



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# ANALÝZA PLASTOVÝCH MATERIÁLŮ VYROBENÝCH ADITIVNÍ TECHNOLOGIÍ 3D TISKU

ANALYSIS OF PLASTIC MATERIALS PRODUCED BY ADDITIVE 3D PRINTING TECHNOLOGY

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Lukáš Spišák

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

BRNO 2020

# Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	<b>Bc. Lukáš Spišák</b>
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	<b>doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2019/20

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:

## **Analyza plastových materiálů vyrobených aditivní technologií 3D tisku**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Diplomová práce se bude zabývat stanovením mechanických vlastností vybraných plastových materiálů vyrobených aditivní metodou FDM s využitím dostupné 3D tiskárny. V práci bude charakterizován vliv barevného pigmentu a nastavení procesních parametrů 3D tisku. Vytisknuté normalizované vzorky budou analyzovány s využitím výpočetní techniky a dostupných testovacích zařízení. Práce bude ukončena zhodnocením dosažených výsledků a celkovým doporučením pro uživatele.

### **Cíle diplomové práce:**

- Teoretická část – rozbor typů 3D tiskáren a technologií 3D tisku.
- Charakteristika materiálu, výroby filamentu a parametrů 3D tisku.
- Experimentální část – provedení mechanické zkoušky, zpracování a vyhodnocení výsledků.

### **Seznam doporučené literatury:**

PÍŠKA, M. a kolektiv. Speciální technologie obrábění. CERM 1. vyd. 246 s. 2009. ISBN 978-80--4-4025-8.

CHUA, C. K., LEONG, K. F., LIM, C. S. Rapid Prototyping: Principles and Applications. 3rd ed. New Jersey: World Scientific, c2010. 512 pp. ISBN 978-981-277-897-0.

JACOBSON, D. M., RENNIE, A. E. W., BOCKING C. E. In Proceedings of the 5th National Conference on Rapid Design, Prototyping, and Manufacture. Professional Engineering Publishing, 2004. pp. 112. ISBN 186-058-465-9.

PÍŠA, Z., KEJDA, P., GÁLOVÁ, D. Rapid Prototyping in Mechanical Engineering. In Proceedings of the abstracts 12th International Scientific Conference CO-MA-TECH 2004. Bratislava: STU, 2004. s. 160. ISBN 80-227-2121-2.

GIBSON, I., ROSEN, D. W., STUCKER, B. Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing. New York: Springer, 2010. ISBN 14-419-1120-0.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

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

## ABSTRAKT

Diplomová práca sa zaoberá vplyvom farbiacich aditív a nastavením procesných parametrov 3D tlače na mechanické a povrchové vlastnosti vzoriek z materiálu PLA. V práci je charakterizovaný proces výroby filamentu, ako aj tlač normalizovaných vzoriek na 3D tlačiarňi s využitím aditívnej metódy Fused Deposition Modeling. Vplyv 3 druhov farbiacich aditív je vyhodnotený na základe ťahovej skúšky, skúšky tvrdosti a analýzy povrchu. Hodnotenými veličinami sú predovšetkým zaťažujúca sila, tvrdosť, textúra povrchu, drsnosť a vlnitosť. V práci je taktiež vyhodnotený vplyv percentuálneho podielu výplne vzoriek, smeru vlákien vnútornej výplne a orientácii vzoriek v tlačovej komore 3D tlačiarne na mechanické vlastnosti. Výsledky sú hodnotené na základe ťahovej skúšky a hodnotenými veličinami sú predovšetkým zaťažujúca sila, napätie na medzi pevnosti a modul pružnosti v ťahu. Práca je ukončená zhodnotením dosiahnutých výsledkov a celkovým odporúčením pre výrobcu filamentov a užívateľov.

### Kľúčové slová

3D tlač, PLA, výroba filamentu, farbiace aditívum, skúška ťahom, skúška tvrdosti, textúra povrchu

## ABSTRACT

The diploma thesis deals with the influence of colouring additives and setting of the process parameters of 3D printing on the mechanical and surface properties of samples made of PLA material. The work describes the process of filament production, as well as the printing of normalized samples on a 3D printer using the additive method Fused Deposition Modeling. The impact of 3 types of colouring additives is evaluated on the basis of tensile test, hardness test and surface analysis. The evaluated quantities are primarily tensile strength, hardness, surface texture, roughness and corrugation. The work also evaluates the influence of the percentage of sample filling, the direction of the fibres of the inner filling and the orientation of the samples in the printing chamber of the 3D printer on the mechanical properties. The results are evaluated on the basis of the tensile test and the evaluated quantities are mainly the tensile strength, the ultimate stress and the modulus of elasticity in traction. The work is completed by evaluating the results and overall recommendations for filament manufacturers and users.

### Key words

3D printing, filament production, colouring additive, tensile test, hardness test, surface texture

## BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

SPIŠÁK, Lukáš. *Analýza plastových materiálov vyrobených aditívni technológií 3D tisku* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124953>. Diplomová práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Josef Sedlák.



## PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som diplomovú prácu na tému **Analýza plastových materiálov vyrobených aditívni technológií 3D tisku** vypracoval samostatne s použitím odbornej literatúry a prameňov, uvedených v zozname, ktorý tvorí prílohu tejto práce.

25.06.2020

.....  
Dátum

.....  
Bc. Lukáš Spišák

## **POĎAKOVANIE**

Ďakujem vedúcemu diplomovej práce, pánovi doc. Ing. Josefovi Sedlákov, Ph.D., za užitočné pripomienky, ochotu a odborné vedenie počas tvorby práce. Taktiež ďakujem zamestnancom Univerzity obrany v Brne za poskytnutie špecializovaných meracích prístrojov a usmernenie počas vykonávania materiálových skúšok. Ďakujem aj vedeniu a zamestnancom spoločnosti Chemosvit Fibrochem, s.r.o. za poskytnutie technického vybavenia na výrobu filamentov, ústretovosť a odborné rady. V neposlednom rade sa chcem poďakovať aj mojej rodine za podporu počas celého štúdia.

**OBSAH**

ABSTRAKT .....	3
PREHLÁSENIE .....	4
POĎAKOVANIE .....	5
OBSAH.....	6
ÚVOD.....	8
1 CHARAKTERISTIKA A ROZBOR TECHNOLOGIE 3D TLAČE.....	9
1.1 Úvod do problematiky .....	9
1.2 Technológia 3D tlače na báze fotopolymerov .....	10
1.2.1 Stereolitografia (SLA) .....	10
1.2.2 Solid Ground Cutting (SGC) .....	11
1.3 Technológie 3D tlače na báze práškových materiálov .....	11
1.3.1 Selective Laser Sintering (SLS).....	12
1.3.2 Direct Metal Laser Sintering (DMLS).....	13
1.4 Technológie 3D tlače na báze tuhých materiálov .....	13
1.4.1 Laminated Object Manufacturing (LOM) .....	14
1.4.2 Multi Jet Modeling (MJM) .....	15
1.4.3 Fused Deposition Modeling (FDM) .....	16
1.5 Zhrnutie popisovaných technológií .....	17
2 MATERIÁLY PRE TECHNOLOGIU FUSED DEPOSITION MODELING .....	18
2.1 Základný prehľad polymérov a prísad.....	18
2.2 Vlastnosti plastových materiálov pre metódu FDM.....	19
2.2.1 PLA materiál.....	19
2.2.2 ABS materiál .....	20
2.2.3 PET materiál .....	21
2.2.4 Materiál nylon.....	21
2.2.5 TPU materiál.....	22
2.2.6 PC materiál .....	22
2.3 Zhrnutie porovnávaných materiálov .....	23
3 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ – VÝROBA A TLAČ FILAMENTOV .....	24
3.1 Úvod do riešenej problematiky .....	24
3.2 Proces výroby filamentov pre 3D tlač metódou FDM.....	26
3.3 Tlač testovaných vzoriek .....	29
4 VPLYV FARBÍV A MNOŽSTVA VÝPLNE NA VLASTNOSTI VÝTLAČKOV ..	32
4.1 Ťahová skúška .....	32

4.1.1	Výber skúšobných vzoriek.....	33
4.1.2	Vykonanie ťahovej skúšky .....	35
4.1.3	Výsledky ťahovej skúšky.....	37
4.2	Skúška tvrdosti.....	40
4.3	Metodika analýzy textúry povrchu .....	42
4.3.1	Výsledky analýzy textúry povrchu – 100 % PLA .....	44
4.3.2	Výsledky analýzy textúry povrchu – červené aditívum.....	48
4.3.3	Výsledky analýzy textúry povrchu – čierne aditívum .....	52
4.3.4	Výsledky analýzy textúry povrchu – zlaté aditívum .....	56
4.4	Sumár výsledkov vplyvu farbív a podielu výplne .....	60
5	ODPORÚČANIA PRE UŽÍVATEĽOV 3D TLAČE.....	62
5.1	Vplyv smeru vlákien na mechanické vlastnosti výtlačku.....	62
5.1.1	Výsledky ťahovej skúšky.....	63
5.2	Vplyv umiestnenia výtlačkov v tlačovej komore .....	65
5.2.1	Výsledky ťahovej skúšky.....	66
5.3	Sumár odporúčaní užívateľom 3D tlače .....	68
6	DISKUSIA.....	70
7	ZÁVER .....	72
	ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV .....	73
	ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATEK.....	76

## ÚVOD

Technológia 3D tlače zaznamenáva jeden z najprudších rastov v technologickom svete 21. storočia. Do povedomia sa dostala najmä v roku 2004 vďaka projektu samoreplikovateľných tlačiarň RepRap. V roku 2009 došlo k vypršaniam patenty firmy Stratasys pre technológiu FDM (Fused Deposition Modeling) a 3D tlač sa stala dostupnejšou aj pre širšiu verejnosť [1].

3D tlač sa radí medzi aditívne spôsoby výroby, keď postupným nanášaním vrstiev materiálu na seba vzniká požadovaný trojdimenzionálny objekt. Oblasť použitia tejto aditívnej technológie sa neustále rozrastá. Splňa požiadavky moderného zákazníka ako sú vysoká presnosť, rýchlosť kusovej výroby, a z dôvodu minimálneho odpadu aj ekologickosť. Technológia umožňuje vytvorenie veľkého množstva podobných prototypov bez nutnosti použitia špeciálnych foriem či nástrojov. Potenciál 3D tlače sa neustále rozvíja aj v zdravotníctve, kde sa uplatňuje pri výrobe implantátov, či pri tlači živých buniek. Technológia je uplatniteľná pre široké množstvo materiálov, ako sú plasty, špeciálny betón, kovy a ďalšie [1, 2].

Existuje množstvo metód 3D tlače. Princípy vybraných z nich sú vysvetlené v úvodnej časti práce. Praktická časť práce vyhodnocuje zvolené mechanické a povrchové vlastnosti vzoriek vyrobených aditívnou technológiou FDM. Vďaka cenovej dostupnosti, širokej škále mechanických vlastností a nízkej náročnosti tlače získava FDM popredné uplatnenie u domácich užívateľov i v priemyselných podnikoch. V narastajúcom dopyte po filamentoch vidí svoju obchodnú príležitosť aj spoločnosť Chemosvit Fibrochem, s.r.o. s primárnym zameraním na výrobu jemných polypropylénových vlákien. Spoločnosť so sídlom v meste Svit kapacitne prevyšuje 4500 ton vlákna ročne a jej nový zámer spočíva vo výrobe filamentov z PLA. Cieľom práce je výroba filamentov na experimentálnej linke spoločnosti, tlač výtlačkov pomocou 3D tlačiarne PRUSA i3 MK3 a následné vyhodnotenie sledovaných parametrov. Farebnosť výtlačkov patrí medzi hlavné výhody materiálu PLA, preto je určený vplyv 3 druhov farieb na základný materiál. S využitím ťahovej skúšky je určené predovšetkým maximálne silové zaťaženie v ťahu. Tvrdosť výtlačkov je hodnotená na základe skúšky tvrdosti metódou Shore D. Technológia FDM sa uplatňuje aj pri výrobe sošiek, figúrok a ďalších estetických predmetov. Z tohto dôvodu sú s využitím špecializovaných prístrojov vyhodnotené povrchové vlastnosti výtlačkov, ako napr. drsnosť či vlnitosť povrchu. Vhodným nastavením procesných parametrov tlače, akým je percentuálny podiel výplne, je možné skrátiť dobu tlače a zároveň znížiť množstvo použitého materiálu. Pre vyhodnotenie vplyvu tohto parametru na mechanické vlastnosti sú porovnávané modely s podielom výplne 25 %, 50 %, 70 % a 100 % [1].

Z dôvodu poskytnutia širšieho odporúčania pre užívateľov 3D tlače je na základe ťahovej skúšky vyhodnotený vplyv umiestnenia výtlačkov v tlačovej komore (na plocho, na hranu, vertikálne). Taktiež je zhodnotený vplyv veľkosti uhla určeného orientáciou vlákien filamentu a vektorom zaťažujúcej sily ( $\pm 45^\circ$  a  $0^\circ / 90^\circ$ ). Hodnotenými veličinami sú zaťažujúca sila, napätie na medzi pevnosti a modul pružnosti v ťahu.

# 1 CHARAKTERISTIKA A ROZBOR TECHNOLOGIE 3D TLAČE

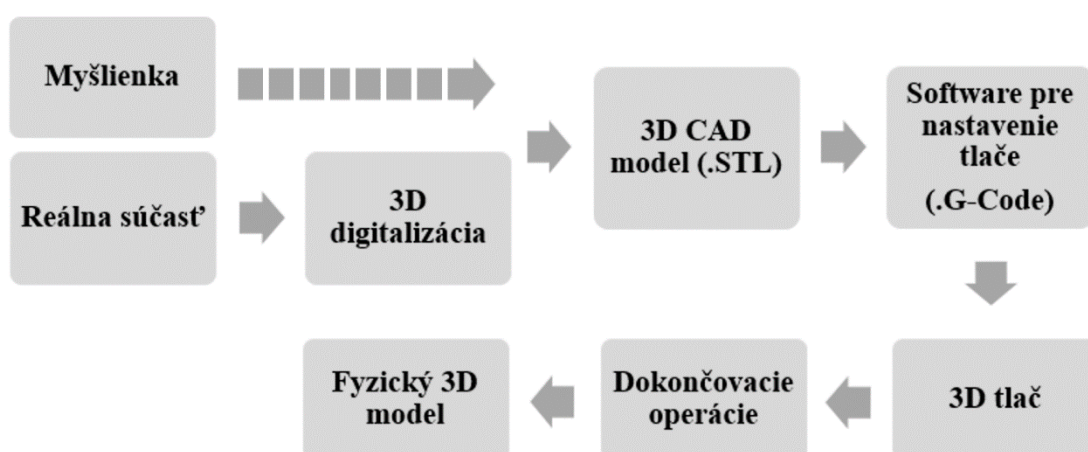
Kapitola popisuje princípy vybraných 3D technológií, ich výhody, nevýhody, ako aj oblasti použitia. Zvýšená pozornosť je venovaná metóde FDM, ktorá je použitá pre 3D tlač výtlačkov testovaných v praktickej časti.

## 1.1 Úvod do problematiky

Vývoj 3D modelovania so sebou prináša vznik nových technológií. Jednou z nich je technológia 3D tlače, globálne známa pod názvom Rapid Prototyping (RP). Jedná sa o technologický proces, ktorého cieľom je vytvorenie reálneho modelu čo najvyššej kvality v čase kratšom, než je možné bežnými technológiami. Použitie 3D tlače má za následok urýchlenie procesu vývoja výrobku, zlepšenie kvality a s tým súvisiacu úsporu nákladov [3, 4].

Zdrojom dát pre RP je priestorový virtuálny model vytvorený v ľubovoľnom CAD systéme, prípadne model získaný na základe reálnej súčasti s využitím priestorového skeneru (Reverse Engineering). Pred ďalším spracovaním je 3D geometrický model prevedený do príslušného formátu (najčastejšie STL). Počítačový model v danom formáte je pomocou špeciálneho softwaru rozdelený priečnymi rezmi na vrstvy s výškou v rádoch stotín až desiatín milimetrov. V tomto kroku užívateľ nastavuje procesné parametre tlače, akými sú výška vrstvy, teplota trysky, percentuálny podiel výplne a ďalšie. Výstupom je zdrojový súbor pre tlačiareň vo formáte G-Code. 3D tlačiareň následne tlačí jednotlivé vrstvy na seba až do vzniku celého výtlačku. Pre dosiahnutie čo najvyššej kvality je model podrobený dokončovacím operáciám. Zjednodušený proces tvorby fyzického modelu je graficky znázornený na obr. 1.1 [3, 4].

Vlastnosti modelu najvýraznejšie ovplyvňuje zvolená metóda a s ňou súvisiaci materiál 3D tlače. Metódy sa okrem použitých materiálov odlišujú predovšetkým v presnosti, náročnosti tlače, ale aj finančnej nákladnosti [1, 3, 4].



Obr. 1.1 Proces tvorby výtlačku technológiou 3D tlače.

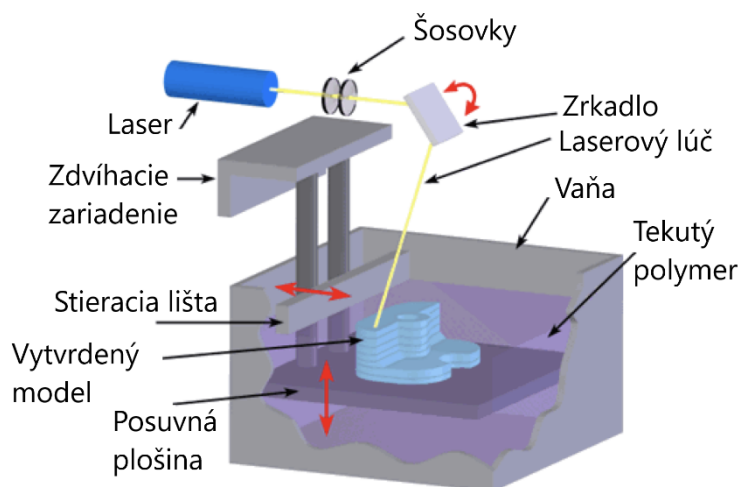
## 1.2 Technológia 3D tlače na báze fotopolymerov

Proces výroby modelov s využitím fotopolymerov (plastická hmota citlivá na svetlo) prebieha najčastejšie vo vnútri nádoby s kvapalnou živcou. K vytvrdzovaniu jednotlivých vrstiev dochádza pod hladinou pôsobením UV laseru. Po vytvrdnutí jednej vrstvy dochádza k posunu materiálu o výšku ďalšej vrstvy. Po dokončení tlače je prebytočná živica odstránená satím [3, 5].

### 1.2.1 Stereolitografia (SLA)

Jedná sa o najstaršiu metódu Rapid Prototypingu, ktorej počiatky siahajú až do roku 1987. Tlač modelu je založená na postupnom vytvrdzovaní 2D vrstiev určených obslužným softwarom z 3D modelu [1, 3].

V nádobe s tekutým fotopolymerom je ponorená posuvná plošina do hĺbky rovnej výške tlačenej vrstvi. Pôsobením laserového lúča cez optickú sústavu je vykreslený potrebný tvar, čím dôjde k vytvrdnutiu vrstvy silnej 0,05 až 0,15 mm. Po stuhnutí jednej vrstvy stieracia lišta zarovná nanosený fotopolymer na potrebnú hrúbku, plošina sa posunie o výšku nasledujúcej vrstvy a proces sa opakuje. Po ukončení tlače sa hotová súčasť vyberie z predom pripravených podpor a umytím zbaví prebytočného fotopolymeru. Ku konečnému vytvrdnutiu dôjde pôsobením UV žiarenia. Princíp tejto metódy znázorňuje obr. 1.2. SLA nachádza uplatnenie vo výrobe foriem pre liatie a vstrekovanie, výrobe modelov s malými otvormi a presnými detailmi [3, 5].



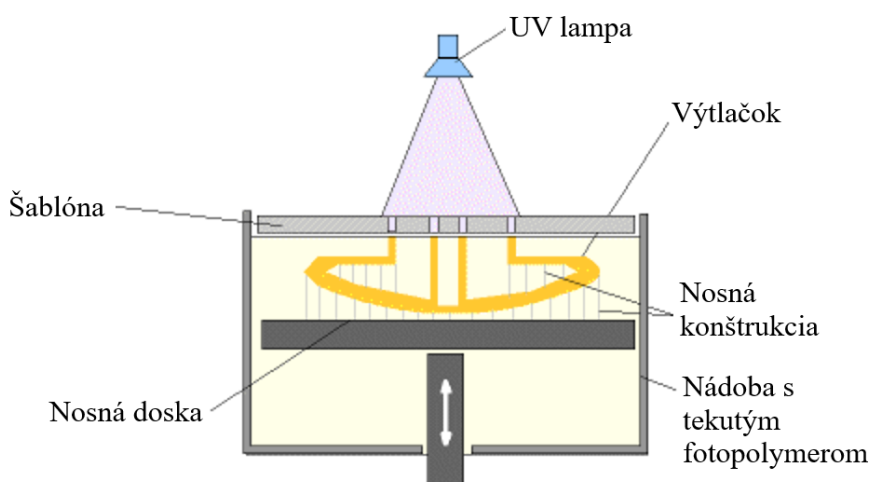
Obr. 1.2 Princíp SLA – upravené [5].

Tab. 1.1 Vlastnosti technológie SLA.

Výhody	Nevýhody
Presnosť a kvalita povrchu	Stavba podpor
Široký rozsah veľkostí modelov	Dokončovacie vytvrdzovanie
Množstvo materiálov	Úprava povrchu a sušenie modelu

### 1.2.2 Solid Ground Cutting (SGC)

Princíp technológie SGC je podobný vyššie spomenutej technológii SLA. Hlavný rozdiel predstavuje použitie negatívnej šablóny, na ktorú je ionografickým procesom nanosená špeciálna vrstva toneru. Pod šablónou je upevnená nosná doska, na ktorej je nanosená tenká vrstva ftopolymernej živice. UV žiarenie z lampy prechádza len časťami šablóny, na ktorých nie je nanosený toner (viď obr. 1.3). Pôsobením žiarenia v presne vymedzených miestach dochádza k vytvrdeniu vrstvy živice. Po odstránení šablóny je prebytočná živica vákuovo odstránená. Po nanosení roztaveného výplňového vosku, ktorý slúži ako podpora ďalšej vrstvy, sa proces opakuje. Technológia sa využíva primárne na overenie zmontovateľnosti a dizajnu súčasti. Uplatnenie nachádza aj v medicíne, napr. pri výrobe protéz [3, 6].



Obr. 1.3 Princíp SGC – upravené [7].

Tab. 1.2 Vlastnosti technológie SGC.

Výhody	Nevýhody
Bez výparov	Stavba podpor
Vysoká rýchlosť tlače	Rozmerné zariadenie
Vysoká spoľahlivosť	Hluk

### 1.3 Technológie 3D tlače na báze práškových materiálov

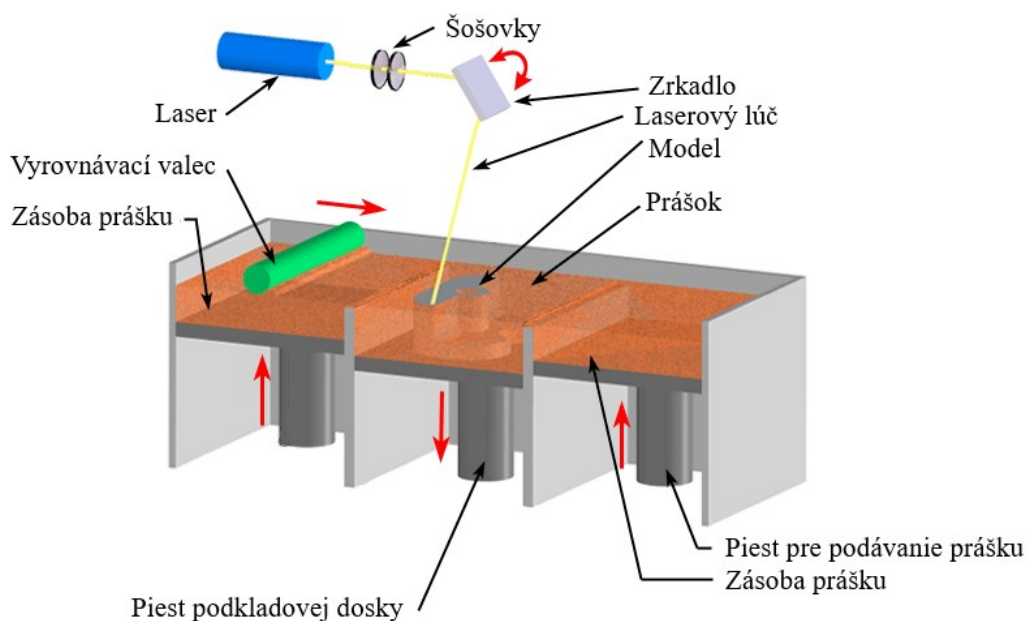
Tento druh technológie využíva ako vstupný materiál jemný prášok. Ten je pôsobením zdroja tepla natavený. Spájaním natavených vrstiev materiálu dochádza ku vzniku výtlačku.



### 1.3.1 Selective Laser Sintering (SLS)

SLS technológia využíva výkonný laser pre tavenie práškových materiálov. Vstupný materiál predstavuje kov, plast, keramika či špeciálny piesok s veľkosťou častíc v rozmedzí 20 až 100  $\mu\text{m}$ . Pracovná komora je naplnená interným plynom (dusík), ktorý zabraňuje oxidácii počas tlače [3, 8].

Princíp SLS metódy je znázornený na obr. 1.4. Konštrukčný materiál vo forme prášku je zo zásobníka vytláčaný piestom. Následne je valcovým mechanizmom nanosená rovnomerná vrstva materiálu na podkladovú dosku. Pôsobením  $\text{CO}_2$  laseru, vychyľovaného v smere osí X a Y, dochádza k roztaveniu zŕn prášku a vytvoreniu spojitkej vrstvy modelu. Po vytvorení vrstvy sa podkladová doska posunie nadol v smere osi Z a proces sa opakuje. Na hotový model sa naniesie ešte niekoľko vrstiev prášku, čo umožní rovnomerné tuhnutie modelu. Vychladený model sa očistí stlačeným vzduchom. Nevyhnutné sú dokončovacie operácie, ako brúsenie či leštenie. Metóda SLS má využitie hlavne v malosériovej výrobe tvarovo náročných dielcov. Uplatňuje sa v oblasti výroby foriem a nástrojov pre plastové, keramické a kovové výrobky [3, 8, 9].



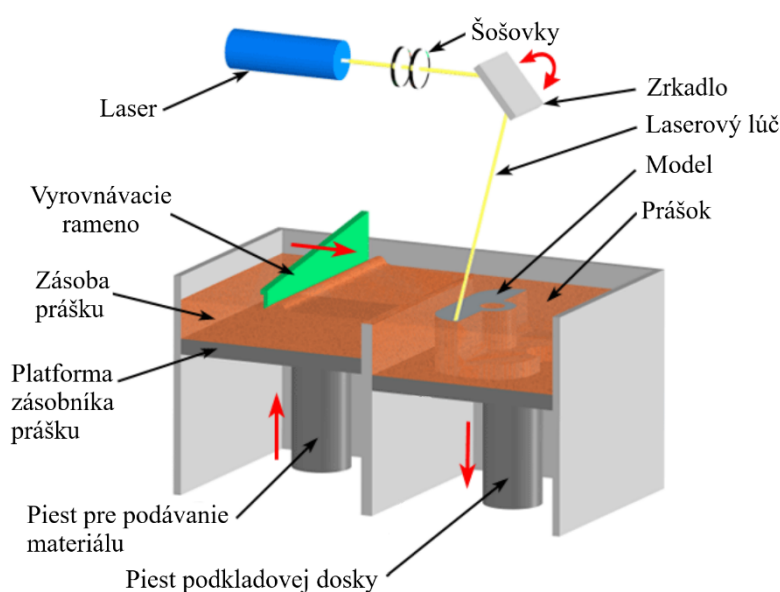
Obr. 1.4 Princíp SLS – upravené [10].

Tab. 1.3 Vlastnosti technológie SLS.

Výhody	Nevýhody
Tvarovo náročné komponenty	Porézny povrch
Podporu tvorí samotný prášok	Dokončovacie operácie
Vysoká pevnosť a odolnosť	Priestorová a energetická náročnosť

### 1.3.2 Direct Metal Laser Sintering (DMLS)

Princíp metódy DMLS je takmer totožný s metódou SLS (viď kap. 1.3.1). Pri oboch metódach dochádza k taveniu jemného prášku po vrstvách s využitím laseru. Nanášanie vrstiev prášku sa však u DMLS metódy nerealizuje s využitím valca, ale pomocou vyrovnávacieho ramena (viď obr. 1.5). Podstatnejší rozdiel predstavujú použité materiály, ktoré sú v prípade DMLS technológie výlučne kovové (oceľ, hliník, titan a ďalšie). Táto technológia umožňuje tlač výrobkov, ktoré nie sú konvenčnými technológiami vôbec, alebo len veľmi zložito vyrobiteľné. Vďaka vysokej pevnosti a tvarovej zložitosti výtláčkov nachádza uplatnenie pri výrobe protéz, zubných implantátov, foriem, ale aj v letectve a kozmonautike [3, 11].



Obr. 1.5 Princíp DMLS – upravené [12].

Tab. 1.4 Vlastnosti technológie DMLS.

Výhody	Nevýhody
Tvarovo náročné komponenty	Kvalita povrchu daná veľkosťou zrn
Podporu tvorí samotný prášok	Vysoká cena
Vysoká pevnosť	Energetická náročnosť

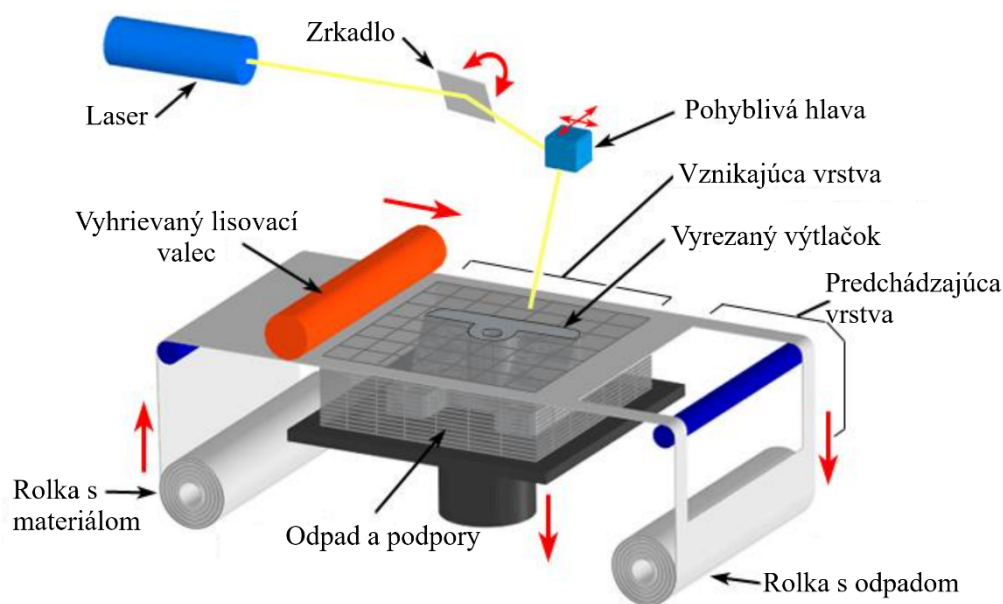
### 1.4 Technológie 3D tlače na báze tuhých materiálov

Spoločným znakom tejto skupiny technológií je tuhá fáza vstupného materiálu (fólie, drôt navinutý na cievke). Popísané sú technológie Laminated Object Manufacturing, Multi Jet Modeling a Fused Deposition Modeling, ktorej sú venované aj nasledujúce kapitoly práce [3].

### 1.4.1 Laminated Object Manufacturing (LOM)

Vstupným materiálom technológie sú plastové, papierové, alebo kovové fólie navinuté na roľkách. Výtlačok vzniká ukladaním jednotlivých vrstiev fólií na seba. Fólia je zo spodnej strany pokrytá lepidlom, ktoré je aktivované pomocou prítlačného valca ohriateho na 330 °C, čím dochádza k spojeniu vrstiev. Profil súčasti je následne vyrezaný pomocou laseru. Prebytočná fólia je laserom narezaná do tvaru kvádrov a slúži ako podpora súčasti. Po dokončení vrstvy sa základňa s modelom zníži o výšku už hotovej vrstvy a proces sa opakuje. Schematicky popisuje túto metódu obr. 1.6 [3, 4, 13].

Hotový model s podporami je z nosnej dosky odstránený pomocou tenkého drôtu, prípadne dláta. Tým je výtlačok pripravený na dokončovacie operácie ako brúsenie, leštenie či farbenie. Technológia LOM sa primárne využíva na výrobu modelov určených pre vizualizáciu a propagáciu. Ďalšou oblasťou je výroba foriem na vstrekovanie a odlievanie [3, 4].



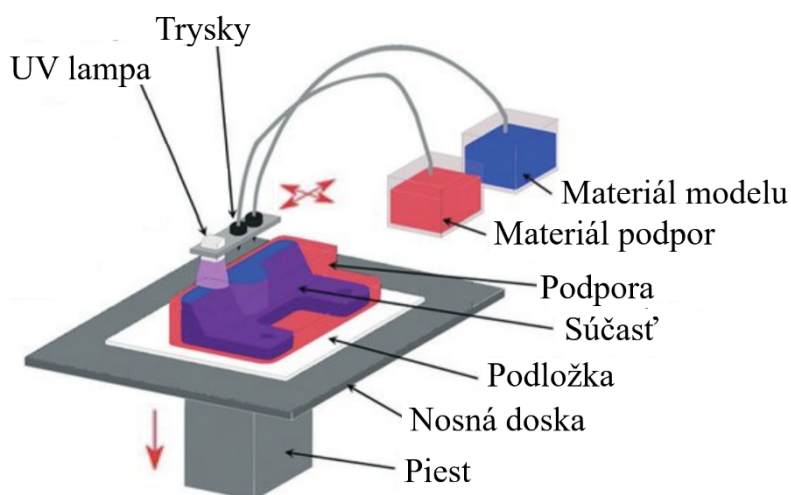
Obr. 1.6 Princíp LOM – upravené [13].

Tab. 1.5 Vlastnosti technológie LOM.

Výhody	Nevýhody
Bez zbytkového prnutia	Nevhodná pre tenkostenné modely
Vysoká rýchlosť tlače	Pevnosť určená vlastnosťami spojiva
Množstvo materiálov	Tvorba odpadu

### 1.4.2 Multi Jet Modeling (MJM)

Metóda Multi Jet Modeling bola vyvinutá v roku 1994 firmou 3D Systems. Jej hlavnú súčasť tvorí špeciálna tlačová hlava pozostávajúca z vedľa seba rovnobežne umiestnených desiatok až stoviek trysiek. Tlačová hlava sa pohybuje v smere osi X a Y, pričom množstvo pretečeného materiálu každou tryskou určuje riadiaci software. Množstvo trysiek umožňuje rýchle a rovnomerné nanášanie materiálu. Technológia MJM využíva materiál termopolymer, ktorý je po vrstvách nanášaný na nosnú dosku. Pre tvorbu podpor sa používa špeciálny vosk, ktorý je z hotového výtlaku odstránený v peci pri teplote tavenia vosku. Proces tlače začína znížením nosnej dosky (viď obr. 1.7) o výšku tlačenej vrstvy, nanesením vrstvy materiálu tryskami a následným rýchlym stuhnutím za pôsobenia UV lampy. V ďalších krokoch sa cyklus opakuje až do vzniku modelu. Technológia sa používa pre tlač výrobkov malých rozmerov v medicíne, ale aj šperkárstve [3, 4, 14].



Obr. 1.7 Princíp MJM – upravené [15].

Tab. 1.6 Vlastnosti technológie MJM.

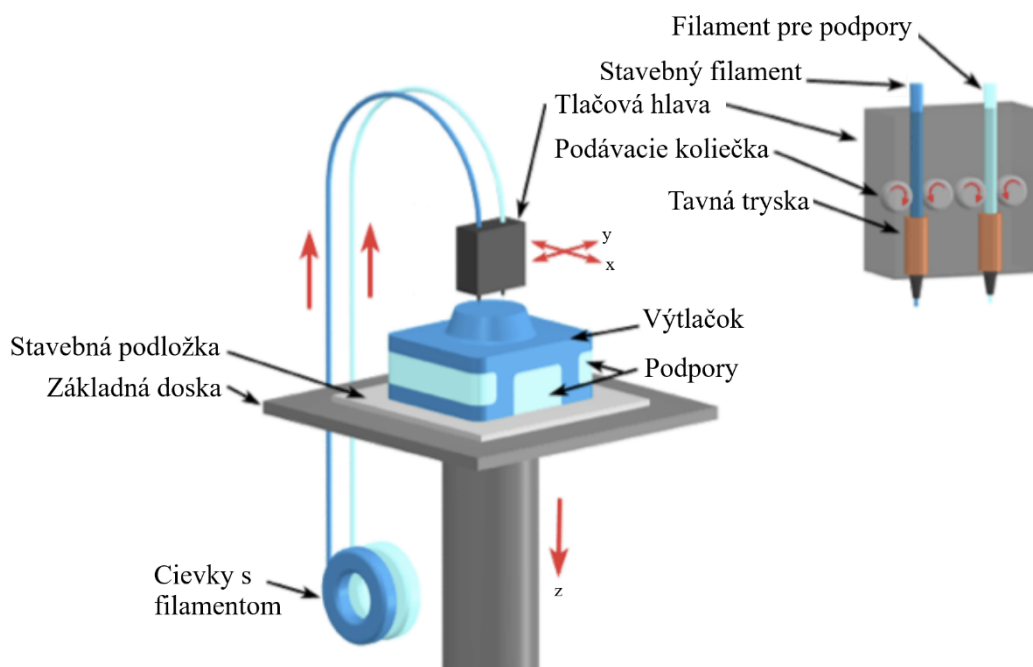
Výhody	Nevýhody
Vysoká produktivita	Nízka presnosť
Nízke náklady	Tvorba odpadu
Výška vrstvy už od 0,05 mm	Len pre menšie súčasti

### 1.4.3 Fused Deposition Modeling (FDM)

Fused Deposition Modeling je v súčasnosti najpoužívanejší spôsob 3D tlače. Takmer totožnú technológiu môžeme nájsť aj pod názvom Fused Filament Fabrication (FFF), ktorá vznikla počas pretrvávania patentu firmy Stratasys na metódu FDM. Popularitu si FDM získala nie len pre dostupnú cenu, ale ja relatívnu jednoduchosť a ekologickosť [1].

Princípom metódy je nanášanie tenkých vrstiev roztaveného termoplastického drôtu (filamentu) cez tlačovú hlavu (extrúder), ktorá na konci obsahuje vyhrievanú trysku (viď obr. 1.8). Posúvanie a presné dávkovanie filamentu je realizované krokovým motorom. Roztavený materiál sa vrstvu po vrstve nanáša na podložku, kde rýchlo tuhne. Pre optimálne nastavenie teploty trysky, musíme zohľadniť okrem druhu materiálu, aj rýchlosť tlače či priemer vlákna filamentu. Počas tlače sa extrúder pohybuje v horizontálnej rovine. Po dokončení vrstvy sa zdvihne o výšku novovzniknutej vrstvy, tlač sa opakuje až do vzniku modelu. Prípadne je vertikálny pohyb realizovaný znížením základnej dosky [3, 16].

Moderné FDM tlačiarne umožňujú tlač modelu s využitím viacerých typov filamentu. Známe sú napr. modely od českého výrobcu Prusa, ktoré umožňujú rozšírenie až na 5 cievok. Striedavým vytlačovaním filamentov, tak dosiahneme kvalitnú viacfarebnú tlač, predĺžime pohotovostnú dobu tlačiarne, či skombinujeme viac druhov materiálov [2, 3, 16].



Obr. 1.8 Princíp FDM – upravené [17].

Technológia FDM vyžaduje použitie podporného materiálu. Podpory sa odstraňujú v závislosti na použítom materiáli buď mechanicky, alebo chemicky ponorením do špeciálneho roztoku [3].

FDM využíva pre stavbu modelov netoxické materiály, čo umožňuje jej bezpečné umiestnenie do domácností, škôl, či kancelárií. Najpoužívanejšie materiály sú PLA a ABS, podrobnejšie sú materiály popísané v nasledujúcej kapitole práce [2].

Medzi amatérskymi užívateľmi je metóda FDM suverénne najrozšírenejšia. Uplatnenie nachádza pri tlači farebných estetických predmetov, ale aj funkčných súčastí. V priemysle je to predovšetkým výroba prototypov pre skúšky tvaru, zostavenia či funkčnosti. Mechanické vlastnosti výtlačkov sú dostatočné pre väčšinu aplikácií, to umožňuje malosériovú výrobu komplexných dielov pre koncové použitie [2, 16].

Tab. 1.7 Vlastnosti technológie FDM.

Výhody	Nevýhody
Jednoduchosť tlače	Stavba podpor
Cenová dostupnosť	Zmrštenie počas chladnutia
Farebná tlač	Priemerné mechanické vlastnosti

### 1.5 Zhrnutie popisovaných technológií

Použitie každej z popisovaných metód 3D tlače (viď kapitoly 1.2 až 1.4) vedie k dosiahnutiu odlišných vlastností finálneho výtlačku. Nižšia výška tlačenej vrstvy výrazne predlžuje dobu tlače, zároveň však umožňuje detailnejšiu tlač. Spoločne s druhom použiteľných materiálov sú popísané v nasledujúcej tabuľke [3].

Tab. 1.8 Zhrnutie vlastností metód 3D tlače [3, 4].

Technológia	Materiál modelu	Výška vrstvy [mm]
SLA	Fotopolymer	0,05 až 0,15
SGC	Fotopolymer, nylon	0,10 až 0,50
SLS	Polyamid, nylon, kovové prášky, vosk	0,10 až 0,50
DMLS	Kovové prášky	0,02 až 0,04
LOM	Papier, fólie	0,01 až 0,20
MJM	Termoplasty, akrylátový fotopolymer	0,05 až 0,20
FDM	ABS, vosk, polykarbonát	0,05 až 0,33

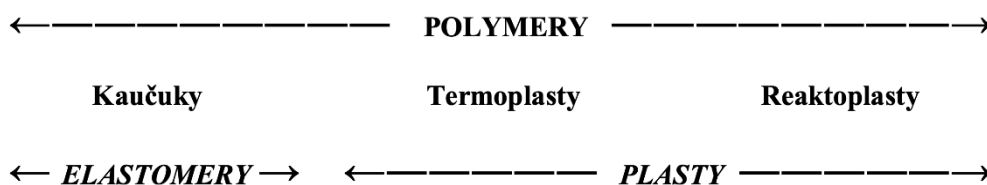
## 2 MATERIÁLY PRE TECHNOLOGIU FUSED DEPOSITION MODELING

Kapitola poskytuje prehľad vlastností vybraných plastových materiálov uplatniteľných v technológií FDM.

### 2.1 Základný prehľad polymérov a prísad

Výber vhodného materiálu výrazne ovplyvňuje finálne vlastnosti modelu. Je potrebné zohľadniť požadované mechanické a optické vlastnosti, cenu a dostupnosť, toxicitu, spôsob uskladnenia či možnosť recyklácie materiálu. S narastajúcim počtom filamentov na trhu sa stáva kúpa toho správneho čoraz náročnejšou úlohou. To platí obzvlášť pre metódu FDM, ktorá je uplatniteľná pre široké množstvo materiálov, ako sú plasty, kovy, ale aj biologické materiály. V praktickej časti sú vyhodnocované plastové materiály, z tohto dôvodu kapitola poskytuje prehľad vlastností vybraných plastov uplatniteľných v tejto technológii [18, 19].

Názov plasty označuje materiály, ktorých hlavnú časť tvoria organické makromolekulárne látky (polymery). Tie vďaka svojim obrovským molekulám poskytujú neobvykle širokú škálu vlastností. Delenie polymérov popisuje obr. 2.1 [18, 19].



Obr. 2.1 Delenie polymérov [18].

Elastomery predstavujú vysoko elastické polymery, ktoré je možné pôsobením malej sily výrazne deformovať bez porušenia. Dominantnou skupinou elastomerov sú kaučuky, z ktorých sa vyrába napr. guma. Reaktoplasty prechádzajú chemickou reakciou pôsobením tepla počas procesu spracovania. Dochádza u nich ku vzniku hustých, priestorovo zosieťovaných štruktúr, v ktorých sú pôvodné molekuly vzájomne prepojené kovalentnými väzbami. Po ohriatí sú reaktoplasty prechodne tvarovateľné. Naopak po ochladení svoju plasticnosť strácajú, prechádzajú do vytvrdeného stavu. V ňom sú reaktoplasty nerozpustné a netaviteľné. Recyklácia reaktoplastov je z tohto dôvodu výrazne náročnejšia než u termoplastov. Výhodou termoplastov je aj opakovateľný ohrev do plastického stavu, alebo viskózneho toku bez zmeny vlastností materiálu po ochladení. K tepelnému rozkladu materiálu dochádza po prekročení teploty tečenia. Technológia FDM pracuje pre vyššie spomenuté dôvody práve s termoplastickými materiálmi [18, 19].

Okrem látok polymérnej povahy obsahujú plasty aj stabilizátory, farbivá (pigmenty), mazadlá, plnivá a ďalšie prídavné látky. Reaktoplasty je možné plniť plnivami až do 70 %, zatiaľ čo termoplasty do 30 %. Všetky zložky plastov musia byť dokonale homogenizované. Prídavné látky sú označované ako prísady a ich účelom je odstránenie nedostatkov či zlepšenie spracovateľnosti. Medzi najbežnejšie nedostatky patrí malá odolnosť voči degradácií, nízka húževnatosť a tvrdosť, malá odolnosť voči chemikáliám či vysoká horľavosť materiálu. Prísady môžu mať za následok aj zmenu farby vlastného plastu, ako je vyhodnocované v praktickej časti práce [18, 19].

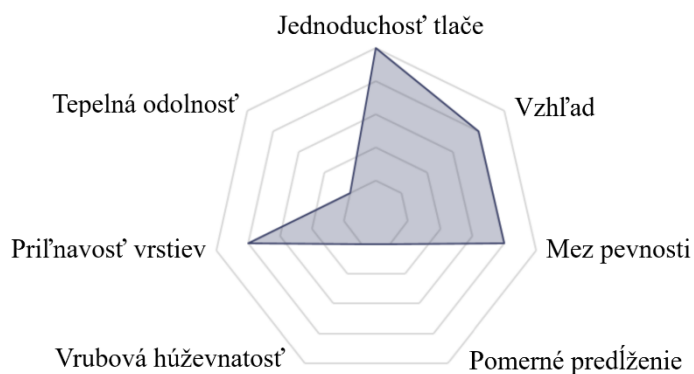
## 2.2 Vlastnosti plastových materiálov pre metódu FDM

Nasledujúce podkapitoly popisujú prehľad vlastností materiálov PLA, ABS, PET, nylon, TPU a PC, uplatniteľných v metóde FDM.

### 2.2.1 PLA materiál

PLA predstavuje termoplastický bio-polymer. Vyrába sa z obnoviteľných zdrojov, ako sú napr. kukuričný či zemiakový škrob, vďaka čomu je biologicky odbúrateľný. Pre účely 3D tlače sa dodáva vo forme drôtu namotaného na cievke. Obvyklé priemery filamentu sú 1,75 a 3 milimetre. Spoločne s ABS patrí medzi najpoužívanejšie termoplastické materiály pre metódu FDM [20, 21].

Tento plast je veľmi obľúbený medzi amatérskymi užívateľmi, pretože sa spracováva za relatívne nízkych teplôt 180 – 230 °C a nevyžaduje striktnu vyhrievanú podložku. Taktiež je cenovo dostupný a pri nízkych nárokoch na tlač poskytuje dobrú výslednú kvalitu. Nedostatkom PLA je pomerne nízka teplota skleneného prechodu okolo 60 °C, pri ktorej materiál začína mäknúť, a tým pádom strácať svoje mechanické vlastnosti. Materiál nie je vhodné skladovať v prostredí s vyššou vlhkosťou, lebo počas tlače môže dôjsť ku nežiadúcej tvorbe bublín v tryske tlačnej hlavy. Pri procese tlače PLA zapácha len mierne. Graficky znázorňuje vlastnosti PLA obr. 2.2. Uplatnenie materiálu je veľmi široké, pričom je často využívaná viacfarebná tlač napr. ozdobných predmetov [20, 21].



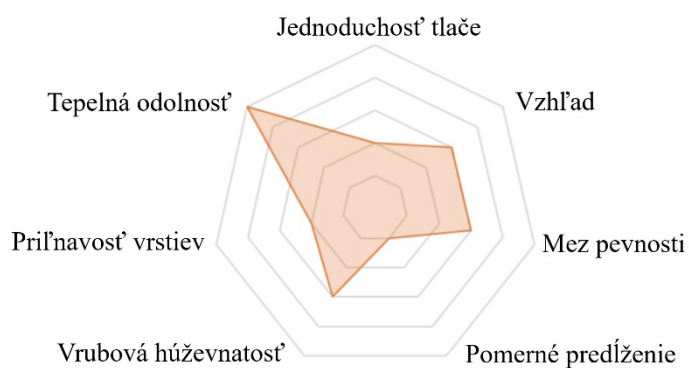
Obr. 2.2 Diagram materiálu PLA – upravené [21].



### 2.2.2 ABS materiál

Akrylonitril-Butadién-Styrénu, skrátene ABS, reprezentuje termoplast vyrábaný z ropy. Vyznačuje sa vysokými hodnotami tuhosti a tvrdosti pri udržaní nízkej hmotnosti modelu. Materiál vykazuje najlepšie vlastnosti v rozmedzí teplôt - 20 °C až + 80 °C a je odolný voči chemikáliám (kyseliny, uhľovodíky, oleje). V porovnaní s ostatnými termoplastami pre 3D tlač má ABS vysokú teplotu topenia v rozmedzí 220 °C až 260 °C. Vďaka tomu je materiál vhodný pre tlač funkčných prototypových modelov v stavebníctve, elektrotechnickom či automobilovom priemysle. Jedným z najväčších užívateľov tohto plastu je spoločnosť LEGO [20, 22].

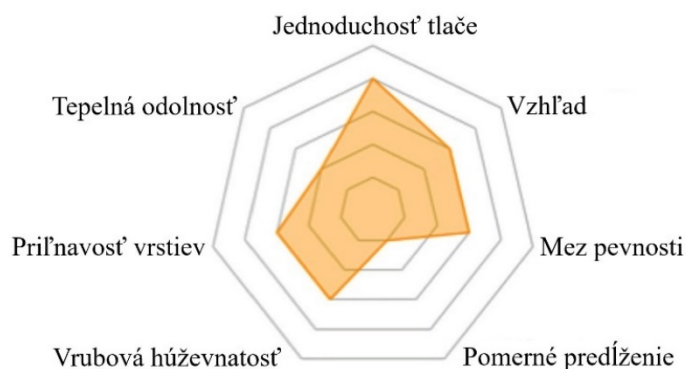
Zrejme najvýznamnejším nedostatkom tohto polyméru je zmršťovanie modelu do seba počas procesu chladnutia. Následná zmena tvaru je pozorovateľná najmä pri väčších výtláčkoch. Zmršťovaniu sa dá čiastočne zamedziť pomalým ochladzovaním. Odporúča sa, aby vytlačený model zostal na vyhriatej podložke tlačiarne až do postupného vychladenia výtláčku. Ďalším nadväzujúcim problémom je slabá priľnavosť prvej vrstvy na podložku (viď obr. 2.3). To sa dá zabezpečiť vyhriatím podložky na minimálne 90 °C a vytvorením tenkej vrstvy ABS na podložke pomocou roztoku rozpusteného ABS v acetóne [20, 22, 23].



Obr. 2.3 Diagram materiálu ABS – upravené [21].

### 2.2.3 PET materiál

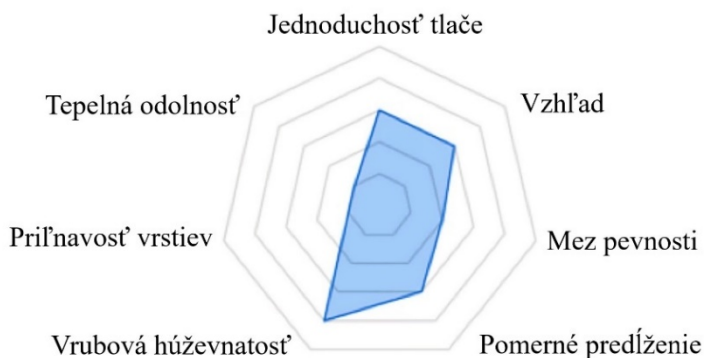
PET, celým názvom polyetyléntereftalát, je materiál vyznačujúci sa vysokou odolnosťou voči nárazom, navlhnutiu a chemikáliám. PET je zdravotne neškodný a je vhodný pre aplikácie, pri ktorých dochádza ku styku s potravinami. Vynikajúce má taktiež elektroizolačné vlastnosti. Rýchlym chladnutím možno vyrobiť amorfný PET (priehľadný) a pomalým chladnutím polokryštalický PET (mliečne zakalený). Pripravuje sa polykondenzáciou etylénglykolu s kyselinou tereftalovou prípadne izoftalovou. Významnou devízou tohto plastu je možnosť úplnej recyklácie. Vysoká stabilita materiálu po recyklácii, ho predurčuje na výrobu obalových materiálov pre potraviny a nápoje či produkciu syntetických vlákien. Medzi rozšírené aplikácie využívajúce metódu FDM patria koncepčné mechanické modely, medicínske modely, nádoby na jedlo a priehľadné objekty. Prehľad vlastností materiálu PET poskytuje obr. 2.4 [21, 23, 24, 25].



Obr. 2.4 Diagram materiálu PET – upravené [21].

### 2.2.4 Materiál nylon

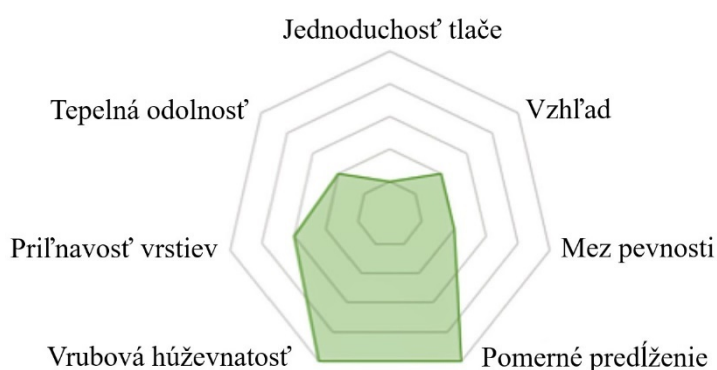
Predstavuje materiál využívaný v inžinierstve, navrhnutý pre výkonnú 3D tlač v laboratóriu a dielni. Pevnosť, pružnosť a odolnosť nylonu umožňujú tlač funkčných prototypov či robustných mechanicky namáhaných dielcov. Materiál je v tenkých vrstvách flexibilný, s vysokou adhéziou medzi vrstvami. Nylon je veľmi hygroskopický, to znamená, že rýchlo absorbuje vodu zo vzduchu, čo môže viesť k nežiaducej tvorbe bublín počas tlače. Pre kvalitnú 3D tlač sa materiál skladuje v uzavretých nádobách s odvlhčovačom. Diagram materiálu nylon na obr. 2.5 poskytuje prehľad jeho vybraných vlastností [21, 23, 26].



Obr. 2.5 Diagram materiálu nylon – upravené [21].

### 2.2.5 TPU materiál

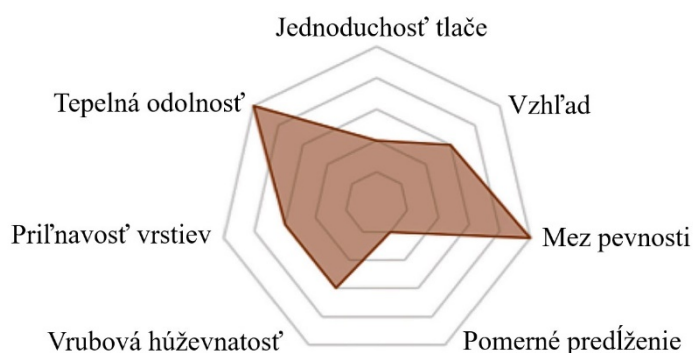
Materiál TPU (termoplastický polyuretan) je univerzálnym polymérom so širokým využitím pre jeho schopnosť kombinovať kvality plastov a gumy. Je mäkký, elastický, ohybný a napriek tomu silný a odolný materiál. Tlač TPU je pomerne náročná, teplota tlače sa pohybuje v rozmedzí 220 °C až 260 °C, vhodné je aj použitie vyhrievanej podložky. V závislosti od použitých aditív TPU odoláva tukom a olejom, ale nie je vhodné ho vystavovať rozpúšťadlám a kyselinám. Pomerne problematická je aj tlač detailov (viď obr. 2.6). Uplatnenie materiálu nachádza nie len v zdravotníctve, ale aj v automobilovom priemysle či výrobe ochranných puzdier pre mobilné telefóny [22, 27].



Obr. 2.6 Diagram materiálu TPU – upravené [21].

### 2.2.6 PC materiál

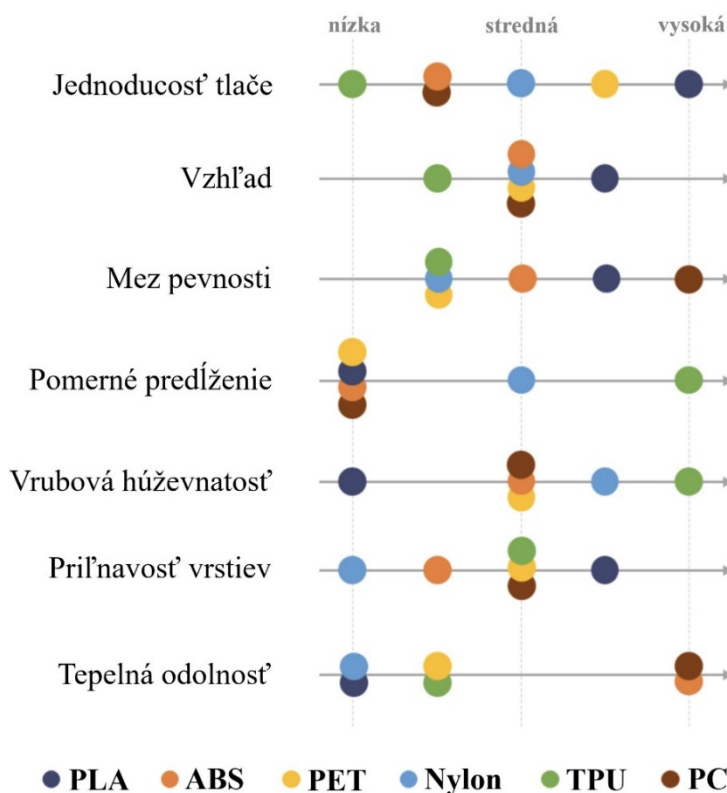
Tento polykarbonát označovaný skratkou PC sa vyznačuje vysokou pevnosťou a tvrdosťou (viď obr. 2.7). Tepelná odolnosť materiálu presahuje hodnotu 110 °C, čo predstavuje najvyššiu hodnotu z porovnávaných materiálov. Čistý polykarbonát je priehľadný, to umožňuje jeho použitie vo výrobe nepriestrelných skiel, potápačských masiek či displejov elektronických zariadení. PC sa vyznačuje stabilitou pri pôsobení UV žiarenia. To umožňuje jeho použitie vo vonkajšom prostredí aj bez použitia špeciálnych aditív. Úprava povrchu výtlačkov je možná pieskovaním a lakovaním. Nevýhodou materiálu sú vysoké nároky na teplotu tlače dosahujúce hodnôt 270 °C až 310 °C. Nevyhnutné je aj použitie vyhrievanej podložky a skladovanie v prostredí s nízkou vlhkosťou [28].



Obr. 2.7 Diagram materiálu PC – upravené [21].

### 2.3 Zhrnutie porovnávaných materiálov

Nasledujúci obrázok sumarizuje vlastnosti polymérov popísaných v predchádzajúcich podkapitolách s cieľom prehľadného porovnania ich vlastností. Z obr. 2.8 vyplýva, že užívateľmi obľúbené PLA má najnižšie nároky na proces tlače, a taktiež dominuje aj vo vzhľade výtlačkov a príľnavosti jednotlivých vrstiev. Výrazne menej v 3D tlači používaný PC dosahuje najvyššiu hodnotu medze pevnosti a spoločne s ABS dosahuje najvyššiu tepelnú odolnosť. Skombinovaním vlastností plastov a gummy dosahuje TPU najlepšie hodnotenie pomerného predĺženia a vrubovej húževnatosti.



Obr. 2.8 Porovnanie vlastností materiálov – upravené [29].

### 3 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ – VÝROBA A TLAČ FILAMENTOV

Touto kapitolou začína praktická časť práce. V kapitole je čitateľ oboznámený s výrobnou spoločnosťou a je vysvetlený výrobný proces 3D filamentov z materiálu PLA. Ďalej sú definované procesné parametre tlače použité pri výrobe vzoriek na 3D tlačiarni PRUSA i3 MK3.

#### 3.1 Úvod do riešenej problematiky

Na výrobu testovaných filamentov bola použitá experimentálna linka spoločnosti Chemosvit Fibrochem, s.r.o. so sídlom v meste Svit. História výroby siaha do roku 1934 a výrobná kapacita spoločnosti prevyšuje 4500 ton vlákna ročne. Jadro produkcie predstavuje výroba polypropylénových vlákien pre rôzne aplikácie. Produkty spoločnosti nachádzajú uplatnenie vo výrobe oblečenia, bandáží, poťahových látok do áut, filtračných materiálov či produkcii lán a pásov [30, 31].

Nadobudnuté skúsenosti a technické zázemie chce spoločnosť využiť a poskytnúť zákazníkovi nový produkt, filament z materiálu PLA určený pre 3D tlač metódou FDM. Pre výrobu testovaného filamentu je použitá experimentálna linka primárne používaná na výrobu polypropylénových vlákien. Účelom experimentálnej linky je testovaním určiť najoptimálnejšie materiálové a technologické požiadavky pre výrobu zákazníkovi zadaného vlákna. Takto vyrobené vlákno je následne v inom špecializovanom laboratóriu spoločnosti ďalej vyhodnocované. Zisťovanými parametrami sú pevnosť, ťažnosť, jemnosť, odtieň farby, prípadne aj úplet. Po schválení nového produktu sú dáta poslané do výrobných častí fabriky. Testovaním sa zabezpečí kvalita výrobkov a znížia náklady pri zavedení nového produktu.

Takto vyrobené filamenty budú následne použité pre 3D tlač s využitím zariadenia PRUSA i3 MK3. Tento typ 3D tlačiarny je súčasťou testovacieho laboratória spoločnosti, zároveň sa však teší aj veľkej obľube medzi budúcimi potencionálnymi zákazníkmi. V súčasnosti spoločnosť využíva experimentálne vyrobené filamenty pre vlastné potreby. Zväčša sa jedná o tlač menších, ťažko vyrobiteľných súčastí potrebných pre údržbu výrobných zariadení. Príklady takýchto súčastí znázorňujú obr. 3.1 a obr. 3.2.



Obr. 3.1 Páka úchopného mechanizmu.



Obr. 3.2 Držiak vlákna.

Pokiaľ má byť budúci PLA filament konkurencieschopný, bude nevyhnutné využiť všetky dominantné vlastnosti tohto materiálu. PLA umožňuje docieľiť veľmi kvalitný povrch a kombinovanú viacfarebnú tlač. Pre výrobu farebného filamentu je nutné do základného PLA granulátu rovnomerne primiešať farbiace aditívum. Použitý základný materiál (100 % PLA) je takmer bielej farby a má označenie PLA3D-173-MK. Finálne filamenty majú tri rozličné farby, zlatú, červenú a čiernu. Konkrétne sa jedná o zlaté organické granulované farbivo s označením STAPA Mastersafe Gold 10103 RG, červený organický pigment s označením Cromophtal red 3890 a čierne anorganické sadze s označením PRINTEX ALPHA. Jednotlivé farbivá sú zobrazené na obr. 3.3 až obr. 3.6.



Obr. 3.3 Základný materiál – 100 % PLA.



Obr. 3.4 Červené farbiace aditívum.



Obr. 3.5 Zlaté farbiace aditívum.





Obr. 3.6 Čierne farbiace aditívum [32].

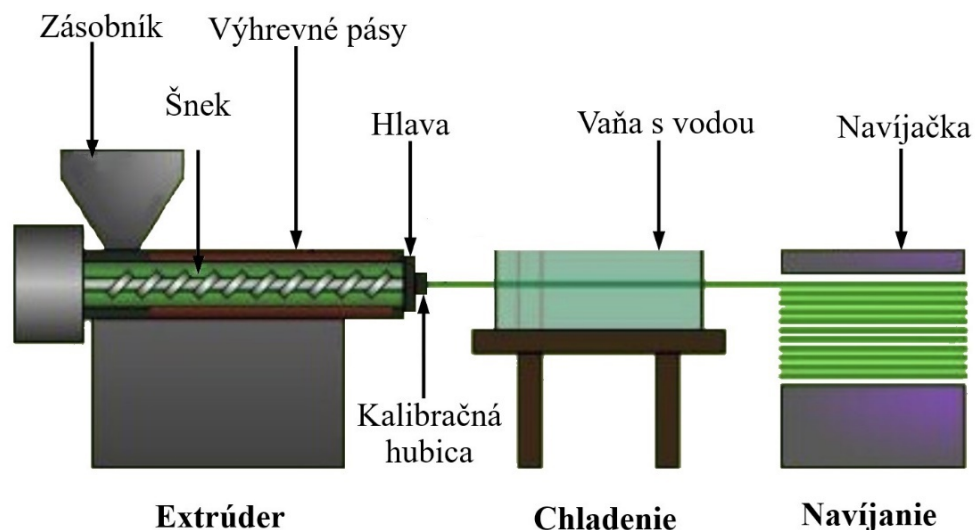
Testované výtlačky sú vyrobené na experimentálnej linke, avšak v prípade pozitívnych výsledkov skúšok a po zhodnotení ďalších faktorov ovplyvňujúcich výrobu, je spoločnosť pripravená investovať do profesionálnej výrobnéj linky, priamo určenej na výrobu 3D filamentov.

### 3.2 Proces výroby filamentov pre 3D tlač metódou FDM

Proces výroby polypropylénových vlákien a 3D filamentov má spoločný základný princíp. Vďaka tomu je možné po prestavení parametrov a menších úpravách vybavenia experimentálnej linky jej použitie na výrobu filamentov. Vstupnou surovinou je 100 % PLA nakupované od externého dodávateľa. Surovina je vysušená vo forme granúl a skladuje sa vo vzduchovo uzatvárateľných nádobách, prípadne vo vreciach. Výrobná dávka predstavuje jednu navinutú cievku filamentu, teda približne 1 kg materiálu. Na výrobu farebných filamentov je potrebné pridať farbiace aditívum. Preto je množstvo materiálu odpovedajúce jednej dávke najprv vložené do miešacej nádoby, v ktorej je strojovo, prípadne ručne materiál premiešaný s cieľom získať homogénnu zmes. Množstvo prídavného farbiva sa líši v závislosti na požadovanom farebnom odtieni a veľkosti výrobnéj dávky. Množstvo farbiacej látky vo vyhodnocovaných filamentoch predstavuje 2 % z celkovej hmotnosti zmesi. Teda približne 20 g. Testovaný je aj filament bez prídavného farbiaceho aditíva.

Takto homogenizovaná zmes je vsypaná do zásobníka, z ktorého je pomocou otáčajúceho sa šneku vedená telom extrúdera. V šneku je zmes pôsobením tepla a tlaku ďalej homogenizovaná, pričom dochádza aj ku jej prechodu do stavu taveniny. K ohrevu zmesi, taktiež nazývanej granulát, dochádza pôsobením trenia medzi šnekom a zmesou, ale aj pôsobením výhrevných zariadení. Použitá linka obsahuje celkovo 3 výhrevné úseky s teplotami 220 °C až 230 °C. Dva obklopujú šnek a jeden je umiestnený v tlačnej hlave nachádzajúcej sa na konci úseku so šnekom. Po natlačení granulátu šnekom do tlačnej hlavy dochádza ku zníženiu tlaku a dodatočnému ohrevu taveniny. Z hlavy je zmes tlačaná zubovým čerpadlom cez kalibračnú hubicu, ktorá má tvar prierezu vyrábaného filamentu. Pre účely testovania bol použitý najčastejšie používaný filament s priemerom 1,75 mm, rozšírené sú však aj filameny s priermi 2,85 mm a 3 mm. Takto kalibrovaný filament je chladený do tuhého stavu vo vodnej vani a navíjaný pomocou navíjačky na kotúč. Teplota vody je rovná teplote okolia, teda približne 22 °C. Rýchlosť navíjania má výrazný vplyv na výsledný priemer filamentu, preto musí byť jej rýchlosť počas výrobného procesu konštantná. Vyššia rýchlosť navíjania znamená filament s menším výsledným priemerom a opačne. Vyrobený filament namotaný na cievke sa predáva vzduchotesne zabalený

v plastovom obale, čo bráni navlhnutiu filamentu. Zjednodušený proces výroby znázorňuje obr. 3.7.



Obr. 3.7 Schematický popis výroby filamentu – upravené [33].

Výrobná rýchlosť použitého zariadenia dosahuje 30 až 35 gramov filamentu za minútu. Ovplyvňuje ju predovšetkým rýchlosťou otáčania šneku, priemer a stúpanie šneku. Tlak v okolí šneku a hubice počas výroby dosahuje hodnotu približne 60 barov. Použitie výrobné zariadenie zobrazuje obr. 3.8 a obr. 3.9.



Obr. 3.8 Experimentálna linka s extrúderom.





Obr. 3.9 Navíjačka filamentu.

Hrúbka filamentu každej cievky bola kontrolovaná minimálne na dvadsiatich miestach pomocou elektronického posuvného meradla. Intervaly hodnôt hrúbky jednotlivých filamentov popisuje tab. 3.1.

Tab. 3.1 Prehľad vlastností filamentov.

Filament	Farbiace aditívum	Hrúbka filamentu [mm]
100 % PLA (biely)	Žiadne	⟨1,71; 1,80⟩
Červený	Organický pigment	⟨1,72; 1,79⟩
Čierny	Anorganické sadze	⟨1,59; 1,83⟩
Zlatý	Organický granulát	⟨1,73; 1,78⟩

Výrobné linky určené priamo na výrobu 3D filamentov merajú hrúbku filamentu pomocou laseru kontinuálne. Každý výrobca si sám určuje povolený interval hodnôt hrúbky pre daný filament. Bežne používané tolerancie hrúbky filamentu dosahujú hodnoty  $\pm 0,05$  mm a  $\pm 0,02$  mm. Pre účely testovania bola požadovaná menej presná odchýlka na úrovni  $\pm 0,05$  mm. Požadovaný interval hodnôt sa podarilo dodržať pri filamente bielej, červenej a zlatej farby. Aj filament čiernej farby však bude naďalej vyhodnocovaný (viď obr. 3.10).



Obr. 3.10 Vyrobené filamenty.

### 3.3 Tlač testovaných vzoriek

Tlač vzoriek z vyrobených filamentov predchádzal návrh 3D virtuálneho modelu. Preto tento účel bol použitý program Autodesk Inventor Professional 2019. Výsledný súbor vo formáte STL bol nahratý do open-source programu PrusaSlicer, v ktorom došlo ku nastaveniu parametrov tlače. Samotná tlač bola po pripojení 3D tlačiarne spustená pomocou voľne dostupného programu Pronterface.

Ponuka 3D tlačiarni založených na metóde FDM je veľmi široká. Základné rozdelenie týchto zariadení je na profesionálne a hobby použitie. Profesionálne tlačiarne sú zväčša v zakrytovanom prevedení, umožňujú tlač rozmernejších výtlačkov pri dodržaní vysokej presnosti a rýchlosti tlače. Ich nevýhodou je predovšetkým vysoká cena a náročnejšia údržba, obzvlášť pri uzavretých tlačiarniach. Uzavretie tlačovej komory však vytvorí prostredie so stabilnou teplotou a vlhkosťou. To vedie ku redukcii zmrštenia a krútenia výtlačkov z materiálov s vysokou teplotnou rozťažnosťou, ako je napr. ABS. Uzavretá verzia taktiež umožňuje odsávanie zdraviu škodlivých výparov.

Skúmaný PLA materiál však nespĺňa ani jednu z týchto podmienok pre nutné použitie uzatvorenej tlačiarne, preto je pre testovanie použitá už vyššie spomenutá otvorená tlačiareň PRUSA i3 MK3 (viď obr. 3.11). Jedná sa o obľúbenú, cenovo dostupnú tlačiareň, ktorá využíva výhrevnú podložku, pre zníženie rozdielu teplôt na spodnej a vrchnej časti tlačeného objektu. To taktiež vedie ku zníženiu nechceného krútenia výtlačku [34].

Použitá tlačiareň je v základnej verzii, a teda dokáže počas tlače pracovať len s jednou cievkou filamentu. Materiál podper a stavebného materiálu je preto rovnaký. Podporný materiál je z tohto dôvodu odstránený vylomením, prípadne aj opilníkovaním.



Obr. 3.11 PRUSA i3 MK3 [35].

Pracovný priestor 3D tlačiarni má veľkosť 250 x 210 x 210 mm. Priemer trysky dosahuje hodnotu 0,25 mm. Procesné parametre tlače boli volené na základe odporúčaní pracovníkov spoločnosti a použitej literatúry. Jednotlivé parametre popisuje tab. 3.2.

Tab. 3.2 Procesné parametre tlače testovaných vzoriek.

<b>Vzor výplne</b>	Rectilinear ( $\pm 45^\circ$ )
<b>Percentuálny podiel výplne</b>	25 / 50 / 70 / 100 %
<b>Teplota tlače</b>	225 °C
<b>Teplota podložky</b>	60 °C
<b>Výška spodnej vrstvy</b>	0,20 mm
<b>Výška ďalších vrstiev</b>	0,15 mm
<b>Počet plných vrstiev vrch / spodok modelu</b>	7 / 5
<b>Rýchlosť tlače plný materiál / výplň</b>	45 / 45 mm/s
<b>Počet perimetrov</b>	4
<b>Chladenie</b>	100 %

Percentuálny podiel výplne, iným názvom hustota výplne, výrazne ovplyvňuje proces tlače, ako aj vlastnosti výtlačku. Počas tlače 3D objektu sa obvodové steny modelu tlačia súvislo, ale výplň objektu je nesúvislá, má tvar mriežky, včelieho plástu, prípadne inú štruktúru. Takýmto spôsobom je možné ušetriť množstvo materiálu a zároveň skrátiť dobu tlače. Percentuálny podiel úspory času potrebného na tlač testovaného výtlačku a množstva použitého materiálu popisuje tab. 3.3 [36].

Tab. 3.3 Vplyv podielu výplne na dobu tlače a množstvo filamentu.

<b>Podiel výplne [%]</b>	<b>Doba tlače prepočítaná na percentá [%]</b>	<b>Objem filamentu prepočítaný na percentá [%]</b>
25	76,97	73,02
50	85,21	81,99
70	92,5	89,20
100	100	100

Z tab. 3.3 jasne vyplýva, že percentuálny podiel výplne výtlačku má výrazný vplyv na dobu tlače a množstvo spotrebovaného filamentu. Pri tlači modelu s podielom výplne 25 % je možné v porovnaní s plným modelom skrátiť dobu tlače o približne 23 % a množstvo použitého filamentu až o takmer 27 %. Z pohľadu úspory času a materiálu je preto najvýhodnejší nižší percentuálny podiel výplne.

Zmena vnútornej štruktúry materiálu však môže viesť ku zmene mechanických vlastností výtlačku. Všeobecné odporúčanie hovorí, že čím viac bude daný výtlačok mechanicky namáhaný, tým vyšší percentuálny podiel výplne by mal obsahovať. Do akej miery je toto odporúčanie pravdivé a aký vplyv na vlastnosti budú mať farbiace aditíva, je predmetom skúmania nasledujúcej časti práce [36].

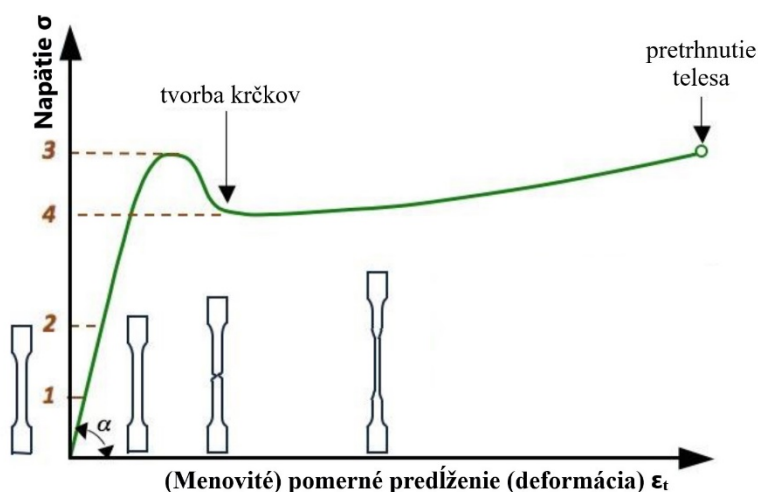
## 4 VPLYV FARBÍV A MNOŽSTVA VÝPLNE NA VLASTNOSTI VÝTLAČKOV

V kapitole je experimentálne vyhodnotený vplyv 3 druhov farbiacich aditív na mechanické a povrchové vlastnosti výtlačkov. Zároveň sa posudzuje vplyv percentuálneho podielu výplne, a to na úrovni 25 %, 50 %, 70 % a 100 %. Spracovávané dáta sú získané na základe ťahovej skúšky, skúšky tvrdosti metódou Shore D a s využitím zariadení určujúcich povrchové vlastnosti vzoriek.

### 4.1 Ťahová skúška

Cieľom statickej skúšky ťahom je vyhodnotiť mechanické vlastnosti materiálov. Princíp spočíva v zaťažovaní skúšobnej tyče pomaly narastajúcou ťahovou silou až do momentu lomu. Počas skúšky sa meria silové zaťaženie pôsobiace na skúšobné teleso a vzdialenosť medzi čeľuťami. Výsledkom sú určené deformačné a napätové charakteristiky, obvykle znázornené deformačnou krivkou, alebo pracovným diagramom. Deformačná krivka (viď obr. 4.1). zobrazuje závislosť deformácie, resp. (menovitého) pomerného predĺženia na normálovom napätí. Skúšaný materiál prechádza štyrmi fázami [37, 38, 39]:

1. Oblasť pružných deformácií.
2. Oblasť od medze úmernosti do medze sklzu.
3. Oblasť rovnomerných trvalých deformácií.
4. Oblasť nerovnomerných trvalých deformácií.



Obr. 4.1 Typická deformačná krivka semikryštalických termoplastov – upravené [39].

Napätie znázornené na obr. 4.1 je definované ako podiel zaťažujúcej sily  $F$  a plochy pôvodného (nedeformovaného) prierezu  $S_0$ . Jedná sa teda o dohovorené napätie  $\sigma$  (viď vzťah 4.1). Skutočné napätie je väčšie, pretože plocha prierezu sa deformáciou znižuje [39].

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (4.1)$$

Medzi ďalšie parametre používané pre zhodnotenie mechanických vlastností skúšobných materiálov patrí pomerné (relatívne) predĺženie  $\varepsilon$  (viď vzťah 4.2), resp. menovité pomerné predĺženie  $\varepsilon_t$  (viď vzťah 4.3).

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0} \cdot 100 [\%] \quad (4.2)$$

$$\varepsilon_t = \frac{L_t}{L} \cdot 100 [\%] \quad (4.3)$$

Kde  $L_0$  je počiatočná meraná dĺžka skúšobného telesa [mm],  $\Delta L_0$  je zväčšenie počiatočnej dĺžky vzorky [mm],  $L$  je upínacia vzdialenosť medzi čeľuťami [mm], a  $L_t$  predstavuje zväčšenie upínacej vzdialenosti medzi čeľuťami [39].

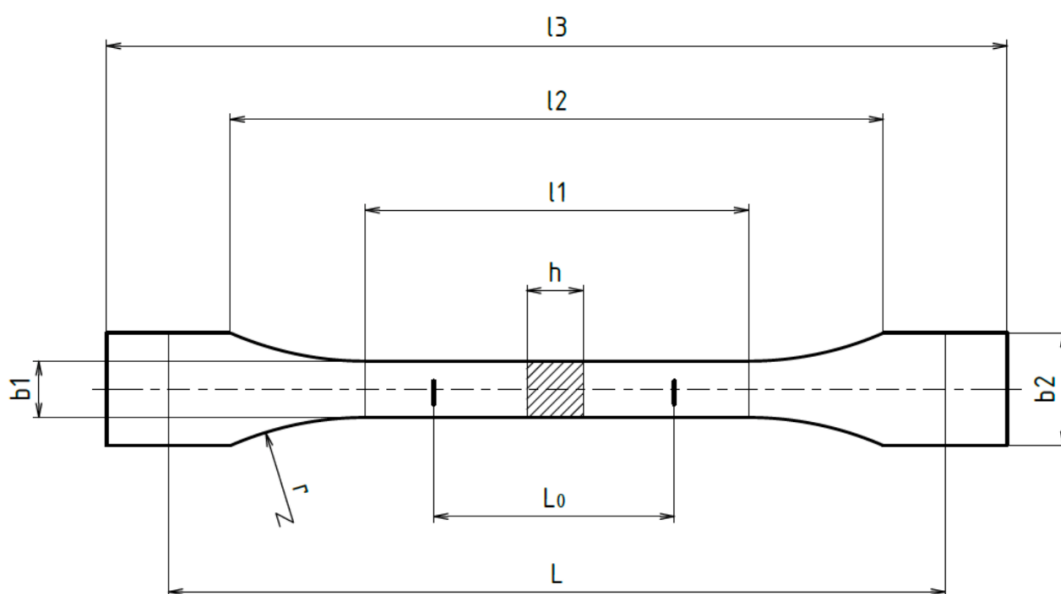
Modul pružnosti v ťahu ( $E$ ) je ďalšou charakteristikou popisujúcou správanie materiálu zaťaženého ťahovým napätím. Táto veličina vyjadruje tuhosť. Čím je hodnota modulu pružnosti vyššia, tým je potrebné väčšie napätie (pri zachovaní prierezu) na dosiahnutie rovnakej deformácie. Hodnota modulu pružnosti sa stanovuje z deformačných kriviek v oblasti Hookovho zákona. Ten hovorí, že deformácia je priamo úmerná napätiu materiálu. Vzťah pre určenie modulu pružnosti v ťahu [39]:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} [\text{MPa}] \quad (4.4)$$

#### 4.1.1 Výber skúšobných vzoriek

Tvary a rozmery testovaných vzoriek (vid' tab. 4.1) boli stanovené na základe normy EN ISO 527-2:2012. Táto norma určuje podmienky pre skúšanie plastových materiálov s cieľom stanovenia ich ťahových vlastností. Norma EN ISO 527-2:2012 je primárne určená pre skúšanie vzoriek zhotovených vstrekaním, vytlačaním, odlievaním a lisovaním. Pretože neexistuje priamo norma definujúca skúšku ťahom pre vzorky vyhotovené aditívnou technológiou, bola zvolená táto norma.

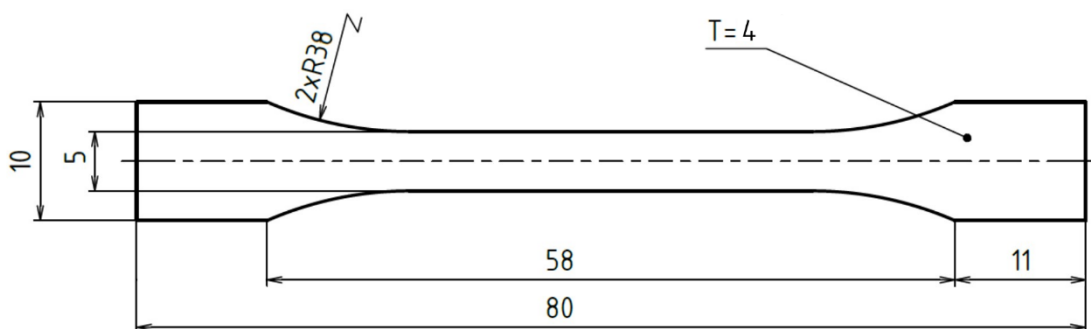
Pre testovanie bola vybraná vzorka typu 1BA (vid' obr. 4.2). Norma stanovuje, že pokiaľ z akýchkoľvek dôvodov nie je možné použiť štandardné skúšobné tyče typu 1A a 1B, tak je možné použiť zmenšené testovacie telesá typu 1BA, 1BB, 5A a 5B. Dôvodom výberu vzorky s menšími rozmermi je predovšetkým úspora materiálu a s tým súvisiace zníženie nákladov. Ďalším dôvodom je úspora času potrebného na výrobu vzoriek. Konkrétne rozmery skúšobných vzoriek popisuje obr. 4.3 [40, 41].



Obr. 4.2 Skúšobná tyč typu 1BA [41].

Tab. 4.1 Tolerancie rozmerov skúšobnej tyče typu 1BA [40, 41].

Parameter	Názov	Rozmer [mm]
$l_3$	Celková dĺžka	$\geq 75$
$l_2$	Vzdialenosť medzi rozšírenými časťami s rovnobežnými hranami	$58 \pm 2$
$l_1$	Dĺžka zúženej časti s rovnobežnými hranami	$30,0 \pm 0,5$
$r$	Polomer	$\geq 30$
$b_2$	Šírka koncov	$10,0 \pm 0,5$
$b_1$	Šírka zúženej časti	$5,0 \pm 0,5$
$L$	Počiatočná vzdialenosť medzi čelust'ami	$l_2 \begin{smallmatrix} +2 \\ 0 \end{smallmatrix}$
$L_0$	Počiatočná meraná dĺžka	$25,0 \pm 0,5$
$h$	Hrúbka	$\geq 2$



Obr. 4.3 Schematické znázornenie skúšobnej tyče.

Každá séria vzoriek podrobených skúške ťahom pozostáva z 8 vzoriek (vid' tab. 4.2). Ich počet bol zvolený v snahe o dosiahnutie čo najrelevantnejších výsledkov s ohľadom na náklady a časovú náročnosť. Celkom bolo v tomto experimente vyhodnotených 128 vzoriek.

Tab. 4.2 Počet vzoriek testovaných ťahovou skúškou.

Filament	Podiel výplne [%]	Počet vzoriek
100 % PLA	25 / 50 / 70 / 100	8 / 8 / 8 / 8
Červený	25 / 50 / 70 / 100	8 / 8 / 8 / 8
Čierny	25 / 50 / 70 / 100	8 / 8 / 8 / 8
Zlatý	25 / 50 / 70 / 100	8 / 8 / 8 / 8

#### 4.1.2 Vykonanie ťahovej skúšky

Ťahová skúška bola vykonaná na testovacom zariadení Zwick Z100 (vid' obr. 4.4). Maximálna povolená hodnota zaťaženia stroja dosahuje 100 kN, čo spĺňa požiadavky na tento experiment. Zariadenie je pomocou dátového kábla pripojené ku počítaču s programom testXpert od firmy Zwick. Pomocou programu sú nastavené vstupné parametre skúšky ako predzaťaženie, rýchlosť zaťažovania, počiatočná vzdialenosť upínacích čelustí či počiatočné rozmery vzoriek. Program taktiež zaznamenáva a vyhodnocuje priebeh skúšky. Medzi vyhodnocované veličiny patrí napr. napätie na medzi pevnosti, modul pružnosti v ťahu či maximálna zaťažujúca sila. Takto získané dáta boli následne vyexportované do programu Excel, kde boli ďalej spracovávané.



Obr. 4.4 Skúšobné zariadenie Zwick Z100.

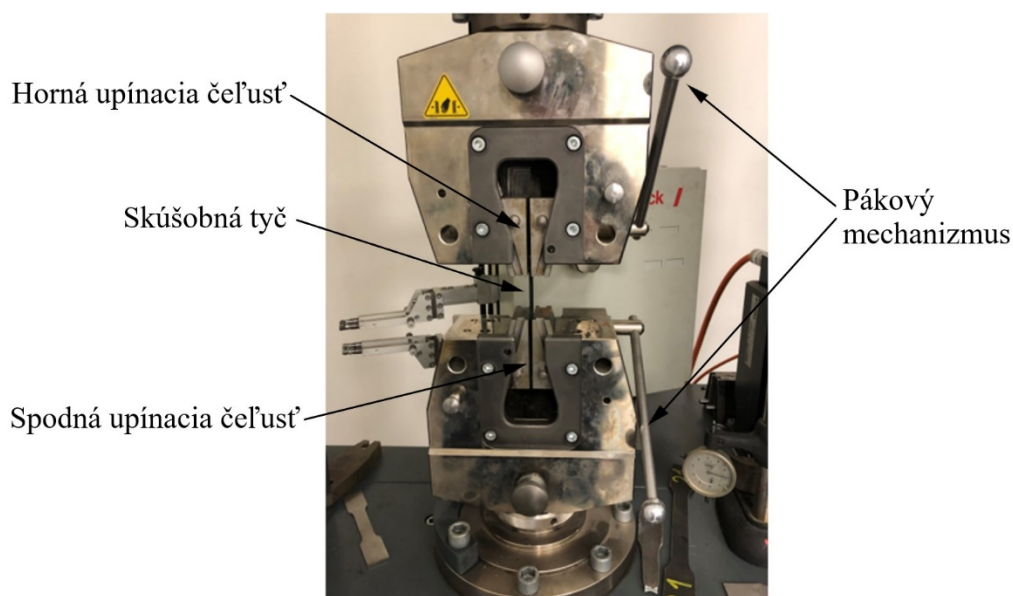
Po zvolení normy EN ISO 527-1:2012 v programe testXpert došlo ku automatickému vyplneniu určitých vstupných parametrov. Následne bola počiatočná vzdialenosť upínacích čelustí nastavená na 60 mm. Takisto hodnota predzaťaženia každej vzorky bola pred skúškou vynulovaná. Každá skúšobná tyč bola pred zaťažovaním premeraná digitálnym posuvným meradlom. Merané boli rozmery v zúženej, teda mernej časti vzorky. Hodnoty hrúbky vzoriek v milimetroch popisuje interval  $\langle 3,91; 4,11 \rangle$  a hodnoty šírky vzoriek v milimetroch predstavuje interval  $\langle 4,97; 5,26 \rangle$ . Po nastavení parametrov skúšky bola do skúšobného zariadenia vložená skúšobná tyč. Každá testovaná vzorka bola ihneď po výrobe viditeľne označená, čím sa zabezpečila prehľadnosť počas testovania. Použité vzorky a spôsob ich značenia zobrazuje nasledujúci obr. 4.5.





Obr. 4.5 Testované vzorky a ich označenie.

Počas upínania vzoriek do čelustí skúšobného zariadenia sa vždy zabezpečí, aby bola pozdĺžna os skúšobnej tyče zhodná s osou skúšobného zariadenia. Len tak je možné zaistiť jednoosé namáhanie vzorky. Pri samotnom upínaní je vzorka najprv vložená medzi spodné čelusti (vid' obr. 4.6), ktoré sa následne s využitím pákového mechanizmu (vid' obr. 4.6) pritlačia na povrch vzorky. Po kontrole rovnobežnosti os dôjde ku pritlačeniu aj horných upínacích čelustí (vid' obr. 4.6). Veľkosť upínacej sily musí mať takú hodnotu, aby nedošlo ku poškodeniu vzorky počas skúšky, zároveň však nesmie dôjsť ani ku jej vykláznutiu z čelustí zariadenia. Z tohto dôvodu je na čelustiach zdrsnený povrch, ktorý zvyšuje hodnotu trenia a zabraňuje vyšmyknutiu skúšobnej tyče počas skúšky.



Obr. 4.6 Upínacia časť skúšobného zariadenia.

Po nastavení vstupných parametrov a upnutí vzorky sa spustí postupné zaťažovanie vzorky. Počas skúšky program testXpert zaznamenáva závislosť vzdialenosti čelustí na pôsobiacu silu a z toho vyplývajúce ďalšie závislosti. Pre úspešné ukončenie testu je nevyhnutné, aby došlo ku lomu v mernej (zúženej) časti skúšobnej tyče. Iba dáta z takto zlomených vzoriek sú ďalej vyhodnocované. Získané dáta sú následne vyexportované do programu Excel a ďalej spracovávané.

#### 4.1.3 Výsledky ťahovej skúšky

Táto podkapitola vyhodnocuje výsledky skúmania vplyvu farbiaceho aditíva a percentuálneho podielu výplne vzoriek na mechanické vlastnosti skúšobných tyčí. Vyhodnotených je celkovo 128 ťahových skúšok v 16 sériách vzoriek. Pre dosiahnutie čo najpresnejších výsledkov, zahŕňa každá séria 8 vzoriek.

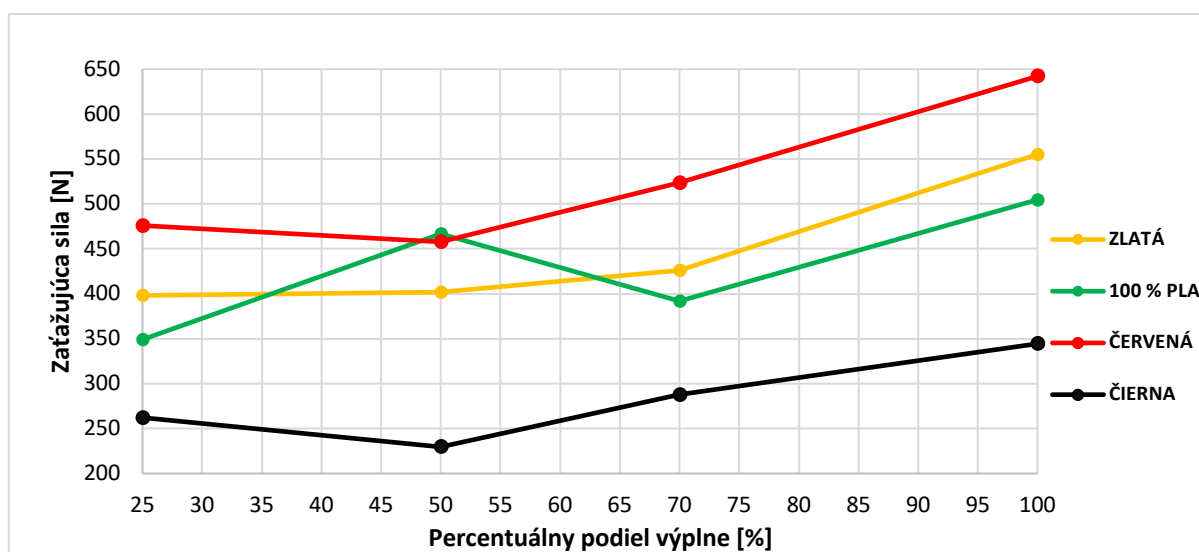
Zobrazené hodnoty v nasledujúcich grafoch sú definované ako mediány ( $\tilde{x}$ ) každej série. Medián (stredná hodnota) predstavuje reálnu hodnotu  $r$ -tej štatistickej jednotky ( $x_r$ ), ktorej poradie ( $r$ ) pri párnom počte hodnôt určuje vzťah (4.5) a nepárnom počte vzťah (4.6) [42].

$$r = \frac{n+1}{2} [-] \quad (4.5)$$

$$r = \frac{n}{2} [-] \quad (4.6)$$

Kde ( $n$ ) predstavuje počet hodnôt v štatistickom súbore.

Veľkosť maximálnej zaťažujúcej sily, ktorú testované vzorky dosiahli pred lomom, popisuje obr. 4.7. Sila je vyhodnotená pre filamenty so zlatým, červeným, čiernym farbiacim aditívom a pre filament zo 100 % základného materiálu PLA. Znárodné sú údaje pre vzorky s percentuálnym podielom výplne 25 %, 50 %, 70 % a 100 %. Maximálna zaťažujúca sila predstavuje kľúčový údaj pre všetky tlakovo a ťahovo namáhané súčasti. Hodnotu maximálneho silového zaťaženia je možné jednoznačne určiť, preto je výhodná pre porovnanie vlastností jednotlivých materiálov.

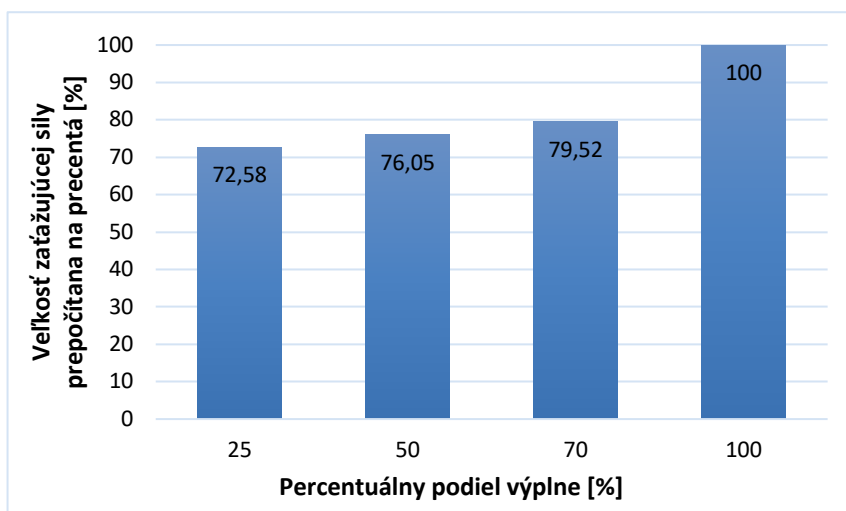


Obr. 4.7 Vplyv percentuálneho podielu výplne a farbiacich aditív na zaťažujúcu silu.

Z obr. 4.7 vyplýva, že na hodnoty silového zaťaženia má vplyv percentuálny podiel výplne, ale aj farbiace aditívum. Konkrétne hodnoty vynesené v obr. 4.7 popisuje tab. 4.3. S nárastom objemu materiálu v skúšobnej vzorke, dochádza aj ku zvýšeniu maximálnej zaťažujúcej sily. Podrobnejšie tento vplyv popisuje nasledujúci obr. 4.8. Z obr. 4.7 je taktiež zrejmé, že pridaním farbiaceho aditíva do základného materiálu (100 % PLA) je možné hodnotu zaťažujúcej sily zvýšiť, ale aj znížiť. Podrobnejšie je vplyv aditív na zaťažujúcu silu popísaný v obr. 4.9.

Tab. 4.3 Hodnoty zaťažujúcej sily pôsobiacej na vzorku.

Filament	Zaťažujúca sila [N]			
	25 %	50 %	70 %	100 %
Zlatý	398,195	401,938	426,203	555,230
100 % PLA	349,084	466,688	391,877	504,719
Červený	475,675	457,758	523,574	642,089
Čierny	262,189	229,621	287,623	344,472
<b>Podiel výplne</b>	<b>25 %</b>	<b>50 %</b>	<b>70 %</b>	<b>100 %</b>

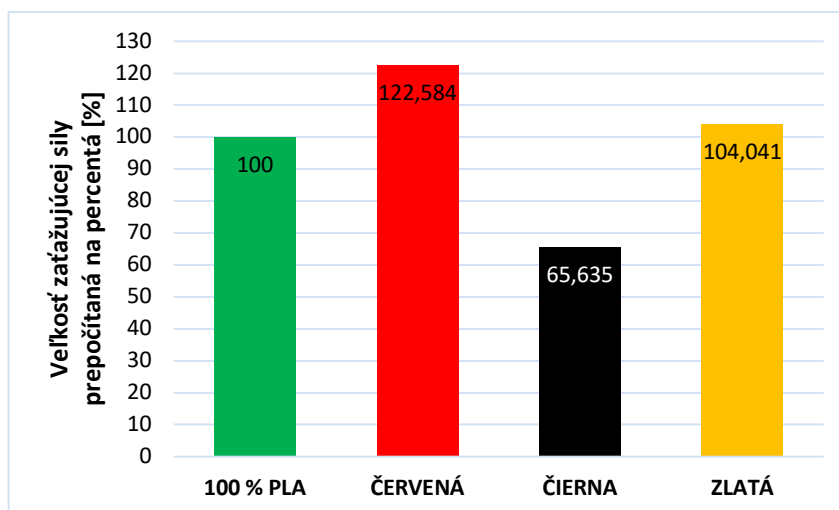


Obr. 4.8 Závislosť zaťažujúcej sily na percentuálnom podiele výplne vzorky.

Ako zobrazuje obr. 4.8, so zvyšujúcim sa percentuálnym podielom výplne narastá aj maximálna ťahová sila, ktorou je možné zaťažiť skúšobnú vzorku. Maximálnu zaťažujúcu silu dosahuje úplne vyplnená vzorka. Hodnoty zaťažujúcich síl jednotlivých stĺpcov v obr. 4.8 a obr. 4.9 sú určené ako súčet príslušných stredných hodnôt vyobrazených v obr. 4.7. Z obr. 4.8 vyplýva, že ku najvýraznejšiemu nárastu zaťažujúcej sily dochádza medzi 70 % výplne a plnou vzorkou. Rozdiel proti úplne vyplnenej vzorke v tomto prípade predstavuje 20,48 %. Naopak, v prípade vzoriek s percentuálnym podielom výplne 25 %, 50 % a 70 % nie je nárast sily tak výrazný.

Na základe týchto zistení je možné podať odporúčanie, že v prípade nízko zaťažovaných výtlačkov, je najvýhodnejšie nastaviť tlač na percentuálny podiel výplne 25 %. Tým sa znížia náklady na použitý filament a zároveň sa aj skráti doba tlače. Pre tlač

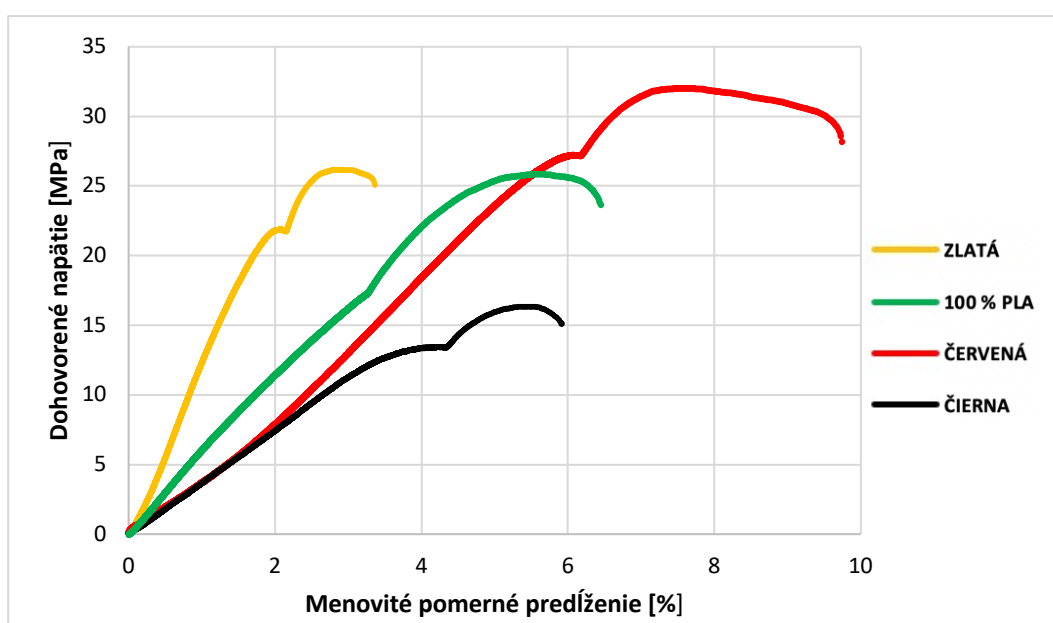
jednoosó výrazne namáhaných súčastí, je vhodné použitie výtlačku so 100 % výplne, čo umožní dosiahnutie najvyšších hodnôt zaťažujúcej sily pre daný materiál.



Obr. 4.9 Vplyv farbiacich aditív na zaťažujúcu silu pôsobiacu na vzorku.

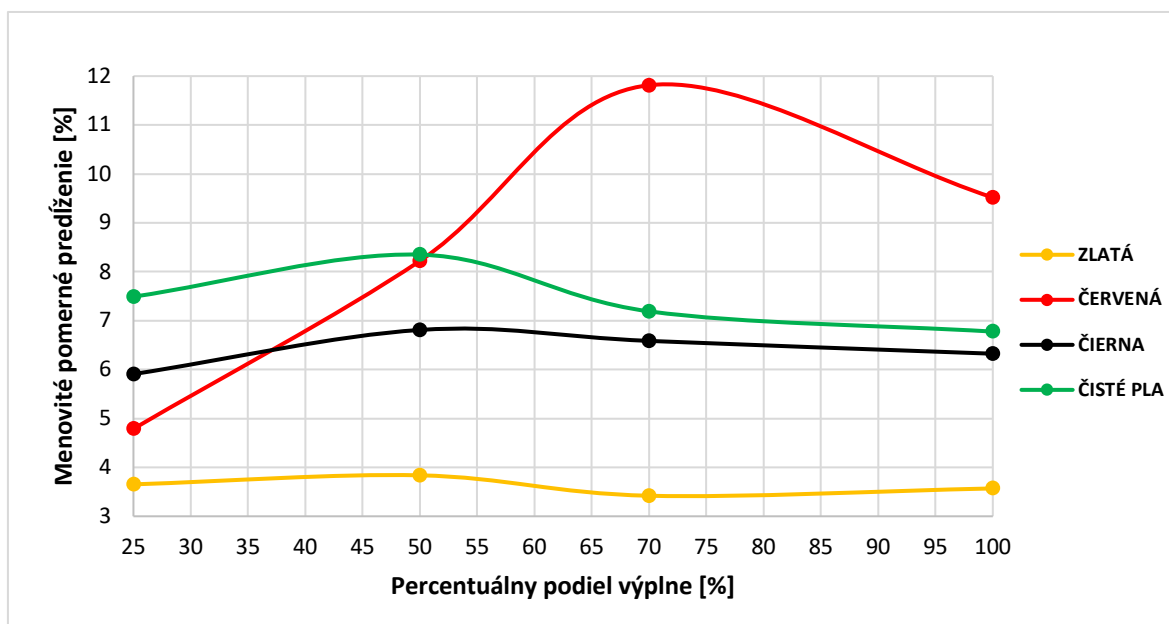
Z obr. 4.9 vyplýva, že farbiace aditívum ma výrazný vplyv na mechanické vlastnosti výtlačkov. Najvyššie hodnoty silového zaťaženia dosiahli vzorky z filamentu s červeným aditívom, pričom voči základnému materiálu došlo ku zvýšeniu sily až o 22,584 %. Ku menej výraznému nárastu zaťaženia došlo vplyvom zlatého aditíva, a to približne o 4 %. Zatiaľ čo primiešaním čierneho aditíva došlo ku poklesu zaťaženia až o 34,365 %. Vzorky s čiernym aditívom teda dosahujú výrazne horšie výsledky v ťahovej skúške než vzorky zo 100 % PLA.

Na vykreslenie závislosti dohovoreného napätia na menovitom pomernom predĺžení slúži ťahový diagram. Tento diagram patrí medzi základné výstupy ťahovej skúšky a pre vybrané výtlačky so 100 % podielom výplne je zobrazený na obr. 4.10.



Obr. 4.10 Ťahový diagram.

Z ťahového diagramu je zrejmé, že najvyššie hodnoty medze pevnosti, ako aj menovitého pomerného predĺženia, dosiahla vzorka z červeného filamentu. Vzorka zlatej farby dosahuje druhú najvyššiu hodnotu medze pevnosti, zároveň však aj najnižšie menovité pomerné predĺženie. Na základe obr. 4.10 teda neexistuje závislosť medzi dohovoreným napätím a menovitým pomerným predĺžením. Hodnoty menovitého pomerného predĺženia v závislosti na percentuálnom podiele výplne popisuje obr. 4.11.



Obr. 4.11 Závislosť menovitého pomerného predĺženia na percentuálnom podiele výplne vzorky.

Pridaním farbiaceho aditíva do základného materiálu PLA došlo u všetkých filamentov ku zníženiu menovitého pomerného predĺženia, okrem vzorky z červeného filamentu, a to len na intervale percentuálneho podielu výplne 50 % až 100 %. U všetkých vzoriek dochádza ku nárastu menovitého pomerného predĺženia pri zvýšení percentuálneho podielu výplne vzorky z 25 % na 50 %. Priebeh závislosti červeného filamentu sa výrazne líši od ostatných filamentov, pričom ako u jediného z nich došlo s nárastom percentuálneho podielu výplne vzorky z 25 % na 100 % aj ku výraznému nárastu hodnoty menovitého pomerného predĺženia. Farbiace aditívum, rovnako ako aj percentuálny podiel výplne vzorky majú, na základe obr. 4.11, vplyv na menovité pomerné predĺženie zaťažovaných vzoriek.

## 4.2 Skúška tvrdosti

Pre meranie tvrdosti vzoriek bola použitá metóda Shore D. Rozsah tvrdosti meraných vzoriek touto metódou predstavuje 10 až 90 jednotiek HShD. Meranie prebiehalo na tvrdomeri od firmy Digi Tech (viď obr. 4.12). Princíp metódy spočíva vo vtláčení indentoru (tvar kužele) do vzorky po dobu 15 sekúnd. Následne sa z displeja odčítala hodnota tvrdosti.

Na základe odbornej konzultácie s pracovníkom spoločnosti poskytujúcej testovacie zariadenie bolo rozhodnuté, že z dôvodu zníženia nákladov budú použité rovnaké vzorky, ako pri skúške ťahom. Testované boli vzorky zo 100 % PLA a s primiešaným červeným,

čiernym a zlatým farbiacim aditívom. Percentuálny podiel výplne vzoriek bol 25 %, 50 %, 70 % a 100 %. Každá séria obsahuje 6 vzoriek s dvoma miestami merania na vzorke.

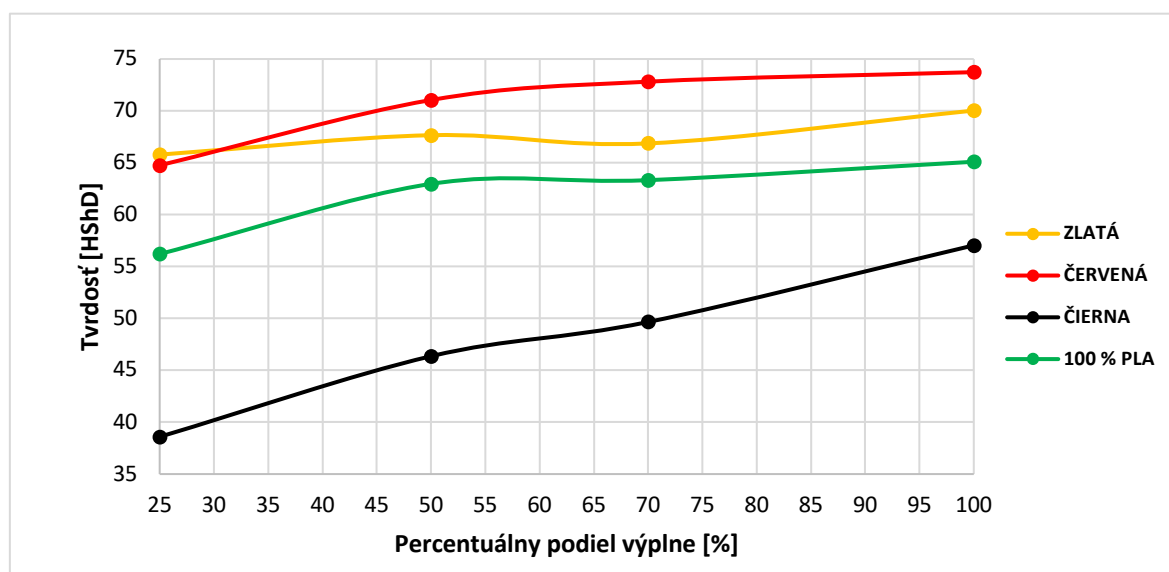


Obr. 4.12 Zariadenie určené na meranie tvrdosti.

Merané miesta sa pri tlači vzorky na plochu nachádzali na najvzdialenejšej ploche od podložky 3D tlačiarne (vrchná plocha vzorky). Presnejšie sa miesta vtláčenia nachádzali v stredoch rozšírených častí skúšobných vzoriek (viď obr. 4.13).



Obr. 4.13 Vyznačené miesta vtláčenia indentoru do vzorky.



Obr. 4.14 Vplyv percentuálneho podielu výplne a farbiacich aditív na tvrdosť vzorky.



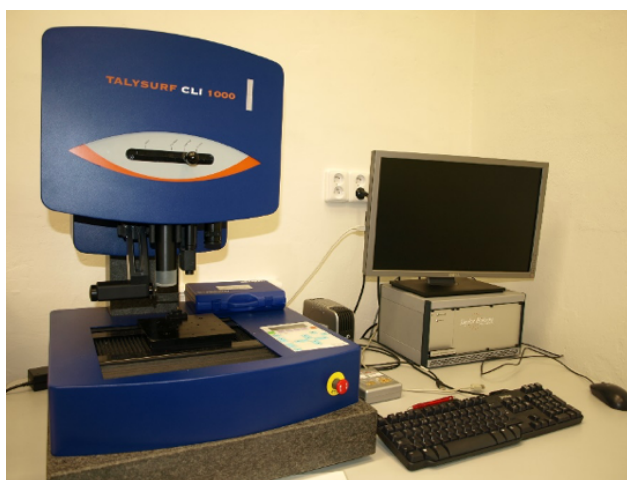
Závislosť tvrdosti na percentuálnom podiele výplne, pre rozličné farbivé aditíva, popisuje obr. 4.14. Hodnoty vynesené v tomto grafe predstavujú stredné hodnoty vždy z 12 meraní v sérii. Z grafu je zreteľný stúpajúci trend hodnôt tvrdosti pri narastajúcom percentuálnom podiele výplne vzoriek. Prídanie farbivého aditíva malo taktiež značný vplyv na tvrdosť vzoriek.

Najvyššie hodnoty tvrdosti dosahujú vzorky úplne vyplnené materiálom. Celkovo najvyššiu tvrdosť 73,733 HShD dosahuje červená vzorka so 100 % podielom výplne. Najmenej výrazný nárast tvrdosti zaznamenala vzorka so zlatým farbivým aditívom. Pri zvýšení percentuálneho podielu výplne z 25 % na 100 % došlo ku nárastu tvrdosti len o 5,275 HShD. Naopak, najvýraznejší nárast tvrdosti z 38,592 HShD na 57,042 HShD pri 100 % podiele výplne zaznamenala vzorka s čiernym farbivým aditívom.

Pri daných podmienkach prídanie červeného a zlatého farbivého aditíva, zvýšilo hodnoty nameranej tvrdosti. Naopak, prídanie čierneho aditíva, došlo ku výraznému zníženiu hodnôt tvrdosti.

### 4.3 Metodika analýzy textúry povrchu

Snímky povrchu skúšobných vzoriek boli vytvorené na metalografickom mikroskope OLYMPUS DSX100, pri zväčšení 25krát a 100krát. Textúra povrchu bola určená s využitím prístroja Talysurf CLI 1000 (viď obr. 4.15), výsledky boli vyhodnotené pomocou softwaru TalyMap Platinum. Pre analyzované povrchy bol zvolený dotykový spôsob merania s parametrami uvedenými v tab. 4.4.



Obr. 4.15 Merací prístroj *Talysurf CLI 1000*.

Tab. 4.4 Parametre merania textúry povrchu.

Metóda	Polomer hrotu	Sila na hrot	Snímaná plocha	Vyhodnocovaná dĺžka	Filter
Indukčná	2 $\mu$ m	15 mN až 25 mN	2 mm x 2 mm	12 mm	Gaussov

Pre analýzu povrchu boli na 3D tlačiarňi vyrobené celkom 4 vzorky s rozmermi rovnakými ako pri skúške ťahom (viď obr. 4.3). Všetky vzorky mali percentuálny podiel výplne 100 %, líšili sa však prídavným farbivým aditívom. Vyhodnocované boli vzorky s červeným, čiernym a zlatým farbivým aditívom, rovnako ako aj vzorka zo 100 % PLA.

Každý materiál bol reprezentovaný jednou skúšobnou vzorkou. Merané miesta sa pri orientácii vzorky na plochu nachádzali na vrchnej a spodnej ploche vzorky. Na každej ploche bolo vykonané jedno meranie, ktoré bolo vždy v strede širšej (upínacej) časti vzorky. Posledné miesto merania sa nachádzalo na bočnej ploche v strednej (mernej) časti vzorky.

V rámci merania 3D plochy (priestorových parametrov textúry povrchu) boli vyhodnocované základné amplitúdové parametre  $S_a$ ,  $S_q$ ,  $S_t$  a  $S_z$ , ktoré predstavujú skupinu parametrov priestorového hodnotenia a vychádzajú z rozloženia výšok súradníc profilu povrchu.

Tab. 4.5 Označenia a názvy použitých 3D parametrov textúry povrchu [43].

Parameter	Celý názov	Jednotka
$S_a$	Priemerná aritmetická úchylka povrchu	$\mu\text{m}$
$S_q$	Priemerná kvadratická úchylka povrchu	
$S_t$	Celková výška povrchu	
$S_z$	Výška z desiatich bodov povrchu	

Z 2D parametrov drsnosti boli určené amplitúdové (výškové) parametre  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_t$  a  $R_z$ . Vlnitosť bola hodnotená amplitúdovými parametrami  $W_a$ ,  $W_q$ ,  $W_t$  a  $W_z$ . Celé názvy parametrov drsnosti a vlnitosti popisuje tab. 4.6.

Tab. 4.6 Označenia a názvy použitých 2D parametrov drsnosti a vlnitosti povrchu [44].

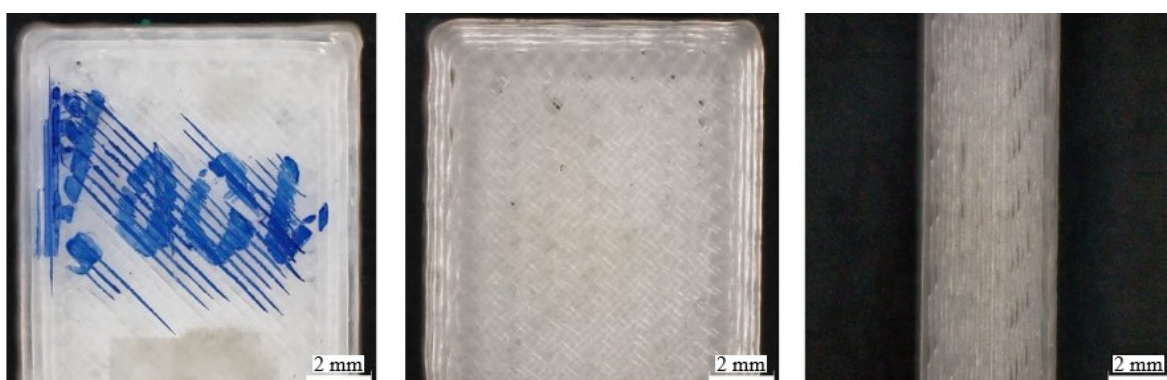
Parameter	Celý názov	Jednotka	
Drsnosť	$R_a$	Priemerná aritmetická úchylka profilu drsnosti	$\mu\text{m}$
	$R_q$	Priemerná kvadratická úchylka profilu drsnosti	
	$R_t$	Celková výška profilu drsnosti	
	$R_z$	Najväčšia výška profilu drsnosti	
Vlnitosť	$W_a$	Priemerná aritmetická úchylka profilu vlnitosti	
	$W_q$	Priemerná kvadratická úchylka profilu drsnosti	
	$W_t$	Celková výška profilu vlnitosti	
	$W_z$	Najväčšia výška profilu vlnitosti	



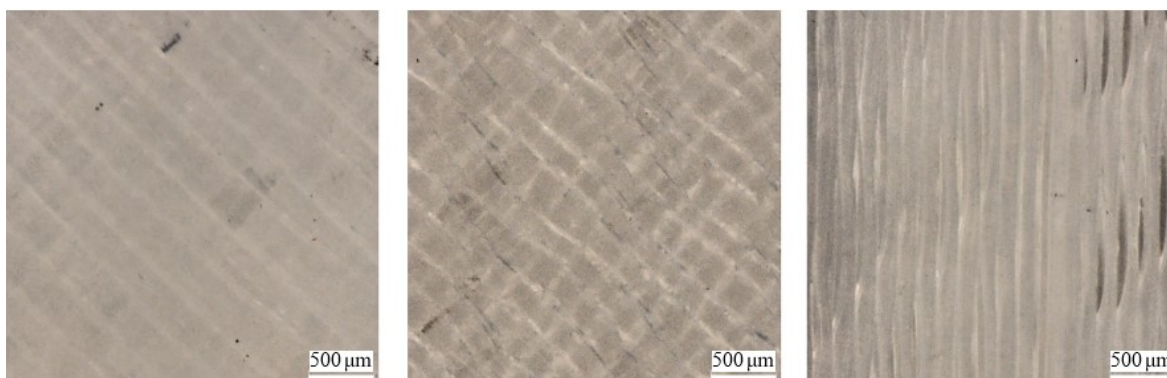
### 4.3.1 Výsledky analýzy textúry povrchu – 100 % PLA

Snímky z merania vzorky zo 100 % PLA pri zväčšení 25krát popisuje obr. 4.16. Na obrázku sú viditeľné rozdiely štruktúry povrchu medzi jednotlivými plochami. Snímky vrchnej a spodnej plochy zobrazujú odlišnú orientáciu vlákien vnútornej výplne a smeru vlákien pri tlači obvodových perimetrov.

Obr. 4.17 dokumentuje detaily meraných plôch pri zväčšení 100krát. Obrázok opäť zobrazuje jasné rozdiely štruktúry jednotlivých plôch. Rozdiel medzi vrchnou a spodnou plochou je spôsobený predovšetkým pôsobením tepla z výhrevnej podložky a vplyvom tlaku filamentu vyšších vrstiev na vrstvy pod nimi. V porovnaní s vodorovnými plochami je bočná plocha vzorky charakterizovaná rozdielnou textúrou povrchu. Na povrchu má viditeľnú orientovanú morfológiu jednotlivých vlákien.



Obr. 4.16 Vrchná plocha (vľavo), spodná plocha (stred), bočná plocha (vpravo) pri zväčšení 25krát.

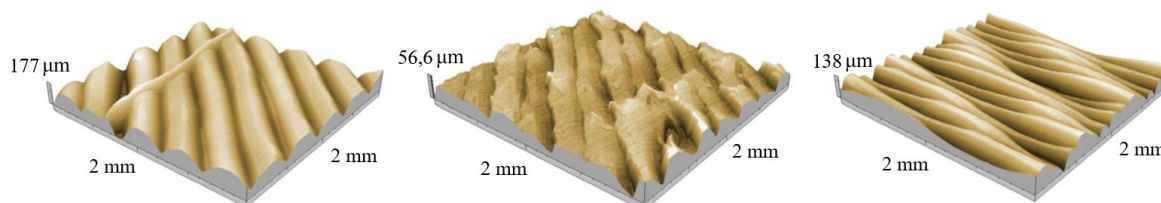


Obr. 4.17 Vrchná plocha (vľavo), spodná plocha (stred), bočná plocha (vpravo) pri zväčšení 100krát.

3D plochy hodnotených oblastí zobrazuje obr. 4.18. Vrchná plocha (vľavo) vykazuje hladký, periodický povrch tvorený výstupkami kruhového prierezu, ktoré majú rovnaký priemer (rovnakú mikogeometriu). Ďalej sú medzi výstupkami viditeľné pomerne hlboké priehlbiny. V ľavej časti hodnotenej vrchnej plochy je zreteľný dominantný výstupok s odlišnou orientáciou a ostrým vrcholom. V tomto prípade sa jedná o chybné položený filament na povrch výtlačku.

Spodná plocha (v strede) na obr. 4.18 je charakteristická orientovanou mikogeometriou výstupkov a priehlbín, avšak s výraznou morfológiou výstupkov, ktoré majú ostré vrcholy. V pravej spodnej časti hodnotenej plochy je možné si všimnúť väčšej priehlbiny. Smery výstupkov vrchnej a spodnej plochy sú identické.

3D zobrazenie bočnej plochy vzorky znázorňuje odlišnú mikrogeometriu povrchu, ktorá je tvorená dominantnými, orientovanými výstupkami, na povrchoch ktorých sú viditeľné ďalšie menšie výstupky orientované do tvaru skrutkovice. Morfológia vykazuje určitú periodicitu, resp. opakovanie výstupkov a priehlbín.



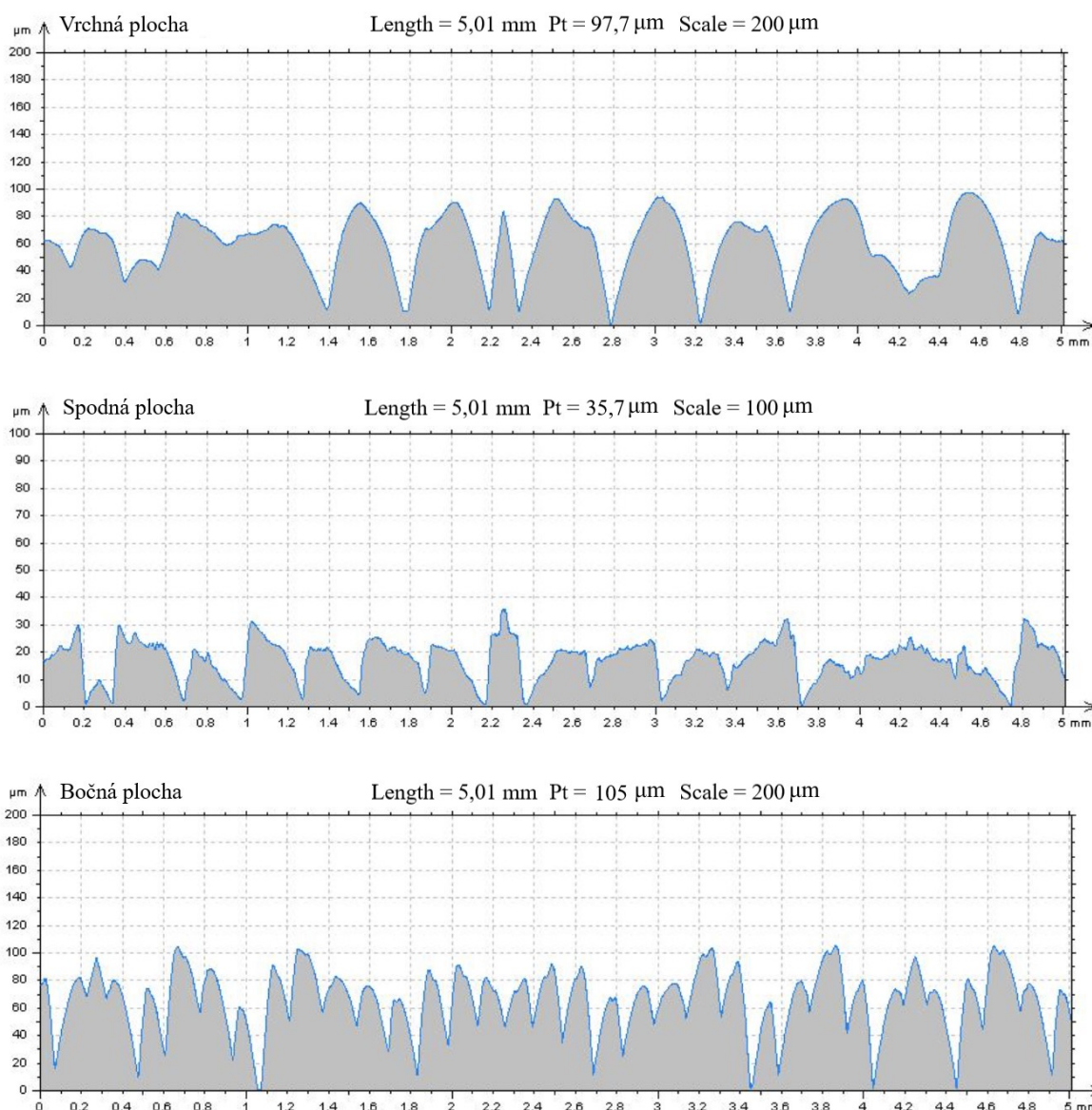
Obr. 4.18 3D plochy meranej oblasti – vrchná plocha (vľavo), spodná plocha (stred), bok (vpravo).

Namerané 3D parametre textúry hodnotenej plochy, vzorky zo 100 % PLA, popisuje tab. 4.7. Určené výsledky poukazujú na podobné hodnoty amplitúdových parametrov plochy v prípade vrchnej a bočnej plochy vzorky. Spodná plocha vykazuje najnižšie hodnoty parametrov plochy.

Tab. 4.7 Namerané hodnoty 3D parametrov textúry povrchu – vzorka zo 100 % PLA.

Hodnotené parametre	Namerané hodnoty [ $\mu\text{m}$ ]		
	Vrchná plocha	Spodná plocha	Bočná plocha
Sa	26,4	7,9	24,5
Sq	32,6	10,1	30,1
St	177,0	56,6	138,0
Sz	163,0	54,6	137,0

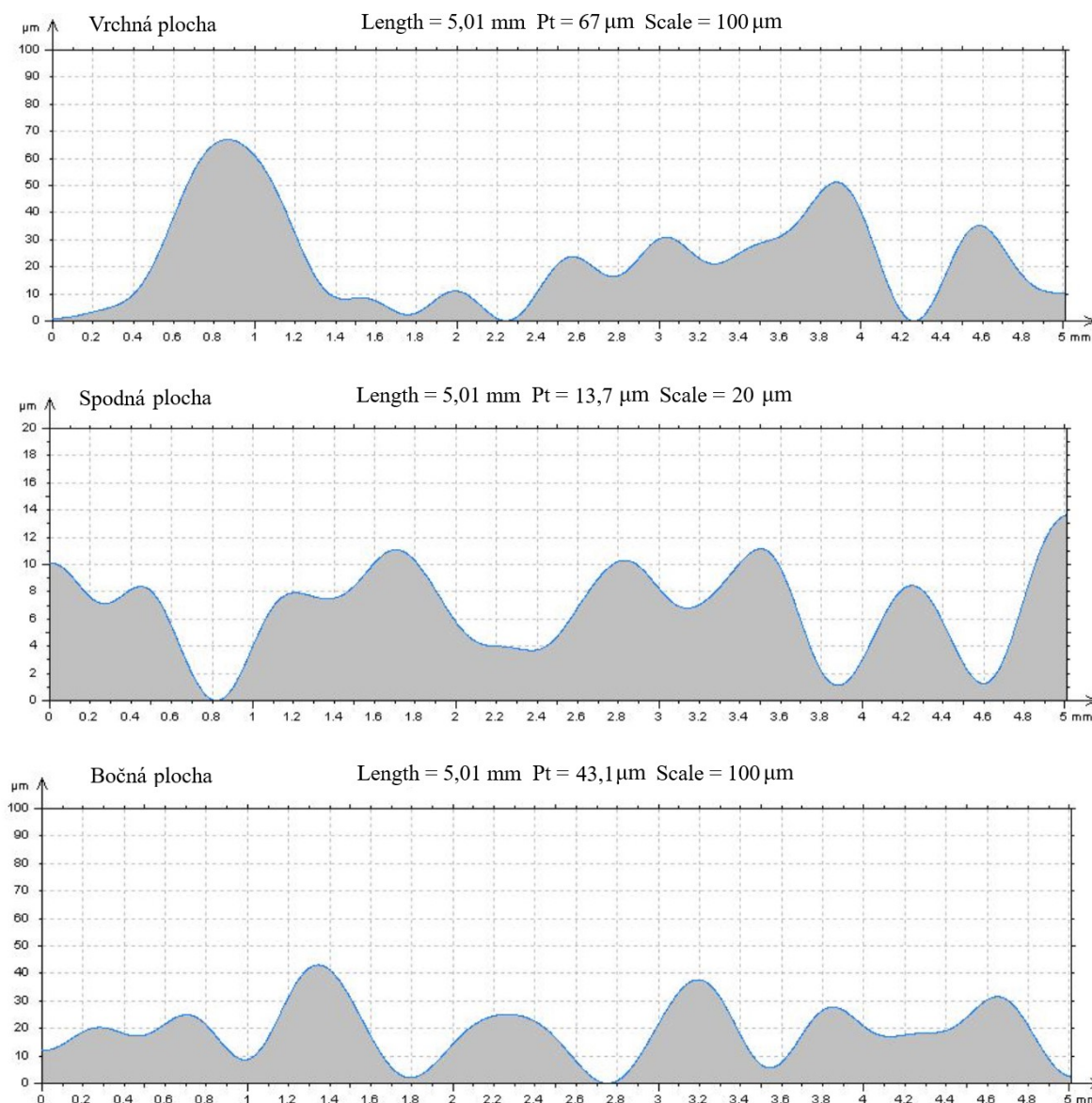
2D profily drsnosti povrchu meranej vzorky popisuje obr. 4.19. 2D profily boli analyzované na vyhodnocovanej dĺžke 12 mm, na obr. 4.19 sú znázornené profily po priblížení vyhodnocovanej dĺžky na hodnotu 5 mm.



Obr. 4.19 Profily drsnosti povrchu vzorky zo 100 % PLA.

Z profilov drsnosti sú zjavné rozdiely v mikrogeometrii jednotlivých analyzovaných plôch. Morfológie profilov korelujú s 3D štruktúrami zobrazenými na obr. 4.18. Vrchná plocha je charakteristická vyššími výstupkami s oblými vrcholmi a hlbokými priehlbunami. Tieto výrazné priehlbiny sú spôsobené nedokonalým ukladaním vrstiev filamentu vedľa seba. Výška výstupkov má zase priamy súvis s výškou jednotlivých vrstiev. Spodná plocha vykazuje menšiu výšku výstupkov hranatého tvaru. Bočnú plochu vzorky reprezentuje výrazná mikrogeometria s vyšším počtom úzkych výstupkov a ostrých priehlbín.

Profily vlnitosti dokumentuje obr. 4.20. Najvýraznejšiu vlnitosť dosahuje vrchná plocha. Najmenšia vlnitosť bola nameraná v prípade spodnej plochy.



Obr. 4.20 Profily vlnitosti povrchu vzorky zo 100 % PLA.

Výsledky meraní vybraných 2D parametrov drsnosti a vlnitosti profilov vzorky zobrazuje tab. 4.8. Získané hodnoty sú však výrazne ovplyvňované procesnými parametrami tlače. Z tohto dôvodu je možné uplatniť výsledky len pri výtlačkoch tlačených za podmienok popísaných v tab. 3.2 a bez dodatočnej úpravy povrchu.



Tab. 4.8 Namerané hodnoty 2D parametrov drsnosti a vlnitosti vzorky zo 100 % PLA.

Hodnotené parametre		Namerané hodnoty [ $\mu\text{m}$ ]		
		Vrchná plocha	Spodná plocha	Bočná plocha
Drsnosť	Ra	15,60	5,23	15,50
	Rq	18,70	6,51	19,40
	Rt	85,60	35,20	96,50
	Rz	71,60	29,10	85,60
Vlnitosť	Wa	4,15	1,00	4,08
	Wq	4,77	1,13	4,68
	Wt	23,80	4,84	18,50
	Wz	14,00	3,22	14,20

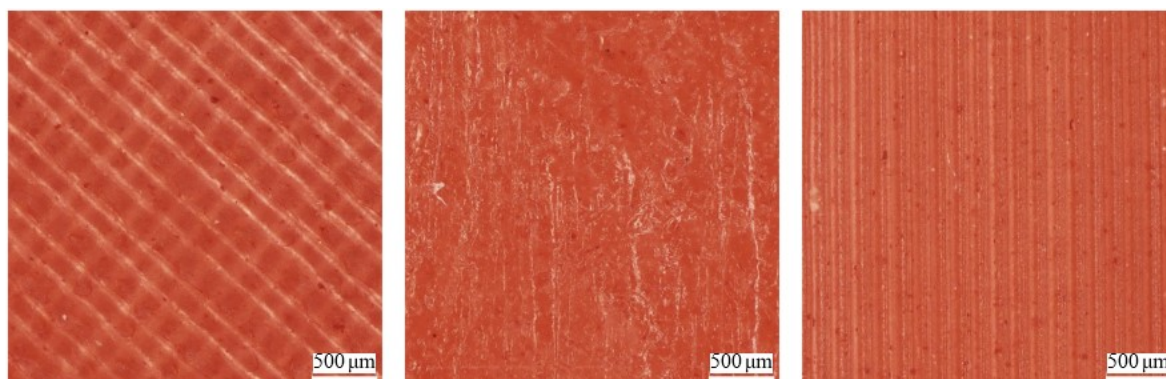
Z dosiahnutých výsledkov drsnosti a vlnitosti vyplýva, že spodná plocha dosiahla výrazne nižších hodnôt všetkých meraných parametrov. Výsledky meraní na vrchnej a bočnej ploche sa líšia len minimálne.

#### 4.3.2 Výsledky analýzy textúry povrchu – červené aditívum

Na snímkach vzorky z materiálu PLA s prídavným červeným aditívom je viditeľná výrazne rozdielna textúra povrchu medzi vrchnou a spodnou plochou, vid' obr. 4.21. Vrchná plocha je charakteristická periodickou štruktúrou navzájom kolmých vlákien. Na spodnej ploche je možné pozorovať neperiodický povrch, ktorého štruktúra je viditeľná pri väčšom zväčšení na obr. 4.22. S najväčšou pravdepodobnosťou sa jedná o povrch poškodený teplom z vyhrievanej podložky 3D tlačiarne. Na bočnej ploche je pozorovateľná orientovaná štruktúra pozdĺžnych vlákien bez viditeľných defektov povrchu.

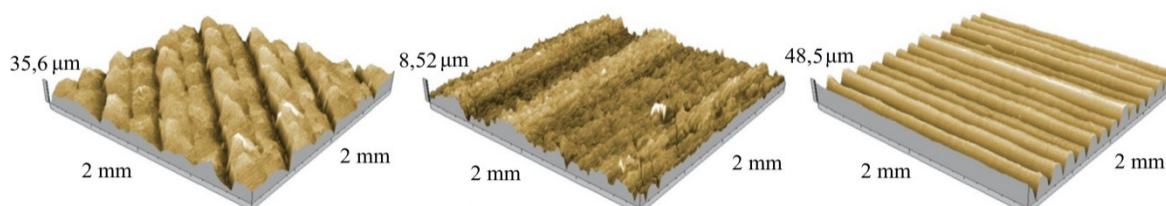


Obr. 4.21 Vrchná plocha (vľavo), spodná plocha (stred), bočná plocha (vpravo) pri zväčšení 25krát.



Obr. 4.22 Vrchná plocha (vľavo), spodná plocha (stred), bočná plocha (vpravo) pri zväčšení 100krát.

Na obr. 4.23 sú zobrazené 3D štruktúry povrchu hodnotených plôch vzorky. Vrchná plocha je tvorená periodicky sa opakujúcimi výstupkami na orientovaných nerovnostiach s tupými vrcholmi a ostrými, hlbokými priehlbunami. Spodná plocha má neperiodickú štruktúru s dvoma dominantnými výstupkami prechádzajúcimi celou hodnotenou plochou. Bok vzorky je charakteristický periodickým profilom, ktorý je tvorený rozmerovo rovnakými dominantnými výstupkami s hladkým povrchom a orientáciou rovnakým smerom. Priehlbiny na bočnej ploche vzorky sú ostré.



Obr. 4.23 3D plochy meranej oblasti – vrchná plocha (vľavo), spodná plocha (stred), bok (vpravo).

3D parametre plochy, namerané na vzorke s červeným aditívom, dokumentuje tab. 4.9. Najvyššie hodnoty parametrov dosiahla bočná plocha. Najnižšie hodnoty boli opäť namerané na spodnej ploche, pričom hodnoty na nej určené, sú približne 4krát nižšie než hodnoty 3D parametrov vrchnej plochy.

Tab. 4.9 Namerané hodnoty 3D parametrov textúry povrchu – vzorka s červeným aditívom.

Hodnotené parametre	Namerané hodnoty [ $\mu\text{m}$ ]		
	Vrchná plocha	Spodná plocha	Bočná plocha
Sa	5,3	1,4	9,1
Sq	7,0	1,7	11,1
St	35,6	8,6	48,6
Sz	35,4	8,4	48,4

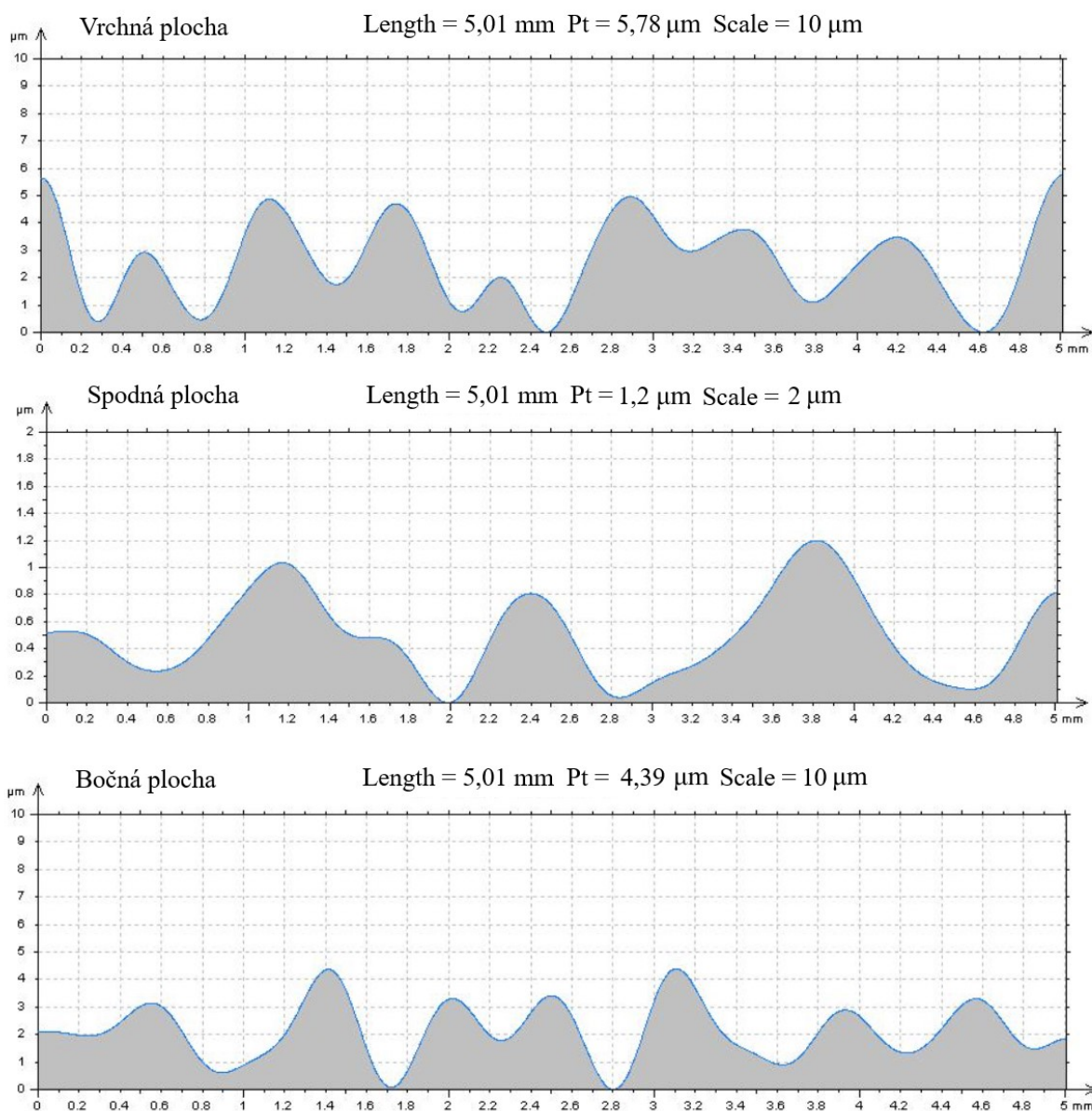


Obr. 4.24 Profily drsnosti povrchu vzorky s červeným aditívom.

2D profil drsnosti povrchu vrchnej plochy (viď obr. 4.24) je neperiodický, s dominantnými výstupkami a priehlbinami. Profil spodnej plochy sa podobá brúsenému povrchu, je neperiodický, s ostrými výstupkami a priehlbinami. Profil boku vzorky sa dá charakterizovať ako periodický s opakujúcimi sa vyššími výstupkami a ostrými priehlbinami.

Profily vlnitosti dokumentuje obr. 4.25. Výraznejšia vlnitosť je pozorovateľná na vrchnej a bočnej ploche vzorky. Vlnitosti týchto plôch dosahujú podobnú morfológiu. Vlnitosť spodnej plochy má menšie hodnoty vlnitosti, a teda aj menej výraznú mikrogeometriu.





Obr. 4.25 Profily vlnitosti povrchu vzorky s červeným aditívom.

Výsledky meraní 2D parametrov drsnosti a vlnitosti hodnotených profilov vzorky s červeným aditívom popisuje tab. 4.10. Najvyšších hodnôt drsnosti aj vlnitosti povrchu s výnimkou parametrov  $W_q$  a  $W_t$  dosiahla bočná plocha vzorky. Vrchná plocha vykazuje približne 5krát vyššie hodnoty drsnosti a vlnitosti povrchu v porovnaní so spodnou plochou vzorky, čo koreluje s výsledkami meraní 3D parametrov plochy v tab. 4.9.

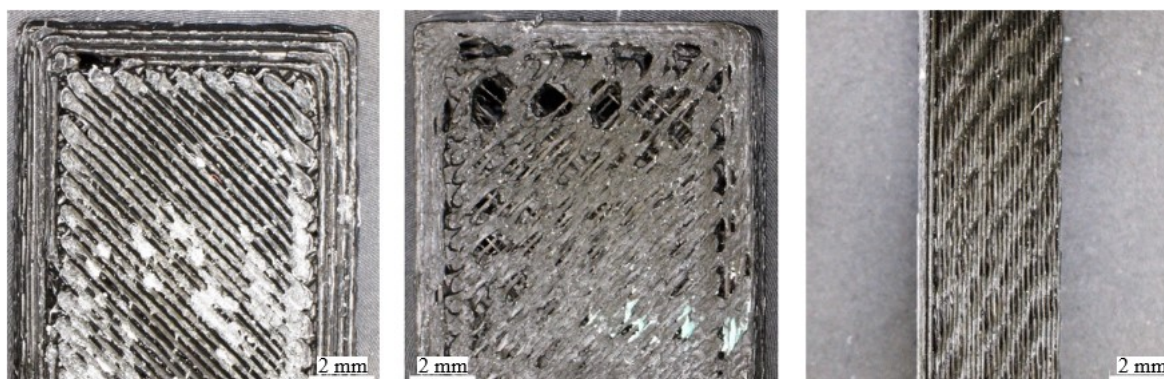


Tab. 4.10 Namerané hodnoty 2D parametrov drsnosti a vlnitosti vzorky s červeným aditívom.

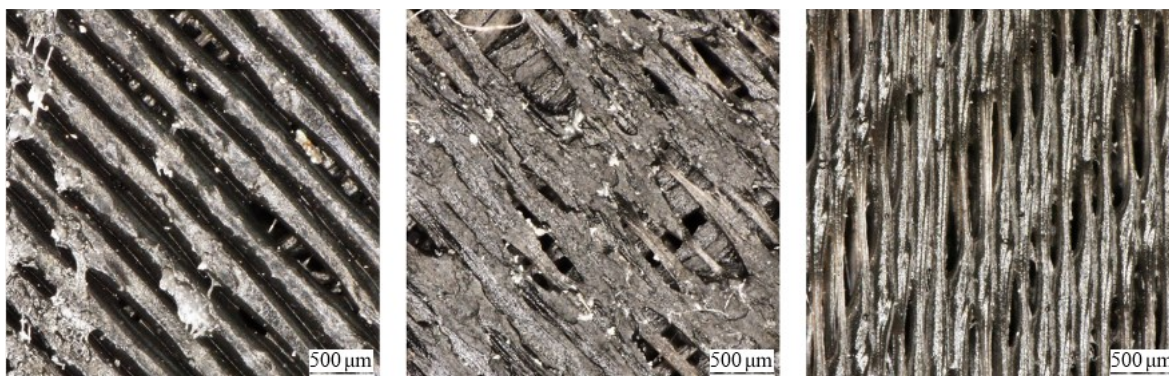
Hodnotené parametre		Namerané hodnoty [ $\mu\text{m}$ ]		
		Vrchná plocha	Spodná plocha	Bočná plocha
Drsnosť	Ra	5,01	0,60	8,92
	Rq	6,44	0,75	10,70
	Rt	33,50	5,09	43,30
	Rz	26,40	3,81	40,80
Vlnitosť	Wa	0,58	0,07	0,54
	Wq	0,65	0,08	0,62
	Wt	2,37	0,36	2,71
	Wz	1,90	0,26	2,03

### 4.3.3 Výsledky analýzy textúry povrchu – čierne aditívum

Povrch vzorky s čiernym aditívom vykazuje na základe snímok z obr. 4.26 a obr. 4.27 najväčší počet nedostatkov, v porovnaní s predchádzajúcimi dvoma vzorkami. Vrchná plocha vzorky je charakteristická usporiadaným, periodickým povrchom, zatiaľ čo spodná plocha má vzhľad tepelne deformovanej štruktúry s početnými defektami povrchu. Bočná plocha vzorky má podobnú štruktúru ako v prípade vzorky zo 100 % PLA. Avšak pri väčšom zväčšení sú viditeľné defekty v podobe dier.

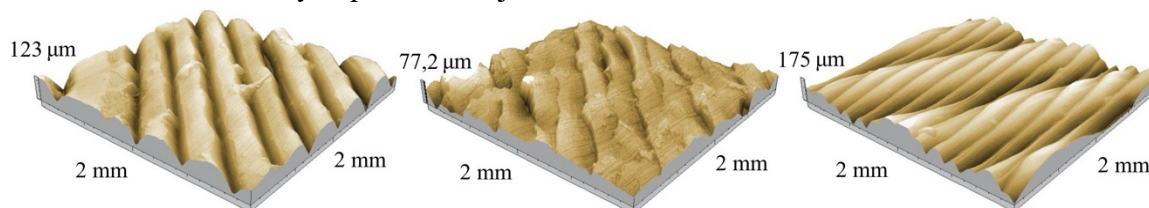


Obr. 4.26 Vrchná plocha (vľavo), spodná plocha (stred), bočná plocha (vpravo) pri zväčšení 25krát.



Obr. 4.27 Vrchná plocha (vľavo), spodná plocha (stred), bočná plocha (vpravo) pri zväčšení 100krát.

Obr. 4.28 zobrazuje 3D plochy hodnotených oblastí vzorky s čiernym aditívom. Vrchná plocha vykazuje periodický povrch s hladkými výstupkami kruhového prierezu v definovanom smere a s hlbokými priehlbunami. Ďalej sú viditeľné ojedinelé priestorové útvary vo forme výstupkov. V ľavej časti povrchu je zreteľná deformácia mikrogeometrie charakteristická dominantným výstupkom bez priehlbiny. Spodná plocha má neperiodický povrch s orientovanými výstupkami a priehlbunami. Výstupky majú ostré, nepravidelné vrcholy. Na ľavej strane hodnotenej plochy je viditeľná výraznejšia deformácia povrchu. Bočná plocha vzorky má podobnú mikrogeometriu, aká bola určená na vzorke zo 100 % PLA. Opäť je tvorená orientovanými, periodickými výstupkami, ktoré sú tvorené množstvom menších výstupkov smerujúcich do tvaru skrutkovice.



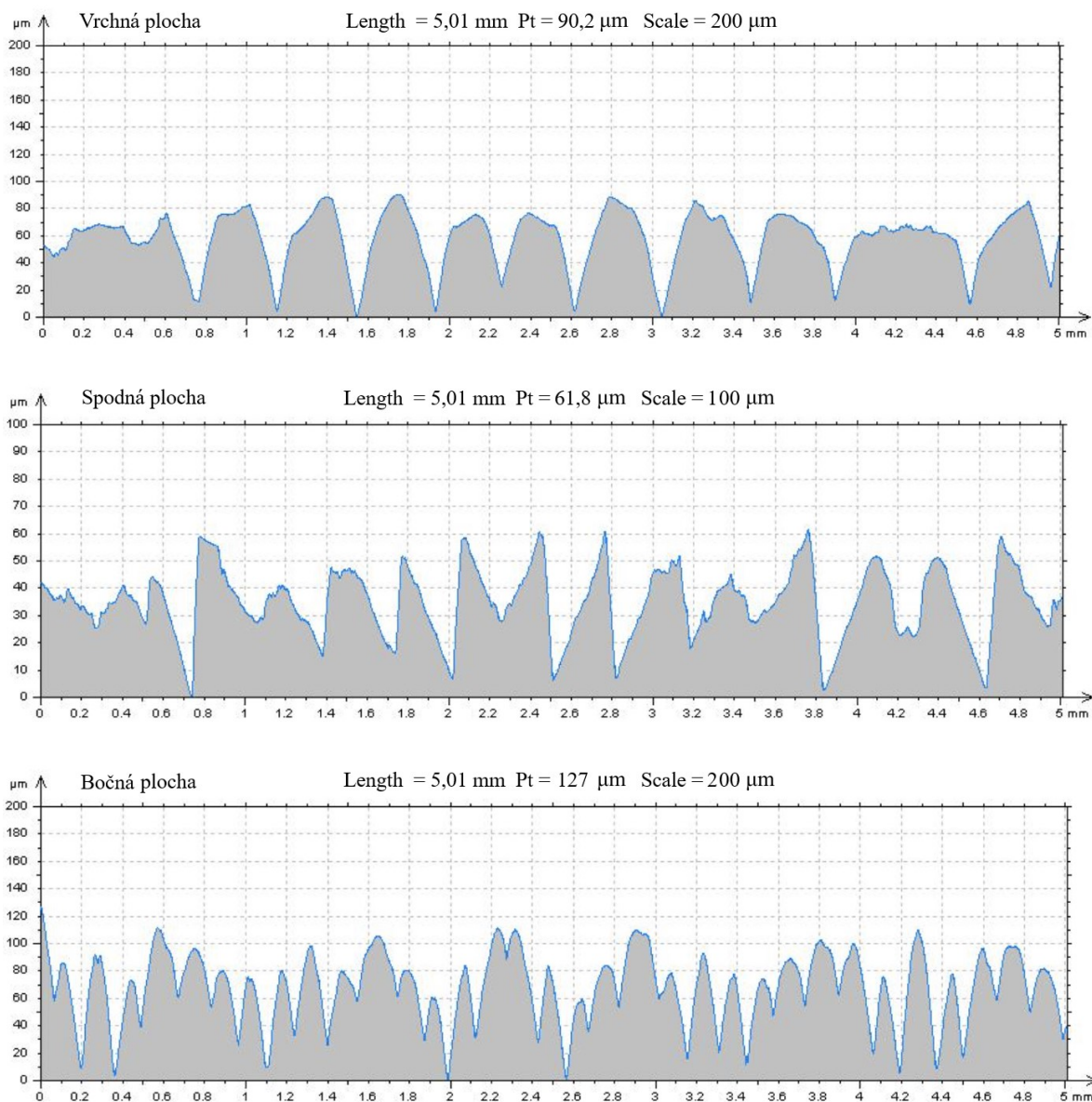
Obr. 4.28 3D plochy meranej oblasti – vrchná plocha (vľavo), spodná plocha (stred), bok (vpravo).

Tab. 4.11 Namerané hodnoty 3D parametrov textúry povrchu – vzorka s čiernym aditívom.

Hodnotené parametre	Namerané hodnoty [ $\mu\text{m}$ ]		
	Vrchná plocha	Spodná plocha	Bočná plocha
Sa	21,9	8,8	32,1
Sq	27,0	11,7	39,0
St	123,0	77,2	175,0
Sz	122,0	76,3	170,0

Výsledky meraní vybraných 3D parametrov plochy vzorky s čiernym aditívom popisuje tab. 4.11. Najvyššie hodnoty boli namerané na bočnej ploche vzorky. Rovnako ako

pri predchádzajúcich vzorkách, aj tu boli najnižšie hodnoty 3D parametrov určené na spodnej ploche vzorky.

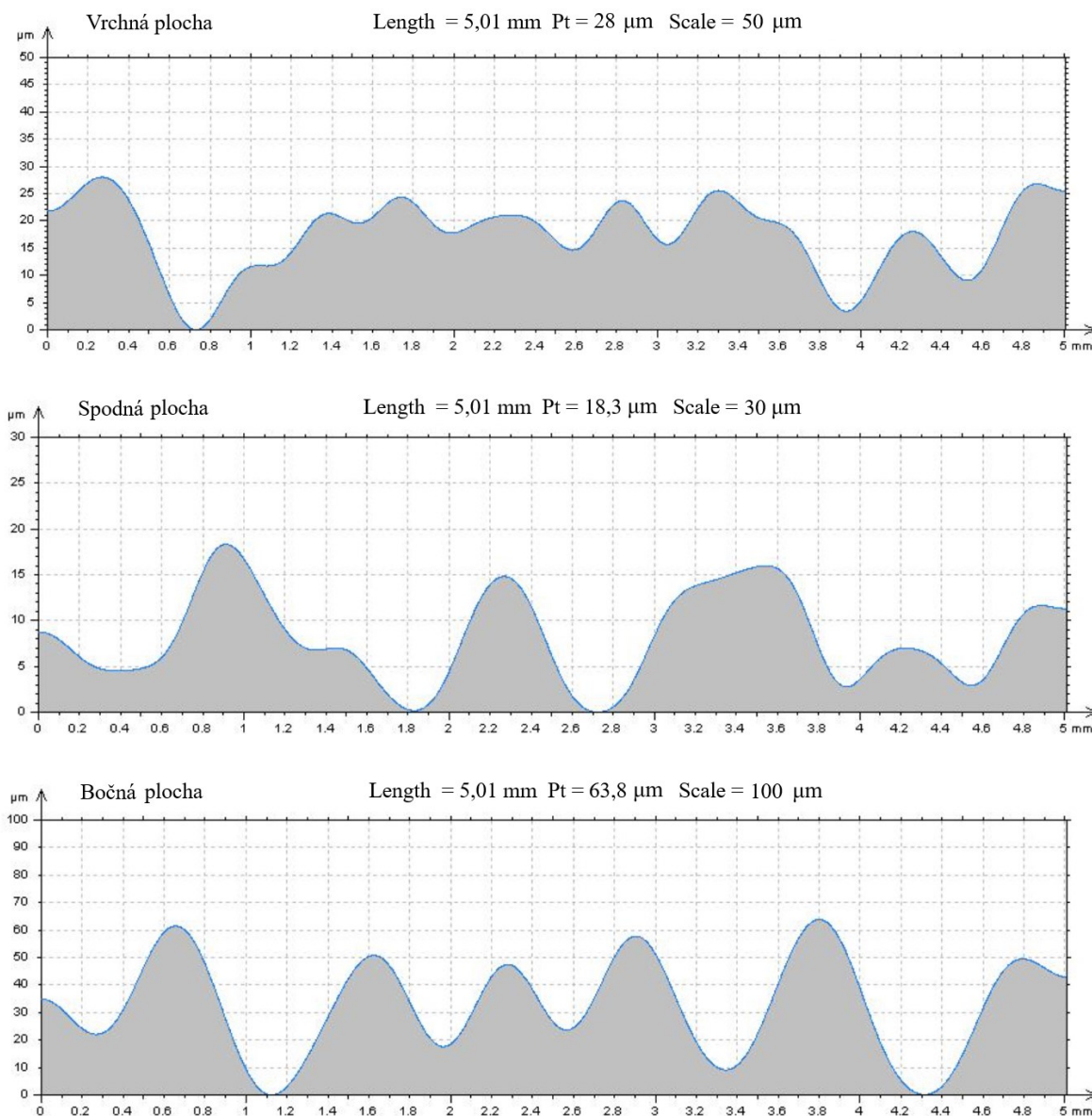


Obr. 4.29 Profily drsnosti povrchu vzorky s čiernym aditívom.

2D profily drsnosti vzorky na obr. 4.29 sú opäť zobrazené po priblížení vyhodnocovanej dĺžky na 5 mm. Na vrchnej ploche je možné vidieť profil s dominantnými výstupkami, zaoblenými vrcholmi a ostrými priehlbunami. Táto plocha vykazuje určitú periodickosť vďaka minimálnej deformácii výšky vrchnej vrstvy. Na ľavej strane profilu je zaznamenaná zmena mikrogeometrie s dominantným výstupkom bez priehlbiny zobrazeným aj v ľavej časti obr. 4.28. Spodná plocha javí určitú podobnosť s vrchnou plochou, líši sa však v ostrých vrcholoch výstupkov. Morfológia boku vzorky je takmer identická s bokom vzorky zo 100 % PLA. Skladá sa z dominantných výstupkov, ktoré majú spravidla štyri ostré vrcholy.



Profily vlnitosti zobrazuje obr. 4.30. Najvýraznejšiu vlnitosť dosahuje bočná plocha vzorky. Najnižšie hodnoty vlnitosti boli zistené na spodnej ploche.



Obr. 4.30 Profily vlnitosti povrchu vzorky s čiernym aditívom.

Z hodnôt vybraných 2D parametrov drsnosti a vlnitosti profilov zobrazených v tab. 4.12 vyplýva, že najvyššie hodnoty všetkých parametrov dosiahla bočná plocha vzorky. Najnižšie hodnoty boli opäť namerané na spodnej ploche vzorky.

Tab. 4.12 Namerané hodnoty 2D parametrov drsnosti a vlnitosti vzorky s čiernym aditívom.

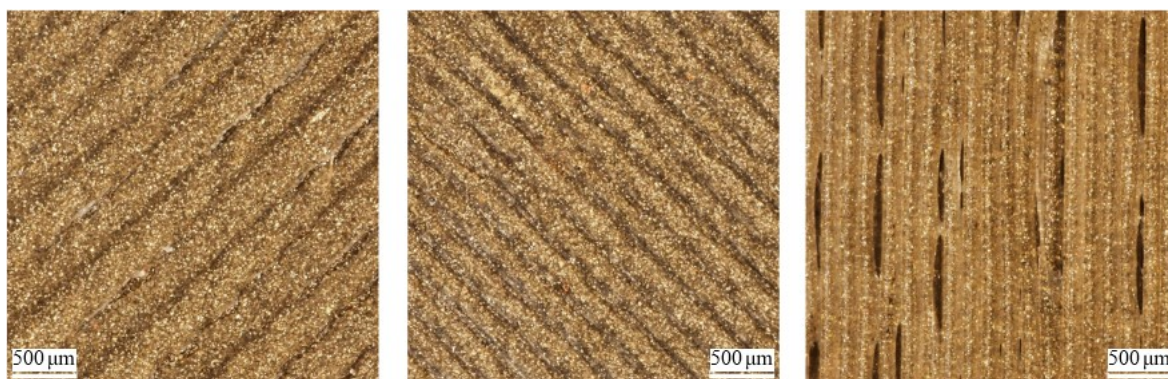
Hodnotené parametre		Namerané hodnoty [ $\mu\text{m}$ ]		
		Vrchná plocha	Spodná plocha	Bočná plocha
Drsnosť	Ra	14,70	9,84	17,50
	Rq	18,20	12,10	21,50
	Rt	86,10	63,20	112,00
	Rz	74,20	52,50	92,70
Vlnitosť	Wa	1,95	1,48	6,70
	Wq	2,31	1,69	7,44
	Wt	9,73	6,55	23,00
	Wz	7,55	4,94	20,90

#### 4.3.4 Výsledky analýzy textúry povrchu – zlaté aditívum

Na obr. 4.31 je možné pozorovať podobnú morfológiu povrchu vrchnej a spodnej plochy. Jedná sa o orientovanú, periodickú štruktúru povrchu. Na spodnej ploche sú viditeľné aj povrchové defekty rozmiestnené po obvode vnútornej štruktúry vzorky. Podobnosť štruktúr oboch plôch je zrejmá aj pri väčšom zväčšení, vid' obr. 4.32. Bočná plocha vzorky je tvorená orientovanou štruktúrou pozdĺžnych vlákien s množstvom defektov vo forme dier.

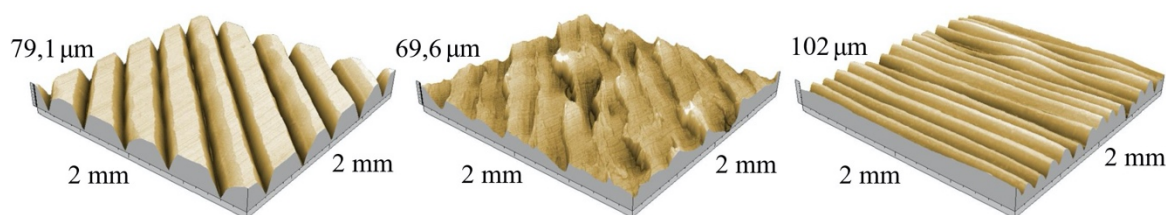


Obr. 4.31 Vrchná plocha (vľavo), spodná plocha (stred), bočná plocha (vpravo) pri zväčšení 25krát.



Obr. 4.32 Vrchná plocha (vľavo), spodná plocha (stred), bočná plocha (vpravo) pri zväčšení 100krát.

Na obr. 4.33 sú zobrazené 3D štruktúry povrchov hodnotených plôch vzorky so zlatým aditívom. Vrchná plocha je charakteristická orientovanou, periodickou štruktúrou s hladkými výstupkami a ostrými priehlbínami. Spodná plocha vykazuje orientovanú štruktúru, avšak s nerovnomerne rozmiestnenými výstupkami a ostrými vrcholmi. Bočná plocha je tvorená množstvom výstupkov menších veľkostí, ktoré sú orientované rovnakým smerom.



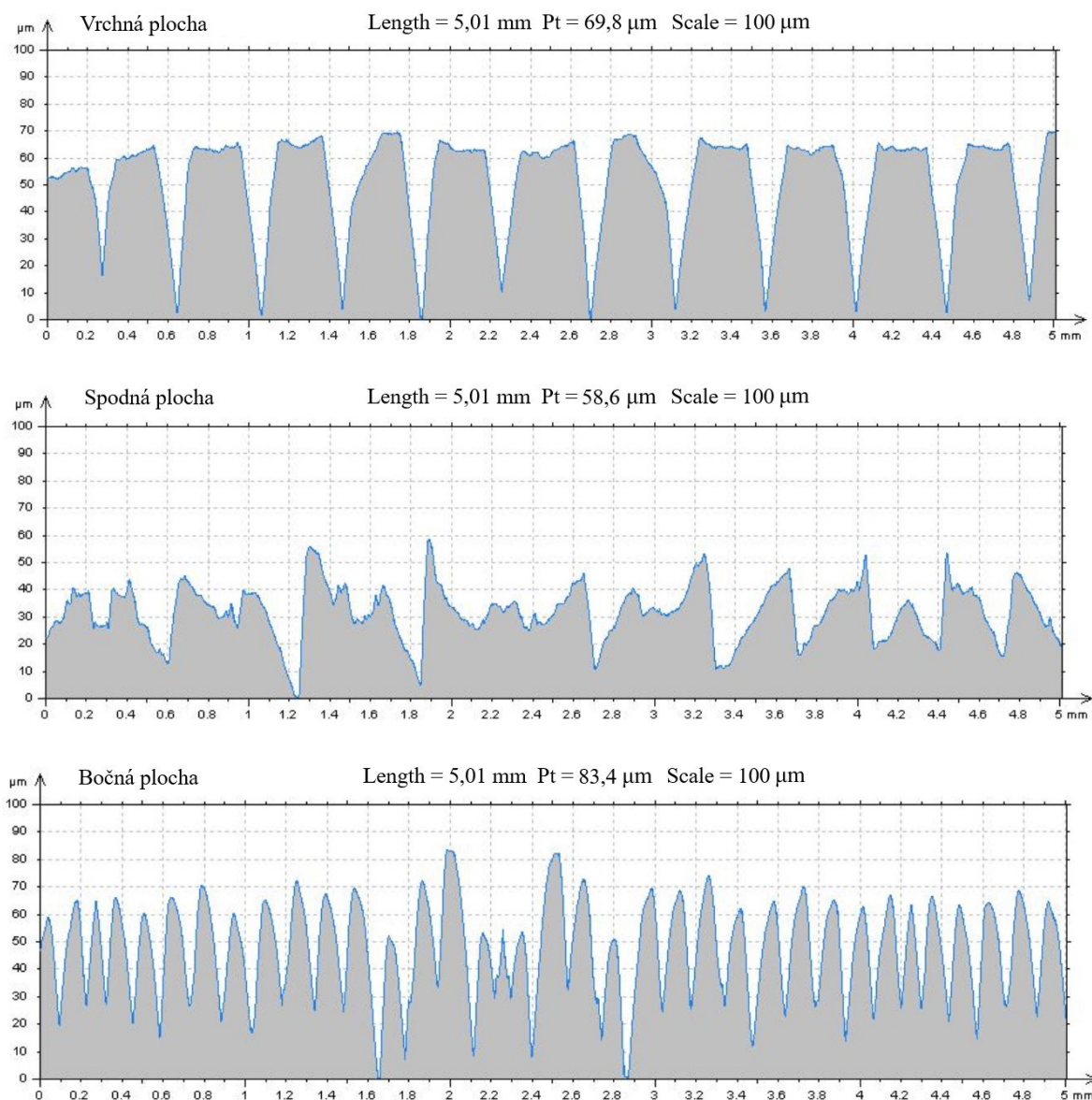
Obr. 4.33 3D plochy meranej oblasti – vrchná plocha (vľavo), spodná plocha (stred), bok (vpravo).

Najvyššie hodnoty plošných 3D parametrov dosiahla bočná plocha vzorky (viď tab. 4.13). Najnižšie hodnoty boli opäť namerané na spodnej ploche vzorky.

Tab. 4.13 Namerané hodnoty 3D parametrov textúry povrchu – vzorka so zlatým aditívom.

Hodnotené parametre	Namerané hodnoty [ $\mu\text{m}$ ]		
	Vrchná plocha	Spodná plocha	Bočná plocha
Sa	17,9	9,2	16,1
Sq	21,3	11,8	20,0
St	79,2	69,6	102,0
Sz	78,5	68,5	101,0

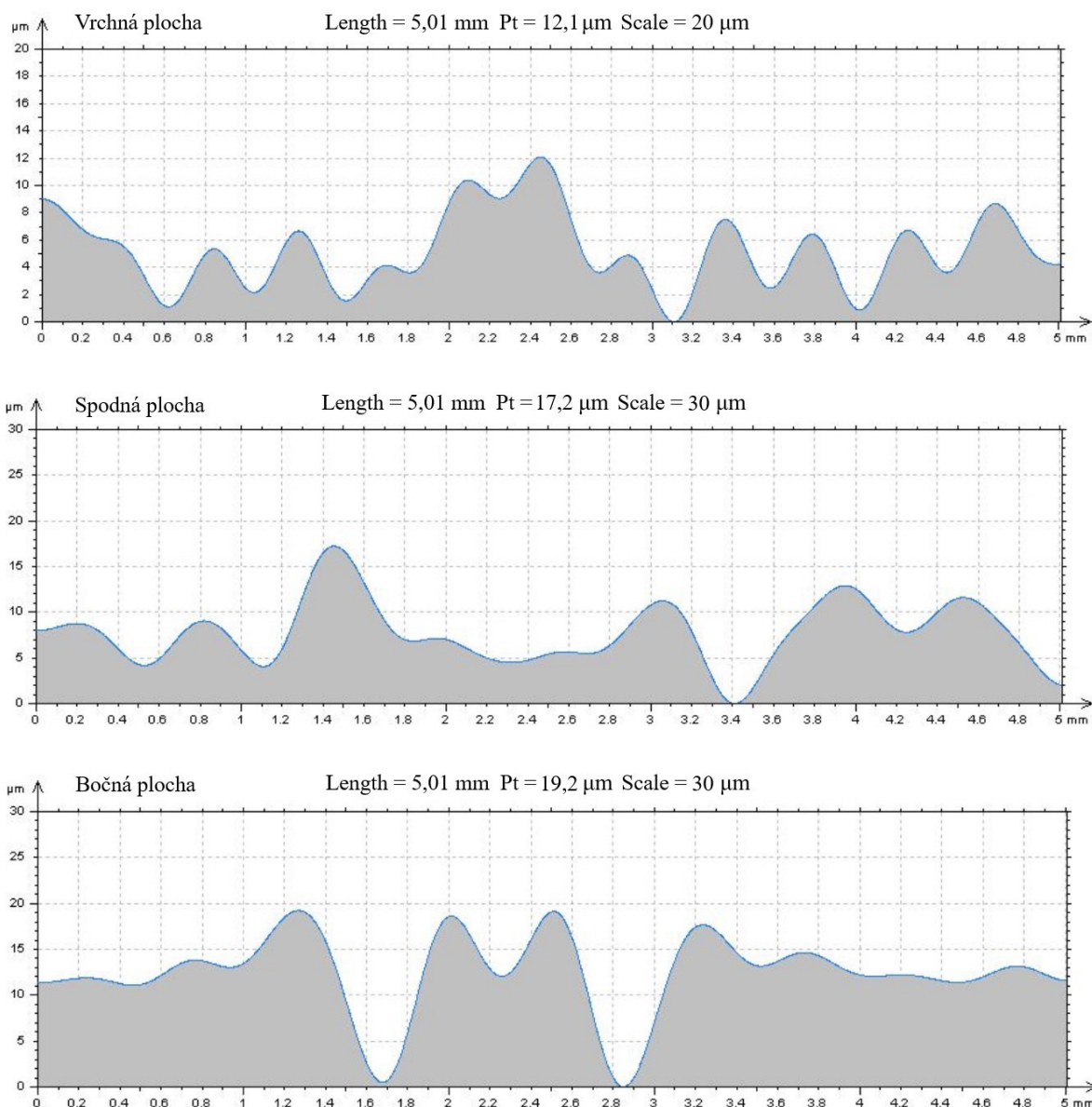




Obr. 4.34 Profily drsnosti povrchu vzorky so zlatým aditívom.

Z profilov drsnosti vzorky so zlatým aditívom (viď obr. 4.34) je opäť viditeľný rozdiel medzi hodnotenými plochami. Vrchná plocha je periodická s vysokými výstupkami, ktoré majú takmer rovné vrcholy. Šírka vrcholov sa taktiež mení len minimálne, čo dokazuje konštantnosť profilu nanesej vrstvy filamentu. Hĺbka priehlbín vrchnej plochy dosahuje približne 0,05 mm, čo predstavuje až tretinu z výšky nanesej vrchnej vrstvy filamentu, ktorá je 0,15 mm. Spodná plocha je charakteristická širokými výstupkami s ostrými vrcholmi. Bočnú plochu tvoria početné úzke a ostré výstupky s hlbokými priehlbunami. Profil je periodický, okrem jeho strednej časti, v ktorej dochádza ku zmene mikrogeometrie.

Profily vlnitosti zobrazuje nasledujúci obr. 4.35. Výraznejšia vlnitosť je pozorovateľná na vrchnej a bočnej ploche vzorky. Vlnitosť spodnej plochy je najmenej výrazná.



Obr. 4.35 Profily vlnitosti povrchu vzorky so zlatým aditívom.

Na základe výsledkov meraní vybraných 2D parametrov drsnosti a vlnitosti zobrazenými v tab. 4.14 je možné vyhodnotiť, že vrchná a bočná plocha vzorky dosiahli takmer zhodné výsledky drsnosti povrchu. Najnižšie hodnoty drsnosti boli dosiahnuté na spodnej ploche. Výsledky vlnitosti vrchnej a spodnej plochy boli taktiež podobné, zatiaľ čo najvyššie hodnoty pozorovaných parametrov vlnitosti zaznamenala bočná plocha vzorky.



Tab. 4.14 Namerané hodnoty 2D parametrov drsnosti a vlnitosti vzorky so zlatým aditívom.

Hodnotené parametre		Namerané hodnoty [ $\mu\text{m}$ ]		
		Vrchná plocha	Spodná plocha	Bočná plocha
Drsnosť	Ra	13,30	7,52	13,60
	Rq	16,60	9,40	15,90
	Rt	69,20	57,80	73,60
	Rz	63,70	42,20	60,70
Vlnitosť	Wa	1,21	1,19	1,72
	Wq	1,39	1,41	2,01
	Wt	5,46	6,92	10,30
	Wz	4,44	4,31	6,66

#### 4.4 Sumár výsledkov vplyvu farbív a podielu výplne

V tejto kapitole bol zisťovaný vplyv farbiacich aditív a percentuálneho podielu výplne na mechanické a povrchové vlastnosti vytlačených vzoriek. Vykonané boli ťahové skúšky, skúšky tvrdosti, taktiež boli určené parametre textúry povrchu, drsnosti a vlnitosti.

Z výsledkov ťahových skúšok jasne vyplýva, že prídavné farbiace aditíva, rovnako ako percentuálny podiel výplne, majú vplyv na mechanické vlastnosti vzoriek. Pridaním červeného a zlatého aditíva došlo ku zvýšeniu celkových hodnôt maximálnej zaťažujúcej sily. Najvyššie hodnoty zaťažujúcej sily na úrovni 642,089 N dosiahli vzorky s červeným aditívom. Primiešaním tohto aditíva do základného materiálu (100 % PLA) došlo ku celkovému zvýšeniu maximálnej zaťažujúcej sily o 22,584 %. Naopak, vplyvom čierneho aditíva došlo ku značnej degradácii mechanických vlastností základného materiálu, a to na úroveň 65,635 %, voči hodnotám zaťažujúcej sily základného materiálu.

Vzorky s percentuálnym podielom výplne 100 % dosiahli počas ťahovej skúšky najvyššie hodnoty zaťažujúcej sily. Preto sú takto vyplnené vzorky vhodné pre mechanicky namáhané výtlačky. Rozdiel silového zaťaženia vzoriek s percentuálnym podielom výplne 25 %, 50 % a 70 %, nie je výrazný, všetky vzorky dosahujú od 72,58 % do 79,52 % zo silového zaťaženia úplne vyplnených vzoriek. Preto je v prípade mierne zaťažovaných vzoriek doporučené nastaviť hodnotu percentuálneho podielu výplne na 25 %.

Výsledky skúšok tvrdosti metódou Shore D dokazujú, že s nárastom percentuálneho podielu výplne, narastá aj tvrdosť výtlačkov. Celkovo najvyššiu tvrdosť 73,733 HShD dosiahli červené vzorky so 100 % podielom výplne. Najnižšie hodnoty tvrdosti na úrovni 38,592 HShD zaznamenali vzorky s čiernym aditívom pri podiele výplne 25 %. Tieto vzorky taktiež zaznamenali najvýraznejší nárast tvrdosti pri zvýšení percentuálneho podielu výplne, a to až na hodnotu 57,042 HShD pre úplne vyplnené vzorky.

Z analýz povrchov vzoriek so 100 % podielom výplne vyplýva, že farbiace aditíva majú značný vplyv na kvalitu povrchu výtlakov. Rozdielne vlastnosti povrchu boli zaznamenané aj medzi jednotlivými plochami tej istej vzorky.

3D štruktúry vrchných plôch boli charakteristické orientovanou a periodickou štruktúrou s hladkými výstupkami a ostrými priehlbunami, taktiež bol pozorovaný konštantný tvar pokladaných vlákien. Nežiadúce priehlbiny boli pravdepodobne spôsobené nedokonalým ukladaním vlákien vedľa seba.

3D štruktúry spodných plôch zväčša vykazovali nevýraznú orientovanú štruktúru s nerovnomerne rozmiestnenými ostrými výstupkami. Spozorované boli často aj nežiadúce deformácie štruktúry spôsobené teplom z výhrevnej podložky 3D tlačiarne. Aj dôsledkom pôsobenia tohto tepla, boli na spodných plochách zaznamenané výrazne nižšie hodnoty sledovaných parametrov povrchu.

Bočné plochy boli obvykle tvorené množstvom menších výstupkov s orientáciou rovnakým smerom, prípadne do tvaru skrutkovice.

Celkovo najnižšie parametre textúry povrchu, vlnitosti a drsnosti zaznamenala vzorka s červeným aditívom. Jej povrch je teda na základe hodnotených parametrov najkvalitnejší. Avšak na spodnej ploche vzorky boli zjavné nežiadúce deformácie spôsobené teplom z výhrevnej podložky. Výrazný negatívny vplyv malo čierne aditívum, keďže vzorka z tohto materiálu obsahovala výrazne vyšší počet defektov povrchu než ostatné vzorky.

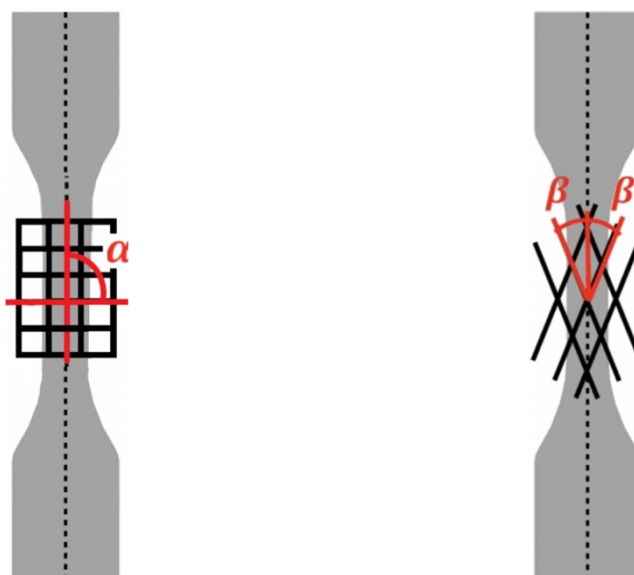
## 5 ODPORÚČANIA PRE UŽÍVATEĽOV 3D TLAČE

Kapitola vyhodnocuje vplyv veľkosti uhla určeného orientáciou vlákien filamentu a vektorom zaťažujúcej sily na mechanické vlastnosti výtláčkov. Ďalej je určený vplyv umiestnenia vzoriek v tlačovej komore 3D tlačiarne na veľkosť zaťažujúcej sily, napätia a modulu pružnosti. Porovnávané vzorky sú orientované na plochu, na hranu a na výšku.

### 5.1 Vplyv smeru vlákien na mechanické vlastnosti výtláčku

Voľba vhodného materiálu nie je jediným parametrom, ktorý výrazne ovplyvňuje finálne vlastnosti vytlačených modelov. Každý zakúpený filament by mal obsahovať aj základné údaje, ako je výrobcom doporučená teplota tlače, prípadne aj teplota výhrevnej podložky. Tieto základné informácie však nestačia pre maximálne využitie potenciálu daného filamentu. Užívatelia preto často upravujú aj rýchlosť tlače, percentuálny podiel výplne či vzor výplne. Jednotlivé vzory sa líšia rozdielnou orientáciou vlákien vnútornej výplne. Vplyv orientácie vlákien na mechanické vlastnosti výtláčku je hlavným predmetom tejto podkapitoly.

Vyhodnocované sú vzorky s najpoužívanejším vzorom vnútornej výplne s názvom *rectilinear*. Vzorky boli tlačené pri základnom nastavení s orientáciou vnútorných vlákien  $\pm 45^\circ$  (viď obr. 5.1 – vpravo) a pri upravenom smere vlákien pod uhlom  $0^\circ / 90^\circ$  (viď obr. 5.1 – vľavo). Smer vlákien daného nastavenia sa striedal vždy po jednej tlačenej vrstve. Vzorky boli počas tlače orientované na plochu a nasledujúci obr. 5.1 zobrazuje pôdorysný pohľad na vzorky umiestnené na podložke 3D tlačiarne.



Obr. 5.1 Uhol medzi smerom vlákien a zaťažujúcou silou:  $\alpha = 0^\circ / 90^\circ$  (vľavo),  $\beta = \pm 45^\circ$  (vpravo).

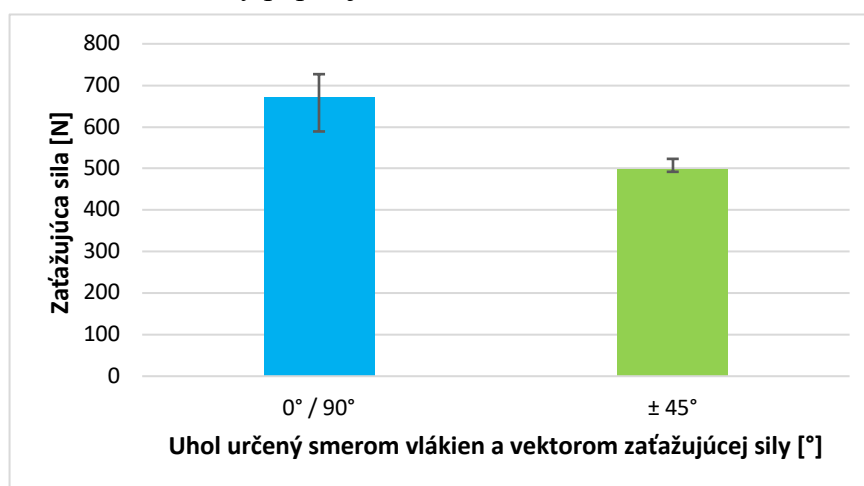
Rozmery hodnotených vzoriek sú zhodné so vzorkami použitými v predchádzajúcej kapitole (viď obr. 4.3). Podrobnejšie nastavenia tlače a použitý filament popisuje tab. 5.1.

Tab. 5.1 Parametre tlače vzoriek vyrobených na 3D tlačiarni PRUSA i3 MK3.

<b>Materiál</b>	100 % PLA
<b>Percentuálny podiel výplne</b>	100 %
<b>Teplota tlače</b>	225 °C
<b>Teplota podložky</b>	60 °C
<b>Výška spodnej vrstvy</b>	0,20 mm
<b>Výška ďalších vrstiev</b>	0,15 mm
<b>Počet plných vrstiev vrch / spodok modelu</b>	7 / 5
<b>Rýchlosť tlače plný materiál / výplň</b>	45 / 45 mm/s
<b>Počet perimetrov</b>	4
<b>Chladienie</b>	100 %

### 5.1.1 Výsledky ťahovej skúšky

Mechanické vlastnosti vzoriek boli určené na základe skúšky ťahom. Medzi vyhodnocované parametre vzoriek patrí maximálne silové zaťaženie, napätie na medzi pevnosti a modul pružnosti v ťahu. Testovaných bolo celkom 16 vzoriek, pričom každá séria obsahovala 8 vzoriek. Hodnoty znázornené v nasledujúcich 3 grafoch sú určené ako stredné hodnoty z hodnôt získaných v danej sérii. Chybové úsečky znázorňujú intervaly hodnôt pre danú sériu. Konkrétne hodnoty popisuje tab. 5.2.

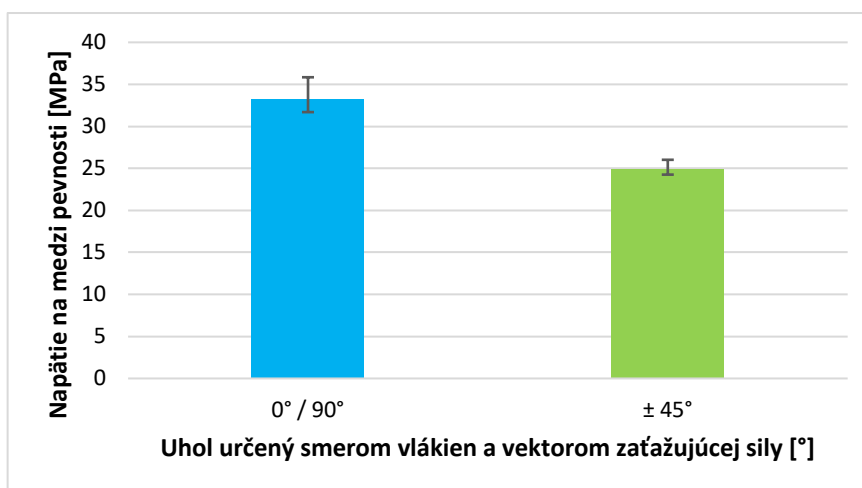


Obr. 5.2 Vplyv orientácie vlákien na zaťažujúcu silu.

Z obr. 5.2 vyplýva, že veľkosť uhla určeného smerom vlákien a vektorom zaťažujúcej sily má vplyv na maximálne silové zaťaženie dosahované pri ťahovej skúške. Medián zaťažujúcej sily pre uhol  $\pm 45^\circ$  dosahuje 498,767 N, zatiaľ čo pri

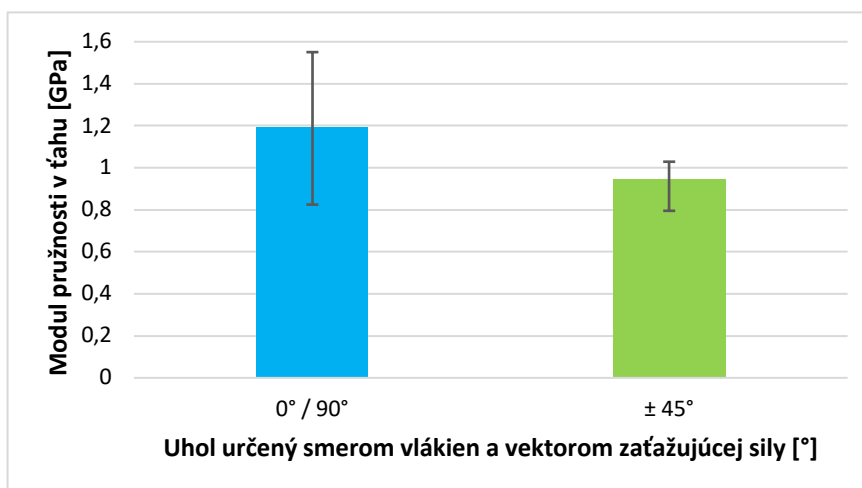
vláknach orientovaných kolmo a rovnobežne na zaťažujúcu silu je táto hodnota výrazne vyššia, a to 672,288 N.

Hodnotám zaťažujúcich síl zodpovedajú aj výsledky napätí na medzi pevnosti znázornené na obr. 5.3. Pre určenie presných hodnôt napätí boli pred skúškou určené príslušné rozmery každej testovanej vzorky samostatne.



Obr. 5.3 Vplyv orientácie vlákien na napätie na medzi pevnosti.

Najvyššie hodnoty opäť dosiahli vlákna s orientáciou 0° / 90°, pričom stredná hodnota napätia na medzi pevnosti dosahuje 33,230 MPa. Rozptyl hodnôt pri orientácii vlákien ± 45° je výrazne menší než pri orientácií 0° / 90°.



Obr. 5.4 Vplyv orientácie vlákien na modul pružnosti v ťahu.

Poslednou hodnotenou charakteristikou popisujúcou správanie materiálu zaťaženého ťahovým napätím je modul pružnosti v ťahu. Vlákna s orientáciou 0° / 90° dosahujú väčšie hodnoty modulu pružnosti, a teda je potrebné pre ich deformáciu aj väčšie napätie. Interval hodnôt pre orientáciu vlákien 0° / 90° je taktiež výrazne väčší než pri orientácií ± 45° a dosahuje od 0,825 GPa do 1,551 GPa (viď obr. 5.4). Stredná hodnota vlákien s orientáciou ± 45° dosahuje hodnotu 0,946 GPa, pričom maximálna nameraná hodnota je 1,029 GPa. Orientácia vlákien má teda vplyv aj na výslednú tuhosť hodnotených vzoriek.

Nasledujúca tab. 5.2 popisuje znázornené hodnoty v obr. 5.2 až obr. 5.4.

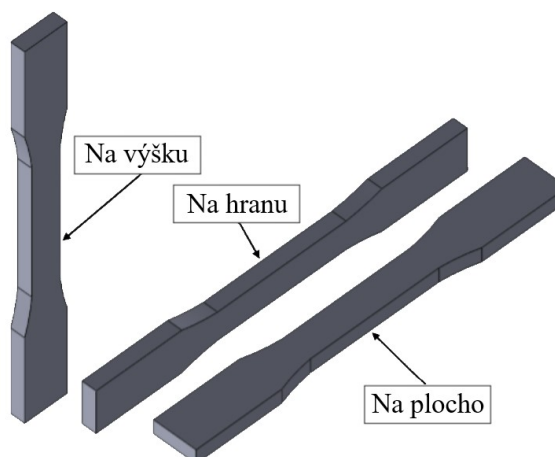
Tab. 5.2 Namerané hodnoty sily, napätia a modulu pružnosti.

Hodnotené veličiny	Uhol určený smerom vlákien a vektorom sily	Namerané hodnoty	
		Stredná hodnota	Interval hodnôt
Zaťažujúca sila	0° / 90°	672,288 N	⟨643,755; 726,955⟩ N
	± 45°	498,767 N	⟨491,975; 523,132⟩ N
Napätie na medzi pevnosti	0° / 90°	33,230 MPa	⟨31,698; 35,844⟩ MPa
	± 45°	24,938 MPa	⟨24,258; 26,023⟩ MPa
Modul pružnosti	0° / 90°	1,192 GPa	⟨0,825; 1,551⟩ GPa
	± 45°	0,946 GPa	⟨0,795; 1,029⟩ GPa

## 5.2 Vplyv umiestnenia výtláčkov v tlačovej komore

Po nastavení optimálnych parametrov 3D tlače je pred výrobou vzorky ešte potrebné určiť umiestnenie modelu na podložku 3D tlačiarne. Pri umiestňovaní modelu pomocou softwaru je nutné zohľadniť rozmery tlačovej komory 3D tlačiarne, rozmery modelu a množstvo vyrábaných výtláčkov. Pri 3D tlači väčších modelov než je veľkosť tlačovej komory sa model vyrába po častiach a výsledný výrobok sa získa zlepením jednotlivých častí dokopy.

Medzi najpoužívanejšie spôsoby umiestnenia výtláčkov v tlačovej komore patrí umiestnenie na plochu, na hranu a na výšku (viď obr. 5.5). Z tohto dôvodu, je vyhodnocovaný vplyv takto orientovaných vzoriek na ich mechanické vlastnosti.



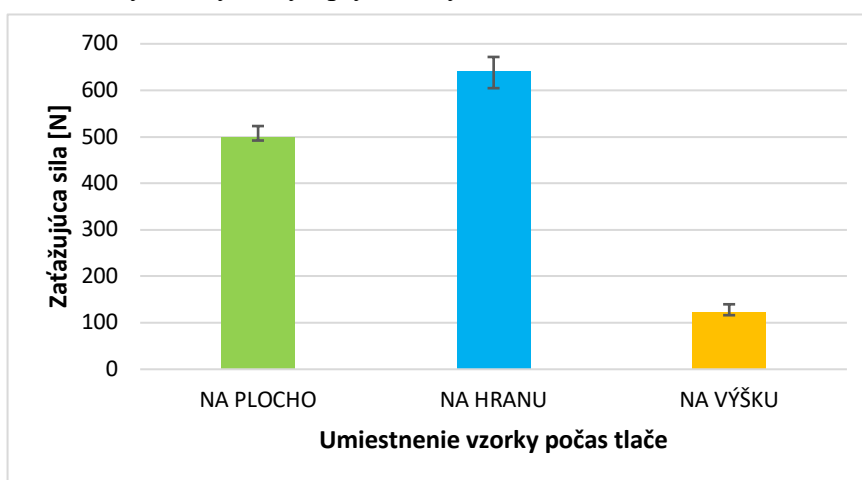
Obr. 5.5 Vyhodnocované umiestnenia vzoriek – upravené [45].

### 5.2.1 Výsledky ťahovej skúšky

Vzorky sú vyhodnocované na základe výsledkov ťahových skúšok, pričom rozmery aj parametre tlače sú identické so vzorkami použitými v predchádzajúcej podkapitole 5.1. Celkovo bolo testovaných 24 vzoriek (každá séria obsahovala 8 vzoriek). Vyhodnotený bol vplyv umiestnenia výtláčkov na maximálne silové zaťaženie, napätie na medzi pevnosti a modul pružnosti v ťahu.

Odlišné umiestnenie vzoriek však malo výrazný vplyv aj na ich dobu tlače. Najkratšiu dobu tlače dosiahli vzorky pri orientácii na plochu, a to 36 min na výrobu jednej vzorky. Pri orientácii na hranu to bolo 53 min a orientácia vzorky na výšku predĺžila čas nevyhnutný na výrobu vzorky až na 106 min, čo predstavuje takmer trojnásobok z doby tlače na hranu orientovaných vzoriek.

Nasledujúci obr. 5.6 znázorňuje vplyv umiestnenia vzorky počas tlače na maximálnu hodnotu zaťažujúcej sily dosiahnutej počas skúšky ťahom. Z neho jasne vyplýva, že umiestnenie vzorky ma výrazný vplyv na výsledné mechanické vlastnosti.

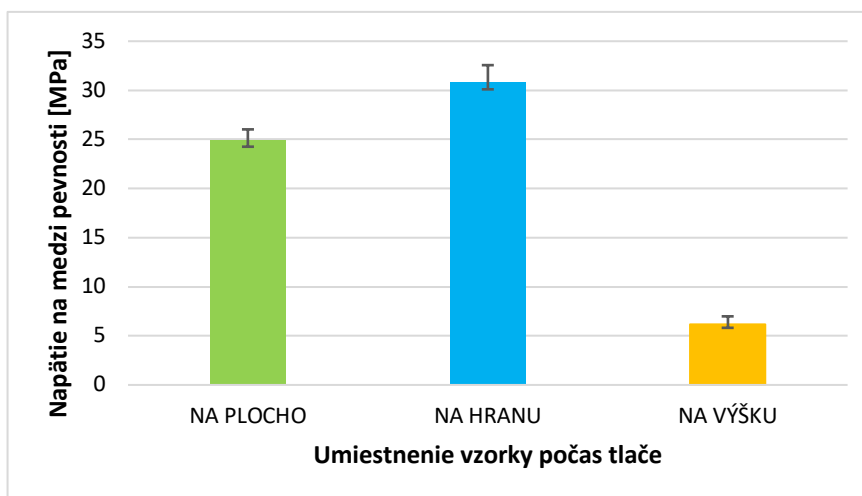


Obr. 5.6 Vplyv umiestnenia vzorky na zaťažujúcu silu.

Najvyššie hodnoty zaťažujúcej sily dosiahli vzorky umiestnené na hranu, pričom stredná hodnota zaťažujúcej sily predstavuje 640,876 N. Naopak, ku výraznej degradácii mechanických vlastností došlo u vzoriek tlačných v polohe na výšku. Stredná hodnota zaťažujúcej sily takto umiestnených vzoriek predstavuje len 123,584 N. Vzorky tlačné na plochu dosiahli hodnoty sily v intervale od 491,975 N do 523,132 N.

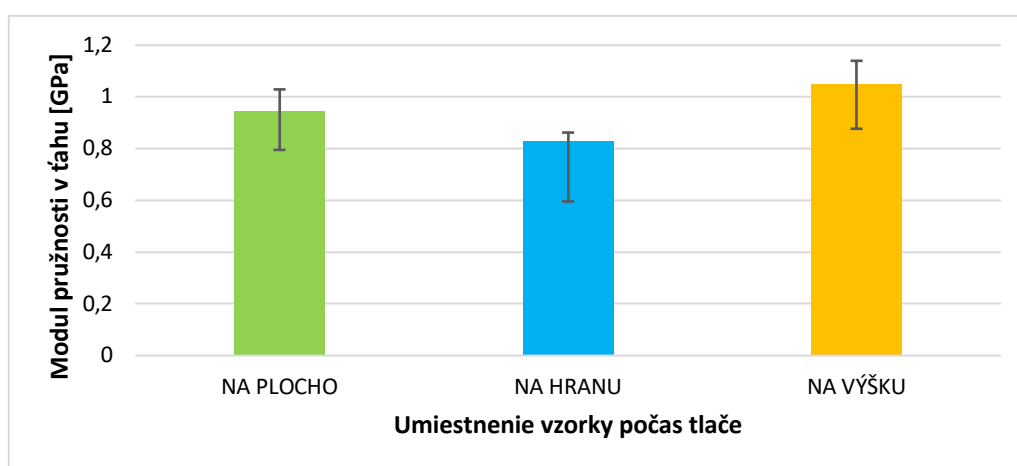
Konkrétne čísla všetkých stredných hodnôt a intervalov hodnôt znázornených v obr. 5.6 až obr. 5.8 popisuje tab. 5.3.

Dosiahnuté hodnoty napätia na medzi pevnosti (viď obr. 5.7) zodpovedajú hodnotám zaťažujúcej sily. Najvyššiu strednú hodnotu napätia dosiahli vzorky tlačné v orientácii na hranu, a to 30,808 MPa. Vzorky tlačné na plochu dosiahli hodnoty v intervale od 24,258 MPa do 26,023 MPa. Najnižšie hodnoty napätia na medzi pevnosti zaznamenali vzorky tlačné na výšku, a to len 6,166 MPa.



Obr. 5.7 Vplyv umiestnenia vzorky na hodnotu napätia na medzi pevnosti.

Umiestnenie vzorky počas 3D tlače má odlišný vplyv na schopnosť vzorky zvládať silové zaťaženie, a iný na výslednú tuhosť vzorky. Rozdiely v hodnotách jednotlivých modulov pružnosti v ťahu (viď obr. 5.8) nie sú tak výrazné, ako v prípade zaťažujúcej sily či napätia na medzi pevnosti. Najvyššiu strednú hodnotu modulu pružnosti na úrovni 1,049 GPa dosiahli vzorky tlačené na výšku. Takto vysoké hodnoty modulu pružnosti môžu byť spôsobené tým, že pri zaťažení vzorky ťahovou silou dochádza ku postupnému nárastu napätia bez predĺženia vzorky až do okamihu lomu vzorky. Dosiagnuté napätie na medzi pevnosti je síce nižšie, ale ku počiatočnému predĺženiu vzorky dochádza až neskôr, a teda pri väčšom zaťažení než u vzoriek tlačených na hranu a na plocho, kde predĺženie nie je skokové, ale je postupné. Stredná hodnota modulu pružnosti vzoriek tlačených na plocho predstavuje 0,946 GPa, a u vzoriek tlačených v orientácii na hranu 0,827 GPa.



Obr. 5.8 Vplyv umiestnenia vzorky na modul pružnosti v ťahu.



Tab. 5.3 Namerané hodnoty sily, napätia a modulu pružnosti.

Hodnotené veličiny	Orientácia vzorky	Namerané hodnoty	
		Stredná hodnota	Interval hodnôt
Zaťažujúca sila	Na plocho	498,767 N	$\langle 491,975; 523,132 \rangle$ N
	Na hranu	640,876 N	$\langle 604,616; 671,747 \rangle$ N
	Na výšku	123,584 N	$\langle 116,285; 139,755 \rangle$ N
Napätie na medzi pevnosti	Na plocho	24,938 MPa	$\langle 24,258; 26,023 \rangle$ MPa
	Na hranu	30,808 MPa	$\langle 30,101; 32,564 \rangle$ MPa
	Na výšku	6,166 MPa	$\langle 5,814; 6,984 \rangle$ MPa
Modul pružnosti	Na plocho	0,946 GPa	$\langle 0,795; 1,029 \rangle$ GPa
	Na hranu	0,827 GPa	$\langle 0,596; 0,862 \rangle$ GPa
	Na výšku	1,049 GPa	$\langle 0,877; 1,140 \rangle$ GPa

### 5.3 Sumár odporúčaní užívateľom 3D tlače

Účelom tejto kapitoly bolo poskytnúť užívateľom 3D tlače odporúčania, na základe ktorých dosiahnu ich výťažky požadované mechanické vlastnosti. Vzorky boli hodnotené na základe ťahových skúšok, pričom určovanými veličinami boli hodnoty maximálneho silového zaťaženia, napätia na medzi pevnosti a modulu pružnosti v ťahu.

Prvým sledovaným parametrom bol vplyv veľkosti uhla určeného orientáciou vlákien vnútornej výplne vzorky a vektorom zaťažujúcej sily na mechanické vlastnosti vzoriek. Použitý vzor vnútornej výplne má názov *rectilinear*, pričom testované boli dve orientácie vlákien, a to  $\pm 45^\circ$  a  $0^\circ / 90^\circ$ . Smer vlákien daného nastavenia sa striedal vždy po jednej tlačenej vrstve. Z výsledkov skúšok vyplýva, že softwarom prednastavená hodnota uhla vlákien  $\pm 45^\circ$  dosahuje horšie mechanické vlastnosti, než vzorky s upraveným parametrom  $0^\circ / 90^\circ$ . Konkrétne, stredná hodnota zaťažujúcej sily vzoriek s orientáciou vlákien  $\pm 45^\circ$  predstavuje 498,767 N, zatiaľ čo u vzoriek so smerom vlákien  $0^\circ / 90^\circ$  dosahuje až 672,288 N. Hodnotám zaťažujúcich síl zodpovedajú aj výsledky napätí na medzi pevnosti, a to 24,938 MPa pri orientácii vlákien  $\pm 45^\circ$  a 33,230 MPa u vzoriek s upraveným smerom vlákien. Zmenou smeru vlákien došlo aj ku zmene tuhosti vzoriek. Rovnako ako hodnoty sily a napätia, aj najvyššie hodnoty modulu pružnosti v ťahu dosiahli vzorky s orientáciou vlákien  $0^\circ / 90^\circ$ . Ich stredná hodnota predstavuje 1,192 GPa, čo je o 0,246 GPa vyššia hodnota, než u vzoriek s prednastaveným uhlom vlákien.

Druhým sledovaným parametrom bol vplyv umiestnenia vzoriek v tlačovej komore 3D tlačiarne na veľkosť zaťažujúcej sily, napätia na medzi pevnosti a modulu pružnosti v ťahu. Porovnávané boli 3 najpoužívanejšie spôsoby umiestnenia výťažkov v tlačovej

komore, a to pri orientácií vzorky na plocho, na hranu a na výšku. Najvyššie hodnoty zaťažujúcej sily aj napätia na medzi pevnosti dosiahli vzorky orientované počas tlače na hranu. Ich stredná hodnota silového zaťaženia predstavuje 640,876 N a hodnota napätia na medzi pevnosti je 30,808 MPa. Vzorky orientované počas tlače na plocho zaznamenali voči vzorkám orientovaným na hranu, zníženie dosiahnutých hodnôt sily a napätia o približne 20 %. Ku výraznej degradácii mechanických vlastností však došlo u vzoriek orientovaných počas tlače na výšku. Stredná hodnota silového zaťaženia týchto vzoriek dosiahla len 123,584 N, a tomu zodpovedajúca hodnota napätia na medzi pevnosti predstavuje 6,166 MPa. Výroba vzoriek orientovaných na výšku sa preto neodporúča, a to aj napriek tomu, že takto orientované vzorky dosiahli najvyššie hodnoty modulu pružnosti na úrovni 1,049 GPa.

Po zohľadnení mechanických vlastností je preto najvýhodnejšie tlačiť výtlačky orientované na hranu. Avšak, je potrebné vziať do úvahy aj dobu tlače, ktorá bola v prípade vzoriek tlačných na hranu 53 min, zatiaľ čo u vzoriek orientovaných na plocho len 36 min. Tlačou vzoriek orientovaných na plocho sa v danom prípade znížila doba tlače o viac než 47 %, preto v prípade tlače väčšieho počtu výtlačkov, ktoré nie sú výrazne mechanicky namáhané, je vhodnejšou variantou umiestnenie výtlačkov na plocho.

## 6 DISKUSIA

Práca mala stanovené dva základné ciele, a to poskytnúť výrobcovi filamentov, spoločnosti Chemosvit Fibrochem, s.r.o. odporúčania, na základe ktorých určí najvhodnejší druh farbiacich aditív pre svoje filamenty. Druhým cieľom bolo poskytnúť užívateľom filamentov odporúčania, na základe ktorých dosiahnu ich výťažky požadované mechanické a povrchové vlastnosti. Pre určenie hodnotených vlastností výťažkov, bolo vykonané množstvo ťahových skúšok, skúšok tvrdosti a analýz kvality povrchu.

Výskum vplyvu percentuálneho podielu výplne vzoriek na mechanické vlastnosti dopadol podľa očakávaní. Najvyššie hodnoty zaťažujúcej sily dosiahli úplne vyplnené vzorky, avšak rozdiel medzi podielom výplne 25 % až 70 % bol prekvapivo nízky. Očakávané dopadli aj skúšky tvrdosti, kde hodnota tvrdosti rástla s narastajúcim percentuálnym podielom výplne, a teda aj s nárastom celkovej hustoty vzoriek.

Avšak prekvapivo významný bol vplyv farbiacich aditív na mechanické a povrchové vlastnosti vzoriek. Testované boli druhovo odlišné farbiace aditíva, ktoré v rôznej miere ovplyvnili vlastnosti vzoriek. Neočakávané bolo najmä zistenie, že pridaním červeného a zlatého farbiaceho aditíva sa dosiahlo zlepšenia mechanických a povrchových vlastností vzoriek, v porovnaní so vzorkami z filamentu bez farbiacich aditív. Jedným z možných vysvetlení môže byť nastavená konštantná teplota tlače a výhrevnej podložky pre všetky testované filamenty. Teploty boli nastavené na základe skúsenosti a doporučení, pričom ich konštantnosť mala vylúčiť vplyv teploty tlače a podložky na vlastnosti vzoriek. Ďalším parametrom ovplyvňujúcim výsledky môže byť konštantnosť hrúbky filamentu. Keďže filament s čiernym farbiacim aditívom, ktorý ako jediný nedodrжал odchýlku hrúbky filamentu  $\pm 0,05$  mm, zároveň dosiahol aj najhoršie vlastnosti vzoriek. Určenie vplyvu konštantnosti hrúbky filamentu na vlastnosti výťažkov, môže byť predmetom dodatočného testovania, pričom sa odporúča zamerať sa na filament s červeným farbiacim aditívom, z ktorého vzorky dosiahli najlepšie vlastnosti.

Pomocou analýz povrchu boli určené rozdielne vlastnosti na vrchnej, spodnej a bočnej ploche vzoriek. Zaznamenané 3D štruktúry spodných plôch zväčša vykazovali nevýraznú orientovanú štruktúru s nerovnomerne rozmiestnenými ostrými výstupkami. U niektorých vzoriek boli pozorovateľné aj nežiadúce deformácie štruktúry spôsobené vplyvom tepla z výhrevnej podložky 3D tlačiarne. Z tohto dôvodu, by dodatočná štúdia určujúca vplyv teploty výhrevnej podložky na povrchové vlastnosti spodnej plochy výťažku mohla viesť ku vyššej kvalite povrchu výťažkov.

Z výsledkov vplyvu veľkosti uhla určeného orientáciou vlákien vnútornej výplne vzorky a vektorom zaťažujúcej sily vyplýva, že softwarom prednastavená hodnota uhla  $\pm 45^\circ$  dosahuje horšie mechanické vlastnosti, než vzorky s upravenou hodnotou uhla  $0^\circ / 90^\circ$ . Pre praktickú aplikáciu je však nutné zohľadniť, že dané nastavenie smeru vlákien s uhlom  $0^\circ / 90^\circ$  je výhodné len v prípade výťažkov, na ktoré pôsobí jednoosé ťahové silové zaťaženie.

Pomerne prekvapivé boli aj výsledky vplyvu orientácie výťažku v tlačovej komore 3D tlačiarne na mechanické vlastnosti vzoriek určené ťahovou skúškou. Najvyššie hodnoty zaťažujúcej sily nedosiahli vzorky v najčastejšie používanej orientácii na plochu, ale vzorky orientované na hranu. Avšak po zohľadnení doby tlače, vyššej tuhosti vzoriek a nižšej náročnosti tlače, je pre väčšinu použití najvhodnejšie orientovať vzorky v tlačovej komore

3D tlačiarne práve na plocho. 3D tlač vzoriek orientovaných na výšku bola značne problematická, zároveň dosiahli tieto vzorky aj najhoršie mechanické vlastnosti, preto sa takáto orientácia výtlačkov neodporúča.

## 7 ZÁVER

Technológie 3D tlače ponúkajú množstvo výhod pre nadnárodné spoločnosti, ako aj domácich užívateľov. Práca skúmala výtlačky zhotovené technológiu FDM (FFF), ktorá sa vyznačuje nízkou náročnosťou, cenovou dostupnosťou a množstvom použiteľných materiálov.

V prvej časti práce bol vyhodnotený vplyv červeného, čierneho a zlatého farbiaceho aditíva na mechanické a povrchové vlastnosti vzoriek. 3D filament zo základného materiálu (100 % PLA) a príslušného farbiaceho aditíva bol vyrobený na experimentálnej linke a následne použitý pre 3D tlač výtlačkov na zariadení PRUSA i3 MK3. Takto zhotovené vzorky boli podrobené ťahovým skúškam, skúškam tvrdosti metódou Shore D a analýzám textúry, drsnosti a vlnitosti povrchu. Z výsledkov skúšok vyplynulo, že farbiace aditívum má výrazný vplyv na mechanické a povrchové vlastnosti výtlačkov. Najvyššie hodnoty zaťažujúcej sily 642,089 N a tvrdosť na úrovni 73,733 HShD dosiahli vzorky s červeným aditívom. Ku zlepšeniu mechanických vlastností a zvýšeniu tvrdosti voči základnému materiálu došlo aj pridaním zlatého aditíva. Naopak, vplyvom čierneho aditíva došlo ku značnej degradácii mechanických vlastností materiálu, a to na úroveň 65,635 % voči hodnotám sily pôsobiacej na vzorky zo 100 % PLA. Vzorka s čiernym aditívom dosiahla zároveň aj najhoršiu kvalitu povrchu. Celkovo najnižšie hodnoty parametrov textúry povrchu, vlnitosti a drsnosti zaznamenala vzorka s červeným aditívom (jej povrch je preto najkvalitnejší). Výrobcom filamentov, spoločnosti Chemosvit Fibrochem, s.r.o., je na základe výsledkov odporúčané používať ako farbiace aditíva organické pigmenty, ktoré boli reprezentované červeným aditívom. Naopak, dôrazne sa neodporúča použitie anorganických sadzí, nakoľko čierne aditívum zhoršilo mechanické aj povrchové vlastnosti výtlačkov.

Druhým zámerom tejto práce, bolo poskytnúť užívateľom 3D tlače odporúčania, na základe ktorých dosiahnu ich výtlačky požadované vlastnosti. Bolo zistené, že jednotlivé plochy výtlačkov sa vyznačujú rozdielnou kvalitou povrchu. Najkvalitnejší povrch dosiahli výtlačky na spodnej ploche, ktorá bola priamo v kontakte s výhrevnou podložkou.

Ďalej bol vyhodnotený vplyv percentuálneho podielu výplne vzoriek na hodnoty zaťažujúcej sily a tvrdosti. Bolo dokázané, že so zvyšujúcim sa percentuálnym podielom výplne, narastá aj maximálna hodnota silového zaťaženia a zároveň aj tvrdosť vzoriek. Ku najvýraznejšiemu nárastu zaťažujúcej sily dochádzalo medzi podielom výplne 70 % až 100 %. Vzorky s podielom výplne 25 % až 70 % zaznamenali len malý rozdiel v zaťažujúcej sile, dosahovali 72,58 % až 79,52 % z hodnôt vzoriek s podielom výplne 100 %. Z tohto dôvodu, je v prípade slabo mechanicky zaťažovaných výtlačkov výhodné nastaviť percentuálny podiel výplne na 25 % a ušetriť tak čas aj náklady. Najlepšie mechanické vlastnosti a najvyššiu tvrdosť však dosiahnu výtlačky úplne vyplnené filamentom.

V záverečnej časti práce bol určený vplyv orientácie vlákien vnútornej výplne a umiestnenia vzoriek v tlačovej komore na mechanické vlastnosti určené ťahovou skúškou. Najvyššie hodnoty tuhosti a silového zaťaženia dosiahli vzorky s orientáciou vlákien 0° / 90°, teda smerujúce rovnobežne a kolmo na zaťažujúcu silu. Pre tlač mechanicky namáhaných výtlačkov sa odporúča zvoliť orientáciu výtlačkov na hranu. Avšak, pri výrobe veľkého množstva výtlačkov, ktoré nebudú výrazne mechanicky namáhané, postačuje tlač s orientáciou výtlačkov na plochu. Umiestnením na plochu sa u testovaných vzoriek skrátila doba tlače voči vzorkám orientovaných na hranu o viac než 47 %. Záverom je možné konštatovať, že všetky vytýčené ciele diplomovej práce boli splnené.

**ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV**

1. KLOSKE, N. a WALLACH, L. *Getting started with 3D printing*. Sebastopol: Maker Media, 2017. ISBN 978-16-804-5379-9.
2. PALERMO, E. *Fused Deposition Modeling: Most Common 3D Printing Method*. [Online] 19. September 2013. [cit. 2019-10-03]. Dostupné z: <https://www.livescience.com/39810-fused-deposition-modeling.html>
3. PÍŠKA, M. a kol. *Speciální technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-80-214-4025-8.
4. RAŠA, J. a KAREČANINOVÁ, Z. *Nekonvenční technologie*. MM Průmyslové spektrum. Nekonvenční metody obrábění 10. díl, [Online] 2008. [cit. 2019-10-11]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonnencni-metody-obrabeni-10-dil.html>
5. LANSARD, M. *CATEGORIES OF 3D PRINTING TECHNOLOGIES*. ANIWAA. [Online] 15. Január 2020. [cit. 2019-11-05]. Dostupné z: <https://www.aniwaa.com/3d-printing-technologies>
6. NOORANI, R. *3D printing: technology, applications, and selection*. Boca Raton: CRC Press, 2018. ISBN 978-13-151-5549-4.
7. ITK.MB. *Solid Ground Curling (SGC)*. lkt.mb.uni-magdeburg. [Online] [cit. 2019-11-07]. Dostupné z: <http://lkt.mb.uni-magdeburg.de/html/sgc/eindex.html>
8. FINA, F. a kol. *Sintering (SLS) 3D printing of medicines*. Int J Pharm. [Online] 2017. [cit. 2020-01-03]. Dostupné z: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28668582>
9. BOURNIAS VAROTSIS, A. *Introduction to SLS 3D Printing*. 3dhubs. [Online] 2020. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sls-3d-printing/#what>
10. CUSTOMPART. *Selective Laser Sintering*. [Online] 2008. [cit. 2020-01-05]. Dostupné z: <https://www.custompartnet.com/wu/selective-laser-sintering>
11. JONES, G. *Direct Metal Laser Sintering (DMLS) – Simply Explained*. all3dp. [Online] 13. Apríl 2019. [cit. 2020-01-05]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/direct-metal-laser-sintering-dmls-simply-explained>
12. CUSTOMPART. *Direct Metal Laser Sintering*. [Online] 2008. [cit. 2020-01-06]. <https://www.custompartnet.com/wu/direct-metal-laser-sintering>
13. MADOU, M. *Advanced Manufacturing Choices*. slideplayer. [Online] 2012. [cit. 2020-01-07]. Dostupné z: <https://slideplayer.com/slide/1554623>
14. 3Dprinttool. *MJM*. [Online] 10. September 2015. [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: <http://3dprinttool.info/process/mjm>
15. RESEARCHGATE. *The upcoming 3D-printing revolution in microfluidics*. [Online] Apríl 2016. [cit. 2019-12-11]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/299655378\\_The\\_upcoming\\_3D-printing\\_revolution\\_in\\_microfluidics/figures?lo=1](https://www.researchgate.net/publication/299655378_The_upcoming_3D-printing_revolution_in_microfluidics/figures?lo=1)
16. GUPTA, V. a kol. *3D Printing in Chemical Sciences*. Royal Society of Chemistry, 2019. ISBN 978-1-78801-440-3.
17. PRISMADD. *Technologie FDM*. [Online] 2015. [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <http://prismadd.com/technologie-fdm>
18. KRATOCHVÍL, B. a ŠVORČÍK, V. a VOJTĚCH, D. *Úvod do studia materiálů*. Praha: VŠCHT Praha, 2005. ISBN 80-7080-568-4.

19. PIETRIKOVÁ, A. a BANSKÝ, J. *Základy inžinierstva materiálov*. Košice : Elfa, 2007. 80-8086-001-7.
20. 3D-tisk. *PLA*. 3D-tisk. [Online] Vydavateľstvá Nová média, s. r. o., 18. September 2013. [cit. 2020-02-25]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/pla>
21. 3D Matter. *What is the best type of plastic for my 3D printing application?* my3Dmatter. [Online] 8. Júl 2016. [cit. 2020-02-12]. Dostupné z: <https://my3dmatter.com/what-is-the-best-type-of-plastic-for-my-3d-printing-application>
22. Materialpro 3d. *ABS*. Materialpro3d. [Online] Materialpro 3d, 2020. [cit. 2020-03-02]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/abs>
23. ÜBEL, Max. *all3dp*. The 3D Printing Materials Guide. [Online] 13. Júl 2019. [cit. 2020-03-06]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/3d-printing-materials-guide-3d-printer-material>
24. POLLÁK, V. *Polyetyléntereftalát (PET)*. Matnet. [Online] Ústav polymérov SAV, 2006. [cit. 2020-03-03]. Dostupné z: <http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=181>
25. LIPTÁKOVÁ, T. a kol. *Polymérne konštrukčné materiály*. uniza. [Online] 2012. [cit. 2020-03-04]. Dostupné z: <http://kmi2.uniza.sk/wpcontent/uploads/2009/10/POLYMERY-Po-RECENZII.pdf>
26. 3D Spectrum. *Nylon*. 3dspectrum. [Online] [cit. 2020-03-04]. Dostupné z: <https://3dspectrum.sk/nylon-3d-tlac>
27. VELOX CMS s.r.o. *TPU – všestranný termoplastický elastomer pro široké použití*. technickytydenik. [Online] 11. September 2018. [cit. 2020-03-05]. Dostupné z: [https://www.technickytydenik.cz/rubriky/plasty/tpu-vsestranny-termoplasticky-elastomer-pro-siroke-pouziti\\_45236.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/plasty/tpu-vsestranny-termoplasticky-elastomer-pro-siroke-pouziti_45236.html)
28. ROHRINGER, S. *2020 3D Printer Filament Buyer's Guide*. all3dp. [Online] 6. Február 2020. [cit. 2020-03-12]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/3d-printer-filament-types-3d-printing-3d-filament>
29. 3d Matter. *FDM 3D Printing materials compared*. 3dhubs. [Online] 2020. [cit. 2020-03-12]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/fdm-3d-printing-materials-compared>
30. Chemosvit Fibrochem s.r.o. *O nás*. fibrochem. [Online] [cit. 2020-03-16]. Dostupné z: <https://www.fibrochem.sk/sk/o-nas>
31. Chemosvit Fibrochem s.r.o. *Who we are and vision*. prolenyarn. [Online] [cit. 2020-03-15]. Dostupné z: <https://www.prolenyarn.com/about/who-we-are-vision>
32. Tradeindia. *Carbon Black Pigment For Printing Ink And Coating*. Tradeindia. [Online] 3. Marec 2016. [cit. 2020-03-17]. Dostupné z: <https://www.tradeindia.com/fp2947234/Carbon-Black-Pigment-For-Printing-Ink-And-Coating.html>
33. 3dprintingforbeginners. *How to make DIY Filament for your 3D Printer*. 3dprintingforbeginners. [Online] 2016. [cit. 2020-03-17]. Dostupné z: <http://3dprintingforbeginners.com/how-to-make-diy-filament-for-your-3d-printer>
34. STRÍTESKÝ, O. a kol. *Základy 3D tisku s Josefem Průšou*. prusa3d. [Online] 2019. [cit. 2020-03-19]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/wp-content/uploads/zaklady-3d-tisku.pdf>

35. amazon. *3DPrintrionics PRUSA i3 MK3 3D Printer (Assembled)*. amazon. [Online] 2020. [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: <https://www.amazon.in/3DPrintrionics-PRUSA-MK3-Printer-Assembled/dp/B07G6S73QH>
36. MACEJ, J. *3D TLAČ*. 3dtechniques. [Online] Stredná priemyselná škola elektrotechnická Prešov. [cit. 2020-03-27]. Dostupné z: [http://www.3dtechniques.eu/download/3D\\_SK.pdf](http://www.3dtechniques.eu/download/3D_SK.pdf)
37. MORAVČÍK, R. *Úvod do materiálového inžinierstva I*. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2015. ISBN 978-80-227-4405-8.
38. MACHEK, V. *Kovové materiály 2: vlastnosti a zkoušení kovových materiálů*. Praha: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05527-4.
39. BĚHÁLEK, L. *Polymery*. publi. [Online] 2016. [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/09.html>. ISBN: 978-80-88058-68-7
40. ČSN EN ISO 527-1. *Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 1: Obecné principy*. Zlín: Institut pro testování a certifikaci, 2012.
41. ČSN EN ISO 527-2. *Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty*. Zlín: Institut pro testování a certifikaci, 2012.
42. ZLACKÁ, A. *STREDNÉ HODNOTY (MOMENTY POLOHY)*. fhpv.unipo. [Online] [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: <http://www.fhpv.unipo.sk/cvt/statistika/zlacka/geoinfo3.pdf>
43. ČSN EN ISO 25178-2. *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Textura povrchu: Plocha-Část 2: Termíny, definice a parametry textury povrchu*. 2012.
44. ČSN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. 2012.
45. HECKENLIVELY, T. *Effects of Build Orientation and Raster Angle on the Tensile Behavior of 3D Printed Parts*. Tetonsim. [Online] 26. September 2019. [cit. 2020-04-27]. Dostupné z: <https://www.tetonsim.com/post/effects-of-build-orientation-and-raster-angle-on-the-tensile-behavior-of-3d-printed-parts>



## ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATEK

Skratka	Popis
<b>2D</b>	Dvojdimenzionálny
<b>3D</b>	Trojdimenzionálny
<b>ABS</b>	Akrylonitril-butadién-styrénu
<b>CAD</b>	Computer-aided design
<b>ČSN EN ISO</b>	Česká technická norma, ktorá zavádza do sústavy českých noriem európsku normu identickú s medzinárodnou normou ISO
<b>DMLS</b>	Direct Metal Laser Sintering
<b>FDM</b>	Fused Deposition Modeling
<b>FFF</b>	Fused Filament Fabrication
<b>ISO</b>	International Standardizing Organization
<b>Kap.</b>	Kapitola
<b>LOM</b>	Laminated Object Manufacturing
<b>Min.</b>	Minúta
<b>MJM</b>	Multi Jet Modeling
<b>Napr.</b>	Napríklad
<b>Obr.</b>	Obrázok
<b>PC</b>	Polykarbonát
<b>PET</b>	Polyetyléntereftalát
<b>PLA</b>	kyselina polymliečna
<b>RepRap</b>	Replicating Rapid Prototyper
<b>Resp.</b>	Respektíve
<b>RP</b>	Rapid Prototyping
<b>SGC</b>	Solid Ground Cutting
<b>SLA</b>	Stereolitografia
<b>SLS</b>	Selective Laser Sintering
<b>STL</b>	Stereolitografia
<b>Tab.</b>	Tabuľka
<b>TPU</b>	Termoplastický polyuretan

<b>UV</b>	Ultrafialové
<b>Vid'</b>	Vidieť
<b>s.r.o.</b>	Spoločnosť s ručením obmedzením

<b>Symbol</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Popis</b>
<b>E</b>	[MPa]	Modul pružnosti v ťahu
<b>F</b>	[N]	Zaťažujúca sila
<b>L</b>	[mm]	Upínacia vzdialenosť medzi čeľustami
<b>L<sub>0</sub></b>	[mm]	Počiatočná dĺžka telesa
<b>L<sub>0</sub></b>	[mm]	Počiatočná meraná dĺžka
<b>L<sub>t</sub></b>	[mm]	Zväčšenie upínacej vzdialenosti čeľustí
<b>Pt</b>	[μm]	Celková výška profilu
<b>Ra</b>	[μm]	Priemerná aritmetická úchylka profilu drsnosti
<b>Rq</b>	[μm]	Priemerná kvadratická úchylka profilu drsnosti
<b>Rt</b>	[μm]	Celková výška profilu drsnosti
<b>Rz</b>	[μm]	Najväčšia výška profilu drsnosti
<b>S<sub>0</sub></b>	[mm <sup>2</sup> ]	Povrch nedeformovaného prierezu
<b>Sa</b>	[μm]	Priemerná aritmetická úchylka povrchu
<b>Sq</b>	[μm]	Priemerná kvadratická úchylka povrchu
<b>St</b>	[μm]	Celková výška povrchu
<b>Sz</b>	[μm]	Výška z desiatich bodov povrchu
<b>Wa</b>	[μm]	Priemerná aritmetická úchylka profilu vlnitosti
<b>Wq</b>	[μm]	Priemerná kvadratická úchylka profilu drsnosti
<b>Wt</b>	[μm]	Celková výška profilu vlnitosti
<b>Wz</b>	[μm]	Najväčšia výška profilu vlnitosti
<b>b<sub>1</sub></b>	[mm]	Šírka zúženej časti
<b>b<sub>2</sub></b>	[mm]	Šírka koncov
<b>h</b>	[mm]	Hrúbka

$l_1$	[mm]	Dĺžka zúženej časti s rovnobežnými hranami
$l_2$	[mm]	Vzdialenosť medzi rozšírenými časťami s rovnobežnými hranami
$l_3$	[mm]	Celková dĺžka
$n$	[-]	Počet hodnôt štatistického súboru
$r$	[-]	Poradie hodnoty v štatistickom súbore
$\tilde{x}$	[-]	Medián (stredná hodnota)
$x_r$	[-]	Hodnota r-tej štatistickej jednotky
$\varepsilon$	[%]	Pomerné (relatívne) predĺženie
$\varepsilon_t$	[%]	Menovité pomerné predĺženie
$\sigma$	[MPa]	Dohovorené napätie
$\Delta L_0$	[mm]	Zväčšenie počiatočnej dĺžky vzorky