibroblastů a keratinocytů a lidské mezenchymální kmenové buňky (MSC) díky jejich vysokému potenciálu při regeneraci lidské kůže a novým aplikačním možnostem terapie kmenovými buňkami. Jejich studie prokázala techniku LIFT jako vhodnou metodu pro počítačem řízené polohování různých typů buněk a jako slibný nástroj pro budoucí aplikace náhrad tkáně *ex vivo*. Gruene, M. a kol.<sup>108</sup> ve své studii použili počítačem řízenou bio-produkční techniku založenou na LIFT, kterou použili k produkci transplantátů z mezenchymálních kmenových buněk (MSC). Prokázali, že laserový tisk nezpůsobuje žádné poškození buněk, MSC transplantáty lze diferenciovat pro kost i chrupavku, metoda LIFT umožňuje „tisk“ buněk o dostatečné hustotě pro podporu chondrogenese, pomocí techniky LIFT mohou být vytvořeny autologní tkáňové transplantáty bez scaffoldu. Zjistili, že předdiferenciované mezenchymální kmenové buňky přežily celý tiskový proces a zachovaly si svou funkčnost. Vysoká přesnost a nedestruktivní povaha této metody lze aplikovat na studium komplexních biologických systémů. Imunologie je řízena komplexní sítí genetických a signalizačních cest podléhajících síti interagujících buněk. Důležitou roli v chování imunitního systému hraje pohyblivost buněk v síti spolu s genetickými produkty, s nimiž vzájemně interagují.<sup>109</sup> Lauzurica, S. a kol.<sup>109</sup> ve své studii využili techniku LIFT k posuzování těchto interakcí buněk *in vitro*. Ve své práci představili techniku bio tisku jednotlivých hematopoetických buněk a chemoatraktantových proteinů s vysokým prostorovým rozlišením.



Obrázek 20. Schéma technologie LIFT<sup>78</sup>

### 6.3.4 Matrix-assisted pulsed laser evaporation direct writing

MAPLE DW je podobný systému LIFT. Namísto použití skleněného sklíčka pro „donor-slide“ používá MAPLE DW opticky průhledný křemenný podklad nazvaný „páska“.<sup>78</sup> Páska je potažena biologickými materiály, jako je Matrigel®<sup>110–112</sup> nebo biokeramika.<sup>113,114</sup> Biomateriály s buňkami jsou označovány jako matrice. Substrát podobný kolektorovému sklíčku může, anebo nemusí být pokryt hydrogelem. Laser je zaměřen na rozhraní křemenného nosiče a laser absorbující vrstvy obsahující buňky. Laserový paprsek způsobuje odpařování části vrstvy biomateriálu, která lokálně vytváří plynové bubliny. Tyto plynové bubliny mají za následek uvolnění a pohon matrice naočkované buňkami k přijímacímu substrátu.<sup>78</sup>

Ringeisen, B. R. a kol.<sup>115</sup> se zabývali laserovým bio-tiskem myších embryonálních karcinomových buněk pluripotentního typu a ověřením životaschopnosti a funkčnosti buněk. Zjistili, že takto „vytištěné“ buňky na modelovém scaffoldu tkáně, kterým byla vrstva hydrogelu, s 95 % úspěšností přežily tento proces a zůstaly životaschopné. Patz, T. M. a kol.<sup>116</sup> použili kombinaci metody MAPLE DW a neuronových buněk B35. Prokázali možnost dvourozměrného a třírozměrného přenosu neuronových buněk B35 na i dovnitř substrátu Matrigel® za využití techniky MAPLE DW. Výsledky jejich studie podaly důkaz, že takto „přenesené“ buňky B35 vytvořily spojení axonů a do 72 hodin po přenosu zformovaly trojrozměrnou síť. Proto tento typ techniky lze použít pro utváření vrstevnatých, heterogenních a trojrozměrných scaffoldů osazených buňkami pro aplikování při „opravách“ periferních nervů. Doraiswamy, A. a kol.<sup>117</sup> zkoumali zpracování materiálů ze zirkonia a hydroxyapatitu pomocí techniky MAPLE DW, které mohou najít uplatnění ve zdravotnictví díky svým inertním a bioaktivním vlastnostem na rozhraní implantát-tkáně. Prokázali, že v případě kompozitního scaffoldu z bio-keramického materiálu buňky podobné osteoblastům zůstaly životaschopné a zachovaly si schopnost proliferace. Takovéto buněčné scaffoldy jsou vhodné na využití pro lékařské a zubní aplikace.

### 6.3.5 Biological laser printing (BioLP)

Barron a kol.<sup>118</sup> vyvinuli Biologický laserový tisk (BioLP). Stejně jako dva předchozí procesy (LIFT a MAPLE DW) využívá BioLP opticky transparentní křemen místo skleněného sklíčka používaného v metodě LIFT. Kov nebo oxid kovu je nanesen na křemenný nosič jako laser absorbující vrstva. Vrstva biomateriálu s buňkami, která je ve formě prášku, kapaliny nebo gelu, je potažena na laser absorbující vrstvu. Energie



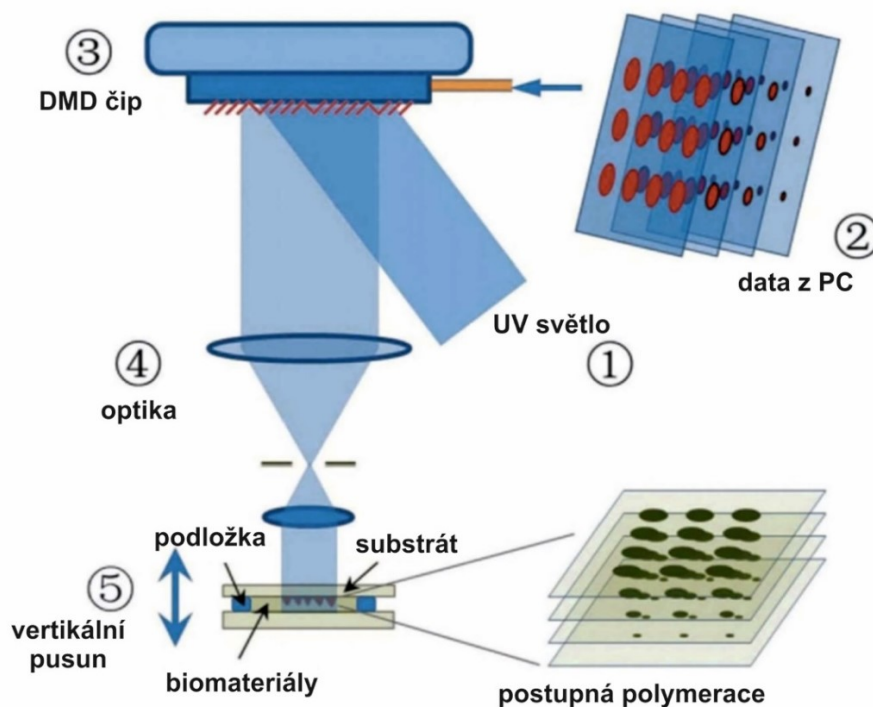
dopadajícího laseru je fokusována a absorbována na rozhraní křemenného nosiče a laser absorbující vrstvy. Teplo vytvářené laserovou absorpční vrstvou způsobuje odpařování vody v biomateriálu. Biomateriál se poté přenáší z povrchu pásu na povrch přijímacího substrátu. Tato technika tedy snižuje potenciální poškození biologických materiálů.<sup>78</sup>

Technika BioLP může být použita k rychlému a přesnému „tisku“ nejen jednotlivých buněk, ale také trojrozměrných „šablon“. Barron, J. A. a kol.<sup>119</sup> ve své studii použili lidské osteosarkomové buňky, které uložili do matrice z biopolymeru. Prokázali, že i po 24 hodinách inkubace zůstaly tyto buňky životaschopné a množily se. V dalším kroku přenesli více vrstev lidských osteosarkomových buněk do substrátu Matrigelu™, čímž vznikla trojrozměrná buněčná konstrukce. Na základě provedených testů konstatovali, že po tom, co byly buňky „vytištěny“ do biopolymeru, více než 95 % z nich bylo životaschopných. Možnost selektivního „tisku“ jednotlivých buněk má velký přínos pro výzkum genomiky a proteomiky. Pirlo, R. K. a kol.<sup>120</sup> pomocí techniky BioLP™ vyrobili tzv. bio-papír jako stohovatelný substrát pro „tisk“ sítí lidských endoteliálních buněk pupečnickové žíly (HUVEC). K tomuto účelu vytvořili bio-papíry o rozměrech 1 cm x 1 cm x 300 μm, které použili jako přenosný a stohovatelný substrát pro buňky. Do těchto scaffoldů byl naplněn kolagen typu I nebo Matrigel™. Výsledky jejich testů prokázaly buněčnou infiltraci a přežití buněk v těchto složených vícevrstvých konstrukcích. To, že je BioLP™ jedinečná technika, která dokáže „tisknout“ dvojrozměrné a trojrozměrné modely živých savčích buněk s vysokým rozlišením a životností více než 95 %, dokazuje i studie Othon, Ch. M. a kol.<sup>121</sup> Tým zmíněných vědců tyto výsledky rozšířil na primární kultivované čichové buňky (OEC) z dospělých potkanů. Techniku BioLP použili k vytvoření několika 8 milimetrových linií OEC ve vícevrstevném hydrogelovém scaffoldu. Na základě výsledků své studie konstatovali, že takové buněčné scaffoldy mohou sloužit ke studiu „opravy“ míchy, neboť jimi vytvořené jednobuněčné „šablony“ se nacházejí v rozměrech vhodných pro růst neuritů.

### 6.3.6 Stereolitografické techniky

Hull v roce 1986 vyvinul techniku Stereolitografie (STL), která je popsána v jeho patentu: „Přístroje pro výrobu trojrozměrných předmětů stereolitografií“.<sup>122</sup> Princip STL spočívá v produkování jednotlivých vrstev za současného vytvrzování fotoreaktivní pryskyřici UV laserem, nebo jiným podobným zdrojem energie. Kromě jednobodového laseru může být u stereolitografie použit i tzv. DMD (Digital Micromirror Device). DMD je řada

až několika milionů mikroskopických zrcadel, které lze ovládat nezávisle na stavu zapnutí a vypnutí.<sup>78,123</sup> V tomto případě se struktura nevytváří skenováním bodu po bodu, ale způsobem vrstvení a vytvrzením celé vrstvy současně. Po vytvoření jedné vrstvy se plošina sníží nebo zvýší pro vytvoření další vrstvy. Tloušťka každé vrstvy je řízena vzdáleností mezi povrchem plošiny a povrchem tekuté pryskyřice. Na základě zmíněného základního konceptu vyvinuli Zhang a kol.<sup>124</sup> systém dynamické optické projekční stereolitografie (DOPsL) pro rychlou výrobu komplexních 3D extracelulárních scaffoldů. Systém DOPsL nabízí vynikající rychlost zpracování srovnatelnou s jinými technikami nanovýroby. Z tohoto důvodu je technika DOPsL vhodnější pro výrobu velkých struktur s detaily o rozlišení v řádech submikronů.<sup>124</sup> Pro svou snadnost, vysokou rychlost výroby a relativně vysoké rozlišení se tak DOPsL stala atraktivní možností výroby komplexních 3D scaffoldů pro *in vitro* tkáňové inženýrství a také funkčních buněčných konstrukcí pro implantaci *in vivo*.<sup>78,124</sup>



Obrázek 21. Schéma technologie DOPsL<sup>78</sup>

## 6.4 Materiály pro bio 3D tisk – současný stav

Biomateriály a scaffoldy hrají zásadní roli v tkáňovém inženýrství tím, že jsou schopny vést nový růst tkáně *in vivo* a *in vitro*. Tkáňové inženýrství se například zabývá možnostmi výroby struktury umělé chrupavky a kostní tkáně. Poptávka po muskuloskeletálních tkáních je obzvláště vysoká, a to zejména v případě defektů a zranění chrupavek a kostí. I když jsou obecně muskuloskeletální tkáně považovány za biologicky jednoduché struktury, skládají se z vysoce organizovaných trojrozměrných sítí buněk a matrice, což vede k tkáňovým strukturám s pozoruhodnými mechanickými vlastnostmi.<sup>87</sup> Biomimetické scaffoldy, které interagují a podporují diferenciaci osteoblastů a proces osteogeneze, nabízejí slibné možnosti výroby kostní tkáně a vyřešení tohoto závažného problému medicíny.<sup>91</sup> Podle Chia, H. N. a kol.<sup>125</sup> je 3D tisk slibnou metodou pro produkci složitých biomedicínských přístrojů pomocí počítačového návrhu využívajících anatomická data specifická pro pacienty.

Od svého počátečního použití, jako předoperačních vizualizačních modelů a forem nástrojů, se 3D tisk pomalu vyvinul, aby vytvořil jedinečné zařízení, implantáty, scaffoldy pro tkáňové inženýrství, diagnostické platformy a systémy pro transport léků. Vznikl zájem kombinovat kmenové buňky s vlastním 3D scaffoldem pro personalizovanou regenerační medicínu. Předtím, než se 3D tisk může běžně používat k regeneraci komplexních tkání (např. kosti, chrupavky, svaly, cévy, nervy v kranio-maxilofaciálním komplexu) a komplexních orgánů se složitou 3D mikroarchitekturou (např. játra, lymfatické orgány), je třeba řešit několik technologických omezení.<sup>125,126</sup>

Zatímco adaptace stávajících chirurgických materiálů splnila potřeby a požadavky v daném oboru, nové aplikace vyžadují lepší kontrolu objemových vlastností, jako je degradace materiálu a povrchové vlastnosti, které ovlivňují interakci buněk. Pokroky v molekulární biologii vedou k implementaci nových biologických částí do materiálů a vyvstává soubor zásad založených na kvantitativní analýze klíčových buněčných procesů, které se podílejí na regeneraci. Současně se objevují nové metody zpracování materiálů, které umožňují výrobu těchto křehkých materiálů ve vhodných zařízeních.<sup>85</sup> Vlastnosti takového materiálu závisí i na biologických faktorech. Například buněčná struktura kolagen-glykosaminoglykanových (CG) scaffoldů používaných v tkáňovém inženýrství musí být navržena tak, aby splňovala řadu omezení s ohledem na biologickou kompatibilitu, rozložitelnost, velikost pórů, strukturu pórů a specifický povrch.<sup>90</sup>

Orban, J. M. a kol.<sup>86</sup> se zabývali několika základními možnostmi, které mohou být nezbytné pro konstrukci kosti, včetně prostorového uspořádání signalizačních faktorů, buněk a biomimetických extracelulárních matric. Kromě toho zdůraznili význam zdravotního stavu pacienta, který může dostávat tkáňově upravenou kompozici, neboť struktura kostní tkáně je ovlivněna klinickým stavem pacienta. A proto je potřeba zohlednit různé faktory pacienta, jako je věk, pohlaví, zdravotní stav a druh anatomického implantátu, neboť různé části těla mají různé funkční zatížení a vaskularitu. Zong, X. a kol.<sup>88</sup> zkoumali strukturální a funkční účinky matric s jemnými (submikronovými) strukturami na růst srdečních myocytů. Tzv. electrospinning neboli elektrostatické zvlákňování použili pro výrobu biologicky rozložitelných scaffoldů na bázi polylaktidu a polyglykolidu (PLGA) pro aplikace v oblasti srdečních tkání. Elektrospinning lze tedy považovat za všestrannou výrobní techniku pro návrh biomateriálů s potenciálem reorganizovatelné architektury pro růst buněk a tkání. Jedním z hlavních problémů v tkáňovém inženýrství je výroba scaffoldů, jež mají napodobit biomechanické vlastnosti tkání, které mají být regenerovány. Je zřejmé, že tyto vlastnosti také ovlivňují mechanické vlastnosti.<sup>89</sup> Proto Moroni, L. a kol.<sup>89</sup> ve své studii zvažovali vliv různých struktur na dynamické mechanické vlastnosti 3D scaffoldů. Konvenční způsoby výroby takových scaffoldů ale nejsou dostačující k tomu, aby mohla být kontrolována struktura scaffoldu a aby bylo možné modifikovat mechanické vlastnosti. V rámci vývoje nových postupů při výrobě scaffoldů proto použili 3D depozici vláken (3DF). Tato technika má velký potenciál pro aplikace v tkáňovém inženýrství především díky přesnosti a reprodukovatelnosti vyrobených scaffoldů různých tvarů a velikostí. Pomocí tzv. dynamické mechanické analýzy (DMA) odhalili, že s rostoucí pórovitostí klesají elastické vlastnosti. Pro srovnání testovali hovězí chrupavku, jejíž vlastnosti se podobaly vlastnostem konstruovaných scaffoldů. Na základě získaných výsledků konstatovali, že viskoelastické vlastnosti 3DF scaffoldů by mohly být modelovány tak, aby splňovaly mechanické požadavky na dané aplikace. Své uplatnění v bio-3D tisku nachází i technologie FDM. Nyberg, E. a kol.<sup>127</sup> použili technologii FDM 3D tisku pro výrobu porézního scaffoldu z poly- $\beta$ -kaprolaktonu (PCL) a funkcionalizovali jej s minerálními přísadami, které byly široce používány komerčně i klinicky.

Vývoj tkání a orgánů je obvykle řízen působením řady růstových faktorů. Snaha regenerovat tkáň (např. kosti, krevní cévy) se obvykle spoléhá na dodávání jednotlivých faktorů, což částečně vysvětluje omezené klinické využití mnoha současných metod. Jedním z omezení při dodávání vhodných kombinací faktorů je nedostatek nosičů, které umožňují

lokalizované a kontrolované dodání více než jednoho faktoru.<sup>95</sup> Richardson, T. P. a kol.<sup>95</sup> publikovali nový polymerní systém, který umožňuje specifické tkáňové podání dvou nebo více růstových faktorů s kontrolovanou dávkou a rychlostí podání, a zkoumali jej v rámci terapeutické angiogeneze. Terapeutická angiogeneze je novou nadějnou metodou léčby terminálního stádia choroby periferních tepen. Její úspěšnost je ve smyslu záchrany končetiny před amputací a zlepšení kvality života u nemocných bez jiné terapeutické možnosti více než 60 procent. Terapeutická angiogeneze využívá plasticitu kmenových buněk k podpoře neovaskularizace v ischemické končetině. Implantované kmenové buňky potencují tento proces jak dodáním angiogenních faktorů, tak přímou inkorporací do cévní stěny a diferenciací v endotelie. V současné době jsou diskutovaná teoretická a praktická hlediska terapeutické angiogeneze.<sup>128</sup> Wang, M. O. a kol.<sup>129</sup> se věnovali hodnocení a charakterizaci 3D konstrukcí. Jako materiál použili polypropylenfumarát, který měl funkci „scaffoldu“ pro vaskularizované tkáně. Vyhodnocovali biokompatibilitu a mechanické vlastnosti a modelovali proces angiogeneze. Snahou vědců je také vytvořit ideální kultivační systém. Johnstone, B. a kol.<sup>130</sup> vyvinuli kultivační systém, který usnadňuje chondrogenní diferenciaci mezenchymálních progenitorových buněk pocházejících z králičí kostní dřevě. Důkazy pro in vitro chondrogenní diferenciaci dospělých savčích progenitorových buněk pocházejících z kostní dřevě poskytly histologické, imunohistologické a molekulární výsledky.

Svůj význam v bio-3D tisku mají i hydrogely. Mnoho výzkumů je zaměřeno na diferenciaci lidských mesenchymálních kmenových buněk v jednovrstvé buněčné kultuře, ale už je méně známý jejich potenciál diferenciace v trojrozměrných podmínkách.<sup>131</sup> Nuttelman, C. R. a kol.<sup>131</sup> se zabývali osteogenní diferenciací lidských mezenchymálních kmenových buněk enkapsulovaných v PEG hydrogelu. Vědecký tým Shi, P. a kol.<sup>132</sup> se zabývali životaschopností a morfologií buněk v alginátových scaffoldech vyrobených pomocí bio-3D tisku. Ve svém výzkumu použili myší fibroblastové buňky, které naočkovali na alginátové hydrogely a které byly vytisknuty za pomoci roztoku alginátu, aby se vytvořily skelety. Zkoumali elastické a viskózní vlastnosti alginátových roztoků, jejich vnitřní strukturu a tuhost, interakci buněk a alginátu, životaschopnost buněk, migraci a morfologii. Pomocí 3D tisku připravili tři typy scaffoldů s výraznou tuhostí a naočkované buňky vykazovaly robustní životaschopnost buď na povrchu alginátového hydrogelu, nebo v konstrukcích vytištěných za pomoci 3D-tisku. Kang, L. H. a kol.<sup>133</sup> se zabývali optimalizací životaschopnosti a foto-enkapsulací buněk srdeční chlopně v kompozitních

hydrogelech tisknutelných pomocí technologie 3D tisku. Úspěšnost takového 3D tisku je závislá na více proměnných. Proto testovali proměnné spojené s „photocrossling“ hydrogely (typ a koncentrace fotoiniciátoru a intenzita světla) a jejich účinky na enkapsulované buňky srdeční chlopně ve směsi metakrylátové želatiny, polyethylenglykoldiakrylátu a alginátu, která by sloužila jako náplň pro bio 3D tiskárnu. Jejich studie prokázala, že lidské mezenchymální kmenové buňky (HADMSC) přežily vyšší koncentrace fotoiniciátoru za podmínek enkapsulací lépe než intersticiální buňky chlopně (HAVIC) a buňky hladkého svalstva aorty (HASSMC). Prokázali, že nejvyšší dosažené životaschopnosti byly 95 % pro HASSMC, 93 % pro HAVIC a 93 % pro HADMSC. Tyto výsledky určují kombinace parametrů, které optimalizují životaschopnost více typů buněk během 3D tisku.

Kromě již zmíněných materiálů, nachází uplatnění v tkáňovém inženýrství i přírodní materiály jako je hedvábí<sup>92</sup> nebo kompozitní materiály.<sup>93</sup> Nazarov, R. a kol.<sup>92</sup> prokázali, že 3D matrice na bázi hedvábí mohou být použity pro biomateriálové aplikace. Roy, T. D. a kol.<sup>93</sup> studovali interpretaci náhradních kostních materiálů. Použili biodegradabilní kompozit skládající se z kopolymeru kyseliny polyléčné (PLA) a kyseliny polyglykolové (PLGA) s 20 % (m/m) příměsí B-trikalciumfosfátu ( $\beta$ -TCP). Lin, A. S. a kol.<sup>94</sup> ve své studii využili biologicky rozložitelné porézní polymerní scaffoldy, jež jsou široce používány v tkáňovém inženýrství, aby poskytly strukturní „šablonu“ pro očkování buněk a tvorbu extracelulární matrice.

I říše živočichů se stala inspirací pro vědce a jejich vynálezy. Han, D. a kol.<sup>134</sup> se inspirovali hydraulickým mechanismem pavoučích nohou a navrhli nový hybridní prst vyrobený pomocí technologie 3D tisku hybridního materiálu. Martini, R a kol.<sup>135</sup> se zabývali 3D-tiskem materiálů inspirovaných přírodní kůží živočichů, jako jsou ryby a aligátoři, která přitahuje stále větší pozornost díky své jedinečné kombinaci tvrdosti, pružnosti a nízké hmotnosti, a tuto inspiraci z přírody se snažili aplikovat do návrhu a výroby materiálů pro osobní ochranné systémy. Singh, M. a kol.<sup>126</sup> dokázali, že 3D tisk lze použít k výrobě biologicky inspirovaných konformních mikrofluidních zařízení, které jsou přímo propojeny s povrchem celých orgánů. Tavakoli, M. a kol.<sup>136</sup> představili návrh a vývoj nového biokompatibilního prstu, který se skládá z 3D vytištěného tuhého endoskeletu pokrytého měkkou hmotou. Strukturní biologické materiály, jako jsou kosti, zuby nebo schránky měkkýšů, oplývají pozoruhodnou a sofistikovanou souhrnou strukturou a tenkých rozhraní. Tento koncept vedl k dimenzování materiálů, které obsahují tenké linie se složitými geometriemi. Síťované materiály jsou v přírodě prominentní a donedávna sloužily jako bio-

inspirace pro tvrzené keramiky a skla. Velký problém ale vždy inženýrům činí spoje a švy. Spoje a švy totiž mohou způsobit velké deformace, změnu houževnatosti a tlumení v případě všech křehkých systémů a materiálů. Malik, I. A. a kol.<sup>137</sup> se také inspirovali těmito přírodními materiály a strukturami a ve své studii zkoumali návrh a optimalizaci spojů s geometrií podobné skládačce „puzzle“. Zaměřovali se na nelineární trakční chování vyvolané třením. Aby ověřili přesnost modelů a návrhu optimalizace, používali 3D tisk a mechanické zkoušky. Slesarenko, V. a kol.<sup>138</sup> se rovněž inspirovali přírodními biologickými materiály a zjistili, že vynikající mechanické vlastnosti biologických materiálů pocházejí z jejich komplexních hierarchických mikrostruktur, které kombinují tuhé a měkké složky v různých poměrech. Využívali trojrozměrný multi-materiálový tisk k výrobě bio-kompozitů a studovali jejich mechanické vlastnosti a mechanismy selhání. Zjistili, že připravená umělá struktura vykazovala vysokou houževnatost pouze při zatížení aplikovaném pod relativně malým úhlem ke směru stohování tablet, zatímco u vyšších úhlů kompozity katastrofálně selhávaly. Důležitost struktury dokázali Mirkhalaf, M. a kol.<sup>139</sup> Zjistili, že je velmi důležitá „zámková architektura“. Mechanismy, jako geometrické vzájemné „zámkování“, jsou důležité v konstrukčních materiálech, jako jsou lepidla, kovy nebo kompozity, ale také v přírodních materiálech, jako jsou například diatomy nebo skořápky měkkýšů. Ve své studii vyvinuli nový typ „šitého“ materiálu založeného na morfologii podobného skládačce, která může být programována tak, aby se geometricky zablokovala do dvou odlišných stabilních poloh. Výsledné materiály tak byly až desetkrát tvrdší než polymer, z něhož byly vyráběny, a nabízejí atraktivní vlastnosti, jako jsou velké a reverzibilní deformace, tolerance poškození, a navíc nabízející slibné perspektivy při vývoji nových architektonických materiálů.

Dle nejnovějších vědeckých poznatků v roce 2018 má bio-3D tisk nahradit dosavadní možnosti transplantace kůže. Vědecký tým z Univerzity v Torontu vynalezl mobilní zařízení, které vypadá a funguje jako korekční roller. Tento systém na hojení hlubokých ran je schopen pomocí 3D tisku vytvářet tkáň, kterou zacelí ránu. Tato inovativní technologie by se měla stát alternativou ke konvenční transplantaci kůže. Pojem hluboká rána znamená těžké poškození všech tří vrstev kůže. Výhodou tohoto zařízení je, že je velmi lehké, malé a nenáročné na manipulaci a že využívá k tisku tkáň biomateriály na bázi bílkovin včetně kolagenu nebo fibrinu, který pomáhá procesu hojení. Podle nejnovějších informací vědci provedli testy prozatím na kůži prasete a klinické testy na lidech budou následovat později.<sup>140</sup>

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**



## 7 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### 7.1 Chemikálie

Filamenty PLA (Plasty Mladeč, Ultimaker) a ABS (Plasty Mladeč, Ultimaker) byly použity jako struny do 3D tiskáren pro výrobu vzorků. Ethanol (Sigma-Aldrich, 96%) byl použit pro čištění připravených vzorků z materiálu PLA a ABS. Deionizovaná voda byla použita jako kapalina pro stanovení experimentálních hodnot kontaktního úhlu smáčení. Všechny chemikálie byly použity bez dalšího čištění. Pro omývání vzorků byla použita deionizovaná voda připravená pomocí přístroje Direct-Q® 3 UV Water Purification System (Merck).

### 7.2 Použité přístroje

Vzorky z PLA a ABS byly vyrobeny pomocí 3D tiskárny Original Prusa i3 MK3 (Prusa Research) s průměrem trysky 0,4 mm pro filamenty materiálu o průměru 1,75 mm, a pomocí 3D tiskárny Ultimaker 2+ (Ultimaker) s průměrem trysky 0,4 mm pro filamenty materiálu o průměru 2,85 mm. Vzorky určené k povrchové úpravě byly plazmovány pomocí přístroje Diener Femto (Diener electronic; 13,56 MHz). Hodnoty kontaktních úhlů smáčení a hodnoty povrchové energie byly zaznamenány pomocí optického goniometru Krüss Drop Shape Analyzer DSA30 (Krüss GmbH) a vyhodnoceny pomocí programu ADVANCE Software (Krüss GmbH). Struktura a topografie povrchu (3D rekonstrukce drsnosti) vyrobených vzorků použitých materiálů byla charakterizována pomocí skenovacího elektronového mikroskopu Phenom Pro (Phenom-World). Pro charakterizaci drsnosti povrchu byl použit přístroj Diavite DH-8 (Diavite AG) a k vyhodnocení program Diavite Soft Basic 7 (Diavite AG). Topografie povrchu byla také sledována pomocí optického povrchového profilometru NewView™ 9000 (Zygo), pomocí kterého byly zaznamenány snímky 3D topografie povrchu a vyhodnoceny hybridní parametry drsnosti  $S_{dr}$ .

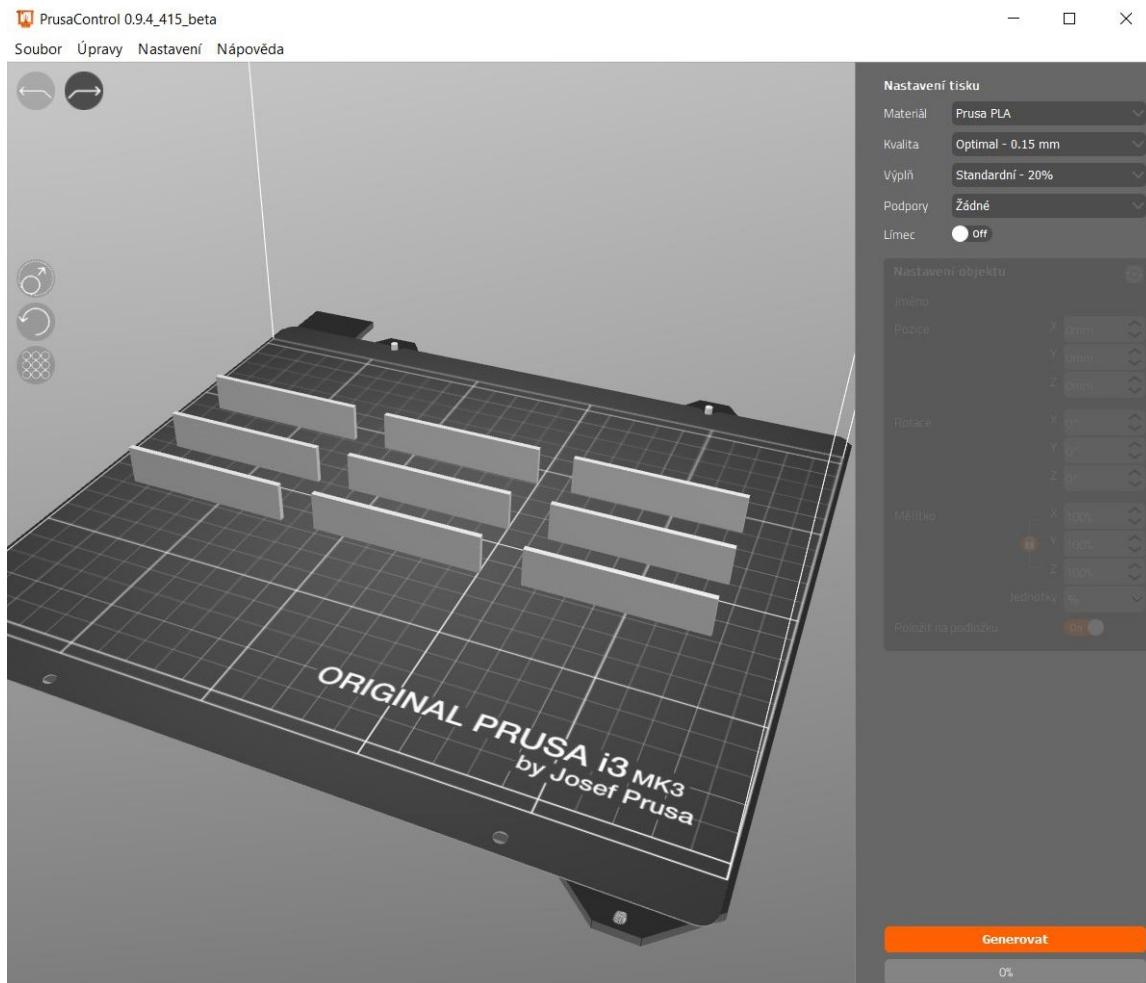
## 7.3 Použité metody

### 7.3.1 Příprava 3D modelu a výroba vzorků pomocí 3D tiskárny

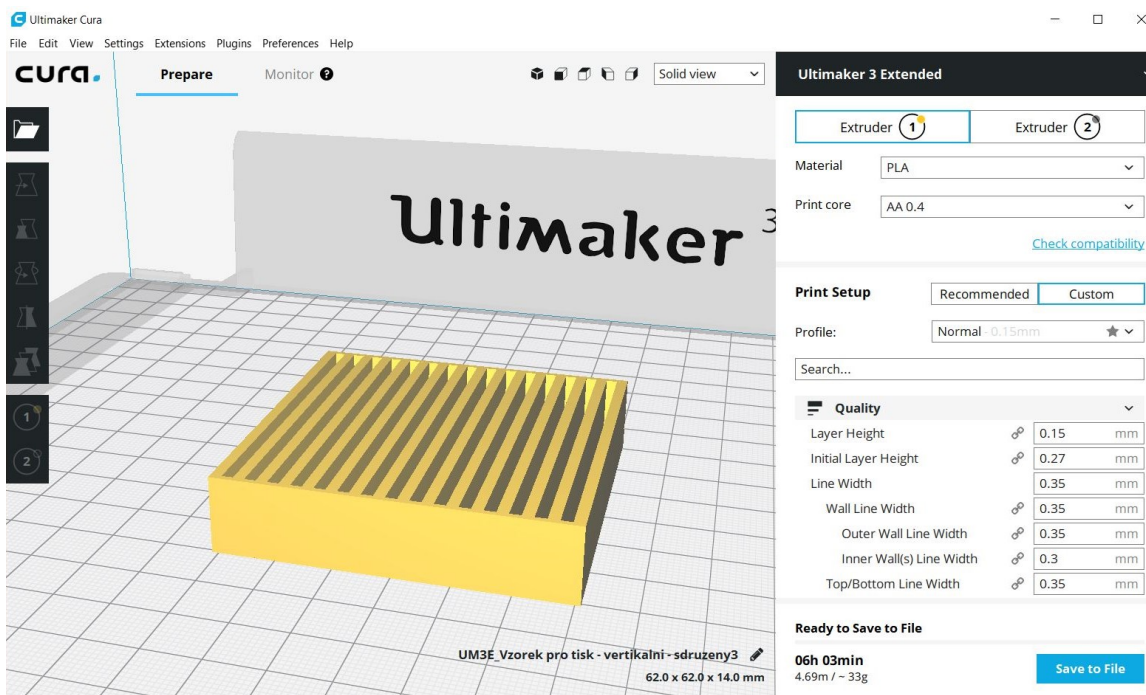
Pro přípravu vzorků bylo nutné nejdříve vytvořit 3D model, ze kterého tiskárna „zjistí“, co má vytisknout.<sup>12</sup> Tento model byl uložen do souboru ve formátu STL, který jednoduše definoval prostorové body a propojil tyto body do série trojúhelníků, které se v souhrnu nazývají „sít“ (anglicky *mesh*) neboli „síťový objekt“. Tento soubor je označován jako „plášťový model“ (*shell model*) a lze si jej představit jako tenkou slupku s dutým vnitřkem.<sup>12</sup> Tyto digitální soubory poté byly odeslány do softwarového nástroje zvaného „nářezový program“ (*slicer*), který digitální soubor nakrájel na mnoho jemných plátků, ze kterých 3D tiskárna zjistila, kde má při tisku 3D objektu definovat a umístit každou vrstvu.<sup>12</sup>

Byly navrženy dva typy tisku, a to horizontální tisk vzorků a vertikální tisk vzorků. Pro každý typ tisku byl navržen odlišný typ modelu. Vzorky, které měly být vyrobeny pomocí 3D tiskárny Original Prusa i3 MK3, byly navrhovány v programu Rhinoceros 4.0 a poté připraveny pro tisk ve sliceru Prusa Slic3r MK3. Procesní parametry byly: kvalita 0,15 mm, výplň 20 %, podpory (v případě vertikálního typu tisku) a bez podpor (v případě horizontálního typu tisku). Vzorky, které měly být vyrobeny pomocí 3D tiskárny Ultimaker 2+, byly navrhovány v programu Rhinoceros 4.0 a poté připraveny pro tisk ve sliceru Cura 3.2.1. Procesní parametry byly: kvalita 0,15 mm, výplň 20 %, podpory (v případě vertikálního typu tisku) a bez podpor (v případě horizontálního typu tisku). Rozměr každého vzorku navržené destičky byl 60 x 14 x 2 mm.

Pomocí vytvořených modelů vzorků byly vyrobeny série vzorků z materiálu PLA a ABS pomocí 3D tiskárny Original Prusa i3 MK3 (Prusa Research). Dále byly také pro získání srovnání kvality a rozlišení tisku a vyrobených vzorků vyrobeny vzorky z materiálů PLA a ABS i za pomoci 3D tiskárny Ultimaker 2+ (Ultimaker). Teplota extrudéru u materiálu PLA byla nastavena na hodnotu 215 °C a teplota vyhřívání podložky byla 60 °C, a to pro oba typy použitých 3D tiskáren. Pro materiál ABS byla teplota extrudéru nastavena na hodnotu 255 °C a teplota vyhřívání podložky byla 100 °C, a to pro oba typy použitých 3D tiskáren.



Obrázek 22. Prostředí přípravy modelu vzorků pro 3D tiskárnu Original Prusa i3 MK3



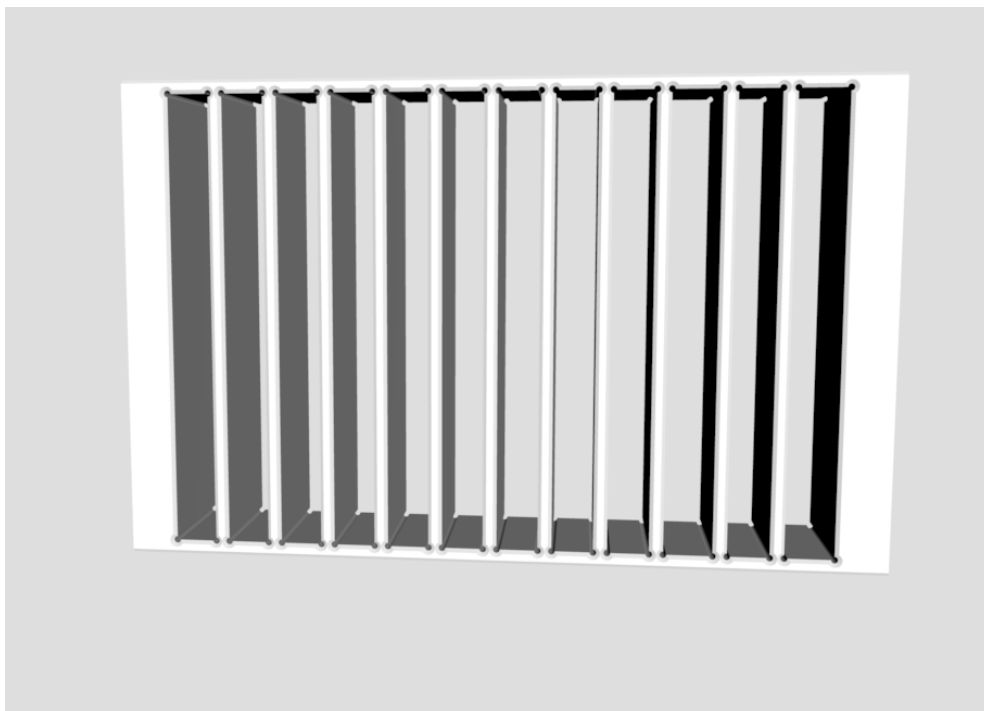
Obrázek 23. Prostředí přípravy modelu vzorku pro 3D tiskárnu Ultimaker 2+



Obrázek 24. 3D model vzorku pro horizontální typ tisku



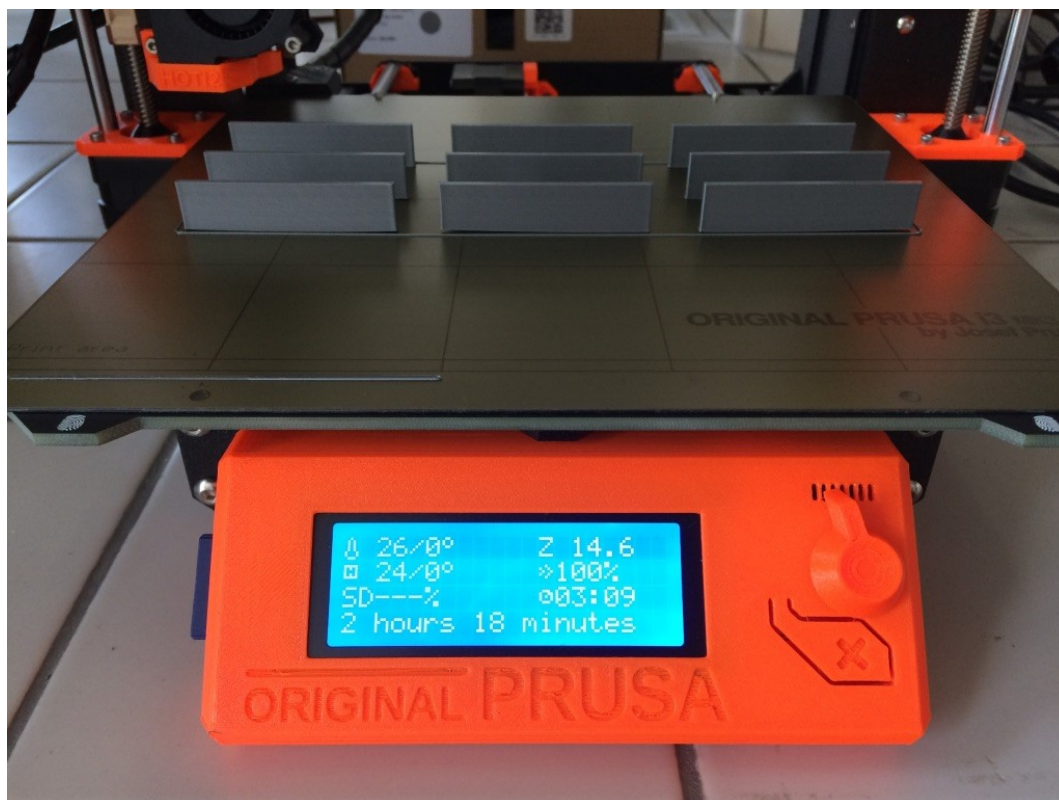
Obrázek 25. Reálná fotografie vzorku – horizontální typ tisku



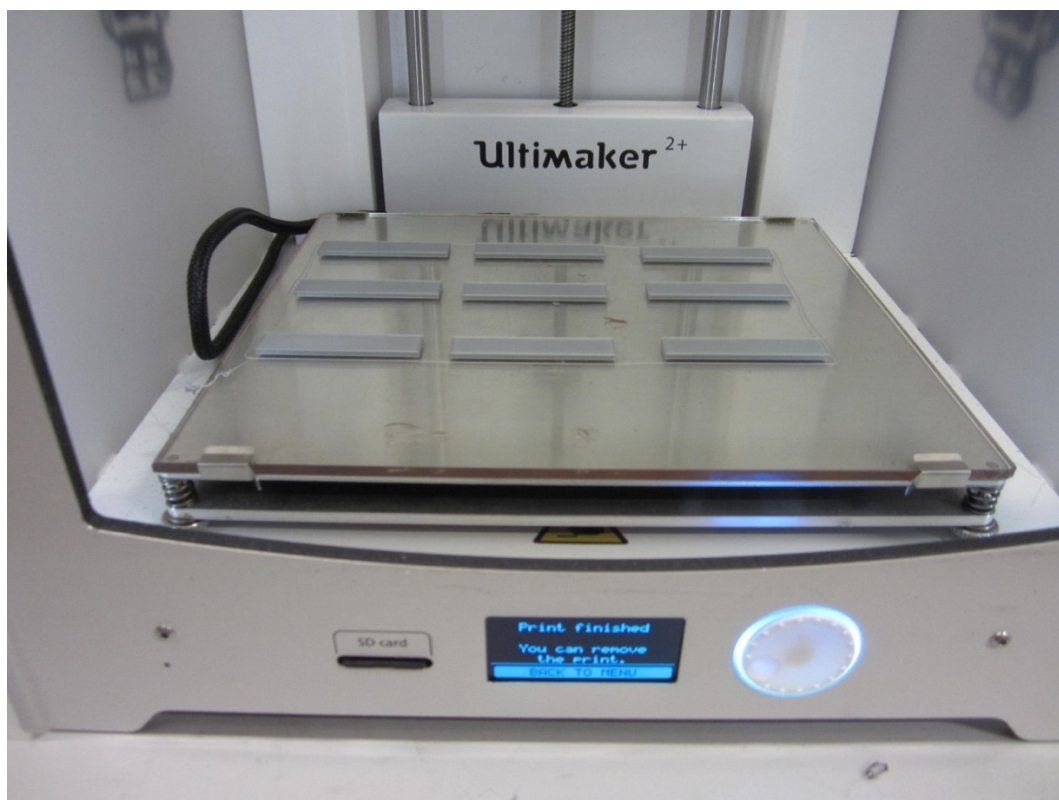
Obrázek 26. 3D model vzorku pro vertikální typ tisku



Obrázek 27. Reálná fotografie vzorku – vertikální typ tisku



Obrázek 28. Fotografie vertikálního typu tisku pomocí 3D tiskárny Original Prusa i3 MK3

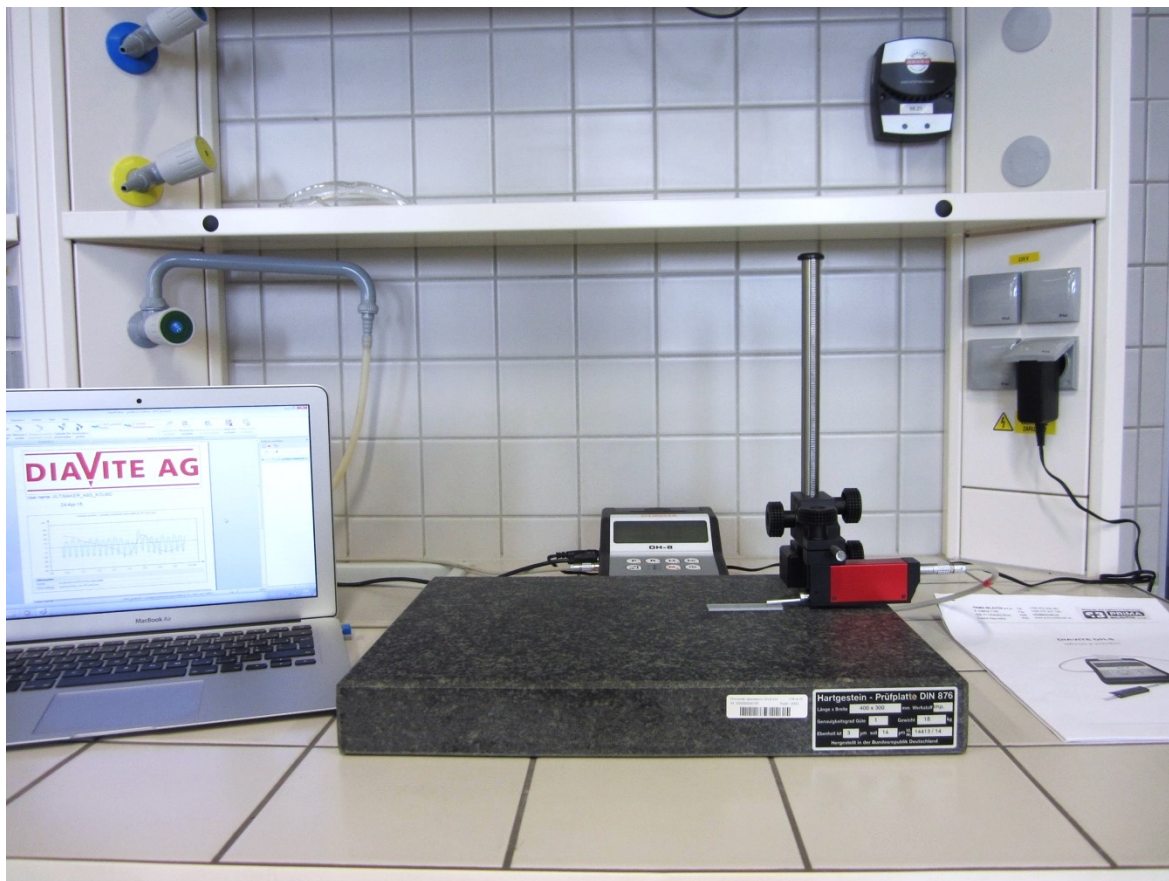


Obrázek 29. Fotografie horizontálního typu tisku pomocí 3D tiskárny Ultimaker 2+

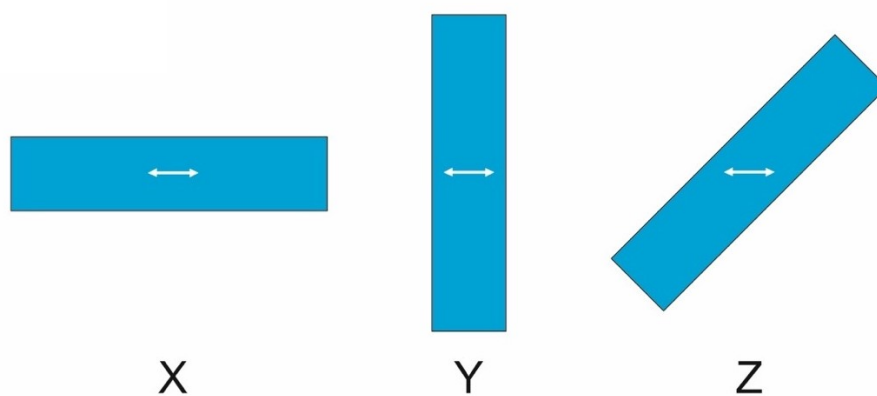
### 7.3.2 Hodnocení povrchu materiálu

Po vyrobení pomocí 3D tiskárny byly vzorky PLA důkladně očištěny oplachováním v ethanolu a destilované vodě a poté osušeny stlačeným vzduchem. Stejný postup byl aplikován i v případě vzorků z ABS. Vzorky jednotlivých materiálů (PLA, ABS) určené v povrchové modifikaci byly modifikovány v plazma-reaktoru Diener Femto (Diener electronic), jehož pracovní frekvence byla 13,56 MHz. Při experimentech byl plazmovacím plynem vzduch, jehož průtok byl 5 sccm. Výkon byl 100 W a vrácený výkon byl pod 10 %. Časy plazmové modifikace vzorků byly 10 s, 30 s, 60 s, 180 s, 360 s a 600 s. Kontaktní úhly smáčení a povrchové energie vzorků byly vyhodnocovány ihned po plazmatické úpravě. Stanovení kontaktních úhlů smáčení bylo provedeno pomocí optického goniometru Krüss Drop Shape Analyzer DSA30 (Krüss GmbH) a jejich hodnoty byly vyhodnocovány pomocí programu Advance (Krüss GmbH). V typickém referenčním měření byla použita deionizovaná voda pro stanovení referenčních hodnot kontaktních úhlů smáčení. Objem jedné kapky byl 3  $\mu$ l. Měření probíhalo tak, že po očištění / povrchové modifikaci byl vzorek opatrně vložen na křížový stolek přístroje a byly na něj postupně deponovány kapky dané kapaliny (voda). Kapky byly nanášeny bezprostředně po sobě v rozestupu 5–7 mm. Prezentované hodnoty kontaktního úhlu smáčení jsou průměrem z 10 měření. Pro stanovení hodnot kontaktního úhlu smáčení byla použita tzv. metoda sedící kapky kapaliny na pevném podkladu (tzv. „Sessile drop“), která je přesnou, rychlou a levnou metodou charakterizace pevných materiálů. Na základě zjištěného kontaktního úhlu lze vypočítat povrchovou energii daného materiálu a tyto informace použít pro lepší porozumění interakcím mezi daným materiálem a kapalinou.<sup>60</sup>

Topografie povrchu vyrobených vzorků byla charakterizována pomocí skenovacího elektronového mikroskopu Phenom Pro (Phenom-World) při 10 keV a také tzv. metodou 3D rekonstrukce drsnosti pomocí programu Phenom Pro Suite. Drsnost povrchu materiálu byla charakterizována pomocí zařízení Diavite DH-8 dle normy ČSN ISO 4287<sup>141</sup> Měřená délka na každém vzorku byla 4,8 mm, vyhodnocovací délka byla 0,8 mm a rychlost byla nastavena na 1000  $\mu$ m/s. Měření bylo provedeno na 5 vzorcích pro každý směr v ose X, Y, Z (viz Obr. 31), a to u každé varianty tiskárna-materiál-typ tisku. Ze získaných dat byl vypočten průměr a směrodatná odchylka průměru. Tyto hodnoty jsou prezentovány v tabulkách (Tab. 3–30). Byla provedena také charakterizace topografie povrchu pomocí optického povrchového profilometru NewView™ 9000 (Zygo), pomocí kterého byly zaznamenány snímky pro získání hodnot parametrů  $S_a$ ,  $S_q$ ,  $S_z$  a  $S_{dr}$ .



Obrázek 30. Zařízení na měření drsnosti – drsnoměr Diavite DH-8 (Diavite AG)



Obrázek 31. Schéma os měření drsnosti na vzorku



## 8 VÝSLEDKY A DISKUZE

Dle popisu v kapitole 7. 3 byly připraveny vzorky materiálu PLA pro hodnocení jejich povrchových vlastností. Hodnocena byla povrchová energie (v podobě kontaktního úhlu smáčení vody) a vliv drsnosti povrchu na povrchovou energii.

Topografie povrchu vzorků připravených na 3D tiskárnách typu FDM má svá specifika. Rozdílný povrch bude v místě kontaktu vzorku s tiskovou podložkou, jiný na horní straně vzorku, kde je tiskový proces ukončen, a zcela jiný na bočních stranách vzorku. I z tohoto důvodu někteří výrobci tiskovou podložku různě strukturují pro dosažení vizuálně přijatelné struktury výrobku. Uživatelsky lze nejnadhěji měnit právě vzhled povrchu na bočních stranách vzorku, a to nastavením tloušťky vrstvy, která se bude tisknout. Je evidentní, že zjemnění boční struktury je vykoupeno úměrným navýšením času tisku. Nejběžněji používané tloušťky vrstvy jsou 200  $\mu\text{m}$  pro koncepty, 150  $\mu\text{m}$  pro běžné dílce a 100 nebo dokonce 50  $\mu\text{m}$  pro velmi kvalitní povrchy (a s ohledem na dlouhou dobu tisku také spíše pro malé dílce). Kvalitu povrchu na horní a spodní straně dílce lze ovlivnit buď materiálem tiskové podložky, nebo průměrem trysky. Běžně používaný je průměr 0,4 mm, pro jemné tisky lze zvolit 0,2 mm, opět ale s výrazným dopadem na dobu tisku.

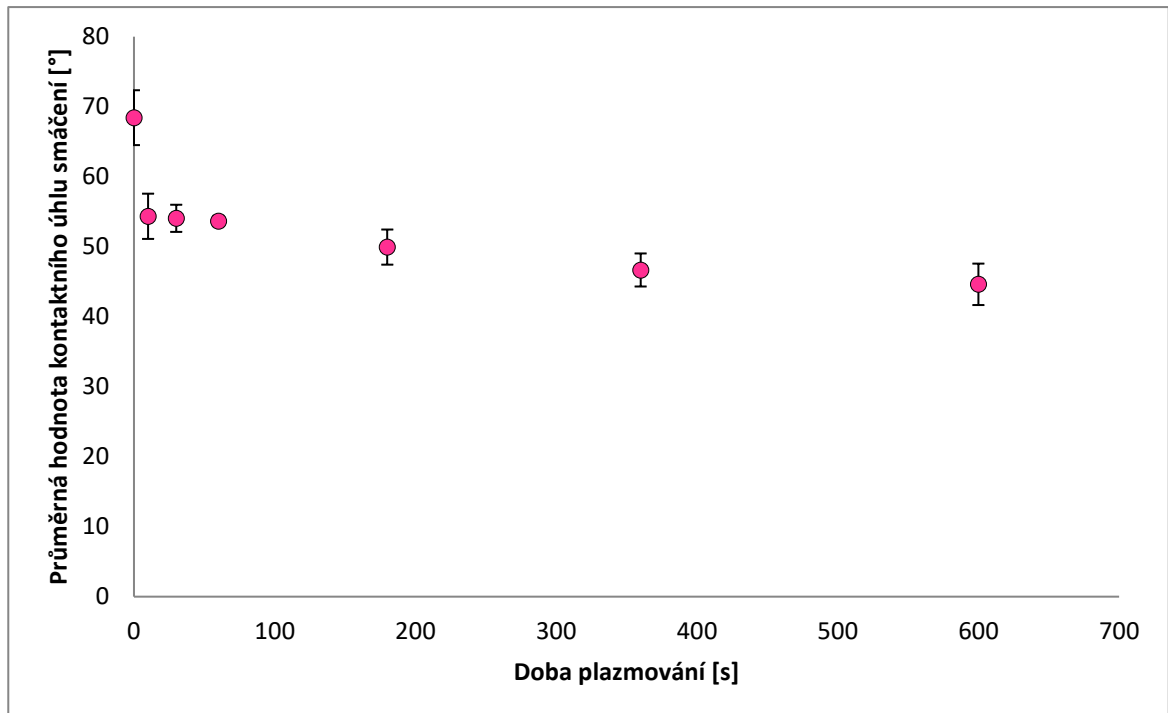
Lze očekávat, že topografie povrchu bude mít velký vliv na hodnotu povrchové energie, pokud bude stanovována metodou měření kontaktního úhlu smáčení. Vzhledem k vlivu povrchové energie, např. proliferaci buněk na substrátech pro medicínské aplikace, je zjevné, že je zde poptávka po vhodné metodice hodnocení povrchové energie na různě strukturovaných površích připravených pomocí 3D tisku. Vliv bude mít samozřejmě i chemické složení materiálu a případná povrchová úprava, nicméně vliv drsnosti na měření lze do jisté míry kompenzovat (viz „kontaktní úhel dle Wenzela“, rovnice 7).

Vzhledem k specifikům povrchů připravených metodou FDM byl kontaktní úhel smáčení pro každou kombinaci (materiál / tiskárna / orientace při tisku / strana vzorku) měřen dvakrát, a to ve směrech navzájem kolmých, aby byla zohledněna případná deformace deponované kapky vlivem topografie povrchu.

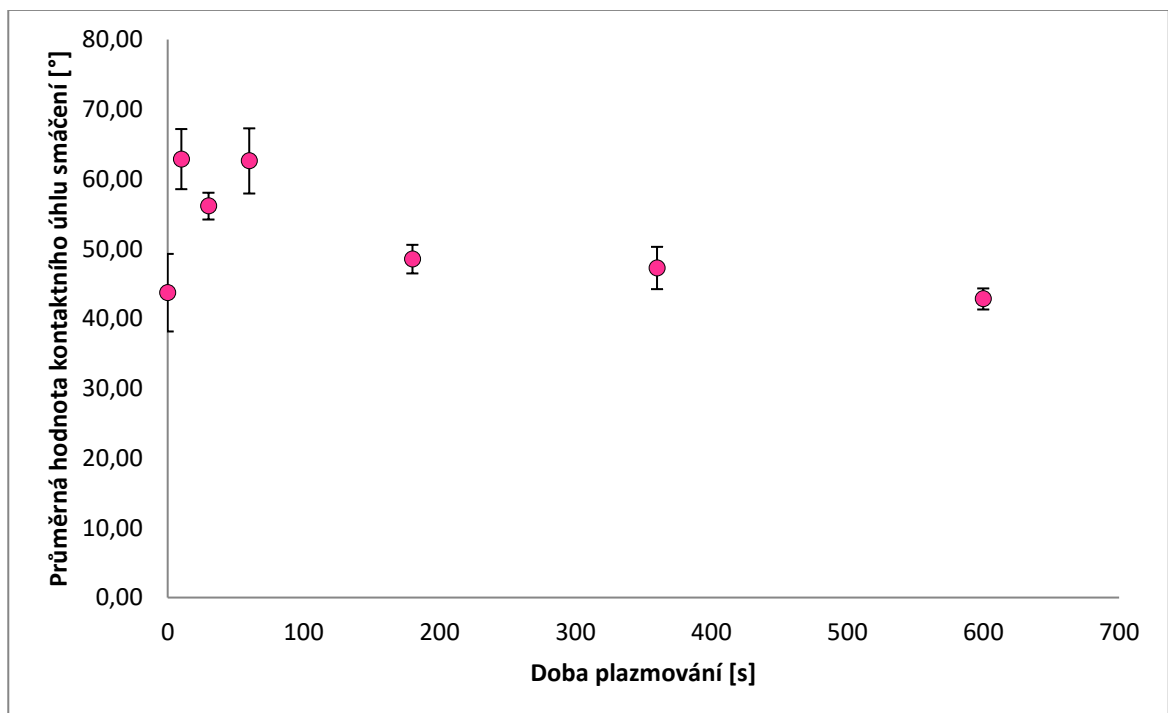
## 8.1 Příprava vzorků PLA pomocí 3D tiskárny Original Prusa i3 MK3

Plazmatické úpravy v plynu obsahujícím kyslík mají většinou vliv na výrazné zvýšení povrchové energie takto upraveného substrátu. Na obrázcích 32 a 33 je uvedena závislost kontaktního úhlu smáčení na době plazmatické úpravy. Oproti předpokladům má v tomto případě nízkoteplotní plazma poměrně malý vliv. K poklesu hodnot kontaktních úhlů smáčení sice dochází, ale ne v míře běžné jako u jiných polymerů. Kontaktní úhly smáčení se výrazně neliší ani v různých směrech analýzy kapky. Hodnoty průměrné drsnosti parametru  $R_a$  v případě horní strany dosahuje hodnot okolo 3  $\mu\text{m}$  (Tab. 3, 4, 5). U spodní strany vzorku je situace podobná, i když hodnoty kontaktních úhlů smáčení klesají s dobou plazmatické úpravy výrazněji. Průměrná drsnost je velmi nízká, hodnota parametru  $R_a$  se pohybuje pod hodnotou 1  $\mu\text{m}$  (Tab. 6, 7, 8). Na obrázcích 37 a 44 jsou uvedeny SEM snímky povrchu horní a spodní strany dílce, na obrázcích 38 a 45 jsou 3D rekonstrukce drsnosti SEM snímků pro příslušnou stranu dílce, včetně stanovených parametrů drsnosti. Tyto hodnoty se výrazně odlišují od hodnot stanovených kontaktním drsnoměrem, trend je ale podobný, kdy horní plocha dílce má drsnost větší ve srovnání se spodní plochou. U vzorků vertikálního tisku (Obr. 46 a 47) se již výrazně projevuje anizotropní charakter povrchu. Analýza kapky ve směru pohledu kolmo na směr tisku se v podstatě shoduje s kontaktními úhly na vzorku tištěném horizontálně, ale analýza ve směru pohledu rovnoběžném se směrem by již naznačovala, že materiál je i přes plazmatickou úpravu značně hydrofobní. Je zjevné, že v případě nutnosti charakterizovat povrchovou energii takových vzorků, je nutné provést několik kontrolních měření a rozhodnout se pro správnou orientaci kamery a vzorku. Vzhledem k asymetričnosti kapky by nejspíše nebyla použitelná ani metoda analýzy horního pohledu na kapku. Hodnoty drsnosti již výrazně závisí na směru měření drsnosti a průměrná hodnota  $R_a$  je 3–10  $\mu\text{m}$  (Tab. 9, 10, 11). Na obrázku 51 je uveden SEM snímek povrchu vertikálně tištěného dílce a na obrázku 52 SEM snímek 3D rekonstrukce drsnosti povrchu. Parametry drsnosti zde byly měřeny pouze ve směru odpovídajícímu orientaci Y a hodnota  $R_a$  je téměř poloviční ve srovnání s kontaktním drsnoměrem. Parametr drsnosti  $S_a$  popisuje průměrnou drsnost na celé hodnocené ploše, mohl by se tedy zdát vhodnějším pro hodnocení takových povrchů. Na druhou stranu ale v jedné průměrné hodnotě skryje informaci o anizotropii a jeho použitelnost u takového typu povrchu je diskutabilní, stejně jako použití analýzy SEM snímků pro hodnocení drsnosti povrchu. Jsou snad použitelné pro srovnání povrchů, absolutní hodnoty je ale třeba brát s rezervou.

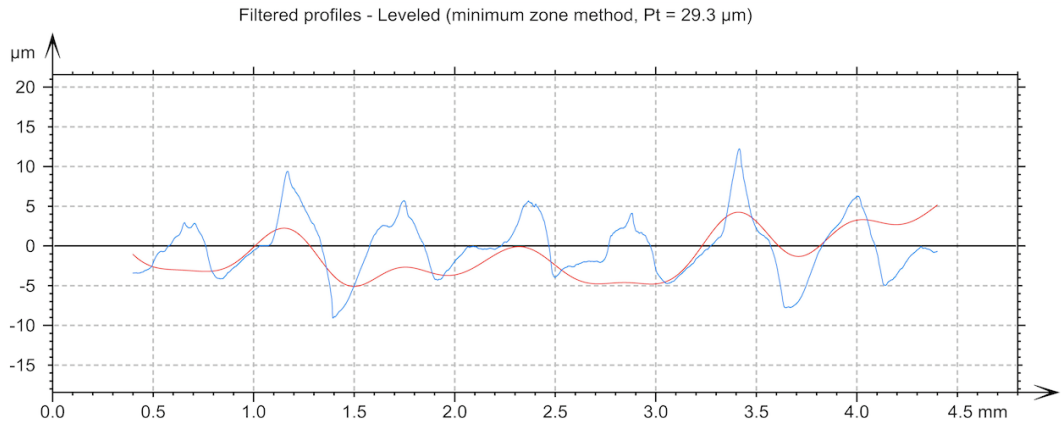
### 8.1.1 Horizontální tisk (PLA, Prusa i3 MK3)



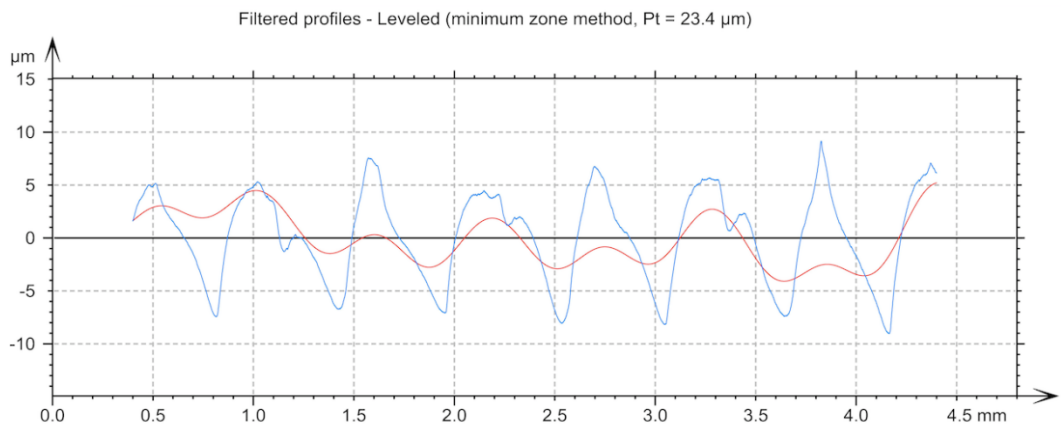
Obrázek 32. Závislost střední hodnoty kontaktního úhlu smáčení na době plazmování; PLA, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, horní strana



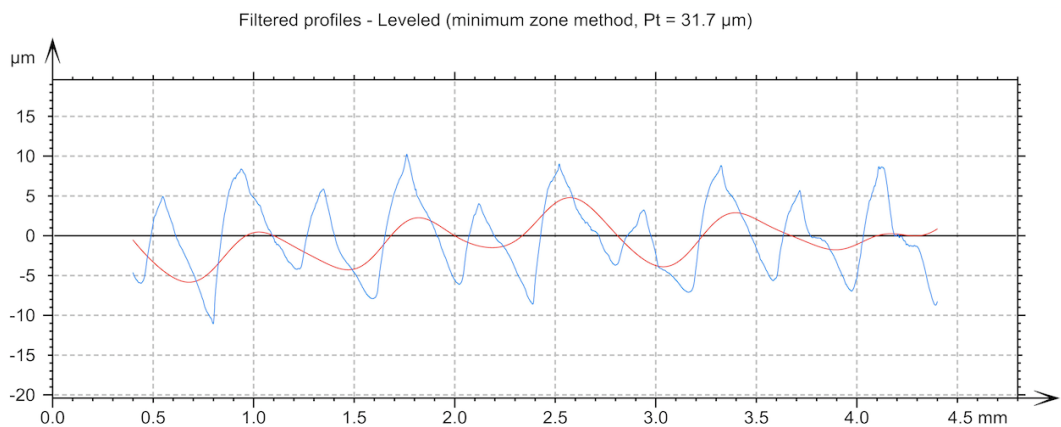
Obrázek 33. Závislost střední hodnoty kontaktního úhlu smáčení na době plazmování; PLA, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, horní strana (měřeno pod úhlem 90 °)



Obrázek 34. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená) pro PLA, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, horní strana, směr X



Obrázek 35. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená) pro PLA, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, horní strana, směr Y



Obrázek 36. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená) pro PLA, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, horní strana, směr Z

Tabulka 3. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru  $X$  (PLA, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, horní strana)

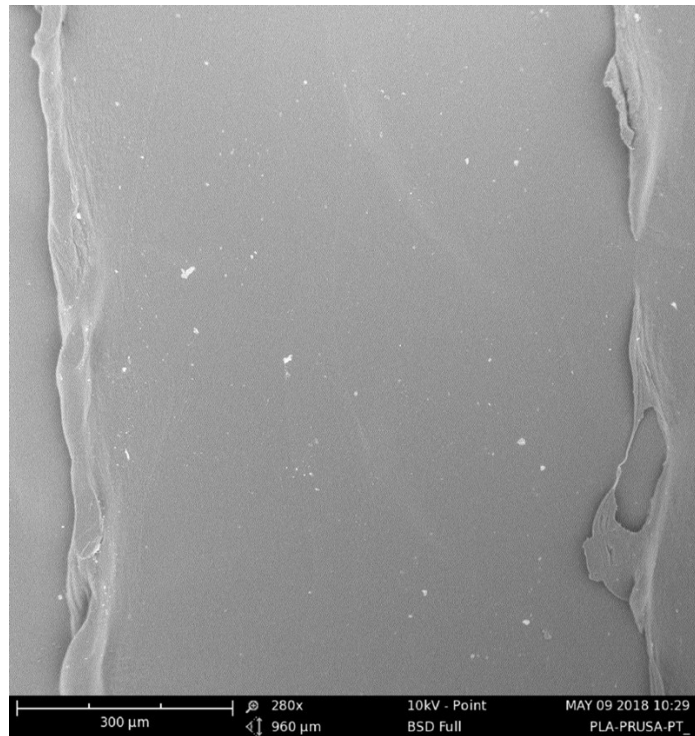
	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 4	vzorek 5	$\mu$	$\sigma_{\mu}$
$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	2,9	2,7	3,2	3,7	3,3	<b>3,1</b>	<b>0,2</b>
$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	14,1	11,4	15,6	16,3	16,4	<b>14,8</b>	<b>0,9</b>
$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	21,3	16,4	19,3	19,3	21,0	<b>19,5</b>	<b>0,9</b>
$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	3,6	3,2	4,0	4,4	4,1	<b>3,8</b>	<b>0,2</b>
$R_{\text{max}}$ [ $\mu\text{m}$ ]	17,0	12,4	17,8	19,3	20,8	<b>17,5</b>	<b>1,4</b>

Tabulka 4. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru  $Y$  (PLA, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, horní strana)

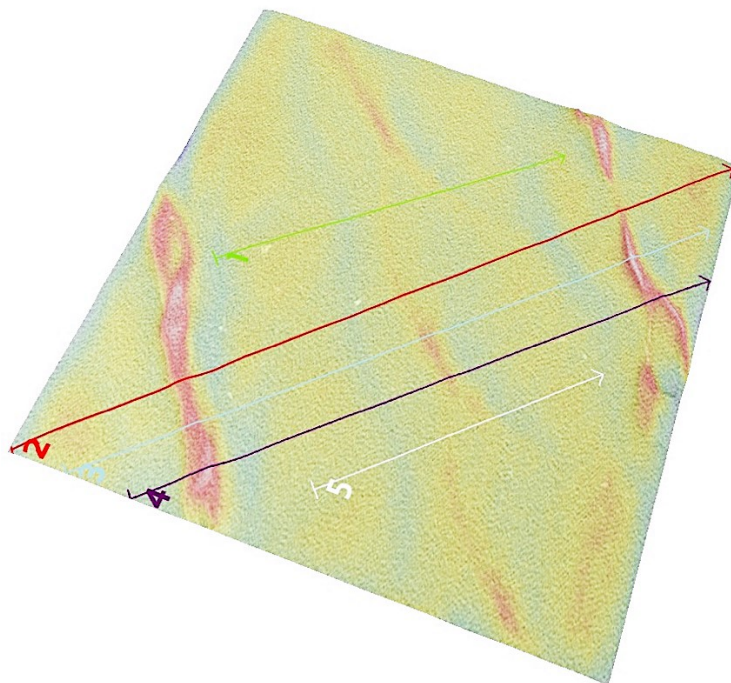
	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 4	vzorek 5	$\mu$	$\sigma_{\mu}$
$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	3,0	3,2	3,7	3,6	3,0	<b>3,3</b>	<b>0,2</b>
$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	14,3	15,3	15,4	14,9	13,9	<b>14,8</b>	<b>0,3</b>
$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	19,0	20,4	19,4	18,2	15,9	<b>18,6</b>	<b>0,8</b>
$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	3,6	3,9	4,4	4,2	3,7	<b>4,0</b>	<b>0,2</b>
$R_{\text{max}}$ [ $\mu\text{m}$ ]	18,4	18,9	17,1	18,2	15,9	<b>17,7</b>	<b>0,5</b>

Tabulka 5. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru  $Z$  (PLA, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, horní strana)

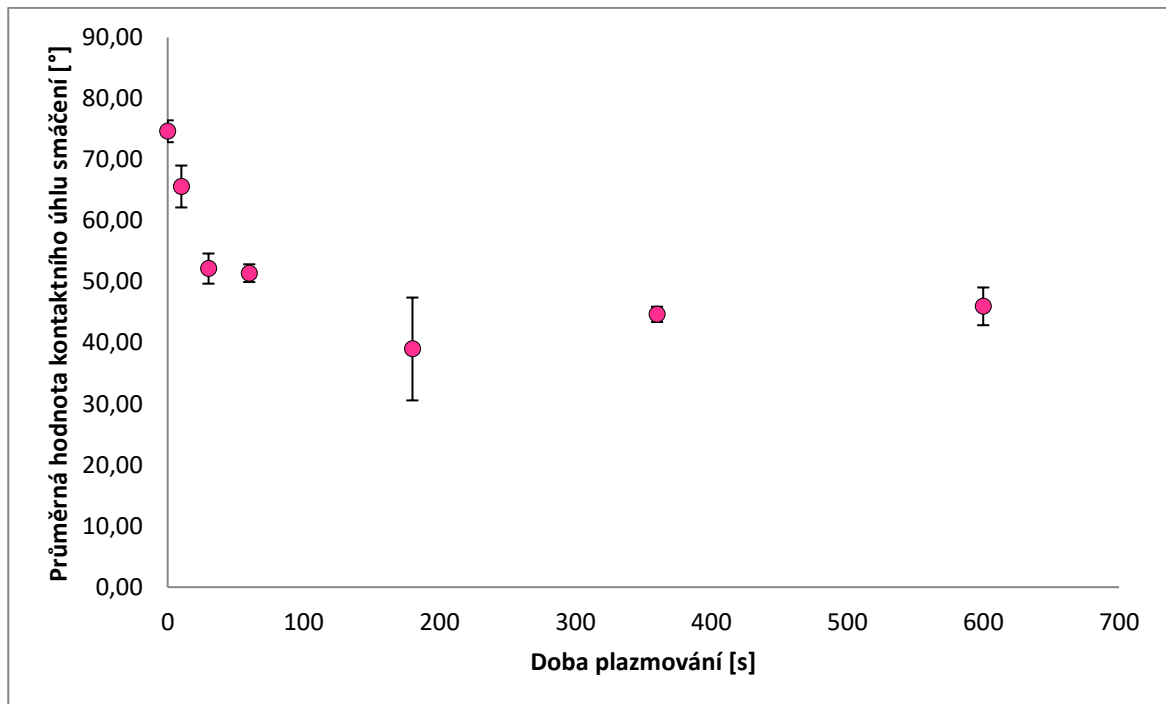
	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 4	vzorek 5	$\mu$	$\sigma_{\mu}$
$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	3,8	3,9	4,3	4,0	3,8	<b>4,0</b>	<b>0,1</b>
$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	17,2	18,5	21,0	17,9	17,7	<b>18,5</b>	<b>0,7</b>
$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	21,4	23,0	27,1	22,1	21,3	<b>23,0</b>	<b>1,1</b>
$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	4,5	4,7	5,4	4,7	4,6	<b>4,8</b>	<b>0,2</b>
$R_{\text{max}}$ [ $\mu\text{m}$ ]	20,9	22,6	26,0	21,0	19,4	<b>22,2</b>	<b>1,1</b>



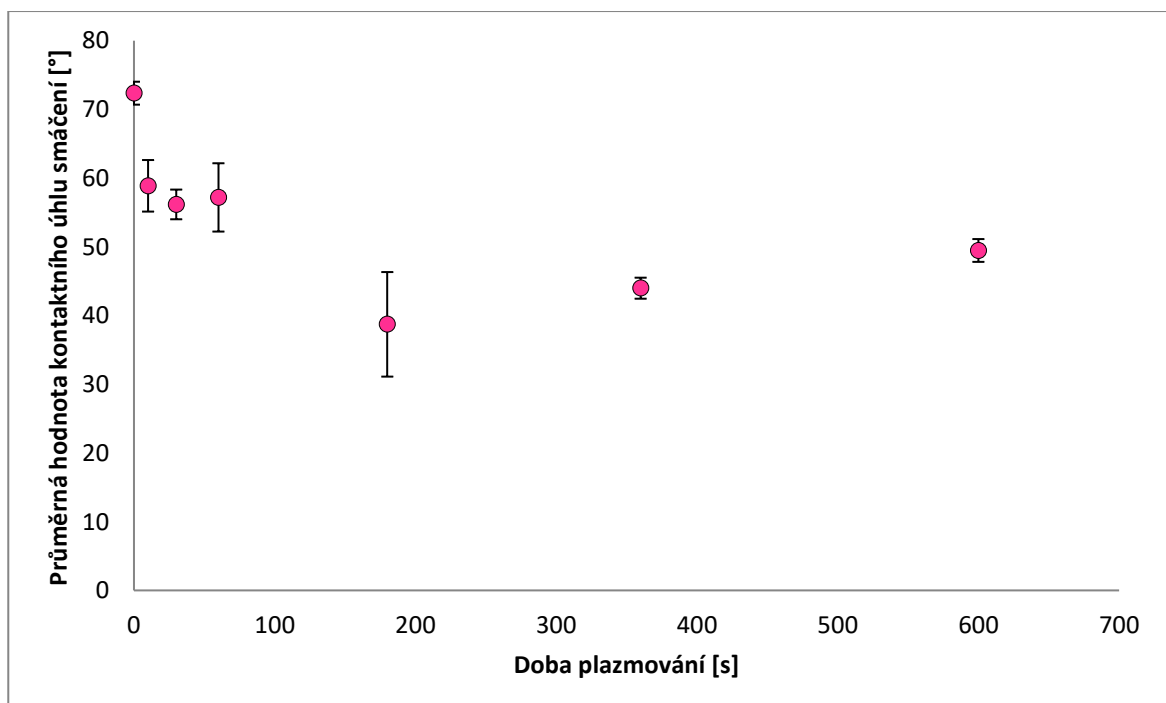
Obrázek 37. SEM snímek – PLA, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk (horní strana)



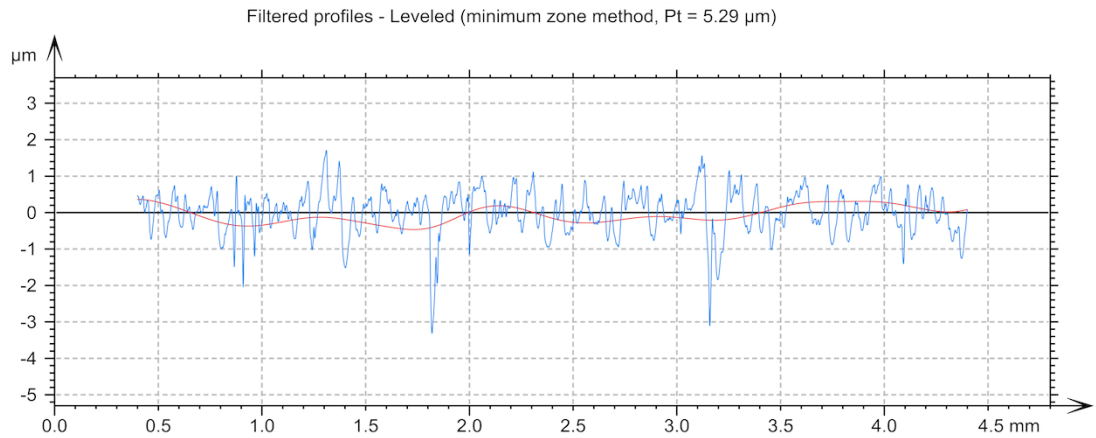
Obrázek 38. SEM snímek (3D rekonstrukce drsnosti): pro PLA, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk (horní strana);  $R_z (8,71 \pm 1,87 \mu\text{m})$ ,  $R_a (1,75 \pm 0,28 \mu\text{m})$ ,  $S_a 2,05 \mu\text{m}$



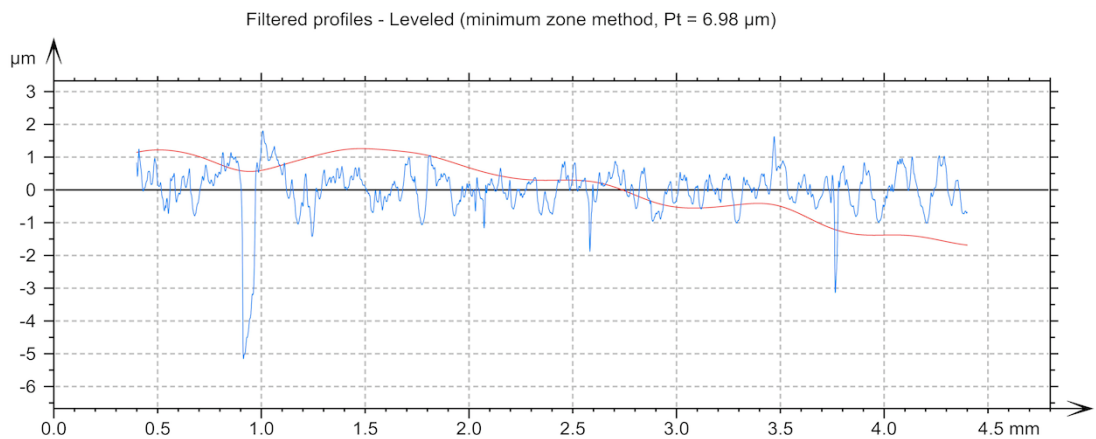
Obrázek 39. Závislost střední hodnoty kontaktního úhlu smáčení na době plazmování; PLA, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, spodní strana



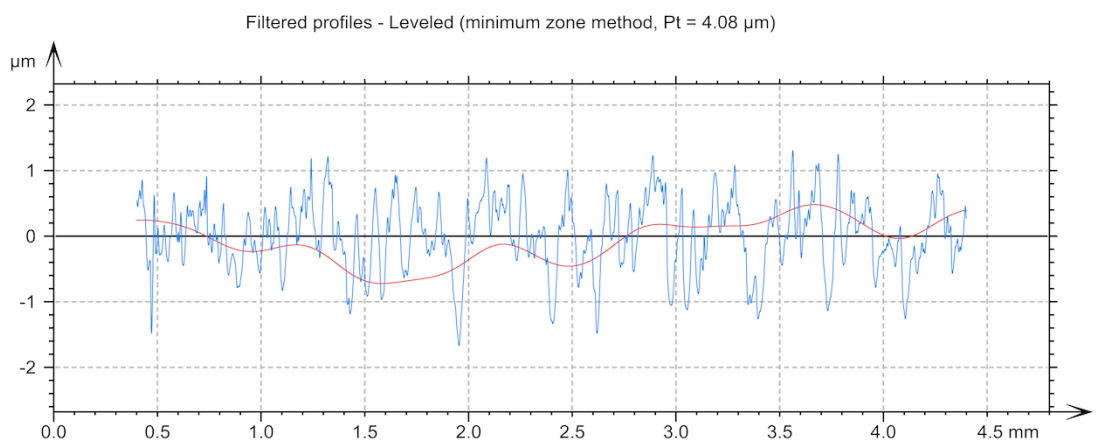
Obrázek 40. Závislost střední hodnoty kontaktního úhlu smáčení na době plazmování; PLA, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, spodní strana (měřeno pod úhlem 90 °)



Obrázek 41. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená): PLA, Original Prusa i3 MK3,  
horizontální tisk, spodní strana, směr X



Obrázek 42. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená): PLA, Original Prusa i3 MK3,  
horizontální tisk, spodní strana, směr Y



Obrázek 43. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená): PLA, Original Prusa i3 MK3,  
horizontální tisk, spodní strana, směr Z



Tabulka 6. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru  $X$  (PLA, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, spodní strana)

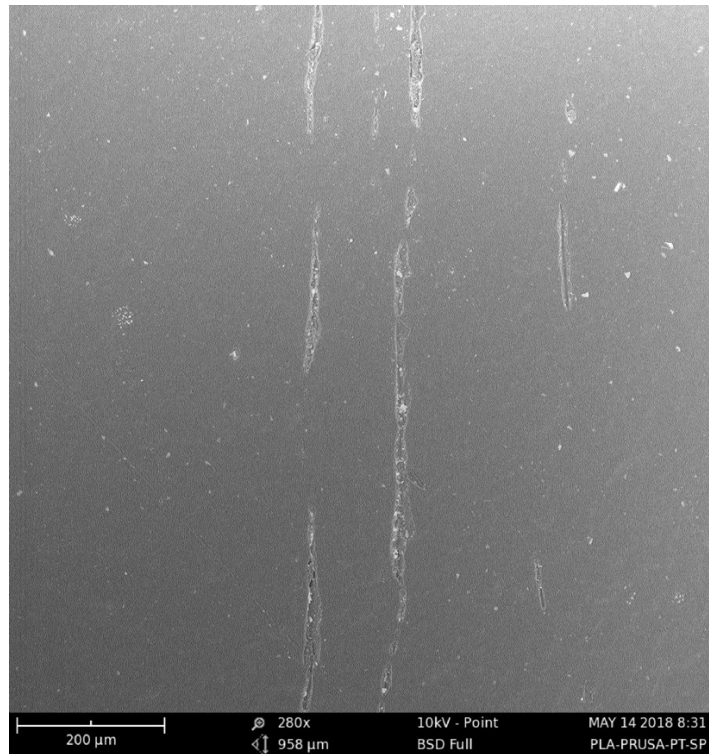
	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 4	vzorek 5	$\mu$	$\sigma_\mu$
$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,4	0,6	0,7	0,4	0,6	<b>0,6</b>	<b>0,1</b>
$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	3,5	7,2	6,7	2,9	5,6	<b>5,2</b>	<b>0,8</b>
$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	5,0	10,9	13,0	3,9	7,2	<b>8,0</b>	<b>1,7</b>
$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,6	1,1	1,1	0,5	1,0	<b>0,9</b>	<b>0,1</b>
$R_{\text{max}}$ [ $\mu\text{m}$ ]	5,0	10,8	12,8	3,6	6,8	<b>7,8</b>	<b>1,7</b>

Tabulka 7. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru  $Y$  (PLA, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, spodní strana)

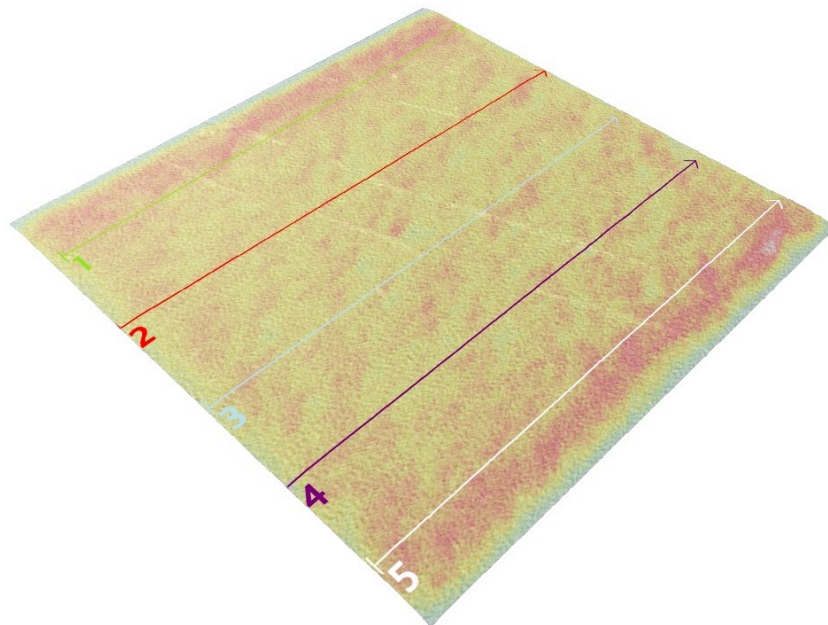
	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 4	vzorek 5	$\mu$	$\sigma_\mu$
$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,5	0,7	0,4	0,5	0,5	<b>0,5</b>	<b>0,1</b>
$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	3,3	6,3	3,1	3,8	3,5	<b>4,0</b>	<b>0,6</b>
$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	5,0	18,2	5,1	6,9	7,4	<b>8,5</b>	<b>2,5</b>
$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,6	1,1	0,5	0,6	0,6	<b>0,7</b>	<b>0,1</b>
$R_{\text{max}}$ [ $\mu\text{m}$ ]	4,6	18,2	4,8	6,9	7,3	<b>8,4</b>	<b>2,5</b>

Tabulka 8. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru  $Z$  (PLA, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, spodní strana)

	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 4	vzorek 5	$\mu$	$\sigma_\mu$
$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	2,3	0,4	1,0	0,4	0,4	<b>0,9</b>	<b>0,4</b>
$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	12,0	2,6	7,3	2,6	2,6	<b>5,4</b>	<b>1,9</b>
$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	43,7	3,6	17,6	3,3	3,0	<b>14,2</b>	<b>7,9</b>
$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	3,0	0,5	1,5	0,5	0,5	<b>1,2</b>	<b>0,5</b>
$R_{\text{max}}$ [ $\mu\text{m}$ ]	43,7	3,6	15,7	3,2	2,9	<b>13,8</b>	<b>7,9</b>

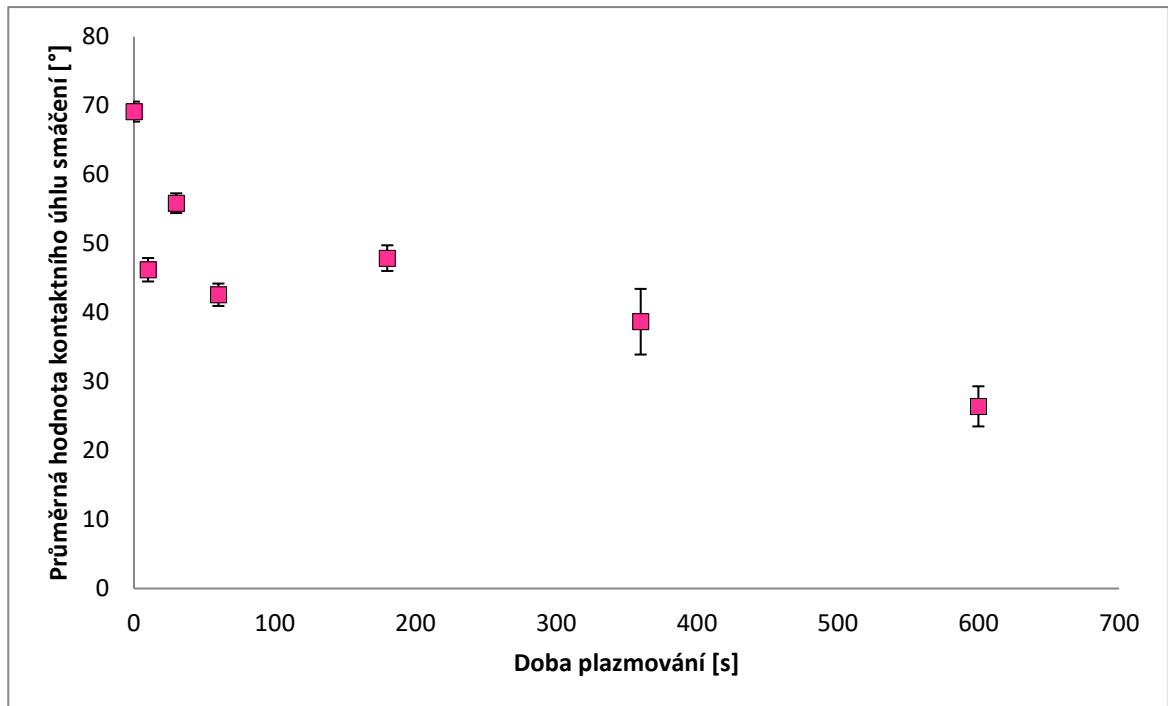


Obrázek 44. SEM snímek – PLA, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk (spodní strana)

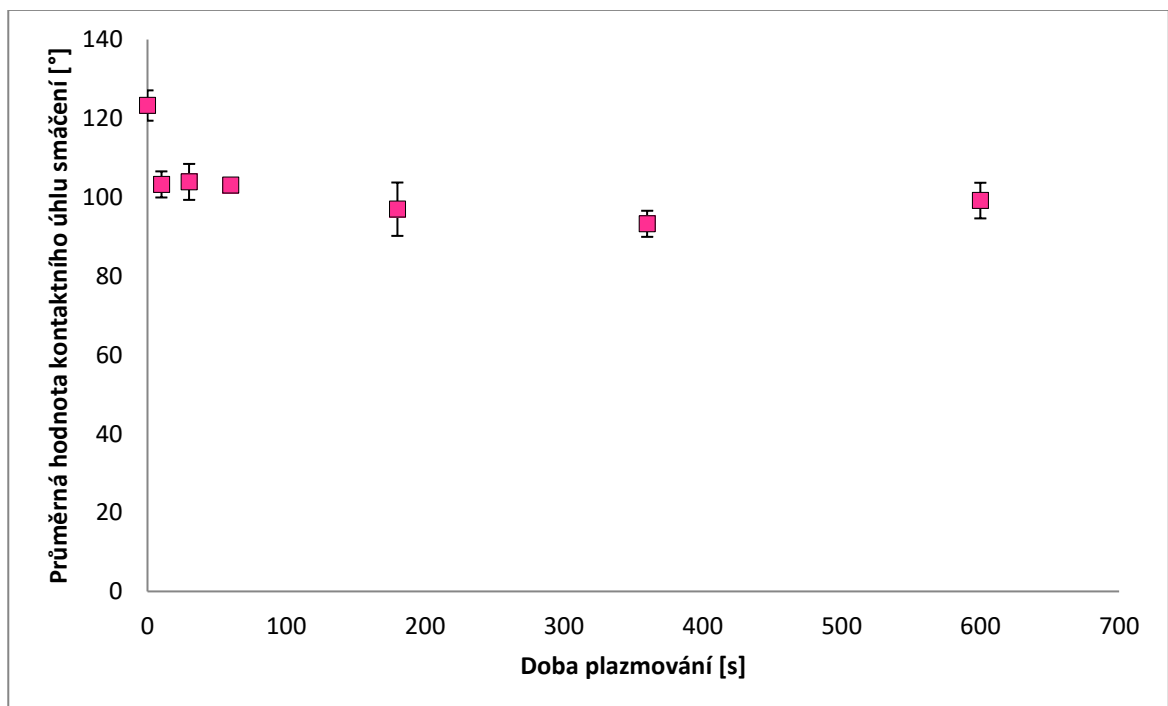


Obrázek 45. SEM snímek (3D rekonstrukce drsnosti): pro PLA, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk (spodní strana);  $R_z (3,61 \pm 0,41 \mu\text{m})$ ,  $R_a (0,87 \pm 0,18 \mu\text{m})$ ,  $S_a 1,16 \mu\text{m}$ .

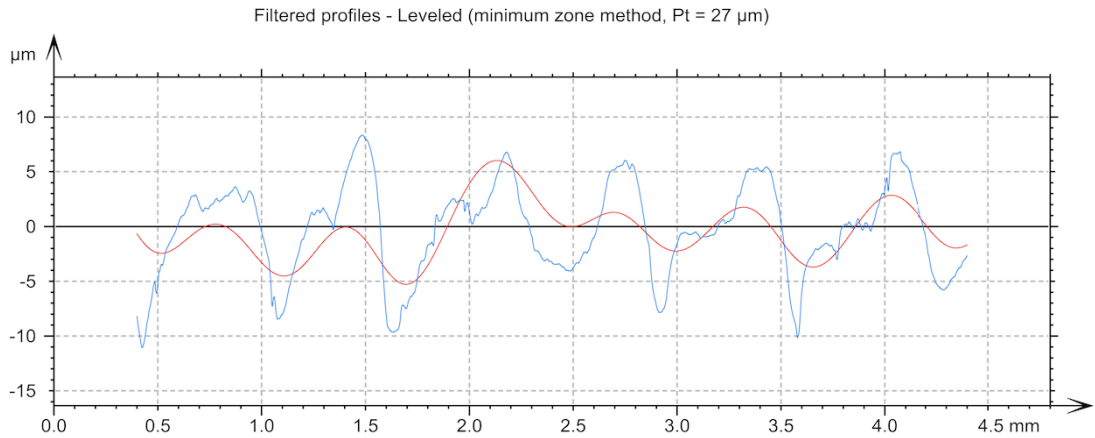
## 8.1.2 Vertikální tisk (PLA, Prusa i3 MK3)



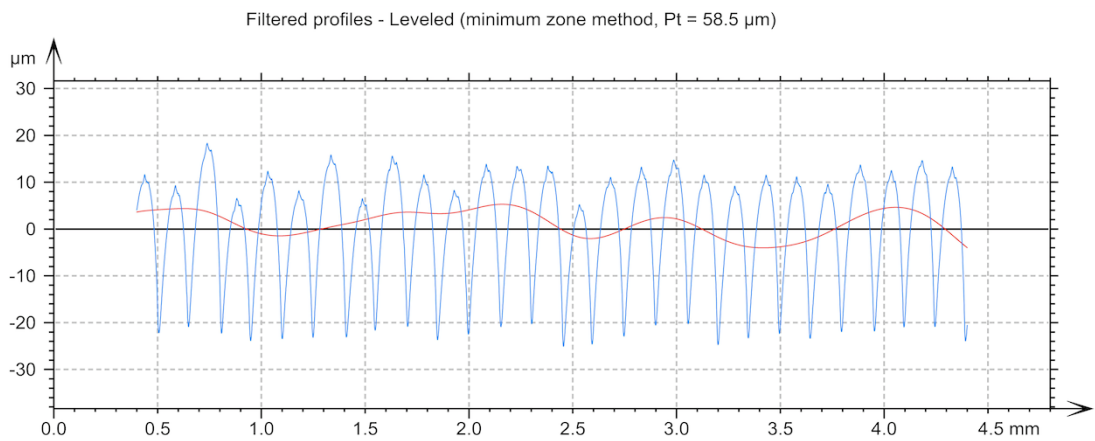
Obrázek 46. Závislost střední hodnoty kontaktního úhlu smáčení na době plazmování;  
PLA, Original Prusa i3 MK3, vertikální tisk



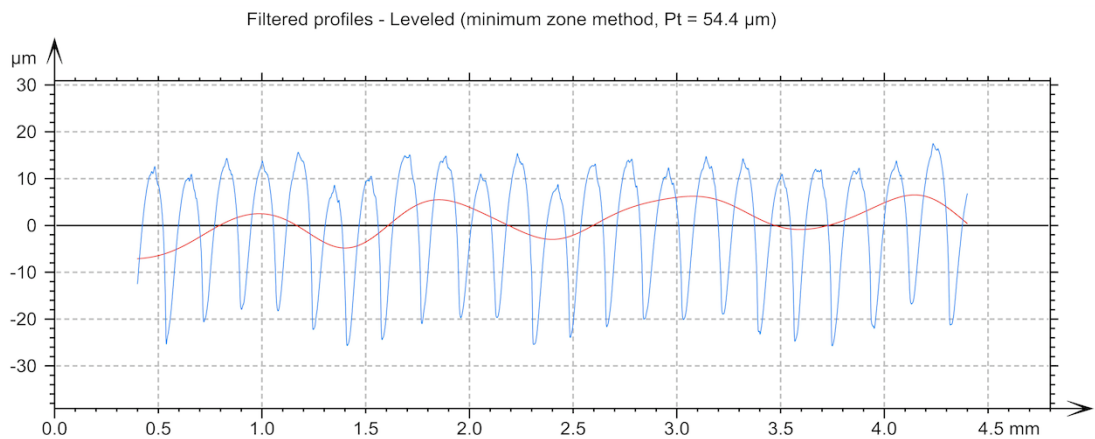
Obrázek 47. Závislost střední hodnoty kontaktního úhlu smáčení na době plazmování;  
PLA, Original Prusa i3 MK3, vertikální tisk (měřeno pod úhlem 90 °)



Obrázek 48. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená): PLA, Original Prusa i3 MK3, vertikální tisk, směr X



Obrázek 49. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená): PLA, Original Prusa i3 MK3, vertikální tisk, směr Y



Obrázek 50. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená): PLA, Original Prusa i3 MK3, vertikální tisk, směr Z

Tabulka 9. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru  $X$  (PLA, Original Prusa i3 MK3, vertikální tisk)

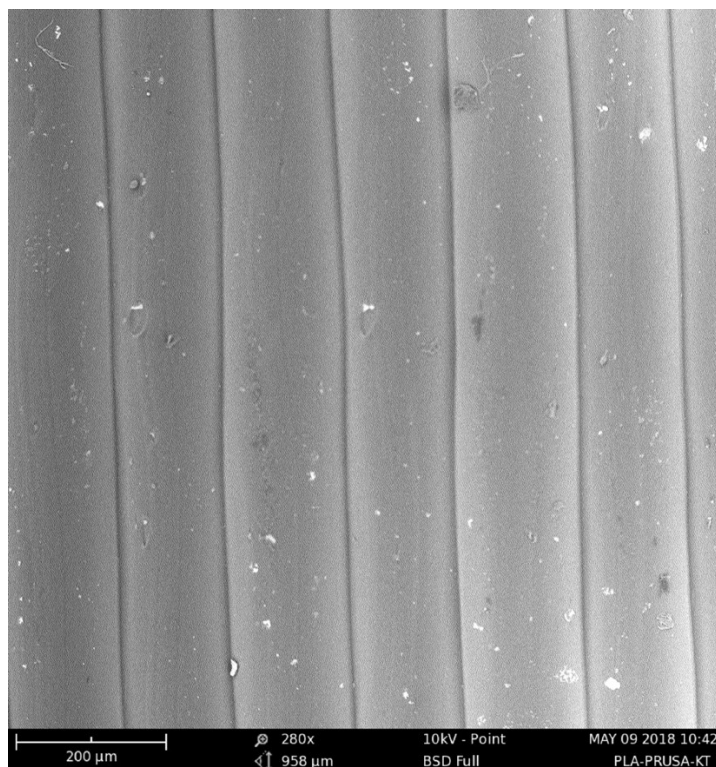
	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 4	vzorek 5	$\mu$	$\sigma_{\mu}$
$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	2,6	2,3	3,1	3,4	3,3	<b>2,9</b>	<b>0,2</b>
$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	9,7	9,9	10,5	14,4	11,9	<b>11,3</b>	<b>0,9</b>
$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	12,7	11,4	14,6	19,4	29,8	<b>17,6</b>	<b>3,3</b>
$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	2,9	2,7	3,5	4,2	3,8	<b>3,4</b>	<b>0,3</b>
$R_{\max}$ [ $\mu\text{m}$ ]	11,8	11,3	14,6	18,0	29,8	<b>17,1</b>	<b>3,4</b>

Tabulka 10. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru  $Y$  (PLA, Original Prusa i3 MK3, vertikální tisk)

	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 4	vzorek 5	$\mu$	$\sigma_{\mu}$
$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	9,4	9,1	10,5	9,8	9,5	<b>9,7</b>	<b>0,2</b>
$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	42,9	39,7	46,5	43,5	44,0	<b>43,3</b>	<b>1,1</b>
$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	46,7	43,4	51,0	46,4	55,2	<b>48,5</b>	<b>2,1</b>
$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	11,3	10,7	12,5	11,6	11,4	<b>11,5</b>	<b>0,3</b>
$R_{\max}$ [ $\mu\text{m}$ ]	46,7	42,1	48,9	44,9	55,2	<b>47,6</b>	<b>2,2</b>

Tabulka 11. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru  $Z$  (PLA, Original Prusa i3 MK3, vertikální tisk)

	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 4	vzorek 5	$\mu$	$\sigma_{\mu}$
$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	10,5	10,7	10,4	10,5	10,0	<b>10,4</b>	<b>0,1</b>
$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	44,6	45,6	41,3	42,8	41,0	<b>43,1</b>	<b>0,9</b>
$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	49,5	48,4	46,0	44,8	43,2	<b>46,4</b>	<b>1,2</b>
$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	12,2	12,6	12,1	12,2	11,6	<b>12,1</b>	<b>0,2</b>
$R_{\max}$ [ $\mu\text{m}$ ]	47,6	48,4	44,7	44,5	43,2	<b>45,7</b>	<b>1,0</b>



Obrázek 51. SEM snímek – PLA, Original Prusa i3 MK3, vertikální tisk



Obrázek 52. SEM snímek (3D rekonstrukce drsnosti povrchu): PLA, Original Prusa i3 MK3, vertikální tisk;  $R_z (22,23 \pm 0,60 \mu\text{m})$ ,  $R_a (5,93 \pm 0,21 \mu\text{m})$ ,  $S_a 5,74 \mu\text{m}$

## 8.2 Příprava vzorků PLA pomocí 3D tiskárny Ultimaker 2+

Na obrázcích 53 a 54 je uvedena závislost kontaktního úhlu smáčení na době plazmatické úpravy. Obdobně jako v případě vzorků PLA připravených na tiskárně Original Prusa i3 MK3 má i v tomto případě nízkoteplotní plazma poměrně malý vliv. K poklesu kontaktních úhlů sice dochází, ale ne v míře běžné u jiných polymerů. Kontaktní úhly se výrazně neliší ani v různých směrech analýzy kapky, tj. na horní straně dílce se anizotropie povrchových vlastností neprojevuje. Průměrná drsnost  $R_a$  dosahuje hodnot okolo 4  $\mu\text{m}$  (Tab. 12, 13, 14).

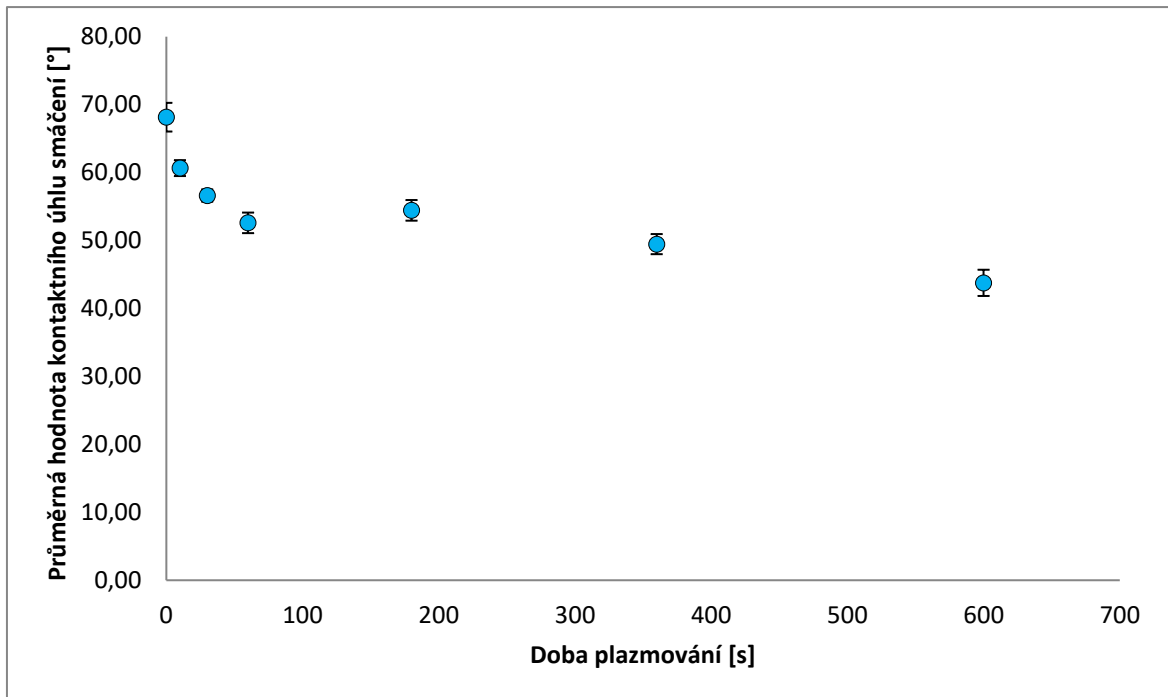
U spodní strany vzorku je situace podobná, i když kontaktní úhly klesají s dobou plazmatické úpravy opět výrazněji a u vzorku plazmovaného 600 sekund klesají až pod hodnotu 30° (Obr. 60 a 61). Průměrná drsnost je překvapivě větší než u horní strany, hodnota  $R_a$  se pohybuje v závislosti na orientaci vzorku při měření od 7,7 do 20,5  $\mu\text{m}$  (Tab. 15, 16, 17). Je zde možný vliv materiálu a struktury tiskové podložky – v případě 3D tiskárny Original Prusa i3 MK3 je to hladká PEI fólie a v případě tiskárny Ultimaker 2+ sklo.

Na obrázcích 58 a 65 jsou uvedeny SEM snímky povrchu horní a spodní strany dílce, na obrázcích 59 a 66 jsou SEM snímky 3D rekonstrukce drsnosti pro příslušnou stranu dílce, včetně stanovených parametrů drsnosti. Tyto se opět výrazně odlišují od hodnot stanovených kontaktním drsnoměrem, srovnání ale vychází obdobně, neboť spodní strana vzorku má vyšší drsnost než strana horní.

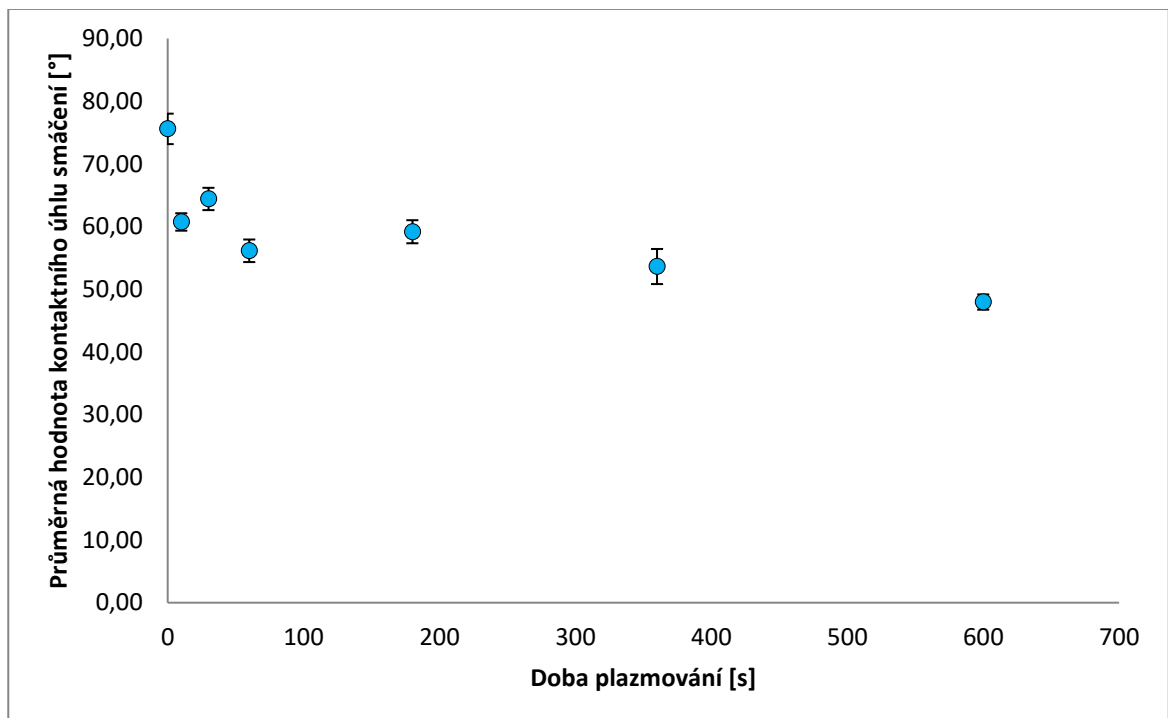
U vzorků tisknutých vertikálně (Obrázky 67 a 68), se stejně jako u vzorků z tiskárny Original Prusa i3 MK3 výrazně projevuje anizotropní charakter povrchu. Analýza kapky ve směru pohledu kolmo na směr tisku a ve směru pohledu rovnoběžném se směrem tisku poskytuje výsledky co do trendu velmi podobné, ale vzájemně posunuté o 30–40 °. Drsnost u těchto vzorků již výrazně závisí na směru měření drsnosti a průměrná hodnota  $R_a$  se pohybuje od cca 1,1 do 10  $\mu\text{m}$  (Tab. 18, 19, 20).

Na obrázku 72 je uveden SEM snímek povrchu vertikálně tištěného dílce a na obrázku 73 3D rekonstrukce drsnosti SEM snímku. Parametry drsnosti zde byly měřeny pouze ve směru odpovídajícímu orientaci Y a hodnota  $R_a$  je méně než třetinová ve srovnání s kontaktním drsnoměrem. Parametr drsnosti  $S_a$  se u tohoto povrchu pohybuje okolo hodnoty 3,1  $\mu\text{m}$ , což je mezi hodnotami pro horní a dolní stranu u horizontálního tisku.

### 8.2.1 Horizontální tisk (PLA, Ultimaker 2+)

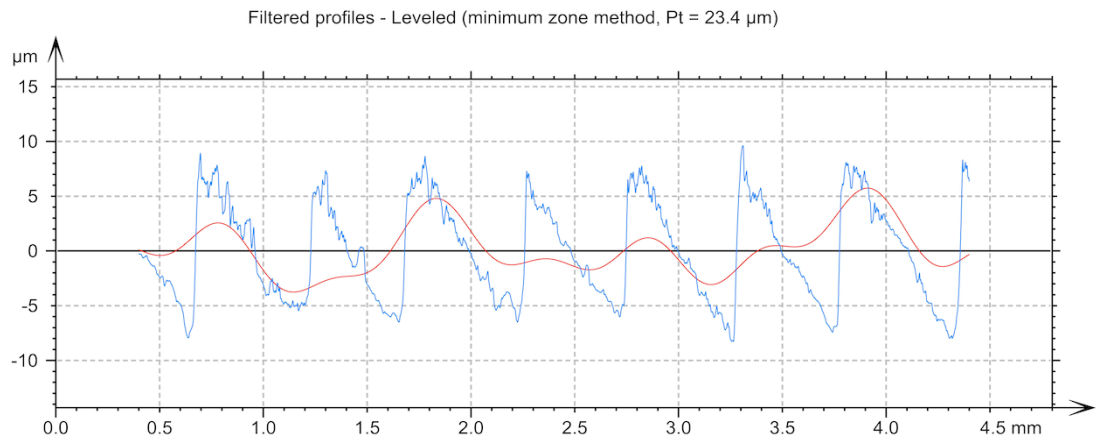


Obrázek 53. Závislost střední hodnoty kontaktního úhlu smáčení na době plazmování; PLA, Ultimaker 2+, horizontální tisk, horní strana

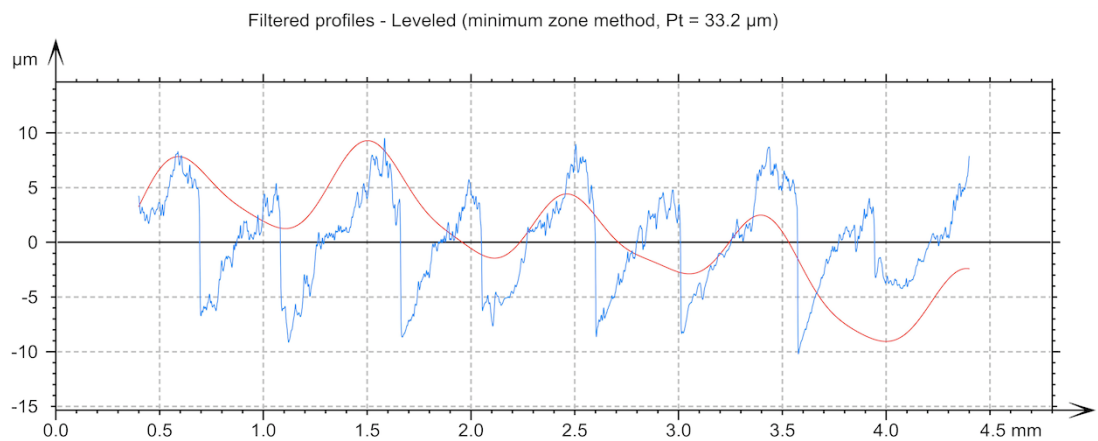


Obrázek 54. Závislost střední hodnoty kontaktního úhlu smáčení na době plazmování; PLA, Ultimaker 2+, horizontální tisk, horní strana (měřeno pod úhlem 90 °)

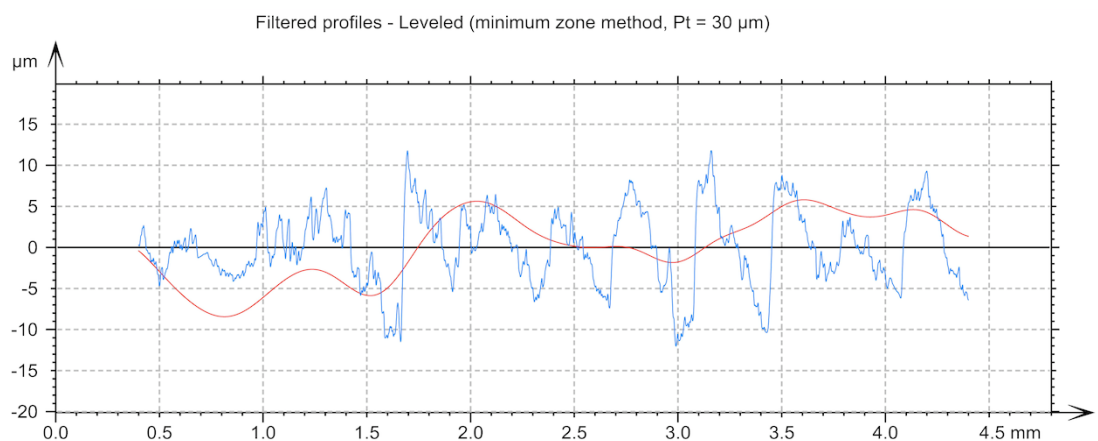




Obrázek 55. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená): kombinace PLA, Ultimaker 2+,  
horizontální tisk, horní strana, směr X



Obrázek 56. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená): kombinace PLA, Ultimaker 2+,  
horizontální tisk, horní strana, směr Y



Obrázek 57. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená): kombinace PLA, Ultimaker 2+,  
horizontální tisk, horní strana, směr Z

Tabulka 12. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru  $X$  (materiál PLA, Ultimaker 2+, horizontální tisk, horní strana)

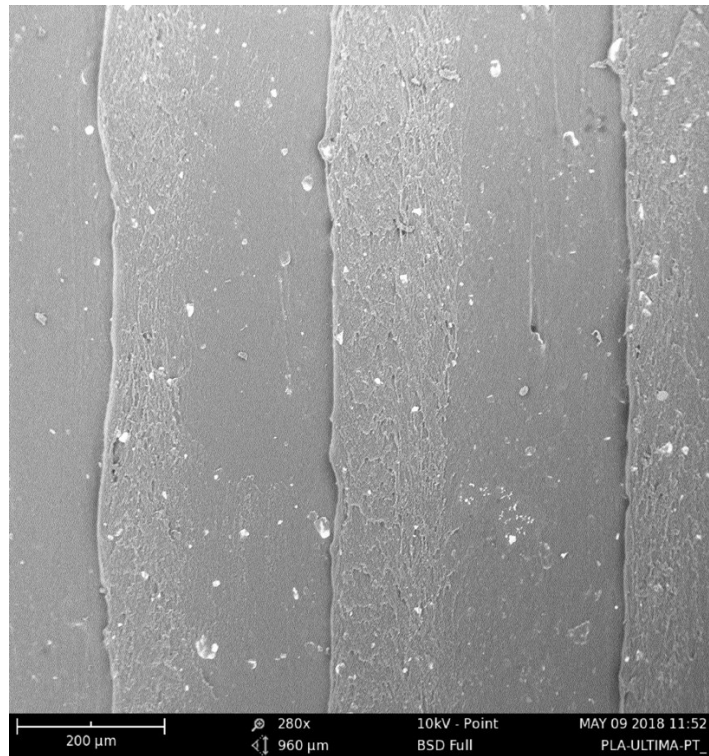
	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 4	vzorek 5	$\mu$	$\sigma_\mu$
$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	3,7	3,4	4,3	3,2	3,9	<b>3,7</b>	<b>0,2</b>
$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	16,4	18,5	17,3	16,5	16,0	<b>16,9</b>	<b>0,4</b>
$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	18,9	21,0	19,8	24,2	17,9	<b>20,4</b>	<b>1,1</b>
$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	4,3	4,3	4,9	3,9	4,5	<b>4,4</b>	<b>0,2</b>
$R_{\text{max}}$ [ $\mu\text{m}$ ]	18,3	20,4	19,8	24,2	17,9	<b>20,1</b>	<b>1,1</b>

Tabulka 13. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru  $Y$  (materiál PLA, Ultimaker 2+, horizontální tisk, horní strana)

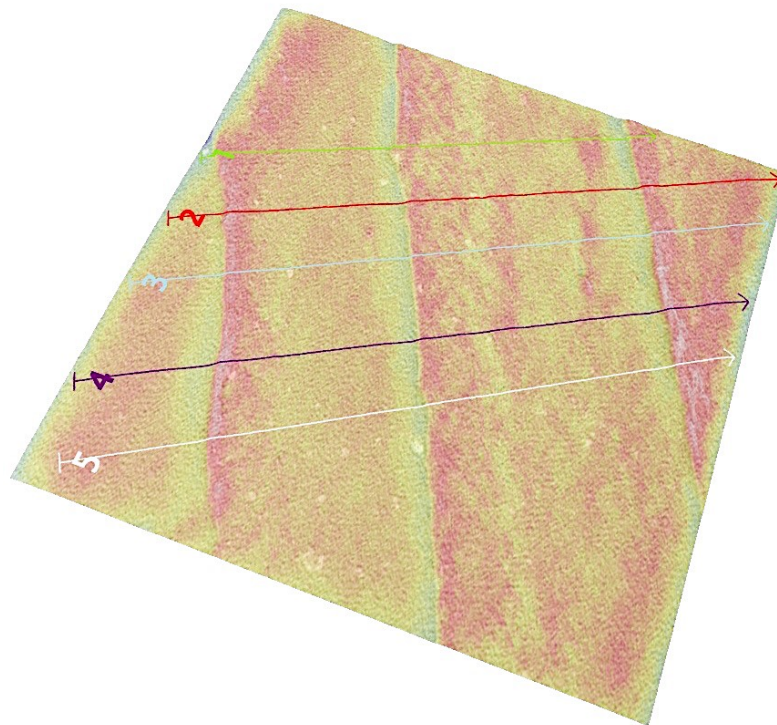
	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 4	vzorek 5	$\mu$	$\sigma_\mu$
$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	3,2	3,4	3,5	3,9	4,0	<b>3,6</b>	<b>0,1</b>
$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	14,7	14,8	17,7	20,5	17,1	<b>17,0</b>	<b>1,1</b>
$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	17,4	16,9	19,7	23,5	20,8	<b>19,7</b>	<b>1,2</b>
$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	3,8	3,9	4,2	4,7	4,7	<b>4,3</b>	<b>0,2</b>
$R_{\text{max}}$ [ $\mu\text{m}$ ]	16,6	16,3	18,9	23,5	20,3	<b>19,1</b>	<b>1,3</b>

Tabulka 14. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru  $Z$  (materiál PLA, Ultimaker 2+, horizontální tisk, horní strana)

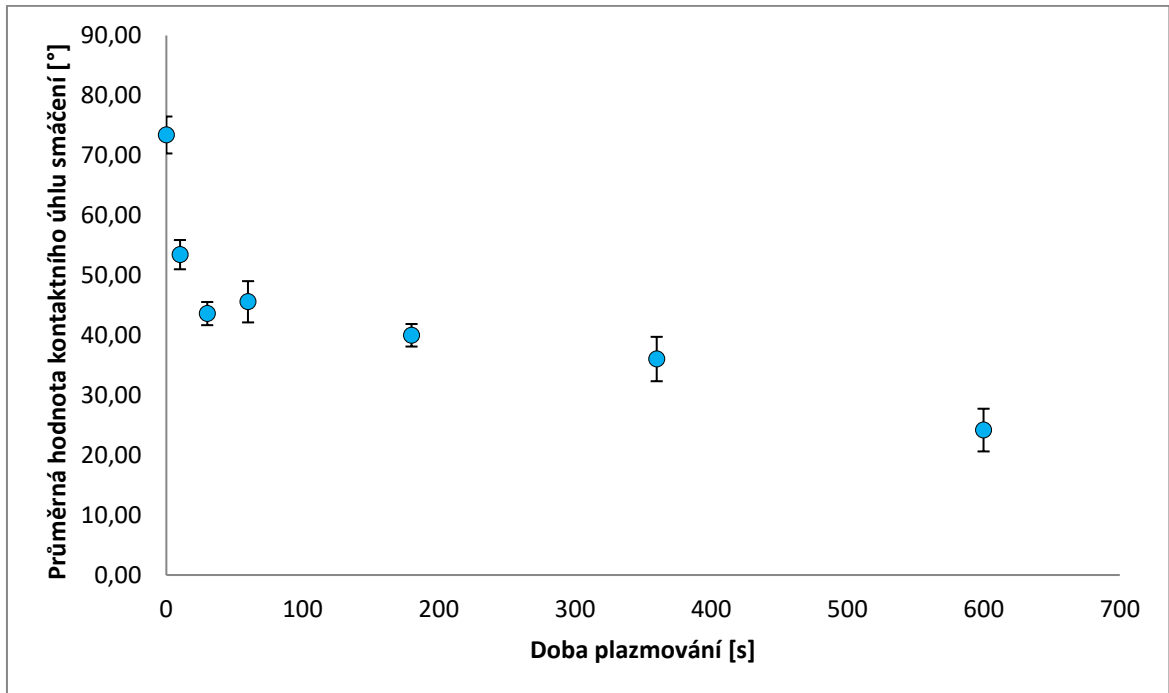
	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 4	vzorek 5	$\mu$	$\sigma_\mu$
$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	4,2	3,9	4,2	4,4	3,7	<b>4,1</b>	<b>0,1</b>
$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	20,0	18,9	17,8	17,6	17,6	<b>18,4</b>	<b>0,5</b>
$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	21,9	22,6	21,3	20,7	23,8	<b>22,1</b>	<b>0,5</b>
$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	5,1	4,7	4,9	5,1	4,3	<b>4,8</b>	<b>0,1</b>
$R_{\text{max}}$ [ $\mu\text{m}$ ]	21,7	21,7	20,0	20,7	23,8	<b>21,6</b>	<b>0,6</b>



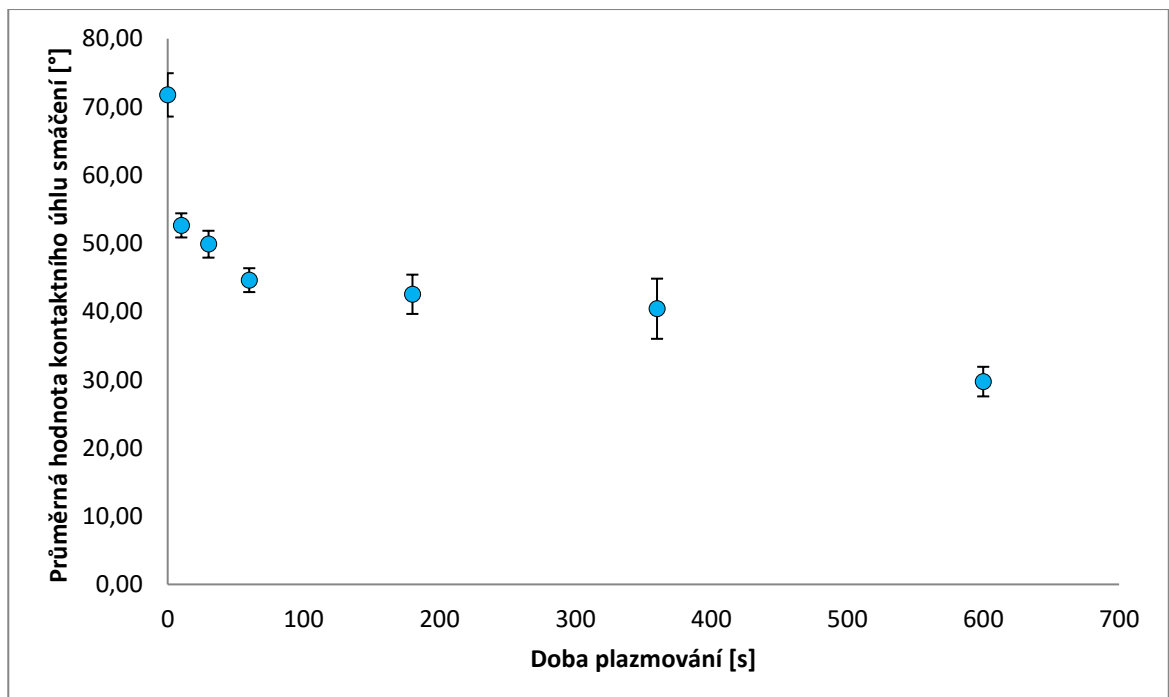
Obrázek 58. SEM snímek – PLA, Ultimaker 2+, horizontální tisk (horní strana)



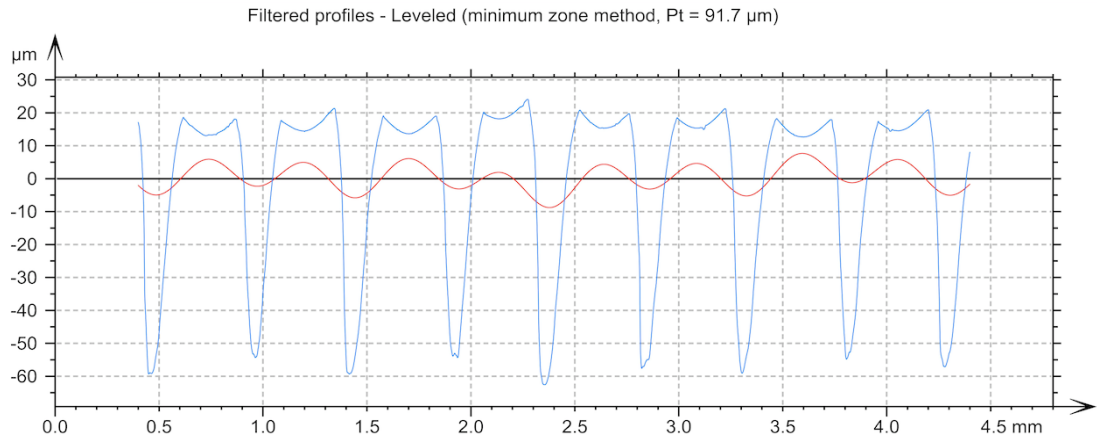
Obrázek 59. SEM snímek (3D rekonstrukce drsnosti): PLA, Ultimaker 2+, horizontální tisk (horní strana);  $R_z (8,87 \pm 0,37 \mu\text{m})$ ,  $R_a (1,73 \pm 0,08 \mu\text{m})$ ,  $S_a 1,80 \mu\text{m}$



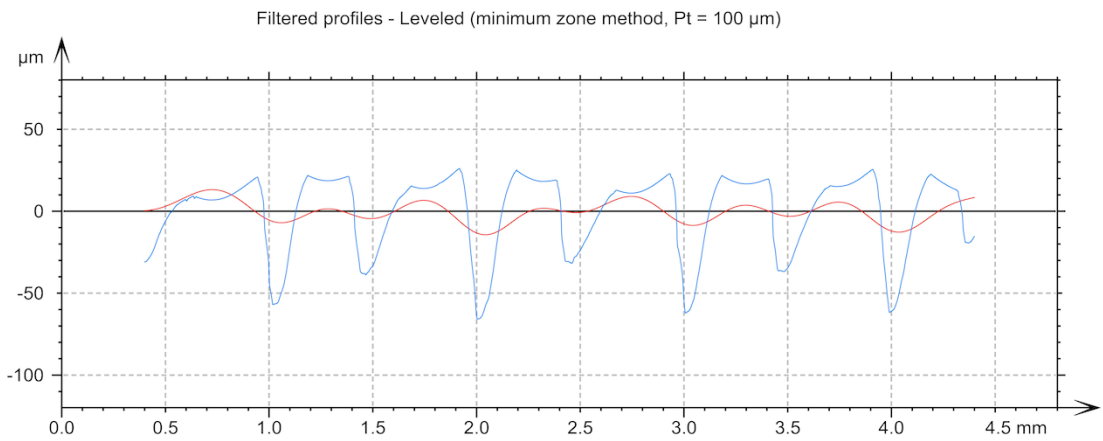
Obrázek 60. Závislost střední hodnoty kontaktního úhlu smáčení na době plazmování;  
PLA, Ultimaker 2+, horizontální tisk, spodní strana



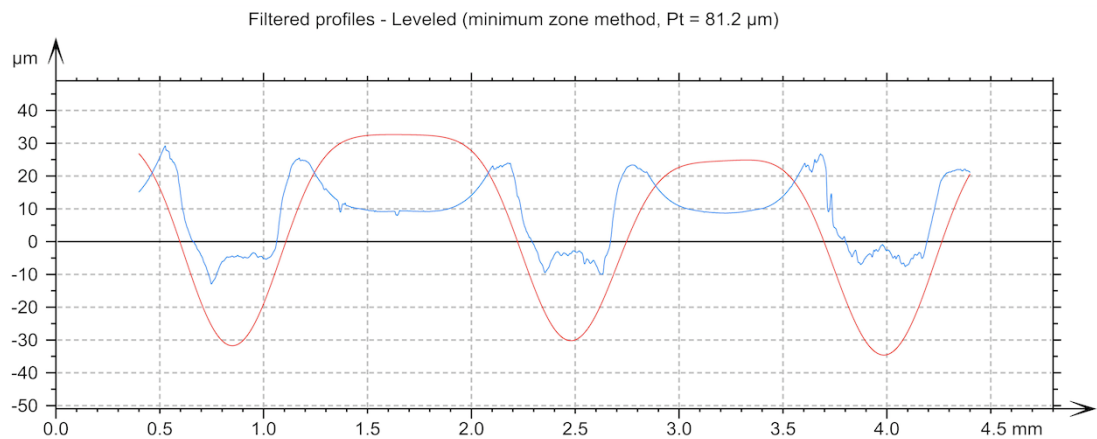
Obrázek 61. Závislost střední hodnoty kontaktního úhlu smáčení na době plazmování;  
PLA, Ul-timaker 2+, horizontální tisk, spodní strana (měřeno pod úhlem 90 °)



Obrázek 62. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená): kombinace PLA, Ultimaker 2+, horizontální tisk, spodní strana, směr X



Obrázek 63. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená): kombinace PLA, Ultimaker 2+, horizontální tisk, spodní strana, směr Y



Obrázek 64. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená): kombinace PLA, Ultimaker 2+, horizontální tisk, spodní strana, směr Z

Tabulka 15. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru  $X$  (materiál PLA, Ultimaker 2+, horizontální tisk, spodní strana)

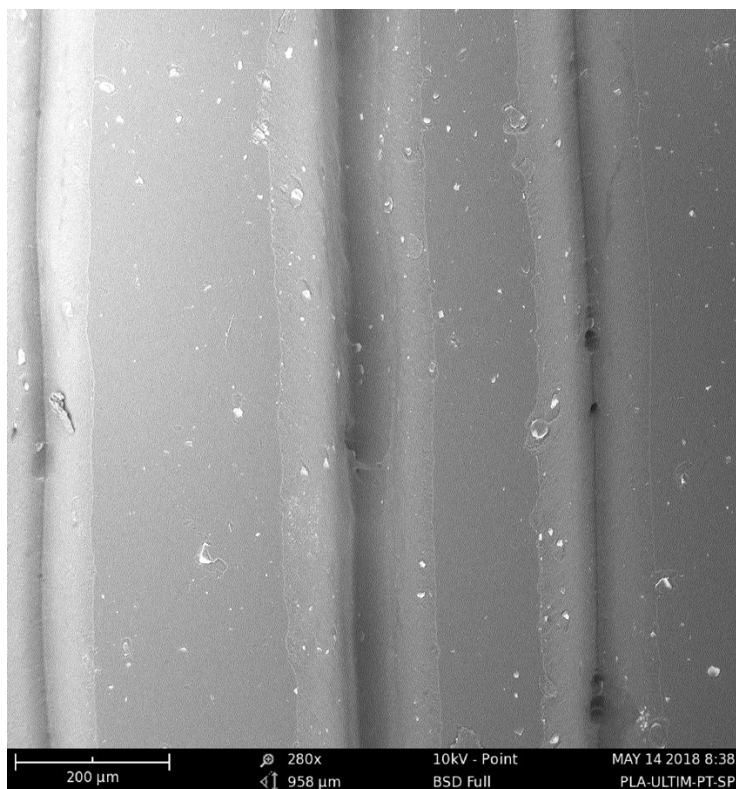
	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 4	vzorek 5	$\mu$	$\sigma_{\mu}$
$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	22,1	14,7	19,6	20,9	13,4	<b>18,1</b>	<b>1,7</b>
$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	80,7	65,6	87,7	85,6	62,9	<b>76,5</b>	<b>5,1</b>
$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	86,6	73,8	92,9	92,5	98,3	<b>88,8</b>	<b>4,2</b>
$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	26,2	18,6	24,3	25,3	17,9	<b>22,5</b>	<b>1,7</b>
$R_{\max}$ [ $\mu\text{m}$ ]	86,6	73,2	92,7	92,5	97,0	<b>88,4</b>	<b>4,1</b>

Tabulka 16. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru  $Y$  (materiál PLA, Ultimaker 2+, horizontální tisk, spodní strana)

	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 4	vzorek 5	$\mu$	$\sigma_{\mu}$
$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	20,9	21,8	21,5	18,6	19,6	<b>20,5</b>	<b>0,6</b>
$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	93,0	88,8	94,5	73,8	86,2	<b>87,3</b>	<b>3,7</b>
$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	112,0	96,5	105,0	78,0	91,8	<b>96,7</b>	<b>5,8</b>
$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	25,4	26,3	26,5	22,6	23,5	<b>24,9</b>	<b>0,8</b>
$R_{\max}$ [ $\mu\text{m}$ ]	112,0	96,5	101,0	78,0	90,9	<b>95,7</b>	<b>5,6</b>

Tabulka 17. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru  $Z$  (materiál PLA, Ultimaker 2+, horizontální tisk, spodní strana)

	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 4	vzorek 5	$\mu$	$\sigma_{\mu}$
$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	9,1	7,9	7,0	8,6	6,3	<b>7,7</b>	<b>0,5</b>
$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	34,5	28,8	28,4	28,3	29,6	<b>29,9</b>	<b>1,2</b>
$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	47,9	38,9	39,2	42,1	42,9	<b>42,2</b>	<b>1,6</b>
$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	10,3	9,5	8,5	9,7	7,6	<b>9,1</b>	<b>0,5</b>
$R_{\max}$ [ $\mu\text{m}$ ]	47,9	33,5	39,2	42,1	42,9	<b>41,1</b>	<b>2,4</b>

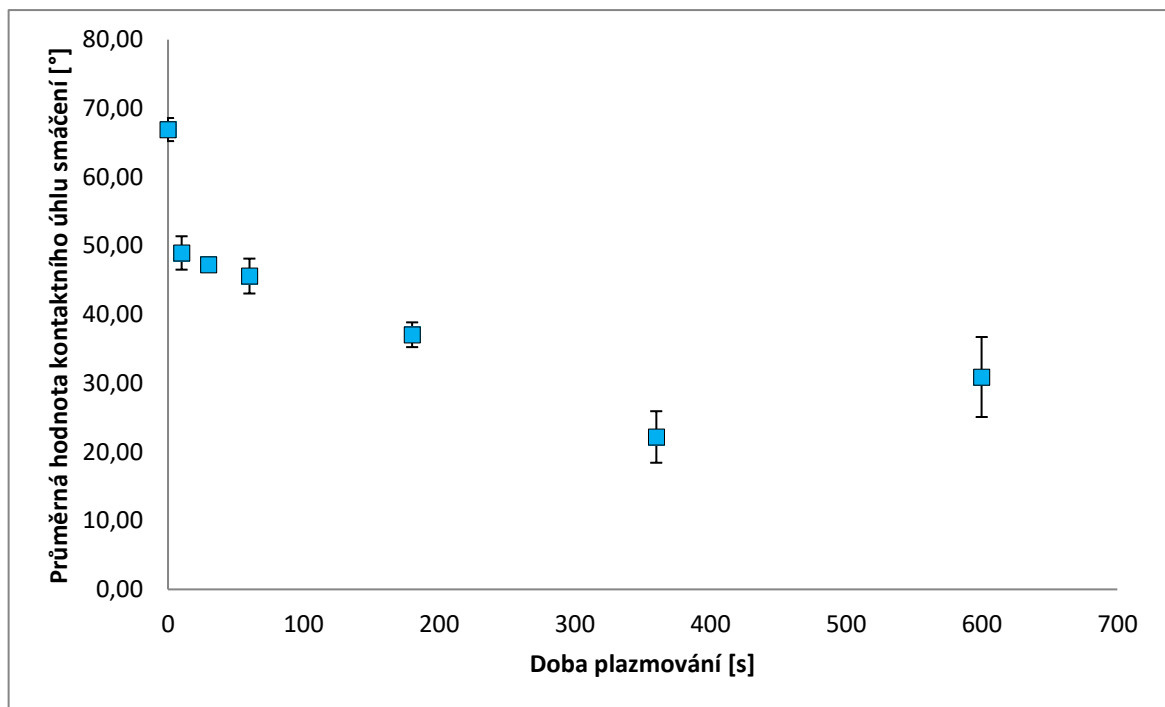


Obrázek 65. SEM snímek – PLA, Ultimaker 2+, horizontální tisk (spodní strana)

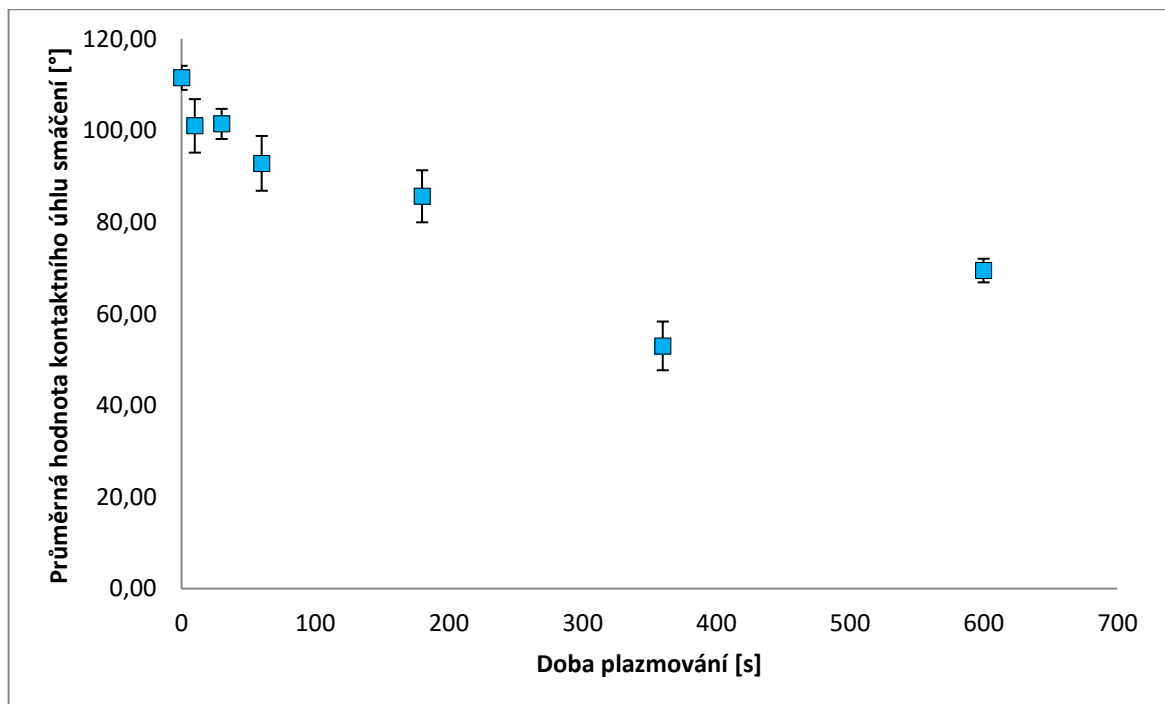


Obrázek 66. SEM snímek (3D rekonstrukce drsnosti): PLA, Ultimaker 2+, horizontální tisk (spodní strana);  $R_z (27,24 \pm 1,41 \mu\text{m})$ ,  $R_a (7,02 \pm 0,13 \mu\text{m})$ ,  $S_a 6,97 \mu\text{m}$

## 8.2.2 Vertikální tisk (PLA, Ultimaker 2+)

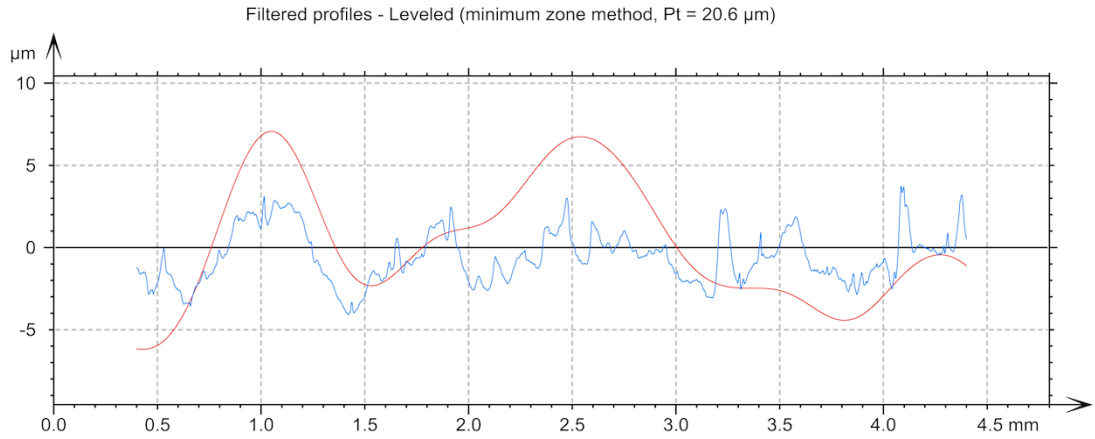


Obrázek 67. Závislost střední hodnoty kontaktního úhlu smáčení na době plazmování; PLA, Ultimaker 2+, vertikální tisk

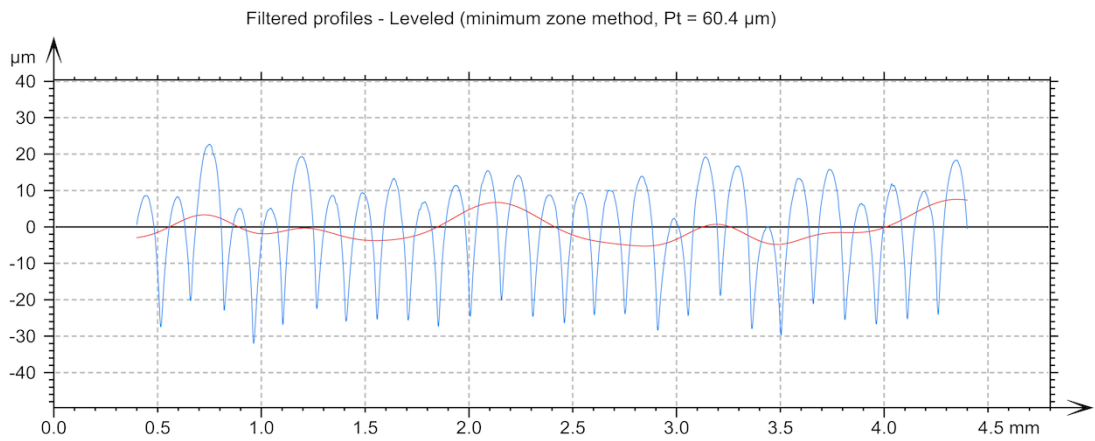


Obrázek 68. Závislost střední hodnoty kontaktního úhlu smáčení na době plazmování; PLA, Ultimaker 2+, vertikální tisk (měřeno pod úhlem 90 °)

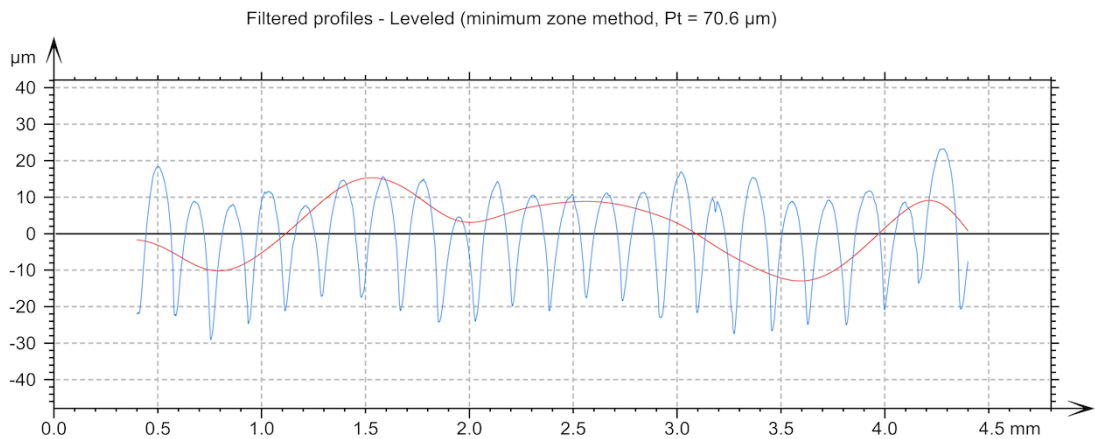




Obrázek 69. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená): PLA, Ultimaker 2+, vertikální tisk, směr X



Obrázek 70. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená): PLA, Ultimaker 2+, vertikální tisk, směr Y



Obrázek 71. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená): PLA, Ultimaker 2+, vertikální tisk, směr Z

Tabulka 18. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru  $X$  (materiál PLA, Ultimaker 2+, vertikální tisk)

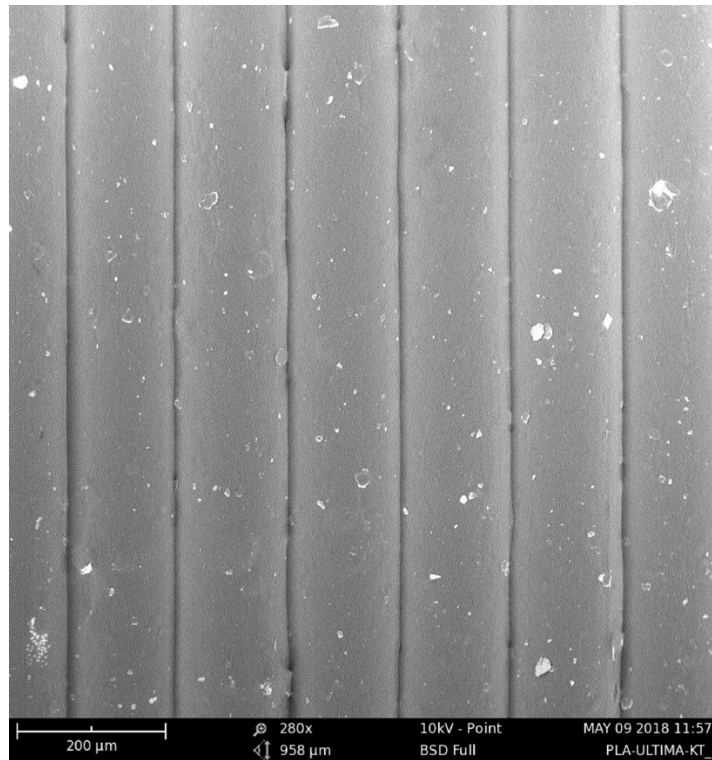
	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 4	vzorek 5	$\mu$	$\sigma_\mu$
$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	1,3	0,9	1,0	1,0	1,3	<b>1,1</b>	<b>0,1</b>
$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	6,2	5,2	8,0	5,2	6,2	<b>6,1</b>	<b>0,5</b>
$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	7,8	8,8	11,9	8,6	10,0	<b>9,4</b>	<b>0,7</b>
$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	1,6	1,1	1,4	1,3	1,5	<b>1,4</b>	<b>0,1</b>
$R_{\text{max}}$ [ $\mu\text{m}$ ]	6,7	8,7	11,6	8,3	10,0	<b>9,1</b>	<b>0,8</b>

Tabulka 19. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru  $Y$  (materiál PLA, Ultimaker 2+, vertikální tisk)

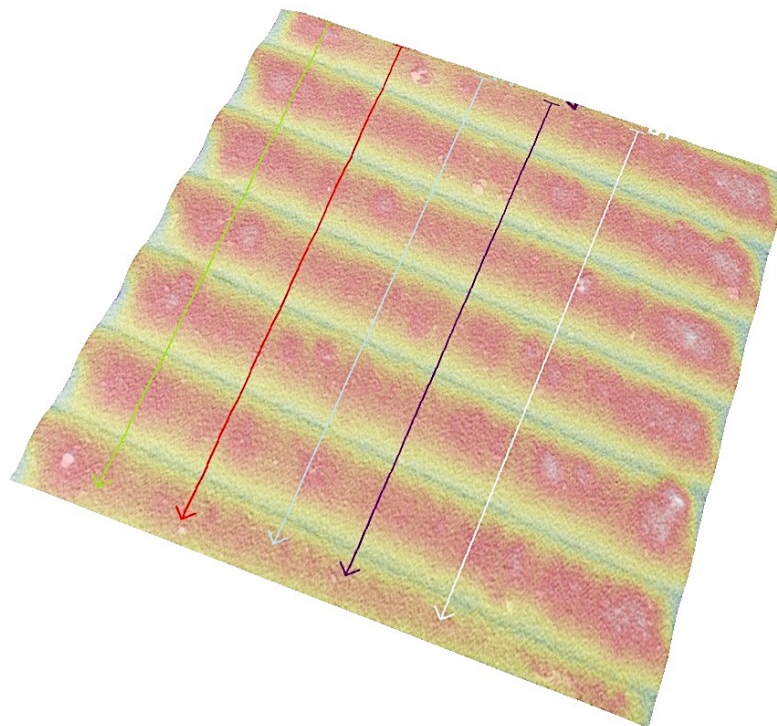
	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 4	vzorek 5	$\mu$	$\sigma_\mu$
$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	9,8	9,4	9,3	9,0	8,6	<b>9,2</b>	<b>0,2</b>
$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	47,4	44,4	43,6	42,4	40,9	<b>43,7</b>	<b>1,1</b>
$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	54,7	50,3	60,9	48,3	52,7	<b>53,4</b>	<b>2,2</b>
$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	11,9	11,3	11,2	10,8	10,4	<b>11,1</b>	<b>0,3</b>
$R_{\text{max}}$ [ $\mu\text{m}$ ]	54,7	50,3	60,9	45,9	52,7	<b>52,9</b>	<b>2,5</b>

Tabulka 20. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru  $Z$  (materiál PLA, Ultimaker 2+, vertikální tisk)

	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 4	vzorek 5	$\mu$	$\sigma_\mu$
$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	10,4	10,3	9,7	9,7	9,7	<b>10,0</b>	<b>0,2</b>
$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	44,7	43,2	42,5	42,5	43,6	<b>43,3</b>	<b>0,4</b>
$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	49,3	48,4	48,1	48,1	52,3	<b>49,2</b>	<b>0,8</b>
$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	12,3	12,2	11,5	11,5	11,6	<b>11,8</b>	<b>0,2</b>
$R_{\text{max}}$ [ $\mu\text{m}$ ]	49,3	47,0	45,7	45,7	48,2	<b>47,2</b>	<b>0,7</b>



Obrázek 72. SEM snímek PLA, Ultimaker 2+, vertikální tisk



Obrázek 73. SEM snímek (3D rekonstrukce povrchu), PLA, Ultimaker 2+, vertikální tisk;

$R_z (11,17 \pm 0,35 \mu\text{m})$ ,  $R_a (2,81 \pm 0,09 \mu\text{m})$ ,  $S_a 3,10 \mu\text{m}$ .

### 8.3 Výroba vzorků ABS pomocí 3D tiskárny Original Prusa i3 MK3

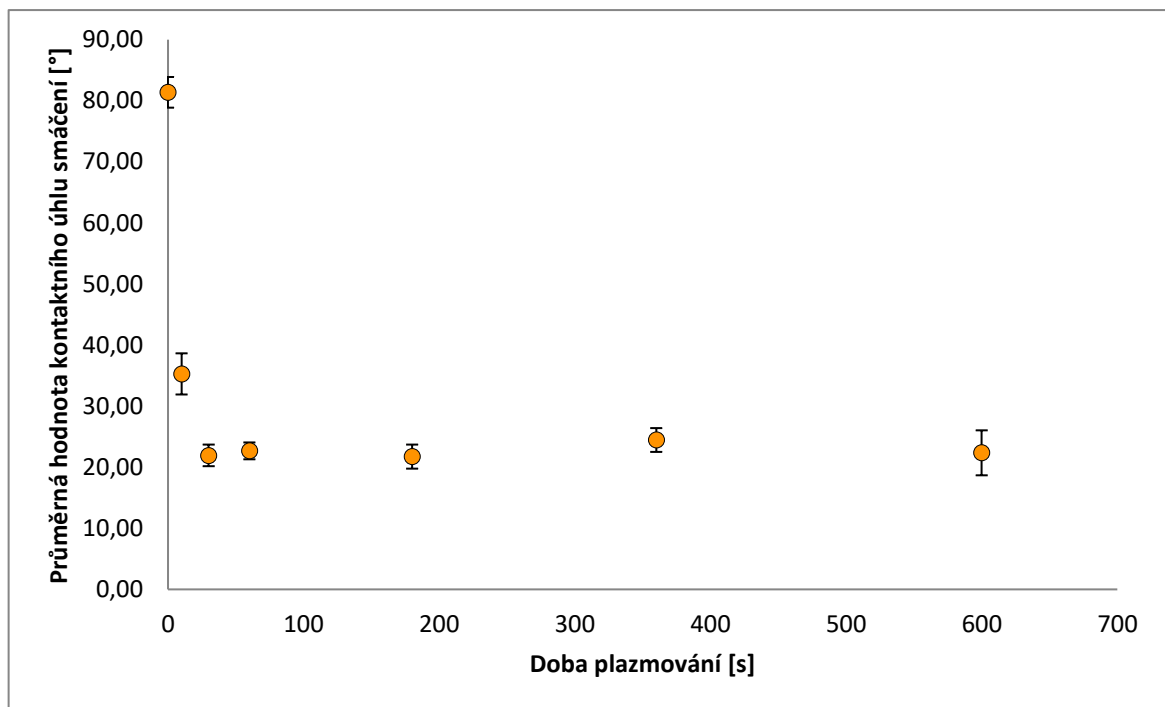
Na obrázcích 74 a 75 je uvedena závislost kontaktního úhlu smáčení na době plazmatické úpravy. Oproti materiálu PLA je zde patrný výrazný nárůst povrchové energie, kdy při relativně krátkých dobách plazmatické úpravy dochází k poklesu kontaktního úhlu k hodnotě 20 °. Kontaktní úhly se výrazně neliší ani v různých směrech analýzy kapky, tj. na horní straně dílce se anizotropie povrchových vlastností neprojevuje. Průměrná drsnost  $R_a$  dosahuje hodnot okolo 5  $\mu\text{m}$  (Tab. 21, 22, 23). V podstatě identických výsledků bylo dosaženo u spodní strany dílce (Obr. 82 a 83). Lze tedy konstatovat, že u materiálu ABS nemusí být vliv povrchové topografie na hodnotu kontaktního úhlu smáčení tak výrazný jako u PLA. Z hodnot  $R_a$  (Tab. 24, 25 a 26) lze usuzovat jistou anizotropii v topografii povrchu, která ale nemá na hodnotu kontaktního úhlu větší vliv. Na obrázcích 79 a 87 jsou uvedeny SEM snímky povrchu horní a spodní strany dílce, na obrázcích 80 a 88 jsou znázorněny 3D rekonstrukce SEM snímků pro příslušnou stranu dílce, včetně stanovených parametrů drsnosti. Nejsou pozorovány výraznější odchylky od vzhledu materiálu PLA.

V případě vzorků tištěných ve vertikální orientaci se opakuje situace podobná té u vertikálního tisku PLA, tedy výrazný rozdíl v hodnotách kontaktních úhlů v závislosti na směru pohledu kamery na kapku (Obrázky 90 a 91), stejně tak je jasně patrná anizotropie drsnosti (viz Tab. 27, 28 a 29).

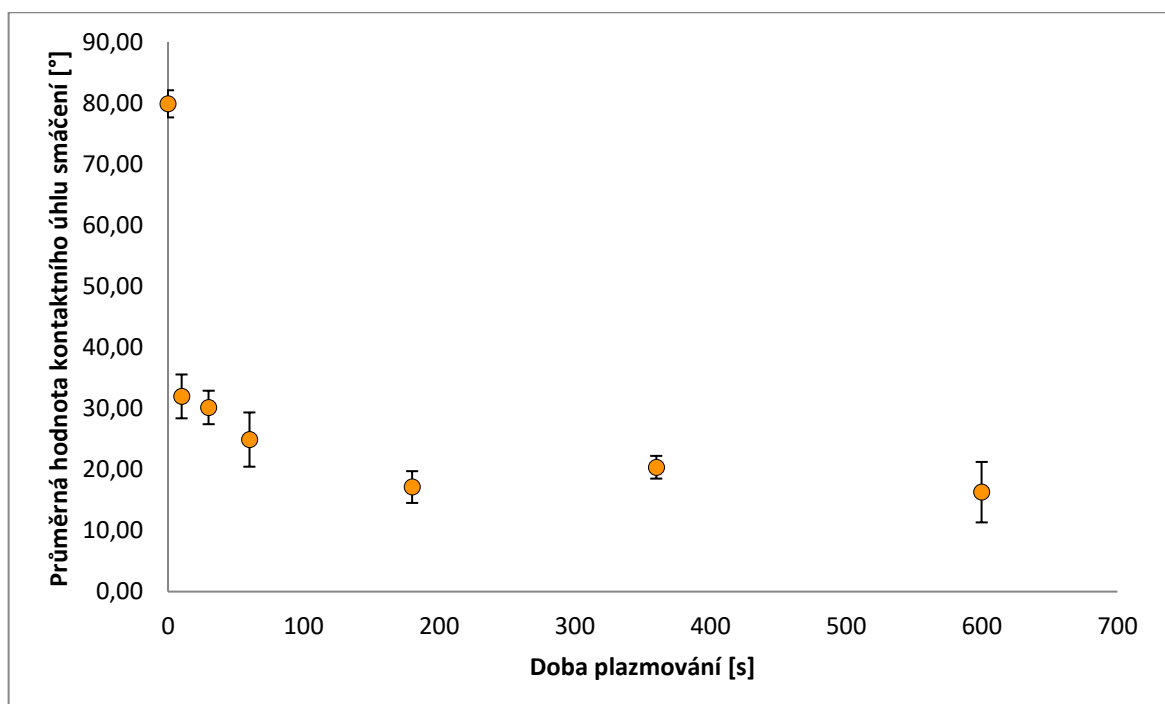
U vzorků ABS byla navíc provedena doplňková analýza povrchu pomocí optického povrchového profilometru (Obr. 81, 89, 97). Tímto přístrojem lze na relativně velké ploše vyhodnotit plošné parametry drsnosti, včetně těch hybridních. Hybridní parametr  $S_{dr}$  je velmi důležitý, lze jej využít k výpočtu skutečné plochy povrchu, kde bude zahrnut i vliv drsnosti, viz přístup dle Wenzela. Korekční faktor  $r$ , používaný ve Wenzelově teorii pro výpočet skutečného (ideálního) kontaktního úhlu smáčení (oproštěného od vlivů drsnosti povrchu) lze snadno vypočítat jako  $r = 1 + S_{dr}$ . Je tedy zřejmé že  $S_{dr}$  vyjadřuje procentní nárůst povrchu vlivem drsnosti. Zajímavé je srovnání parametrů  $S_{dr}$  u jednotlivých typů tisku. V případě horní strany dílce je nárůst téměř zanedbatelný (okolo 3 %). U vertikálního tisku již jde o 18 procent a nejpřekvapivější je 17% nárůst u spodní strany dílce. V první tiskové vrstvě zjevně jsou jednotlivá vlákna vytištěna s drobnou mezerou, a tím dochází k nárůstu reálného povrchu. Reálný dopad není v tomto případě velký. Spodní část vzorku většinou není pohledová, ani se nejedná o funkční plochu. Důležitý je nárůst povrchu u bočních stran dílce, což odpovídá vertikálně tištěnému vzorku.

Na základě zjištěného skutečného povrchu by následně bylo možno přepočítat experimentální kontaktní úhly na skutečné (ideální) kontaktní úhly. Ty budou vždy větší než ty experimentální (viz rovnice 7). V reálné situaci bude k hysterezi kontaktního úhlu přispívat ještě nehomogenita v chemickém složení povrchu, což je faktor mnohem hůře hodnotitelný.

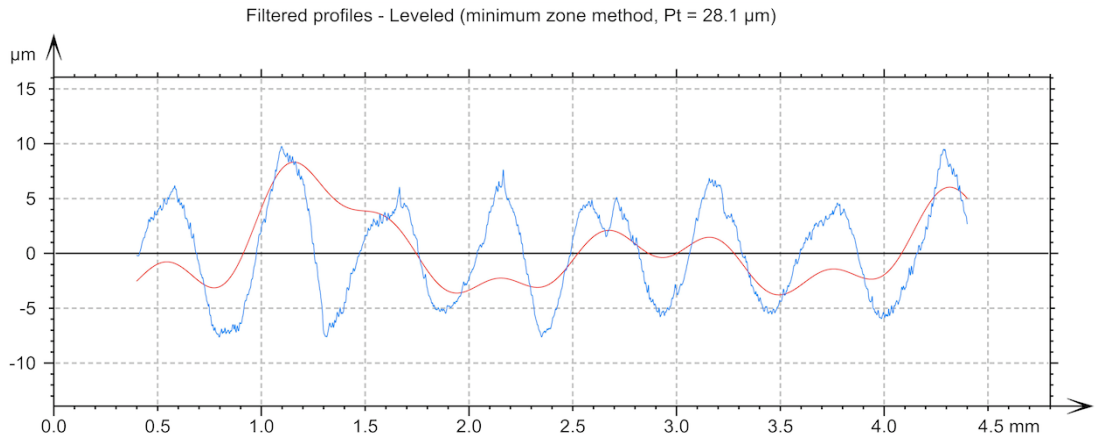
### 8.3.1 Horizontální tisk (ABS, Prusa i3 MK3)



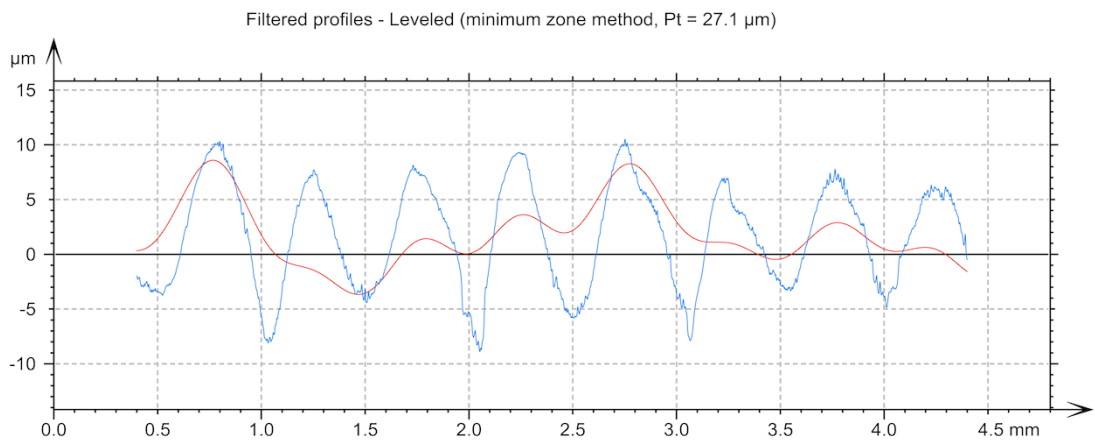
Obrázek 74. Závislost střední hodnoty kontaktního úhlu smáčení na době plazmování; ABS, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, horní strana



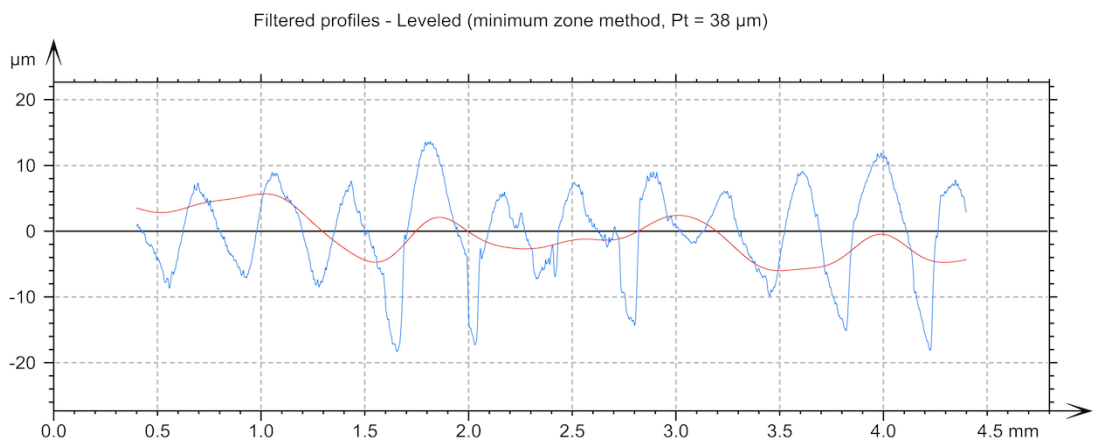
Obrázek 75. Závislost střední hodnoty kontaktního úhlu smáčení na době plazmování; ABS, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, horní strana (měřeno pod úhlem 90 °)



Obrázek 76. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená): ABS, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, horní strana, směr X



Obrázek 77. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená): ABS, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, horní strana, směr Y



Obrázek 78. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená): ABS, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, horní strana, směr Z

Tabulka 21. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru  $X$  (ABS, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, horní strana)

	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 4	vzorek 5	$\mu$	$\sigma_\mu$
$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	4,9	5,4	4,2	4,0	3,8	<b>4,5</b>	<b>0,3</b>
$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	22,7	23,0	20,3	16,9	15,0	<b>19,6</b>	<b>1,6</b>
$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	30,8	30,3	27,1	26,1	17,4	<b>26,3</b>	<b>2,4</b>
$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	6,0	6,5	5,2	4,7	4,4	<b>5,4</b>	<b>0,4</b>
$R_{\text{max}}$ [ $\mu\text{m}$ ]	28,3	30,3	23,6	26,1	17,4	<b>25,1</b>	<b>2,2</b>

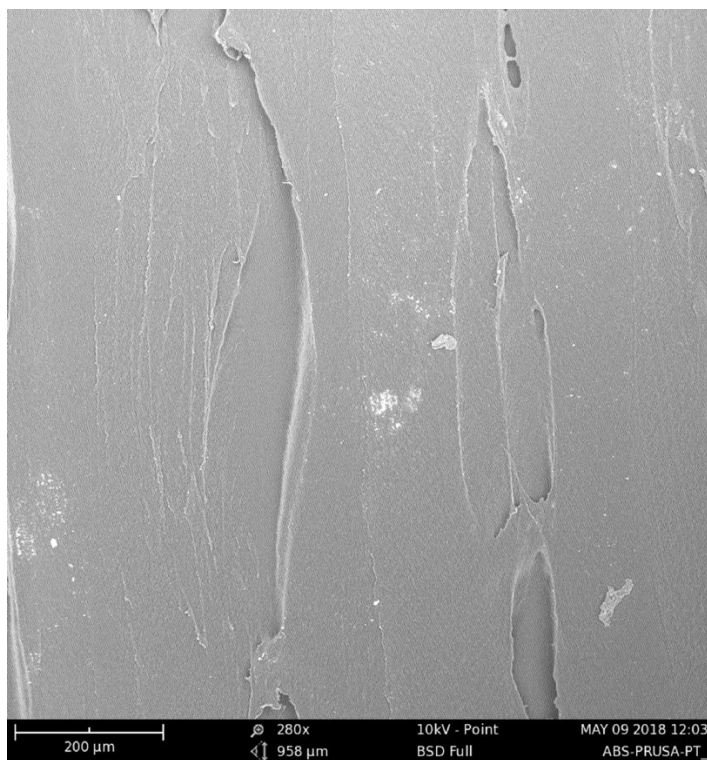
Tabulka 22. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru  $Y$  (ABS, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, horní strana)

	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 4	vzorek 5	$\mu$	$\sigma_\mu$
$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	4,7	4,7	4,1	6,8	3,3	<b>4,7</b>	<b>0,6</b>
$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	21,1	20,4	15,9	27,7	13,7	<b>19,8</b>	<b>2,4</b>
$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	26,7	26,1	19,4	33,1	16,3	<b>24,3</b>	<b>3,0</b>
$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	5,6	5,6	4,6	8,0	3,9	<b>5,5</b>	<b>0,7</b>
$R_{\text{max}}$ [ $\mu\text{m}$ ]	26,7	26,1	19,4	30,3	15,9	<b>23,7</b>	<b>2,6</b>

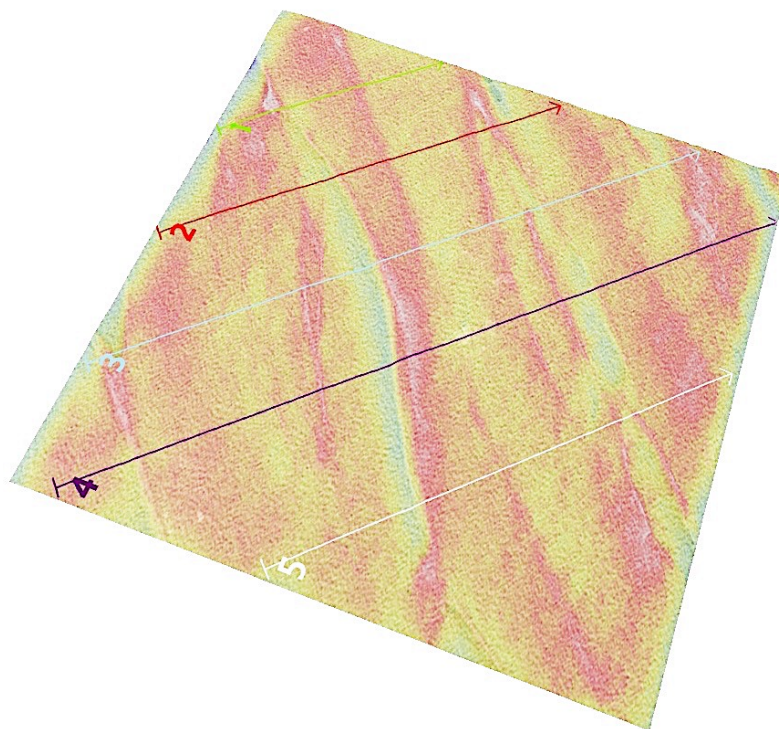
Tabulka 23. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru  $Z$  (ABS, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, horní strana)

	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 4	vzorek 5	$\mu$	$\sigma_\mu$
$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	5,3	4,5	5,1	5,4	5,7	<b>5,2</b>	<b>0,2</b>
$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	24,1	22,0	24,5	25,5	27,7	<b>24,8</b>	<b>0,9</b>
$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	28,3	30,9	30,0	31,9	35,8	<b>31,4</b>	<b>1,3</b>
$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	6,3	5,5	6,2	6,6	7,0	<b>6,3</b>	<b>0,2</b>
$R_{\text{max}}$ [ $\mu\text{m}$ ]	28,2	30,9	30,0	31,9	33,0	<b>30,8</b>	<b>0,8</b>

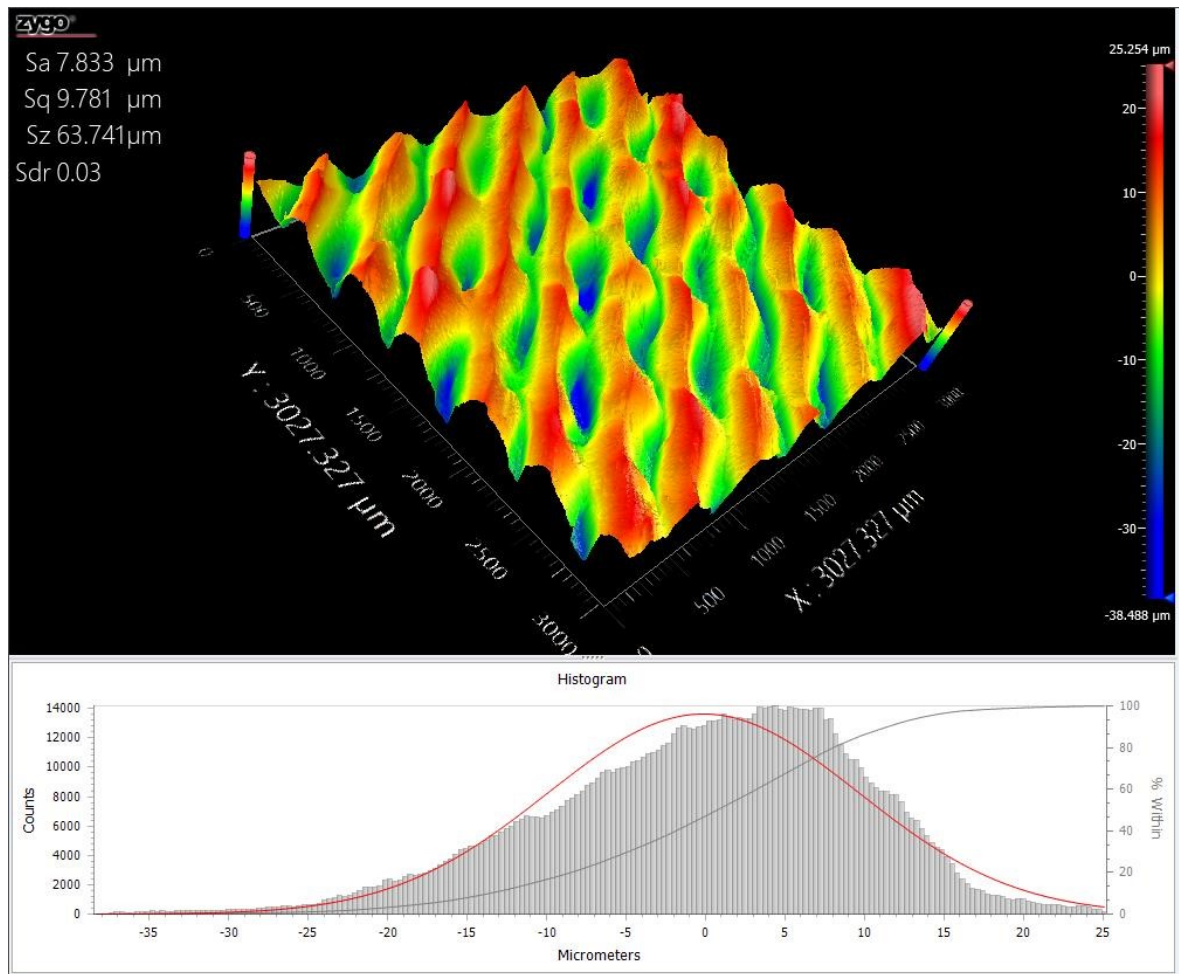




Obrázek 79. SEM snímek – ABS, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk (horní strana)



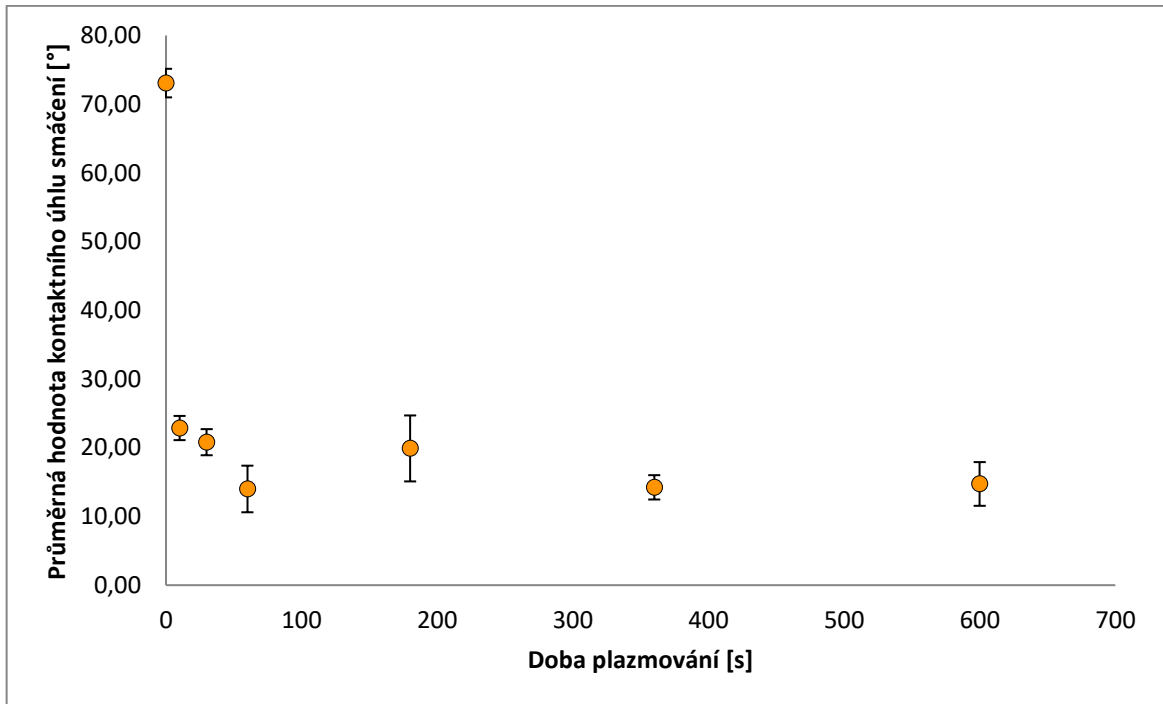
Obrázek 80. SEM snímek (3D rekonstrukce drsnosti): ABS, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk (horní strana);  $R_z (6,75 \pm 0,55 \mu\text{m})$ ,  $R_a (1,36 \pm 0,05 \mu\text{m})$ ,  $S_a 1,56 \mu\text{m}$



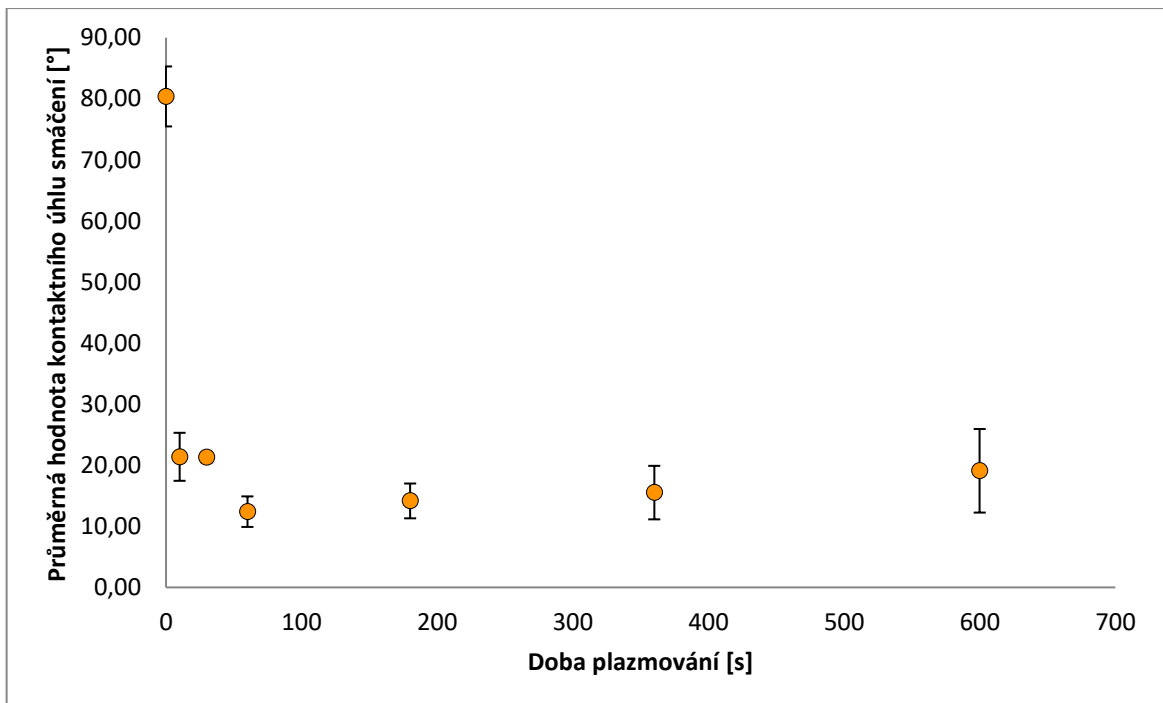
Obrázek 81. 3D rekonstrukce povrchu optickým povrchovým profilometrem, 3 x 3 mm, ABS, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk (horní strana)

Poměr mezi reálným a půdorysným povrchem  $S_{dr}$  vyjadřuje o kolik se plocha povrchu zvětší vlivem drsnosti. Tento parametr je obzvláště užitečný ve studiích smáčivosti, protože může být použit k výpočtu drsnosti  $r$  pomocí vztahu:<sup>142</sup>

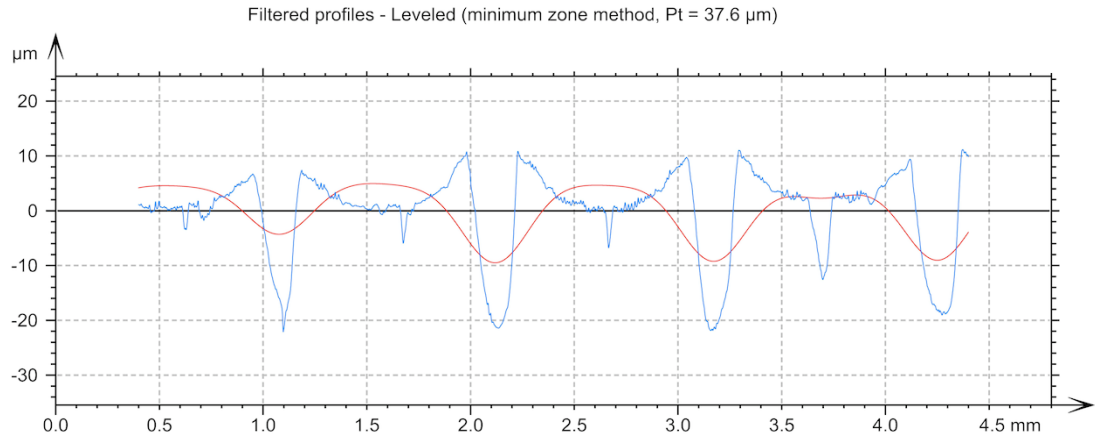
$$r = 1 + \frac{S_{dr}}{100} \quad (11)$$



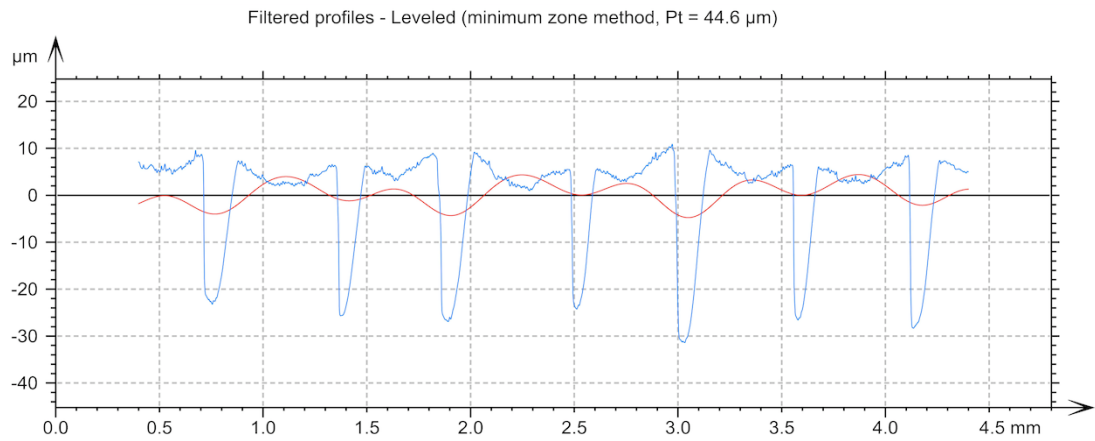
Obrázek 82. Závislost střední hodnoty kontaktního úhlu smáčení na době plazmování;  
ABS, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, spodní strana



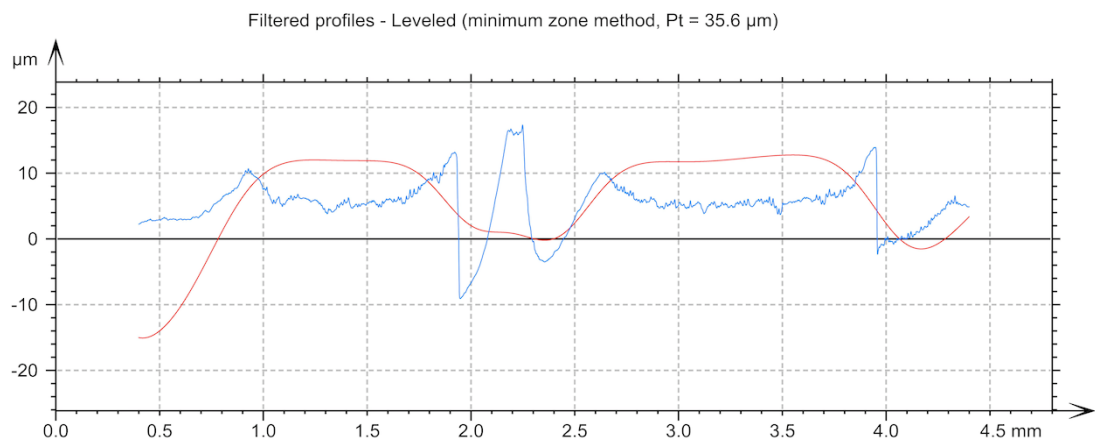
Obrázek 83. Závislost střední hodnoty kontaktního úhlu smáčení na době plazmování;  
ABS, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, spodní strana (měřeno pod úhlem 90 °)



Obrázek 84. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená): ABS, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, spodní strana, směr X



Obrázek 85. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená): ABS, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, spodní strana, směr Y



Obrázek 86. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená): ABS, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, spodní strana, směr Z

Tabulka 24. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru  $X$  (ABS, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, spodní strana)

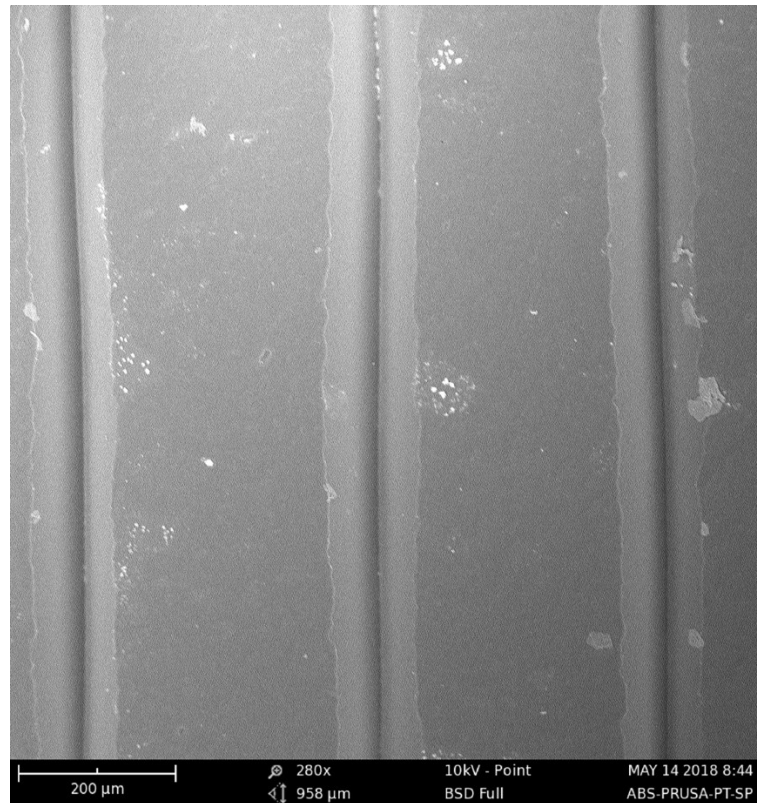
	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 4	vzorek 5	$\mu$	$\sigma_\mu$
$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	5,2	5,7	7,0	7,5	7,7	<b>6,6</b>	<b>0,5</b>
$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	24,1	28,3	26,2	36,9	37,1	<b>30,5</b>	<b>2,7</b>
$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	27,7	33,2	30,1	40,8	39,8	<b>34,3</b>	<b>2,6</b>
$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	6,7	7,6	8,2	9,7	10,2	<b>8,5</b>	<b>0,7</b>
$R_{\text{max}}$ [ $\mu\text{m}$ ]	27,7	32,9	28,4	39,9	39,1	<b>33,6</b>	<b>2,6</b>

Tabulka 25. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru  $Y$  (ABS, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, spodní strana)

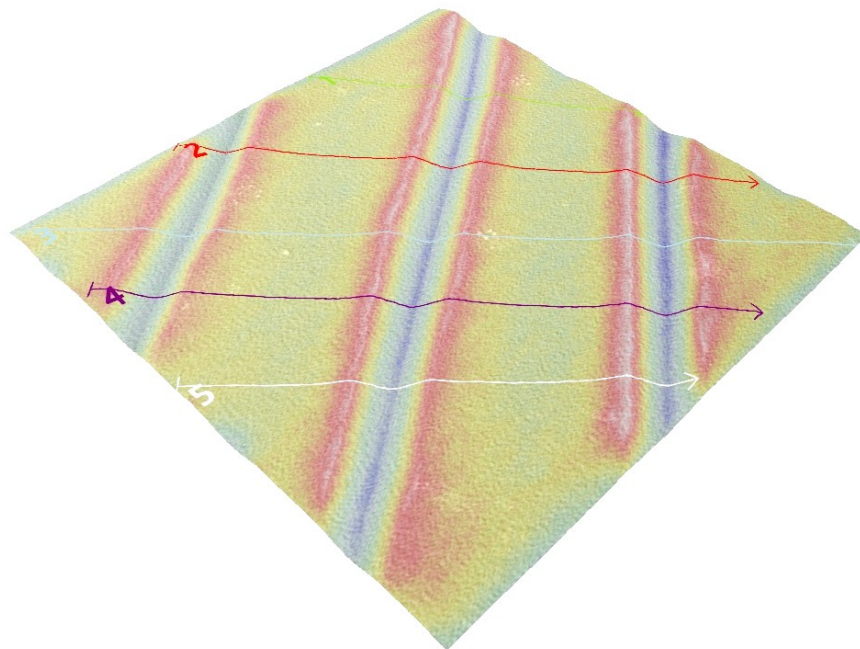
	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 4	vzorek 5	$\mu$	$\sigma_\mu$
$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	5,9	6,2	5,5	6,7	7,6	<b>6,4</b>	<b>0,4</b>
$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	25,3	27,7	28,5	30,6	36,2	<b>29,7</b>	<b>1,8</b>
$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	37,8	33,7	44,0	36,7	42,2	<b>38,9</b>	<b>1,9</b>
$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	7,4	7,7	7,6	8,6	10,2	<b>8,3</b>	<b>0,5</b>
$R_{\text{max}}$ [ $\mu\text{m}$ ]	36,2	32,4	44,0	36,7	42,2	<b>38,3</b>	<b>2,1</b>

Tabulka 26. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru  $Z$  (ABS, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, spodní strana)

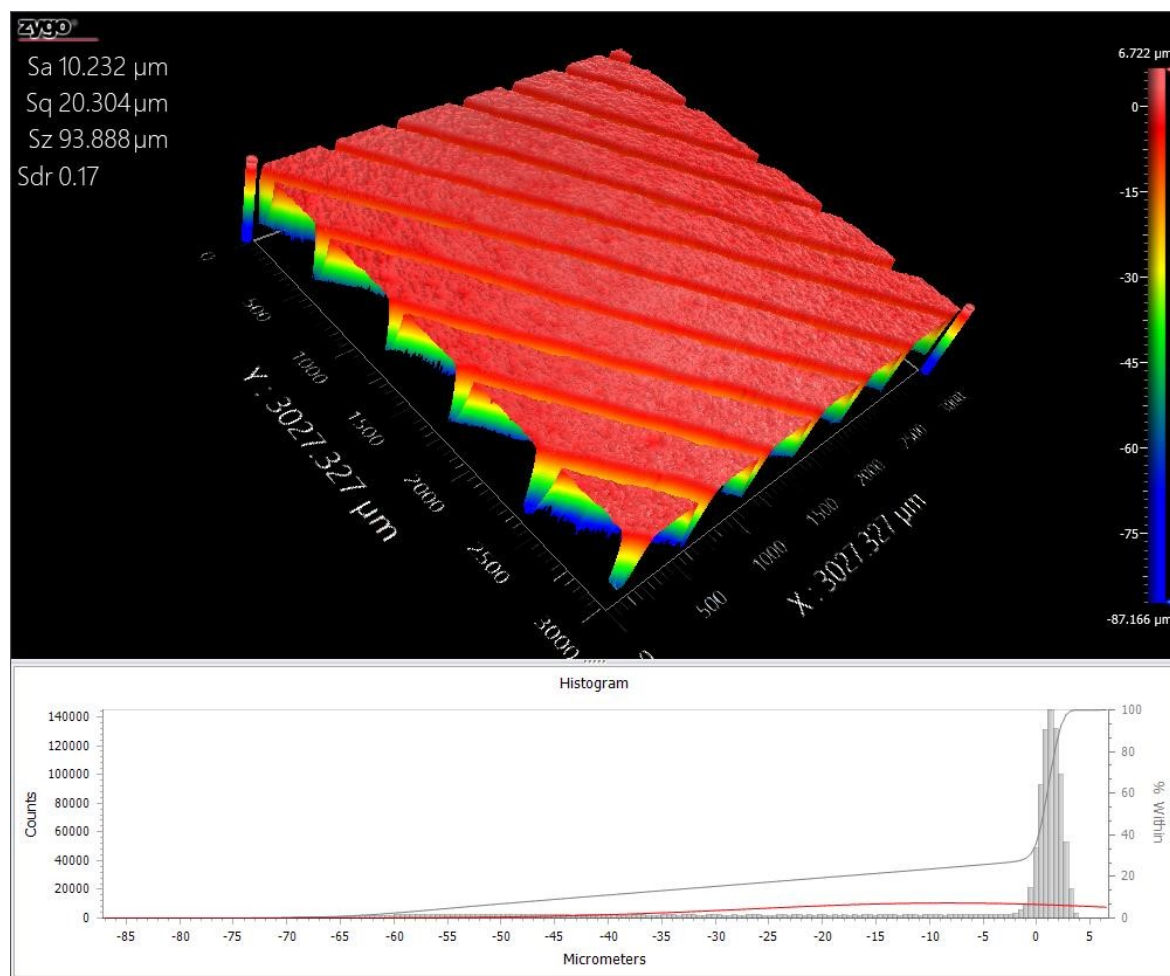
	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 4	vzorek 5	$\mu$	$\sigma_\mu$
$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	1,7	1,8	2,7	1,7	2,6	<b>2,1</b>	<b>0,2</b>
$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	9,5	8,7	14,7	9,1	13,8	<b>11,2</b>	<b>1,3</b>
$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	22,8	17,0	26,4	28,0	28,7	<b>24,6</b>	<b>2,2</b>
$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	2,2	2,2	3,5	2,1	3,6	<b>2,7</b>	<b>0,3</b>
$R_{\text{max}}$ [ $\mu\text{m}$ ]	22,8	17,0	24,0	28,0	23,9	<b>23,1</b>	<b>1,8</b>



Obrázek 87. SEM snímek – ABS, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk (spodní strana)

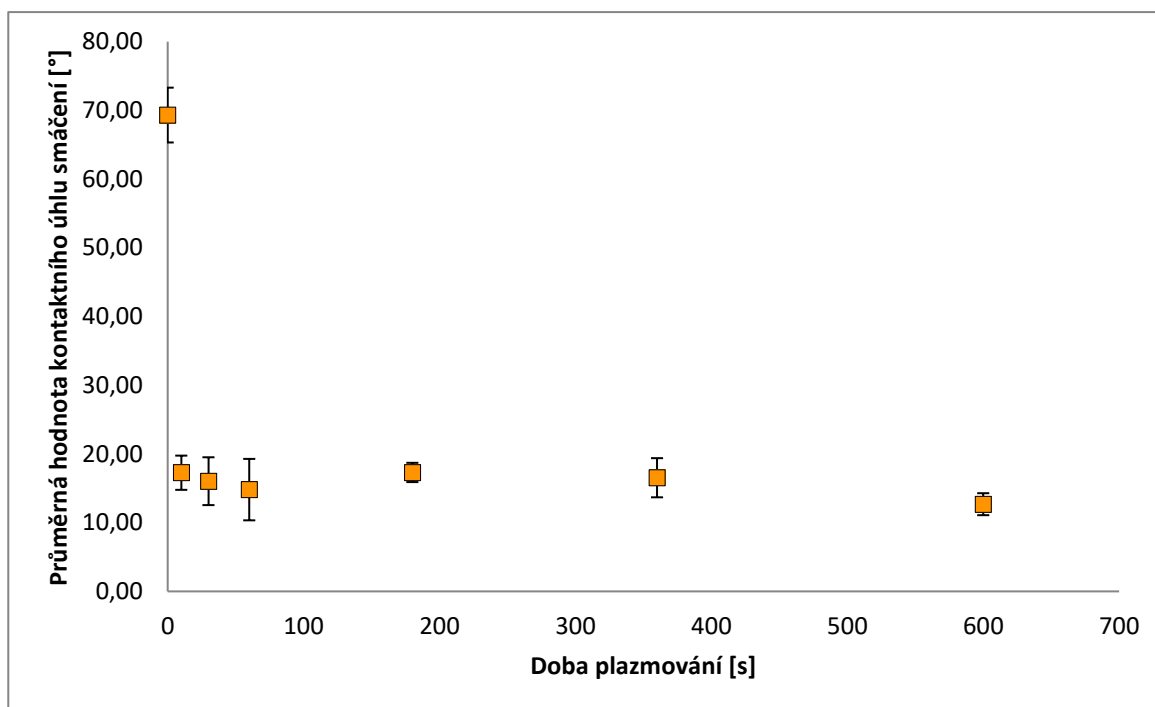


Obrázek 88. SEM snímek (3D rekonstrukce drsnosti): pro ABS, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk (spodní strana);  $R_z (20,79 \pm 1,74 \mu\text{m})$ ,  $R_a (4,61 \pm 0,22 \mu\text{m})$ ,  $S_a 4,89 \mu\text{m}$

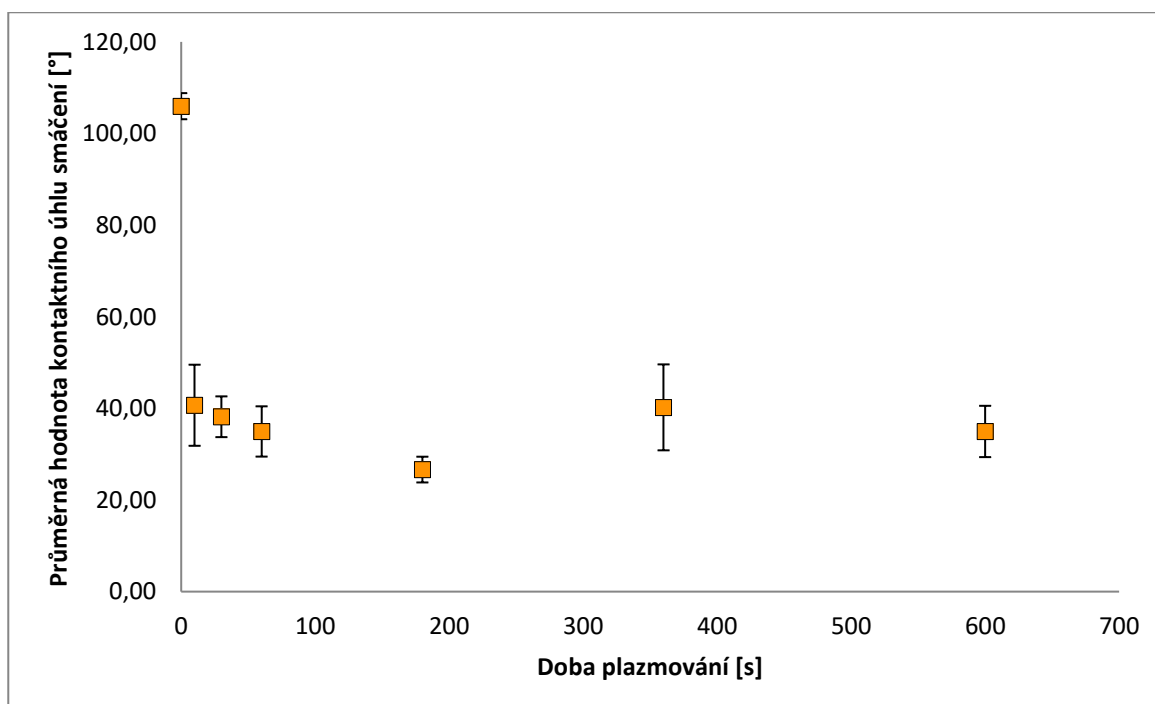


Obrázek 89. 3D rekonstrukce povrchu optickým povrchovým profilometrem; 3 x 3 mm, ABS, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk (spodní strana)

## 8.3.2 Vertikální tisk (ABS, Prusa i3 MK3)

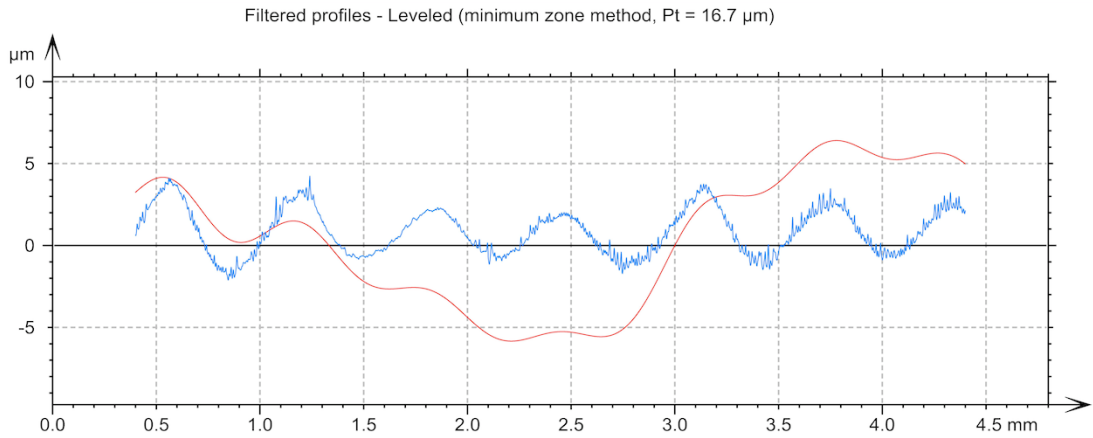


Obrázek 90. Závislost střední hodnoty kontaktního úhlu smáčení na době plazmování;  
ABS, Original Prusa i3 MK3, vertikální tisk

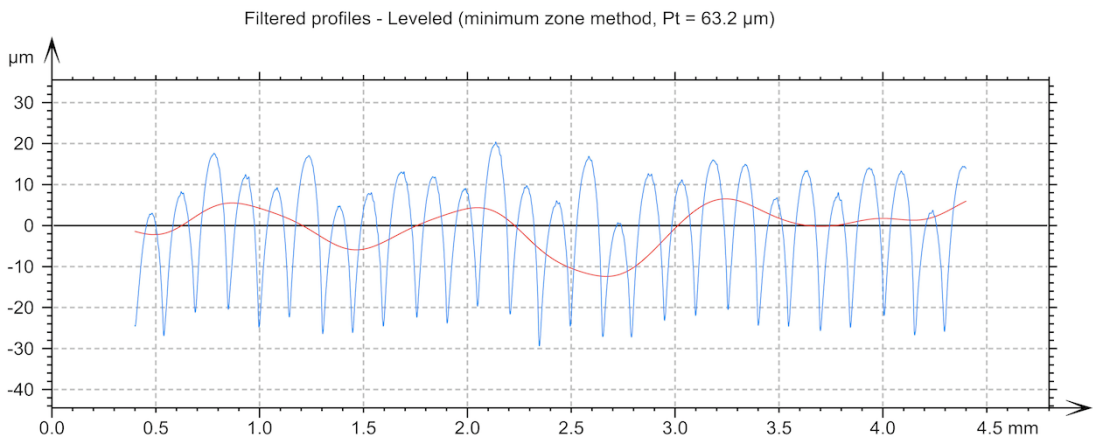


Obrázek 91. Závislost střední hodnoty kontaktního úhlu smáčení na době plazmování;  
ABS, Original Prusa i3 MK3, vertikální tisk (měřeno pod úhlem 90 °)

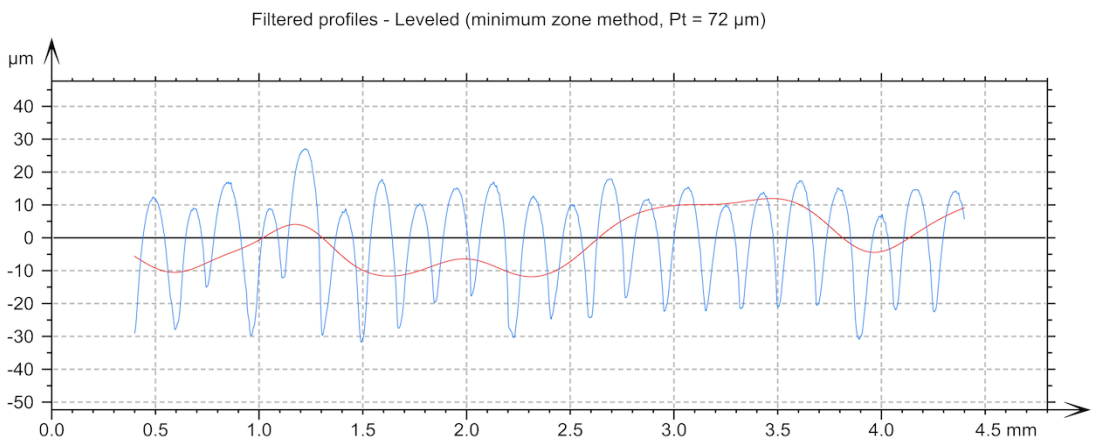




Obrázek 92. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená): ABS, Original Prusa i3 MK3, vertikální tisk, směr X



Obrázek 93. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená): ABS, Original Prusa i3 MK3, vertikální tisk, směr Y



Obrázek 94. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená): ABS, Original Prusa i3 MK3, vertikální tisk, směr Z

Tabulka 27. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru  $X$  (ABS, Original Prusa i3 MK3, vertikální tisk)

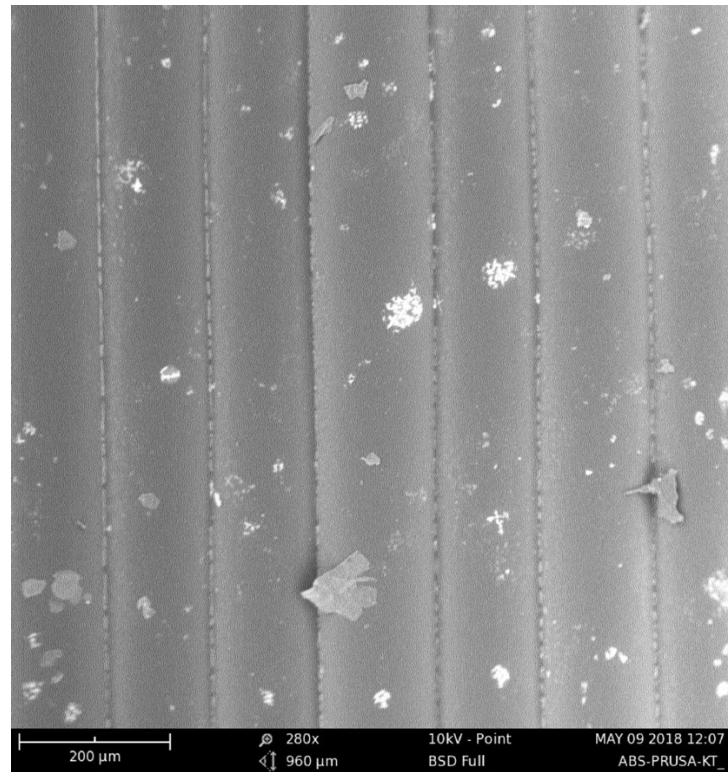
	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 4	vzorek 5	$\mu$	$\sigma_\mu$
$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,9	1,0	0,6	0,9	1,2	<b>0,9</b>	<b>0,1</b>
$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	4,0	5,1	2,4	3,8	4,9	<b>4,1</b>	<b>0,5</b>
$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	5,4	9,0	2,9	4,7	6,3	<b>5,6</b>	<b>1,0</b>
$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	1,1	1,2	0,7	1,1	1,4	<b>1,1</b>	<b>0,1</b>
$R_{\text{max}}$ [ $\mu\text{m}$ ]	5,4	7,9	2,7	4,5	6,2	<b>5,3</b>	<b>0,9</b>

Tabulka 28. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru  $Y$  (ABS, Original Prusa i3 MK3, vertikální tisk)

	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 4	vzorek 5	$\mu$	$\sigma_\mu$
$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	9,5	9,6	9,4	9,3	10,6	<b>9,7</b>	<b>0,2</b>
$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	45,2	43,9	44,0	42,2	49,4	<b>44,9</b>	<b>1,2</b>
$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	50,2	49,8	47,1	48,0	53,6	<b>49,7</b>	<b>1,1</b>
$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	11,4	11,5	11,3	11,2	12,6	<b>11,6</b>	<b>0,3</b>
$R_{\text{max}}$ [ $\mu\text{m}$ ]	48,6	49,8	46,8	46,6	51,2	<b>48,6</b>	<b>0,9</b>

Tabulka 29. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru  $Z$  (ABS, Original Prusa i3 MK3, vertikální tisk)

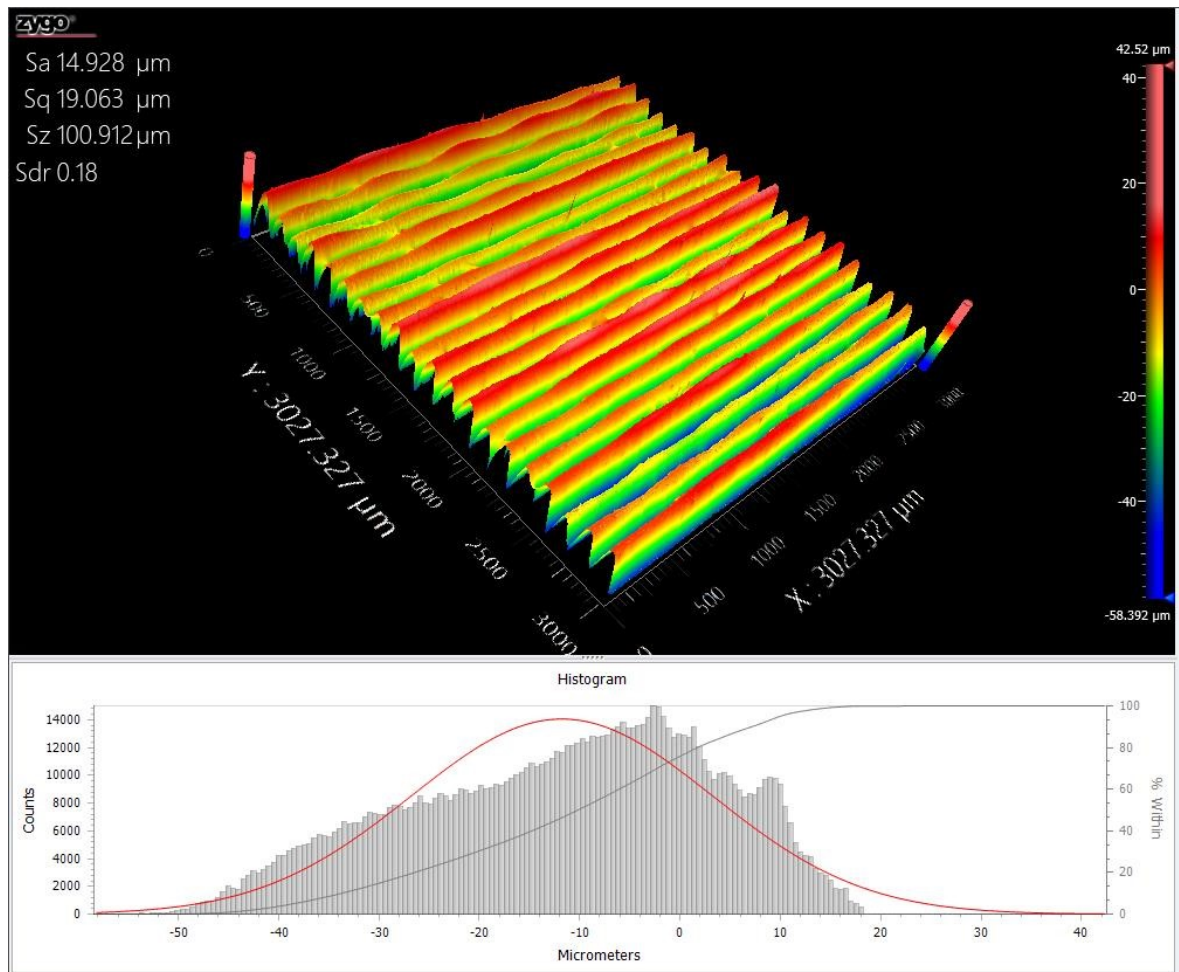
	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 4	vzorek 5	$\mu$	$\sigma_\mu$
$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	11,1	10,5	10,7	10,4	11,5	<b>10,8</b>	<b>0,2</b>
$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	43,3	41,4	43,1	43,4	49,9	<b>44,2</b>	<b>1,5</b>
$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	45,8	44,5	46,0	48,6	58,8	<b>48,7</b>	<b>2,6</b>
$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	12,8	12,2	12,5	12,2	13,6	<b>12,7</b>	<b>0,3</b>
$R_{\text{max}}$ [ $\mu\text{m}$ ]	45,8	44,5	45,2	46,7	58,8	<b>48,2</b>	<b>2,7</b>



Obrázek 95. SEM snímek – ABS, Original Prusa i3 MK3, vertikální tisk



Obrázek 96. SEM snímek (3D rekonstrukce drsnosti): pro ABS, Original Prusa i3 MK3, vertikální tisk;  $R_z$  ( $14,28 \pm 0,14 \mu\text{m}$ ),  $R_a$  ( $3,83 \pm 0,06 \mu\text{m}$ ),  $S_a$   $3,73 \mu\text{m}$



Obrázek 97. 3D rekonstrukce povrchu optickým povrchovým profilometrem; 3 x 3 mm, ABS, Original Prusa i3 MK3, vertikální tisk

#### 8.4 Výroba vzorků ABS pomocí 3D tiskárny Ultimaker 2+

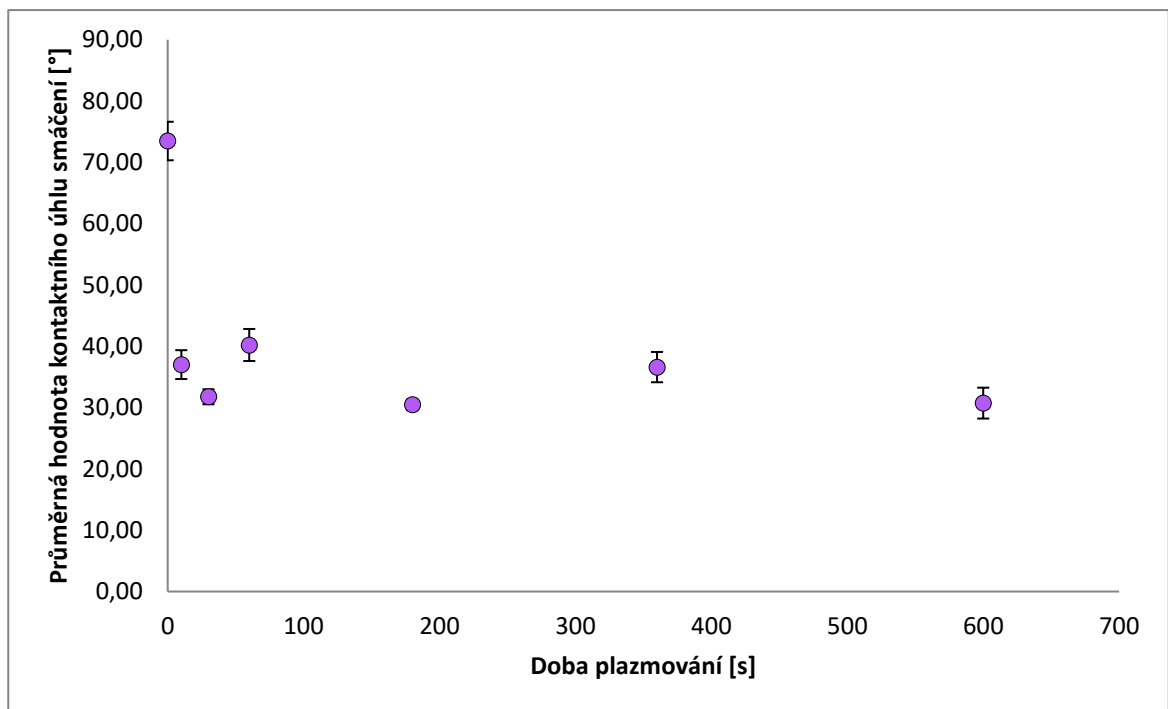
Na obrázcích 98 a 99 je znázorněna závislost kontaktního úhlu smáčení na době plazmatické úpravy (horní strana). U tohoto materiálu není nárůst povrchové energie tak výrazný jako u vzorků ABS z 3D tiskárny Original Prusa i3 MK3, kontaktní úhel vody klesá pouze mírně pod  $40^\circ$  i po plazmatické úpravě 600 sekund. Průměrná drsnost  $R_a$  dosahuje hodnot v rozmezí od 2,6 do 3,8  $\mu\text{m}$  (viz Tab. 30, 31, 32). Na spodní straně dílce byly kontaktní úhly smáčení nižší a klesaly k hodnotám  $25^\circ$  (viz Obr. 106 a 107). Na základě hodnot parametru  $R_a$  (Tab. 33, 34, 35) lze konstatovat malý vliv drsnosti na hodnotu kontaktního úhlu smáčení.

Na obrázcích 103 a 111 jsou uvedeny SEM snímky povrchu horní a spodní strany dílce, na obrázcích 104 a 112 SEM snímky 3D rekonstrukce drsnosti povrchu SEM pro příslušnou stranu dílce, včetně stanovených parametrů drsnosti. Nejsou pozorovány výraznější odchylky od vzhledu materiálu PLA.

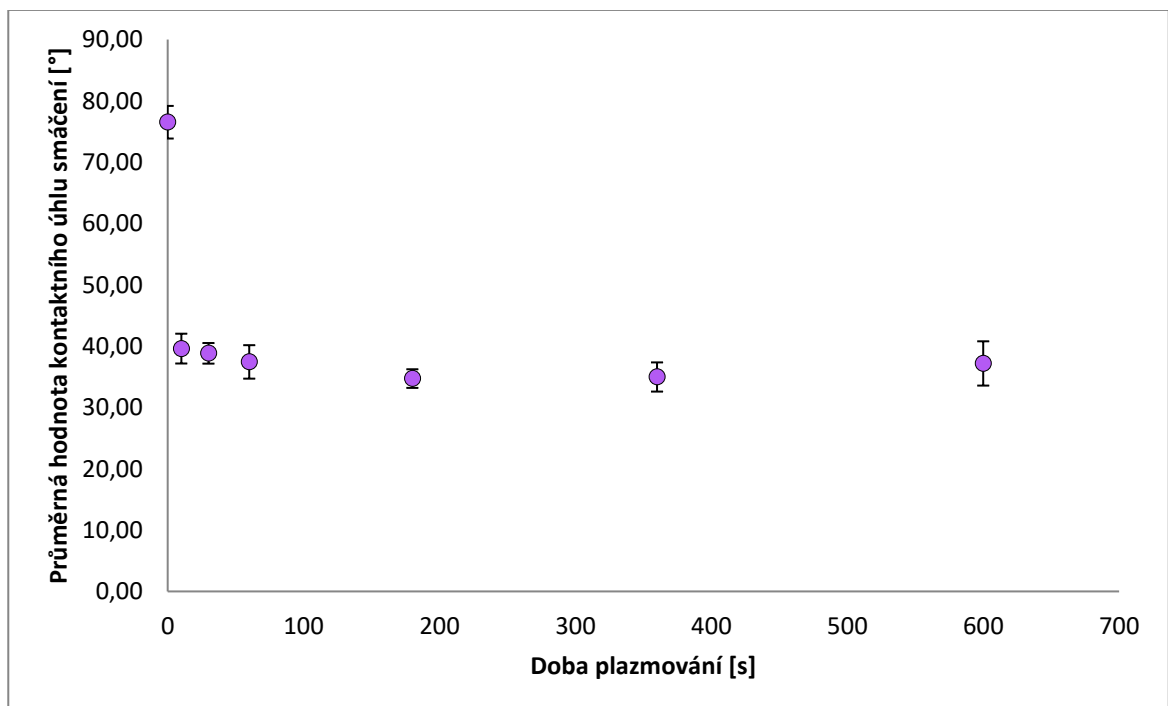
V případě vzorků tištěných ve vertikální orientaci se opět opakuje situace podobná té u vertikálního tisku PLA, tedy výrazný rozdíl v hodnotách kontaktních úhlů v závislosti na směru pohledu kamery na kapku (viz Obr. 114 a Obr. 115), stejně tak je jasně patrná anizotropie drsnosti (Tab. 36, 37, 38).

U vzorků ABS byla i zde provedena doplňková analýza povrchu pomocí optického povrchového profilometru (viz Obr. 105, 113 a 121). Jak již bylo diskutováno v kapitole 8.3, tímto přístrojem lze na relativně velké ploše vyhodnotit plošné parametry drsnosti, včetně těch hybridních. Hybridní parametr drsnosti  $S_{dr}$  na horní ploše dosahuje také poměrně nízkých hodnot, konkrétně 0,02; tj. nárůst reálného povrchu vlivem drsnosti pouze o 2 procenta, na spodní ploše je to již 16 procent a na vertikálně tištěném vzorku 17 procent. Těmito faktory by bylo možné korigovat zjištěné kontaktní úhly smáčení.

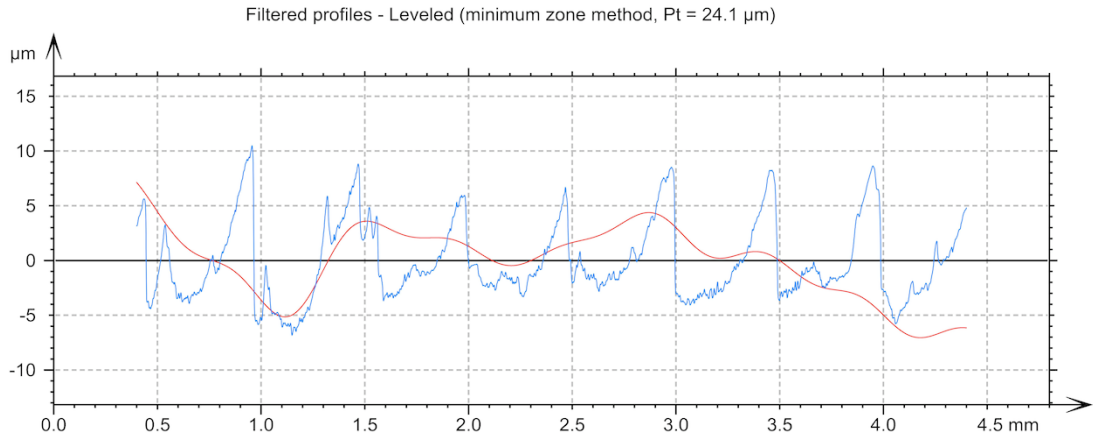
#### 8.4.1 Horizontální tisk (ABS, Ultimaker 2+)



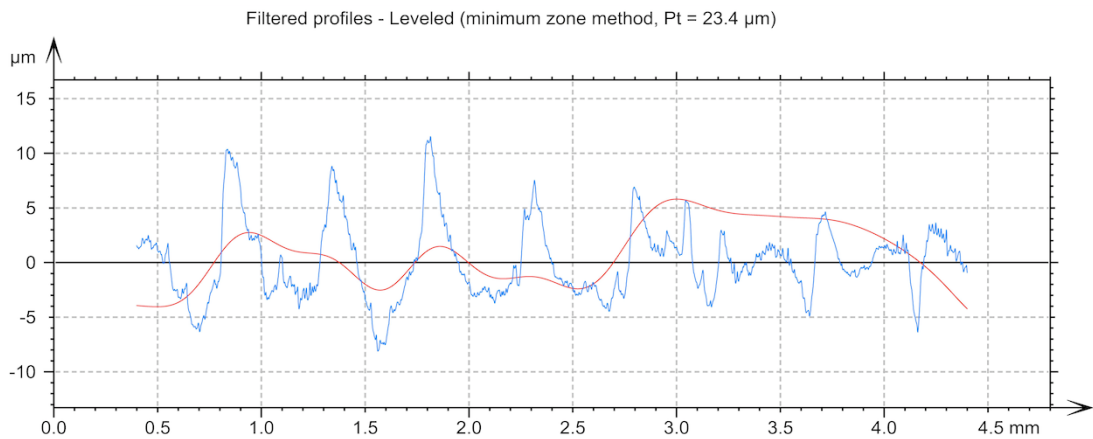
Obrázek 98. Závislost střední hodnoty kontaktního úhlu smáčení na době plazmování; ABS, Ultimaker 2+, horizontální tisk, horní strana



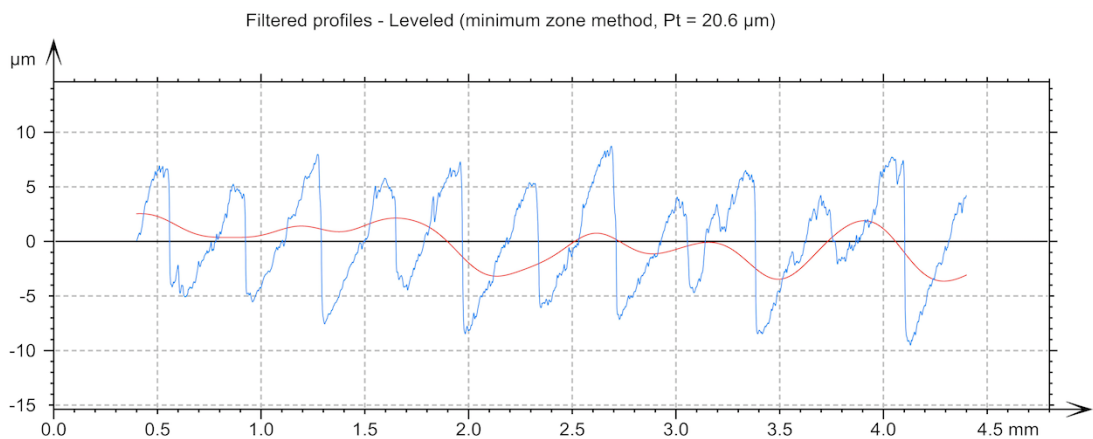
Obrázek 99. Závislost střední hodnoty kontaktního úhlu smáčení na době plazmování; ABS, Ultimaker 2+, horizontální tisk, horní strana (měřeno pod úhlem 90 °)



Obrázek 100. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená): varianta ABS, Ultimaker 2+,  
horizontální tisk, horní strana, směr X



Obrázek 101. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená): varianta ABS, Ultimaker 2+,  
horizontální tisk, horní strana, směr Y



Obrázek 102. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená): varianta ABS, Ultimaker 2+,  
horizontální tisk, horní strana, směr Z

Tabulka 30. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru  $X$  (materiál ABS, Ultimaker 2+, horizontální tisk, horní strana)

	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 4	vzorek 5	$\mu$	$\sigma_\mu$
$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	1,9	3,1	2,3	3,0	2,9	<b>2,6</b>	<b>0,2</b>
$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	10,9	13,7	12,1	15,0	13,7	<b>13,1</b>	<b>0,7</b>
$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	14,9	18,2	16,4	21,8	17,3	<b>17,7</b>	<b>1,2</b>
$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	2,5	3,7	2,9	3,7	3,5	<b>3,3</b>	<b>0,2</b>
$R_{\text{max}}$ [ $\mu\text{m}$ ]	13,9	18,2	14,3	20,8	17,3	<b>16,9</b>	<b>1,3</b>

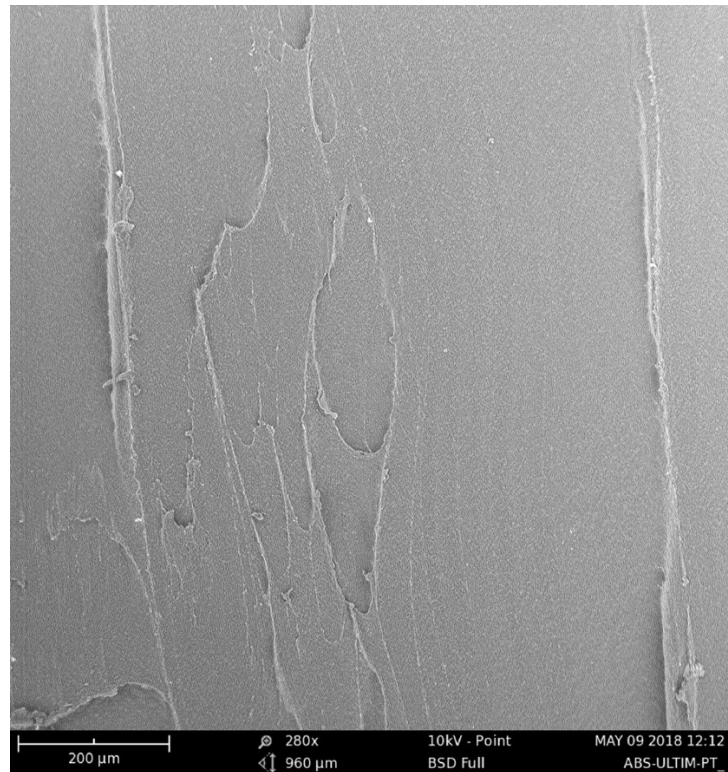
Tabulka 31. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru  $Y$  (materiál ABS, Ultimaker 2+, horizontální tisk, horní strana)

	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 4	vzorek 5	$\mu$	$\sigma_\mu$
$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	2,4	2,1	2,7	2,5	3,4	<b>2,6</b>	<b>0,2</b>
$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	12,6	12,5	14,0	18,1	18,5	<b>15,1</b>	<b>1,3</b>
$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	14,9	14,4	19,6	26,9	31,6	<b>21,5</b>	<b>3,4</b>
$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	3,0	2,7	3,3	3,3	4,4	<b>3,3</b>	<b>0,3</b>
$R_{\text{max}}$ [ $\mu\text{m}$ ]	14,1	14,0	19,6	26,9	22,6	<b>19,4</b>	<b>2,5</b>

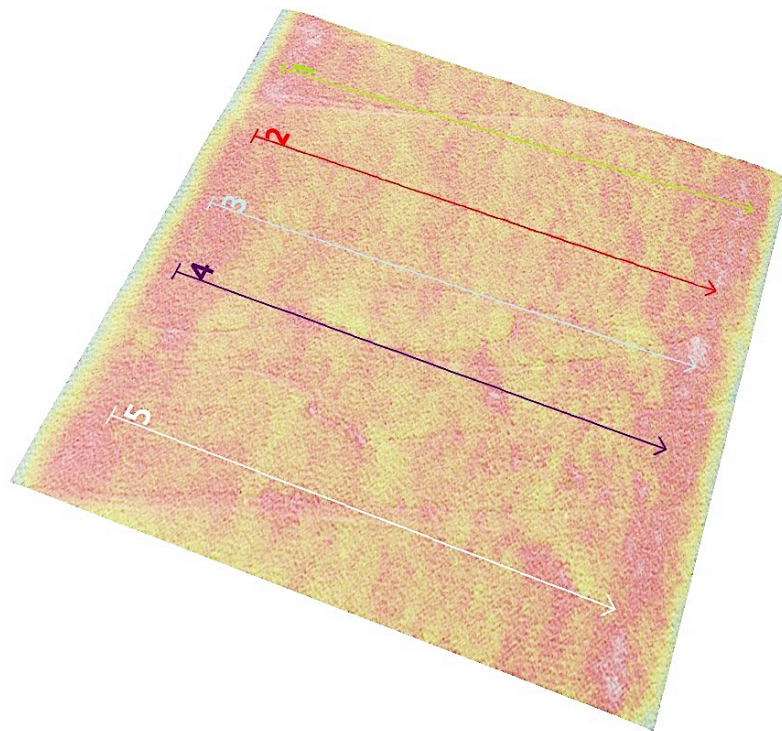
Tabulka 32. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru  $Z$  (materiál ABS, Ultimaker 2+, horizontální tisk, horní strana)

	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 4	vzorek 5	$\mu$	$\sigma_\mu$
$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	4,1	3,9	3,9	3,9	3,5	<b>3,8</b>	<b>0,1</b>
$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	18,3	16,8	16,9	15,6	13,4	<b>16,2</b>	<b>0,8</b>
$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	22,1	20,7	22,4	18,2	16,4	<b>20,0</b>	<b>1,2</b>
$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	4,9	4,5	4,6	4,3	4,0	<b>4,4</b>	<b>0,1</b>
$R_{\text{max}}$ [ $\mu\text{m}$ ]	21,3	20,1	21,0	17,2	16,4	<b>19,2</b>	<b>1,0</b>

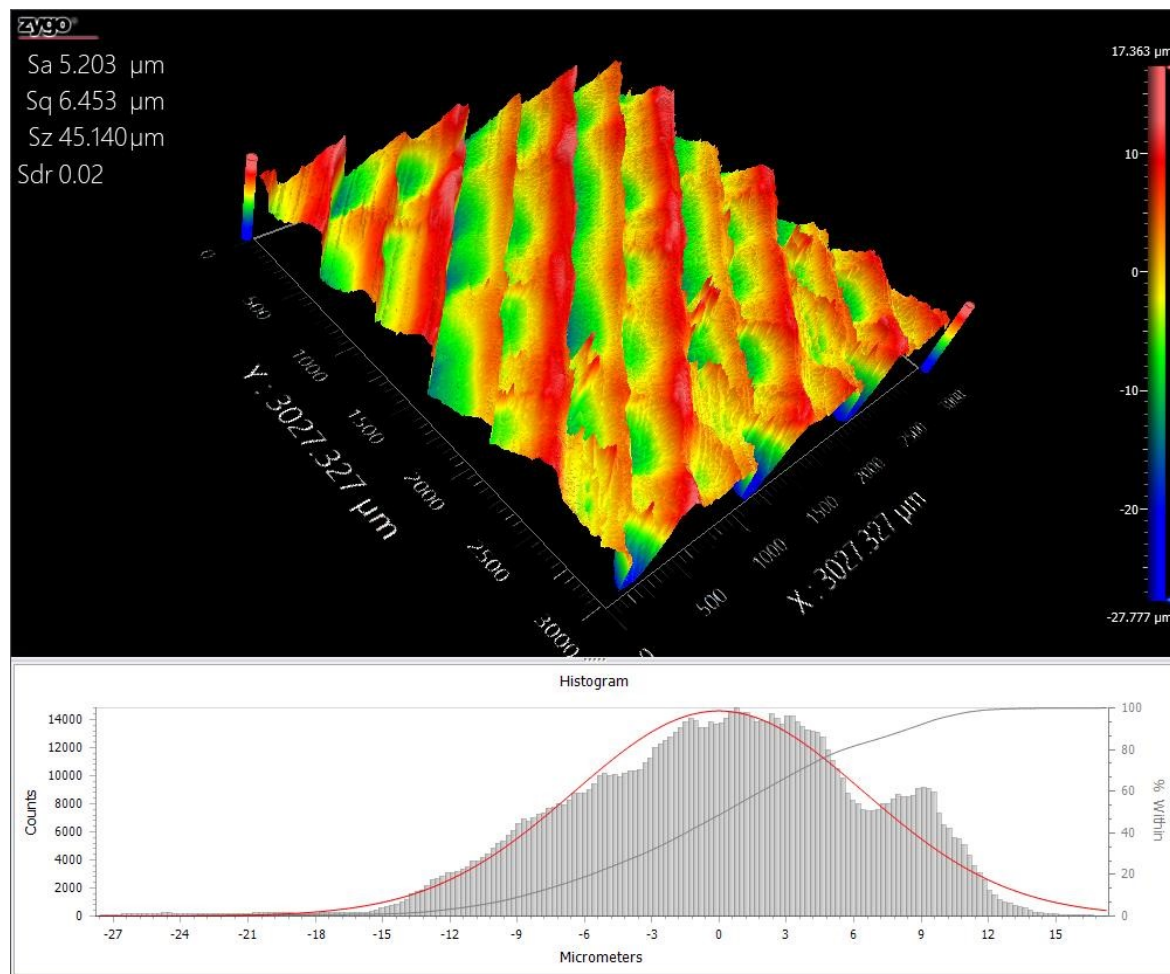




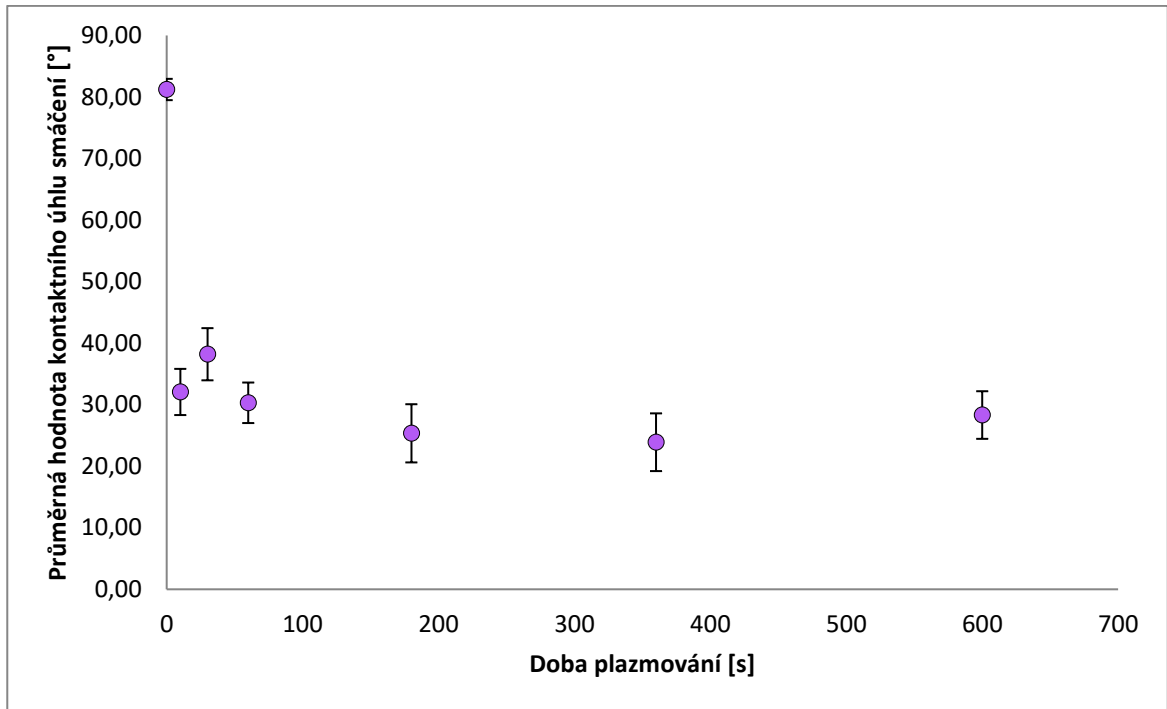
Obrázek 103. SEM snímek ABS, Ultimaker 2+, horizontální tisk (horní strana)



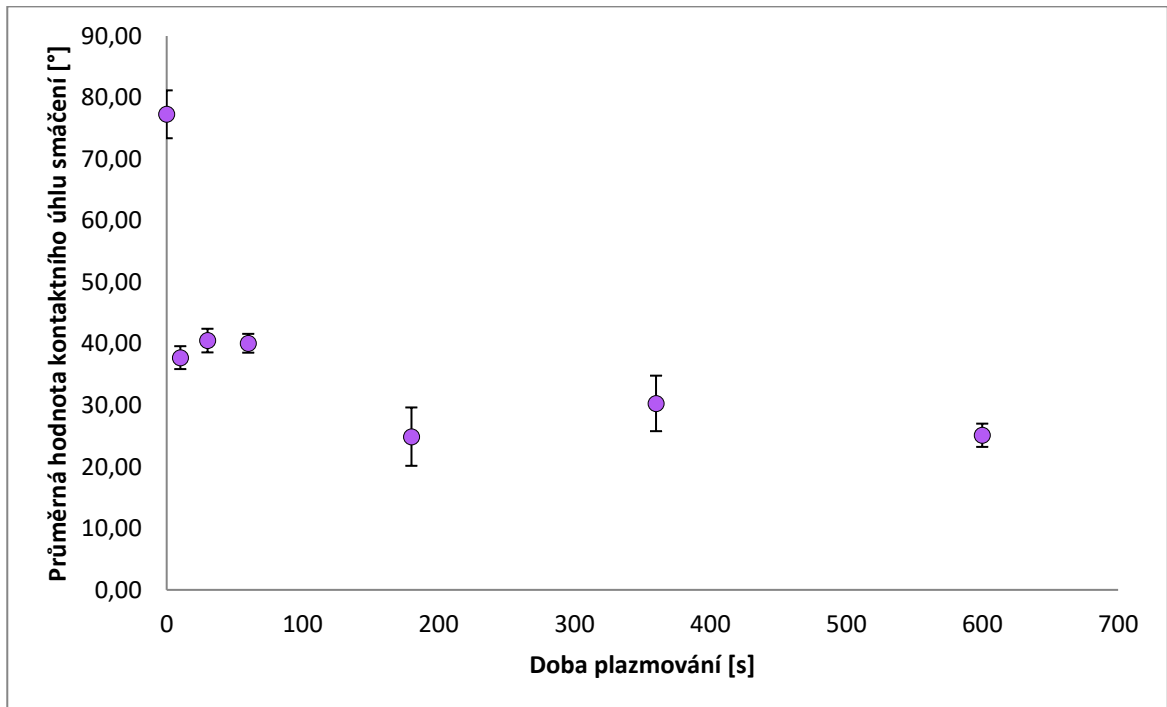
Obrázek 104. SEM snímek (3D rekonstrukce drsnosti): ABS, Ultimaker 2+, horizontální tisk (horní strana);  $R_z (3,93 \pm 0,17 \mu\text{m})$ ,  $R_a (0,726 \pm 0,05 \mu\text{m})$ ,  $S_a 0,976 \mu\text{m}$



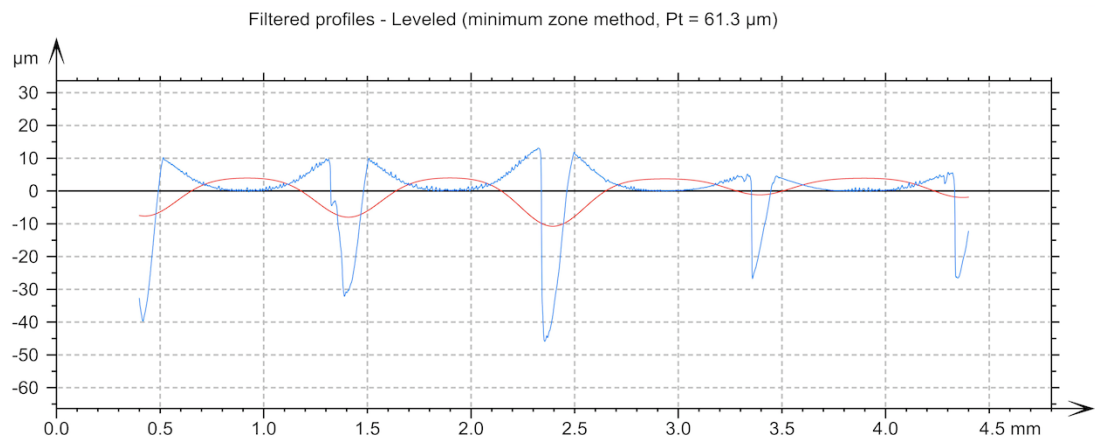
Obrázek 105. 3D rekonstrukce povrchu optickým povrchovým profilometrem, plocha 3 x 3 mm, ABS, Ultimaker 2+, horizontální tisk (horní strana)



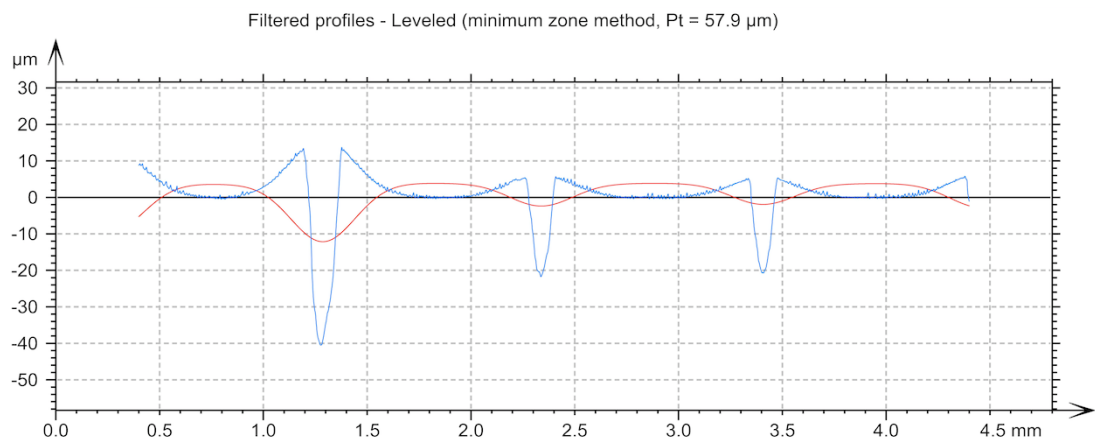
Obrázek 106. Závislost střední hodnoty kontaktního úhlu smáčení na době plazmování; ABS, Ultimaker 2+, horizontální tisk, spodní strana



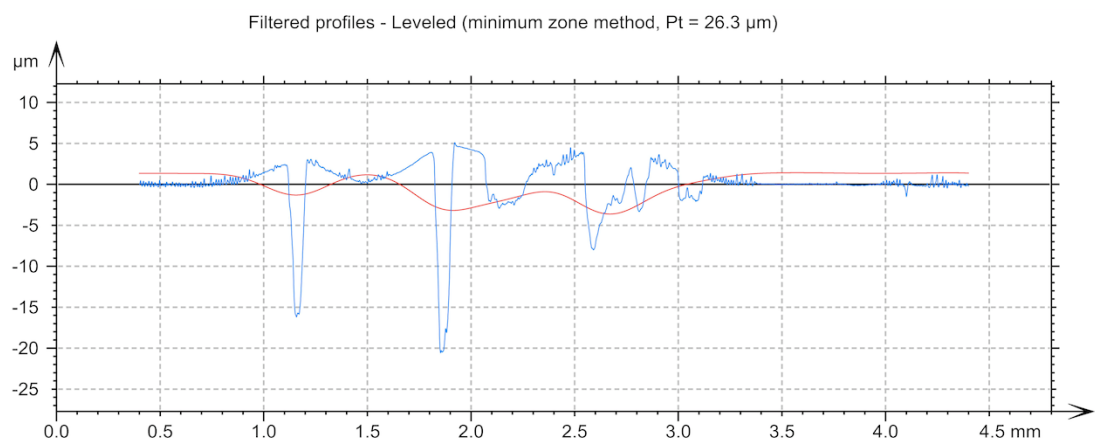
Obrázek 107. Závislost střední hodnoty kontaktního úhlu smáčení na době plazmování; ABS, Ultimaker 2+, horizontální tisk, spodní strana (měřeno pod úhlem 90°)



Obrázek 108. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená) u varianty ABS, Ultimaker 2+, horizontální tisk, spodní strana, směr X



Obrázek 109. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená) u varianty ABS, Ultimaker 2+, horizontální tisk, spodní strana, směr Y



Obrázek 110. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená) u varianty ABS, Ultimaker 2+, horizontální tisk, spodní strana, směr Z

Tabulka 33. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru  $X$  (materiál ABS, Ultimaker 2+, horizontální tisk, spodní strana)

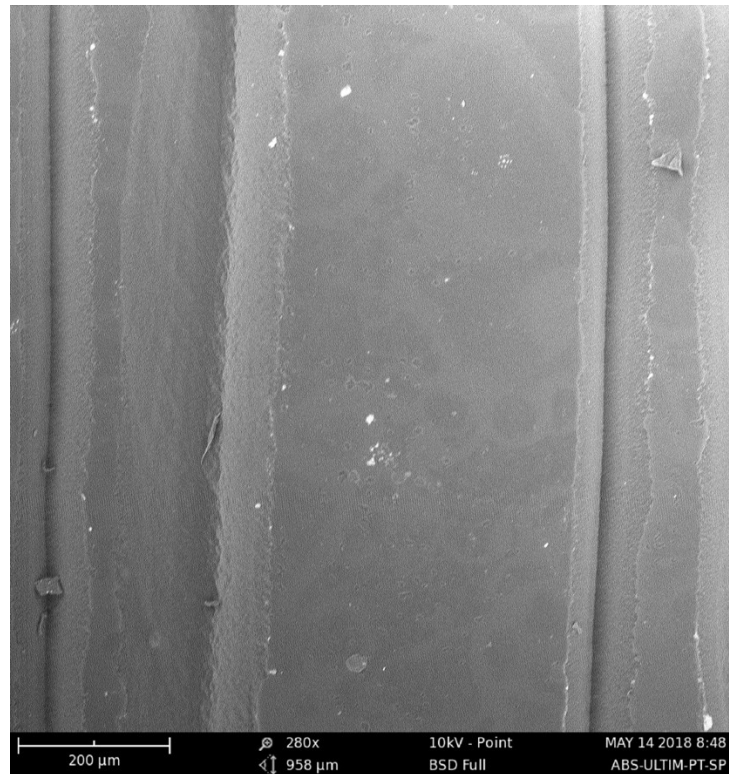
	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 4	vzorek 5	$\mu$	$\sigma_\mu$
$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,1	2,3	5,6	3,2	2,8	<b>2,8</b>	<b>0,9</b>
$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,1	16,7	43,0	26,8	20,0	<b>21,3</b>	<b>7,0</b>
$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,1	26,6	58,9	39,7	35,7	<b>32,2</b>	<b>9,6</b>
$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,1	3,6	9,4	5,5	4,4	<b>4,6</b>	<b>1,5</b>
$R_{\text{max}}$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,1	26,6	58,9	39,5	35,7	<b>32,2</b>	<b>9,6</b>

Tabulka 34. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru  $Y$  (materiál ABS, Ultimaker 2+, horizontální tisk, spodní strana)

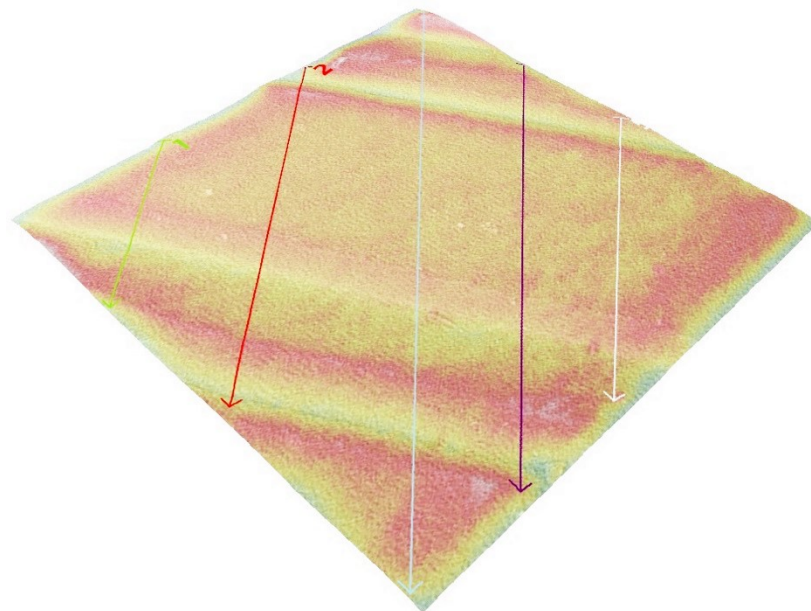
	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 4	vzorek 5	$\mu$	$\sigma_\mu$
$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	7,8	0,5	3,7	0,1	2,3	<b>2,9</b>	<b>1,4</b>
$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	51,7	5,0	25,6	0,3	18,2	<b>20,2</b>	<b>9,1</b>
$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	63,0	19,4	54,2	0,4	34,7	<b>34,3</b>	<b>11,4</b>
$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	12,1	0,8	6,4	0,1	3,9	<b>4,7</b>	<b>2,2</b>
$R_{\text{max}}$ [ $\mu\text{m}$ ]	58,9	19,4	54,2	0,4	34,7	<b>33,5</b>	<b>10,9</b>

Tabulka 35. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru  $Z$  (materiál ABS, Ultimaker 2+, horizontální tisk, spodní strana)

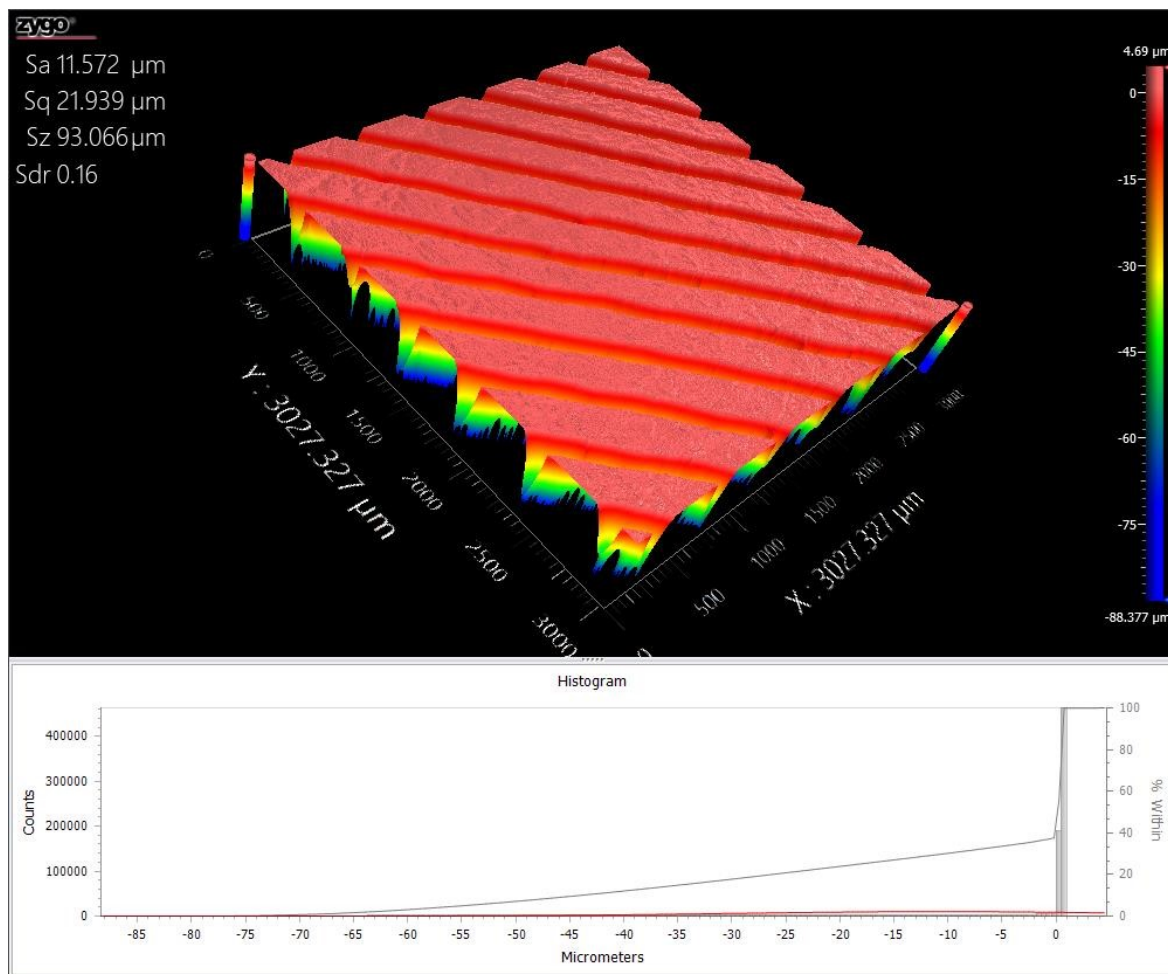
	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 4	vzorek 5	$\mu$	$\sigma_\mu$
$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,1	1,8	2,3	1,0	1,7	<b>1,4</b>	<b>0,4</b>
$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,1	8,9	13,7	6,1	13,3	<b>8,4</b>	<b>2,5</b>
$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,1	21,0	37,9	16,0	25,7	<b>20,1</b>	<b>6,2</b>
$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,1	2,3	3,2	1,3	2,8	<b>1,9</b>	<b>0,6</b>
$R_{\text{max}}$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,1	21,0	37,9	15,1	25,7	<b>20,0</b>	<b>6,2</b>



Obrázek 111. SEM snímek – ABS, Ultimaker 2+, horizontální tisk (spodní strana)

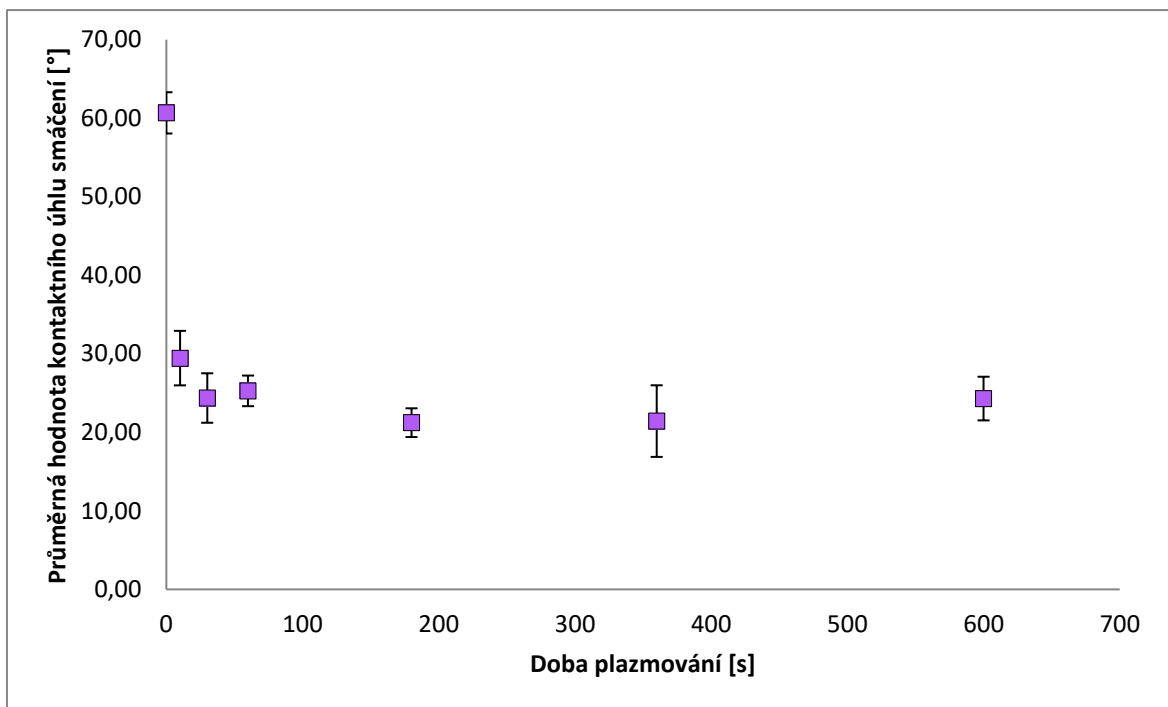


Obrázek 112. SEM snímek (3D rekonstrukce drsnosti): ABS, Ultimaker 2+, horizontální tisk (spodní strana);  $R_z$  ( $6,07 \pm 0,48 \mu\text{m}$ ),  $R_a$  ( $1,518 \pm 0,12 \mu\text{m}$ ),  $S_a$   $1,81 \mu\text{m}$

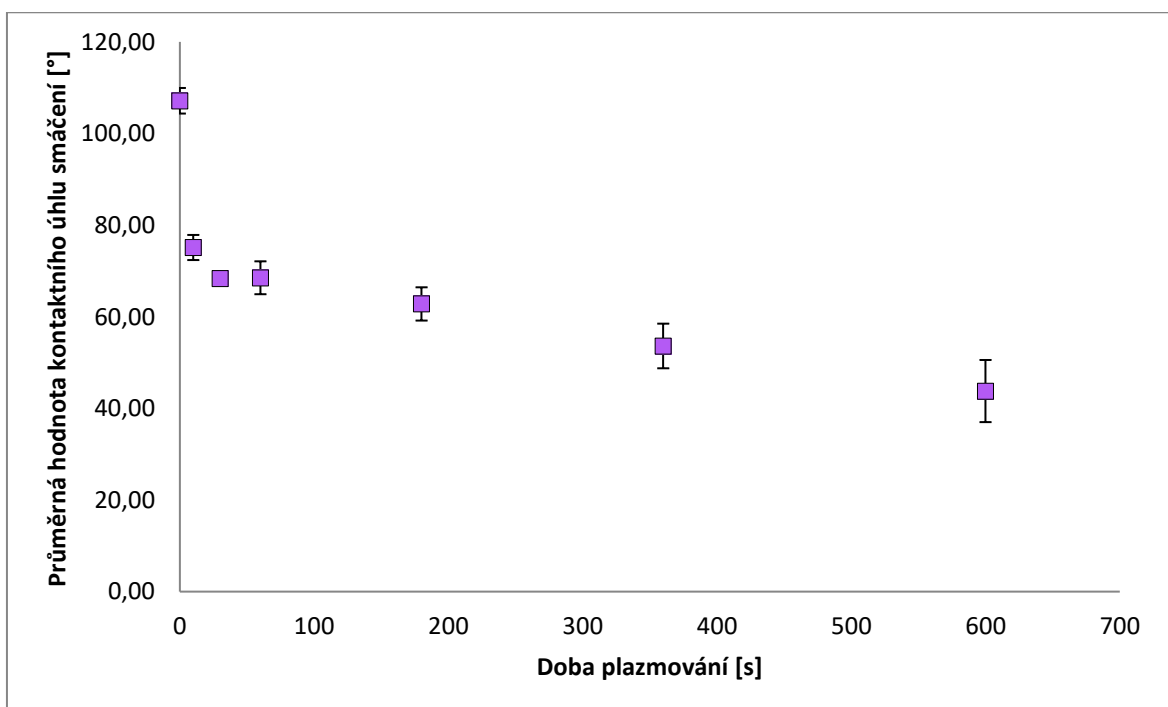


Obrázek 113. 3D rekonstrukce povrchu optickým povrchovým profilometrem; 3 x 3 mm, ABS, Ultimaker 2+, horizontální tisk (spodní strana)

## 8.4.2 Vertikální tisk (ABS, Ultimaker 2+)

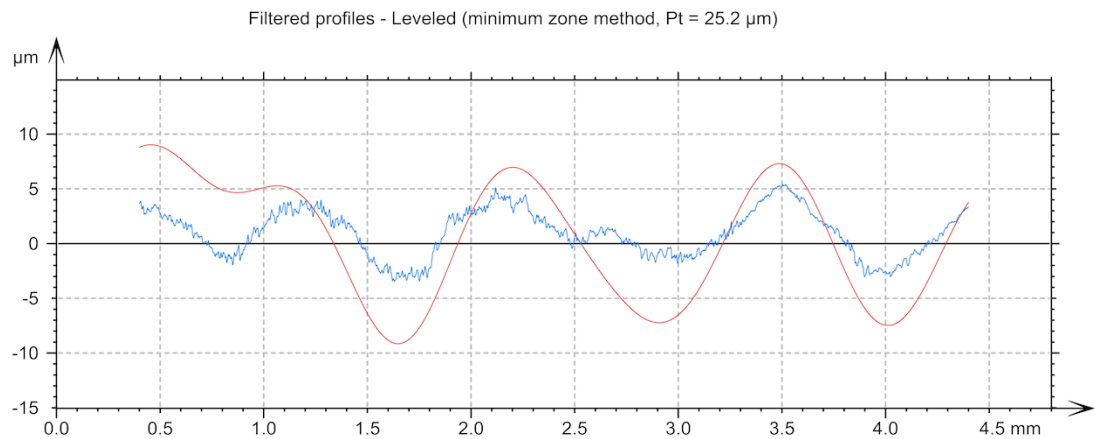


Obrázek 114. Závislost střední hodnoty kontaktního úhlu smáčení na době plazmování; ABS, Ultimaker 2+, vertikální tisk

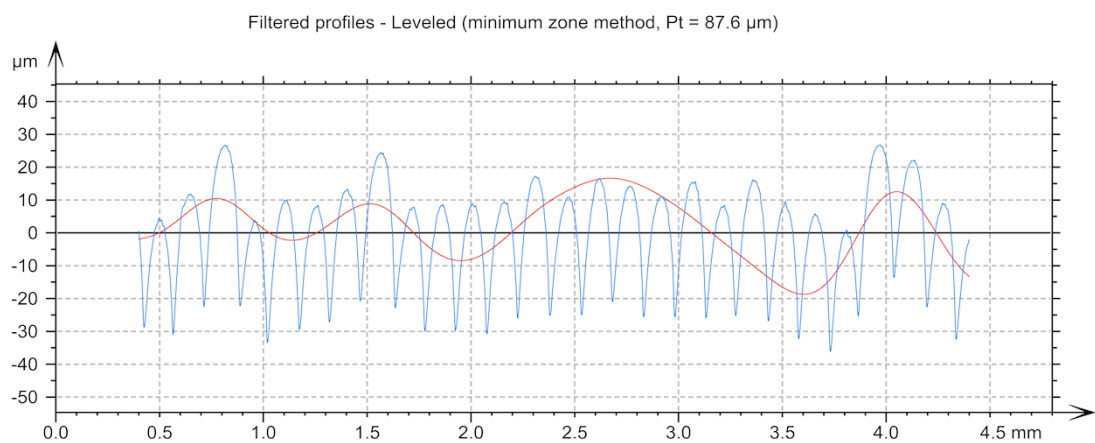


Obrázek 115. Závislost střední hodnoty kontaktního úhlu smáčení na době plazmování; ABS, Ultimaker 2+, vertikální tisk (měřeno pod úhlem 90 °)

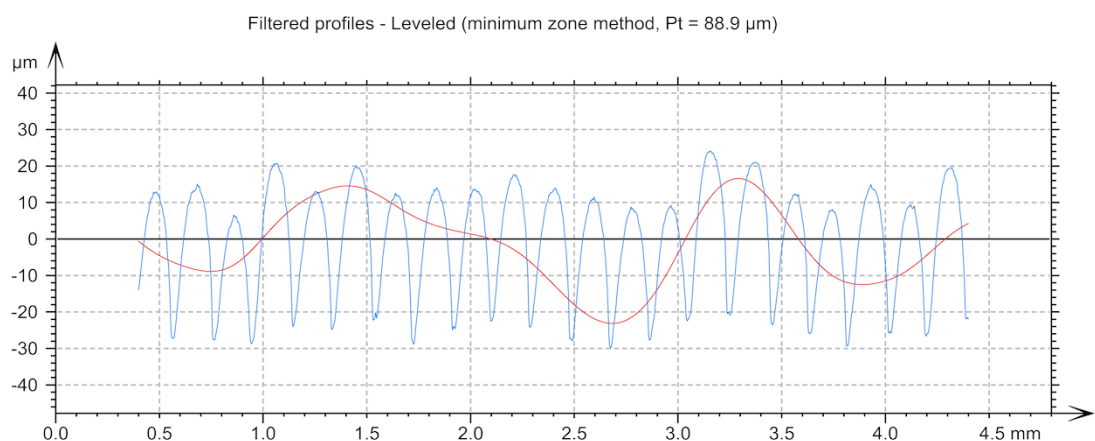




Obrázek 116. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená) u varianty ABS, Ultimaker 2+, vertikální tisk, směr X



Obrázek 117. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená) u varianty ABS, Ultimaker 2+, vertikální tisk, směr Y



Obrázek 118. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená) u varianty ABS, Ultimaker 2+, vertikální tisk, směr Z

Tabulka 36. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru  $X$  (materiál ABS, Ultimaker 2+, vertikální tisk)

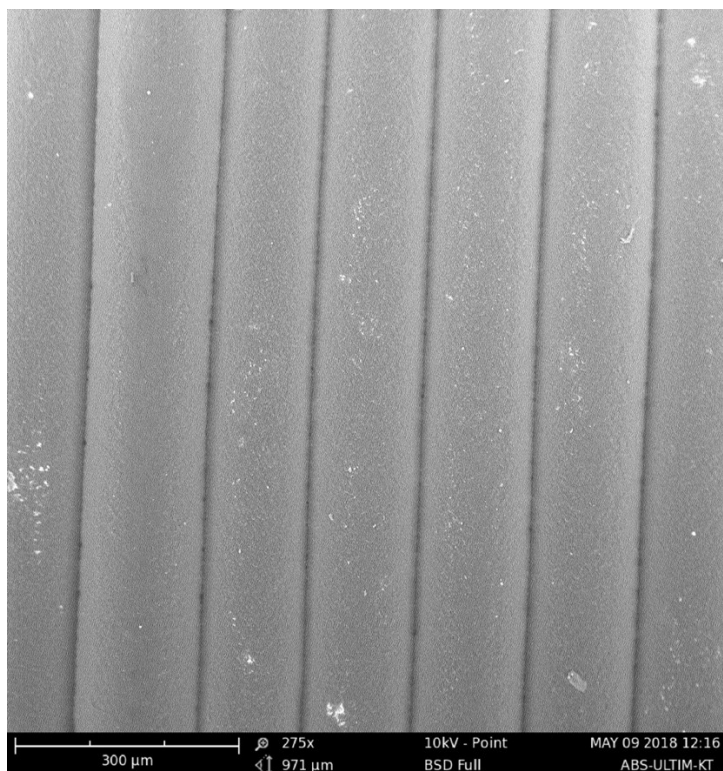
	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 4	vzorek 5	$\mu$	$\sigma_\mu$
$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,5	1,1	1,8	2,0	1,8	<b>1,4</b>	<b>0,3</b>
$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	3,0	4,7	6,7	10,3	8,2	<b>6,6</b>	<b>1,3</b>
$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	3,9	7,2	8,9	14,9	10,8	<b>9,1</b>	<b>1,8</b>
$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,7	1,3	2,1	2,3	2,2	<b>1,7</b>	<b>0,3</b>
$R_{\text{max}}$ [ $\mu\text{m}$ ]	3,4	7,2	7,4	13,9	9,8	<b>8,3</b>	<b>1,7</b>

Tabulka 37. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru  $Y$  (materiál ABS, Ultimaker 2+, vertikální tisk)

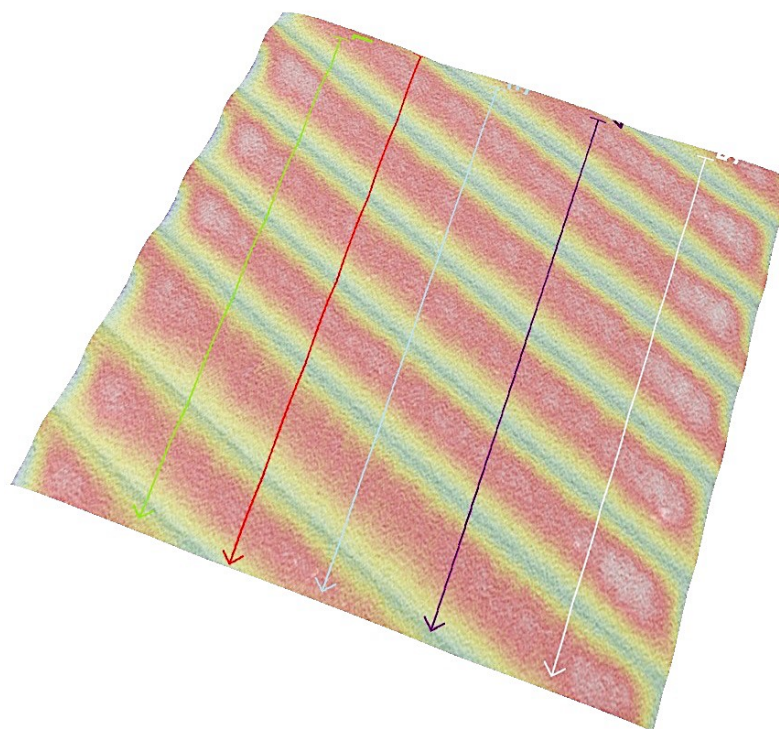
	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 4	vzorek 5	$\mu$	$\sigma_\mu$
$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	11,0	11,1	11,1	10,7	11,1	<b>11,0</b>	<b>0,1</b>
$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	53,4	54,7	54,1	53,9	61,1	<b>55,4</b>	<b>1,4</b>
$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	63,9	62,8	65,4	64,8	73,3	<b>66,0</b>	<b>1,9</b>
$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	13,3	13,6	13,6	13,1	14,1	<b>13,5</b>	<b>0,2</b>
$R_{\text{max}}$ [ $\mu\text{m}$ ]	59,3	62,8	65,4	64,6	69,5	<b>64,3</b>	<b>1,7</b>

Tabulka 38. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru  $Z$  (materiál ABS, Ultimaker 2+, vertikální tisk)

	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 4	vzorek 5	$\mu$	$\sigma_\mu$
$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	11,3	11,7	11,9	12,3	11,8	<b>11,8</b>	<b>0,2</b>
$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	46,2	48,9	49,2	48,3	45,9	<b>47,7</b>	<b>0,7</b>
$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	54,0	58,5	53,9	62,1	58,6	<b>57,4</b>	<b>1,6</b>
$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	13,3	13,8	14,0	14,4	13,8	<b>13,9</b>	<b>0,2</b>
$R_{\text{max}}$ [ $\mu\text{m}$ ]	54,0	57,7	51,8	62,1	57,9	<b>56,7</b>	<b>1,8</b>

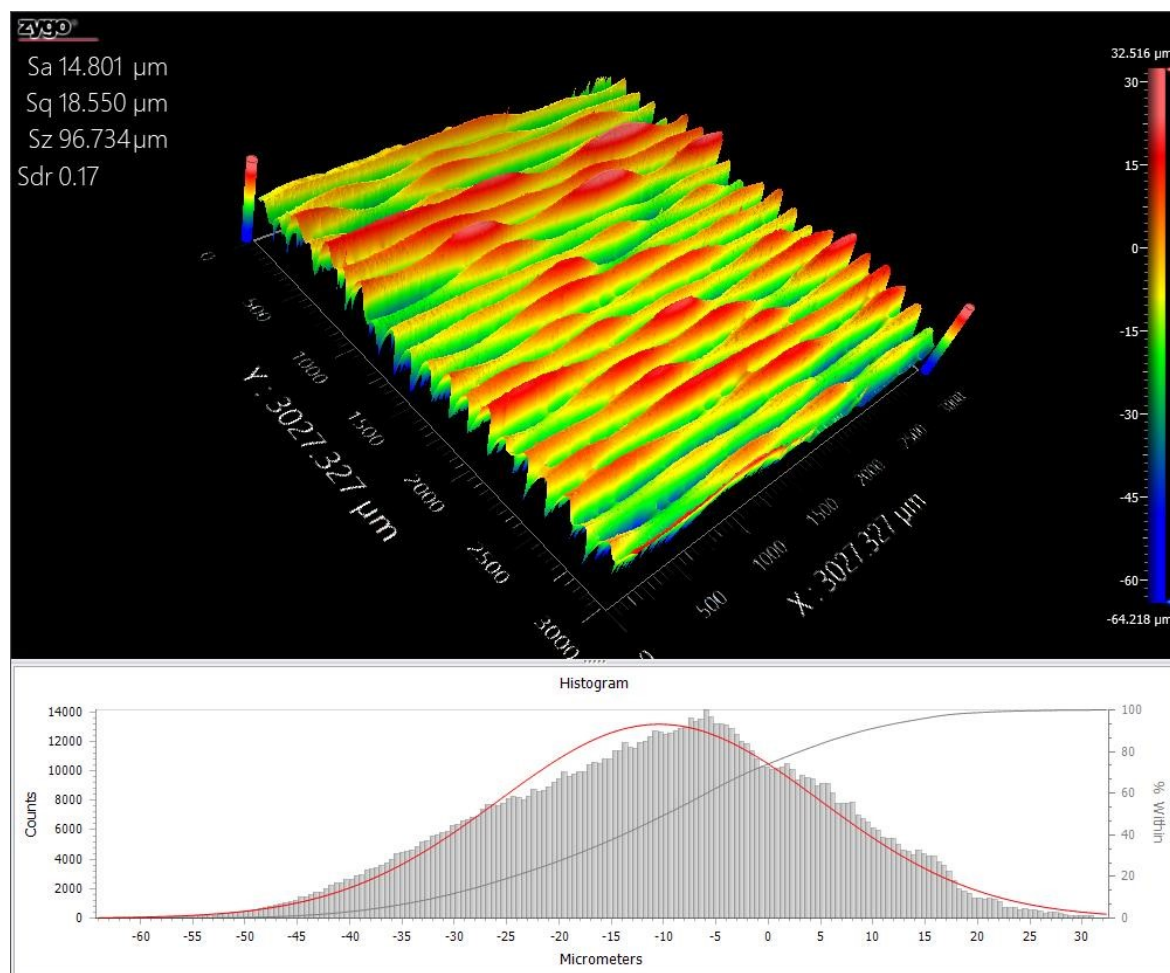


Obrázek 119. SEM snímek – ABS, Ultimaker 2+, vertikální tisk



Obrázek 120. SEM snímek (3D rekonstrukce drsnosti): ABS, Ultimaker 2+, vertikální tisk;

$R_z (16,01 \pm 0,72 \mu\text{m})$ ,  $R_a (4,07 \pm 0,19 \mu\text{m})$ ,  $S_a 4,15 \mu\text{m}$



Obrázek 121. 3D rekonstrukce povrchu optickým povrchovým profilometrem;  
analýza plochy 3 x 3 mm, ABS, Ultimaker 2+, vertikální tisk

## 8.5 Diskuze vlivu povrchové drsnosti na hodnotu kontaktního úhlu smáčení

Jak vyplynulo z výsledků v kapitolách 8.1, 8.2, 8.3 a 8.4, plazmatická úprava má jistý vliv na povrchovou energii plastů. Toto zjištění samo o sobě není nijak překvapivé. Zajímavé je chování materiálu PLA, u kterého oproti materiálu ABS dochází k mnohem menšímu nárůstu povrchové energie s dobou plazmování. Oba plasty jsou potenciálně využitelné v medicíně, kde by chování PLA mohlo být limitujícím faktorem pro určité aplikace.

Byl také prokázán vliv povrchové morfologie tištěných vzorků na zjištěné hodnoty kontaktních úhlů smáčení. Horní strany vzorků obou materiálů připravených na obou tiskárnách byly z pohledu povrchu poměrně homogenní a nebyl problém kontaktní úhly změřit. Spodní, zejména ale boční strany dílců (odpovídající vertikálnímu tisku) představují již pro měření jistou překážku. Na základě zkušeností z výše uvedených měření lze doporučit stanovení nejdříve kontaktního úhlu na horní straně vzorku a ten pak využít jako referenční hodnotu pro ostatní měření. Na vertikálních vzorcích se hodnoty kontaktních úhlů smáčení vody mohly lišit v závislosti na vyhodnocení ve směru pohledu kamery rovnoběžně s orientací tisku nebo kolmo na ni, a to o 50 °. Ve směru pohledu kamery kolmo na směr tisku byly naměřeny hodnoty kontaktních úhlů podobné těm na horní straně vzorku. Byly také zjištěny rozdíly mezi povrchovými vlastnostmi plazmovaných vzorků ABS připravených na různých 3D tiskárnách, zde jde ale spíše o vliv samotného materiálu filamentu (odlišné procentuální množství aditiv, jiný výrobce pro každý typ 3D tiskárny), než o rozdíly v kvalitě tisku samotných 3D tiskáren. Překvapivě byla kvalita povrchu výtisků z obou použitých 3D tiskáren srovnatelná, a to i přes značný rozdíl v cenách obou výrobků.

Pravděpodobně největším přínosem experimentální části je ověření postupu výpočtu skutečného kontaktního úhlu smáčení z hodnoty zdánlivého kontaktního úhlu smáčení zahrnutím vlivu povrchové drsnosti. Na spodních stranách vzorků a vertikálně tištěných vzorcích byl stanoven hybridní parametr drsnosti  $S_{dr}$  0,16 až 0,18. To odpovídá reálnému povrchu o 16 až 18 procent většímu, než je povrch zdánlivý (půdorysný rozměr povrchu). Na horních stranách vzorků měl parametr  $S_{dr}$  hodnotu okolo 0,02; tj. reálný povrch pouze o 2 procenta větší. Pokud na základě Wenzelovy rovnice provedeme přepočtení zdánlivého kontaktního úhlu smáčení na skutečný, zjistíme např. u varianty horizontálního tisku ABS, že nižší hodnoty kontaktních úhlů smáčení na spodní straně vzorku se velmi přiblíží hodnotám kontaktních úhlů na horní straně vzorku, kde je vliv drsnosti zanedbatelný.

## ZÁVĚR

Cílem práce bylo studium materiálů potenciálně využitelných v medicíně, např. pro přípravu scaffoldů metodami 3D tisku. Byly studovány materiály PLA a ABS a vzorky z nich byly připravovány pomocí dvou FDM 3D tiskáren, konkrétně Průša i3 MK3 a Ultimaker 2+. Metoda FDM umožňuje s relativně malými náklady tisk širokého spektra termoplastů a lze tak v budoucnu očekávat její výrazné rozšíření. U medicínských aplikací je často vyžadováno, aby výsledný povrch byl hydrofilní a biokompatibilní. Znalost povrchové energie je v takových případech nutností. Topografie povrchů připravených na 3D tiskárnách má svá specifika. Je známo, že drsnost povrchu může mít vliv na smáčivost, a tak na hodnotu kontaktního úhlu smáčení, ze kterého je povrchová energie stanovována. Hodnocení povrchové energie vzorků s výraznější topografií povrchu (drsností) tak představuje poměrně velký problém. Výsledky měření odhalily, že nízkoteplotním plazmatem lze efektivně měnit povrchovou energii plastů, ale s různou efektivitou. PLA reaguje na kyslíkaté plazma méně, než ABS, kde ve většině případů došlo k poklesu kontaktního úhlu smáčení pod  $20^\circ$  již po krátké době modifikace. U dílců připravených metodou FDM se nacházejí v principu tři druhy povrchů, a to spodní (kontakt s tiskovou deskou), horní (kde ji tisk ukončen) a boční (simulovaný vertikálním tiskem). Poměrně překvapující je fakt, že horní strany dílců jsou z pohledu topografie poměrně homogenní a měřit na nich kontaktní úhly nepředstavuje větší problém. Jiná je situace u spodních a bočních stran. Spodní strany vykazovaly při měření na kontaktním profilometru poměrně malou drsnost, až měření na optickém povrchovém profilometru odhalilo, že stejně jako boční strany mají specifický povrch poměrně velký a pro stanovení správné hodnoty kontaktního úhlu je třeba tento jev kompenzovat. Nárůst reálného povrchu činil 16–18 % (pro srovnání u horní strany vzorku pouze 2–3 %). Stanovením korekčního faktoru  $r$  přepočtem z hybridního parametru drsnosti  $S_{dr}$  lze podle Wenzelovy teorie vypočítat ze zdánlivých kontaktních úhlů smáčení ty skutečné a vliv drsnosti tak kompenzovat. U bočních stran dílců (vertikální tisk) je situace i přes korekci komplikovanější a lze doporučit provést měření kontaktního úhlu smáčení ve více směrech podhledu kamery na vzorek a povrchovou energii počítat z hodnot, které se přibližují těm na horní straně vzorku, jež je z pohledu drsnosti nejhomogennější. Při hodnocení povrchové energie scaffoldů připravených na 3D bio-tiskárně bude nutné brát na vědomí výše uvedené závěry. Lze předpokládat, že u síťových povrchových struktur (scaffoldů) bude vliv topografie velmi výrazný. Tato práce tak může přispět k přesnějšímu stanovení povrchových vlastností substrátů připravených 3D tiskem.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

1. Českomoravská konfederace odborových svazů. *Průmysl 4.0, Vzdělávání 4.0, Práce 4.0 a Společnost 4.0 : učební text*.
2. Reverse engineering. Available at: <http://3dlaboratory.cz/reverse-engineering/>. (Accessed: 1st May 2018)
3. Kratochvílová, J., Millarová, P. & Růžička, J. *3D tisk*.
4. Dodziuk, H. Applications of 3D printing in healthcare. *Polish J. Thorac. Cardiovasc. Surg.* **13**, 283–293 (2016).
5. Mikołajewska, E. *et al.* 3D printing technologies in rehabilitation engineering. (2014).
6. Scienceworld. 3D tisk ze skla, písku i kmenových buněk. Available at: <http://www.scienceworld.cz/aktuality/3d-tisk-ze-skla-pisku-i-kmenovych-bunek/>. (Accessed: 8th March 2018)
7. Cherny, N. I. *et al.* Words Matter: Distinguishing Personalized Medicine and Biologically Personalized Therapeutics. *JNCI J. Natl. Cancer Inst.* **106**, (2014).
8. Dylevský, I. *Funkční anatomie*. (Grada, 2009).
9. 3D tisk pro vývoj implantátů a dalších zdravotnických potřeb. Available at: <http://www.prospon.cz/3d-tisk>. (Accessed: 5th May 2018)
10. Mironov, V., Visconti, R. & Markwald, R. What is regenerative medicine? Emergence of applied stem cell and developmental biology. *Expert Opin. Biol. Ther.* **4**, 773–781 (2004).
11. Skardal, A., Murphy, S., Atala, A. & Soker, S. in 325–353 (2017). doi:10.1142/9789813144583\_0012
12. Kloski, L. W., Kloski, N. & Goner, J. *Začínáme s 3D tiskem*.
13. Agarwal, M., Singh, B. P., Kumar, V., Goel, A. & Sankhwar, S. N. THREE-DIMENSIONAL PRINTING OF RING RETRACTOR SYSTEM FOR URETHROPLASTY. *J. Urol.* **199**, e805–e806 (2018).
14. Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q. & Hui, D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and

- challenges. *Compos. Part B Eng.* **143**, 172–196 (2018).
15. Invisalign Česká republika. Available at: <https://www.invisalign.cz/>. (Accessed: 14th May 2018)
  16. Ventola, C. L. Medical Applications for 3D Printing: Current and Projected Uses. *P T* **39**, 704–11 (2014).
  17. Concrete 3D printer. Available at: <http://www.3d-printers.com.au/2010/11/17/concrete-3d-printer/>. (Accessed: 13th May 2018)
  18. Select 3D: Australian company developing 3D printed plaster for interior design. Available at: <https://www.3ders.org/articles/20180213-select-3d-australian-company-developing-3d-printed-plaster-for-interior-design.html>. (Accessed: 13th May 2018)
  19. 3D tisk architektonických modelů, koncepční 3D tisk. Available at: <http://www.archprint.cz/3dtisk.html>. (Accessed: 22nd April 2018)
  20. Mendis, D., Lemley, M. & Rimmer, M. *3D Printing and Beyond: The Intellectual Property and Legal Implications Surrounding 3D Printing and Emerging Technology*. (2018).
  21. Esposito Corcione, C., Palumbo, E., Masciullo, A., Montagna, F. & Torricelli, M. C. Fused Deposition Modeling (FDM): An innovative technique aimed at reusing Lecce stone waste for industrial design and building applications. *Constr. Build. Mater.* **158**, 276–284 (2018).
  22. Ostuzzi, F., Rognoli, V., Saldien, J. & Levi, M. +TUO project: low cost 3D printers as helpful tool for small communities with rheumatic diseases. *Rapid Prototyp. J.* **21**, 491–505 (2015).
  23. SLS, SLA, SLM, MLS technologie. Available at: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/slm-technologie/>. (Accessed: 22nd April 2018)
  24. Selektivní laserové sintrování. Available at: <http://www.materialise.com/cs/manufacturing/technologie-materialy-a-dokoncovaci-upravy/laserove-sintrovani>. (Accessed: 6th May 2018)
  25. Laminated Object Manufacturing. Available at:



- <https://www.manufacturingguide.com/en/laminated-object-manufacturing-lom>.  
(Accessed: 6th May 2018)
26. 3D tisk SLM - Reverzní inženýrství a aditivní technologie. Available at: <http://3dlaboratory.cz/rapid-prototyping/>. (Accessed: 21st April 2018)
  27. Vandenbroucke, B. & Kruth, J.-P. SELECTIVE LASER MELTING OF BIOCOMPATIBLE METALS FOR RAPID MANUFACTURING OF MEDICAL PARTS. *Rapid Prototyp. J.* **13**, 196–203 (2007).
  28. SLM 280 HL systém. Available at: <http://3dlaboratory.cz/rapid-prototyping/>. (Accessed: 21st April 2018)
  29. 3D printing initiative with purchase of SLM 280 HL 3D printer by SLM Solutions. Available at: <http://www.3ders.org/articles/20160506-audi-revs-up-3d-printing-initiative-with-purchase-of-slm-280hl-printer.html>. (Accessed: 21st April 2018)
  30. DLP 3D tisk. Available at: <https://www.futur3d.net/stereolitografie-dlp-3d-tisk>. (Accessed: 10th May 2018)
  31. DLP 3D TISKÁRNA 3DWARF. Available at: [https://www.nc.cz/dlp-3d-tiskarna-3dwarf\\_d288788.html](https://www.nc.cz/dlp-3d-tiskarna-3dwarf_d288788.html). (Accessed: 15th May 2018)
  32. Na úspěch levných 3D tiskáren plastu brzy navážou přesné tiskárny SLA a DLP. Available at: <https://www.3d-tisk.cz/na-uspech-levnych-3d-tiskaren-z-plastu-brzy-navazou-velmi-presne-tiskarny-sla-a-dlp/>. (Accessed: 10th May 2018)
  33. Encyklopedie 3D tisku. Fused Deposition Modeling. Available at: <https://www.3d-tisk.cz/fused-deposition-modeling/>. (Accessed: 6th March 2018)
  34. Dudek, P. FDM 3D printing technology in manufacturing composite elements. *Arch. Metall. Mater.* 1415–1418 (2013).
  35. FDM technologie (Fused Deposition Modeling). Available at: <https://www.inventor3dblog.cz/fdm-technologie/>. (Accessed: 10th May 2018)
  36. Encyklopedie 3D tisku. 3D tiskárna. Available at: <https://www.3d-tisk.cz/3d-tiskarna/>. (Accessed: 6th March 2018)
  37. Příručka 3D tiskaře. Available at: <https://www.prusa3d.cz/downloads/manual/Prusa-i3-manual-1.75-cz.pdf>. (Accessed: 5th March 2018)
  38. Rozlišení modelu. Available at: <https://www.3d-tisk.cz/rozliseni-modelu/>. (Accessed:

- 6th May 2018)
39. Výběr 3D tiskárny. Available at: <https://josefprusa.cz/vyber-3d-tiskarny/>. (Accessed: 6th May 2018)
  40. Gümperlein, I. *et al.* Acute health effects of desktop 3D printing (fused deposition modeling) using acrylonitrile butadiene styrene and polylactic acid materials: An experimental exposure study in human volunteers. *Indoor Air* (2018). doi:10.1111/ina.12458
  41. Bose, S., Vahabzadeh, S. & Bandyopadhyay, A. Bone tissue engineering using 3D printing. *Mater. Today* **16**, 496–504 (2013).
  42. Skowrya, J., Pietrzak, K. & Alhnan, M. A. Fabrication of extended-release patient-tailored prednisolone tablets via fused deposition modelling (FDM) 3D printing. *Eur. J. Pharm. Sci.* **68**, 11–17 (2015).
  43. Nylon Hips 3D Printer Filament. Available at: [https://www.alibaba.com/product-detail/Nylon-HIPS-3d-printer-filament-for\\_60475179611.html](https://www.alibaba.com/product-detail/Nylon-HIPS-3d-printer-filament-for_60475179611.html). (Accessed: 11th May 2018)
  44. PLA Filament. Available at: <http://www.crystal3d.co.nz/product/pla-filament-for-3d-printing/>. (Accessed: 10th May 2018)
  45. Filamento in PLA di colore fucsia. Available at: <http://www.eumakers.com/en/filamento-pla-magenta-eumakers.html>. (Accessed: 11th May 2018)
  46. ABS – 3D-tisk. Available at: <https://www.3d-tisk.cz/abs/>. (Accessed: 29th April 2018)
  47. ASA 3D tiskový materiál. Available at: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/asa/>. (Accessed: 29th April 2018)
  48. FLEX filament materiál pro 3D tisk. Available at: <https://www.materialpro3d.cz/tiskove-struny-filamenty/flex-filament-cerny-1-75-mm-smartfil/>. (Accessed: 29th April 2018)
  49. PET, PET-G filamenty pro 3D tisk. Available at: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/pet-g/>. (Accessed: 29th April 2018)

50. PLA filamenty pro FDM tisk. Available at: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/pla/>. (Accessed: 29th April 2018)
51. Cuiffo, M. A. *et al.* Impact of the Fused Deposition (FDM) Printing Process on Polylactic Acid (PLA) Chemistry and Structure. *Appl. Sci.* **7**, 579 (2017).
52. Rozdíl mezi ABS, PLA a PETG. Available at: <https://www.materialpro3d.cz/blog/rozdily-abs-pla-petg/>. (Accessed: 14th April 2018)
53. Albu, S. C. Development on the production of a new type of extruder used in additive manufacturing, FDM technology. *Procedia Manuf.* **22**, 141–146 (2018).
54. Brischetto, S., Ferro, C. G., Torre, R. & Maggiore, P. 3D FDM production and mechanical behavior of polymeric sandwich specimens embedding classical and honeycomb cores. doi:10.1515/cls-2018-0007
55. Petruš Josef, V. v B. Kyselina polymléčná nejen jako biodegradabilní polymer. Available at: <http://www.chempoint.cz/kyselina-polymlecna-nejen-jako-biodegradabilni-polymer>. (Accessed: 13th April 2018)
56. Li, X., Ni, Z., Bai, S. & Lou, B. Preparation and Mechanical Properties of Fiber Reinforced PLA for 3D Printing Materials. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **322**, 22012 (2018).
57. Atkins, P. W. (Peter W. & De Paula, J. *Fyzikální chemie*. (Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2013).
58. Bartovská, L., Šišková, M. & Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. *Fyzikální chemie povrchů a koloidních soustav*. (Vydavatelství VŠCHT, 2010).
59. Měření povrchové energie pevných látek. Available at: [https://vydavatelstvi-old.vscht.cz/knihy/uid\\_es-001/hesla/mereni\\_povrchove\\_energie\\_pevnych\\_latek.html](https://vydavatelstvi-old.vscht.cz/knihy/uid_es-001/hesla/mereni_povrchove_energie_pevnych_latek.html). (Accessed: 15th April 2018)
60. Měření kontaktního úhlu sedící kapky jako metoda charakterizace povrchu. Available at: <http://www.chempoint.cz/mereni-kontaktneho-uhlu-sedici-kapky-jako-metoda-charakterizace-povrchu>. (Accessed: 15th April 2018)
61. Youngova rovnice. Available at: [http://147.33.74.135/knihy/uid\\_es-](http://147.33.74.135/knihy/uid_es-)

- 001/hesla/youngova\_rovnice.html. (Accessed: 15th April 2018)
62. Charakterizace vybraných povrchových vlastností materiálů. Available at: [https://vscht.cz/kat/download/lab\\_charakterizace\\_povrchu.pdf](https://vscht.cz/kat/download/lab_charakterizace_povrchu.pdf). (Accessed: 15th April 2018)
63. Měření úhlu smáčení. Available at: [http://147.33.74.135/knihy/uid\\_es-001/hesla/mereni\\_uhlu\\_smaceni.html](http://147.33.74.135/knihy/uid_es-001/hesla/mereni_uhlu_smaceni.html). (Accessed: 15th April 2018)
64. Holmberg, K., Shah, D. O. & Schwuger, M. J. *Handbook of applied surface and colloid chemistry*. (Wiley, 2002).
65. Meiron, T. S., Marmur, A. & Saguy, I. S. Contact angle measurement on rough surfaces. *J. Colloid Interface Sci.* **274**, 637–644 (2004).
66. Hiemenz, P. C. *Principles of colloid and surface chemistry*. (M. Dekker, 1986).
67. Mittal, K. L. *Contact angle, wettability and adhesion*. (CRC Press, 2006).
68. Gleiche, M., Chi, L., Gedig, E. & Fuchs, H. Anisotropic Contact-Angle Hysteresis of Chemically Nanostructured Surfaces. *ChemPhysChem* **2**, 187–191 (2001).
69. Grzesik, W. *Advanced machining processes of metallic materials: theory, modelling and applications*. (Elsevier, 2008).
70. Drsnost povrchu. Available at: [https://www.spszengrova.cz/texty/texty/TEK/Drsnost\\_povrchu.pdf](https://www.spszengrova.cz/texty/texty/TEK/Drsnost_povrchu.pdf). (Accessed: 15th April 2018)
71. Wu, S. *Polymer interface and adhesion*. (M. Dekker, 1982).
72. Fridman, A. *Plasma Chemistry*. (Cambridge university press, 2008).
73. Carrino, L., Moroni, G. & Polini, W. Cold Plasma Technology for Surface Treatment. *MACPLAS Int.* **2**, 69–72 (1999).
74. Chen, F. F. & Chang, J. P. *Lecture Notes on Principles of Plasma Processing*. (Springer US, 2003).
75. Chen, F. F. *Úvod do fyziky plazmatu*. (Academia, 1984).
76. Yasuda, H. Plasma for Modification of Polymers. *J. Macromol. Sci. Part A - Chem.* **10**, 383–420 (1976).
77. Kim, B. K., Kim, K. S., Park, C. E. & Ryu, C. M. Improvement of wettability and

- reduction of aging effect by plasma treatment of low-density polyethylene with argon and oxygen mixtures. *J. Adhes. Sci. Technol.* **16**, 509–521 (2002).
78. Zhang, L. G., Fisher, J. P. & Leong, K. W. (Professor of biomedical engineering). *3D bioprinting and nanotechnology in tissue engineering and regenerative medicine*.
79. Tan, K. H. et al. Selective laser sintering of biocompatible polymers for applications in tissue engineering. *Biomed. Mater. Eng.* **15**, 113–124 (2005).
80. Nevláková nosiče pro tkáňové inženýrství. Available at: [https://nanoed.tul.cz/pluginfile.php/5376/mod\\_resource/content/1/MTI\\_3\\_ZS2015\\_2016\\_materialy\\_3.pdf](https://nanoed.tul.cz/pluginfile.php/5376/mod_resource/content/1/MTI_3_ZS2015_2016_materialy_3.pdf). (Accessed: 22nd April 2018)
81. Kanczler, J. M. *et al.* Biocompatibility and osteogenic potential of human fetal femur-derived cells on surface selective laser sintered scaffolds. *Acta Biomater.* **5**, 2063–2071 (2009).
82. Scaffold - BioScaffolder (GeSiM). Available at: <https://gesim-bioinstruments-microfluidics.com/slider-bioscaffolder-2/>. (Accessed: 12th May 2018)
83. 3D BIO-TISKÁRNA BIOSCAFFOLDER. Available at: <http://www.chromspec.cz/produkty/detail.php?name=bioscaffolder>. (Accessed: 22nd April 2018)
84. Advancing Tissue Engineering: The State of 3D Bioprinting. Available at: <https://3dprint.com/26107/ui-bioprinting-3d-print/>. (Accessed: 22nd April 2018)
85. GRIFFITH, L. G. Emerging Design Principles in Biomaterials and Scaffolds for Tissue Engineering. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* **961**, 83–95 (2002).
86. Orban, J. M., Marra, K. G. & Hollinger, J. O. Composition Options for Tissue-Engineered Bone. *Tissue Eng.* **8**, 529–539 (2002).
87. Sharma, B. & Elisseeff, J. H. Engineering Structurally Organized Cartilage and Bone Tissues. *Ann. Biomed. Eng.* **32**, 148–159 (2004).
88. Zong, X. *et al.* Electrospun fine-textured scaffolds for heart tissue constructs. *Biomaterials* **26**, 5330–5338 (2005).
89. Moroni, L., de Wijn, J. R. & van Blitterswijk, C. A. 3D fiber-deposited scaffolds for tissue engineering: Influence of pores geometry and architecture on dynamic mechanical properties. *Biomaterials* **27**, 974–985 (2006).

90. O'Brien, F. J., Harley, B. A., Yannas, I. V. & Gibson, L. Influence of freezing rate on pore structure in freeze-dried collagen-GAG scaffolds. *Biomaterials* **25**, 1077–1086 (2004).
91. Yang, X. B. *et al.* Human Osteoprogenitor Growth and Differentiation on Synthetic Biodegradable Structures After Surface Modification.
92. Rina Nazarov, †, Hyoung-Joon Jin, †,‡ and & David L. Kaplan\*, †. Porous 3-D Scaffolds from Regenerated Silk Fibroin. (2004). doi:10.1021/BM034327E
93. Roy, T. D. *et al.* Performance of degradable composite bone repair products made via three-dimensional fabrication techniques. *J. Biomed. Mater. Res.* **66A**, 283–291 (2003).
94. Lin, A. S. ., Barrows, T. H., Cartmell, S. H. & Guldberg, R. E. Microarchitectural and mechanical characterization of oriented porous polymer scaffolds. *Biomaterials* **24**, 481–489 (2003).
95. Richardson, T. P., Peters, M. C., Ennett, A. B. & Mooney, D. J. Polymeric system for dual growth factor delivery. *Nat. Biotechnol.* **19**, 1029–1034 (2001).
96. Han, L.-H., Mapili, G., Chen, S. & Roy, K. Projection Microfabrication of Three-Dimensional Scaffolds for Tissue Engineering. *J. Manuf. Sci. Eng.* **130**, 21005 (2008).
97. Chua, C. K., Leong, K. F. & Lim, C. S. *Rapid Prototyping: Principles and Applications.* (WORLD SCIENTIFIC, 2003). doi:10.1142/5064
98. Deckard, C. R. Method and apparatus for producing parts by selective sintering. (1986).
99. Duan, B. *et al.* Three-dimensional nanocomposite scaffolds fabricated via selective laser sintering for bone tissue engineering. *Acta Biomater.* **6**, 4495–4505 (2010).
100. Bagratashvili, V. *et al.* Osteogenesis on Surface Selective Laser Sintered Bioresorbable Scaffolds. 12–15 (2008). doi:10.1007/978-3-540-69367-3\_4
101. Liu, F.-H., Lee, R.-T., Lin, W.-H. & Liao, Y.-S. Selective Laser Sintering of Bio-Metal Scaffold. *Procedia CIRP* **5**, 83–87 (2013).
102. Odde, D. J. & Renn, M. J. Laser-guided direct writing for applications in biotechnology. *Trends Biotechnol.* **17**, 385–389 (1999).
103. Nahmias, Y., Schwartz, R. E., Verfaillie, C. M. & Odde, D. J. Laser-guided direct

- writing for three-dimensional tissue engineering. *Biotechnol. Bioeng.* **92**, 129–136 (2005).
104. Nahmias, Y. & Odde, D. J. Micropatterning of living cells by laser-guided direct writing: application to fabrication of hepatic–endothelial sinusoid-like structures. *Nat. Protoc.* **1**, 2288–2296 (2006).
  105. Narasimhan, S. V., Goodwin, R. L., Borg, T. K., Dawson, D. M. & Gao, B. Z. Multiple beam laser cell micropatterning system. in (eds. Dholakia, K. & Spalding, G. C.) **5514**, 437 (International Society for Optics and Photonics, 2004).
  106. Rosenbalm, T. N., Owens, S., Bakken, D. & Gao, B. Z. Cell viability test after laser guidance. in (eds. Jacques, S. L. & Roach, W. P.) **6084**, 608418 (International Society for Optics and Photonics, 2006).
  107. Koch, L. *et al.* Laser Printing of Skin Cells and Human Stem Cells. *Tissue Eng. Part C Methods* **16**, 847–854 (2010).
  108. Gruene, M. *et al.* Laser Printing of Stem Cells for Biofabrication of Scaffold-Free Autologous Grafts. *Tissue Eng. Part C Methods* **17**, 79–87 (2011).
  109. Lauzurica, S. *et al.* Laser induced forward transfer bioprinting of immune cells and chemoattractant proteins for immunological responses studies (Conference Presentation). in *Laser 3D Manufacturing V* (eds. Helvajian, H., Piqué, A. & Gu, B.) **10523**, 28 (SPIE, 2018).
  110. Riggs, B. C. *et al.* Matrix-assisted pulsed laser methods for biofabrication. *MRS Bull.* **36**, 1043–1050 (2011).
  111. Barron, J. A., Ringeisen, B. R., Kim, H., Spargo, B. J. & Chrisey, D. B. Application of laser printing to mammalian cells. *Thin Solid Films* **453–454**, 383–387 (2004).
  112. Schiele, N. R. *et al.* Laser-based direct-write techniques for cell printing. *Biofabrication* **2**, 32001 (2010).
  113. Gittard, S. D. & Narayan, R. J. Laser direct writing of micro- and nano-scale medical devices. *Expert Rev. Med. Devices* **7**, 343–356 (2010).
  114. Hopp, B. *et al.* Survival and Proliferative Ability of Various Living Cell Types after Laser-Induced Forward Transfer. *Tissue Eng.* **11**, 1817–1823 (2005).
  115. Ringeisen, B. R. *et al.* Laser Printing of Pluripotent Embryonal Carcinoma Cells.

- Tissue Eng.* **10**, 483–491 (2004).
116. Patz, T. M. *et al.* Three-dimensional direct writing of B35 neuronal cells. *J. Biomed. Mater. Res. Part B Appl. Biomater.* **78B**, 124–130 (2006).
  117. Doraiswamy, A. *et al.* Laser microfabrication of hydroxyapatite-osteoblast-like cell composites. *J. Biomed. Mater. Res. Part A* **80A**, 635–643 (2007).
  118. Barron, J. A., Wu, P., Ladouceur, H. D. & Ringeisen, B. R. Biological Laser Printing: A Novel Technique for Creating Heterogeneous 3-dimensional Cell Patterns. *Biomed. Microdevices* **6**, 139–147 (2004).
  119. Barron, J. A., Spargo, B. J. & Ringeisen, B. R. Biological laser printing of three dimensional cellular structures. *Appl. Phys. A* **79**, 1027–1030 (2004).
  120. Pirlo, R. K., Wu, P., Liu, J. & Ringeisen, B. PLGA/hydrogel biopapers as a stackable substrate for printing HUVEC networks via BioLP™. *Biotechnol. Bioeng.* **109**, 262–273 (2012).
  121. Othon, C. M., Wu, X., Anders, J. J. & Ringeisen, B. R. Single-cell printing to form three-dimensional lines of olfactory ensheathing cells. *Biomed. Mater.* **3**, 34101 (2008).
  122. HULL, C. W. Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography. (1984).
  123. Melchels, F. P. W., Feijen, J. & Grijpma, D. W. A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering. *Biomaterials* **31**, 6121–30 (2010).
  124. Zhang, A. P. *et al.* Rapid Fabrication of Complex 3D Extracellular Microenvironments by Dynamic Optical Projection Stereolithography. *Adv. Mater.* **24**, 4266–4270 (2012).
  125. Chia, H. N. *et al.* Recent advances in 3D printing of biomaterials. *J. Biol. Eng.* **9**, 4 (2015).
  126. Singh, M. *et al.* 3D printed conformal microfluidics for isolation and profiling of biomarkers from whole organs. *Lab Chip* **17**, 2561–2571 (2017).
  127. Nyberg, E., Rindone, A., Dorafshar, A. & Grayson, W. L. Comparison of 3D-Printed Poly-ε-Caprolactone Scaffolds Functionalized with Tricalcium Phosphate, Hydroxyapatite, Bio-Oss, or Decellularized Bone Matrix . *Tissue Eng. Part A* **23**,



- 503–514 (2017).
128. Léčba kritické ischemie dolních končetin a terapeutická angiogeneze. Available at: <http://www.lekarsky.herba.sk/lekarsky-obzor-4-2011/lecba-kriticke-ischemie-dolnich-koncetin-a-terapeuticka-angiogeneze>. (Accessed: 23rd April 2018)
  129. Wang, M. O. *et al.* Evaluating 3D-Printed Biomaterials as Scaffolds for Vascularized Bone Tissue Engineering. *Adv. Mater.* **27**, 138–144 (2015).
  130. Johnstone, B., Hering, T. M., Caplan, A. I., Goldberg, V. M. & Yoo, J. U. In Vitro Chondrogenesis of Bone Marrow-Derived Mesenchymal Progenitor Cells. *Exp. Cell Res.* **238**, 265–272 (1998).
  131. Nuttelman, C. R., Tripodi, M. C. & Anseth, K. S. In vitro osteogenic differentiation of human mesenchymal stem cells photoencapsulated in PEG hydrogels. *J. Biomed. Mater. Res.* **68A**, 773–782 (2004).
  132. Shi, P., Laude, A. & Yeong, W. Y. Investigation of cell viability and morphology in 3D bio-printed alginate constructs with tunable stiffness. *J. Biomed. Mater. Res. Part A* **105**, 1009–1018 (2017).
  133. Kang, L. H. *et al.* Optimizing Photo-Encapsulation Viability of Heart Valve Cell Types in 3D Printable Composite Hydrogels. *Ann. Biomed. Eng.* **45**, 360–377 (2017).
  134. Han, D., Gu, H., Kim, J. & Yokota, S. A bio-inspired 3D-printed hybrid finger with integrated ECF (electro-conjugate fluid) micropumps. *Sensors Actuators A Phys.* **257**, 47–57 (2017).
  135. Martini, R., Balit, Y. & Barthelat, F. A comparative study of bio-inspired protective scales using 3D printing and mechanical testing. *Acta Biomater.* **55**, 360–372 (2017).
  136. Tavakoli, M., Sayuk, A., Lourenço, J. & Neto, P. Anthropomorphic finger for grasping applications: 3D printed endoskeleton in a soft skin. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **91**, 2607–2620 (2017).
  137. Malik, I. A., Mirkhalaf, M. & Barthelat, F. Bio-inspired ‘jigsaw’-like interlocking sutures: Modeling, optimization, 3D printing and testing. *J. Mech. Phys. Solids* **102**, 224–238 (2017).
  138. Slesarenko, V., Kazarinov, N. & Rudykh, S. Distinct failure modes in bio-inspired 3D-printed staggered composites under non-aligned loadings. *Smart Mater. Struct.*

- 26, 35053 (2017).
139. Mirkhalaf, M. & Barthelat, F. Design, 3D printing and testing of architected materials with bistable interlocks. *Extrem. Mech. Lett.* **11**, 1–7 (2017).
  140. U of T researchers develop portable 3D skin printer to repair deep wounds. Available at: <https://www.utoronto.ca/news/u-t-researchers-develop-portable-3d-skin-printer-repair-deep-wounds>. (Accessed: 10th May 2018)
  141. ČSN EN ISO 4287: Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu. *Praha Úřad pro Tech. Norm. Metrol. a státní zkušebnictví* (1998). doi:(01 4450)
  142. Influence of surface roughness on contact angle and wettability. Available at: <https://cdn2.hubspot.net/hubfs/516902/Pdf/Attension/TechNotes/AT-TN-07Surface-roughness-CA-wettability.pdf>. (Accessed: 16th May 2018)

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

$\gamma$	povrchové napětí
$\gamma_{lg}$	povrchová energie, povrchové napětí kapaliny
$\gamma_{sg}$	povrchová energie pevné látky
$\gamma_{sl}$	mezifázové napětí pevná látka-kapalina
$\gamma_{sv}^0$	povrchové napětí substrátu
$\pi_{e(sv)}$	smáčecí tlak
$\theta$	kontaktní úhel smáčení
$\theta_a$	postupující kontaktní úhel
$\theta_r$	ustupující kontaktní úhel
$\theta_c$	Cassieho kontaktní úhel
A	Helmholtzova energie
atm	jednotka tlaku
ABS	akrylonitrilbutadienstyren
AFM	mikroskopie atomárních sil
ASA	akrylonitril-styren-akryl
CAD	Computer-aided design (počítačem podporované projektování)
FDM	modelování depozicí taveniny
(g)	plynná fáze
G	Gibbsova energie
H	hystereze kontaktního úhlu
J	Joule; jednotka práce a energie
K	Kelvin; jednotka termodynamické teploty
(l)	kapalná fáze
l/g	fázové rozhraní kapalina / plyn

---

<i>l/l</i>	fázové rozhraní kapalina / kapalina
m	metr; jednotka délky
N	Newton; jednotka síly
PET	polyetyhlentereftalát
PETG	polyethylentereftalát-glykol
PLA	kyselina polymlečná
PLC	programovatelný logický automat
<i>r</i>	koeficient drsnosti
RE	reverzní inženýrství
( <i>s</i> )	pevná fáze
<i>s/g</i>	fázové rozhraní pevná látka / plyn
<i>s/l</i>	fázové rozhraní pevná látka / kapalina
SEM	skenovací elektronová mikroskopie
SLA	stereolitografie
SLM	selektivní tavení laserem
SLS	selektivní laserové spékání
UV	ultrafialové záření
3D	trojrozměrný
3DP	technologie trojrozměrných tiskařských technik

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1. Schéma výrobního procesu SLS <sup>24</sup> .....	17
Obrázek 2. Schéma výrobního procesu technologie LOM <sup>25</sup> .....	18
Obrázek 3. SLM 280 HL systém <sup>28</sup> .....	19
Obrázek 4. Příklad 3D tiskárny technologie DLP <sup>32</sup> .....	20
Obrázek 5. Princip technologie FDM v detailu <sup>35</sup> .....	21
Obrázek 6. Tiskárna Original Prusa i3 MK2 <sup>37</sup> .....	22
Obrázek 7. Filamenty materiálů pro FDM 3D tiskárnu a příklady výrobků <sup>434445</sup> .....	24
Obrázek 8. Rovnovážný tvar kapky na tuhém povrchu <sup>61</sup> .....	29
Obrázek 9. Kapka kapaliny na povrchu pevné látky <sup>58</sup> .....	30
Obrázek 10. Schéma uspořádání při měření kontaktního úhlu smáčení <sup>63</sup> .....	31
Obrázek 11. Kapky smáčející hydrofilní (světlé) a hydrofobní (tmavé) pruhy materiálu <sup>67</sup> .....	33
Obrázek 12. 2D profil představující kombinované efekty drsnosti, vlnitosti a tvaru .....	34
Obrázek 13. Příklad drsnoměru fungujícího na principu indukčnosti .....	35
Obrázek 14. Závislost teploty na tlaku u rovnovážného a nerovnovážného plazmatu <sup>74</sup> .....	37
Obrázek 15. Komponenty radiofrekvenčního plazmatického systému <sup>74</sup> .....	38
Obrázek 16. Příklad scaffoldu <sup>82</sup> .....	41
Obrázek 17. Příklad komerční bio-tiskárny a příklady „orgánů“ vyrobených pomocí bio 3D-tisku <sup>84</sup> .....	42
Obrázek 18. Schématické uspořádání procesu SLS <sup>79</sup> .....	44
Obrázek 19. Schéma systému LGDW <sup>102</sup> .....	46
Obrázek 20. Schéma technologie LIFT <sup>78</sup> .....	47
Obrázek 21. Schéma technologie DOPsL <sup>78</sup> .....	50
Obrázek 22. Prostředí přípravy modelu vzorků pro 3D tiskárnu Original Prusa i3 MK3 .....	59
Obrázek 23. Prostředí přípravy modelu vzorku pro 3D tiskárnu Ultimaker 2+ .....	59
Obrázek 24. 3D model vzorku pro horizontální typ tisku .....	60
Obrázek 25. Reálná fotografie vzorku – horizontální typ tisku .....	60
Obrázek 26. 3D model vzorku pro vertikální typ tisku .....	61
Obrázek 27. Reálná fotografie vzorku – vertikální typ tisku .....	61

Obrázek 28. Fotografie vertikálního typu tisku pomocí 3D tiskárny Original Prusa i3 MK3.....	62
Obrázek 29. Fotografie horizontálního typu tisku pomocí 3D tiskárny Ultimaker 2+.....	62
Obrázek 30. Zařízení na měření drsnosti – drsnoměr Diavite DH-8 (Diavite AG)....	64
Obrázek 31. Schéma os měření drsnosti na vzorku .....	64
Obrázek 32. Závislost střední hodnoty kontaktního úhlu smáčení na době plazmování; PLA, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, horní strana.....	67
Obrázek 33. Závislost střední hodnoty kontaktního úhlu smáčení na době plazmování; PLA, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, horní strana (měřeno pod úhlem 90 °).....	67
Obrázek 34. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená) pro PLA, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, horní strana, směr X.....	68
Obrázek 35. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená) pro PLA, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, horní strana, směr Y .....	68
Obrázek 36. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená) pro PLA, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, horní strana, směr Z .....	68
Obrázek 37. SEM snímek – PLA, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk (horní strana).....	70
Obrázek 38. SEM snímek (3D rekonstrukce drsnosti): pro PLA, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk (horní strana); $R_z (8,71 \pm 1,87 \mu\text{m})$ , $R_a (1,75 \pm 0,28 \mu\text{m})$ , $S_a 2,05 \mu\text{m}$ .....	70
Obrázek 39. Závislost střední hodnoty kontaktního úhlu smáčení na době plazmování; PLA, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, spodní strana .....	71
Obrázek 40. Závislost střední hodnoty kontaktního úhlu smáčení na době plazmování; PLA, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, spodní strana (měřeno pod úhlem 90 °).....	71
Obrázek 41. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená): PLA, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, spodní strana, směr X.....	72
Obrázek 42. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená): PLA, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, spodní strana, směr Y.....	72
Obrázek 43. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená): PLA, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, spodní strana, směr Z .....	72

Obrázek 44. SEM snímek – PLA, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk (spodní strana) .....	74
Obrázek 45. SEM snímek (3D rekonstrukce drsnosti): pro PLA, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk (spodní strana); $R_z (3,61 \pm 0,41 \mu\text{m})$ , $R_a (0,87 \pm 0,18 \mu\text{m})$ , $S_a 1,16 \mu\text{m}$ . .....	74
Obrázek 46. Závislost střední hodnoty kontaktního úhlu smáčení na době plazmování; PLA, Original Prusa i3 MK3, vertikální tisk.....	75
Obrázek 47. Závislost střední hodnoty kontaktního úhlu smáčení na době plazmování; PLA, Original Prusa i3 MK3, vertikální tisk (měřeno pod úhlem $90^\circ$ ) .....	75
Obrázek 48. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená): PLA, Original Prusa i3 MK3, vertikální tisk, směr X.....	76
Obrázek 49. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená): PLA, Original Prusa i3 MK3, vertikální tisk, směr Y .....	76
Obrázek 50. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená): PLA, Original Prusa i3 MK3, vertikální tisk, směr Z .....	76
Obrázek 51. SEM snímek – PLA, Original Prusa i3 MK3, vertikální tisk.....	78
Obrázek 52. SEM snímek (3D rekonstrukce drsnosti povrchu): PLA, Original Prusa i3 MK3, vertikální tisk; $R_z (22,23 \pm 0,60 \mu\text{m})$ , $R_a (5,93 \pm 0,21 \mu\text{m})$ , $S_a 5,74 \mu\text{m}$	78
Obrázek 53. Závislost střední hodnoty kontaktního úhlu smáčení na době plazmování; PLA, Ultimaker 2+, horizontální tisk, horní strana.....	80
Obrázek 54. Závislost střední hodnoty kontaktního úhlu smáčení na době plazmování; PLA, Ultimaker 2+, horizontální tisk, horní strana (měřeno pod úhlem $90^\circ$ )..	80
Obrázek 55. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená): kombinace PLA, Ultimaker 2+, horizontální tisk, horní strana, směr X .....	81
Obrázek 56. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená): kombinace PLA, Ultimaker 2+, horizontální tisk, horní strana, směr Y .....	81
Obrázek 57. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená): kombinace PLA, Ultimaker 2+, horizontální tisk, horní strana, směr Z .....	81
Obrázek 58. SEM snímek – PLA, Ultimaker 2+, horizontální tisk (horní strana) .....	83
Obrázek 59. SEM snímek (3D rekonstrukce drsnosti): PLA, Ultimaker 2+, horizontální tisk (horní strana); $R_z (8,87 \pm 0,37 \mu\text{m})$ , $R_a (1,73 \pm 0,08 \mu\text{m})$ , $S_a 1,80 \mu\text{m}$ .....	83

Obrázek 60. Závislost střední hodnoty kontaktního úhlu smáčení na době plazmování; PLA, Ultimaker 2+, horizontální tisk, spodní strana.....	84
Obrázek 61. Závislost střední hodnoty kontaktního úhlu smáčení na době plazmování; PLA, Ultimaker 2+, horizontální tisk, spodní strana (měřeno pod úhlem 90 °).....	84
Obrázek 62. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená): kombinace PLA, Ultimaker 2+, horizontální tisk, spodní strana, směr X.....	85
Obrázek 63. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená): kombinace PLA, Ultimaker 2+, horizontální tisk, spodní strana, směr Y .....	85
Obrázek 64. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená): kombinace PLA, Ultimaker 2+, horizontální tisk, spodní strana, směr Z .....	85
Obrázek 65. SEM snímek – PLA, Ultimaker 2+, horizontální tisk (spodní strana) ...	87
Obrázek 66. SEM snímek (3D rekonstrukce drsnosti): PLA, Ultimaker 2+, horizontální tisk (spodní strana); $R_z (27,24 \pm 1,41 \mu\text{m})$ , $R_a (7,02 \pm 0,13 \mu\text{m})$ , $S_a$ 6,97 $\mu\text{m}$ .....	87
Obrázek 67. Závislost střední hodnoty kontaktního úhlu smáčení na době plazmování; PLA, Ultimaker 2+, vertikální tisk.....	88
Obrázek 68. Závislost střední hodnoty kontaktního úhlu smáčení na době plazmování; PLA, Ultimaker 2+, vertikální tisk (měřeno pod úhlem 90 °).....	88
Obrázek 69. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená): PLA, Ultimaker 2+, vertikální tisk, směr X .....	89
Obrázek 70. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená): PLA, Ultimaker 2+, vertikální tisk, směr Y .....	89
Obrázek 71. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená): PLA, Ultimaker 2+, vertikální tisk, směr Z.....	89
Obrázek 72. SEM snímek PLA, Ultimaker 2+, vertikální tisk.....	91
Obrázek 73. SEM snímek (3D rekonstrukce povrchu), PLA, Ultimaker 2+, vertikální tisk; $R_z (11,17 \pm 0,35 \mu\text{m})$ , $R_a (2,81 \pm 0,09 \mu\text{m})$ , $S_a 3,10 \mu\text{m}$ . .....	91
Obrázek 74. Závislost střední hodnoty kontaktního úhlu smáčení na době plazmování; ABS, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, horní strana .....	94
Obrázek 75. Závislost střední hodnoty kontaktního úhlu smáčení na době plazmování; ABS, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, horní strana (měřeno pod úhlem 90 °).....	94



Obrázek 76. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená): ABS, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, horní strana, směr X.....	95
Obrázek 77. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená): ABS, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, horní strana, směr Y.....	95
Obrázek 78. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená): ABS, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, horní strana, směr Z.....	95
Obrázek 79. SEM snímek – ABS, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk (horní strana).....	97
Obrázek 80. SEM snímek (3D rekonstrukce drsnosti): ABS, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk (horní strana); $R_z$ ( $6,75 \pm 0,55 \mu\text{m}$ ), $R_a$ ( $1,36 \pm 0,05 \mu\text{m}$ ), $S_a$ $1,56 \mu\text{m}$ .....	97
Obrázek 81. 3D rekonstrukce povrchu optickým povrchovým profilometrem, 3 x 3 mm, ABS, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk (horní strana).....	98
Obrázek 82. Závislost střední hodnoty kontaktního úhlu smáčení na době plazmování; ABS, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, spodní strana.....	99
Obrázek 83. Závislost střední hodnoty kontaktního úhlu smáčení na době plazmování; ABS, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, spodní strana (měřeno pod úhlem $90^\circ$ ).....	99
Obrázek 84. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená): ABS, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, spodní strana, směr X.....	100
Obrázek 85. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená): ABS, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, spodní strana, směr Y.....	100
Obrázek 86. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená): ABS, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, spodní strana, směr Z.....	100
Obrázek 87. SEM snímek – ABS, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk (spodní strana).....	102
Obrázek 88. SEM snímek (3D rekonstrukce drsnosti): pro ABS, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk (spodní strana); $R_z$ ( $20,79 \pm 1,74 \mu\text{m}$ ), $R_a$ ( $4,61 \pm 0,22 \mu\text{m}$ ), $S_a$ $4,89 \mu\text{m}$ .....	102
Obrázek 89. 3D rekonstrukce povrchu optickým povrchovým profilometrem; 3 x 3 mm, ABS, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk (spodní strana).....	103
Obrázek 90. Závislost střední hodnoty kontaktního úhlu smáčení na době plazmování; ABS, Original Prusa i3 MK3, vertikální tisk.....	104

Obrázek 91. Závislost střední hodnoty kontaktního úhlu smáčení na době plazmování; ABS, Original Prusa i3 MK3, vertikální tisk (měřeno pod úhlem 90 °).....	104
Obrázek 92. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená): ABS, Original Prusa i3 MK3, vertikální tisk, směr X.....	105
Obrázek 93. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená): ABS, Original Prusa i3 MK3, vertikální tisk, směr Y.....	105
Obrázek 94. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená): ABS, Original Prusa i3 MK3, vertikální tisk, směr Z.....	105
Obrázek 95. SEM snímek – ABS, Original Prusa i3 MK3, vertikální tisk .....	107
Obrázek 96. SEM snímek (3D rekonstrukce drsnosti): pro ABS, Original Prusa i3 MK3, vertikální tisk; $R_z (14,28 \pm 0,14 \mu\text{m})$ , $R_a (3,83 \pm 0,06 \mu\text{m})$ , $S_a 3,73$ $\mu\text{m}$ .....	107
Obrázek 97. 3D rekonstrukce povrchu optickým povrchovým profilometrem; 3 x 3 mm, ABS, Original Prusa i3 MK3, vertikální tisk .....	108
Obrázek 98. Závislost střední hodnoty kontaktního úhlu smáčení na době plazmování; ABS, Ultimaker 2+, horizontální tisk, horní strana.....	110
Obrázek 99. Závislost střední hodnoty kontaktního úhlu smáčení na době plazmování; ABS, Ultimaker 2+, horizontální tisk, horní strana (měřeno pod úhlem 90 °).....	110
Obrázek 100. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená): varianta ABS, Ultimaker 2+, horizontální tisk, horní strana, směr X.....	111
Obrázek 101. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená): varianta ABS, Ultimaker 2+, horizontální tisk, horní strana, směr Y.....	111
Obrázek 102. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená): varianta ABS, Ultimaker 2+, horizontální tisk, horní strana, směr Z.....	111
Obrázek 103. SEM snímek ABS, Ultimaker 2+, horizontální tisk (horní strana) ....	113
Obrázek 104. SEM snímek (3D rekonstrukce drsnosti): ABS, Ultimaker 2+, horizontální tisk (horní strana); $R_z (3,93 \pm 0,17 \mu\text{m})$ , $R_a (0,726 \pm 0,05 \mu\text{m})$ , $S_a$ $0,976 \mu\text{m}$ .....	113
Obrázek 105. 3D rekonstrukce povrchu optickým povrchovým profilometrem, plocha 3 x 3 mm, ABS, Ultimaker 2+, horizontální tisk (horní strana).....	114
Obrázek 106. Závislost střední hodnoty kontaktního úhlu smáčení na době plazmování; ABS, Ultimaker 2+, horizontální tisk, spodní strana.....	115

Obrázek 107. Závislost střední hodnoty kontaktního úhlu smáčení na době plazmování; ABS, Ultimaker 2+, horizontální tisk, spodní strana (měřeno pod úhlem 90°).....	115
Obrázek 108. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená) u varianty ABS, Ultimaker 2+, horizontální tisk, spodní strana, směr X.....	116
Obrázek 109. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená) u varianty ABS, Ultimaker 2+, horizontální tisk, spodní strana, směr Y.....	116
Obrázek 110. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená) u varianty ABS, Ultimaker 2+, horizontální tisk, spodní strana, směr Z.....	116
Obrázek 111. SEM snímek – ABS, Ultimaker 2+, horizontální tisk (spodní strana).....	118
Obrázek 112. SEM snímek (3D rekonstrukce drsnosti): ABS, Ultimaker 2+, horizontální tisk (spodní strana); $R_z (6,07 \pm 0,48 \mu\text{m})$ , $R_a (1,518 \pm 0,12 \mu\text{m})$ , $S_a 1,81 \mu\text{m}$ .....	118
Obrázek 113. 3D rekonstrukce povrchu optickým povrchovým profilometrem; 3 x 3 mm, ABS, Ultimaker 2+, horizontální tisk (spodní strana).....	119
Obrázek 114. Závislost střední hodnoty kontaktního úhlu smáčení na době plazmování; ABS, Ultimaker 2+, vertikální tisk.....	120
Obrázek 115. Závislost střední hodnoty kontaktního úhlu smáčení na době plazmování; ABS, Ultimaker 2+, vertikální tisk (měřeno pod úhlem 90 °)....	120
Obrázek 116. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená) u varianty ABS, Ultimaker 2+, vertikální tisk, směr X.....	121
Obrázek 117. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená) u varianty ABS, Ultimaker 2+, vertikální tisk, směr Y.....	121
Obrázek 118. Profily drsnosti (modrá) a vlnitosti (červená) u varianty ABS, Ultimaker 2+, vertikální tisk, směr Z.....	121
Obrázek 119. SEM snímek – ABS, Ultimaker 2+, vertikální tisk.....	123
Obrázek 120. SEM snímek (3D rekonstrukce drsnosti): ABS, Ultimaker 2+, vertikální tisk; $R_z (16,01 \pm 0,72 \mu\text{m})$ , $R_a (4,07 \pm 0,19 \mu\text{m})$ , $S_a 4,15 \mu\text{m}$ .....	123
Obrázek 121. 3D rekonstrukce povrchu optickým povrchovým profilometrem; analýza plochy 3 x 3 mm, ABS, Ultimaker 2+, vertikální tisk.....	124

**SEZNAM TABULEK**

Tabulka 1. Povrchová napětí kapalin při 293 K <sup>57</sup> .....	28
Tabulka 2. Seznam parametrů drsnosti povrchu 2D podle ISO 4287 <sup>69</sup> .....	35
Tabulka 3. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru <i>X</i> (PLA, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, horní strana) .....	69
Tabulka 4. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru <i>Y</i> (PLA, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, horní strana) .....	69
Tabulka 5. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru <i>Z</i> (PLA, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, horní strana) .....	69
Tabulka 6. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru <i>X</i> (PLA, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, spodní strana) .....	73
Tabulka 7. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru <i>Y</i> (PLA, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, spodní strana) .....	73
Tabulka 8. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru <i>Z</i> (PLA, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, spodní strana) .....	73
Tabulka 9. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru <i>X</i> (PLA, Original Prusa i3 MK3, vertikální tisk) .....	77
Tabulka 10. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru <i>Y</i> (PLA, Original Prusa i3 MK3, vertikální tisk) .....	77
Tabulka 11. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru <i>Z</i> (PLA, Original Prusa i3 MK3, vertikální tisk) .....	77
Tabulka 12. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru <i>X</i> (materiál PLA, Ultimaker 2+, horizontální tisk, horní strana) .....	82
Tabulka 13. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru <i>Y</i> (materiál PLA, Ultimaker 2+, horizontální tisk, horní strana) .....	82
Tabulka 14. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru <i>Z</i> (materiál PLA, Ultimaker 2+, horizontální tisk, horní strana) .....	82
Tabulka 15. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru <i>X</i> (materiál PLA, Ultimaker 2+, horizontální tisk, spodní strana) .....	86
Tabulka 16. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru <i>Y</i> (materiál PLA, Ultimaker 2+, horizontální tisk, spodní strana) .....	86
Tabulka 17. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru <i>Z</i> (materiál PLA, Ultimaker 2+, horizontální tisk, spodní strana) .....	86

Tabulka 18. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru $X$ (materiál PLA, Ultimaker 2+, vertikální tisk) .....	90
Tabulka 19. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru $Y$ (materiál PLA, Ultimaker 2+, vertikální tisk) .....	90
Tabulka 20. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru $Z$ (materiál PLA, Ultimaker 2+, vertikální tisk) .....	90
Tabulka 21. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru $X$ (ABS, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, horní strana) .....	96
Tabulka 22. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru $Y$ (ABS, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, horní strana) .....	96
Tabulka 23. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru $Z$ (ABS, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, horní strana) .....	96
Tabulka 24. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru $X$ (ABS, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, spodní strana) .....	101
Tabulka 25. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru $Y$ (ABS, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, spodní strana) .....	101
Tabulka 26. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru $Z$ (ABS, Original Prusa i3 MK3, horizontální tisk, spodní strana) .....	101
Tabulka 27. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru $X$ (ABS, Original Prusa i3 MK3, vertikální tisk) .....	106
Tabulka 28. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru $Y$ (ABS, Original Prusa i3 MK3, vertikální tisk) .....	106
Tabulka 29. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru $Z$ (ABS, Original Prusa i3 MK3, vertikální tisk) .....	106
Tabulka 30. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru $X$ (materiál ABS, Ultimaker 2+, horizontální tisk, horní strana) .....	112
Tabulka 31. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru $Y$ (materiál ABS, Ultimaker 2+, horizontální tisk, horní strana) .....	112
Tabulka 32. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru $Z$ (materiál ABS, Ultimaker 2+, horizontální tisk, horní strana) .....	112
Tabulka 33. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru $X$ (materiál ABS, Ultimaker 2+, horizontální tisk, spodní strana) .....	117

Tabulka 34. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru $Y$ (materiál ABS, Ultimaker 2+, horizontální tisk, spodní strana) .....	117
Tabulka 35. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru $Z$ (materiál ABS, Ultimaker 2+, horizontální tisk, spodní strana) .....	117
Tabulka 36. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru $X$ (materiál ABS, Ultimaker 2+, vertikální tisk) .....	122
Tabulka 37. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru $Y$ (materiál ABS, Ultimaker 2+, vertikální tisk) .....	122
Tabulka 38. Parametry profilu drsnosti, měřeno ve směru $Z$ (materiál ABS, Ultimaker 2+, vertikální tisk) .....	122

