



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

METODY POVRCHOVÝCH ÚPRAV APLIKOVANÉ NA VZORKY VYROBENÉ 3D TISKEM A JEJICH ANALÝZA

SURFACE TREATMENT METHODS APPLIED TO 3D PRINTED SAMPLES AND THEIR ANALYSIS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Michal Rygl

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Michal Rygl
Studijní program:	Strojírenská technologie
Studijní obor:	Strojírenská technologie a průmyslový management
Vedoucí práce:	doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.
Akademický rok:	2021/22

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

Metody povrchových úprav aplikované na vzorky vyrobené 3D tiskem a jejich analýza

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomová práce bude zaměřena na porovnání experimentálních metod povrchových úprav plastových dílců vyrobených pomocí technologie FDM/FFF 3D tisku. Zkušební vzorky budou vyrobeny z konvenčních materiálů vhodných pro 3D tisk. Samotné povrchové úpravy budou realizovány čtyřmi postupy (chemickým leptáním, tepelným ovlivněním, mechanickým broušením a nástřikem plniče). Výsledné povrchy budou analyzovány a jejich parametry změřeny. Výstupem diplomové práce bude zhodnocení povrchových úprav doplněné o analýzu parametrů povrchu a porovnání jednotlivých metod post–processingu.

Cíle diplomové práce:

Theoretická část – rešerše dostupných tiskových strun a možnosti post–processingu, rozbor parametrů struktury povrchu.

Experimentální část – návrh a výroba testovacích vzorků, stanovení parametrů post–processingu a provedení povrchových úprav dílců, porovnání použitých technologií.

Technicko–ekonomické zhodnocení – analýza, zpracování a vyhodnocení naměřených dat.

Seznam doporučené literatury:

PTÁČEK, L. a kol. Nauka o materiálu I. 1. vyd. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 2003. 516 s. ISBN 80-7204-193-2.

BUDMEN, I. et al. The book on 3D printing. 1. Lexington, KY: CreateSpace, 2013. ISBN 9781489529442.

GEBHARDT, A. et al. Additive manufacturing: 3D printing for prototyping and manufacturing. Cincinnati: Hanser Publications, [2016]. ISBN 978-1-56990-582-1.

VALERGA, A. et al. Impact of Chemical Post-Processing in Fused Deposition Modelling (FDM) on Polylactic Acid (PLA) Surface Quality and Structure [online]. University of Cadiz, Spain, [2019]. ISSN 2073-4360.

LALEHPOUR, A. et al. Surface roughness of FDM parts after post-processing with acetone vapor bath smoothing process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018, 95(1), 1505-1520. ISSN 1433-3015.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

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

Abstrakt

Předložená práce pojednává o problematice vyhlazování dílů vyrobených pomocí technologie FFF 3D tisku. Cílem práce bylo porovnat metody povrchových úprav po technické i ekonomické stránce. Důraz byl kladen zejména na míru snížení drsnosti povrchu se zachováním přijatelné výše procesních nákladů. Pro vyhlazování plastových výtisků byla použita technologie chemického leptání, lokálního natavení CO₂ laserem, omílání a povrchová úprava založená na nástřiku plniče. Procesu vyhlazování byly podrobeny výtisky z materiálu ABS, PLA, PolySmooth a PolyCast. Pro jednotlivé materiály byly nejprve stanoveny tiskové parametry a na jejich základě byly vyrobeny testovací vzorky. Po stanovení procesních parametrů pro jednotlivé metody povrchových úprav byly dokončené povrchy měřeny profilometrem. Na základě výsledků byla jako nejefektivnější metoda vyhlazování povrchu vyhodnocena metoda chemického leptání. Díky naleptání povrchové vrstvy vzorku z materiálu PolySmooth byl plošný parametr drsnosti Sa, oproti referenčnímu vzorku, snížen v průměru o 99,56 %. Nejméně efektivní metodou byla technologie omílání, která vykazovala snížení drsnosti v průměru o 30,07 % v případě materiálu ABS. Technologie založená na obrušování dílů brusnými kameny však vykazovala nejnižší procesní náklady na dokončování vzorků. Technicky i ekonomicky nejlepší volbou ze všech testovaných kombinací byla vyhodnocena technologie chemického leptání výtisků z polymeru ABS. Výsledky a závěry práce poslouží nejen pro volbu dokončovací operace a materiálu pro specifické aplikace výtisků v praxi, ale i rozšíření možností použití aditivně vyráběných komponent.

Klíčová slova

3D tisk, FFF, povrchové úpravy, drsnost, náklady

Abstract

The presented paper deals with the issue of smoothing parts produced using FFF 3D printing technology. The aim of the paper was to compare technical surface treatment methods and economic side. Emphasis was placed especially on the degree of reduction of surface roughness while maintaining an acceptable level of process costs. Chemical smoothing, local CO₂ laser melting, tumbling and surface treatment based on filler spraying were used to smooth the plastic prints. Prints made of ABS, PLA, PolySmooth and PolyCast were subjected to the smoothing process. Printing parameters were first determined for individual materials and test samples were produced on their basis. After determining the process parameters for individual surface treatment methods, the finished surfaces were measured with a profilometer. Based on the results, the chemical etching method was evaluated as the most effective surface smoothing method. Due to the etching of the surface layer of the sample made of PolySmooth material, the surface roughness parameter Sa was reduced in diameter compared to the reference sample. by 99,56 %. The least effective method was tumbling technology, which showed an average roughness reduction of 30,07 % in the case of ABS. However, the technology based on grinding parts with grinding stones had the lowest process costs for finishing the samples. Technical The economically best choice of all tested combinations was the technology of chemical etching of ABS polymer prints. The results and conclusions of the work will serve not only to select the finishing operation and material for specific applications of prints in practice, but also to expand the possibilities of using additively produced components.

Key words

3D printing, FFF, post-processing, roughness, costs

Bibliografická citace

RYGL, Michal. *Metody povrchových úprav aplikované na vzorky vyrobené 3D tiskem a jejich analýza* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/140247>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Josef Sedlák.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Metody povrchových úprav aplikované na vzorky vyrobené 3D tiskem a jejich analýza* vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

v Brně, datum

Bc. Michal Rygl

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu předložené práce, doc. Ing. Josefu Sedlákoví, Ph.D. za cenné rady, odborné vedení a vynaložený čas. Rád bych také poděkoval vedení Katedry strojírenství Univerzity obrany, za poskytnutí měřicího vybavení a cenných rad.

Velké díky patří také rodině, přátelům a kolegům za neustálou podporu a vytvoření produktivního prostředí během celého studia.

OBSAH

ÚVOD	9
1 Rozbor zadání	10
2 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ.....	12
2.1 Metody 3D tisku	12
2.1.1 Materiály v kapalně fázi	12
2.1.2 Materiály ve formě prášku.....	13
2.1.3 Materiály v tuhé formě	14
2.2 FDM/FFF 3D tisk.....	14
2.2.1 Druhy konstrukcí FFF tiskáren.....	15
2.3 Materiály pro 3D tisk	16
2.3.1 Filament ABS	16
2.3.2 Filament PET-G.....	17
2.3.3 Filament PLA	18
2.3.4 Filament PVB	18
2.3.5 Speciální kompozitní filamenty.....	19
2.4 Povrchové úpravy.....	20
2.4.1 Chemické leptání	20
2.4.2 Lokální natavení	23
2.4.3 Omílání	24
2.4.4 Aplikace plniče	24
2.5 Textura povrchu	26
2.5.1 2D profily	26
2.5.2 Základní parametry 2D profilu.....	28
2.5.3 3D textura	30
3 MATERIÁLY A METODY.....	33
3.1 3D tisk	33
3.1.1 3D tiskárna.....	34
3.1.2 Software pro přípravu tisku (Slicer).....	35
3.2 Vybrané materiály	36
3.3 Tvorba a optimalizace tiskových profilů.....	37
3.3.1 Teplota trysky a výkon chlazení.....	38
3.3.2 Rychlost a hloubka retrakce	38
3.3.3 Šířka extruze	39
3.3.4 Finální test tiskových parametrů.....	39
3.4 Návrh a výroba testovacích vzorků	40
3.5 Aplikace povrchových úprav.....	42
3.5.1 Technologie chemické leptání	42
3.5.2 Technologie lokální natavení.....	45
3.5.3 Technologie omílání	46
3.5.4 Nástřik plniče.....	47
3.6 Měření textury povrchu	47
4 VÝSLEDKY.....	53

4.1	Parametry tisku	53
4.2	Textura povrchu ABS vzorku.....	53
4.3	Porovnání vybraných materiálů v rámci dokončovací metody	64
5	TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	68
5.1	Ekonomická náročnost výroby vzorků.....	68
5.2	Ekonomická náročnost procesu vyhlazování	68
5.3	Porovnání celkových nákladů výrobu vzorků chemickým leptáním	71
6	DISKUZE VÝSLEDKŮ	73
7	ZÁVĚR.....	75
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	76
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	80
	SEZNAM PŘÍLOH	81

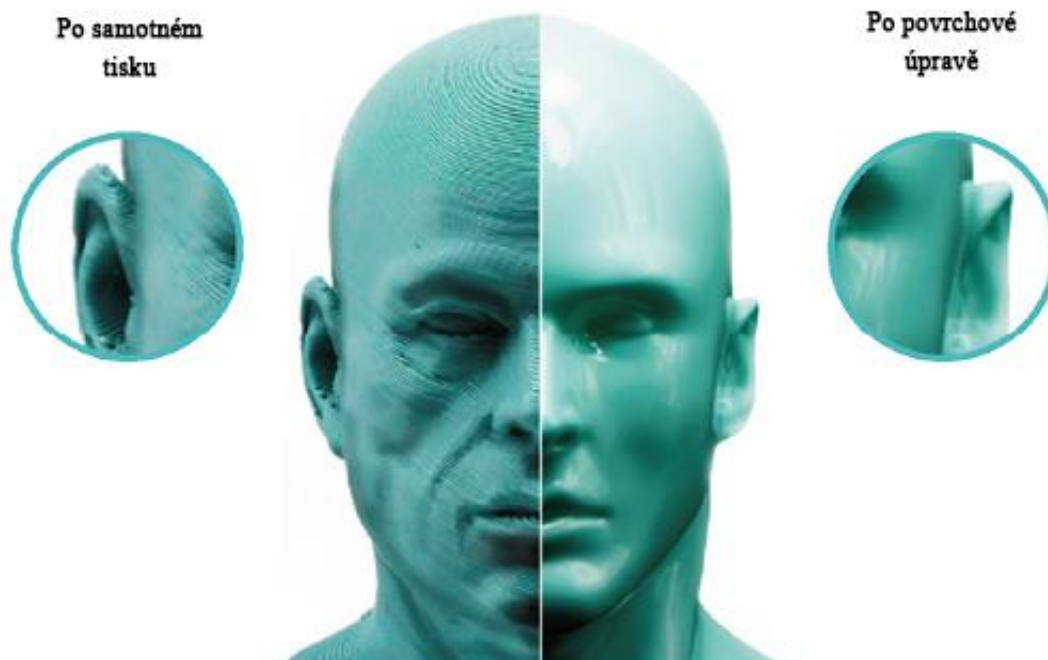
ÚVOD

Trendem posledních let se na poli aditivní výroby bezpochyby stala technologie FDM/FFF 3D tisku. Principem této metody je vrstvení materiálu, protlačeného skrze trysku, nahřátou na tavicí teplotu použitého materiálu. Díky zvýšení dostupnosti a rostoucí popularitě jsou 3D tiskárny ve velké míře využívány nejen ve firmách, ale i domácnostech. Praktické využití 3D tisku je možné nalézt téměř v každém odvětví kusové a malosériové produkce. Od výroby držáků, dorazů, forem až po šperky či designové vybavení bytů. Zvýšení povědomí a popularity stolních 3D tiskáren vede řadu výrobců k dalšímu vývoji nejen samotné konstrukce, ale i technického provedení či firmwaru.

Společně se samotnými tiskárnami jsou velmi rychle vyvíjeny i materiály, které jsou pro metodu FDM vyráběny ve formě strun. Do konvenčně využívaných materiálů jako jsou ABS, PET-G, PLA či polyamid jsou přidávány uhlíková či aramidová vlákna ke zvýšení pevnosti a modulu pružnosti, kovový prach nebo dřevěná drť pro designové účely, či vosk, díky kterému lze z výtisku snadno vyrobít odlitek a snížit tak náklady na finální produkt [1].

Jednou z technologických i designových nevýhod FDM 3D tisku je nízká kvalita povrchové vrstvy. Kvůli tomu je pro specifická použití výrobku nutná povrchová úprava s cílem dosažení vyhlazení povrchu. Metody vyhlazování jsou však závislé na materiálu, ze kterého je výtisk vyroben. Nejčastěji používanou metodou efektivního vyhlazování je chemické leptání. Další využívanou metodou je mechanické broušení, kdy je však proces náročnější a výsledný povrch není po celé ploše výtisku homogenně vyhlazen.

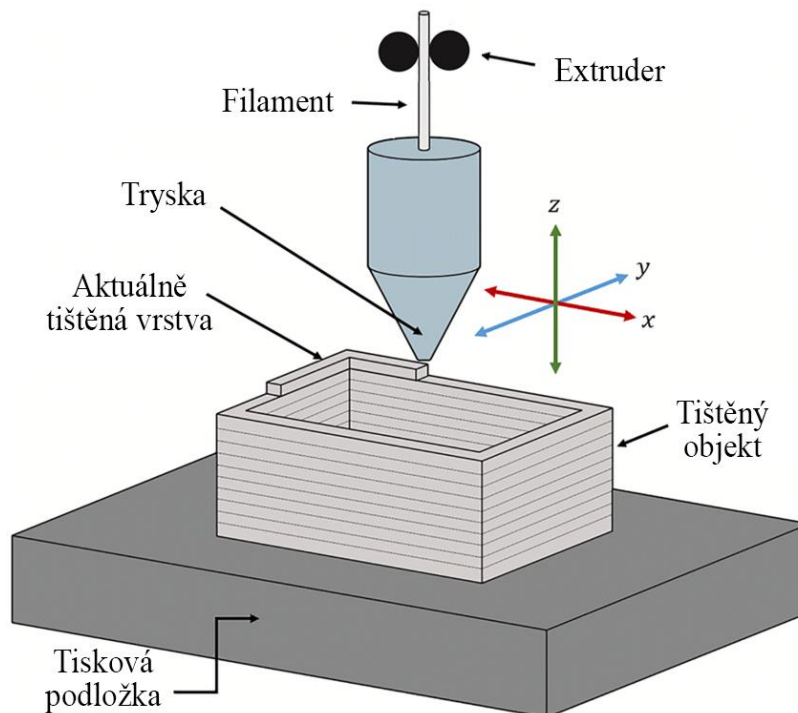
Práce proto dostupné metody povrchových úprav výtisků porovnává a hodnotí, jaké metody jsou vhodné, pro jakou aplikaci a materiál. Dále také definuje vhodné tiskové parametry a postup povrchových úprav.



Obr. 1 Porovnání základního a upraveného povrchu výtisku [2].

1 ROZBOR ZADÁNÍ

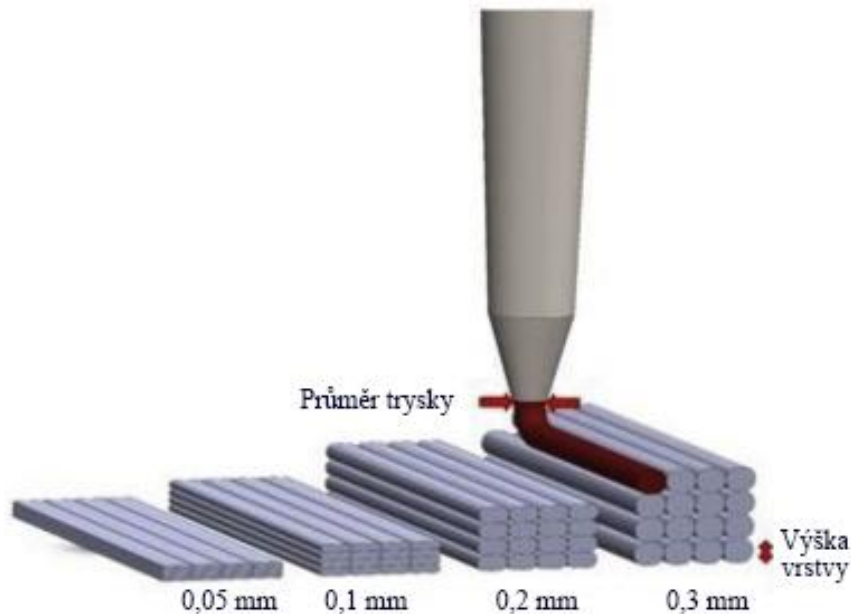
Aditivní technologie jsou v dnešní době využívány ve velké míře. Jejich využití je možné nalézt téměř v každém technickém oboru, zvláště metodu Fused Deposition Modeling (FDM). Právě metoda FDM je často využívána kvůli nízké pořizovací ceně stroje a materiálu i jednoduchosti konstrukce. Principem této aditivní technologie výroby je vrstvení roztaveného materiálu, který je protlačován skrze kovovou trysku na vyhřívanou podložku (Obr. 2). Materiál ve formě plastové struny (tzv. filament) je extruderem (tlačným motorem) natlačován nebo natahován (podle typu konstrukce) do tiskové hlavy. Ta se díky krokovým motorům může hýbat v rovině XZ (podložka se pohybuje pouze v ose Y) a díky tomu je materiál nanášen na předem definovaná místa. Po tomto procesu je tisková hlava posunuta o výšku jedné vrstvy (0,05 až 0,35 mm) ve směru osy Z nahoru a celý proces je opakován [1], [3], [4], [5].



Obr. 2 Princip FDM tisku [5].

Technika vrstvení materiálu (Obr. 3) je velice praktická zvláště pro možnost tisku složitých tvarů, či otvorů a čepů zároveň. Díky tomu je možné vyrobit celé sestavy ve smontovaném stavu. To rapidně zkracuje proces výroby sestav a zároveň snižuje náklady na jeho produkci. Tato výhoda je však zároveň i značně limitující právě pro následné použití, kde je požadována vyšší kvalita povrchu [6].

Výsledná drsnost povrchové vrstvy výtisku závisí převážně na dvou parametrech. Prvním z nich je průměr trysky, skrze kterou je protlačován stavební materiál. S menším průměrem trysky roste čas tisku, protože pro danou plochu je zapotřebí vygenerovat větší počet drah, avšak kvalita vrstvení se zvyšuje. V aplikacích, kde není kladen důraz na výsledný povrch, ale například na zástavbové rozměry, jsou používány trysky o průměru i 1 mm, díky čemuž může být rozměrný model (na poměry stolních tiskáren) vytištěn v řádu hodin [7].



Obr. 3 Schéma vrstvení materiálu při různých výškách vrstvy [7].

Sekundárním parametrem ovlivňujícím povrch výtisku je výška vrstvy. Výšku tištěné vrstvy lze předem definovat v softwaru pro přípravu tisku (tzv. Slicer), a právě tento parametr tisku je zásadní pro výslednou kvalitu povrchu výtisku. Protože je tato hodnota řádově v desetinách milimetru, není povrch, například kulových ploch, příliš hladký, jak je patrné z Obr. 4 [8].



Obr. 4 Snímek povrchu kulového výtisku [8].

Výše zmíněné nedostatky jsou důvodem, proč jsou na výtisky z FDM tiskárny často aplikovány metody *post-processingu* (následných úprav). Pomocí dokončovacích operací je docíleno požadovaného vyhlazení povrchové vrstvy a tím dosažení hladšího povrchu. Nejvyužívanější metodou *post-processingu* je chemické leptání. Tato metoda je efektivní díky možnosti vyhlazovat povrch relativně homogenně, a to i v malých záhybech či otvorech. Je zde však limitace ze strany materiálu, které musí být chemicky leptatelné. Další metody povrchových úprav, jako je například lokální natavení, omílání brusnými kameny či tvorba další povrchové vrstvy jsou sice méně používané, avšak také podle aktuálních studií, rozebraných v kapitole 2.4, poměrně účinné a efektivní. Technické porovnání uvedených metod tak naskýtá zásadní podklad pro praktické použití pro dané technické odvětví. Ekonomické zhodnocení přináší cenné informace o tom, zda se nákladnější povrchová úprava vyplatí nebo zda je možné stejné kvality povrchu dosáhnout snazší a levnější metodou realizovatelnou v domácích podmínkách.

2 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

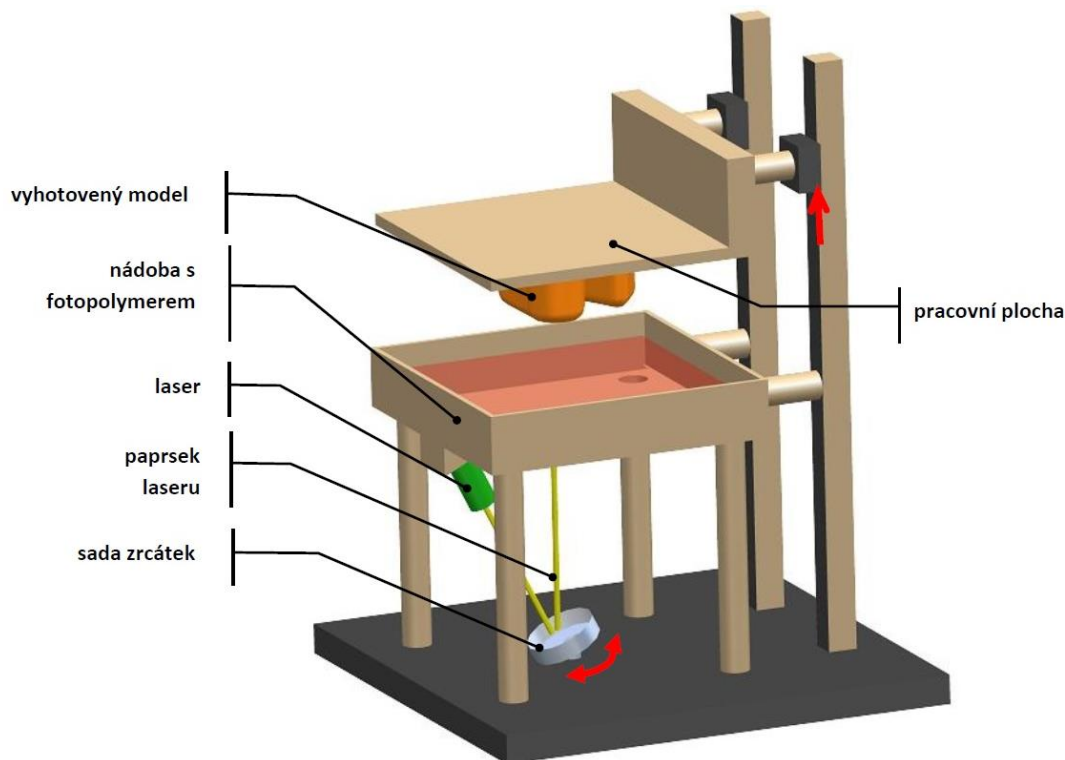
Metoda 3D tisku patří mezi výrobu aditivní (Additive Manufacturing, AM), která obecně spočívá v nanášení vrstev, což je opačný princip, než je tomu u metody subtraktivní, tedy kdy je materiál postupně odebrán. Díky tomu, že je proces od svého návrhu až po výrobu prvního dílu velmi rychlý, získal proces název *Rapid Prototyping* (rychlé prototypování). Urychlení procesu výroby dopomáhá k celkovému snížení nákladů potřebných k produkci. Z ekonomického pohledu je aditivní výroba také výhodná pro svou nízkou produkci odpadu. Metody 3D tisku produkují výrazně méně odpadu než například výroba obráběním či frézováním z polotovaru. V neposlední řadě je výhodou aditivní výroby i zmiňovaná vyrobiteľnost komponent se složitým tvarem, které by byly klasickým konvenčním způsobem výroby těžce vyrobiteľné [3], [4].

2.1 Metody 3D tisku

Rapid Prototyping či 3D tisk je definován jako postup, kdy je objekt tvořen postupným nanášením vrstev materiálu za současné fyzikální či chemické interakce. V praxi se nejčastěji jedná o působení tepelné energie, vytvrzení pomocí UV záření nebo nanášení lepidla. Z pohledu stavu stavebního materiálu, ve kterém se v počáteční fázi procesu nachází, lze metody 3D tisku rozdělit do 3 skupin [3], [4].

2.1.1 Materiály v kapalné fázi

Fotopolymery, jak se tyto plasty v kapalné fázi nazývají, jsou využívány k metodám 3D tisku, kde dochází k jejich vytvrzování pomocí zdroje světla. Principem těchto metod je ozáření vrstvy fotopolymery, kdy ke stavbě modelu dochází pod hladinou. Jakmile je vrstva vytvrzena, dojde k posuvu tiskové podložky ve směru osy Z a srovnání hladiny epoxidové pryskyřice v nádobě. Následuje posun o výšku vrstvy a proces ozařování je opakován. Výška vrstvy se běžně pohybuje mezi 0,01 až 0,15 mm [3], [4], [9].



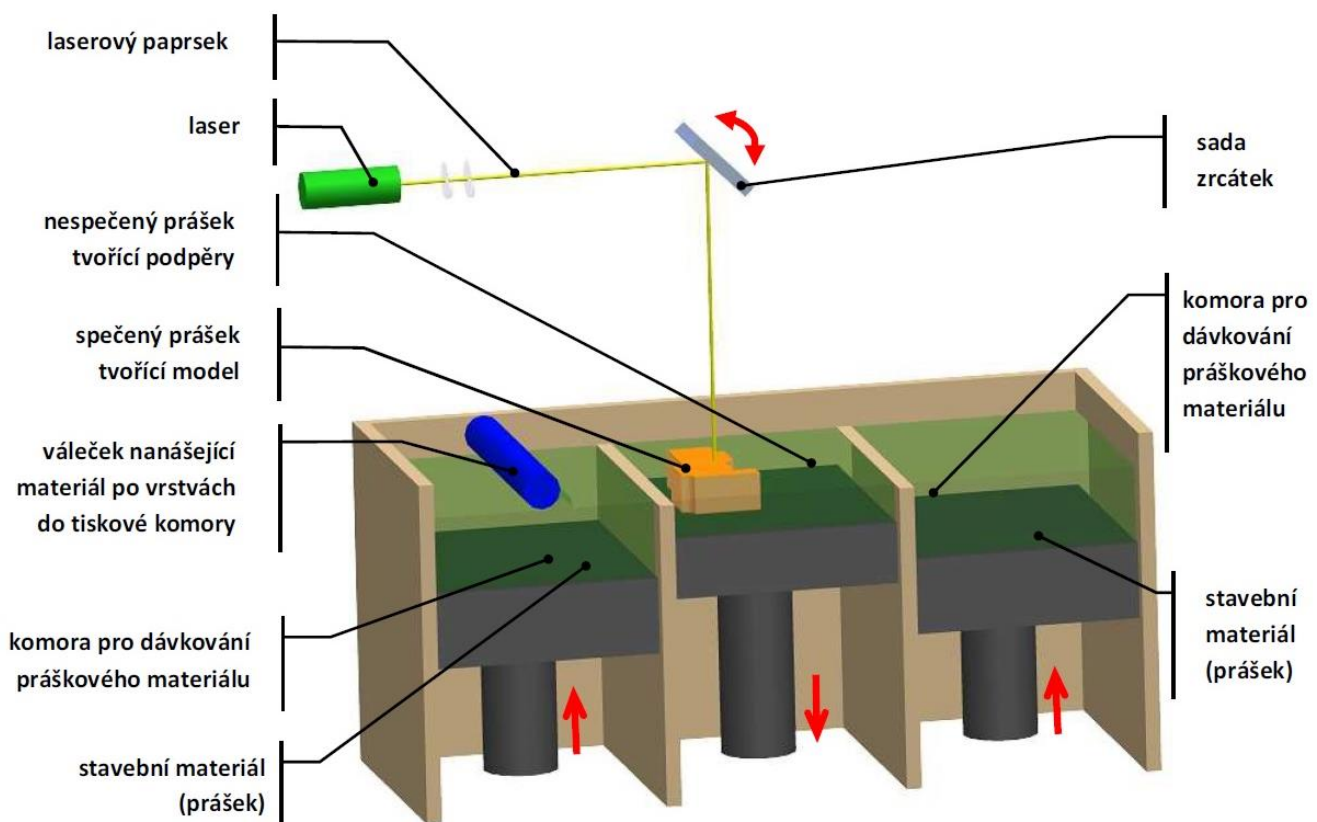
Obr. 5 Schématický model SLA tiskárny [9].

Mezi tyto metody patří například Stereolitografie (SLA), která spočívá v postupném vytvrzování vrstvy pomocí plynového nebo pevnolátkového laseru. Schematický model SLA tiskárny je zobrazen na Obr. 5 [9].

Principiálně podobná metoda 3D tisku, jako je SLA, je metoda zvaná Digital Light Processing (DLP). V tomto případě řešení je vytvrzovací laser nahrazen výkonným projektorem či UV lampou. Emitované záření tak není soustředěné pouze do bodu, ale vytvrzuje celou vrstvu výtisku najednou. Díky tomu dochází ke zvýšení efektivity tisku a výrobní proces je tak rychlejší. Obě metody však vyžadují následné vytvrzení pomocí UV lampy, protože po vytištění jsou modely velice křehké [4].

2.1.2 Materiály ve formě prášku

Princip práškových 3D tiskáren spočívá ve spékání plastových, pryžových, keramických či kovových zrn pomocí CO₂ laseru. Spékání/slinování probíhá v tiskové komoře, která je rozdělena na 3 části, jak je patrné z Obr. 6 [4], [9].



Obr. 6 Schématický model SLS a DLMS tiskárny [9].

Tiskárnu tvoří několik základních komponentů. Jedním z nich je rameno nebo váleček, který nanáší stavební materiál na předem definovaná místa a připravuje celou vrstvu k následnému slinování pomocí laseru. Jakmile je spečení jedné vrstvy dokončeno, dojde k posunu středové platformy o výšku jedné vrstvy. Tištěný model je opět zasypán stavebním práškem a proces slinování se opakuje. Zmíněný princip využívají metody 3D tisku jako je Selective Laser Sintering (SLS), Selective Laser Melting (SLM), Direct Metal Laser Sintering (DMLS) a další [4].

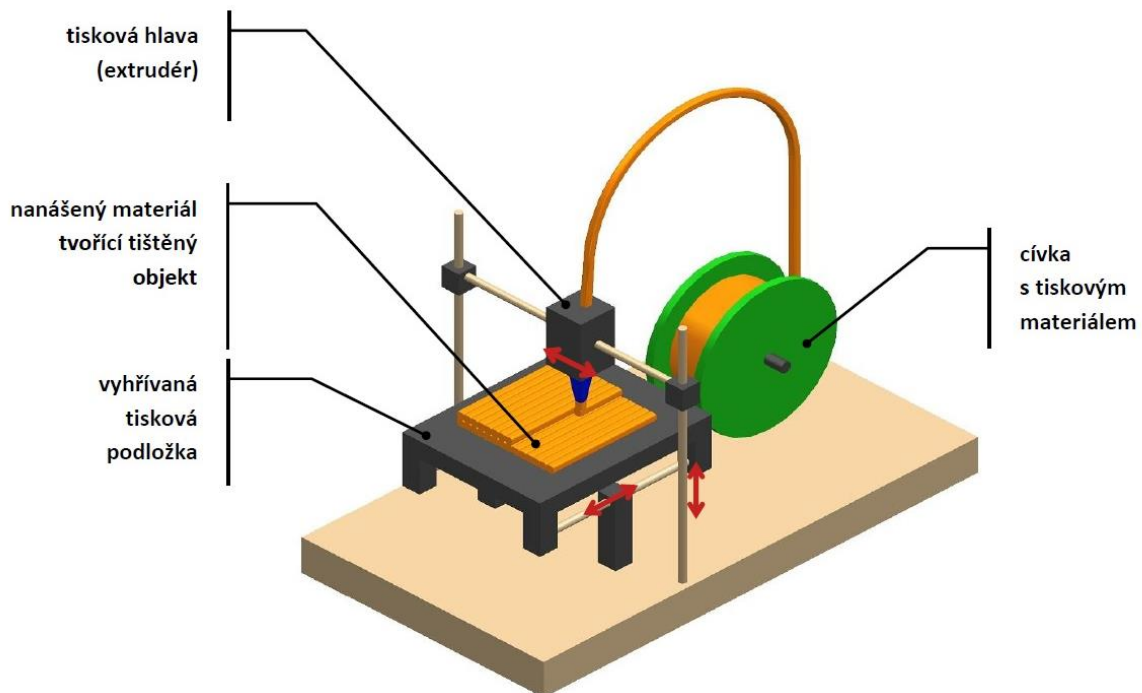
2.1.3 Materiály v tuhé formě

3D tisk materiálů v tuhé formě je v dnešní době nejpoužívanější pro stolní 3D tiskárny. Přestože výtisky vyrobené z této skupiny metod nejsou tak detailní jako například u té, která je založena na tekutých materiálech, patří metoda k nejoblíbenějším a nejpoužívanějším k výrobě prototypů či koncových předmětů. Mezi metody využívající tuhou formu stavebního materiálu patří Laminated Object Manufacturing (LOM), Multi Jet či FDM, která bude využita pro účely předložené práce v praktické části a detailněji bude rozebrána v kapitole 2.2 [4].

2.2 FDM/FFF 3D tisk

Metoda FDM byla od roku 1989 patentována firmou Stratasys (dosud jedna z největších firem vyrábějící a distribuující průmyslové 3D tiskárny). Patent však v roce 2009 vypršel, ale firma Stratasys si název FDM nechala registrovat jako ochrannou známku. Registrace je důvodem, proč dnešní výrobci stolních tiskáren nemohou své produkty spojovat s tímto označením, avšak využívají zkratku FFF tedy Fused Filament Fabrication. Za zrodem domácích stolních 3D tiskáren stojí globálně sdílený projekt zvaný Replicating Rapid Prototyper (RepRap), který obsahuje velkou komunitu techniků napomáhajícím vývoji [3], [10], [11].

Princip metody spočívá v tavně termoplastu dodávaného pomocí extruderu (dávkovače) do tiskové hlavy. V tomto místě je dosud tuhý materiál nataven pomocí tzv. heat blocku (kovový kvádr s topným tělesem) a tlakem, vytvořeným kontinuálním dávkováním, je protlačen skrze nahřátou trysku. Z trysky je roztavený materiál vrstven na nahřívanou podložku, a to na definovaných místech v určitém množství. Většinu materiálů vhodných pro tuto metodu je pro vrstvení nutné chladit. Pro některé z nich je výhodné pouze pasivní chlazení prostředím, pro většinu je však zapotřebí využít aktivní chlazení v podobě ventilátoru. Po dokončení jedné vrstvy je pomocí krokových motorů tisková hlava či tisková podložka (záleží na konstrukci) posunuta ve směru osy Z (svislém) a proces vrstvení se opakuje. Stavební materiál je dodáván navinutý na cívce a má kruhový průřez o průměru 1,75 mm či 2,85 mm. Na Obr. 7 je princip metody zobrazen společně s možnostmi pohybů jednotlivých komponentů [1], [3], [4].



Obr. 7 Schéma modelu FDM/FFF tiskárny [9].

2.2.1 Druhy konstrukcí FFF tiskáren

Dle využití konstrukce a kinematiky stroje jsou FFF tiskárny rozděleny na 4 typy – Kartézská, Delta, Polar a Scara. Každý typ tiskárny má specifické pohyby a jiné možnosti využití. V praxi jsou však využívány převážně 2 – Kartézská a Delta.

▪ Kartézská tiskárna

Tento typ tiskárny je jeden z neznámějších. Byl proslaven také díky české firmě Prusa Research a.s., která v roce 2020 vyprodukovala a odeslala přes 100 000 tiskáren. Firma Josefa Průši dosáhla tržby přes 2,2 miliardy Kč [12].

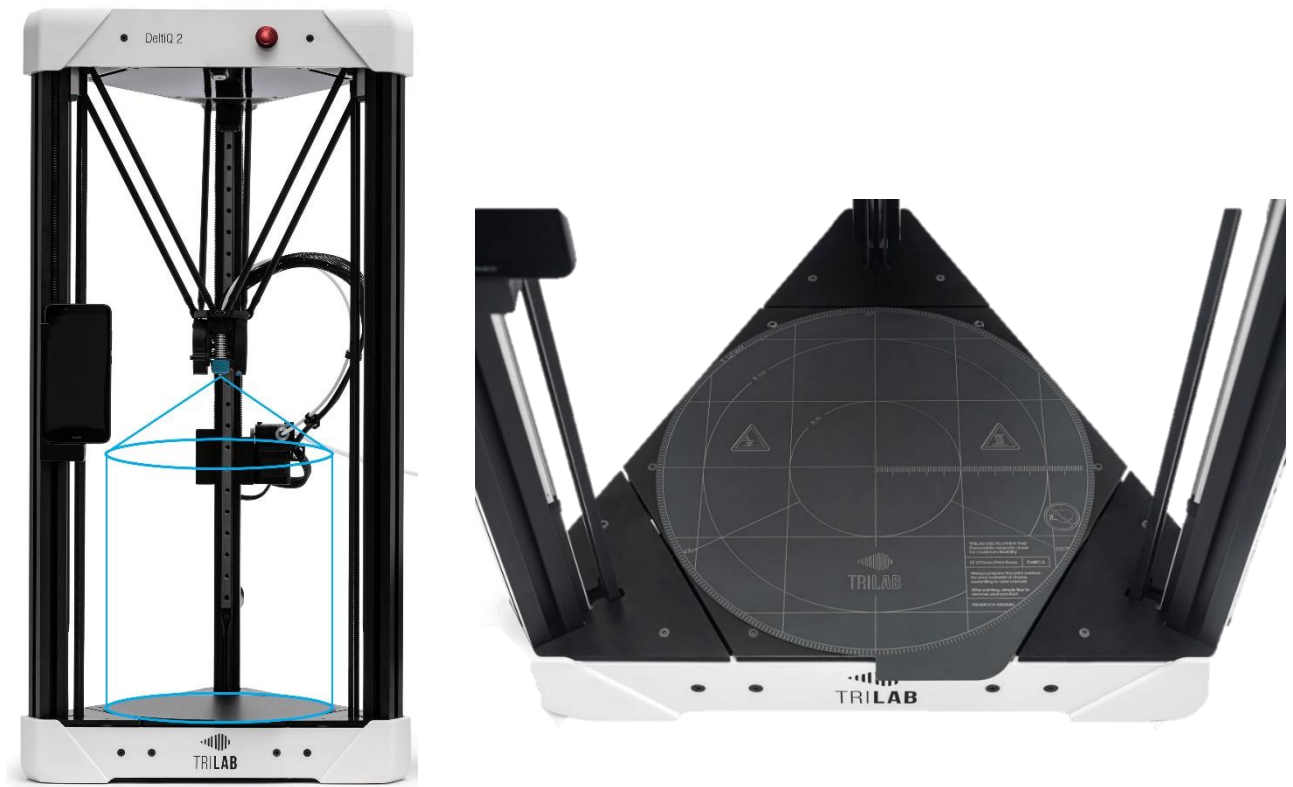
Kinematika pohybu při tisku je založena na lineárním pohybu tiskové hlavy v rovině XZ a podložky pohybující se ve směru osy Y. Od kartézského typu byla navržena i druhá varianta tzv. CoreXY, kdy se tisková hlava pohybuje v rovině XY a tisková podložka v ose Z. Extruder je nejčastěji umístěn přímo do tiskové hlavy, což přispívá k univerzálnosti volby tištěného materiálu. Tisková podložka je téměř vždy vyhřívaná a její tvar je čtvercový či obdélníkový, jak je patrné z Obr. 8 [13].



Obr. 8 Kartézská tiskárna Prusa i3 MK3S [18].

▪ Delta tiskárna

Konstrukce Delta tiskáren využívá třech staticky uložených věží umístěných po 120° a její pracovní plochu tvoří válec, respektive válec a kužel v horní části pracovní plochy (Obr. 9). Veškeré pohyby během tisku náleží tiskové hlavě, která je uchycena na trojici ramen. Využití statické podložky (oproti kartézské tiskárně) eliminuje větší množství vibrací vzniklých pohybem podložky, což napomáhá k vyšší kvalitě tisku. Umístění extruderu je vyřešeno aretací na rám tiskárny, díky čemuž je tisková hlava o několik set gramů lehčí a tiskárna tak může tisknout rychleji se zachováním kvality tisku. Nevýhodou využití *bowdenového* extruderu je však nemožnost tisku flexibilních materiálů. Pro tisk pružných materiálů je nutné pozměnit konstrukční řešení extruderu [14], [10].



Obr. 9 Tiskový prostor Delta tiskáren [14].

2.3 Materiály pro 3D tisk

Volba materiálu, ze kterého je výrobek vytištěn, hraje klíčovou roli, protože definuje výsledné vlastnosti výtisku. Ovlivňuje zejména pevnost v tahu a tlaku, teplotní a chemickou odolnost či tisknutelnost a kvalitu povrchu. Na trhu se v posledních letech čím dál četněji objevují i materiály, které jsou biologicky lehce odbouratelné či přímo kompostovatelné v domácích podmínkách. Všechna zmíněná specifika závisí na volbě materiálu, a proto je znalost vlastností a chování materiálu klíčová k určení konkrétní aplikace výtisku v praxi [15], [16].

2.3.1 Filament ABS

Amorfní termoplast Acrylonitrile-Butadiene-Styrene, označovaný zkratkou ABS, je ve velkém množství využíván pro technologii vstřikování plastů poměrně dlouho. Byl také jedním z prvních, který byl pro metodu 3D tisku FDM používán. Mechanické a termomechanické vlastnosti, vypsané v Tab. 1, umožňují široké možnosti použití (Obr. 10). Nevýhoda tohoto materiálu spočívá ve velké smrštitivosti při teplotních rázech. Náchylnost na změnu okolní teploty při tisku činí z materiálu ABS poměrně náročně tisknutelný materiál, zvláště pro tisk rozměrnějších objektů. Při tisku se také uvolňují látky, které tisk doprovází nepříjemným zápachem. Termoplast je rozpustný v acetonu, což dodává tomuto materiálu možnost *post-processingu* v podobě chemického naleptání [17], [18], [19], [20].

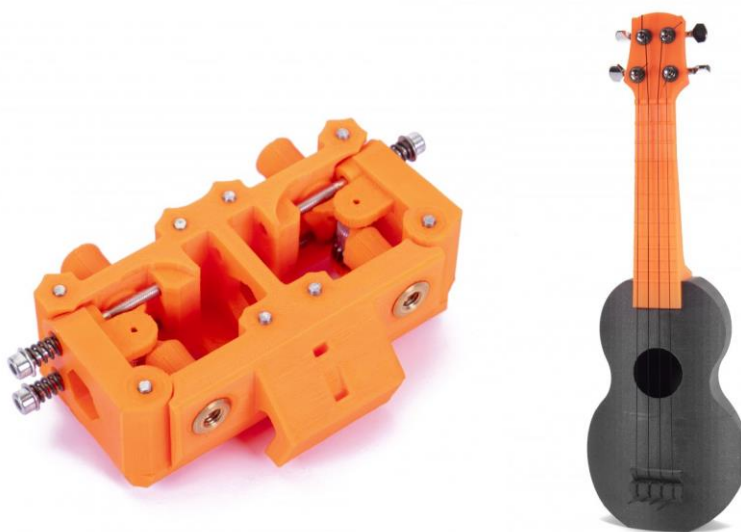


Obr. 10 Příklady výtisků z materiálu ABS [19] [20].

2.3.2 Filament PET-G

Polyethylentereftalát neboli zkráceně PET je v průmyslu velice známý díky svému četnému využití jako obalový materiál. Při produkci filamentu z PET materiálu je do roztaveného granulátu přimíchán modifikovaný glykol, čímž vzniká materiál s označením PET – G. Přimíchaný glykol ve fázi polymerizace zlepšuje tisknutelnost, ale i snižuje křehkost. Teplota tavení výsledného materiálu se pohybuje okolo 230 °C a teplota skelného přechodu je 73 °C. V oboru 3D tisku je termoplast velice využíván pro snadnou tisknutelnost a mechanické vlastnosti pohybující se na podobné úrovni jako tomu je u materiálu ABS (Tab. 1). Adheze PET – G materiálu je při tisku v porovnání s materiálem ABS mnohem vyšší a k viditelnému smrštění nedochází. Příklady vytištěných výrobků jsou zobrazené na Obr. 11.

Výtisk je možné mechanicky brousit či tepelně vyhlazovat plamenem. Leštěný povrch je však vysoce náchylný na škrábance. Přestože je PET – G materiál odolný vůči kyselinám a rozpouštědlům ve vyšší míře než další konvenční materiály, jeho odolnost vůči UV záření je poměrně nízká. Výtisky tak na přímém slunci značně degradují a ztrácejí svou barvu i tvrdost [21], [22].



Obr. 11 Příklady využití výtisků z PET – G [24].

2.3.3 Filament PLA

Biologický termoplast vyráběný z modifikovaného kukuřičného škrobu společně s kyselinou polymlečnou je jeden z nejpoužívanějších materiálů v komunitě domácích kutilů. Je biologicky odbouratelný a rozložitelný, pokud do základního materiálu nejsou přidána umělá barviva. Dalším důvodem jeho oblíbenosti je vysoká adheze při tisku a v porovnání s ostatními materiály nízký součinitel teplotní roztažnosti, díky čemuž je materiál vhodný pro tisk detailních a rozměrných designových modelů. Polymer má však teplotu skelného přechodu 52 °C (Tab. 1), a tak je jeho použití ve vyšších než pokojových teplotách nevhodné [23], [24].

Výtisky z materiálu PLA (Obr. 12) mohou být detailní a povrch je možné upravit mechanickým broušením, chemickým leptáním či lokálním tepelným ovlivněním. Opět je zde ale problém s nízkou tepelnou odolností, což je třeba zohlednit ve volbě *post-processingu*.



Obr. 12 Příklady designových výtisků z materiálu PLA [23] [24].

2.3.4 Filament PVB

Polyvinyl butyral neboli PVB je často používán ve formě tenké folie jako mezivrstva bezpečnostních skel. Ovšem díky své pružnosti a pevnosti je také využíván pro FFF 3D tisk. Tento polymer je však hygroskopický, a proto je nutné ho skladovat za přítomnosti silikagelu nebo celou cívku před tiskem patřičně vysušit od vzdušné vlhkosti. Tisknutelnost je při dodržení správného skladování podobná jako u PLA. Teplota skelného přechodu PVB materiálu se výrazně neliší od materiálu PET-G, tedy mírně nad 70 °C. [17]

Výhodou PVB materiálu je možnost povrchového naleptání pomocí izopropylalkoholu, podobně jako je tomu u ABS s použitím acetonu. V tomto případě je však eliminován nepříjemný a toxický opar, kterým je leptání pomocí acetonu provázáno. Vyhlazené výtisky často slouží jako stínidla lamp či dekorativní vázy (Obr. 13).



Obr. 13 Designové výtisky z materiálu PVA [24].

2.3.5 Speciální kompozitní filamenty

Paleta dostupných materiálů určených pro 3D tisk je velice široká, a to díky možnostem kombinací základních polymerů s aditivami, které dodávají výtiskům specifické vlastnosti. Mezi aditiva zvyšující mechanickou a termomechanickou odolnost patří aramidová, skelná či uhlíková vlákna, která se kombinují s materiály ABS, PLA, PA (polyamid), PC (polycarbonát) a mnoha dalšími.

Designová, ale i praktická aditiva jako je dřevěný, bronzový či měděný prach jsou přimíchávaná do konvenčních materiálů a rozvíjí tak celé spektrum možností využití. Mezi praktické přidávané složky patří i vosk. Při použití voskového filamentu vznikne výtisk, který lze využít pro odlévání metodou vytavitelného modelu. Materiál Butenediol Vinylalkoholový Kopolymer (BVOH) či Polyvinylalkohol (PVA) je zase rozpustný ve vodě, a tak je vhodný pro tisk podpěr, což eliminuje nutnost odlamovat podpory ve fázi *post-processingu*.

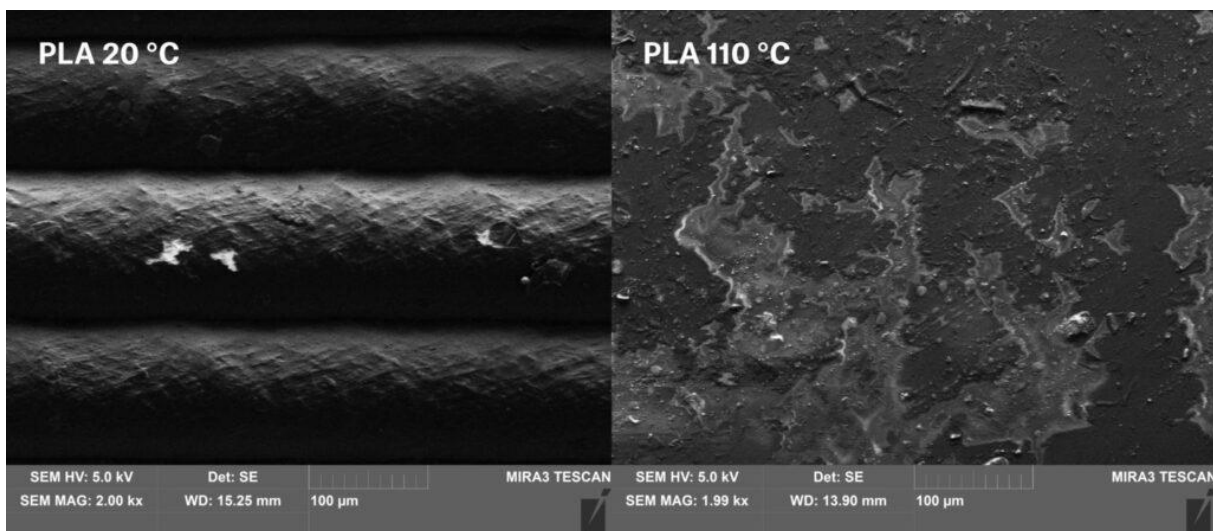
Tab. 1 Mechanické a termomechanické vlastnosti materiálů [15], [23], [25], [26].

Materiál	Pevnost v tahu	Rázová houževnatost	Součinitel teplotní roztažnosti	Teplota skelného přechodu	Teplota trysky	Tisknutelnost
	[MPa]	[kJ/m ²]	[$\mu\text{m}/\text{mK}$]	[°C]	[°C]	[-]
ABS	40	85	90	98	220-250	7/10
PET-G	53	85	60	73	230-250	8/10
PLA	65	80	68	52	190-220	9/10
PVB	50	55	64	75	210-220	8/10
Nylon	40-85	105	72	80-95	220-270	5/10

2.4 Povrchové úpravy

Pro získání lepších vlastností výtisků z FFF tiskáren je zapotřebí výtisk upravit vhodnou metodou *post-processingu*. Volba vhodné metody povrchové úpravy hraje klíčovou roli pro možnosti dalšího použití. Nevhodná volba povrchové úpravy může vést až k nemožnosti výtisk použít v praxi. Důvodem je vliv nežádoucích chemických reakcí či deformací tvaru součásti. Důraz je nutné klást také na prostředí, ve kterém bude výtisk použit [27].

Metody mají prokazatelný vliv nejen na kvalitu povrchu, ale i na mechanické a termomechanické vlastnosti. Jedná se konkrétně o tepelné žíhání, při kterém dochází ke změně molekulární struktury. Většina konvenčních polymerů využívaných ve 3D tisku má semi-krytalické uspořádání, avšak jakmile je materiál během tisku roztaven, vazby jsou narušeny. Vlivem rychlého chladnutí vytlačeného materiálu filament tuhne a jeho molekuly zůstanou v neuspořádané (amorfní) struktuře. Když je materiál opět zahřát na teplotu vyšší, než je teplota skelného přechodu, ale nižší než bod tání, může být přeměna amorfního uspořádání molekul zpět do semi-krytalického (pevnějšího) možná (Obr. 14). Nevýhodou je však změna rozměrů výtisku ve všech jeho osách, proto je s ní třeba počítat a model dle smrštění optimalizovat [28], [29].



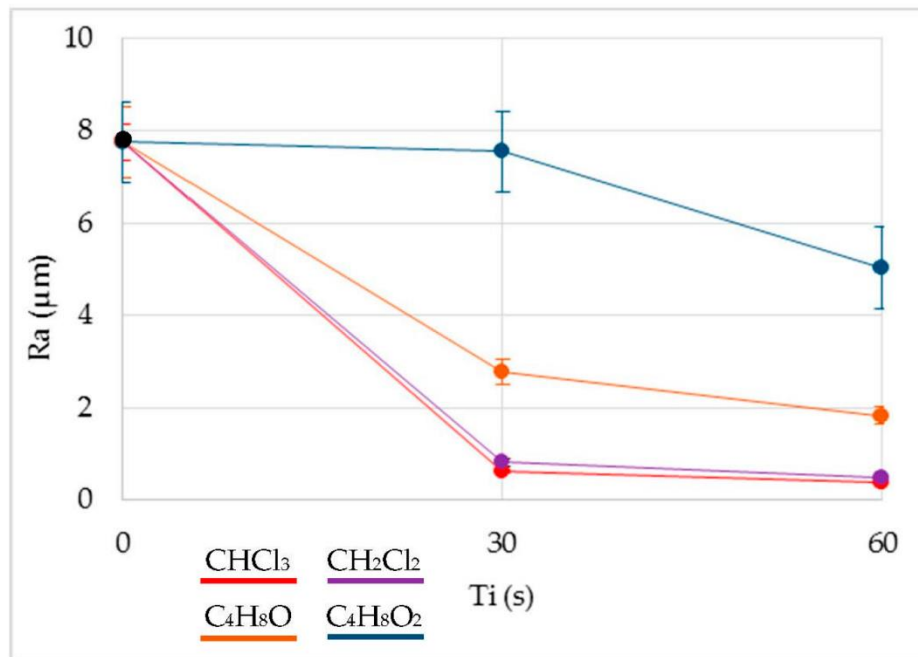
Obr. 14 Srovnání povrchu nežíhaného a žíhaného PLA [28].

Pro účely práce budou rozebrány metody, které ovlivňují zejména kvalitu povrchu. Metod *post-processingu*, které je možné pro daný účel použít, je celá řada. Mezi nejzákladnější patří mechanické broušení, leštění, chemické leptání, povrchové natavení, nástřik plnicí vrstvy či galvanické pokovování. Každá z uvedených metod má své technické i aplikační výhody a nevýhody. Nelze tedy využít každý materiál pro jakoukoliv dokončovací metodu a neexistuje tudíž univerzálně optimální řešení [28], [30].

2.4.1 Chemické leptání

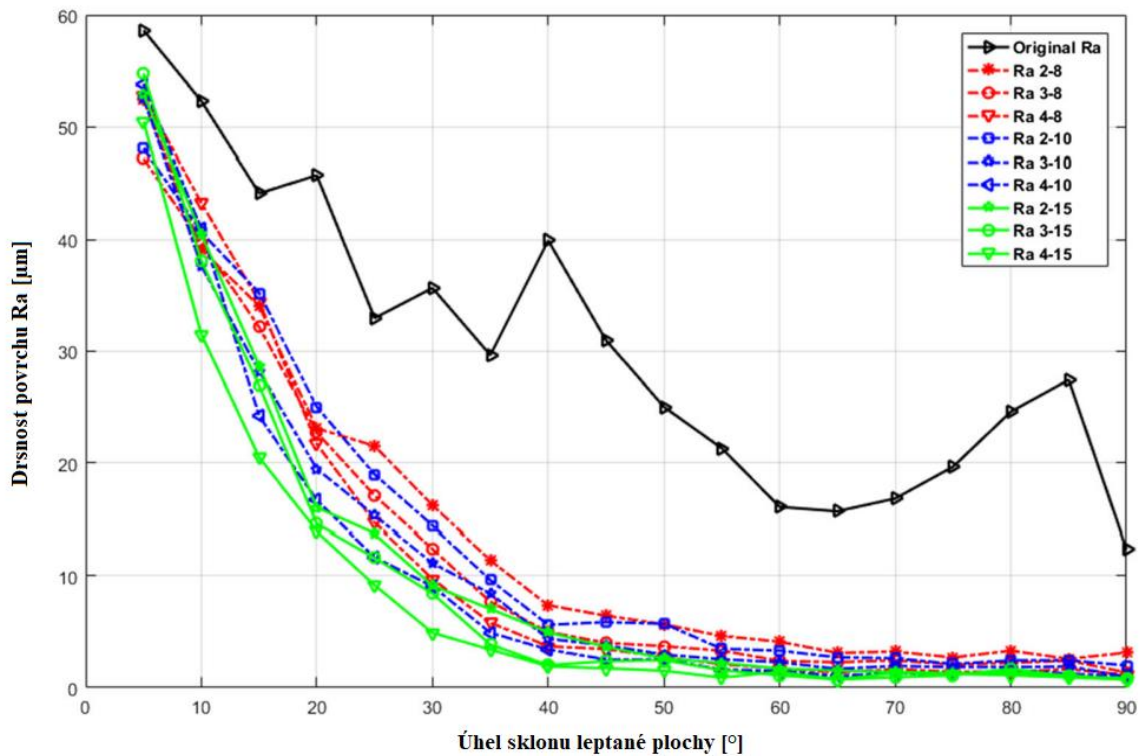
Vyhlazování povrchu chemickým naleptáním je populární metodou díky své jednoduchosti, rychlosti procesu i míře rekrystalizace vzorků. Princip této metody spočívá v kontrolovaném rozpouštění materiálu v předem definovaných podmínkách. Volba rozpouštědla pro daný materiál hraje klíčovou roli k dosažení nejlepšího výsledku. Sekundární proměnou je čas, po který je model vystaven rozpouštědlu. Pro úspěšnou a homogenní rekrystalizaci je důležitá i volba ideální metody vyhlazování, která je v zásadě trojího typu. Máčením vzorku v chemikálii v kapalném stavu, vystavením atmosféře z výparů rozpouštědla a nanášením chemikálie na model pomocí štětce [27], [30].

Pro filament PLA je k leptání využívána organická sloučenina zvaná dichlormethan (CH_2Cl_2), což je vysoce těkavá a bezbarvá tekutina s nasládlým zápachem. Při kontaktu polymeru s chemikálií dochází k modifikaci mikrostruktury materiálu a zasažená oblast je schopna rekrytalizace do semi-krystalického uspořádání. Výsledkem je nejen vyhlazený povrch, ale i změna materiálových vlastností. Ve studii, kterou vedl Dr. Ana Pilar Valerga Puerta, byla měřena nejen zásadní redukce drsnosti povrchu u všech testovaných chemikálií (Obr. 15), ale také zvýšení teplotní odolnosti. Znovu uspořádání řetězců brání vzniku fáze skelného přechodu, což by mohlo mít vliv i na mechanické vlastnosti výtisku. Dichloromethan účinně mění materiálové vlastnosti termoplastu PLA, díky čemuž je rozšířen rozsah jeho použití i zvýšení životnosti výtisků [27].



Obr. 15 Graf závislosti drsnosti povrchu na době vystavení vzorku chemikálii [27].

Aceton neboli dimethyketon ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$) je využíván k leptání výtisků z materiálu ABS či ASA. Pro vyhlazování je nejčastěji používáno vystavení vzorků výparům. Chemická sloučenina v kombinaci s kyslíkem tvoří atmosféru, která účinně naleptá povrchovou vrstvu a redukuje její drsnost až o 95 %. Hlavním faktorem, který kvalitu povrchu ovlivňuje, je i zde čas, po který je vzorek chemikálii vystaven. Studie s názvem *Surface roughness of FDM parts after post-processing with acetone vapor bath smoothing process* [31] z roku 2017 zmiňuje i změnu drsnosti povrchu v závislosti na sklonu leptané plochy, které je patrné na Obr. 16. Při menším sklonu než je 40° , je efekt zvýšení kvality povrchu prudce klesající, avšak drsnost mezi sklony 40° až 90° je téměř neměnná. Velký vliv na kvalitu povrchu má i samotné nastavení tisku, kdy při menší výšce tištěné vrstvy je kvalita povrchu vyšší, a tak je i lépe připravena na *post-processing*. Pro predikci drsnosti byly ve zmíněné práci vyvinuty matematické modely, jejichž výsledky odpovídaly naměřeným parametrům. Nebylo však uvedeno použité množství acetonu ani objem nádoby, ve které byl model vyhlazován, takže predikační modely nemohou být pro účely práce použity [15], [30], [31], [32].



Obr. 16 Graf závislosti drsnosti na sklonu měřené plochy [31].

Další sloučeninou, která se dá k naleptání výtisků z 3D tiskárny použít, je vysokoprocenní alkohol zvaný isopropylalkohol neboli IPA (C_3H_8O). Materiálem, který se dá alkoholem povrchově naleptat, je filament PVB či materiály na bázi vosku. Relativně netoxická chemická sloučenina tak nabízí bezpečnější používání oproti výše zmiňovaným. Firma Polymaker, spolupracující na předložené práci, vyvinula dokončovací stanici, která tento alkohol využívá k naleptání svých materiálů PolySmooth a PolyCast (Obr. 17) [17], [32].

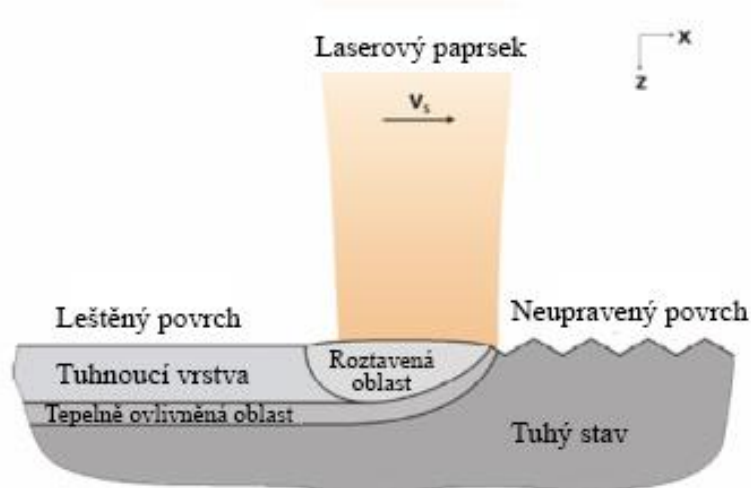


Obr. 17 Dokončovací stanice Polysher a vyhlazené PVB modely [32].

Nutno také podotknout, že všechny zmíněné chemikálie jsou pro člověka nebezpečné, a proto je při jejich používání nutno dbát zvýšené pozornosti a bezpečnosti práce.

2.4.2 Lokální natavení

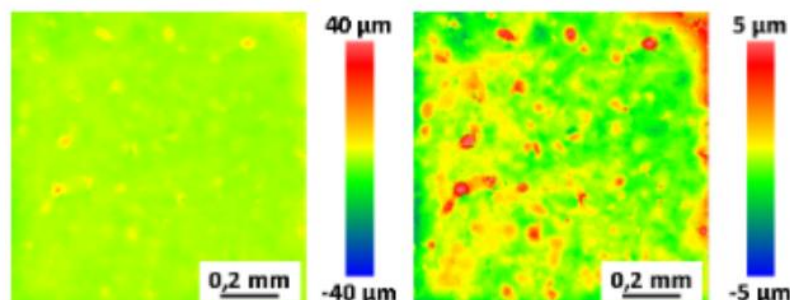
Vyhlazování povrchu lokálním natavením je založeno na principu laserového leštění. Principem metody je vystavení termoplastu laserovému paprsku, který se pohybuje předem definovanou rychlostí a je soustředěn do malé oblasti na povrch vzorku. Polymer se vlivem lokálně vysoké teploty nataví, což vede k rekrystalizaci a přeskupení řetězců. Dochází tak k vyhlazení povrchové vrstvy a zvýšení její kvality (Obr. 18). Laserové vyhlazování je efektivní metodou, díky pracovní rychlosti laserové hlavy, která se pohybuje rychlostí v řádech stovek až tisíců milimetrů za sekundu. Hlavními parametry je zde teplota tavby a procesní čas [33], [34], [35].



Obr. 18 Princip vyhlazování termoplastu CO₂ laserem [33].

Vědci z Fraunhoferova institutu pro laserové technologie využili zmíněnou metodu vyhlazování v kombinaci s pyrometrem a skenerem pro kontrolu teploty ve vyhlazované oblasti, díky čemuž byl proces tavby lépe ovladatelný. Experiment byl prováděn na dvou typech vzorků. První z nich byl tištěn metodou SLS a druhý FDM. Výrazné snížení drsnosti bylo měřeno u polyamidového vzorku vyrobeného metodou SLS, jak je patrné z Obr. 19. Na levém snímku byl naměřen rozsah drsností přibližně 30 μm , zatímco na pravém snímku, reprezentujícím natavený vzorek, tvořil naměřený rozsah drsností přibližně 7 μm [33], [34].

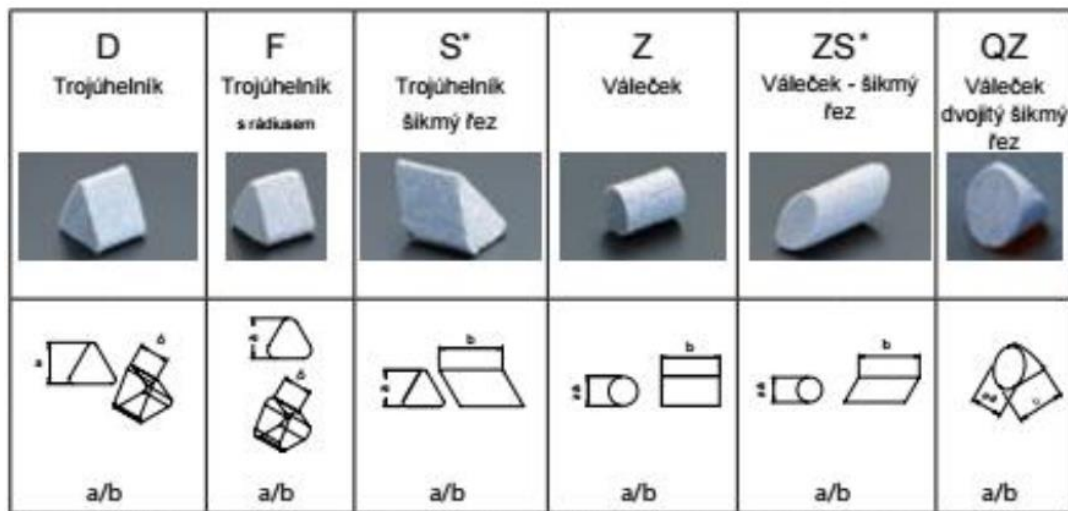
Při testování termoplastu ABS bylo docíleno snížení drsnosti z původních 18,5 μm na 0,24 μm při interakci laserového paprsku s povrchem trvající 60 sekund na ploše o rozměrech 30 mm krát 30 milimetrů. Teplota vyhlazování byla dle měření 220 $^{\circ}\text{C}$, avšak hodnota nemusí odpovídat skutečné teplotě procesu, protože nebyl znám emisní koeficient, který může teplotu vyhlazování ovlivnit. Vědecký tým také došel k závěru, že kvalita vyhlazovaného povrchu může být ovlivněna vlhkostí, kterou materiál nasaje před nebo po samotném tisku. Pro termoplasty s vysokou hygroskopicitou tedy platí doporučení, že by doba mezi rozbalením filamentu z výroby a leštěním výtisků měla být co nejkratší [17], [33], [34].



Obr. 19 Interferometricky snímaný povrch před (vlevo) a po vyhlazení (vpravo) vzorku z materiálu PA12 vyrobený metodou SLS [33].

2.4.3 Omílání

Dokončovací operace zvaná omílání spočívá v neustálém tření mezi brusnými tělisky a dokončovaným dílem, čímž dochází k jeho vyleštění, zaoblení hran či odstranění ostřin. Technologie je díky kapacitě dílů, kterou lze dokončovat najednou, používána pro zpracování velkých sérií či tvarově náročných součástek. Brusné elementy mají geometricky rozmanité tvary s keramickým či plastovým pojivem (Obr. 20). Liší se i brusným profilem, který je závislý na typu kamene. Tento parametr ovlivňuje brusný výkon, a tak i čas, po který bude díl vyhlazován. Každý typ kamene obsahuje celou škálu velikostí daného elementu, kterou je nutné volit s ohledem na rozměry dokončovaného modelu [36], [37], [38].



Obr. 20 Základní tvary brusných elementů s keramickým pojivem [37].

Český tým vědců z Technické univerzity v Ostravě provedl experiment, ve kterém podrobil tištěný díl na SLS 3D tiskárně třem typům kamenů a hledal optimální parametry dokončovacího procesu. Mimo to sledovali kvalitu omílaného povrchu a geometrickou odchylku od původního CAD modelu. Výsledky prokázaly, že metoda není tak efektivní jako například chemické naleptání povrchu, avšak při možnosti dokončování velké série dílu dává metoda smysl. Nejhladšího povrchu bylo docíleno s použitím kamenů XS 10 P. Detekováno bylo snížení plošného parametru povrchu S_a až o 71 % oproti neupravenému dílu. Nejmenšího rozptylu rozměrových odchylek bylo rovněž dosaženo díky omílání pyramidovými kameny. Naměřený rozptyl hodnot upraveného výtisku byl 0,398 mm oproti odchylce 1,097 mm, která byla měřena u neupraveného modelu [39].

2.4.4 Aplikace plniče

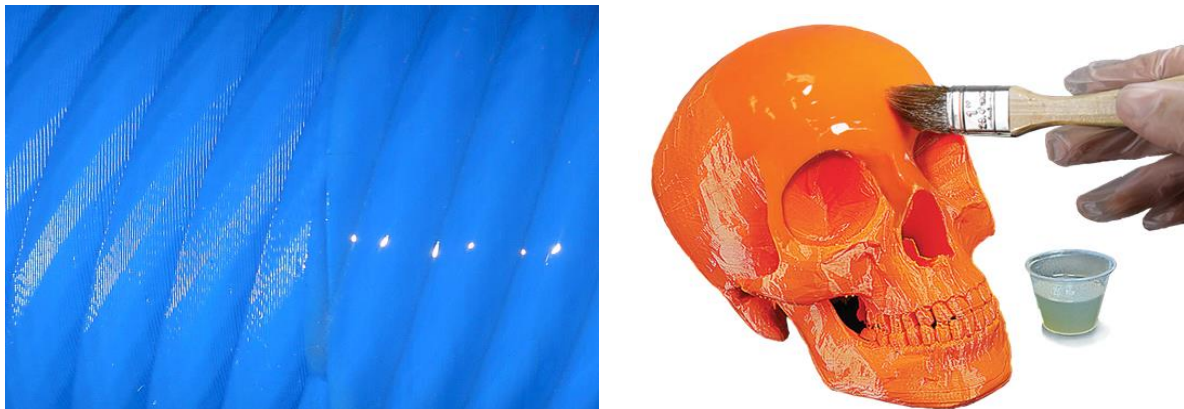
Jednoduchou a nenáročnou metodou *post-processingu* je nástřik nebo nátěr výplňového materiálu, který dokáže zacelit drobné mezery a zvýšit kvalitu povrchu. Pro 3D tištěné modely je rychlou a efektivní metodou vyhlazení vrstev. Plniče ve formě pasty jsou snadno aplikovány, avšak pro získání homogenního povrchu je nutné docílit rovnoměrného roztírání (Obr. 21). Silná vrstva tmelu však ovlivňuje tvarovou přesnost modelů, čímž vzniká nutnost model ručně dobrousit jemným smirkovým papírem s cílem dosažení tenké, avšak hladké povrchové vrstvy. Aplikací plniče ve spreji právě takovou (hladkou a tenkou) vrstvu lze dosáhnout poměrně snadno, není však v plné míře dosaženo zacelení mezer a vyrovnání vrstveného povrchu. Problém lze vyřešit několikanásobným vrstvením do té doby, než je povrchová vrstva takřka homogenní. Mezi jednotlivými nástřiky musí být dosaženo plného vytvrzení plniče, protože v opačném případě by mohlo docházet ke stékání po nakloněných rovinách. I pro tento typ

aplikace platí možnost konečného broušení, což dopomůže k větší tvarové přesnosti výrobku. [40]



Obr. 21 Tmelený model (vlevo) a aplikace plniče ve spreji (vpravo) [40].

Pokročilejší verzi tmelů jsou plniče na bázi pryskyřice. Aplikace epoxidu je stejně jednoduchá jako v předchozích případech, avšak pryskyřice musí být po nanesení dále vytvrzena jednou ze dvou metod. První z nich je smíchání pryskyřice s tvrdidlem v přesně definovaném množství před samotnou aplikací. Alternativou je možnost vytvrzení epoxidu zdrojem UV záření. Dostupné epoxidové plniče určené konkrétně pro 3D tisk disponují vysokou smáčivostí, díky které nejsou na modelu patrné tahy štětcem a nanosená vrstva se díky své viskozitě sama vyrovná do konstantní tloušťky nátěru. Díky povrchové úpravě je docíleno nejen zvýšení kvality povrchu (Obr. 22) ale i zvýšení tvrdosti a odolnosti vůči UV záření. Epoxid také zvyšuje teplotní odolnost výtisků a účinně zvyšuje rázovou houževnatost [30], [41].



Obr. 22 Porovnání neupraveného a vyhlazeného povrchu (vlevo) a aplikace epoxidové pryskyřice XTC-3D (vpravo) [41].

2.5 Textura povrchu

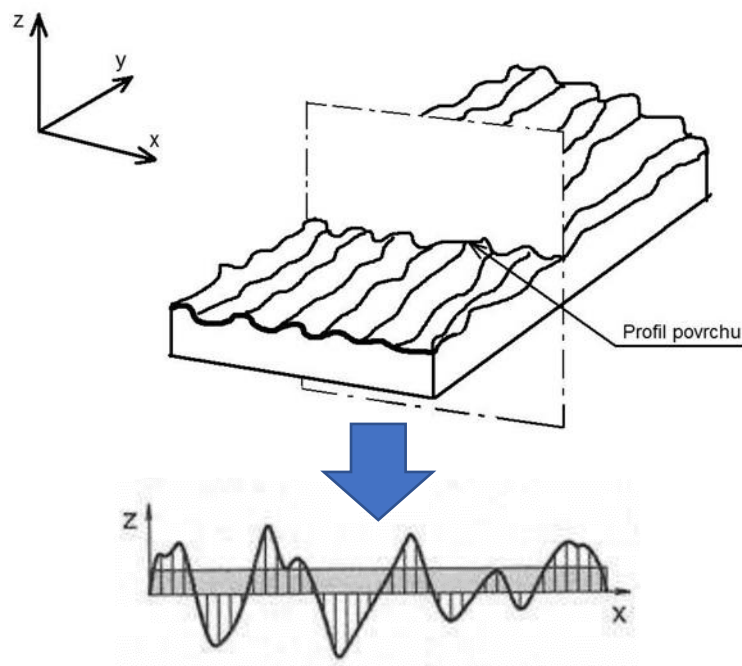
Pro výrobu jakýchkoliv součástí je nutné dodržet předepsanou přesnost dle dokumentace a ani v 3D tisku tomu není jinak. I zde se mezi základní předpoklady výroby řadí dodržení rozměrových tolerancí, tvarové přesnosti a kvality povrchu. Na textuře povrchu závisí mechanické i termomechanické vlastnosti součásti stejně jako tvrdost či morfologie. Morfologie povrchu je dělena na 2 části dle typu úrovně. V mikroskopické sféře je sledováno chování jednotlivých zrn či vláken, jejich interakce mezi sebou, defekty nebo pórovitost. Makroskopická úroveň sleduje zejména drsnost, která je pro tuto práci zásadní [42], [43].

Drsnost povrchu je definována jako nerovnost povrchu, která vzniká v procesu výroby. Pro určení drsnosti jsou sledovány náhodné či opakované odchylky skutečného povrchu, od povrchu ideálního (daného geometrií dílu). Ideálním povrchem se rozumí teoretický povrch, který by byl vyroben za ideálních technologických podmínek bez jakýchkoliv nerovností. Drsnost je ovlivňována zejména použitou technologií a technologickými podmínkami, které jsou pro výrobu předem definovány. Má významný vliv na vznik potenciální třecích sil při kontaktu s jiným tělesem, a tak i tribologické vlastnosti výrobku. Zmíněné vlastnosti poté určují možnosti použití, funkčnost dílu i jeho životnost [42], [43].

Profilové parametry drsnosti povrchu jsou popsány normou ČSN EN ISO 4287 „*Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu*” [44] a plošné parametry povrchu definuje norma ČSN EN ISO 25178-2. „*Textura povrchu: Plocha – Část 2: Termíny, definice a parametry textury povrchu*” [45].

2.5.1 2D profily

Plošný profil povrchu zobrazuje výstupky a prohlubně, které vznikají z výše uvedených důvodů. Princip získání plošného profilu spočívá v kolmém řezu tělesem rovinou XZ (v tomto případě), jak je patrné z Obr. 23. Výsledkem řezu je 2D křivka kopírující nerovnostmi povrchu dílu. Získaný profil je nutné filtrovat kvůli eliminaci nežádoucích naměřených složek dle mezní vlnové délky označované jako *cut-off*. Filtrovaný profil je použit jako zdrojový soubor dat sloužící k hodnocení struktury povrchu a zjištění parametrů povrchu [46], [47].



Obr. 23 Schéma řezu dílem a získání 2D profilu povrchu [47].

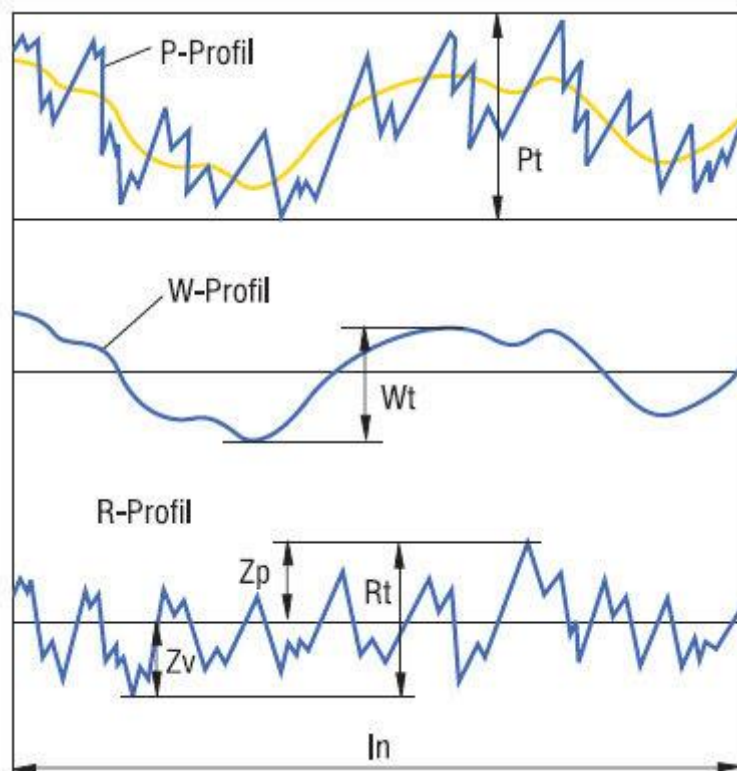
Typy profilů

Na Obr. 24 jsou zobrazeny 3 typy profilů. Profily jsou popsány pomocí tvarových, délkových a výškových parametrů, díky kterým jsou hodnoceny jednotlivé prvky. Prvek tvoří výchytku výstupku či prohlubně od střední hodnoty profilu [42].

Prvním z nich je P – profil neboli profil základní. Získán je pomocí filtrace krátkovlnné složky. Rozměr P_t udává nejmenší vzdálenost mezi dvěma rovnoběžnými mezními přímkami z nefiltrovaného profilu povrchu. Slouží k vyhodnocování chyb povrchu a je silně závislý na délce l_n [46].

W – profil neboli profil vlnitosti je získáván oddělením vlnové složky filtrem λ_c a λ_f od základního profilu. Měření je zde parametr W_t , který představuje vzdálenost mezi nejvyšším a nejhlubším bodem vyrovnaného profilu vlnitosti uvnitř měřené délky l_n . Maximální velikost lokálních extrémů je používána jako kontrolní parametr výrobního postupu, u kterého vlnitost představuje funkční kritérium [46].

Posledním typem je profil R, tedy profil drsnosti. Získáván je separací vlnové složky filtrem λ_c . 2D křivku, kterou profil tvoří, lze popsat a hodnotit širokou škálou parametrů. Vybrané z nich jsou popsány v podkapitole 2.5.2. Výsledné parametry poté definují samotnou drsnost povrchu [46].



Obr. 24 Typy profilů [46].

2.5.2 Základní parametry 2D profilu

Pro účely práce nejsou podrobně rozebrány všechny parametry drsnosti, ale pouze základní, které mohou být v práci použity. Práce posuzuje kvalitu vyhlazování dle jednotlivých metod, a tudíž budou pro hodnocení kvality textury preferovány parametry aritmetické a nikoliv extrémní. Parametry sledující maxima hodnot budou sloužit pro kontrolní účely.

▪ Průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti R_a

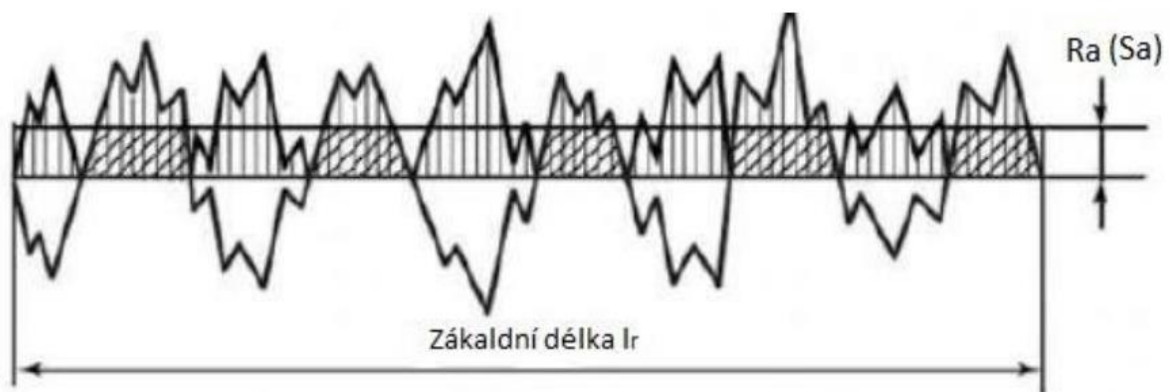
Zřejmě nejpoužívanější parametr drsnosti popisuje aritmetický průměr hodnot výšek prvků profilu v daném rozsahu délky l_r . Protože se jedná o aritmetický průměr absolutních hodnot, nevypovídá parametr o přesné drsnosti povrchu. Poskytuje však základní představu o tom, jakou má daný profil strukturu. Průměrná aritmetická úchylka profilu je dána vztahem (1) [44].

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

kde: l_r – základní délka profilu [mm]

$Z(x)$ – výška posuzovaného prvku v bodě x [mm]

Parametr R_a je využíván díky jednoduchosti měření a statistické přesnosti. Přestože parametr nemá vysokou vypovídátnost o povrchu, vychází z něj závěry týkající se životnosti či funkcionality. Vystihuje také vlivy kvality povrchu spojené s únosností uložení, těsnosti spoje nebo schopností odrážet světelné či tepelné záření. Graficky je parametr znázorněn na Obr. 25 [44], [48].



Obr. 25 Grafické znázornění parametru R_a [48].

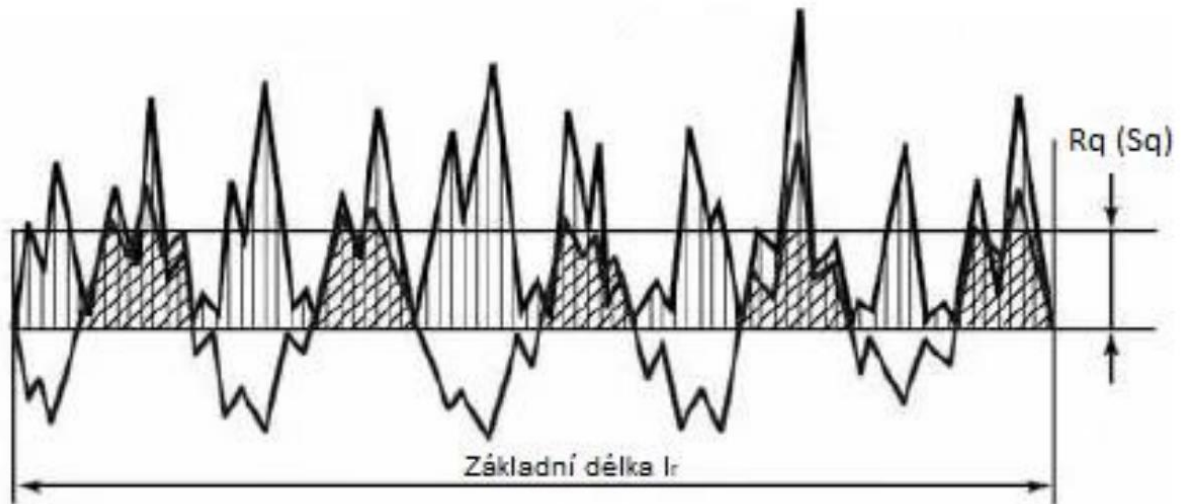
▪ Průměrná kvadratická úchylka profilu drsnosti R_q

Jak už samotný název napovídá, parametr využívá druhých mocnin výškových souřadnic, díky čemuž dosahuje parametr vyšších hodnot než R_a . Výhodou je vyšší citlivost na lokální extrémní funkce, která je popsána vztahem (2). Zmíněná citlivost je využívána k vyhodnocování ploch, na kterých je příliš velké množství výstupků a prohlubní větších rozměrů nežádoucí. Vizualizace profilu je zobrazena na Obr. 26 [44].

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l_r} * \int_0^{l_r} Z^2(x) dx} \quad [\mu\text{m}] \quad (2)$$

kde: l_r – základní délka profilu [mm]

$Z(x)$ – výška posuzovaného prvku v bodě x [mm]

Obr. 26 Grafické znázornění parametru R_q [48].

▪ Nejvyšší výška výstupku R_p

Parametr představuje nejvyšší hodnotu výstupku v měřené délce l_r . Je dán vztahem 3 jako maximum výšky posuzovaného prvku v bodě. Využíván je pro vyhodnocování třecích charakteristik při kontaktu součástí. Graficky je zobrazený na Obr. 27 [44].

$$R_p = \max(Z(x)) [\mu\text{m}] \quad (3)$$

kde: $Z(x)$ – výška posuzovaného prvku v bodě x [mm]

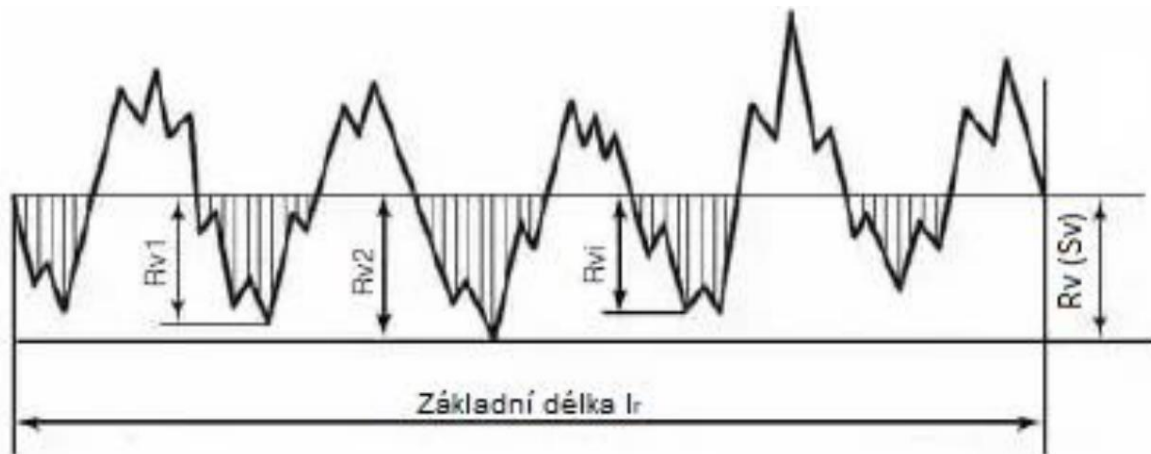
Obr. 27 Grafické znázornění parametru R_p [48].

▪ Největší hloubka prohlubně profilu drsnosti R_v

Podobně jako přechází parametr, i R_v je parametrem měřeného extrému. Vyjadřuje hloubku nejnižší prohlubně v dané délce l_r . Využíván je především k popisu náchylnosti na vznik trhlin či koroze. Pomocí R_v lze také lépe předpovědět, kolik maziva se může na dané součásti zachytit. Nevýhodou je nízký stupeň opakovatelnosti měření vzhledem k měřené oblasti. Je dán vztahem 4 a graficky znázorněn na Obr. 28 [44].

$$R_v = \min(Z(x)) [\mu\text{m}] \quad (4)$$

kde: $Z(x)$ – výška posuzovaného prvku v bodě x [mm]

Obr. 28 Grafické znázornění parametru R_v [48].

▪ Celková výška profilu drsnosti R_t

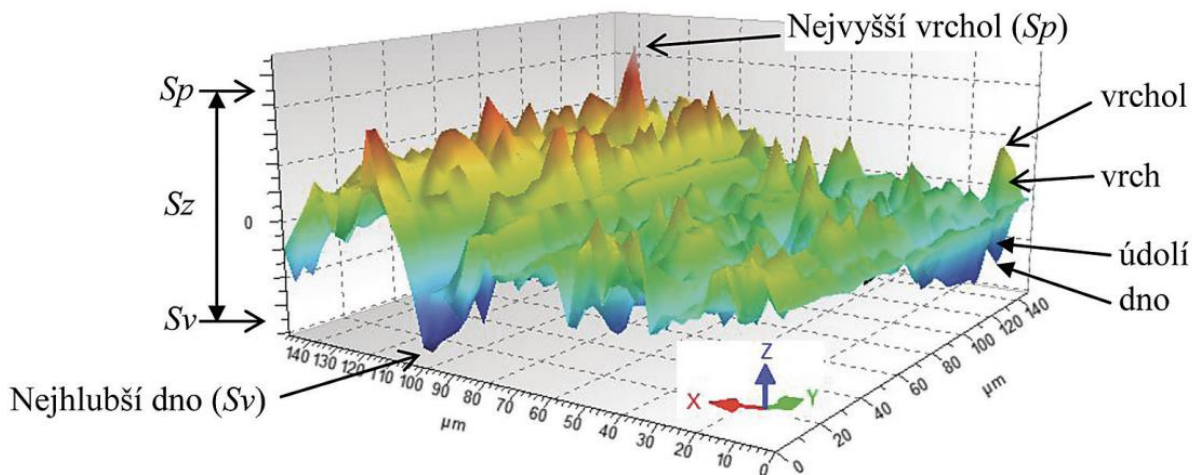
Parametr R_t popisuje součet absolutní hodnoty výšky nejhlubšího a nejvyššího bodu naměřeného na vyhodnocované délce l_n . Při snímání 3D tištěných povrchů by mohl parametr být naměřen na rozmezí dvou vrstev modelu na nakloněné rovině. Význam parametru je důležitý pro vyhodnocení závislosti sklonu plochy vůči kvalitě povrchu. Nevýhodou parametru je nízká opakovatelnost měření, protože je vypočítán pouze ze dvou právě naměřených extrémů (Obr. 29) [44].

$$R_t = R_p + R_v \text{ [}\mu\text{m]} \quad (5)$$

Obr. 29 Grafické znázornění parametru drsnosti R_t [48].

2.5.3 3D textura

Trojrozměrný profil povrchu slouží k vyhodnocení plošných parametrů textury povrchu, které jsou definovány normou ČSN EN ISO25178-2. Podobně, jako tomu bylo u profilové metody, kde je nutné definovat základní profil, pro 3D profil je zapotřebí získat data o základním povrchu, který je následně filtrován pro odstranění šumu. Ze základního povrchu je po definici souřadného systému možné určovat parametry povrchu. Topografické prvky, které 3D povrch definují, se dělí na bodové, čárové a plošné. Některé z nich jsou zobrazeny na Obr. 30. Mezi bodové patří vrcholy a dna, čárové tvoří údolnice, hřebenice a vrstevnice a plošné prvky se skládají z vrcholů a údolí [45], [49], [50].



Obr. 30 Vizualizace 3D povrchu se základními prvky [49].

Podobně jako u 2D profilů, i 3D profily je třeba filtrovat. Docíleno je toho oddělením jednotlivých struktur od sebe, čímž jsou eliminovány rušivé jevy. K filtraci jsou využívány 3 typy filtrů. Rozdělení a stručný popis je obsažen v Tab. 2.

Tab. 2 Rozdělení a popis filtrů pro 3D profily [45].

Filtrace 3D profilu	Stručný popis
S – filtr	S – filtr neboli Gaussův je používán v prvním kroku filtrace. Slouží k filtraci prvků s krátkou vlnovou délkou a při jeho použití je výstupem tzv. primární povrch.
F – filtr	F – filtr je založen na matematickém modelu, který využívá metodu nejmenších čtverců. Při jeho použití dochází k vyřazení vlivu tvaru z primárního povrchu. Výstupem je tzv S – F povrch.
L – filtr	L – filtr je využíván pro filtraci dlouhých vlnových délek. Je aplikován na primární nebo na S – F povrch a výstup z něj je označován jako S – L povrch.

Plošné parametry textury povrchu jsou rozděleny do dvou skupin, a to na parametry prvku a parametry pole. Parametry prvku hodnotí předem definované topografické podmnožiny. Parametry pole jsou stanovovány ze všech měřených bodů povrchu a dělí se dál na S a V parametry [45].

Zmíněnou normou ČSN EN ISO 25178-2 jsou S parametry dále rozděleny do 4 skupin (výškové, prostorové, hybridní a smíšené). Výškové parametry vypovídají o vlastnostech povrchu v souvislosti s odchylkou amplitudy. Na rozdíl od profilových parametrů, plošné výškové parametry mají vyšší míru statistické přesnosti [45].

▪ Aritmetický průměr výšky omezení stupnice povrchu Sa

Je plošným ekvivalentem k profilovému parametru Ra. Sa vyjadřuje aritmetický průměr absolutních hodnot na měřené ploše. I popis parametrem Sa však nemusí být zcela přesný, a to ze stejného důvodu jako u parametru Ra. Je však používán pro všestranné měření obráběných ploch, pro predikci těsnosti spoje či vyjádření životnosti. Vyjádření matematicky závislých veličin je uveden ve vztahu 6 [45].

$$Sa = \frac{1}{A} * \iint_A |Z(x, y)| dx dy \quad [\mu\text{m}] \quad (6)$$

kde: A – hodnocená plocha [mm²]

Z(x,y) – výšková souřadnice hodnoceného prvku [μm]

▪ Základ průměrné výšky čtvercem omezené stupnice povrchu Sq

Představuje plošnou alternativu k profilovému parametru Rq. Vykazuje vyšší míru stability měření než parametr Sa. Využívá druhých mocnin výškových souřadnic, díky čemuž je citlivější na extrémy výšky a hloubky dané povrchem. Princip parametru spočívá ve vymezení průměrné hodnoty čtverce hodnot na měřené ploše. Je vyjádřen vztahem 7 [45].

$$Sq = \frac{1}{A} * \sqrt{\iint_A |Z^2(x, y)| dx dy} \quad [\mu\text{m}] \quad (7)$$

kde: A – hodnocená plocha [mm²]

Z(x,y) – výšková souřadnice hodnoceného prvku [μm]

▪ Maximální výška posuzované plochy Sz

Udává součet absolutních hodnot nejvyšší výšky vrcholu (Sp) a nejhlubší prohlubně (Sv), které jsou zobrazeny na obr. 30. Výpočet hodnot je dán vztahem 8 resp. 9. Zmíněné hodnoty jsou závislé na zvolené oblasti měření povrchu, takže jejich hodnota může být zavádějící. Při opakovaném měření na stejném vzorku v jiném místě je tak možné dosáhnout zcela jiných hodnot. Parametr Sz je využíván pro posouzení životnosti dílu či možnosti nanášení povlaků. Vyjádřen je vztahem 10 [45].

$$Sp = \max (Z(x, y)) \quad [\mu\text{m}] \quad (8)$$

kde: Z(x,y) – výšková souřadnice hodnoceného prvku [μm]

$$Sv = \min (Z(x, y)) \quad [\mu\text{m}] \quad (9)$$

kde: Z(x,y) – výšková souřadnice hodnoceného prvku [μm]

$$Sz = Sp + Sv \quad [\mu\text{m}] \quad (10)$$

3 MATERIÁLY A METODY

Po důkladné rešerši byly zhodnoceny veškeré aspekty možného ovlivnění povrchově upravených vzorků a ve spolupráci s odborníky z praxe byla projednána strategie, kterou bude práce postupovat. V kapitole 3 je postup chronologicky zaznamenán pro možnost opakovatelnosti experimentálního výzkumu.

Z níže uvedené Tab. 3 je patrné, že vybranými metodami jsou všechny probrané z kapitoly 2.4 pro získání dostatečného množství výsledků k porovnání. Na vzorky z materiálu ABS a PLA byly aplikovány všechny vybrané metody a vzorky ze speciálních filamentů (PolySmooth a PolyCast) byly podrobeny pouze chemickému leptání, k čemu jsou primárně určeny.

Tab. 3 Tabulka vybraných metod povrchových úprav pro konkrétní typ filamentu

Materiál	Chemické leptání	Lokální natavení	Omílání	Nástřík
ABS				
PLA				
PolySmooth				
PolyCast				

3.1 3D tisk

Jak už je ze samotného zadání patrné, metodou 3D tisku, která byla pro účely práce zvolena, byla metoda FFF. Kvalitu samotného výtisku a jeho povrchu ovlivňuje celá řada aspektů. Mezi nimi zejména typ materiálu, teplota trysky a podložky, rychlost tisku, výška tištěné vrstvy nebo samotné konstrukční řešení tiskárny a její tuhost. Kvalitu povrchu výrazně ovlivňuje i nastavení parametrů tisku v softwaru zvaném Slicer. Program z CAD modelu převedeného do formátu .stl, vytvoří tzv. *g-code*, který obsahuje mimo souřadnic objektu také informace o teplotě tisku, rychlosti jakou se má tisková hlava pohybovat či nastavení výkonu chlazení atd.

3.1.1 3D tiskárna

Jak je z Obr. 31 patrné, zvolenou 3D tiskárnou byla tiskárna s konstrukcí typu Delta. Konkrétně se jedná o stolní tiskárnu značky Anycubic, model Anycubic Kossel linear plus. Využitá tiskárna disponuje lehkou tiskovou hlavou, díky čemuž může být tisk rychlý a zároveň kvalitní. Tomu napomáhá i tzv. bowdenové konstrukční řešení extruderu, tedy že motor, tlačící filament do tiskové hlavy, je umístěn mimo samotnou hlavu (na jednu ze tří věží).



Obr. 31 3D tiskárna Anycubic Kossel Linear Plus [51].

Tab. 4 Specifikace tiskárny Kossel Linear Plus [51].

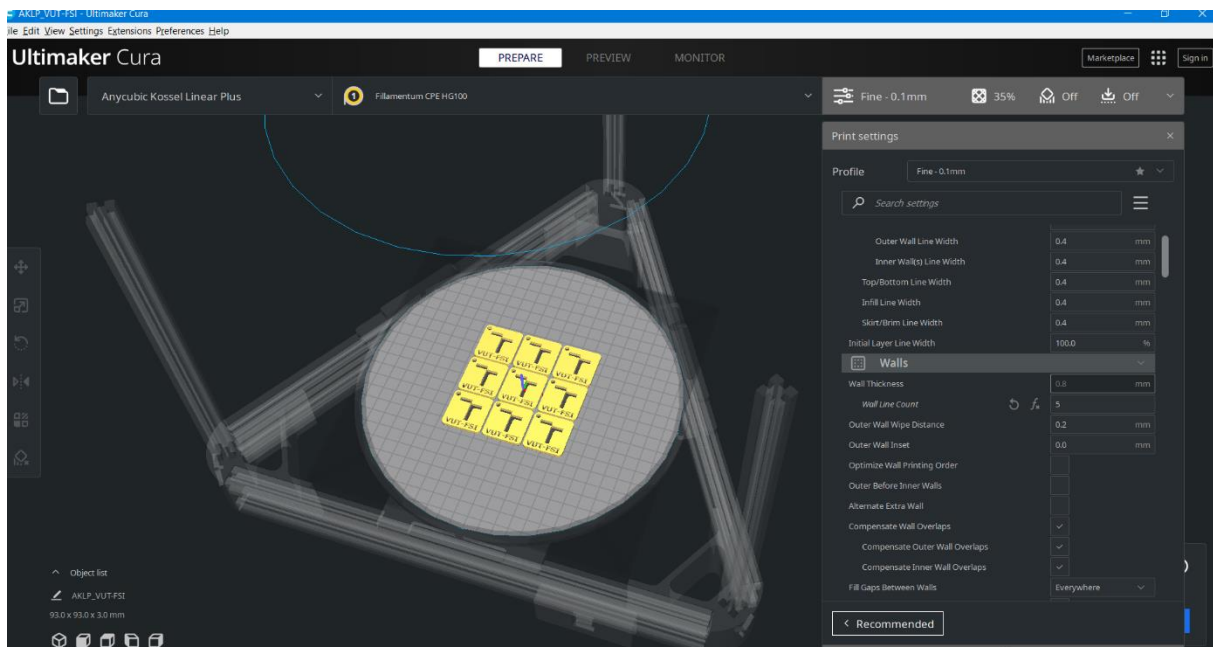
Parametr	Hodnota
Výrobce	Anycubic
Model	Kossel linear plus
Typ	Delta
Tiskový objem	Ø230x300 mm
Maximální teplota trysky	260 °C
Přesnost osy Z	0,0025 mm
Přesnost osy X a Y	0,0125 mm
Konektivita	SD karta, USB
Napájení	AC 220 V 60 Hz

Kvalita výtisků je zvýšena i díky statické podložce, na které nevznikají vibrace, jako tomu je u kartézských typů 3D tiskáren. Podložka je vyhřívána, takže základní materiály se zvýšenou smrštivostí (ABS, ASA, PA) se od podložky neodlupují a neprojevuje se tzn. *warping* (deformace modelu během tisku vlivem smrštivosti materiálu). Je však tiskárnou otevřenou, tedy bez uzavřené komory. Tisk materiálu typu PEEK, PEAK, PC či PP je tedy téměř nemožný.

3.1.2 Software pro přípravu tisku (Slicer)

Pro kvalitu výroby 3D tisku je nastavení procesu ve Slicer softwaru zásadní. Na trhu je dostupné široké spektrum programů zdarma, které jsou pro přípravu *g-cody* více než dostačující. Mezi nejčastěji používané patří Slic3r, Prusa Slicer, Simplify3D či Kiss Slicer. Jeden z nejrozšířenějších a zároveň co se možností nastavení týče nejobsáhlejších slicerů je program Ultimaker Cura, který byl pro účely práce využit. Konkrétně nejnovější verze 4.13.1.

Cura je propracovaným softwarem pro přípravu 3D tisku a obsahuje přes 500 různých nastavení tisku. Díky tomu je možné přesně předem nadefinovat, jak má být objekt stavěn k docílení nejvyšší kvality tisku a rozměrové přesnosti. Na Obr. 32 je zobrazeno Cura prostředí, které je rozděleno do tří sekcí. První z nich, *Prepare*, sloužící k polohování modelu, jeho úpravě, definování podpor a samotného nastavení tisku. Druhá sekce *Preview* zobrazuje, jak bude model tištěn včetně přejezdových trajektorií. Proces tisku lze simulovat a predikovat možné komplikace či tiskové defekty. V případě připojení tiskárny a počítače, na kterém je software otevřen, je možné použít třetí sekci s označením *Monitor*, která umožňuje uživateli ovládat tiskárnu přímo ze sliceru a spouštět vygenerované *g-cody*.



Obr. 32 Prostředí sliceru Ultimaker Cura.

Parametrem tisku, který hraje zásadní roli v tvarové přesnosti i kvalitě povrchu je bezesporu výška vrstvy. Ta je nastavitelná dvojím způsobem. Jedna z možností je nastavení výšky vrstvy coby konstantního rozměru, tedy že tzv. rozřezání modelu je prováděno v celé výšce objektu při stejné rozteči. U FFF tiskáren je parametr závislý na průměru trysky, avšak při použití běžné mosazné trysky o průměru 0,4 mm je používáno rozmezí výšky vrstvy 0,08 mm až 0,32 mm. Jinými slovy výška vrstvy by neměla překračovat 80 % průměru trysky. Druhou variantou je nastavení proměnné výšky vrstvy (ve sliceru Cura označováno jako *Adaptive layers*). Tato funkcionalita umožní Sliceru nastavit výšku vrstvy dle tištěné geometrie a převisu, kterou tvoří dříve vytištěná vrstva. Vstupem funkce je nastavení maximální možné výšky, se kterou může Cura počítat. Sekundární proměnou je nastavení výšky kroku variační vrstvy, tedy minimální rozdíl výšky oproti předchozí tištěné vrstvě. Při použití funkce proměnné výšky je část modelu, bez velkých změn tvaru a rozměru v rámci několika vrstev, tištěna po 0,2 mm a pokud je na modelu například svislý rádius či zkosení, software na tuto část naprogramuje tisk s výškou vrstvy například 0,08 mm. Výsledkem je rychlejší stavba modelu se zachováním kvalitní povrchové vrstvy.

Další aspekty kvality povrchové vrstvy spočívají v teplotách tisku, chlazení a rychlosti tisku. Parametry jsou však závislé na daném materiálu, ze kterého je objekt tištěn. Proto musí být experimentálně optimalizovány k docílení ideální kvality tisku.

3.2 Vybrané materiály

Požadavky kladené na vybrané materiály závisí na zvolených metodách povrchových úprav. Z rešeršní části vyplývá, že aby bylo možné materiály chemicky naleptat, je nutné, aby byl filament v dostupné chemikálii rozpustný. Metoda využívající natavení povrchu laserovým paprskem z principu omezuje výběr pouze na termoplasty. Omílání, mechanické broušení či nástrik aditiva je však možné použít téměř pro jakýkoliv materiál, takže při využití těchto metod nebylo nutné výběr dále redukovat. Pro účely práce byly vybrány celkem 4 materiály, z nichž jsou 2 konvenčně používané ve velké míře a další 2 materiály, které jsou přímo určené pro povrchovou úpravu chemickým vyhlazováním.

Tab. 5 shrnuje základní technickoekonomické informace o materiálu dostupné z technických listů sepsaných výrobcem. Všechny testované filaments mají průměr 1,75 mm s tolerancí $\pm 0,05$ mm, což zaručuje nízkou pravděpodobnost ucpávání trysky materiálem vlivem nestabilního průměru struny. Jak je z tabulky patrné, speciální materiály od výrobce PolyMaker jsou výrazně dražší, než běžně používané ABS či PLA. Zda je cena úměrná kvalitě povrchu, které je u nich pomocí *post-processingu* možné dosáhnout, bude možné zhodnotit až po měření.

Tab. 5 Tabulka základních parametrů zvolených filamentů [2], [23].

Materiál / Vlastnost	Výrobce	Cena [Kč·kg ⁻¹]	Hustota [g·cm ⁻³]	Teplota měknutí podle Vicata [°C]
ABS	Fillamentum	725	1,04	103
PLA	Filament PM	659	1,24	55
PolySmooth	PolyMaker	1463	1,08	70
PolyCast	PolyMaker	1831	1,10	67

Níže uvedená tabulka (Tab. 6) obsahuje základní informace o parametrech pro úspěšný tisk. Ty jsou však pouze orientační a jejich upřesnění bude experimentálně ověřeno v kapitole 3.3, kde bude pro každý z vybraných materiálů vytvořen tiskový profil.

Tab. 6 Tabulka tiskových parametrů vybraných materiálů viz. příloha 1 až 4.

Materiál / Vlastnost	Teplota trysky [°C]	Teplota podložky [°C]	Adhezní aplikátory	Rychlost tisku [mm·s ⁻¹]	Výkon chlazení [%]
ABS	220-240	80-105	3Dlac, lepidlo	Neuvedeno	Neuvedeno
PLA	200-230	20-60	Žádný	Neuvedeno	100
PolySmooth	190-220	25-70	Žádný	40-60	100
PolyCast	190-220	25-70	Žádný	40-60	100

Dle adhezních aplikátorů, které je doporučeno při tisku použít, je možné usoudit, že jediný obtížněji tisknutelný materiál by měl být materiál ABS. U ostatních není doporučena žádná úprava tiskové podložky a tisk by měl být bezproblémový. Pro filamenty ABS a PLA nebyla uvedena optimální rychlost tisku, proto bude výchozí hodnota rychlosti tisku pro všechny materiály stejná.

3.3 Tvorba a optimalizace tiskových profilů

Kvůli rozmanitosti 3D tiskáren a jejich konstrukčním aspektům neexistuje univerzální nastavení parametrů tisku. Proto musí být uživatelem vytvořen tzv. tiskový profil pro každý tištěný materiál a přizpůsoben konstrukci a typu dané tiskárny. Běžný uživatel je většinou odkázan na technickou dokumentaci dodávanou výrobcem, ovšem ta neobsahuje data pro specifickou tiskárnu a interval teplot tisku není konkrétní, jak je patrné z příloh 1 až 4.

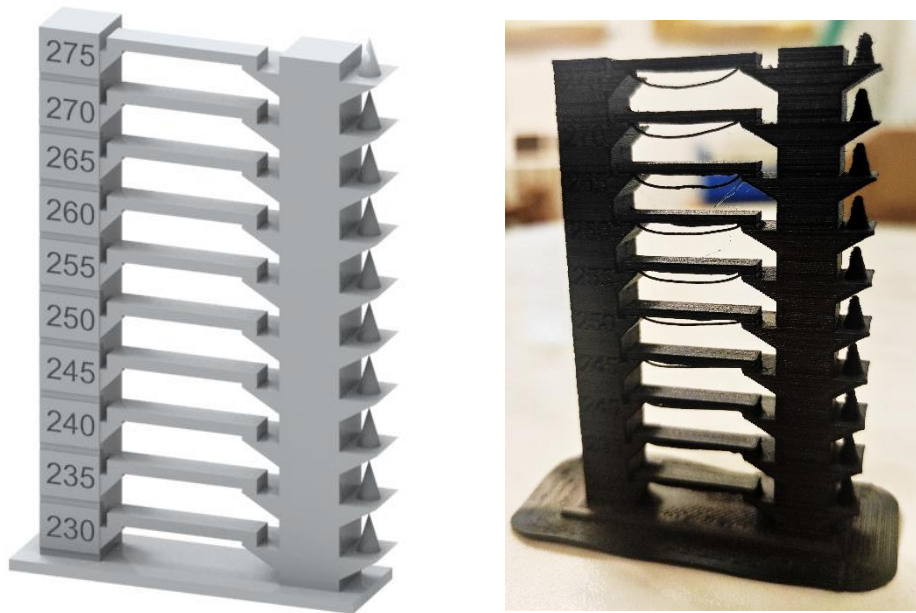
Proces tvorby a optimalizace tiskových profilů byl prováděn experimentální metodou na základě zkušeností. Na stránkách *Simplify3D.com* je vytvořen podrobný návod na řešení nejčastějších tiskových defektů, který slouží i pro tvorbu tiskových profilů. Základními parametry, které musí být nastaveny jsou:

- teplota trysky,
- výkon chlazení,
- hloubka retrakce,
- rychlost retrakce,
- šířka extruze.

Všechny zmíněné parametry byly optimalizovány pomocí tisku série modelů volně dostupných na internetu. Iterací experimentů bylo poté dosaženo optimálního nastavení, které slouží pro následný tisk modelů. Pro účely zvýšení pevnosti či dosažení vodotěsnosti modelů jsou však i tyto vytvořené profily pro běžnou praxi upravovány. Mezi parametry, které nejsou univerzálně použitelné pro každý model, patří například počet perimetrů, typ a hustota výplně, tloušťka stěny, orientace švu či počet spodních a horních plných vrstev (s hustotou výplně 100 %).

3.3.1 Teplota trysky a výkon chlazení

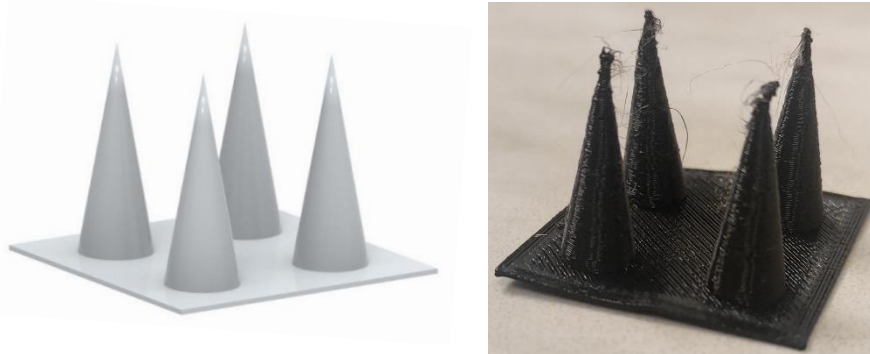
Nejdůležitějším parametrem tiskového profilu je teplota trysky. Stanovení teplotního parametru spočívá v tisku tzv. Teplotní věže (Obr. 33). Při experimentu je hledáno i ideální nastavení výkonu chlazení, které s teplotou tisku souvisí. Pro tisk věže je vygenerovaný *g-code* modifikován tak, aby se po dané výšce zvýšila teplota trysky o 5 °C. V levé části speciálně designovaného modelu je stupnice, díky které lze pak snadno detekovat, při jaké teplotě je přemostění a špičatý kužel vytištěn nejkvalitněji. Tisk modelu je opakován celkem 5x, kdy je pro každou iteraci modifikován výkon chladičového ventilátoru na určitou hodnotu (0 %, 30 %, 50 %, 80 % a 100 %).



Obr. 33 Model Teplotní věže (vlevo) a testovací výtisk (vpravo).

3.3.2 Rychlost a hloubka retrakce

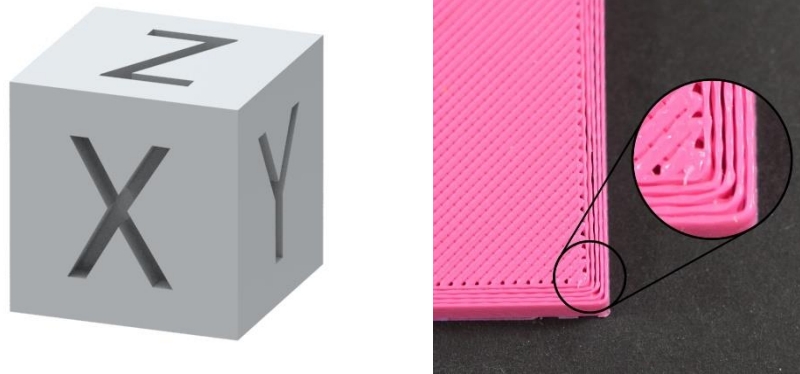
Retrakce, neboli zpětný pohyb extruderu při dokončení vytlačování materiálu ve fázi tisku, je experimentálně testována pomocí modelu na Obr. 34. Nejdůležitějšími parametry jsou rychlost a hloubka, o kterou se má filament posunout zpět do trysky. Důvodem retrakce je vytvoření dostatečného podtlaku v trysce a zamezení tak samovolnému nežádoucímu vytékání materiálu z trysky (tzv. *stringování*). Model se skládá ze čtyř špičatých kuželů, mezi kterými je nežádoucí tažení tenkého pramenu plastu sledováno. Retrakční test je ovlivněn i teplotou trysky a výkonem ventilátoru chlazení, takže test musí být proveden až po úspěšném tisku Teplotní věže.



Obr. 34 Model pro určení retrakcí (vlevo) a snímek nežádoucího stringování (vpravo).

3.3.3 Šířka extruze

Parametr, který má přímý vliv na kvalitu povrchu je testován a optimalizován pomocí modelu, patrného na Obr. 35. Jedná se o jednoduchou krychli o hraně 20 mm s vyznačenými osami, reprezentující zkoumanou stěnu. Sledováno je zejména správné vyplňování mezer nebo naopak vytlačení nadměrného množství materiálu. Pokud výtisk obsahuje mezery mezi jednotlivými dráhami, je šířka extruze příliš malá. Je-li materiál vytlačen natolik, že narušuje tvarovou přesnost modelu, je parametr šířky extruze příliš velký.



Obr. 35 Model testovací krychle (vlevo) a snímek špatně nastavené šířky extruze (vpravo) [52].

3.3.4 Finální test tiskových parametrů

Výsledným testem byl tisk modelu astronauta (Obr. 36), který svým tvarem prověřuje správnost nastavení zmíněných parametrů. Model obsahuje přemostění až 60° , které musí být vytištěno bez nutnosti generování podpor. Mezi nohama astronauta je zkoumáno nežádoucí *stringování*, skafandr testuje správnou teplotu trysky při tisku převisu. Model obsahuje značné množství kulových ploch, na kterých je patrné špatné nastavení šířky extruze a celková kvalita povrchu. Výsledná kvalita výtisku a subjektivní hodnocení uživatele rozhodne, zda je nutné optimalizaci tiskových profilů dále iterovat, nebo zda je profil připraven k použití.



Obr. 36 Model astronauta (vlevo) a výsledný testovací výtisk (vpravo).

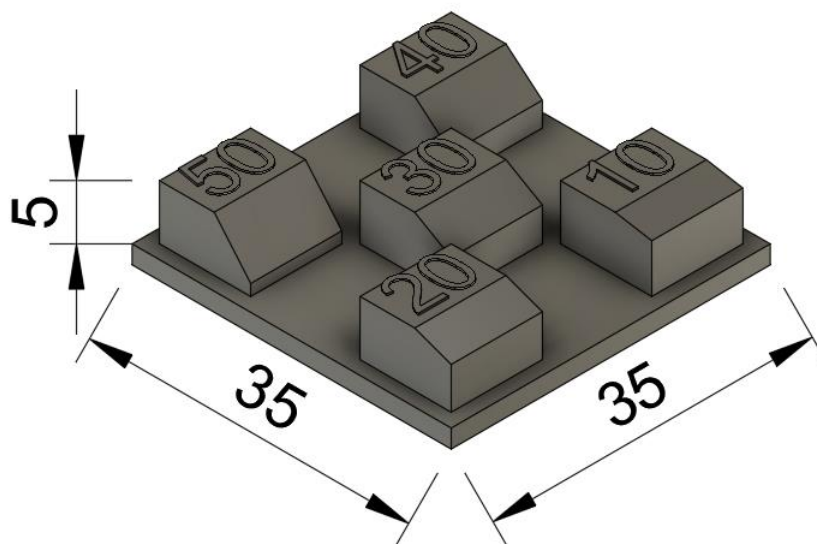
3.4 Návrh a výroba testovacích vzorků

Testovací vzorek byl na základě rešerše navržen tak, aby na něj bylo možné aplikovat vybrané metody povrchových úprav. Kritéria, která musel vzorek splňovat, jsou obsažena v Tab. 7. Mezi základní kritéria patří rozměr vzorku, omezení tvaru a sklonu či maximální rozdíl výšek testovaných ploch.

Tab. 7 Kritéria pro návrh vzorku.

Metoda <i>post-processingu</i>	Omezení
Chemické leptání	Model bez otvorů a prohlubní, rozměrově do 150 mm v průměru.
Lokální natavení	Rozmezí výšky upravovaných povrchů maximálně 3 mm.
Omílání	Dostatečná rozteč zkoumaných ploch pro volný pohyb kamenů.
Nástřík	Maximální sklon zkoumaných ploch 60° kvůli možnému stékání.

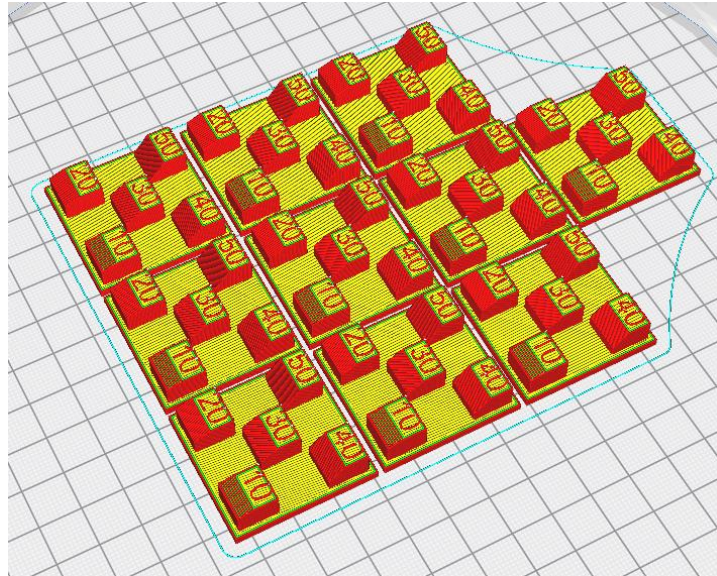
3D návrh vzorku byl zpracován v modelovacím softwaru Fusion 360 od firmy Autodesk. Středně pokročilý CAD program je dostupný pro studenty a malé firmy zdarma. Na Obr. 37 je zobrazen navržený vzorek. Skládá se z podstavy a pěti zkosených elementů s popisem úhlu sklonu. Jednotlivé úhly byly vybrány na základě rešerše, ze které vyplývá, že vzorky s nakloněnou rovinou nad 50° výrazně nepotvrzují trend snižování parametru Ra. To je v souladu s omezením sklonu, ze strany dokončování nástříkem. Výška skloněné entity je pro všechny prvky stejná, díky čemuž bylo možné provést lokální natavení CO₂ laserem. Zároveň skloněné elementy poslouží pro vytvoření závislosti sklonu nakloněné roviny na drsnosti povrchu, které bylo dosaženo *post-processingem*.



Obr. 37 3D model navrženého vzorku.

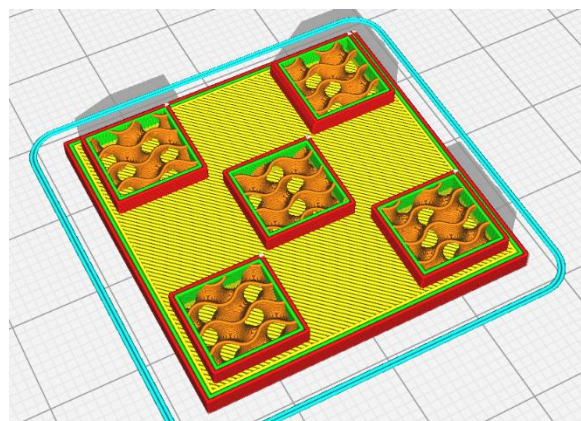
K výrobě vzorků byly použity tiskové profily experimentálně vytvořené v kapitole 3.3. Další proměnné byly nastavovány ve sliceru Ultimaker Cura. Pro danou metodu povrchové úpravy byla vyrobena sada vzorků, která obsahovala 5 výtisků z jednotlivých filamentů pro zajištění relevantní statistiky měření. Pro účely měření byly vyrobeny i sady referenčních vzorků, které upravovány nebyly. Každý tisk obsahoval 2 sady vzorků (10 kusů) (Obr. 38) pro snížení vlivu drobných odchylek pracovního prostředí (teplota a vlhkost v místnosti).

Z Obr. 38 je patrné, že orientace vzorků je synchronní, kde je zkosená plocha orientovaná doleva z konstrukčních důvodů tiskové hlavy. Pokud by byly modely orientovány opačně, mohlo by dojít k ovlivnění kvality povrchu z důvodu méně efektivního chlazení v průběhu tisku.



Obr. 38 Vizualizace tisku dvou sad vzorků ze sliceru Ultimaker Cura.

Hlavním parametrem byla výška vrstvy, která byla zvolena konstantních 0,1 mm. Důvodem je samotná podstata experimentu, která má vrstvení materiálu v kontextu kvality povrchové vrstvy prověřit. Další proměnnou byl počet perimetrů, který byl nastaven na hodnotu 4. Další nastavení je věnováno typu a hustotě výplně. Nastavena byla na typ gyroid (Obr. 39) s hustotou výplně 30 %. Pro snížení časové náročnosti tisku byl nastaven počet spodních vrstev modelu na hodnotu 3, což je pro účely práce dostačující. Vrchních vrstev bylo nastaveno 5, a to z důvodu, že při chemickém leptání by při použití menšího počtu vrstev mohlo dojít k propadu povrchových vrstev směrem k výplni a ovlivnit tak měření. Kompletní přehled parametrů tisku je shrnut v Tab. 8.



Obr. 39 Ukázka „rozřezaného“ modelu s výplní Gyroid.

Tab. 8 Parametry tisku.

Parametr tisku	Hodnota
Výška vrstvy	0,1 mm
Počet perimetrů	4
Počet spodních vrstev	3
Počet horních vrstev	5
Typ výplně	Gyroid
Hustota výplně	30 %
Rychlost tisku	40-80 mm/s
Pozice švu	pravý zadní roh
Adhezní typ	obrys / límec (ABS)

3.5 Aplikace povrchových úprav

Vzorky, vytištěné parametry uvedenými v Tab. 8, byly podrobeny čtyřem typům povrchových úprav. Jak bylo uvedeno v Tab. 3, vzorky z PLA a ABS byly upravovány všemi metodami povrchových úprav a materiály od značky PolyMaker (PolySmooth a PolyCast) byly vystaveny jen chemickému leptání, pro které jsou určeny.

Prvním úkonem bylo stanovení procesních parametrů metod *post-processingu*. Jejich stanovení probíhalo zejména experimentálně na základě konzultací s odborníky a dat z rešerše. Zásadní procesní parametry povrchových úprav byly postupně optimalizovány a vyhodnocovány. Vzájemné porovnání a vizuální kontrola rozhodla, jaké parametry budou použity pro danou dokončovací operaci. Po konzultaci s odborníky na tiskové filameny a vedoucím předložené práce bylo docíleno závěru, že přesné parametry povrchových úprav nebudou z důvodu utajení *know-how* zveřejněny.

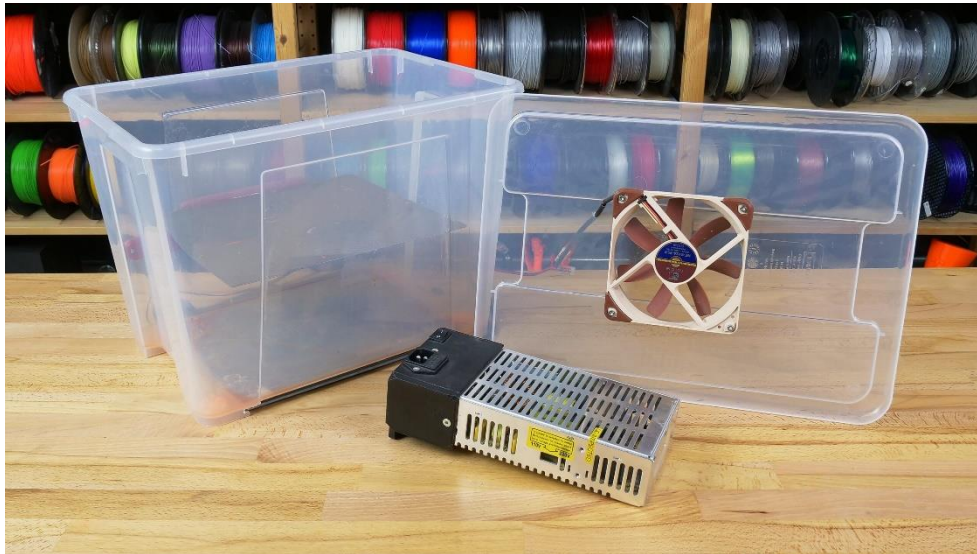
3.5.1 Technologie chemické leptání

Použité metody chemického leptání byly dvojího typu. Narušení povrchové vrstvy atmosférou bylo využito pro materiály ABS, PolyCast a PolySmooth. Pro vzorky z PLA se jako nejúčinnější metoda nanášení chemikálie ukázala metoda máčení. Postup *post-processingu* je níže rozdělen dle vyhlazovaného materiálu.

- **Vzorky z materiálu ABS**

Vyhlazování ABS bylo docíleno vystavením vzorku výparům acetonu po určitou dobu. Použitá vyhlazovací komora vyrobená v domácích podmínkách je zobrazena na Obr. 40. Při naleptávání hrála zásadní roli teplota prostředí, od které je odvíjena míra vypařování acetonu. Kvůli lepší kontrolovatelnosti procesu a důkladnějšímu vyhlazování bez nežádoucího stékání při přílišném naleptání bylo vyhlazování prováděno při nižší teplotě, než je teplota pokojová. Vzorky tak byly vystaveny acetonovým výparům řádově několik desítek minut.

Zásadní roli hrálo i množství použitého acetonu, respektive poměr množství acetonu v závislosti na objemu použité nádoby, ve které byl proces prováděn. Při použití menšího množství chemické sloučeniny byl proces vyhlazování výrazně prodloužen.



Obr. 40 Komora pro vyhlazování ABS pomocí acetonu [32].

Po úspěšném naleptání povrchu vzorků bylo nutné nechat výtisky vyschnout, aby se z nich zbylý aceton vypařil. Ve fázi odpařování byly vzorky extrémně náchylné na poškrábání a vznik defektů. To bylo způsobeno samotnou povrchovou úpravou, která na leptaných modelech způsobuje výrazné měknutí. Při odpařování zbylého acetonu byl v některých případech pozorován vznik malých bublinek na povrchu vzorku, které mohou dokončenou vrstvu negativně ovlivnit. Nežádoucí vznik bublinek byl eliminován vysušením materiálu před samotným tiskem.

- **Vzorky z materiálu PolySmooth a PolyCast**

Pro *post-processing* materiálů byla využita dokončovací stanice od stejného výrobce (PolyMaker) označovaná obchodním názvem Polysher. Proces vyhlazování v dokončovací



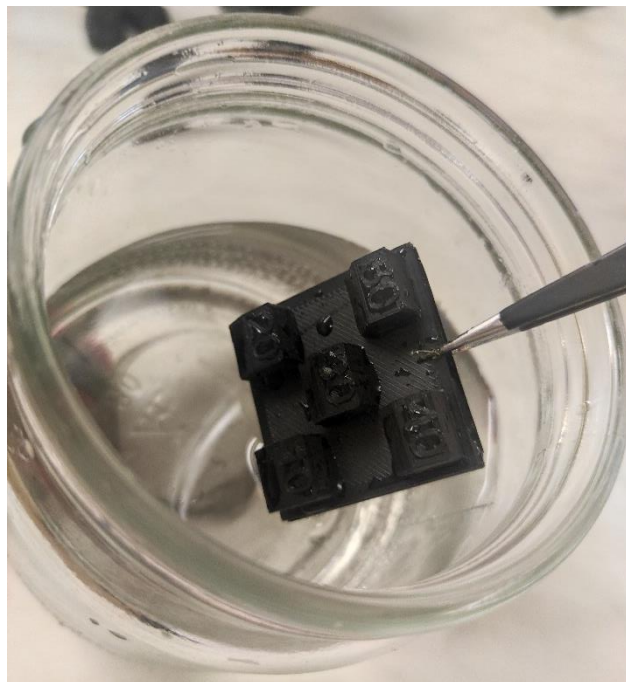
Obr. 41 Proces vyhlazování pomocí stanice Polysher [33].

stanici spočívá ve vytvoření mlžného oparu rozpouštědla v uzavřené nádobě (Obr. 41). Chemickou sloučeninou použitou pro vyhlazování materiálů byl izopropylalkohol (IPA). Jak sám výrobce materiálů i stanice uvádí, výtisky by měly být vystaveny alkoholové mlze přibližně 20 až 40 minut v závislosti na velikosti modelu a koncentraci alkoholu. Využitím stanice je docíleno snížení vlivu teploty prostředí, protože o stabilitu leptacího procesu se stará speciální tryska, která v pravidelných intervalech mlžný opar obnovuje. Aplikační výhodou je oproti předešlému případu využití rotační podložky, díky které je dosaženo zvýšení rovnoměrnosti naleptání vzhledem k tvaru a povaze modelu. To však platí pouze při leptání nízkých modelů. Při dokončování výtisku s maximální výškou, kterou lze pro Polysher použít (180 mm), je nerovnoměrnost leptání vysoká a spodní část je tak oproti horní výrazně více naleptaná.

Podobně jako v případě leptání ABS, i zde bylo nutné nechat dokončený díl několik hodin bez jakéhokoliv kontaktu s jiným předmětem. Modely vykazovaly zvýšenou měkkost, dokud z nich nevyprchal izopropylalkohol. K úplnému odpaření alkoholu z modelu dochází i po řádově několika desítkách hodin, zvláště u modelů s hlubokými otvory. Pro snížení časové náročnosti odpařování byl použit ventilátor, díky kterému došlo k vysušení rychleji.

▪ Vzorky z materiálu PLA

Výtisky byly leptány metodou máčení, kdy bylo jako rozpouštědlo použita chemická sloučenina dichloromethan (Obr. 42). Model byl uchycen pomocí pinzety a po stanovený čas ponořen do skleněné nádoby s rozpouštědlem. Po ponoření začal model ihned měknout a zkoumaná povrchová vrstva byla postupně vyhlazována. Proces vyhlazování trval řádově několik desítek sekund. Při delším vystavení by byl plastový výtisk z materiálu PLA zcela rozpuštěn.



Obr. 42 Vyhlazování výtisku z PLA pomocí máčení.

Ani leptání PLA se neobešlo bez nutnosti nechat rozpouštědlo z modelu vyprchat. Během vypařování bylo na povrchu vzorků pozorováno zmatňování povrchu, které však nebylo na celé ploše jednotné. Tomuto jevu nebylo zabráněno ani použitím jiného dostupného rozpouštědla, ani urychlením procesu vypařování pomocí ventilátoru.

3.5.2 Technologie lokální natavení

Natavování termoplastů PLA a ABS bylo docíleno pomocí CO₂ laserového plotteru o výkonu 40 W (Obr. 43). Laserový plotr tvoří skleněná CO₂ trubice, ve které je vysokým napětím generován laserový paprsek. Pomocí série třech zrcadel je paprsek odrážen na řezaný (nebo gravírovaný) povrch. Pohyb laserové hlavy umožňuje dvojice krokových motorů, které jsou řízeny základovou deskou. Specifikace stroje jsou vypsány v Tab. 9.



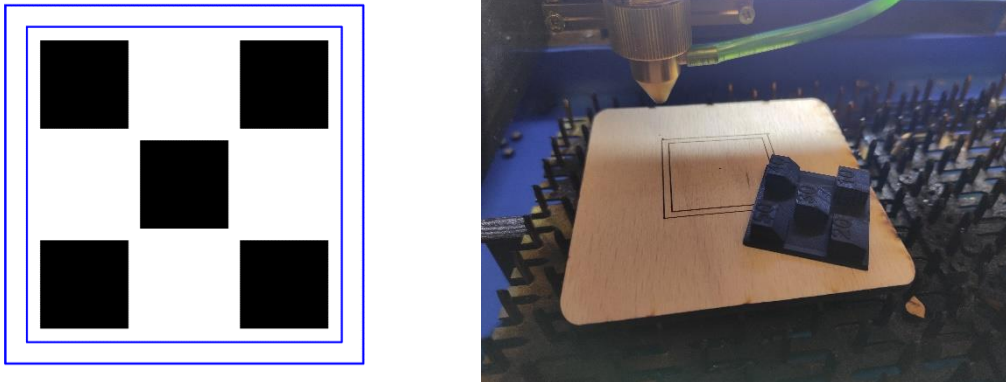
Obr. 43 Laserový plotr s výkonem 40 W [54].

Tab. 9 Parametry laserového plotteru [54].

Parametr	Specifikace
Výrobce	Venor
Model	K40
Výkon trubice	40 W
Maximální rychlost	350 mm/s
Pracovní plocha	300 x 200 mm
Maximální rozlišení	0,026 mm / 1000 dpi
Konektivita	USB

Softwarem pro řízení stroje a generování strojových příkazů byl program K40 Whisper. Program obsahuje několik možností určení referenčního bodu, což napomáhá ke správnému napolohování gravírovaného dílu. Pro dosažení co nejkvalitnějšího povrchu vzorků v rámci práce bylo nastaveno nejvyšší možné rozlišení rastrové grafiky, stejně jako parametr, definující vzdálenost mezi gravírovanými body v ose Y (*Scanline step*). Po definování grafického rozlišení byly experimentálně stanoveny procesní parametry gravírování. Nejzásadnějšími byly rychlost posuvu, výkon laseru a ohnisková vzdálenost. Z principu pohybu laserové hlavy při gravírování vyplynulo, že velkou roli zde hrála i orientace vzorku na pracovní ploše vzhledem k vrstvám výtisku. Při shodné orientaci směru gravírování a vrstvení materiálu by mohlo dojít dokonce ke zvýšení drsnosti povrchu, proto byl výtisk vždy polohován tak, aby vrstvené plochy směřovaly kolmo k ose X laserového plotru.

Po stanovení procesních parametrů byla vytvořena 2D grafika, díky které bylo natavování cíleno pouze na zkoumané plochy. Z Obr. 44 patrné, že grafiku tvoří dvojice modrých čtverců sloužící k polohování testovaného vzorku do stroje. Vnitřní modrý čtverec je rozměrově shodný s podstavou testovacího vzorku, což usnadňuje polohování na stroji. Černé čtverce odpovídají testovacím výstupkům na dokončovaném výtisku, pro které byl nastaven proces rastrového gravírování.



Obr. 44 Grafika pro povrchové naleptání (vlevo) a polohování vzorku pomocí gravírovaných čtverců (vpravo).

3.5.3 Technologie omílání

Tištěné vzorky byly omílány pomocí vibračního žlabu Minor T od firmy Rösler (Obr. 45), spolupracující na předložené práci. Omílací zařízení o kompaktních rozměrech je vybaveno kanálky, kterými je přiváděna čistá voda. Jejím účelem je odvádět ze žlabu nečistoty a drobné třísky, které proces omílání produkuje. Podpůrným prostředkem byl mimo čisté vody i detergent, díky kterému došlo ke snížení povrchového napětí na mokřích vzorcích a nečistoty tak byly snáze odplaveny. Kompletní specifikace vibračního žlabu je vypsána v tab. 10.



Obr. 45 Vibrační žlab Minor T.

Tab. 10 Parametry vibračního žlabu [39].

Parametr	Hodnota
Výrobce	Rösler
Model	Minor T
Rozměry vany	210 x 270 x 530 mm
Objem vany	20 l
Výkon motoru	0,65 kW
Maximální rychlost	3000 1/min

Zásadními parametry pro správné vyhlazení výtisků jsou převážně tvar, rozměry a brusný profil omílacích kamenů společně s dobou omílání. Po konzultaci s odborníkem z firmy Rösler byly pro účely práce zvoleny k testování brusné kameny dvojího typu. Konkrétně typ RSF o velikosti 3/5 s válečkovým tvarem se sešikmenými řezy a typ RSG o velikosti 10/10 s trojúhelníkovým profilem. Oba typy brusiva byly podrobeny testování a na základě vizuálního porovnání byl vybrán vhodnější typ. Kameny typu RSF s trojúhelníkovým profilem vykazovaly vyšší brusný výkon a tím i vyšší efektivitu vyhlazování, avšak jejich velikost byla příliš velká pro použití na navržené vzorky. To způsobilo vysokou míru nerovnoměrnosti obroušení zkoumané plochy a k měření by vzorky nebyly vhodné. Pro dokončovací úpravu vzorků byly vybrány menší, válečkové kameny, které obrousily povrch rovnoměrně. Použití menších brusných kamenů v praxi je také vhodnější pro tvarově složitější modely.

3.5.4 Nástřík plniče

Posledním typem povrchové úpravy, která byla na sérii vzorků použita, bylo vyhlazování pomocí aditiva. Jednalo se konkrétně o dokončování výtisků z PLA a ABS. Pro účely práce byl vybrán běžně dostupný plnič značky Motip o objemu 150 ml. Před samotným nástříkem byly zkoumané plochy zbroušeny smirkovým papírem o zrnitosti P320 pro vyšší míru vyhlazení. Po broušení byly výtisky důkladně odmaštěny izopropylalkoholem, aby mastnota neovlivňovala adhezi plniče na vzorku.

Mezi parametry povrchové úpravy byl řazen pouze počet vrstev nástříku, protože zbylé proměnné jako úhel, pod kterým má být nástřík prováděn je stejně jako vzdálenost od objektu definován návodem k použití. Testována byla jedna, dvě a tři vrstvy nástříku, kdy další nástřík byl možný až po úplném zatuhnutí předešlé vrstvy (10 min až 15 min). Optimální počet nástříků byl stanoven na hodnotu dva, kdy při jednom se vrstvy zcela nezcelily a u třech vrstev nástříku docházelo k ovlivňování tvarové přesnosti na zkosených prvcích.

3.6 Měření textury povrchu

V rámci meziuniverzitní spolupráce bylo kompletní měření prováděno na Katedře strojírenství Univerzity obrany. Textura referenčních i povrchově upravených výtisků byla měřena pomocí interferometrie. Konkrétně pomocí interferometru Talysurf CCI značky Taylor Hobson (Obr. 46). Jedná se o bezkontaktní 3D profilometr s automatizovaným systémem optického měření malých rozměrů. Kompletní specifikace profilometru jsou vypsány v Tab. 11.

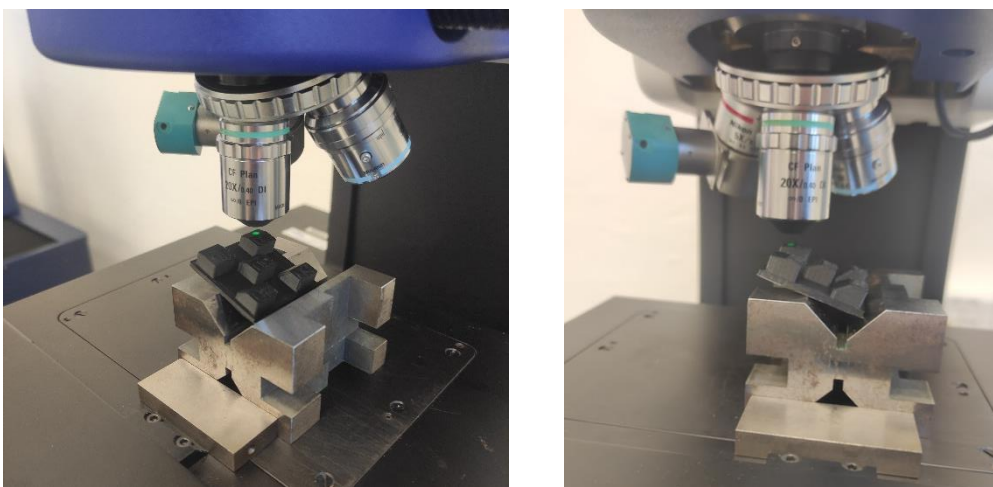


Obr. 46 Interferometr Talysurf CCI značky Taylor Hobson [54].

Tab. 11 Specifikace interferometru Talysurf CCI [54].

Parametr	Hodnota
Výrobce	Taylor Hobson
Model	Talysurf CCI Lite
Vertikální rozsah	2,2 mm
Vertikální rozlišení	0,01 nm
Opakovatelnost RMS povrchu	0,02 nm
Šum	0,08 nm
Maximální měřená plocha	6,6 x 6,6 mm
Hustota měřených bodů (zvětšeno 20krát)	1024 x 1024
Optické rozlišení	0,4 až 0,6 μm

Pro dosažení kvalitnějších výsledků měření byly vzorky podloženy přípravkem, kdy měřená skloněná plocha byla vyrovnána do vodorovné polohy, jak je patrné z Obr. 47. Pro vyšší stabilitu vzorku byla na přípravek nanесena plastelína, díky které bylo možné vzorek vyrovnat pro všechny měřené sklony.



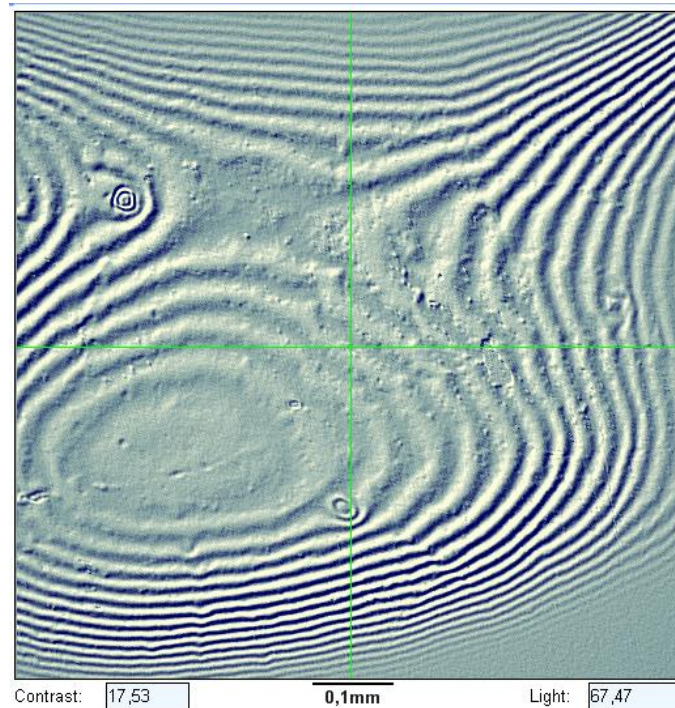
Obr. 47 Polohování vzorku před samotným měřením.

Správný postup měření hraje zásadní roli pro relevantnost výsledků. Proto byl sestaven za pomoci vedoucího pracovníka měřící laboratoře. Celkový postup měření je rozepsán v Tab. 12 a následně detailněji rozebrán.

Tab. 12 Postup operací pro měření textury povrchu.

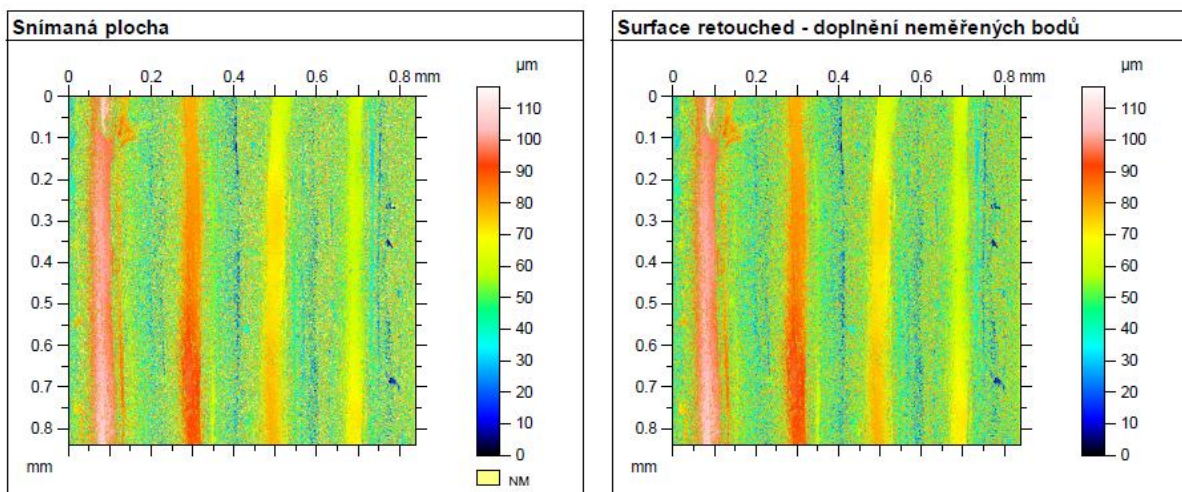
Číslo operace	Operace	Stručný popis
1	Výběr vhodné plochy k měření	
2	Zaostření na povrch vzorku	
3	Nastavení výškového rozsahu	Zadaný rozsah ovlivňuje čas měření
4	Snímání plochy	Získání hrubých dat
5	Nahrazení nezměřených bodů	Nahrazení nezměřených bodů tvarem povrchu, který odpovídá nejbližše měřeným
6	Vyrovnaní povrchu	Pomocí metody nejmenších čtverců dochází k vyrovnaní měřené oblasti
7	Thresholding	Zahrnutí odpovídajícího spektra dat do celkové analýzy
8	Odstranění tvaru	Pomocí aproximace polynomem 3. řádu dochází k odstranění tvarových úchylek
9	Filtrace pro získání drsnosti a vlnitosti	Filtrování dat pomocí Gausova filtru s parametrem cut-off 0,25 mm
10	Vygenerování 3D textury povrchu	
11	Kalkulace 3D parametrů textury	(Sa, St, Sp, Sv, Spd, SPc)
12	Extrahování profilů	ve směru Západ-Východ
13	Zobrazení středního profilu vlnitosti a drsnosti	ve směru Západ-Východ
14	Kalkulace 2D parametrů textury	ve směru Západ-Východ (Ra, Rt, Rp, Rv, RPc)
15	Extrahování profilu	ve směru Sever-Jih
16	Zobrazení středního profilu vlnitosti a drsnosti	ve směru Sever-Jih
17	Kalkulace 2D parametrů textury	ve směru Sever-Jih (Ra, Rt, Rp, Rv, RPc)

Po výběru vhodné plochy k měření následovalo správné zaostření na povrch vzorku. Určováno bylo pomocí interference vzorku (Obr. 48) či detekce textury povrchu. Pro stanovení výškového rozsahu měření bylo nutné nalézt hranice, za kterými již zobrazený jev nebylo možné pozorovat.



Obr. 48 Snímek interferenčního jevu na povrchu vzorku z materiálu PolyCast.

Na Obr. 49 je patrný nasnímaný povrch, který byl dále numericky zpracováván. Nejprve byl snímek doplněn o body, které nebyly profilometrem naměřeny, na základě nejbližších naměřených bodů. Zmíněné doplnění mohlo narušit přesnost výsledků, protože dopočítané hodnoty výšky vrcholů a prohlubní neodpovídaly skutečnosti. Měření textur bylo iterováno, dokud nebylo docíleno úspěšnosti naměření alespoň 90 %.

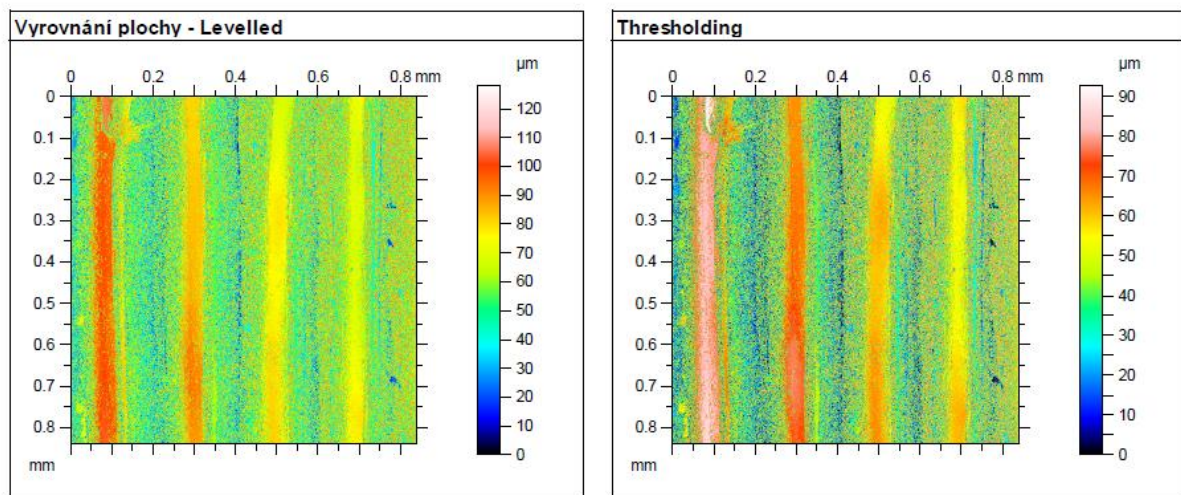


Obr. 49 Snímek měřené plochy (vlevo) a doplnění o nezměřené body (vpravo).

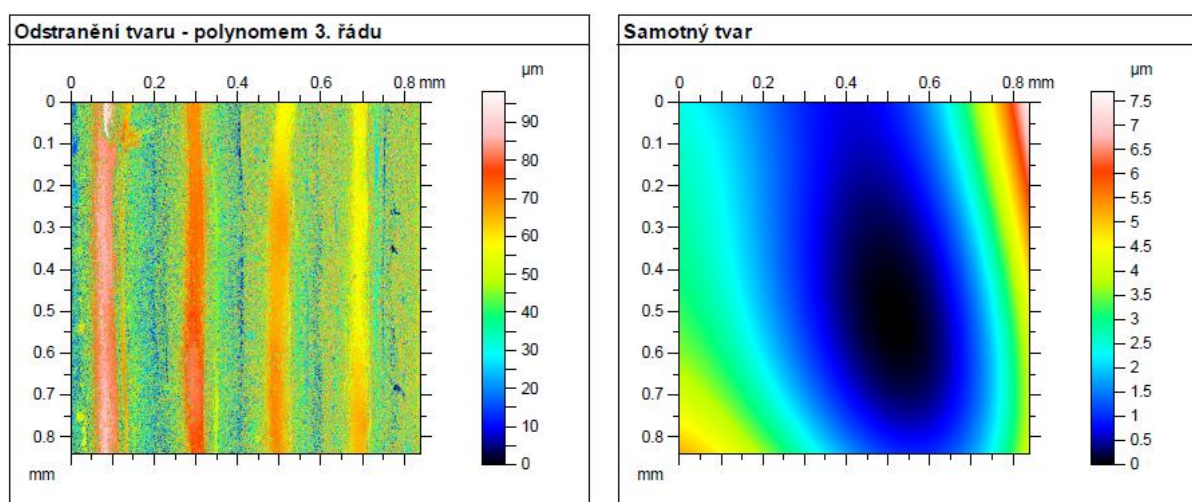
Následovalo vyrovnaní povrchu pomocí metody nejmenších čtverců. Tato úprava dat byla nezbytná pro správnost výsledků, protože plastové vzorky nebyly měřeny přesně pod úhlem, o který jsou v porovnání s rovinou horizontální skloněny. Vyrovnaní numerickou metodou poskytovalo efektivní kompenzaci úhlové odchylky.

Thresholding je operace zahrnující do analýzy odpovídající spektrum dat. Úpravou dat je možné odstranit z hodnocených dat náhodné a dominantní vrcholy a prohlubně, a tím zpřesnit naměřené hodnoty parametrů. Pro vyhodnocení bylo nastaveno omezení dat 1 %. Jinými slovy, do výpočtu parametrů povrchu byly zahrnuty hodnoty pouze v rozsahu 0,5 % až 99,5 %. Odstraněním byly eliminovány extrémní hodnoty, které mohly vzniknout nesprávnou kalkulací při doplňování nezměřených hodnot či extrémů na hodnoceném povrchu, které by měření ovlivnily.

V další fázi zpracovávání dat byly odstraněny tvarové úchytky aproximací polynomem 3. řádu, díky čemuž bylo dosaženo získání samotného tvaru povrchu vzorku, jak je patrné z Obr. 51. Data podrobená výše uvedeným numerickým operacím dále posloužila pro získání grafu vlnitosti a drsnosti plochy.



Obr. 50 Numerické vyrovnaní měřené plochy (vlevo) a odstranění hraničních bodů spektra (vpravo).



Obr. 51 Profil po odstranění tvarových úchytek (vlevo) a získání samotného tvaru vzorku (vpravo).

Na každém elementu bylo provedeno celkem 5 měření pro zachování relevance výsledků a statistické přesnosti dat. Časová náročnost vyhodnocení jedné textury povrchu byla přibližně 5 minut.

Během měření došlo ke dvojici komplikací, které byly vzápětí vyřešeny. První problém nastal hned u prvního měřeného vzorku, kde nebylo možné plochy se sklonem 40° a 50° měřit. Důvodem byla kolize optiky přístroje s výtiskem, kdy po vyrovnání měřené plochy do vodorovné pozice došlo ke snížení operačního prostoru pro měření a optika do vzorku při měření narážela. Docházelo tedy k nemožnosti plochy měřit. Řešením byla separace 40° a 50° elementu od zbytku vzorku. Další komplikace byla špatná odrazivost omílaných povrchů, kdy docházelo k naměření pouze 20 % zkoumané plochy. Po postupném zvyšování a snižování výkonu přisvětlovací žárovky bylo docíleno téměř kompletní eliminace nezměřených bodů a vzorky bylo možné hodnotit.

4 VÝSLEDKY

Kapitola výsledků obsahuje kompletní data měřených vzorků pro materiál ABS. Pro zachování přehlednosti a stručnosti práce jsou naměřená data textur povrchu pro další testované materiály vyhodnocena v přílohách 5 až 7. Ze stejného důvodu nejsou prezentovány všechny snímky a profily povrchů testovaných sklonů.

4.1 Parametry tisku

Po dokončení všech testů s násobnou iterací bylo docíleno vhodných parametrů tisku, které byly použity pro výrobu testovacích vzorků určených pro dokončovací operace. Z Tab. 13 je patrné, výkon chlazení ABS materiálů byl stanoven na 0 %, výtisk tedy bude při tisku chlazen pouze okolním prostředím. Přestože výrobcem uváděné intervaly teplot trysky byly u materiálu PolySmooth a PolyCast stejné, experimenty ukázaly, že teplota trysky by měla být pro materiál na bázi vosku o 5 °C nižší. Pro eliminaci narušení výsledků kvality povrchu byla zvolena jednotná rychlost tisku ($40 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ pro perimetry a $80 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ pro tisk výplně), k čemuž musel být uzpůsoben parametr rychlosti a hloubky retrakce pro zamezení nežádoucího *stringování*.

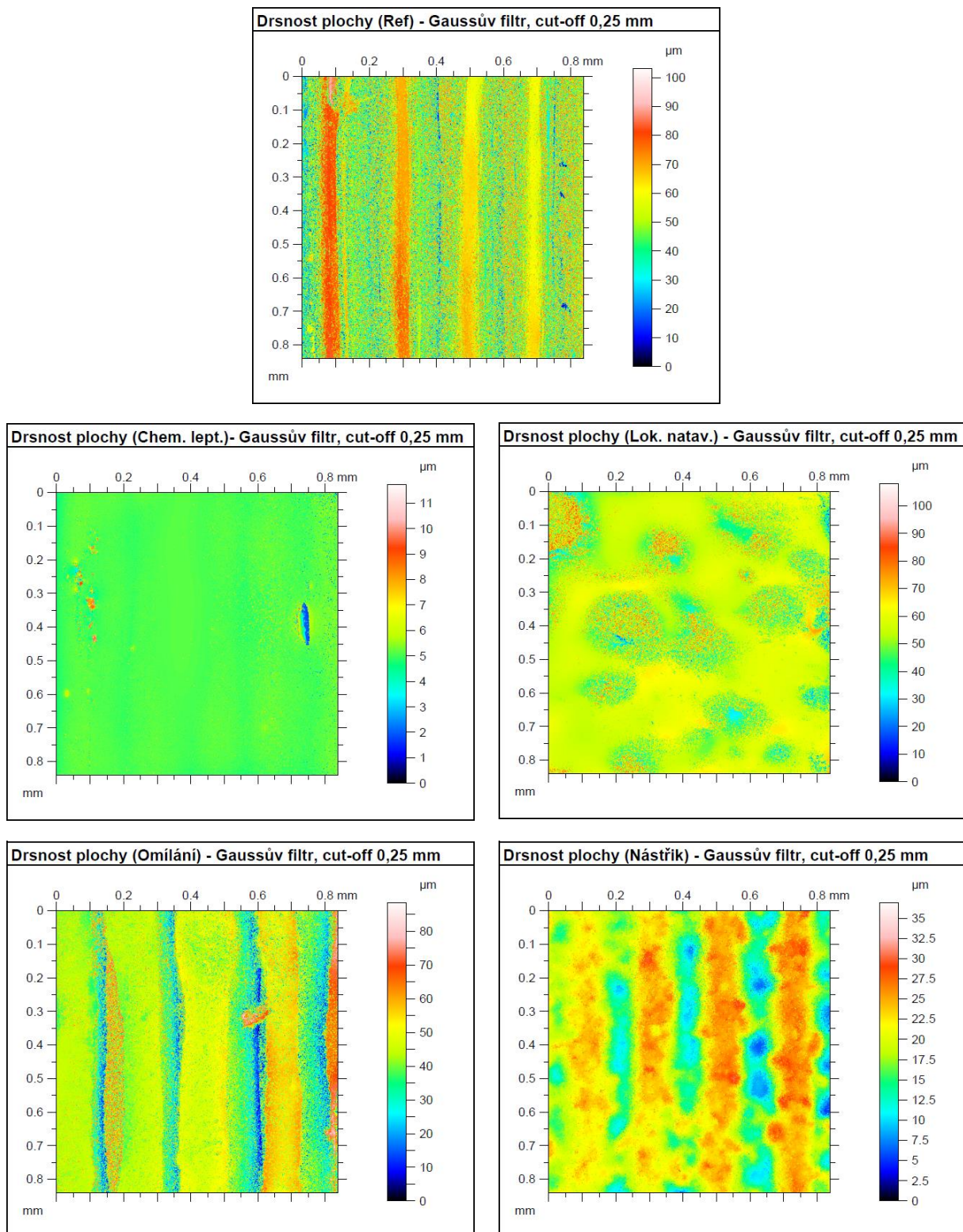
Tab. 13 Výsledné tiskové parametry jednotlivých materiálů.

Materiál	Parametr tisku						
	Teplota trysky [°C]	Teplota podložky [°C]	Rychlost tisku [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]	Hloubka retrakce [mm]	Rychlost retrakce [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]	Výkon chlazení [%]	Šířka extruze [mm]
ABS	238	105	40-80	4,8	30	0	0,38
PLA	217	55	40-80	6,5	25	100	0,38
PolySmooth	210	55	40-80	6,3	25	100	0,37
PolyCast	205	40	40-80	6,5	25	100	0,41

4.2 Textura povrchu ABS vzorku

Jedním ze základních výsledků analýzy textury povrchů bylo grafické zobrazení textury hodnoceného povrchu. Grafické zobrazení obsahuje data z obou měřených směrů a poskytuje komplexní náhled na texturu povrchu vzorku. Na referenčních vzorcích byl dle zvýšené drsnosti snadno detekovatelný směr vrstvení materiálu při tisku, které bylo odstraněno povrchovými úpravami s různou efektivitou vyhlazení. Obr. 52 poskytuje srovnání drsnosti plochy u měřených vzorků, kde referenční vzorek (v horní části) slouží pro celkové porovnání. Všechna prezentovaná zobrazení textury povrchu byla naměřena na elementech skloněných o 30° vůči horizontální rovině.

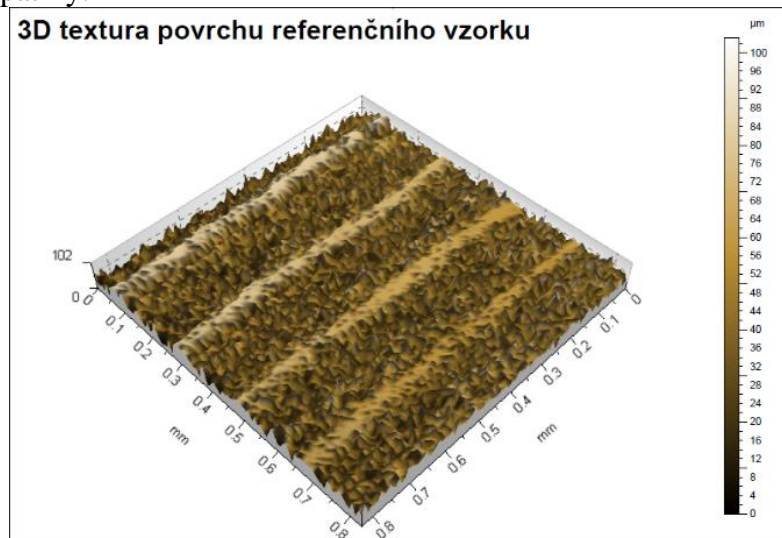
Nejmenší drsnost povrchu, dle rozsahu naměřených dat, vykazuje vzorek vyhlazovaný pomocí chemického leptání. Povrch, vyhlazen téměř na stejnou hodnotu drsnosti po celé měřené ploše, obsahuje drobné oblasti, kde byly detekovány defekty textury povrchu. Metoda *post-processingu* vykazuje velkou míru vyhlazení vrstev, kde stopy po vrstvení nejsou detekovatelné. Vzorky natavené laserovým paprskem, obsahovaly vyšší míru nezměřených bodů a hodnoty drsnosti jsou tím pravděpodobně mírně ovlivněny.



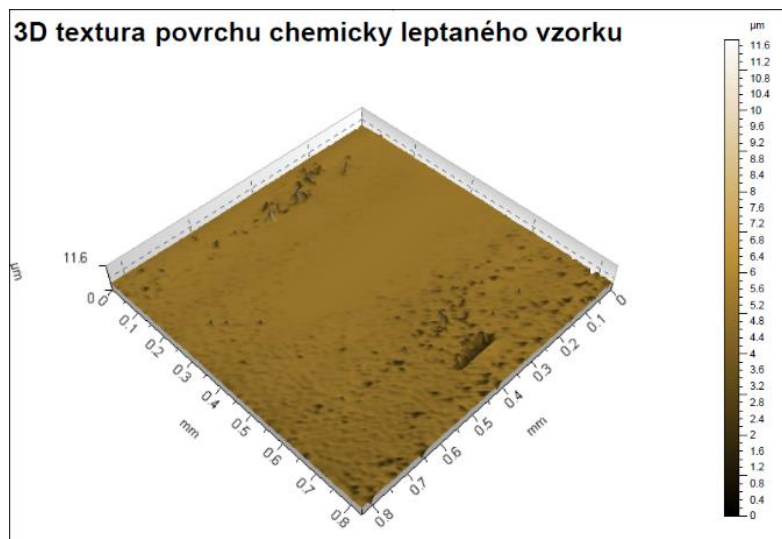
Obr. 52 Porovnání textury povrchu referenčního a upravených vzorků.

Na omílaném vzorku je vrstvení i přes snížení drsnosti, stále snadno detekovatelné. Drsnost byla díky použité metodě snížena, ovšem ne nijak znatelně. Na vzorku byly pozorovány rozsáhlé prohlubně, které měřenou drsnost snižují. Úplného vyhlazení hranic vrstvení nebylo dosaženo ani u vzorku, kde bylo aplikováno vyhlazení nástřikem plniče. Přestože oproti referenčnímu vzorku došlo k výraznému snížení drsnosti měřené plochy, nebyl výtisk vyhlazen do takové míry jako tomu bylo u chemického leptání.

Pro lepší představu a vizualizaci výsledků byly na základě naměřených dat vygenerovány 3D textury povrchu o rozměru 0,8x0,8 mm. Dopomohly tak k analýze defektů a míře vyhlazení na dokončených plochách. Porovnání všech textur měřených na sklonu 30° je zobrazeno na Obr. 54 až Obr. 57. Na referenčním vzorku, prezentovaném na Obr. 54, je směr vrstvení materiálu zcela patrný.



Obr. 53 3D textura povrchu referenčního vzorku.



Obr. 54 3D textura povrchu chemicky leptaného vzorku.

Textura chemicky vyhlazeného vzorku nevykazuje téměř žádné známky výroby 3D tiskem a jeho povrch je kvalitně vyhlazen. Přestože je v měřené oblasti několik defektů a nedokonalostí, povrch je hladký.

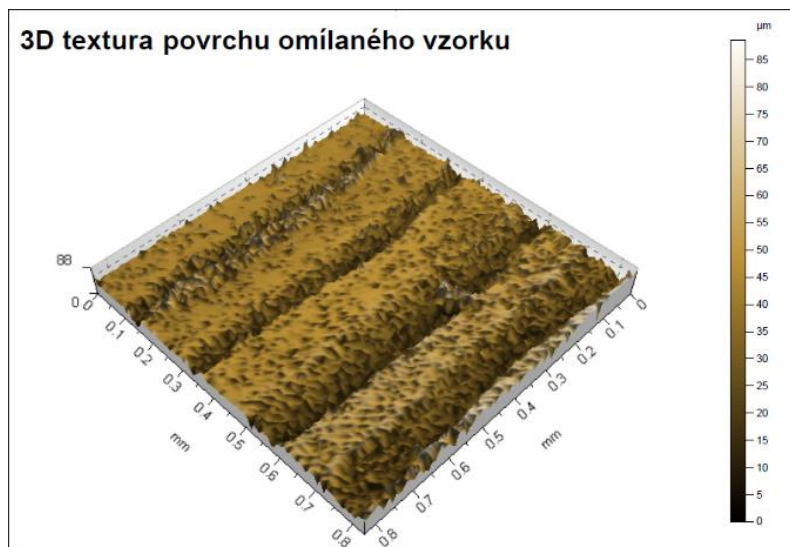
Kvalitně vyhlazené oblasti jsou patrné i na vzorku, který byl vyhlazován pomocí CO₂ laseru. Velkou část povrchové vrstvy pokrývají oblasti, které nad okolním povrchem značně vyčnívají.

Textura omílaného vzorku je v porovnání s referenčním mírně hladší. Neobsahuje takové množství vrcholů jako referenční vzorek. Avšak i po povrchové úpravě trajektorie trysky silně detekovatelná.

Na 3D textuře povrchu vzorku upraveného nástřikem plniče je možné pozorovat vyšší míru vyhlazování na vrcholech v porovnání s prohlubněmi. Pozorováno bylo i významné snížení drsnosti.



Obr. 56 3D textura povrchu lokálně nataveného vzorku.



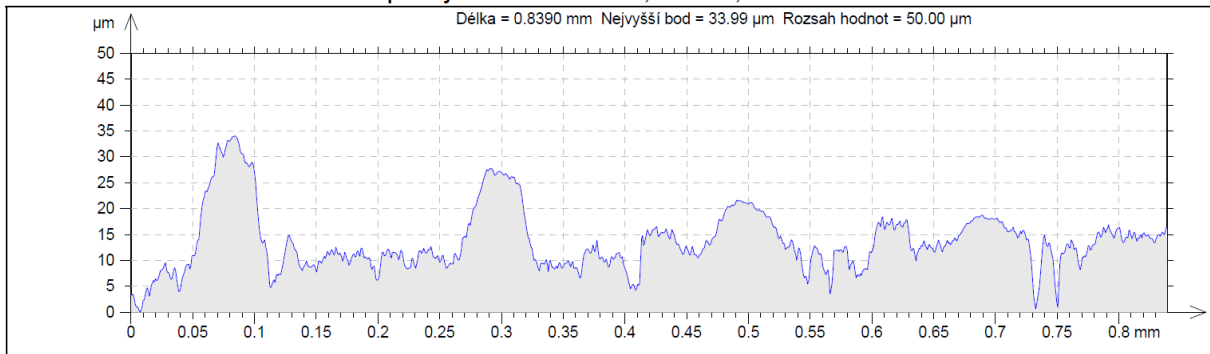
Obr. 55 3D textura povrchu omílaného vzorku.



Obr. 57 3D textura povrchu nástřikem upraveného vzorku.

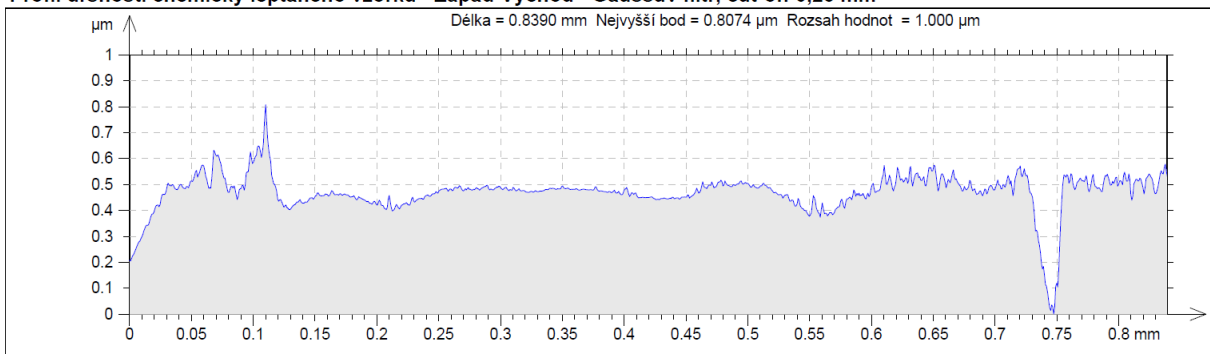
Pro názornost a zjednodušení vizualizace textur povrchů byly vytvořeny 2D profily drsnosti v obou měřených směrech. Orientace Východ – Západ (V – Z) je kolmá na směr vrstvení materiálu, zatímco Sever – Jih (S – J) je se směrem vrstvení rovnoběžná. Jak bylo predikováno, snížení drsnosti u jednotlivých materiálů bylo patrné v obou směrech pro téměř všechny metody *post-processingu*. Výjimkou bylo vyhlazování povrchu laserovým paprskem, kde ve směru S – J bylo detekováno zvýšení drsnosti. Porovnání profilů drsnosti pro dané povrchové úpravy je ve směru V – Z zobrazeno na Obr. 58 až Obr. 62. Při analýze profilů je třeba dbát zvýšené pozornosti kvůli proměnnému rozsahu osy Y. Profily mají horní hranici rozsahu nastavenou na 50, 30, 10 či 1 μm .

Profil drsnosti referenčního vzorku - Západ-Východ - Gaussův filtr, cut-off 0,25 mm



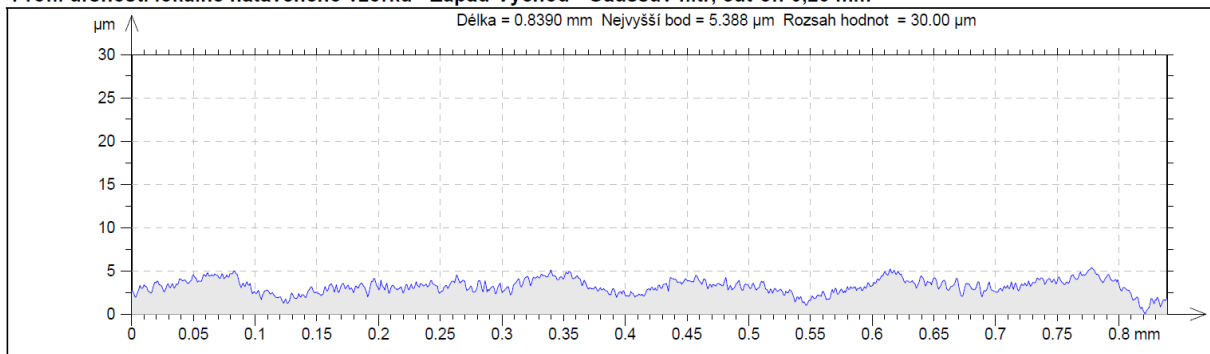
Obr. 58 Profil drsnosti referenčního vzorku.

Profil drsnosti chemicky leptaného vzorku - Západ-Východ - Gaussův filtr, cut-off 0,25 mm



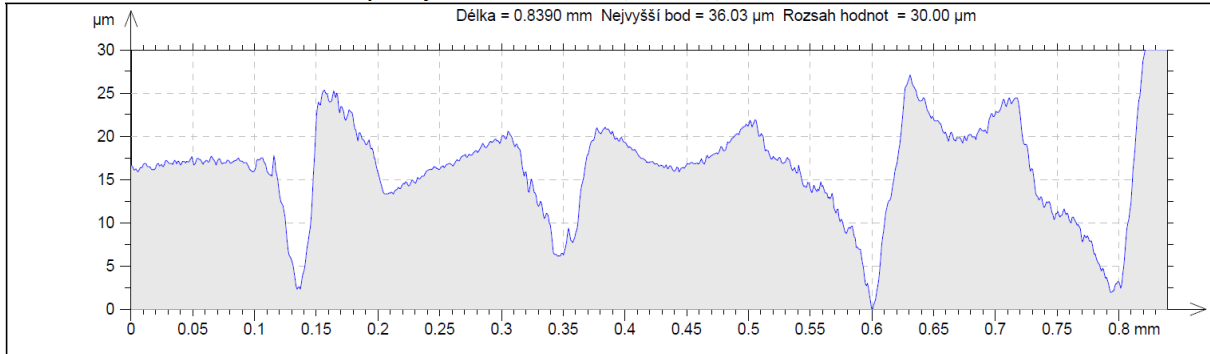
Obr. 59 Profil drsnosti chemicky leptaného vzorku.

Profil drsnosti lokálně nataveného vzorku - Západ-Východ - Gaussův filtr, cut-off 0,25 mm



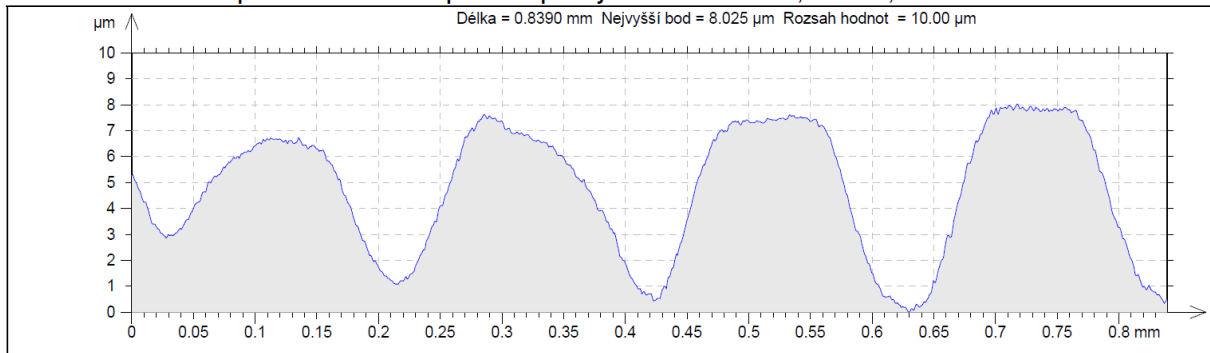
Obr. 60 Profil drsnosti lokálně nataveného vzorku.

Profil drsnosti omílaného vzorku - Západ-Východ - Gaussův filtr, cut-off 0,25 mm



Obr. 61 Profil drsnosti omílaného vzorku.

Profil drsnosti vzorku upraveného nástřikem plniče- Západ-Východ - Gaussův filtr, cut-off 0,25 mm



Obr. 62 Profil drsnosti vzorku upraveného nástřikem plniče.

V rámci hodnocení textur povrchu byly měřeny i profilové a plošné parametry. Konkrétně plošné parametry S_a , S_t , S_p , S_v , SP_d a SP_c . Měřenými profilovými parametry byly R_a , R_t , R_p , R_v a RP_c , hodnocenými v obou směrech. Vybrané z nich jsou prezentovány v Tab. 14, která je rozdělena do jednotlivých skupin dle použité technologie *post-processingu*.

Z Tab. 14 je patrné, že nejhladšího povrchu se podařilo docílit metodou chemického leptání u všech sklonů sešikmené plochy. Snížení hodnot parametrů textury povrchu bylo dle výsledků v rámci několika řádů. Nejnižší hodnoty parametrů byly měřeny na ploše skloněné o 20° , kde parametr S_a dosáhl hodnoty $0,078 \mu\text{m}$.

Laserové vyhlazování se ukázalo jako efektivní metoda vyhlazování v kolmém směru vrstvení materiálu, avšak v rovnoběžném směru jsou hodnoty parametrů vyšší oproti referenčnímu vzorku. Parametr R_a i R_t je ve směru S – J vyšší než ve směru kolmém. Při vyhodnocování výsledné drsnosti povrchu tedy musí být použity hodnoty parametru R_a a R_t ze směru S – J.

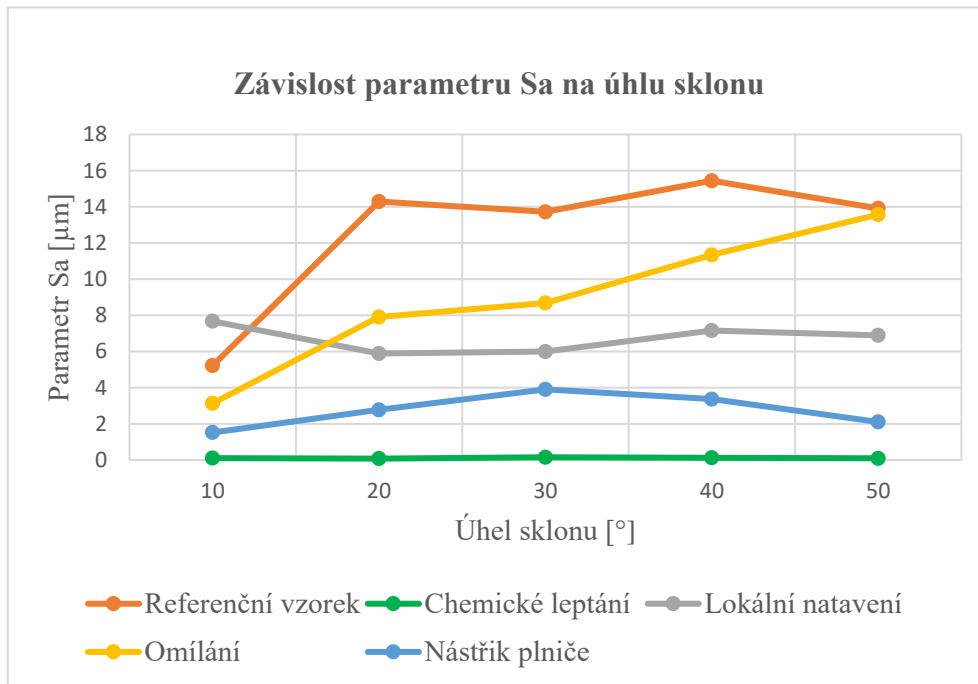
Omílané vzorky vykazují snížení všech parametrů textury povrchů pro všechny úhly sklonu s výjimkou 50° , kde jsou hodnoty mírně zvýšené. Nejlepších výsledků bylo dosaženo u úhlu sklonu 10° . Průměrná aritmetická úchylka omezené stupnice povrchu (S_a) byla naměřena $3,135 \mu\text{m}$.

Významné snížení všech parametrů textury lze pozorovat i u nástřiku plničem. Nejlépe vyhlazený povrch byl skloněn o 10° . Hodnota parametru R_a zde byla naměřena $0,347 \mu\text{m}$. V porovnání s referenčním vzorkem, kde na stejně skloněné ploše byl parametr R_a naměřen $3,244 \mu\text{m}$, je to více než 10krát lepší výsledek.

Tab. 14 Vybrané měřené parametry vzorku z materiálu ABS.

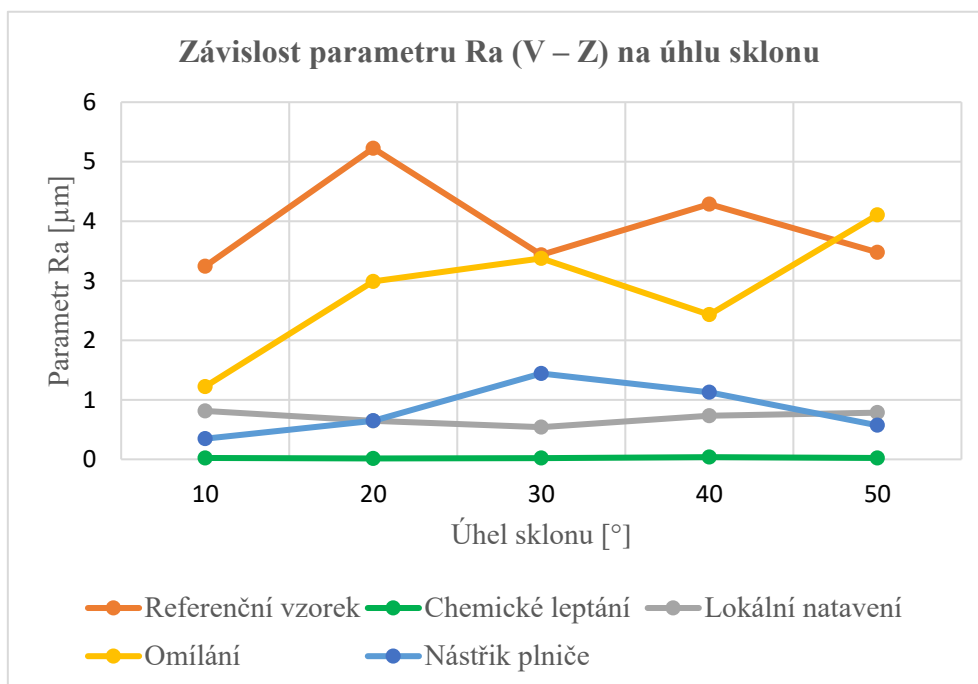
	Úhel [°]	Plošné parametry		Profilové parametry (Z–V)		Profilové parametry (S–J)	
		Sa [μm]	St [μm]	Ra [μm]	Rt [μm]	Ra [μm]	Rt [μm]
Referenční	10	5,220	120,200	3,244	41,840	0,251	1,704
	20	14,290	138,700	5,226	41,040	0,573	4,748
	30	13,720	103,200	3,435	21,250	0,527	4,408
	40	15,440	118,700	4,287	22,000	0,568	4,905
	50	13,910	122,600	3,478	25,960	0,570	4,426
Chemické leptání	10	0,106	6,674	0,022	0,255	0,012	0,141
	20	0,078	6,509	0,015	0,102	0,004	0,054
	30	0,151	11,740	0,020	0,176	0,020	0,173
	40	0,123	6,751	0,037	0,228	0,033	0,262
	50	0,093	18,980	0,022	0,114	0,007	0,094
Lokální natavení	10	7,671	149,600	0,813	5,760	0,789	7,100
	20	5,889	108,300	0,646	4,976	0,734	5,646
	30	5,994	108,100	0,541	3,727	0,806	6,023
	40	7,160	134,000	0,733	5,000	0,920	7,193
	50	6,895	138,400	0,785	7,038	0,787	7,039
Omílání	10	3,135	67,910	1,222	15,990	0,181	1,369
	20	7,908	103,800	2,988	22,340	0,404	3,017
	30	8,680	88,600	3,376	24,980	0,459	4,543
	40	11,340	139,000	2,430	33,200	0,536	4,387
	50	13,570	153,500	4,107	28,940	0,667	5,261
Nástřík	10	1,521	23,310	0,347	1,886	0,152	0,920
	20	2,777	30,020	0,648	3,820	0,297	1,359
	30	3,905	36,950	1,442	5,425	0,207	1,223
	40	3,366	65,370	1,126	5,546	0,227	1,993
	50	2,107	50,940	0,572	3,141	0,202	1,427

Výše uvedená data byla použita pro vytvoření závislosti parametrů kvality povrchu na úhlu sklonu. Grafické znázornění slouží k přehlednému porovnání výsledků jednotlivých metod povrchových úprav. Mimo vzájemné srovnání lze také pozorovat, jak se parametr kvality povrchu měnil v závislosti na úhlu sklonu.



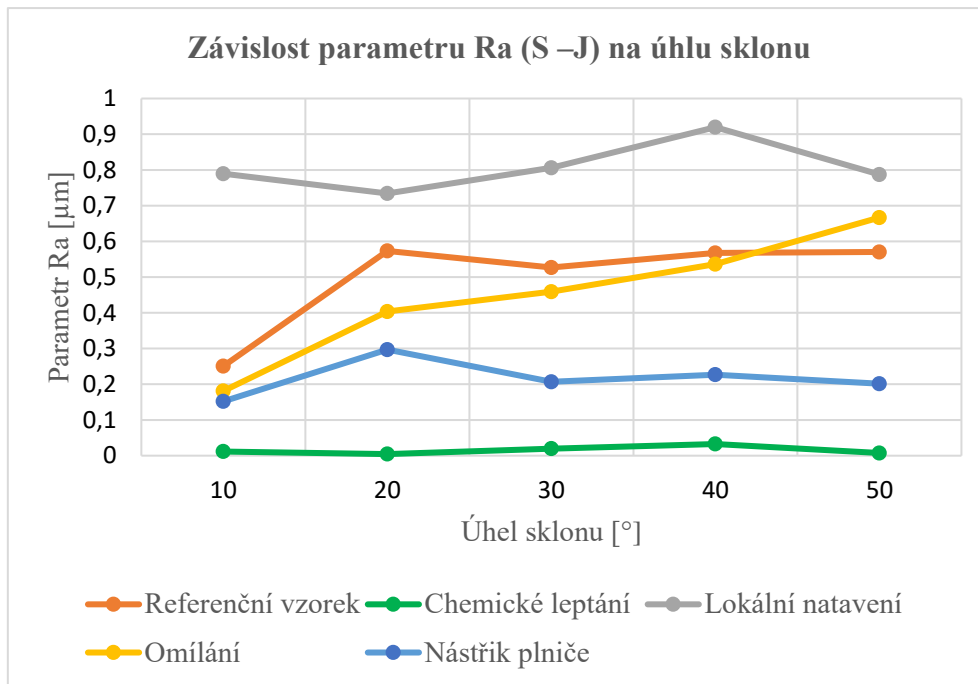
Obr. 63 Grafická závislost parametru Sa na úhlu sklonu.

Z Obr. 63 je patrné, že parametr Sa vykazuje u referenčního vzorku se zvyšujícím se úhlem sklonu rostoucí tendenci. Podobně je to tak i u metody omílání, kde je parametr navyšován téměř lineárně. Téměř dvojnásobný růst a pokles byl sledován u metody nástřiku. Metody nástřiku a lokálního natavení vykazují korelaci parametru Sa mezi hodnotami 2 až 4 μm a 6 až 8 μm v případě natavení, avšak jejich průběh je opačný. Křivka, odpovídající metodě chemického leptání v porovnání s ostatními, téměř kopíruje vodorovnou osu a pro čtení hodnot parametru Sa je třeba využít výše uvedenou Tab. 14.



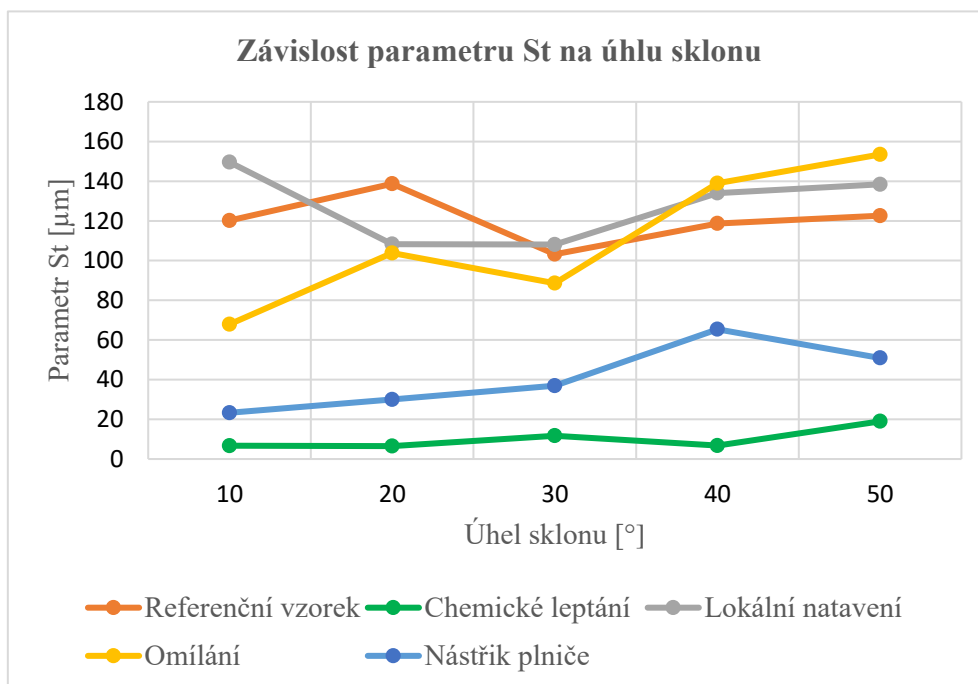
Obr. 64 Grafická závislost parametru Ra na úhlu sklonu ve směru Východ – Západ.

Graf na Obr. 64 obsahuje závislost profilového parametru Ra na úhlu sklonu ve směru V – Z. Nejlepší výsledky vykazuje metoda založená na leptání acetonem, avšak podobných výsledků bylo dosaženo metodou nástřiku a lokálního natavení. Při dokončování nástřikem parametr Ra s rostoucím sklonem zvyšuje svou hodnotu, ovšem u úhlu 40° a 50° klesá téměř na původní hodnotu. Pro metodu lokálního natavení vzorku byla sledována inverzní závislost.



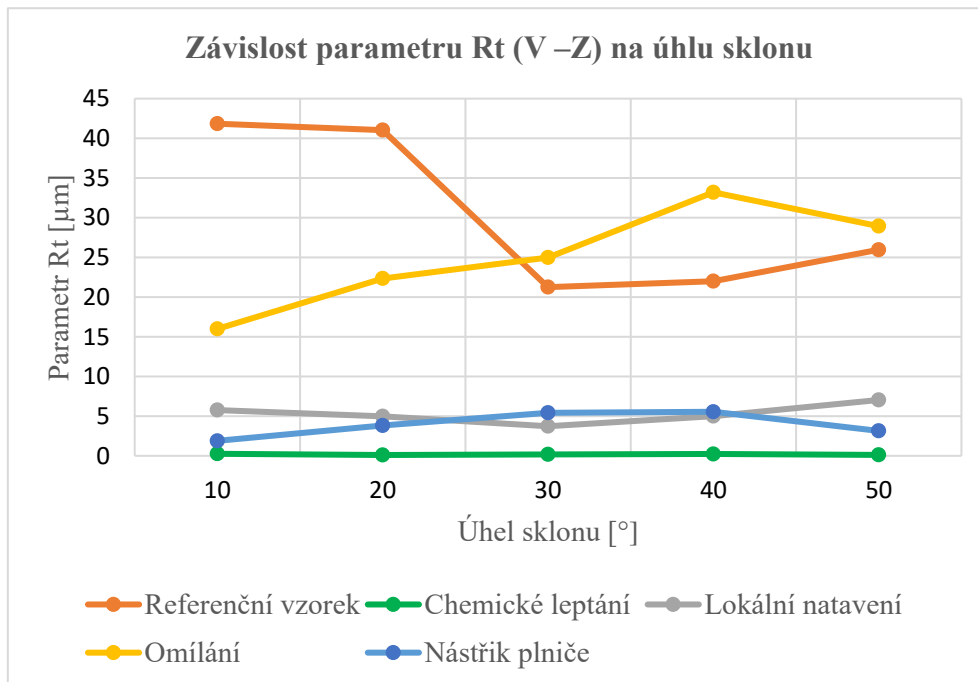
Obr. 65 Grafická závislost parametru Ra na úhlu sklonu ve směru Sever – Jih.

Z výše uvedeného grafu na Obr. 65 lze jednoznačně zhodnotit, že metoda laserového natavení vykazuje horší kvalitu povrchu, než referenční vzorek. Na 50° sklonu byla naměřena vyšší hodnota Ra i u vzorku, který byl omílán. Metoda nástřiku a chemického leptání potvrzují kvalitu povrchu z kolmého směru (V – Z).



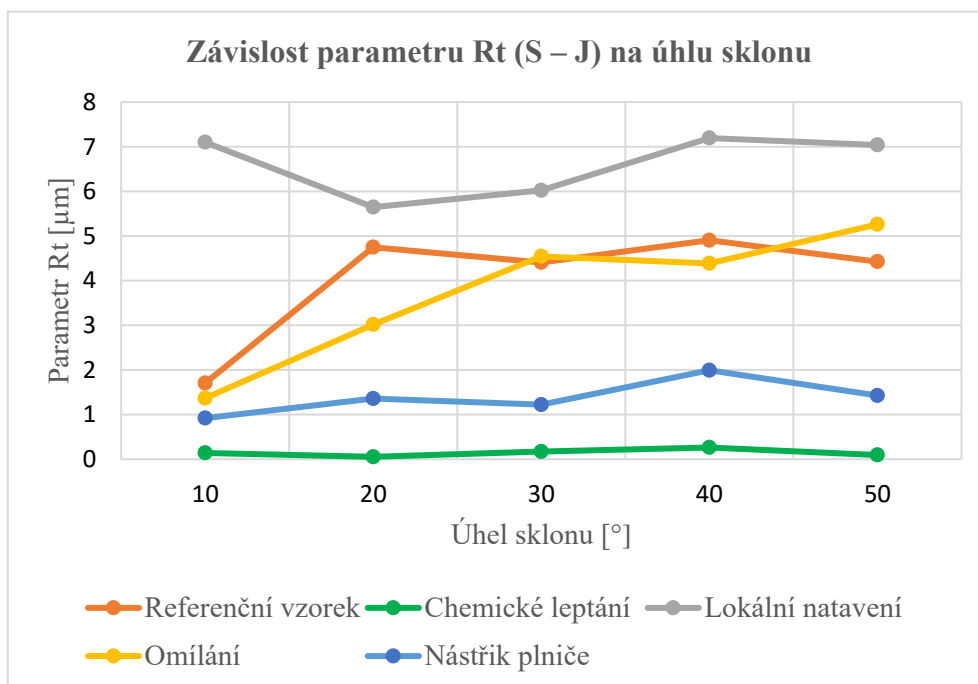
Obr. 66 Grafická závislost parametru St na úhlu sklonu.

Graf na Obr. 66 vykresluje závislost plošného paramteru St na tištěném úhlu sklonu. Parametr hodnotící maximální naměřenou výšku od nejhlubší prohlubně po nejvyšší vrchol je silně závislý na vybrané oblasti měření. Metoda leptání a nástřiku vykazuje výrazně lepší výsledky než zbylé dokončovací operace. Na povrchu vzorku vyhlazeným laserem byla až na na úhel 20° naměřena dokonce vyšší hodnota parametru St než u referenčního vzorku.



Obr. 67 Grafická závislost parametru Rt na úhlu sklonu ve směru Východ – Západ.

Výše uvedený graf (Obr. 67) porovnává závislosti parametru Rt ve směru V – Z pro všechny aplikované metody povrchové úpravy. Nejnižší hodnoty vykazují hned 3 metody. Nejnižší naměřené výšky bylo docíleno chemickým leptáním, avšak metoda laserového natavení a nástřiku plniče rovněž vykazuje v porovnání s referenčním vzorkem výrazně nižší hodnoty. Pro větší část sklonů byla u omílaných vzorků měřena hodnota vyšší.



Obr. 68 Grafická závislost parametru Ra na úhlu sklonu ve směru Sever – Jih.

Na grafu z Obr. 68 je patrné, že metoda laserového natavení je silně závislá na orientaci vyhlazování. Ve směru Z – V byla metoda dle naměřených dat efektivní, avšak ve směru S – J, ve kterém byl vzorek vyhlazován, vykazuje výrazně vyšší hodnoty parametru R_t než vzorek referenční. Rostoucí trend byl sledován u metod nástřiku plniče a omílání, který byl potvrzen i referenčním vzorkem. Nejnižší hodnoty R_t v měřeném směru vykazoval vzorek leptaný chemikáliemi.

Pro přehlednost a shrnutí výsledků naměřených drsností pro materiál ABS byly vytvořeny Tab. 15 až Tab. 17, ve kterých je prezentováno procentuální snížení či zvýšení (záporné hodnoty) hodnoty daného parametru v závislosti na úhlu sklonu. Prezentovaná data pro jednotlivé úhly jsou aritmeticky zprůměrována pro snazší porovnání jednotlivých metod. Vyšší hodnoty snížení plošné drsnosti S_a reprezentují vyšší míru vyhlazení povrchu vůči referenčnímu vzorku.

Tab. 15 Procentuální snížení plošné drsnosti S_a oproti referenčnímu vzorku.

Úhel sklonu [°]	Chemické leptání [%]	Lokální natavení [%]	Omílání [%]	Nástřik plniče [%]
10	97,96	-46,95	39,94	70,86
20	99,45	58,79	44,66	80,57
30	98,90	56,31	36,73	71,54
40	99,20	53,63	26,55	78,20
50	99,33	50,43	2,44	84,85
Průměrně	98,97	34,44	30,07	77,20

Tab. 16 Procentuální snížení drsnosti R_a (V – Z) oproti referenčnímu vzorku.

Úhel sklonu [°]	Chemické leptání [%]	Lokální natavení [%]	Omílání [%]	Nástřik plniče [%]
10	99,31	74,93	62,33	89,29
20	99,71	87,64	42,82	87,61
30	99,41	84,26	1,72	58,02
40	99,14	82,90	43,32	73,73
50	99,36	77,44	-18,09	83,56
Průměrně	99,39	81,44	26,42	78,44

Tab. 17 Procentuální snížení drsnosti R_a (S – J) oproti referenčnímu vzorku.

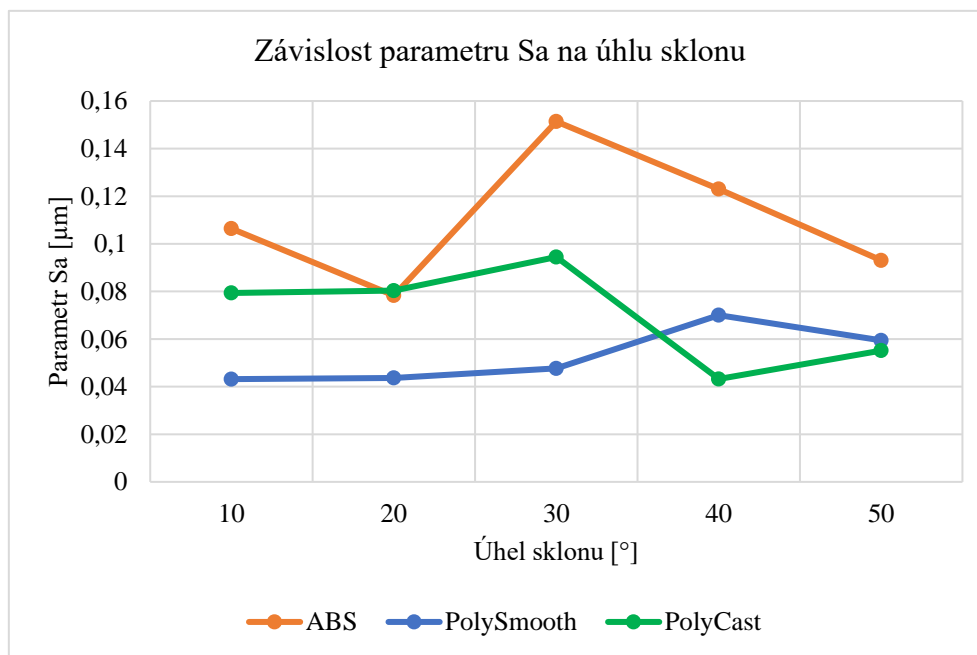
Úhel sklonu [°]	Chemické leptání [%]	Lokální natavení [%]	Omílání [%]	Nástřik plniče [%]
10	95,40	-214,96	27,73	39,35
20	99,23	-28,09	29,61	48,19
30	96,26	-53,05	12,82	60,74
40	94,25	-62,04	5,53	60,04
50	98,71	-38,02	-16,90	64,67
Průměrně	96,77	-79,23	11,76	54,59

4.3 Porovnání vybraných materiálů v rámci dokončovací metody

Porovnání míry vyhlazování materiálů je zhodnoceno v kapitole 4.3 dle použité metody. Pro každou aplikovanou metodu je prezentována grafická závislost parametru Sa na úhlu sklonu. Výsledná data jsou porovnána v odpovídajících tabulkách.

▪ Technologie chemického leptání

Metodou, která byla použita pro vyhlazení všech vzorků z vybraných materiálů byla metoda chemického leptání. Z Obr. 69 je patrné, že materiál PolySmooth byl vyhlazen na nejnižší hodnoty Sa. Pouze při úhlu sklonu 40° vykazoval materiál PolyCast nižší hodnotu (0,432 μm). Materiál ABS byl v jednom bodě (úhel sklonu 20°) srovnatelný se speciálním materiálem na bázi vosku, avšak kvality vyhlazení, měřené parametrem Sa, oproti dalším dvěma prezentovaným nedosáhl. Pro zachování přehlednosti grafu byla ze závislosti vymazána data odpovídající hodnotám pro materiál PLA z důvodu výrazně vyšších hodnot parametru Sa.



Obr. 69 Grafická závislost parametru Sa na úhlu sklonu pro jednotlivé materiály.

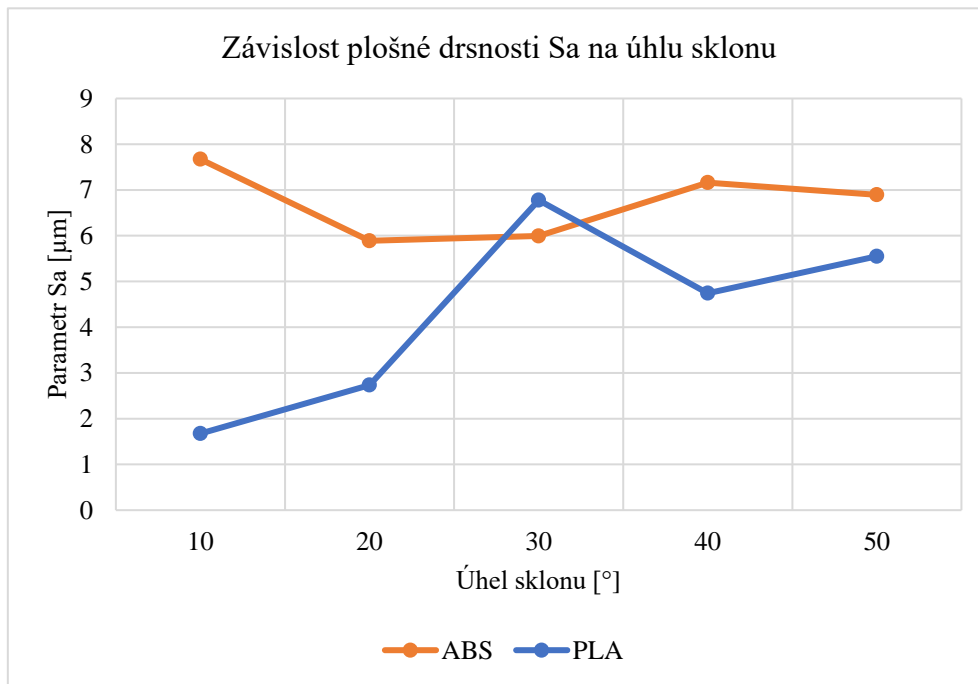
Tab. 18 porovnává procentuální snížení hodnot parametru Sa pro jednotlivé materiály v porovnání s daty naměřenými na referenčních vzorcích. Nejvyšší míry snížení hodnoty parametru Sa chemickým leptáním bylo docíleno vyhlazováním vzorků z materiálu PolySmooth. Největší rozdíl hodnot byl naměřen na úhlu sklonu 20°. Hodnota parametru Sa referenčního vzorku odpovídala 16,28 μm a vyhlazováním byla snížena na 0,043 μm , tedy o 97,73 %. Vyhlazování chemickou cestou bylo nejméně účinné pro vzorky z materiálu PLA, kde bylo docíleno snížení v průměru o 93,61 %.

Tab. 18 Procentuální porovnání snížení parametru Sa pro jednotlivé materiály.

Úhel sklonu [°]	ABS [%]	PLA [%]	PolySmooth [%]	PolyCast [%]
10	97,96	77,87	99,30	98,45
20	99,45	96,94	99,73	99,59
30	98,90	96,31	99,67	99,33
40	99,20	98,86	99,50	99,70
50	99,33	98,09	99,60	99,61
Průměrně	98,97	93,61	99,56	99,34

▪ Technologie lokálního natavení

Vyhlazování povrchové vrstvy lokálním natavením bylo prováděno pro materiály ABS a PLA. Grafická závislost parametru Sa na úhlu sklonu je pro oba materiály zobrazena na Obr. 70. Z obr. 70 je patrné, že nižších hodnot parametru Sa bylo dosaženo u materiálu PLA. Výjimkou byl sklon 30°, kde vzorky z materiálu PLA narušily téměř lineárně rostoucí závislost. Vzorky z materiálu ABS nataveny laserovým paprskem nevykazují významnou závislost na úhlu sklonu a oproti PLA vzorkům byla sledována menší citlivost vůči úhlové proměnné.



Obr. 70 Grafická závislost parametru Sa na úhlu sklonu pro jednotlivé materiály.

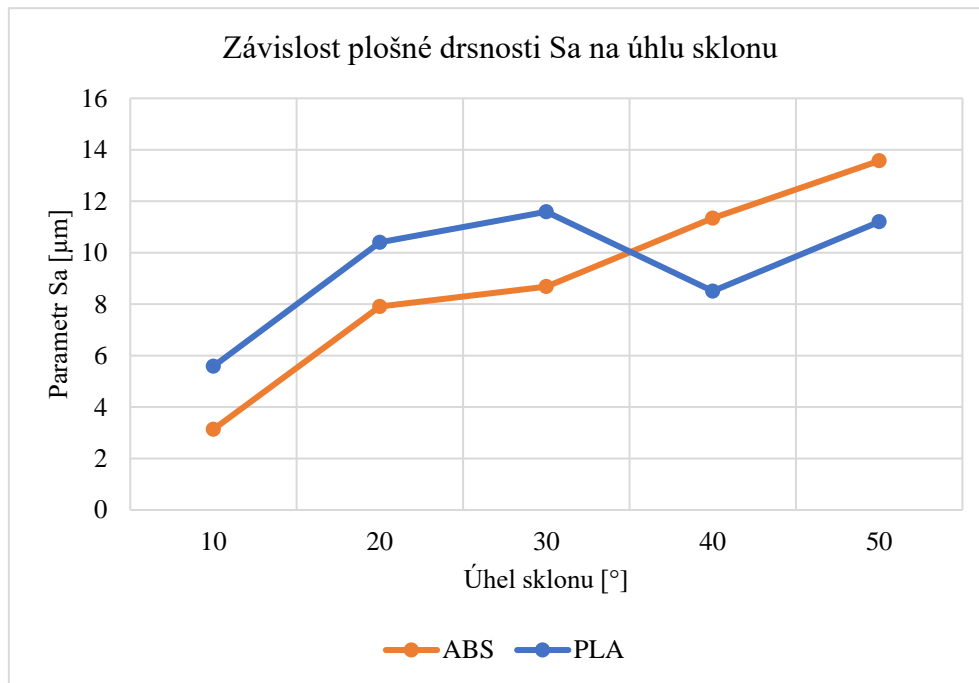
Procentuální míra snížení hodnot parametru Sa je uvedena v Tab. 19. Měřené vzorky z materiálu ABS vykazují na nejmenším úhlovém sklonu dokonce zvýšení hodnot parametru Sa v průměru téměř o 47 %. Na plochách skloněných pod vyššími úhly byl však efekt pozitivní. Celkově bylo pro materiál ABS měřeno snížení parametru Sa v průměru o 34,44 % a v podání materiálu PLA o 71,94 %. Negativní vliv, měřen na 10° sklonu u vzorku z ABS, nebyl u PLA pozorován. Na nejmenším úhlu bylo měřeno největší snížení parametru Sa, a to v průměru o 81,24 %.

Tab. 19 Procentuální porovnání snížení parametru Sa pro jednotlivé materiály.

Úhel sklonu [°]	ABS [%]	PLA [%]
10	-46,95	81,24
20	58,79	77,09
30	56,31	58,33
40	53,63	75,19
50	50,43	68,02
Průměrně	34,44	71,97

▪ Technologie omílání

Závislost parametru Sa na úhlu sklonu zobrazená na Obr. 71 porovnává omílané vzorky z materiálu ABS a PLA. Z grafu patrné, že obě závislosti zde vykazují mírný nárůst hodnoty parametru Sa se zvyšujícím se úhlem sklonu. Křivka závislosti pro materiál PLA však v intervalu 30° a 40° klesá a vymezuje se tak vůči předešlému trendu.



Obr. 71 Grafická závislost parametru Sa na úhlu sklonu pro jednotlivé materiály.

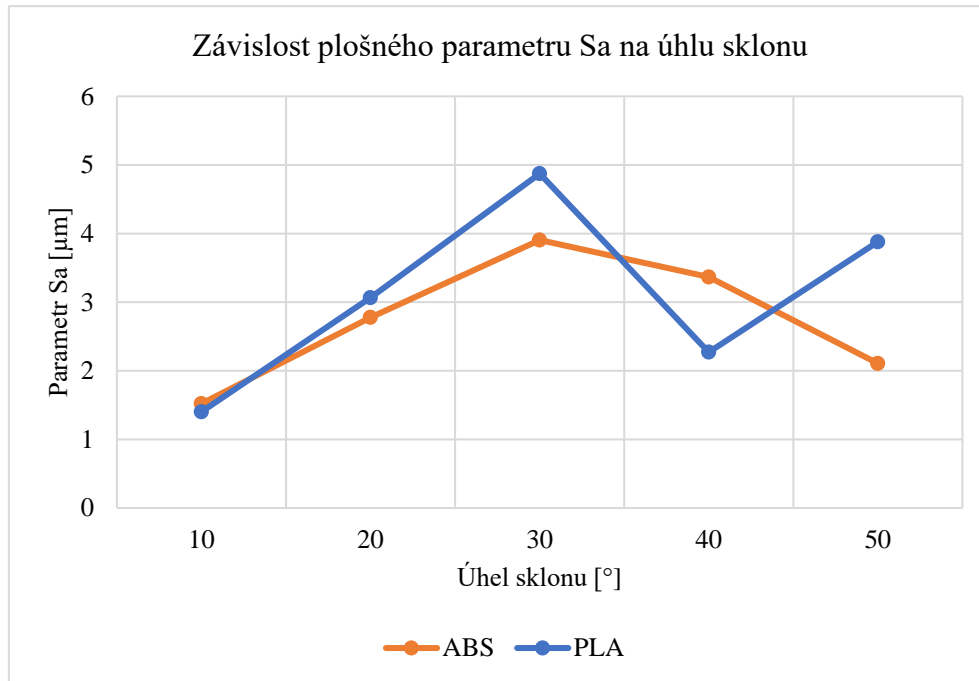
Procentuální vyjádření snížení hodnoty parametru Sa omílaných vzorků oproti vzorkům referenčním je vyjádřeno v Tab. 20. Z tabulky je patrné, že vzorky z PLA byly vyhlazeny o přibližně 4 % lépe, než vzorky z ABS. Největší rozdíl byl detekován u úhlu sklonu 20° a 50°, kde byla měřena procentuální rozdílnost snížení parametrů Sa o více než 32 %. Na úhlu sklonu 50° bylo měřeno snížení hodnoty pouze o 2,44 %. Jinými slovy, kvalita povrchu se oproti referenčnímu vzorku příliš nezvýšila.

Tab. 20 Procentuální porovnání snížení parametru Sa pro jednotlivé materiály.

Úhel sklonu [°]	ABS [%]	PLA [%]
10	39,94	37,44
20	44,66	12,90
30	36,73	28,72
40	26,55	55,50
50	2,44	35,45
Průměrně	30,07	34,00

▪ Metoda nástřiku plniče

Grafické znázornění závislosti parametru Sa na úhlu sklonu pro nástřikem upravované vzorky je prezentováno na Obr. 72. Z obr. 72 je patrné, že hodnoty naměřené u obou materiálů se do úhlu sklonu 30° zásadně neliší. Ve střední hodnotě úhlu sklonu (30°) leží maximum obou závislostí.



Obr. 72 Grafická závislost parametru Sa na úhlu sklonu pro jednotlivé materiály.

V Tab. 21 je vyjádřeno procentuální snížení hodnoty parametru Sa, které bylo na dokončovaných vzorcích naměřeno. Hodnoty procentuálního snížení jsou porovnány s referenčními vzorky. Dle průměrného snížení hodnoty Sa byly vzorky z materiálu PLA vyhlazeny do vyšší míry, a to konkrétně o 78,88 %. Největší snížení bylo měřeno při úhlu sklonu 40°. Podobných výsledků dosahovaly i vzorky z materiálu ABS, kde byla nejnižší hodnota parametru Sa měřena na úhlu sklonu 50°.

Tab. 21 Procentuální porovnání snížení parametru Sa pro jednotlivé materiály.

Úhel sklonu [°]	ABS [%]	PLA [%]
10	70,86	84,30
20	80,57	74,33
30	71,54	70,03
40	78,20	88,12
50	84,85	77,64
Průměrně	77,20	78,88

5 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Ekonomická stránka povrchových úprav je pro všechny metody odlišná a zhodnocení prokáže, zda využití speciálních materiálů dává smysl. Kapitola 5 je rozdělena do tří částí, kde první poskytuje porovnání nákladů na výrobu tištěných vzorků, druhá je zaměřena na ekonomickou náročnost procesu vyhlazování a třetí část poskytuje komplexní porovnání.

5.1 Ekonomická náročnost výroby vzorků

Vybrané materiály jsou, co se nákupní ceny týče, rozdílné. Ekonomické porovnání dává možnost zhodnotit, zda je využití speciálních materiálů, které jsou více než 2krát dražší, vhodnou volbou. Tab. 22 obsahuje výčet hodnot, které byly použity jako vstupní data pro výpočet nákladové ceny tisku. Kalkulace byla provedena pomocí softwaru Ultimaker Cura, ve kterém byl tisk připraven. Do výpočtu není zahrnuta pořizovací cena tiskárny, servisní náklady ani cena spotřebované elektrické energie, protože rozdíly hodnot pro jednotlivé materiály jsou zanedbatelné.

Tab. 22 Porovnání nákladů na tisk jednoho vzorku.

Materiál	ABS	PLA	PolySmooth	PolyCast
Cena filamentu [Kč · kg ⁻¹]	725	659	1 463	1 831
Hustota filamentu [g · cm ⁻³]	1,04	1,24	1,08	1,10
Spotřeba materiálu [g]	4,60	5,48	4,77	4,86
Cena tisku [Kč]	3,33	3,61	6,98	8,90

Z Tab. 22 je patrné, že výtisk z materiálu na bázi vosku (PolyCast) je nejnákladnější, a to více než 2,5krát než nejméně nákladný vzorek z ABS. Oproti konvenčním materiálům je i materiál PolySmooth výrazně dražší. Přestože je materiál PLA v přepočtu na jeden kilogram levnější než ABS, jeho vyšší spotřeba na tisk jednoho vzorku je důvodem vyšších nákladů.

5.2 Ekonomická náročnost procesu vyhlazování

Pro objektivní zhodnocení ekonomické náročnosti procesu povrchových úprav tištěných vzorků byly sledovány náklady, rozdělené do tří skupin:

- počáteční investice,
- procesní náklady,
- náklady na obsluhu.

Počáteční investice zahrnuje nákup všech elementů, které jsou pro daný proces vyhlazování nutné. Procesní náklady obsahují výdaje na spotřebovanou elektrickou energii a na procesní náklady spojené s obnovou funkčnosti po završení operační životnosti. Cena elektrické energie byla stanovena na 6 Kč/kWh dle aktuální smlouvy s dodavatelem. Náklady spojené se zajištěním chodu obsluhou jsou započteny do nákladů na obsluhu, kde pro výpočet výše odměny byl použit průměrný plat, platný ke čtvrtému čtvrtletí roku 2021, který činil přibližně 250 Kč/h.

V Tab. 23 jsou uvedeny všechny proměnné, které do výpočtu celkových nákladů zasahují. Proměnné jsou stručně charakterizovány pro upřesnění a je uvedena použitá jednotka.

Tab. 23 Popis proměnných vstupujících do výpočtu procesních nákladů.

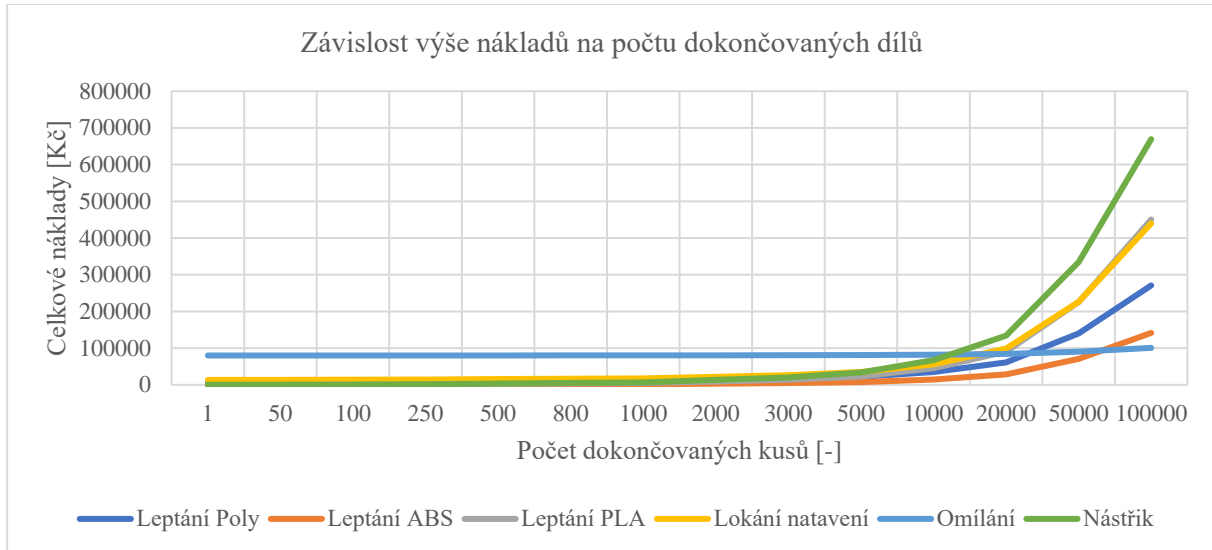
Název	Stručný popis	Jednotka
Počáteční investice	Náklady spojené s nákupem nutných komponent	[Kč]
Operační životnost	Časový horizont, ve kterém je zařízení schopné pracovat bez dalších nutných nákladů	[h]
Náklady na opětovné použití	Aplikační náklady vynaložené po dosažení operační životnosti	[Kč]
Spotřeba elektrické energie	Spotřeba elektrické energie	[kWh]
Časová náročnost procesu	Čas trvání povrchové úpravy	[min]
Časová náročnost pracovníka	Čas, po který pracovník aktivně vykonává povrchovou úpravu	[min]
Energetická náročnost operace	Součin spotřeby elektrické energie a času trvání povrchové úpravy	[kW]
Počet operací na operační životnost	Podíl operační životnosti a časové náročnosti procesu	[-]
Náklady na operaci	Aplikační náklady spojené s operační životností na jednu operaci	[Kč]
Náklady na energii / operaci	Náklady na elektřinu spojenou s povrchovou úpravou	[Kč]
Náklady na pracovníka	Náklady na obsluhu	[Kč]
Náklady na operaci celkem	Součet aplikačních nákladů, nákladů za elektřinu a pracovníka	[Kč]
Maximální počet upravovaných dílů najednou	Maximální počet dílů, který je možný upravovat v jedné operaci	[-]
Celkové procesní náklady na úpravu n kusů	Součet počáteční investice a všech nákladů na úpravu jednoho dílu	[Kč]

Pro prezentaci celkového výpočtu byla vytvořena Tab. 24, která obsahuje data pro dané operace. Kvůli různým metodám vyhlazování pomocí chemického leptání byla data rozdělena dle dokončovaných materiálů. Rozdíly v nákladech na lokální natavení, omílání a nástřik mezi materiály ABS a PLA byly zanedbatelné. Výsledkem je přehled celkových nákladů pro 1, 100, 500, 1 000, 5 000, 10 000, 20 000, 50 000 a 100 000 upravovaných kusů. Výroba jakýchkoliv součástí v množství 10 000 a více kusů pomocí 3D tisku je v porovnání s dalšími technologiemi výroby neefektivní. Vysoký objem výroby součásti je prezentován k nalezení bodu, kdy by se *post-processing* metodami, které mají vysoké počáteční náklady, ekonomicky vyplatil.

Tab. 24 Přehled nákladů na dané dokončovací operace.

	Chemické Leptání	Chemické Leptání	Chemické Leptání	Lokální natavení	Omílání	Nástřik plnicem
	PolyCast PolySmooth	ABS	PLA	ABS PLA	ABS PLA	ABS PLA
Počáteční investice [Kč]	8 960	500	500	13 500	80 000	150
Operační životnost [h]	15	12	2	800	1 500	0,08
Náklady na opětovné použití [Kč]	160	230	160	4 500	750	150
Spotřeba elektrické energie [kWh]	0,12	0	0	0,32	0,85	0
Časová náročnost procesu [min]	25	60	0,5	3	120	0,15
Časová náročnost pracovníka [min]	3	3	1	1	5	2
Energetická náročnost operace [kW]	0,05	0	0	0,016	1,7	0
Počet operací na životnost [-]	36	12	240	16000	750	32
Náklady na operaci [Kč]	0,30	1,60	0,33	0,0004	0,001	58,59
Náklady na energie za operaci [Kč]	0,3	0	0	0,096	10,2	0
Náklady na pracovníka [Kč]	12,50	12,50	4,17	4,17	20,83	8,33
Náklady na operaci celkem [Kč]	13,10	14,10	4,50	4,26	31,03	66,93
Maximální počet upravovaných dílů najednou [-]	5	10	1	1	150	10
Celkové procesní náklady na úpravu 1ks [Kč]	2,619	1,410	4,500	4,263	0,207	6,693
Celkové náklady na 1 ks [Kč]	8 963	501	505	13 504	80 000	157
Celkové náklady na 100 ks [Kč]	9 222	641	950	13 926	80 021	819
Celkové náklady na 500 ks [Kč]	10 270	1 205	2 750	15 632	80 103	3 496
Celkové náklady na 1 000 ks [Kč]	11 579	1 910	5 000	17 763	80 207	6 843
Celkové náklady na 5 000 ks [Kč]	22 056	7 549	23 000	34 815	81 034	33 614
Celkové náklady na 10 000 [Kč]	35 153	14 597	45 500	56 130	82 069	67 077
Celkové náklady na 20 000 [Kč]	61 345	28 694	90 500	98 760	84 138	134 004
Celkové náklady na 50 000 [Kč]	139 923	70 986	225 500	226 651	90 345	334 785
Celkové náklady na 100 000 [Kč]	270 886	141 472	450 500	439 802	100 689	669 421

Pro přehlednost a vyšší míru porozumění dat, kdy se jaká metoda po ekonomické stránce vyplatí, byl vytvořen graf na Obr. 73. Z grafu je patrné, že při upravování vytištěných dílců o počtu více než 100 000 ks se jako nejnákladovější metoda jeví metoda nástřiku. O pomyslné 4. místo se dělí metoda lokálního natavení a chemického leptání PLA, které mají křivku závislosti celkových nákladů na počtu dokončovaných kusů téměř identickou. Metoda, využívající chemického naleptání ABS vzorků acetonem, se jeví jako nákladově nejvýhodnější řešení až do přibližně 65 000 ks, kdy nejvýhodnější metoda po ekonomické stránce je metoda omílání. Jak je možné pozorovat, metoda omílání vykazuje malé provozní náklady a v průběhu závislosti se jeví téměř konstantně. Malé provozní náklady jsou však kompenzovány vysokou pořizovací cenou stroje.



Obr. 73 Graf závislosti výše nákladů na počtu dokončovaných dílů.

5.3 Porovnání celkových nákladů výroby vzorků chemickým leptáním

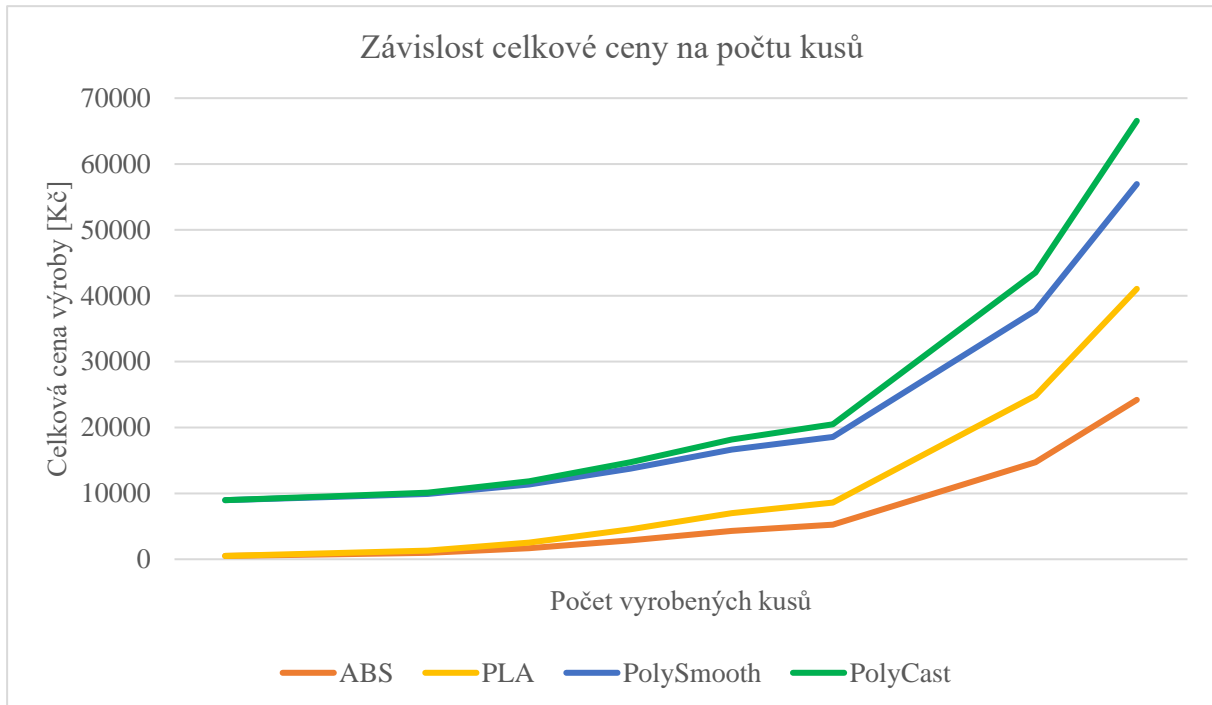
Pro zachování přehlednosti práce je prezentováno pouze komplexní porovnání nákladů na výrobu vzorků s povrchovou úpravou chemického leptání. Ekonomické zhodnocení výroby vzorků s následnou úpravou povrchu lokálním natavením, omíláním a nástřikem byla zpracována v příloze 8 až příloze 10.

Tab. 25 prezentuje celkové náklady na výrobu a *post-processing* vzorků chemickým leptáním všech testovaných materiálů. Hodnoty se skládají ze součtu nákladů na výrobu 3D tiskem a nákladů vzniklých povrchovou úpravou včetně nutných počátečních investic. Z hodnot je patrné, že nejnižších nákladů na celý proces výroby bylo docíleno s využitím materiálu ABS.

Tab. 25 Celkové náklady na výrobu a povrchovou úpravu chemickým leptáním.

	ABS	PLA	PolySmooth	PolyCast
Celkové náklady na výrobu 1 ks [Kč]	505	508	8 970	8 972
Celkové náklady na výrobu 50 ks [Kč]	737	906	9 440	9 536
Celkové náklady na výrobu 100 ks [Kč]	974	1 311	9 920	10 112
Celkové náklady na výrobu 250 ks [Kč]	1 685	2 528	11 360	11 840
Celkové náklady na výrobu 500 ks [Kč]	2 870	4 555	13 760	14 720
Celkové náklady na výrobu 800 ks [Kč]	4 292	6 988	16 639	18 175
Celkové náklady na výrobu 1 000 ks [Kč]	5 240	8 610	18 559	20 479
Celkové náklady na výrobu 2 000 ks [Kč]	9 979	16 720	28 159	31 999
Celkové náklady na výrobu 3 000 ks [Kč]	14 719	24 830	37 758	43 518
Celkové náklady na výrobu 5 000 ks [Kč]	24 199	41 050	56 956	66 556

Kombinace nízké ceny filamentu a ekonomicky nejméně nákladné metody povrchové úpravy dělá z využití ABS filamentu ekonomicky nejlepší volbu. Naopak nejnákladnější volbou je využití materiálu PolyCast, kde je výroba 3D tiskem i povrchová úprava ekonomicky nejméně výhodná. Rozdíl mezi speciálními a konvenčními materiály je patrný v celém rozsahu kusové výroby. Pro přehlednost výsledků byl z dat vytvořen graf na Obr. 74.



Obr. 74 Graf závislosti celkové ceny výroby a povrchové úpravy na počtu dokončovaných dílů.

6 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Z kapitoly 4 a 5 plyne množství závěrů a zhodnocení. Jednotlivé metody povrchových úprav byly mezi sebou porovnávány a zhodnoceny po technické stránce. Sledována byla zejména kvalita povrchu, měřené parametry Sa, St, Ra a Rt v obou směrech. Rozebrány byly i ekonomické aspekty výroby vzorků a aplikace povrchových úprav. Pro jednotné porovnání všech aplikovaných metod povrchových úprav byl vytvořen bodový systém, který jednotlivé metody komplexně hodnotí. Škálu hodnocení tvoří body 1 až 4, kde 1 je nejnižší a 4 nejvyšší bodové ohodnocení. Součet všech bodů pro jednotlivé metody napříč komplexním porovnáním vyhodnocuje všestranně nejlepší metodu povrchové úpravy (Tab. 26).

Tab. 26 Komplexní bodové porovnání metod povrchových úprav.

	Chemické leptání	Lokální natavení	Omílání	Nástřík
Náročnost operace	3	1	4	2
Spektrum použitelných materiálů	2	1	3	4
Časová náročnost procesu	2	3	1	4
Kvalita povrchu (Z - V)	4	3	1	2
Kvalita povrchu (S - J)	4	1	2	3
Počáteční náklady	3	2	1	4
Provozní náklady	3	2	4	1
Celkem	21	13	16	20

Z Tab. 26 je patrné, že nejlepší zkoumanou metodou povrchové úpravy 3D tištěných vzorků je metoda založená na chemickém leptání. Metoda vykazovala nejlepší kvalitu textury povrchu, kde měřené parametry Sa, Ra i Rt byly v porovnání s dalšími výrazně nižší. Ekonomický rozbor nákladnosti povrchové úpravy, založené na naleptání povrchu rozpouštědlem, prokázal, že metoda se řadí mezi méně nákladné pro všechny zkoumané materiály v porovnání s dalšími testovanými technologiemi.

Druhá nejlepší metoda *post-processingu* je metoda nástřiku. Kvalita povrchové vrstvy, spektrum použitelných materiálů i rychlost provedení povrchové úpravy. Uvedené aspekty dělají metodu nástřiku plnicem velmi efektivní. Negativum je výše nákladů na dlouhodobé využívání, kdy náklady v podobě plniče rychle rostou.

Metoda omílání je dobrou volbou pro dokončování velkých sérií dílů, kdy většinu nákladů tvoří pořizovací cena stroje. Pro vyhlazení povrchové vrstvy je zásadní volba brusného kamene, kde hraje roli tvar, velikost i brusný výkon. Pro účely rozšíření výzkumu by bylo vhodné testovat více druhů a velikostí brusných elementů, kdy by bylo možné dosáhnout nižších hodnot parametrů povrchu.

Nejméně bodů získala metoda lokálního natavení, která dosahovala nízkých hodnot parametrů textur ve směru natavování. Využití metody by mohlo být v oblastech, kde je na díl kladen požadavek nízké hodnoty Ra v daném směru a zároveň vysoká míra ulpívání maziva ve směru kolmém. Mezi negativa metody patří nutnost tvorby 2D grafiky sloužící k naprogramování laserového stroje a vysoké počáteční náklady s ní spojené.

Nejvýhodnější testovanou metodou povrchových úprav je dle bodovacího systému metoda chemického leptání. Pro účely komplexního porovnání byly pro nejefektivnější metodu porovnány celkem 4 sady vzorků z různých materiálů. Tab. 27 porovnává testované materiály obdobným bodovým systémem, který byl použit pro hodnocení metod *post-processingu*.

Tab. 27 Komplexní bodové porovnání využitých materiálů pro chemické leptání.

	ABS	PLA	PolySmooth	PolyCast
Mechanické vlastnosti	3	4	2	1
Provozní teplota	4	3	2	1
Náročnosti tisku	1	4	3	2
Náklady na tisk	4	3	2	1
Kvalita povrchu (Z - V)	2	1	4	3
Kvalita povrchu (S - J)	2	1	4	3
Počáteční náklady na vyhlazování	3	4	1	1
Náklady na vyhlazení povrchu	4	1	2	3
Celkem	23	21	20	15

Z Tab. 27 vychází jako nejvýhodnější volba materiálu k povrchové úpravě chemickým leptáním materiál ABS. Přestože kvalitu textury nevykazovaly vzorky z polymeru ABS nejlepší, možnosti využití, náklady na samotný tisk či celý proces vyhlazování byly v porovnání s dalšími celkově nejmenší.

Povrch vzorku z materiálu PLA leptatelný dichlormethanem nebyl vyhlazen do takové míry jako ostatní testované, avšak rychlost procesu leptání byla nejvyšší. Výhodami konvenčně využívaného materiálu jsou mechanické vlastnosti výtisků, náklady na tisk i počáteční náklady na proces vyhlazování. Mezi negativa metody patří výše procesních nákladů na povrchovou úpravu a nižší míra snížení drsnosti v porovnání s dalšími testovanými materiály.

Vzorky ze speciálního materiálu Polysmooth vykazovaly nejnižší parametry textury povrchu a byly tak nejlépe vyhlazovány. Při správném nastavení tisku je díky vysokému slítí vrstev po povrchové úpravě výtisk vodotěsný, což otevírá další možnosti využití. Negativum materiálu je ve vyšší pořizovací ceně filamentu i dokončovací stanice Polysher, která byla k vyhlazování použita.

Bodově nejhorší volbou materiálu je PolyCast, který je nejdražším z testovaných. Kvalita povrchu vzorků byla však srovnatelná s materiálem PolySmooth, který vykazoval nejnižší hodnoty parametrů textury. Materiál je primárně určen pro segment slévárenství, takže mechanickými vlastnostmi ani provozní teplotou materiál nevyniká. Výtisky z filamentu na bázi vosku však rozšiřují možnosti odlévání metodou vytavitelného modelu.

7 ZÁVĚR

V předložené diplomové práci jsou porovnávány čtyři typy povrchových úprav (chemické leptání, lokální natavení, omílání a nástřik plniče) aplikované na vzorky vyrobené metodou FFF 3D tisku. Vzorky byly tištěny z materiálu ABS, PLA, PolySmooth a PolyCast. Měřena byla textura povrchu jednotlivých ploch se závislostí na úhlu sklonu. Pro komplexní porovnání byla provedena kalkulace nákladů pro všechny metody povrchových úprav a také pro každý z vybraných materiálů společně s ekonomickou analýzou finanční náročnosti samotné výroby vzorků. Všechny aspekty byly náležitě porovnány a vyhodnoceny s doporučením využití konkrétního řešení v praxi.

Teoretická část práce byla věnována rešerši dostupných metod 3D tisku, konvenčně používaným i speciálním materiálům a vhodným metodám povrchových úprav. Na základě studia vědeckých publikací byly pro účely práce vybrány konkrétní kombinace materiálů a dokončovacích úprav s cílem dosažení minimálních hodnot parametrů textury. V rámci teorie byla nastudována problematika hodnocení 2D a 3D parametrů povrchu.

V první části kapitoly materiály a metody byly stanoveny parametry tisku a návrh dokončovaných vzorků. Další část byla zaměřena na stanovení parametrů povrchových úprav a samotná úprava testovacích výtisků. Závěrem praktické části bylo měření parametrů povrchu a vyhodnocení výsledků společně s ekonomickou analýzou.

V diskuzní části práce byly zhodnoceny naměřené výsledky a metody povrchových úprav byly porovnány. Pro jednotlivé dokončovací operace bylo doporučeno praktické využití. Porovnány byly i materiály testované pro metodu chemického leptání a bylo provedeno zhodnocení použitelnosti a využitelnosti.

V diplomové práci byly splněny následující cíle:

- byla provedena důkladná rešerše tiskových strun a možností povrchových úprav,
- byl proveden rozbor parametrů struktury povrchu,
- byl proveden návrh a výroba testovacích vzorků,
- na základě stanovení parametrů povrchových úprav byly vzorky vyhlazeny,
- struktura povrchu byla řádně naměřena a výsledky zpracovány a vyhodnoceny,
- byla provedena technickoekonomická analýza a vyvozeny závěry použití v praxi.

Dle výčtu splněných cílů lze konstatovat, že všechny hlavní i dílčí cíle stanovené zadáním byly splněny.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KRATOCHVÍLOVÁ, Jitka. *3D tisk*. Vydání první. Přeložil Petra MILLAROVÁ. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, 2015. ISBN isbn978-80-7414-936-8.
- [2] PolyCast™. In: *Polymaker: PolyCast™* [online]. Spojené státy americké: Polymaker, 2022 [cit. 2022-02-25]. Dostupné z: <https://eu.polymaker.com/product/polycast/>
- [3] KLOSKI, Liza a Nick KLOSKI. *Začínáme s 3D tiskem*. 1. vydání. Přeložil Jakub GONER. Brno: Computer Press, 2017. ISBN isbn978-80-251-4876-1.
- [4] PÍŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN isbn978-80-214-4025-8.
- [5] SHAH, J., B. SNIDER, T. CLARKE, S. KOZUTSKY, Maciej LACKI a Ali HOSSEINI. Large-scale 3D printers for additive manufacturing: design considerations and challenges: design considerations and challenges. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019, 104, 1-15. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-019-04074-6
- [6] ZUZA, Mikolas. Vše o tryskách s různým průměrem. *PrusaPrinters Blog* [online]. 2018, 17 [cit. 2022-02-26]. Dostupné z: https://blog.prusaprinters.org/cs/vse-o-tryskach-s-ruznym-prumerem_8344/
- [7] AYRILMIS, Nadir. Effect of layer thickness on surface properties of 3D printed materials produced from wood flour/PLA filament. *Polymer Testing*. 2018, 71, 163-166. ISSN 0142-9418. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.09.009>
- [8] Modelování pro 3D tisk. In: *PrusaPrinters* [online]. Praha: Prusa Research, 2016 [cit. 2022-02-25]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/modelovani-pro-3d-tisk_164135
- [9] Přehled technologií 3D tisku. In: *Dk metal prominent* [online]. Libhošť: dk metal prominent, 2018 [cit. 2020-03-06]. Dostupné z: <http://www.dkmp.cz/onas/detail/Prehled-technologie-3D-tisku>
- [10] 3D tisk: jak funguje FDM/FFF tiskárna?. *Svět hardware* [online]. 2019, 2019, 1 [cit. 2020-03-07]. Dostupné z: <https://www.svethardware.cz/3d-tisk-jak-funguje-fdm-fff-tiskarna/48457-2>
- [11] JONES, Rhys, Patrick HAUFE, Edward SELLS, Pejman IRAVANI, Vik OLLIVER, Chris PALMER a Adrian BOWYER. RepRap – the replicating rapid prototyper. *Robotica* [online]. 2011, 29(01), 177-191 [cit. 2019-02-17]. ISSN 0263-5747. Dostupné z: doi:10.1017/S026357471000069X
- [12] BREJČÁK, Peter. Více než 100 tisíc tiskáren a tržby přes 2 miliardy. 3D tiskaři z Prusa Research zažili úspěšný rok a nehodlají zpomalovat. *CzechCrunch* [online]. 2021, 3 [cit. 2022-03-02]. Dostupné z: <https://cc.cz/vice-nez-100-tisic-tiskaren-a-trzby-pres-2-miliardy-3d-tiskari-z-prusa-research-zazili-uspesny-rok-a-nehodlaji-zpomalovat/>
- [13] PRŮŠA, Josef. *Příručka pro 3D tiskaře* [online]. In: . s. 76 [cit. 2022-03-04]. Dostupné z: https://www.prusa3d.com/downloads/manual/prusa3d_manual_mk3_cz.pdf
- [14] TAMBOR, Vojtěch. TriLab DQ2. In: *Trilab3d.com* [online]. Hradec Králové: TriLab, 2019 [cit. 2022-03-07]. Dostupné z: <https://trilab3d.com/deltiq-2/>
- [15] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. Brno: CERM, 2001. ISBN isbn80-7204-193-2.
- [16] Jaký materiál vybrat pro stolní 3D tisk?: Průvodce základními polymery napoví. *Blog 3D tisk???* [online]. 2016, 2016, 1 [cit. 2020-03-07]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/jaky-material-vybrat-pro-stolni-3d-tisk/>

- [17] Materiálový slovník: Nylon. In: *Https://www.materialpro3d.cz* [online]. Brno: materialpro3d, 2019 [cit. 2020-03-18]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/nylon/>
- [18] PRŮŠA, Josef. Příručka 3D tiskaře: Příručky k tiskárně. In: *PrusaPrinters* [online]. Praha: Prusa Research a.s., 2018 [cit. 2022-03-04]. Dostupné z: https://www.prusa3d.com/downloads/manual/prusa3d_manual_mk3_cz.pdf
- [19] About ABS. In: *Beamer* [online]. Německo: Beamlar, 2021 [cit. 2022-03-04]. Dostupné z: <https://www.beamlar.com/3d-printing-capabilities/materials/abs/>
- [20] ABS 3D Printer Filament: What is ABS?. In: *Filamentive* [online]. Anglie: Filamentive, 2015 [cit. 2022-03-04]. Dostupné z: <https://www.filamentive.com/product-category/rabs-recycled-abs-3d-printer-filament/>
- [21] PETG Material. In: *Tractus 3D* [online]. Bernseweg: Tractus 3D, 2019 [cit. 2020-03-09]. Dostupné z: <https://tractus3d.com/materials/petg/>
- [22] PET-G. In: *Filament-PM* [online]. Haňovice: Plasty Mladeč, 2017 [cit. 2020-03-09]. Dostupné z: <https://www.filament-pm.cz/petg>
- [23] Materiálový slovník. In: *Materialpro3d* [online]. Brno: materialpro3d, 2017 [cit. 2020-03-09]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/pet-g/>
- [24] Průvodce materiály. In: *Prusa3d.cz* [online]. Praha: PrusaResearch a.s., 2019 [cit. 2019-02-17]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/materialy/>
- [25] Filament Properties Table. In: *Simplify3D* [online]. Ohio: Simplify3D, 2022 [cit. 2022-03-08]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/properties-table/>
- [26] Prusa Tabulka Materiálů. In: *PrusaPrinters* [online]. Praha: Prusa Research a.s., 2022 [cit. 2022-03-08]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/materials#_ga=2.10865524.1744310426.1616522816-896702491.1583656356
- [27] VALERGA, Ana P., Moises BATISTA, Severo R. FERNANDEZ-VIDAL a Antonio J. GAMEZ. *Impact of Chemical Post-Processing in Fused Deposition Modelling (FDM) on Polylactic Acid (PLA) Surface Quality and Structure* [online]. University of Cadiz, Španělsko, 2019, [cit. 2022-05-16]. ISSN 2073-4360. Dostupné z: doi:10.3390/polym11030566. Článek. University of Cadiz, Španělsko.
- [28] KOČÍ, Jakub. Jak zesílit svůj výtisk žiháním. *PrusaPrinters Blog* [online]. Praha, 2019, 2019, 15 [cit. 2022-04-13]. Dostupné z: https://blog.prusa3d.com/cs/jak-zesilit-svuj-vytisk-zihanim_31088/
- [29] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. První. Pardubice: Publi.cz, 2015 [cit. 2020-06-11]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>
- [30] GREGURIĆ, Leo. FDM/PLA 3D Print Post-Processing. In: *All3dp* [online]. Mnichov: All3DP, 2022 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/fdm-3d-printing-post-processing-an-overview-for-beginners/>
- [31] LALEHPOUR, Amirali, Conner JANETEAS a Ahmad BARARI. Surface roughness of FDM parts after post-processing with acetone vapor bath smoothing process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018, 95(1), 1505-1520. ISSN 1433-3015. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-017-1165-5
- [32] Polysher. In: *Https://polymaker.com/* [online]. Shanghai: Polymaker, 2020 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://eu.polymaker.com/product/polysher/>
- [33] BRAUN, Karsten, Edgar WILLENBORG a Johannes Henrich SCHLEIFENBAUM. Laser polishing as a new post process for 3D-printed polymer parts. *Procedia CIRP*. 2020,

94, 134-138. ISSN 2212-8271. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.09.026](https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.09.026)

- [34] ZHOU, Li, Youen JIANG, Peng ZHANG, Hui WEI, Wei FAN, Xuechun LI a Jianqiang ZHU. *Numerical and Experimental Investigation of Morphological Modification on Fused Silica Using CO2 Laser Ablation*. 2019, . ISSN 1996-1944. Dostupné z: [doi:10.3390/ma12244109](https://doi.org/10.3390/ma12244109)
- [35] TEMMLER, A., E. WILLENBORG a K. WISSENBAACH. Laser polishing. In: *Proc.SPIE*. 2012, . Dostupné z: [doi:10.1117/12.906001](https://doi.org/10.1117/12.906001)
- [36] Omílání. In: *Roc Galvanik* [online]. Domažlice: Roc Galvanik, 2004 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.roc-galvanik.cz/mechanicke-opracovani-povrchu/omilani/>
- [37] Prostředky pro omílání. In: *Flidr metal* [online]. Polička: Flidr, 2017 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: JAK VYBRAT BROUSÍCÍ A LEŠTÍCÍ KAMENY PRO OMÍLÁNÍ
- [38] Omílací technika Rosler. In: *Rosler* [online]. Untermerzbach: Rosler, 2017 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://cz.rosler.com/cz-cs/produkty/omilaci-stroje/>
- [39] LICHOVNIK, Jiri, Ondrej MIZERA, Marek SADILEK, Lenka CEPOVA, Jan ZELINKA a Robert CEP. Influence of Tumbling Bodies on Surface Roughness and Geometric Deviations by Additive SLS technology. *Manufacturing Technology Journal*. 2020, 20(3), 342-346. ISSN 12132489. Dostupné z: [doi:10.21062/mft.2020.050](https://doi.org/10.21062/mft.2020.050)
- [40] SCHWARTZ, David. Postprocessing 3D výtisků krok za krokem. In: *PrusaPrinters Blog* [online]. Praha: Prusa Research a.s., 2018 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: https://blog.prusa3d.com/cs/postprocessing-3d-vytisku-krok-za-krokem_29270/
- [41] XTC-3D: High Performance 3D Print Coating. In: *Smooth-on* [online]. Spojené státy americké: Smooth-on, 2020 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.smooth-on.com/product-line/xtc-3d/>
- [42] TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2004. ISBN 80-248-0671-1.
- [43] TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2006. ISBN 80-248-1209-6.
- [44] ČSN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobu (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha: Český normalizační institut, 1999, 24 s.
- [45] ČSN EN ISO 25178-2. : *Geometrické specifikace produktu (GPS) – Textura povrchu: Plocha – Část 2: Termíny, definice a parametry textury povrchu*. 2. Praha: Český normalizační institut, 2012, 52 s.
- [46] Parametry drsnosti. In: *Jenoptik* [online]. Teplice: Jenoptik, 2017 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.jenoptik.cz/cz/technicke-informace/drsnost-povrchu-dle-din-en-iso/>
- [47] GROTE, Karl-Heinrich a Hamid HEFAZI. *Springer Handbook of Mechanical Engineering*. Cham: Springer International Publishing AG, 2021. ISBN 3030470342.
- [48] Surface Roughness Parameters. In: *Keyence* [online]. 2009 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.keyence.com/ss/products/microscope/roughness/line/parameters.jsp>
- [49] JANKOVÝCH, Róbert a Bohumil BUMBÁLEK. Výškové parametry textury povrchu. *MM Průmyslové spektrum*. Praha, 2014, 2014, (11), 106-107. ISSN 1212-2572.
- [50] Standardní prostorové hodnocení textury povrchu. In: *MMSpektrum* [online]. MMSpektrum, 2012 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/standardni-prostorove-hodnoceni-textury-povrchu>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbole

Označení	Legenda	Jednotka
A	hodnocená plocha	[mm ²]
Ra	průměrná aritmetická úchylna profilu drsnosti	[μm]
Rt	celková výška profilu drsnosti	[μm]
Rq	průměrná kvadratická úchylna profilu drsnosti	[μm]
Rp	nejvyšší výška výstupku	[μm]
Rv	nejvyšší hloubka prohlubně profilu drsnosti	[μm]
Sa	aritmetický průměr výšky omezení stupnice povrchu	[μm]
Sq	základ průměrné výšky čtvercem omezené stupnice povrchu	[μm]
Sp	absolutní hodnota nejvyšší výšky vrcholu	[μm]
Sv	absolutní hodnota nejnižší hloubky prohlubně	[μm]
Sz	maximální výška posuzované plochy	[μm]
Z(x)	výška posuzovaného prvku v bodě x	[μm]
Z(x,y)	výšková souřadnice hodnoceného prvku	[μm]

Zkratky

Označení	Legenda
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
3D	Trojdimenzionální
CAD	Computer Aided Design
AM	Additive Manufacturing
RepRap	Replicating Rapid Prototyper
SLA	Stereolitografie
DLP	Digital Light Processing
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
SLS	Selective Laser Sintering
LOM	Laminated Object Manufacturing
ABS	Acrylonitrile-Butadiene-Styrene
PET – G	Polyethylentereftalát glykol
PLA	Polylactic Acid
ASA	Akrylonitril Styren Akryl
PVB	Polyvinyl butyral
IPA	Isopropylalkohol

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Fillamentum ABS technicky list
- Příloha 2 Filament PM PLA technicky list
- Příloha 3 PolyMaker PolySmooth technicky list
- Příloha 4 PolyMaker PolyCast technicky list
- Příloha 5 Výsledky PLA
- Příloha 6 Výsledky PolySmooth
- Příloha 7 Výsledky PolyCast
- Příloha 8 Ekonomické hodnocení - lokální natavení
- Příloha 9 Ekonomické hodnocení - omílání
- Příloha 10 Ekonomické hodnocení – nástřik plniče

Datasheet



ABS Extrafill

Description:

Fillamentum ABS Extrafill is a material for the FFF (also known as FDM) 3D printing technology.

ABS filament is suitable for the production of the first samples before serial production for functional prototyping, manufacturing tools, but also for the production of goods for everyday use.

This material can be used for production of electrical and electronic equipment. It doesn't contain the restricted substances. The use of the material in the food or medical industry is not recommended.

Fillamentum guarantees high precision of filament dimensions within the tolerance of +/- 0,05 mm, which is strictly controlled throughout the production.

Printing filaments marked under the trademark Fillamentum are produced in a wide variety of colours in accordance with the colour charts RAL and Pantone, and also in own unique colour ranges.



Physical properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Material density	1,04 g/cm ³	ISO 1183	23 °C
Melt volume index	29 cm ³ /10 min	ISO 1133	220 °C, 10 kg
Diameter tolerance	+ 0,05 mm		
Weight	750 g of filament (+ 250 g spool)		

Mechanical properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Tensile strength	39 MPa	ISO 527	at yield, 50 mm/min
	32 MPa	ISO 527	at break, 50 mm/min
Elongation at break	20 %	ISO 527	50 mm/min
Flexural strength	60 MPa	ISO 178	2 mm/min
Flexural modulus	1900 MPa	ISO 178	2 mm/min
Izod impact strength	24 kJ/m ²	ISO 180-1A	23 °C, notched
	10 kJ/m ²	ISO 180-1A	-30 °C, notched
Charpy impact strength	25 kJ/m ²	ISO 179	23 °C, notched
	11 kJ/m ²	ISO 179	-30 °C, notched

Thermal properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Heat deflection temperature	81 °C	ISO 75-A	1,8 MPa
Vicat softening temperature	103 °C	ISO 306	50 °C/h, 1 kg
	96 °C	ISO 306	50 °C/h, 5 kg
Coefficient of linear thermal expansion	9,0 × 10 ⁻⁵	ISO 11359	

Printing properties	Recommended	Notes
Print temperature	220-240 °C	Recommended settings! It may differ according to the printer and the object.
Hot pad	80-105 °C	Try your own settings before printing.
Adhesive	3Dlac, glue stick	

Workability of 3D printing filament is at least 12 months from delivery. The information was processed with the best knowledge of the manufacturer and it is for information only.

Fillamentum Manufacturing Czech s.r.o.
nam. Miru 1217, 768 24 Hulín
Czech Republic

(+420) 720 060 947
helpdesk@fillamentum.com
www.fillamentum.com

Příloha 2 (Filament PM PLA technický list)



TECHNICAL DATA SHEET FOR PRODUCT: PLA FILAMENT

Use	is a material for the FDM (FFF) 3D printing additive technology		
Material	polylactid acid by NatureWork, biodegradabilic material, non petroleum product		
Diameters	1,75 or 2,90 mm		
Tolerance	± 0,05 mm		
Weight	0,5 kg netto ± 5% / 0,7 kg brutto ± 5%		
	1,0 kg netto ± 5% / 1,3 kg brutto ± 5%		
	2,0 kg netto ± 5% / 2,4 kg brutto ± 5%		
Packing	spool in Vacuum ZIP bag, inserting to paper box, all in LDPE foil		
Colours	views on web https://www.filament-pm.com/pla		
Solvents	1,2 Dichloroethane, Toluene, Tetrahydrofuran,		
Printing Properties:			
Temperature HE	200 – 230 °C		
Temperature HB	20-60 °C		
Surface bed	kapton, ultem, PET foil, commons for FDM printing		
Cooling print object	YES		
Nozzle	All diameters / for glitter using nozzle min 0,5 mm and more		
Printer space	Open / Close		
Material Properties:			
Thermal	vicat softening temperature	ISO 306	55 °C
	heat deflection temperature	ISO 75	55 °C
Mechanical	impact strength	ISO 179	16 kJ/m²
	flexural modulus	ISO 178	3500 MPa
Physical	Density	ISO 1183/B	1,24 g/cm³
	Melt Flow Index	ISO 1133	6 g/10 min

Filament-PM by Plasty Mladec, Hanovice 18, 78321, VAT: CZ00147346
Tel. +420 585 100 308, email: info@plastymladec.cz <http://www.filament-pm.com>

Příloha 3 (PolyMaker PolySmooth technicky list)



Nov. 2018

Technical Data Sheet

Version 4.0

PolySmooth™

PolySmooth™ is a unique, easy-to-print filament designed for hands-free post processing. The surface can be smoothed with alcohol to achieve layer free models using the Polysher™.

Physical Properties

Property	Testing method	Typical value
Density	ASTM D792 (ISO 1183, GB/T 1033)	1.08 - 1.10 (g/cm ³ at 21.5 °C)
Glass transition temperature	DSC, 10 °C/min	70 (°C)
Vicat Softening temperature	ASTM D1525 (ISO 306 GB/T 1633)	Natural: 67 (°C) Colored: 70 (°C) Transparent: 70 (°C)
Melt index	210 °C, 2.16 kg	6.6 - 6.7 (g/10 min)
Decomposition temperature	TGA, 20 °C/min	260 (°C)

Tested with 3D printed specimen of 100% infill

Mechanical Properties

Property	Testing method	Typical value
Young's modulus (X-Y)	ASTM D638 (ISO 527, GB/T 1040)	Colored: 2047 ± 111 (MPa) Transparent: 2092 ± 152 (MPa)
Tensile strength (X-Y)	ASTM D638 (ISO 527, GB/T 1040)	Colored: 39.8 ± 0.7 (MPa) Transparent: 44.1 ± 0.8 (MPa)
Elongation at break (X-Y)	ASTM D638 (ISO 527, GB/T 1040)	Colored: 4.5 ± 1.4 (%) Transparent: 3.4 ± 0.4 (%)
Bending modulus	ASTMD790 (ISO 178, GB/T 9341)	Colored: 1846 ± 109 (MPa) Transparent: 2062 ± 29 (MPa)
Bending strength	ASTMD790 (ISO 178, GB/T 9341)	Colored: 64.9 ± 1.2 (MPa) Transparent: 76.2 ± 2.3 (MPa)
Charpy impact strength	ASTM D256 (ISO 179, GB/T 1043)	Colored: 9.2 ± 1.2 (kJ/m ²) Transparent: 5.2 ± 0.3 (kJ/m ²)

All testing specimens were printed under the following conditions:
nozzle temperature = 220 °C, printing speed = 45 mm/s, build plate temperature = 60 °C, infill = 100%.
All specimens were conditioned at room temperature for 24h prior to testing

Recommended printing conditions

Parameter	
Nozzle temperature	190 - 220 (°C)
Build Surface material	Glass, Blue Tape, BuildTak®
Build surface treatment	None, Applying PVA glue to the build surface
Build plate temperature	25 - 70 (°C)
Cooling fan	Turned on
Printing speed	40 - 60 (mm/s)
Raft separation distance	0.1 - 0.14 (mm)
Retraction distance	1-3 (mm)
Retraction speed	30 - 40 (mm/s)
Recommended environmental temperature	20 - 30 (°C)
Threshold overhang angle	60 (°)
Recommended support material	PolyDissolve™ S1

Based on 0.4 mm nozzle and Simplify 3D v.4.0. Printing conditions may vary with different nozzle diameters

It is highly recommended to use the PolyBox™ when printing with PolySmooth™ and to store it in the resealable bag.

www.polymaker.com

Příloha 4 (PolyMaker PolyCast technický list)



Nov. 2018

Technical Data Sheet

Version 4.0

PolyCast™

PolyCast™ is a filament designed to produce investment patterns for investment casting applications. 3D printing significantly cuts down both the cost and lead time by eliminating the tooling process.

Physical Properties

Property	Testing method	Typical value
Density	ASTM D792 (ISO 1183, GB/T 1033)	1.1 (g/cm ³ at 21.5 °C)
Glass transition temperature	DSC, 10 °C/min	70(°C)
Vicat Softening temperature	ASTM D1525 (ISO 306 GB/T 1633)	67 (°C)
Melt index	260 °C, 2.16 kg	6.6 - 6.7 (g/10 min)
Decomposition temperature	TGA, 20 °C/min	260 (°C)

Tested with 3D printed specimen of 100% infill

Mechanical Properties

Property	Testing method	Typical value
Young's modulus (X-Y)	ASTM D638 (ISO 527, GB/T 1040)	1745 ± 151 (MPa)
Tensile strength (X-Y)	ASTM D638 (ISO 527, GB/T 1040)	35.7 ± 1.7 (MPa)
Elongation at break (X-Y)	ASTM D638 (ISO 527, GB/T 1040)	5.8 ± 0.9 (%)
Bending modulus (X-Y)	ASTMD790 (ISO 178, GB/T 9341)	1198 ± 173 (MPa)
Bending strength (X-Y)	ASTMD790 (ISO 178, GB/T 9341)	60.2 ± 1.6 (MPa)
Charpy impact strength (X-Y)	ASTM D256 (ISO 179, GB/T 1043)	9.6 ± 0.9 (kJ/m ²)

All testing specimens were printed under the following conditions:
nozzle temperature = 220°C, printing speed = 45mm/s, build plate temperature = 60°C, infill = 100%
All specimens were conditioned at room temperature for 24h prior to testing

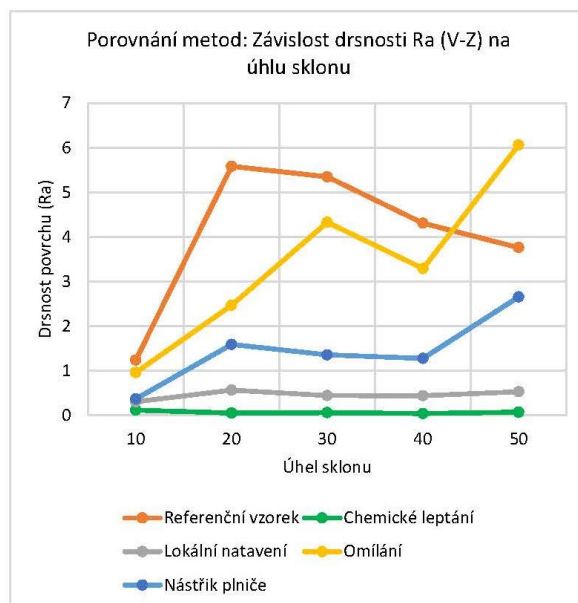
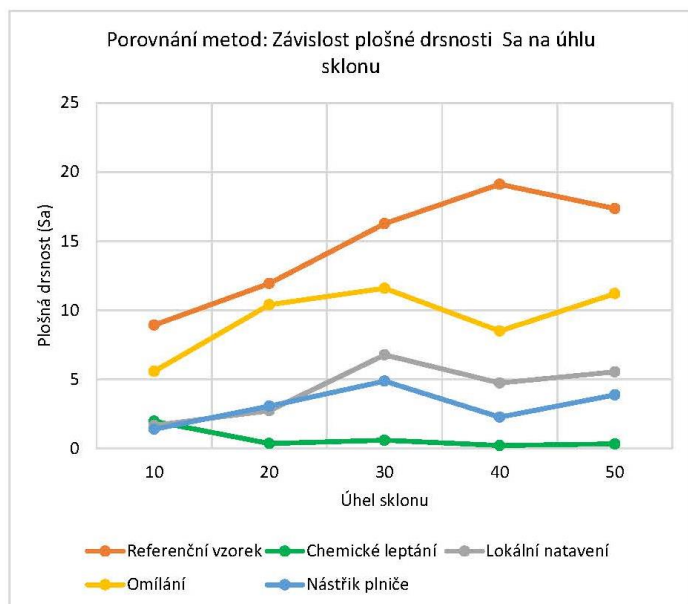
Recommended printing conditions

Parameter	
Nozzle temperature	190 - 220 (°C)
Recommended build surface	Glass with glue
Build plate temperature	25-70 (°C)
Cooling fan	Turned ON
Printing speed	40 - 60 (mm/s)
Raft separation distance	0.10 - 0.14 (mm)
Retraction distance	1 - 3 (mm)
Retraction speed	30 - 40 (mm/s)
Recommended environmental temperature	20-30 (°C)
Threshold overhang angle	60 (°)
Recommended support material	PolyDissolve™ S1

Based on 0.4 mm nozzle and Simplify 3D v4.0. Printing conditions may vary with different nozzle diameters

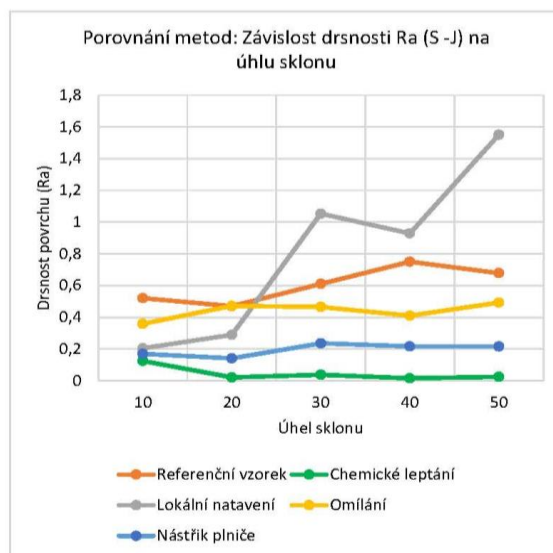
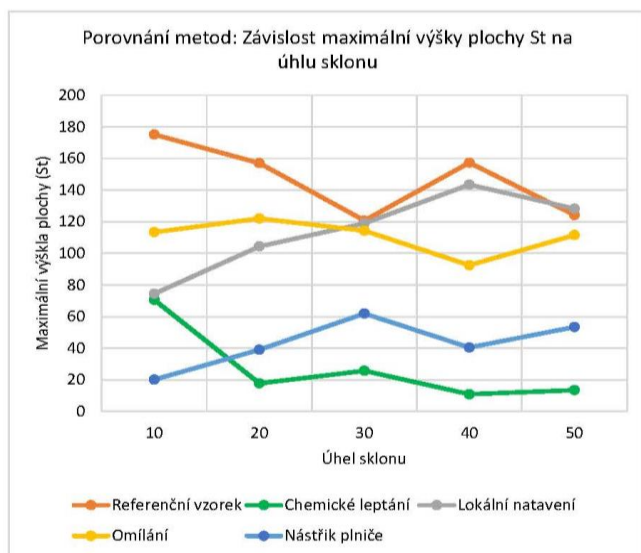
It is highly recommended to use the PolyBox™ when printing with PolyCast™ and to store it in the resealable bag.

Příloha 5 (Výsledky PLA)



Procentuální snížení plošné drsnosti Sa oproti referenčnímu vzorku				
Úhel sklonu	Chemické leptání	Lokální natavení	Omílání	Nástřík
10	77,87	81,24	37,44	84,30
20	96,94	77,09	12,90	74,33
30	96,31	58,33	28,72	70,03
40	98,86	75,19	55,50	88,12
50	98,09	68,02	35,45	77,64
Průměrně	93,61	71,97	34,00	78,88

Procentuální snížení drsnosti Ra (V-Z) oproti referenčnímu vzorku				
Úhel sklonu	Chemické leptání	Lokální natavení	Omílání	Nástřík
10	90,67	75,60	22,69	70,45
20	99,07	89,89	55,79	71,53
30	98,91	91,71	19,08	74,64
40	99,10	89,79	23,58	70,36
50	98,14	85,96	-61,15	29,41
Průměrně	97,18	86,59	11,99	63,28

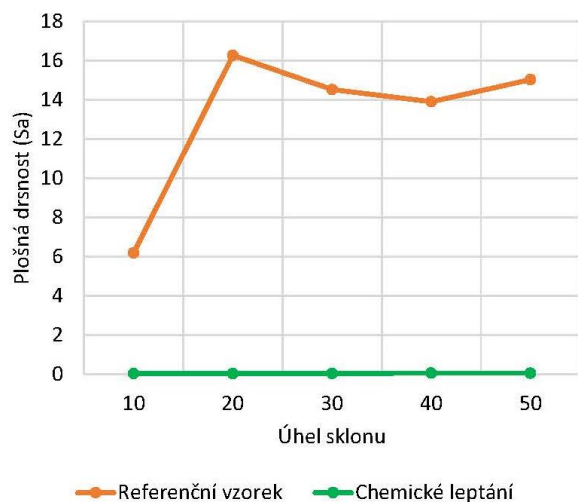


Procentuální snížení maximální výšky plochy St oproti referenčnímu vzorku				
Úhel sklonu	Chemické leptání	Lokální natavení	Omílání	Nástřík
10	59,70	57,49	35,24	88,54
20	88,72	33,50	22,29	75,16
30	78,73	1,41	5,30	48,73
40	93,09	8,84	41,22	74,32
50	89,19	-3,22	10,23	57,00
Průměrně	81,89	19,60	22,86	68,75

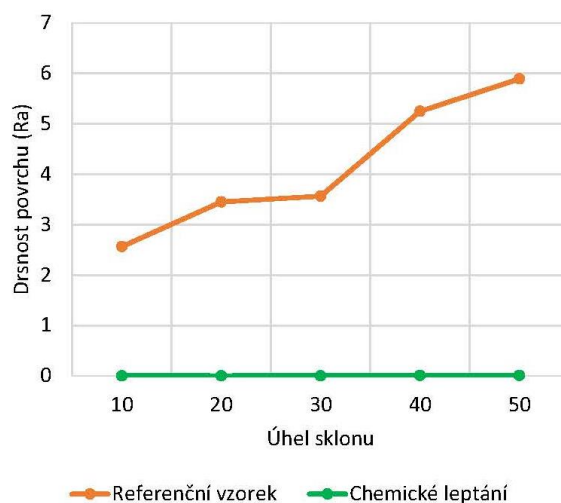
Procentuální snížení drsnosti Ra (S-J) oproti referenčnímu vzorku				
Úhel sklonu	Chemické leptání	Lokální natavení	Omílání	Nástřík
10	76,09	60,73	31,08	67,44
20	95,54	38,32	-0,47	70,05
30	93,90	-72,48	23,83	61,36
40	97,96	-23,88	45,34	71,12
50	96,38	-128,59	27,44	68,17
Průměrně	91,98	-25,18	25,45	67,63

Příloha 6 (Výsledky PolySmooth)

Porovnání metod: Závislost plošné drsnosti Sa na úhlu sklonu



Porovnání metod: Závislost drsnosti Ra (V-Z) na úhlu sklonu



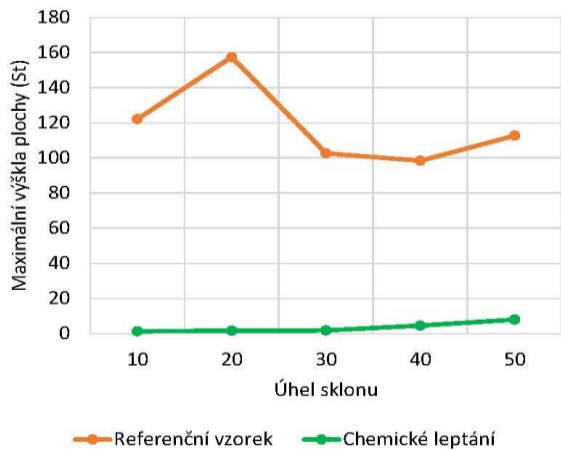
Procentuální snížení plošné drsnosti Sa oproti referenčnímu vzorku

Úhel sklonu	Chemické leptání
10	99,30
20	99,73
30	99,67
40	99,50
50	99,60
Průměrně	99,56

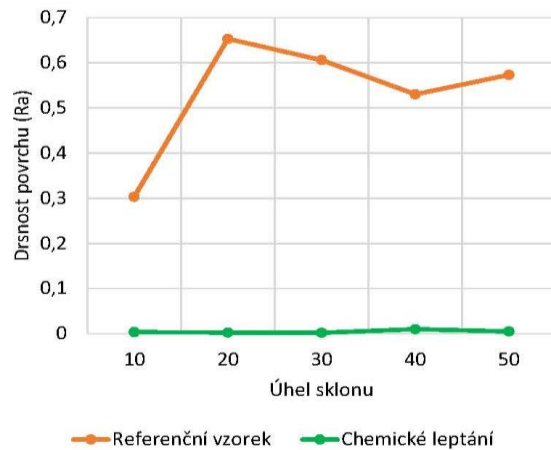
Procentuální snížení drsnosti Ra (V-Z) oproti referenčnímu vzorku

Úhel sklonu	Chemické leptání
10	99,91
20	99,93
30	99,93
40	99,86
50	99,90
Průměrně	99,91

Porovnání metod: Závislost maximální výšky plochy St na úhlu sklonu



Porovnání metod: Závislost drsnosti Ra (S-J) na úhlu sklonu



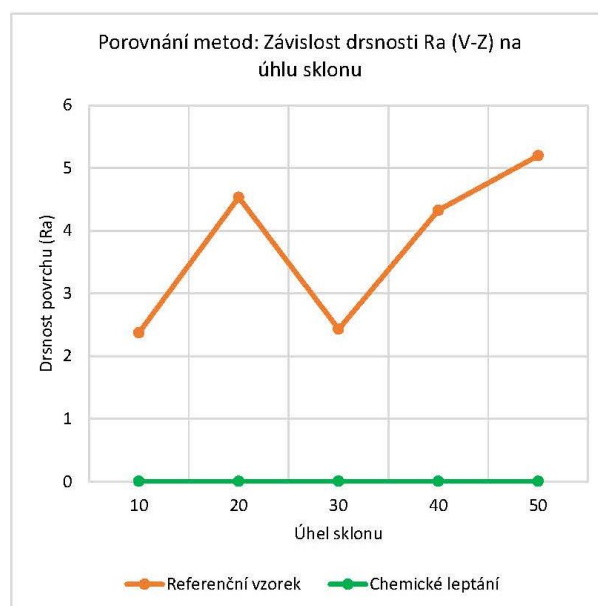
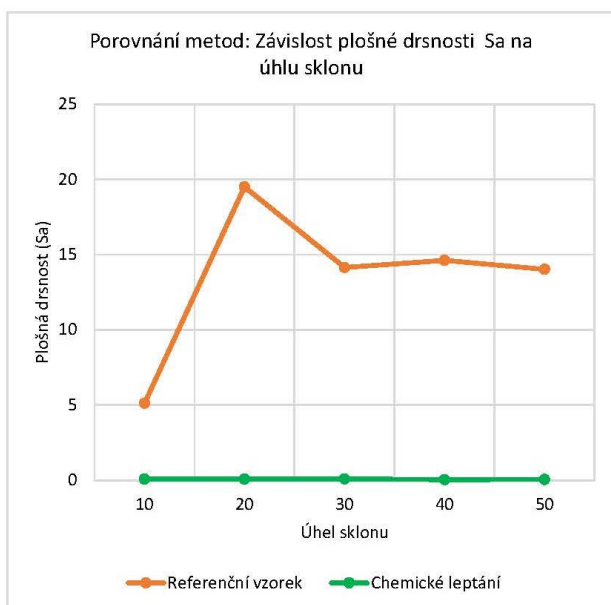
Procentuální snížení maximální výšky plochy St oproti referenčnímu vzorku

Úhel sklonu	Chemické leptání
10	98,84
20	98,92
30	98,20
40	95,37
50	92,88
Průměrně	96,84

Procentuální snížení drsnosti Ra (S-J) oproti referenčnímu vzorku

Úhel sklonu	Chemické leptání
10	98,89
20	99,64
30	99,68
40	98,12
50	99,15
Průměrně	99,10

Příloha 7 (Výsledky PolyCast)

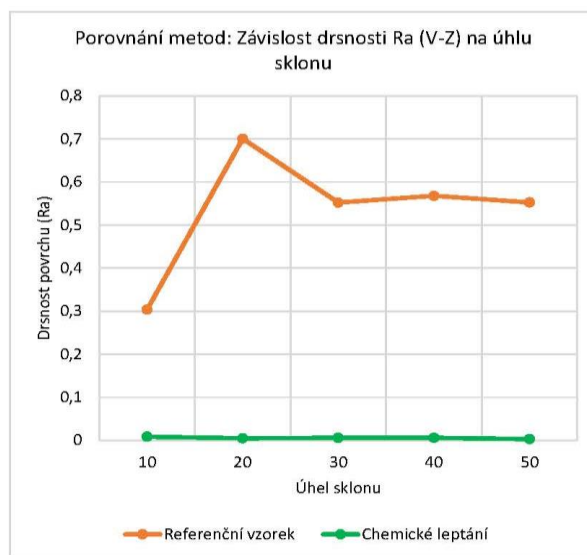
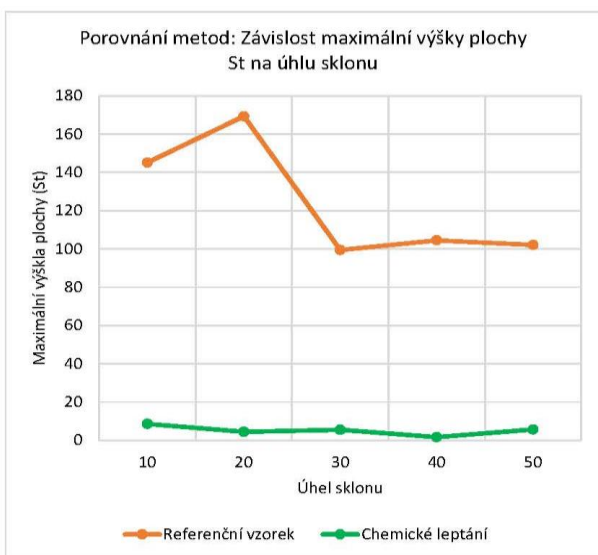


Procentuální snížení plošné drsnosti Sa oproti referenčnímu vzorku

Úhel sklonu	Chemické leptání
10	98,45
20	99,59
30	99,33
40	99,70
50	99,61
Průměrně	99,34

Procentuální snížení drsnosti Ra (V-Z) oproti referenčnímu vzorku

Úhel sklonu	Chemické leptání
10	99,71
20	99,90
30	99,71
40	99,86
50	99,92
Průměrně	99,82



Procentuální snížení maximální výšky plochy St oproti referenčnímu vzorku

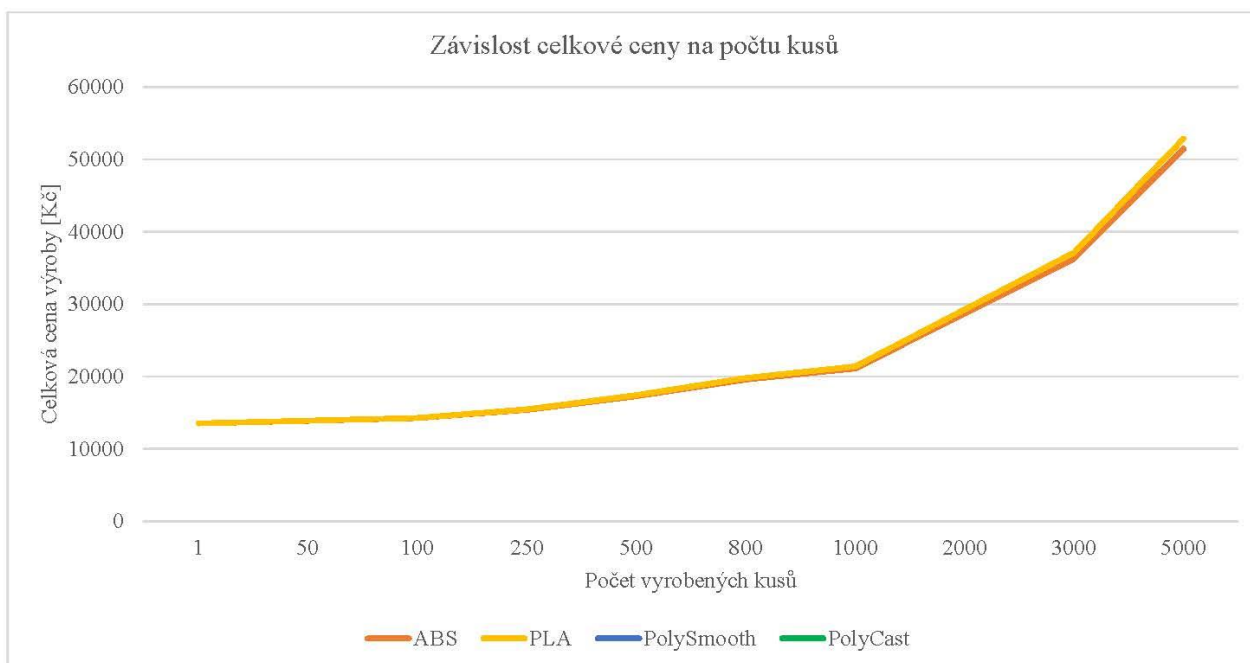
Úhel sklonu	Chemické leptání
10	94,07
20	97,36
30	94,44
40	98,37
50	94,42
Průměrně	95,73

Procentuální snížení drsnosti Ra (S-J) oproti referenčnímu vzorku

Úhel sklonu	Chemické leptání
10	97,16
20	99,31
30	98,95
40	98,95
50	99,46
Průměrně	98,77

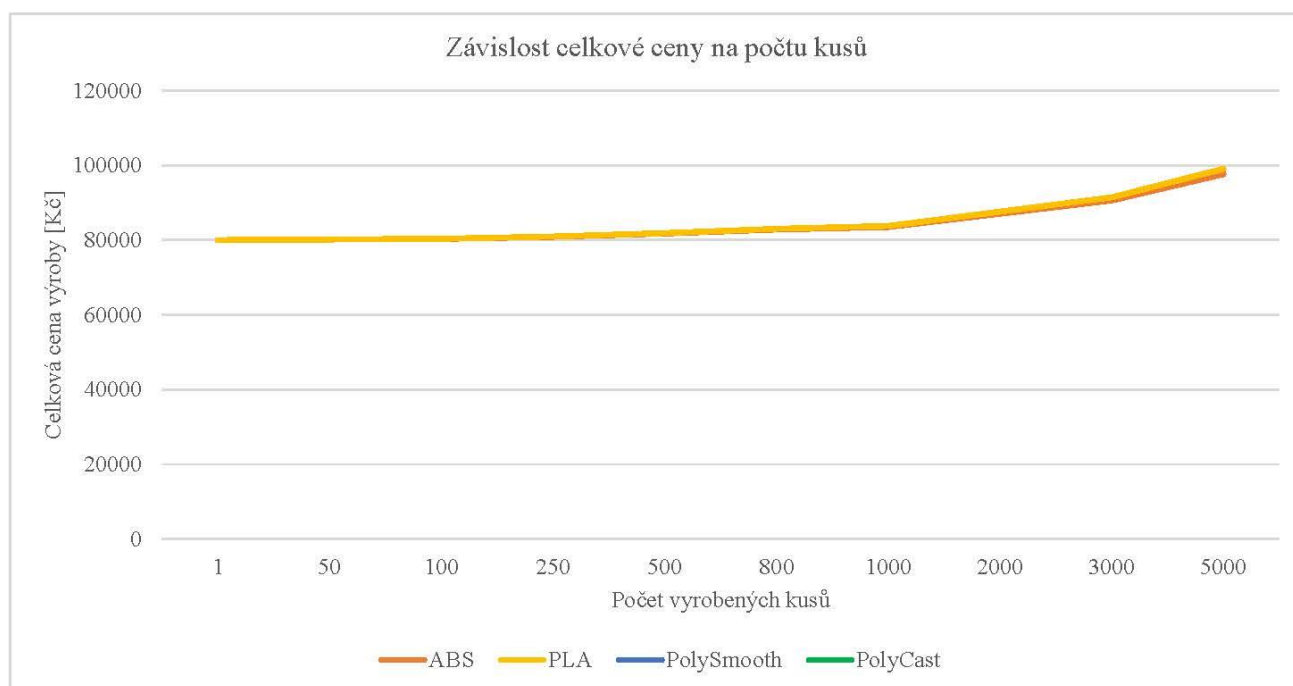
Příloha 8 (Ekonomické hodnocení - lokální natavení)

	Počet kusů	ABS	PLA
Celkové náklady na výrobu 1 ks [Kč]	1	13508	13508
Celkové náklady na výrobu 50 ks [Kč]	50	13880	13894
Celkové náklady na výrobu 100 ks [Kč]	100	14259	14287
Celkové náklady na výrobu 250 ks [Kč]	250	15398	15468
Celkové náklady na výrobu 500 ks [Kč]	500	17297	17437
Celkové náklady na výrobu 800 ks [Kč]	800	19574	19798
Celkové náklady na výrobu 1 000 ks [Kč]	1000	21093	21373
Celkové náklady na výrobu 2 000 ks [Kč]	2000	28686	29246
Celkové náklady na výrobu 3 000 ks [Kč]	3000	36279	37119
Celkové náklady na výrobu 5 000 ks [Kč]	5000	51465	52865



Příloha 9 (Ekonomické hodnocení - omílání)

	Počet kusů	ABS	PLA
Celkové náklady na výrobu 1 ks [Kč]	1	80004	80004
Celkové náklady na výrobu 50 ks [Kč]	50	80177	80191
Celkové náklady na výrobu 100 ks [Kč]	100	80354	80382
Celkové náklady na výrobu 250 ks [Kč]	250	80884	80954
Celkové náklady na výrobu 500 ks [Kč]	500	81768	81908
Celkové náklady na výrobu 800 ks [Kč]	800	82830	83054
Celkové náklady na výrobu 1 000 ks [Kč]	1000	83537	83817
Celkové náklady na výrobu 2 000 ks [Kč]	2000	87074	87634
Celkové náklady na výrobu 3 000 ks [Kč]	3000	90611	91451
Celkové náklady na výrobu 5 000 ks [Kč]	5000	97684	99084



Příloha 10 (Ekonomické hodnocení – nástřík plniče)

	Počet kusů	ABS	PLA
Celkové náklady na výrobu 1 ks [Kč]	1	160	160
Celkové náklady na výrobu 50 ks [Kč]	50	651	665
Celkové náklady na výrobu 100 ks [Kč]	100	1152	1180
Celkové náklady na výrobu 250 ks [Kč]	250	2656	2726
Celkové náklady na výrobu 500 ks [Kč]	500	5161	5301
Celkové náklady na výrobu 800 ks [Kč]	800	8168	8392
Celkové náklady na výrobu 1 000 ks [Kč]	1000	10173	10453
Celkové náklady na výrobu 2 000 ks [Kč]	2000	20195	20755
Celkové náklady na výrobu 3 000 ks [Kč]	3000	30218	31058
Celkové náklady na výrobu 5 000 ks [Kč]	5000	50264	51664

