

Užitné vlastnosti výrobků připravených pomocí technologie 3D tisku

Bc. Martin Janovec

Diplomová práce
2019



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav fyziky a mater. inženýrství

akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin Janovec**

Osobní číslo: **T17304**

Studijní program: **N2808 Chemie a technologie materiálů**

Studijní obor: **Materiálové inženýrství**

Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Užitné vlastnosti výrobků připravených pomocí technologie 3D tisku**

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s obsluhou FDM tiskárny dle doporučení vyučujícího.
2. Připravte 3D modely testovacích tělísek ve formátu STL a vytvořte z nich soubory G-kódu pro tisk.
3. Vytiskněte testovací tělíška na FDM tiskárně z alespoň dvou materiálů.
4. Testujte a hodnotte mechanické a povrchové vlastnosti připravených výrobků.
5. Výsledky diskutujte a zhodnoťte vliv procesních parametrů 3D tisku na užitné vlastnosti výrobků.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

1. **GIBSON, Ian, David ROSEN a Brent STUCKER. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. 2nd. London: Springer, 2015. ISBN 978-1493944552.**
2. **BADIRU, Adedeji, Vhance VALENCIA a David LIU. Additive Manufacturing Handbook: Product Development for the Defense Industry. Boca Raton: CRC Press, 2017. ISBN 978-1482264081.**
3. **SCHWAB, Klaus. The Fourth Industrial Revolution. Geneva: Crown Business, 2017. ISBN 978-1524758868.**

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Petr Smolka, Ph.D.

Ústav fyziky a mater. inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

1. února 2019

Termín odevzdání diplomové práce:

17. května 2019

Ve Zlíně dne 22. února 2019

L.S.

doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

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

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně
13.5.2019

.....

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

(1) Vysoká škola nevydávalečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

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

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

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

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

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

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

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

ABSTRAKT

Tato diplomová práce si vzala za cíl přinést ucelenější pohled na současný stav aditivní výroby, potažmo 3D tisku. V první polovině práce je velká část věnována popisu výhod a nevýhod 3D tisku a srovnání s konvenčními technologiemi. Současně je uveden přehled jednotlivých technologií 3D tisku spolu s výčtem materiálů, které jsou pro danou technologii vhodné. Není opomenut ani stručný přehled vybraných typů aplikací, kde již aditivní technologie zdomácněla. Druhá sekce již sleduje konkrétní metodu aditivní výroby a to Fused Deposition Modeling. Snahou je nalezení optimálních procesních podmínek pro tisk s různými materiály a popsání mechanických a povrchových vlastností vzhledem k různým parametrům tisku s ohledem na užité vlastnosti výtisků.

Klíčová slova: 3D tisk, Fused Deposition Modeling, mechanické testování.

ABSTRACT

The goal of this thesis is to bring a more complete view of the current state of additive production-3D printing. In the first half of the work, a great deal is devoted to describing the advantages and disadvantages and comparing them to conventional methods of material processing. Simultaneously is here an overview of individual 3D printing technologies is given along with a list of materials that are appropriate for the technology. There is also a brief overview of selected types of applications where additive technology has already become available. The second section already follows a specific method of additive production, namely Fused Deposition Modeling. The aim is to find optimal process conditions for printing for various materials and to describe the mechanical and surface properties due to the different print parameters with regard to the utility properties of the prints.

Keywords: 3D Printing, Fused Deposition Modeling, Mechanical Testing.

Mé poděkování patří Ing. Petru Smolkovi, PhD. za odborné vedení, ochotu a trpělivost, kterou mi během zpracování diplomové práce věnoval.

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

OBSAH

ÚVOD.....	13
1. ADITIVNÍ VÝROBA.....	16
1.1 Historie aditivní výroby.....	16
1.2 Princip aditivní výroby.....	17
1.3 Rozdíly mezi běžnými technologiemi zpracování a 3D tiskem.....	18
1.4 Výhody a nevýhody aditivní výroby.....	18
1.4.1 Výhody aditivní výroby vůči ostatním metodám.....	19
1.4.2 Nevýhody aditivní výroby vůči konvenčním metodám.....	20
1.5 Průmysl 4.0 a jeho kontext v oblasti aditivní výroby.....	21
1.5.1 Průmysl 4.0 a aditivní výroba.....	21
2. TECHNIKY ADITIVNÍ VÝROBY, JEJICH ROZDĚLENÍ A CHARAKTERISTIKA.....	22
Techniky aditivní výroby můžeme dělit hned několika způsoby.....	22
2.1 Technologie aditivní výroby využívající jevu fotopolymerizace.....	24
2.1.1 SLA.....	24
2.1.2 DLP.....	25
2.1.3 CLIP.....	25
2.1.4 MPP.....	26
2.2 Technologie aditivní výroby pracující na základě řízené energetické.....	27
depozice.....	27
2.3 Technologie aditivní výroby pracující na základě slinování prášků.....	29
2.3.1 Selektivní laserové sintrování.....	29
2.4 Technologie aditivní výroby pracující na základě tryskání materiálu.....	31
nebo pojiva.....	31
2.4.1 Thermal Injekt Printing.....	31
2.4.2 Polyjet Process.....	31
2.4.3 Aerosol Jet Printing.....	32
2.4.4 3D Powder Binding Process.....	33
2.5 Technologie aditivní výroby pracující na základě listové laminace.....	34
materiálu.....	34
2.6 Technologie aditivní výroby pracující na základě extruze materiálu.....	35
2.6.1 MEAM za použití pístu.....	36
2.6.2 MEAM za použití filamentu.....	37
2.6.3 MEAM za použití šneku.....	39
2.6.4 Tisk vysoce plněných polymerů pomocí MEAM.....	39
2.6.5 3D dávkování.....	40
2.7 4D tisk.....	41

3. MATERIÁLY VYUŽITELNÉ PRO ADITIVNÍ VÝROBU.....	43
3.1 Keramika	43
3.2 Kovy	44
3.3 Polymery	45
3.3.1 Termoplasty pro PBF.....	45
3.3.2 Termoplasty pro MEAM	46
3.3.3 Termosety pro SLA	46
3.3.4 Termosety pro procesy pracující na bázi tryskání pojiva/materiálu.....	46
3.4 Kompozity.....	47
3.4.1 Keramické kompozity.....	47
3.4.2 Kovové kompozity	48
3.4.3 Polymerní kompozity	48
3.5 Nanokompozity	50
4. VYBRANÉ APLIKACE ADITIVNÍ VÝROBY	52
4.1 Konstrukční aplikace.....	52
4.2 Medicínské aplikace.....	53
4.2.1 Protetika a zubní implantologie.....	53
4.2.2 Regenerativní medicína a tkáňové inženýrství.....	54
4.2.3 Doprava léčiv.....	54
4.3 Aplikace v oblasti elektroniky a optiky.....	55
4.4 Uplatnění v energetice.....	55
4.5 Umění a móda	56
5. MECHANICKÉ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ	57
5.1 Statické namáhání v tahu.....	57
5.2 Statické namáhání v ohybu.....	58
6. POVRCHOVÉ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ V PEVNÉM STAVU	61
6.2 Drsnost povrchu	61
6.2.1 Kvantifikování drsnosti povrchu	61
7. CÍL PRÁCE.....	64
8. POPIS 3D TISKÁRNY, POUŽITÝCH MATERIÁLŮ A NAVRŽENÝCH MODELŮ PRO TISK.....	65
8.1 3D tiskárna	65
8.2 Stručný přehled použitých materiálů.....	66
8.2.1 PLA.....	66
8.2.2 ABS	66
8.2.3 PET/PET-G.....	66
8.2.5 CPE HG 100.....	67
8.2.6 Flexfill 98A.....	67
8.3 Přehled navržených 3D modelů pro tisk	68

9. VÝSLEDKY	72
9.1 Optimalizace procesních podmínek 3D tisku za účelem produkce výrobků s co nejlepšími užitnými vlastnostmi	72
9.2 Rozměrová a vizuální analýza.....	73
9.3 Mechanické testování.....	82
9.3.1. Tahová zkouška.....	83
9.3.2. Ohybová zkouška.....	85
9.4. Povrchové vlastnosti.....	87
10. DISKUZE	101
11. ZÁVĚR	105
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	106
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	113
SEZNAM OBRÁZKŮ	114
SEZNAM TABULEK.....	116
SEZNAM PŘÍLOH.....	117

ÚVOD

Během posledních několika let dochází v oblasti technologií k velkému posunu. Není to tak dávno, kdy se objevila zcela nová technologie výroby, kterou dnes známe pod souhrnným názvem aditivní výroba. Co si pod tímto pojmem máme představit? V jednoduchosti ji lze popsat, jako metodu, která vytváří daný výrobek vrstvením tenkých vrstev až do vytvoření hotového výrobku. Aditivní výroba tvoří opak vůči běžně používaným výrobním postupům. Jejím rozšíření pomohlo nejen možnost produkce komplikovaných součástí a někdy i z více materiálů najednou, ale také široké portfolio materiálů, které je možné využít.

Nejen proto je tématem této diplomové práce problematiku 3D tisku a jeho vztah k užitným vlastnostem výrobků. V teoretické části je snahou nejprve vysvětlení a popsání pojmu aditivní výroba, zhodnocení jejich plusů, ale i nedostatků, po případně možností do budoucnosti. Současně je zde i krátká pasáž, která se týká Průmyslu 4.0, který představuje nástup nových technologií, ale i nového přístupu a možností v oblasti technických věd s prolnutím do běžného života. Stěžejním pilířem práce je poté podrobný popis jednotlivých metod aditivní výroby rozdělených dle jejich principu fungování. Následuje přehledný popis všech nejčastěji používaných materiálů spolu s konkrétními příklady metod a aplikací, kde se uplatňují. Poslední dvě sekce teoretické části se snaží přiblížit mechanické a povrchové vlastnosti materiálů se zaměřením na oblast 3D tisku. Mechanické vlastnosti představují měřitelnou vlastnost materiálu, na základě, které lze posoudit vhodnost materiálu pro dané použití a ovlivnit i užité vlastnosti s maximální přidanou hodnotou pro cílového uživatele.

Druhá polovina této práce je již věnována praktickému studiu 3D tisku. V rámci této práce byla použita metoda Fused Deposition Modeling, která zpracovává nejčastěji polymerní materiál v našem případě ve formě struny a vrství jej na podložku. Experimentální část lze rozdělit do třech oblastí, na které byla zaměřena pozornost. Nejprve se jedná o sledování kvality tisku s cílem definování vhodných procesních podmínek vzhledem k použitým materiálům, pro posouzení kvality tisku a změny rozměrů vůči výchozím 3D modelům byla využita rozměrová analýza, která přinesla porovnání mezi návrhem a realitou tisku. Další část se věnuje testování mechanických vlastností – statické namáhání v tahu a ohybu. V tomto případě jsou výsledkem jednotlivé křivky zachycující průběh testování spolu se základními

fyzikálně-mechanickými veličinami popisující stav materiálu. U zkoušky v ohybu byl sledován trend stupně plnění a typu výplně na změnu mechanických vlastností. Poslední část je věnována sledování profilu povrchu výtisku a následnému zhodnocení získaných výsledků vzhledem k užitným vlastnostem výrobku.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1. ADITIVNÍ VÝROBA

Dnes již ustálené a hojně se vyskytující slovní spojení aditivní výroba si lze překládat hned několika způsoby. Jeden z nejčastějších je ten, kdy ji popisujeme jako ustálený technologický proces, během kterého se z virtuálního 3D modelu stává plnohodnotný výrobek. Synonymem pro aditivní výrobu je termín, užívaný více širokou veřejností, 3D tisk nebo též označení rapid prototyping, jehož náplní je spíše využití aditivní výroby pro zhotovení prototypů a jejich testování [1].

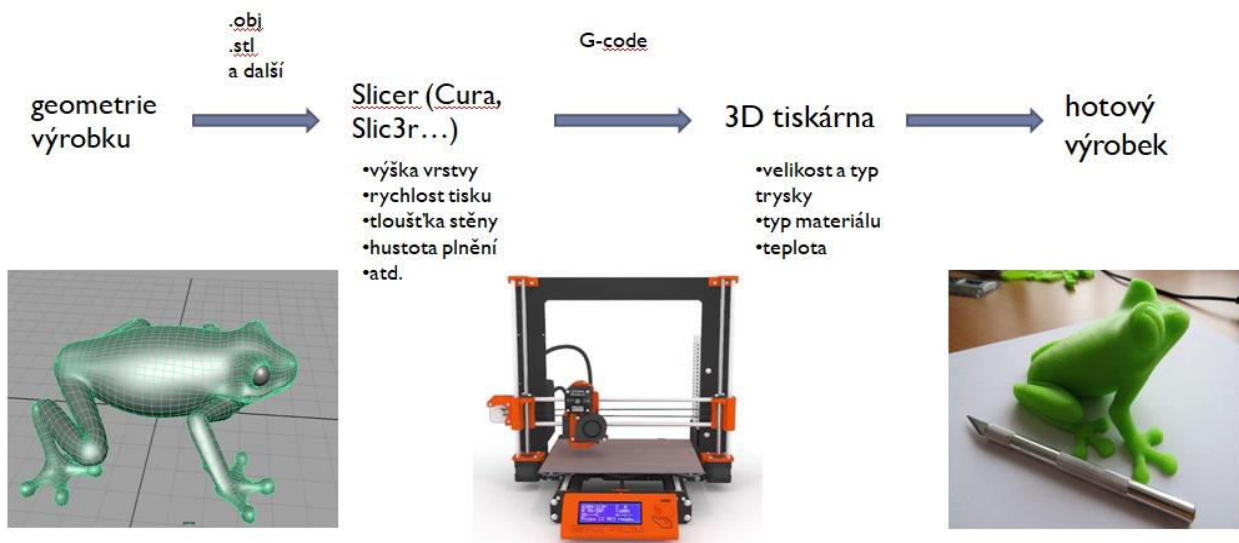
1.1 Historie aditivní výroby

Vynález aditivní výroby a její následný rozvoj do mnoha odvětví lidského poznání lze rozdělit do několika málo milníků. Nedlouho po rozšíření prvních počítačů bylo snahou vyrobit objekt, bez vnějšího přílišného zásahu člověka. Stavební kámen 3D tisku, jak jej známe dnes, byl položen již v roce 1984 panem Charlesem Hullem, který objevil schopnost tzv. fotopolymerů vlivem UV záření ztuhnout do pevné vrstvy. Po dvou letech si tento poznatek nechal patentovat a onu metodu nazval stereolitografie. Za další metody, které znamenaly významný posun v oblasti aditivní výroby, vděčíme panu Scottu Crumpovi, který přišel se dvěma technikami, a to Fused Deposition Modeling (FDM) a Selective Laser Sintering (SLS). Právě Scott Trump je zakladatel dnes již legendární společnosti Stratasys. Firma Stratasys poskytuje ucelené portfolio 3D tiskáren pro většinu dnes používaných metod 3D tisku. Rok 1999 neznamenal pouze konec 20. století, ale taky významný průlom 3D tisku ve sféře medicíny. Poprvé byla vytisknuta část lidského orgánu, které byla následně transplantována. V roce 2005 Dr. Adrian Bowyer přichází s myšlenkou, kterou známe dnes pod označením RepRap, což znamená snahu vyrobit tiskárnu, u které bude možné si většinu komponent vytisknout sami a snížit tak významně finanční zátěž. O 4 roky později přichází společnost MakerBot s možností si zakoupit balíček jednotlivých součástek 3D tiskárny, kterou si můžete snadno poskládat sami doma. Tato skutečnost opět posouvá možnosti 3D tisku na novou úroveň. Ve stejném roce zakládá Josef Průša svoji společnost Prusa Research na výrobu 3D tiskáren a v současnosti je jedním z lídrů na trhu 3D tiskáren. V roce 2012 byla pacientce v Holandsku úspěšně implantována spodní čelist vytvořená pomocí 3D technologie. V současnosti se můžeme setkat s touto technologií i v oblasti potravinářství, kdy jsou tisknuty výrobky z čokolády. Aditivní výroba za relativně krátkou dobu své existence ušla dlouhou

cestu a je více než jasné, že s postupem času ji čeká ještě větší expanze a taky možnost, že některé dnes používané výrobní technologie upozadí či dokonce plně nahradí [2].

1.2 Princip aditivní výroby

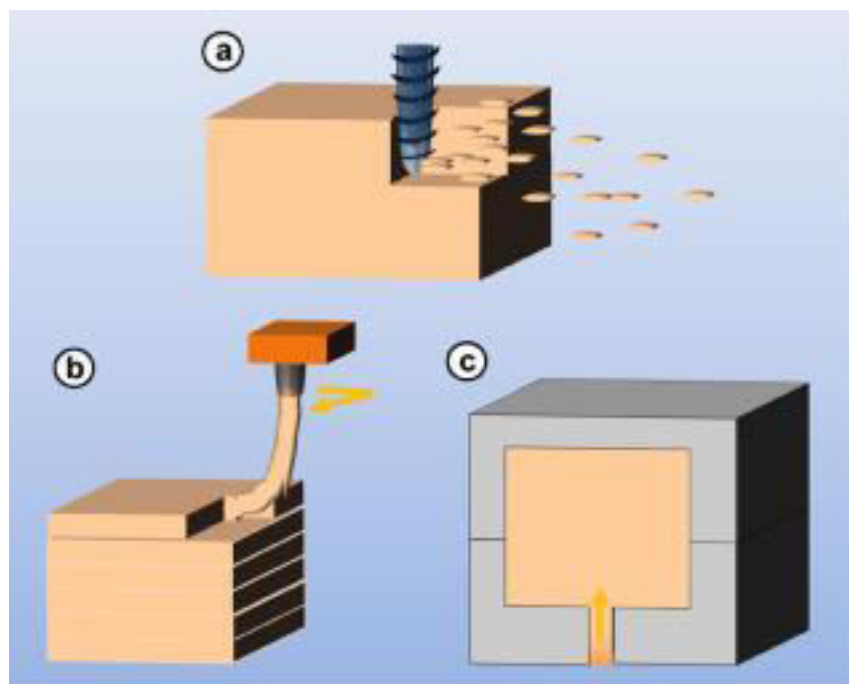
Prostřednictvím aditivní výroby lze zpracovávat téměř všechny typy tradičních materiálů od polymerů přes keramiku až po kovy. Základní odlišností od běžných technologií je, že výroba daného produktu probíhá po jednotlivých relativně tenkých vrstvách (15 až 500 μm), které jsou na sebe kladeny až do vzniku hotového výtisku. Celý proces aditivní výroby bez ohledu na konkrétní technologii či použitý materiál lze rozdělit do několika po sobě jdoucích kroků, která jsou charakteristická pro tuto technologii. Na začátku stojí počítačově vytvořený 3D model pomocí CAD softwaru, ten je následně exportován do programu, kterému říkáme slicer. Tento nástroj slouží pro zadání základních parametrů pro samotný tisk (rychlost tisku, tloušťka vrstev, typ materiálu atd.) a výsledkem je formát souboru (G-kód) čitelný pro samotnou 3D tiskárnu. Následně přichází samotný tisk daného předmětu. U složitějších struktur mohou být tisknuty současně podpěry pro samotnou možnost tisku tvarově složitých objektů. V některých případech následuje postprocessing, během kterého dochází k odstranění podpěr či dalším úpravám [1]. Pro jednodušší představu slouží následující obrázek.



Obrázek 1: Schematický popis principu aditivní výroby.

1.3 Rozdíly mezi běžnými technologiemi zpracování a 3D tiskem

Pokud se podíváme na dnes masivně používané výrobní technologie, můžeme je rozdělit do dvou skupin. První skupinou jsou výrobní postupy, které obrábějí masivní blok materiálu za vzniku finálního produktu. Někdy tyto postupy označujeme jako subtraktivní. Řadíme sem metody jako je frézování, soustružení, broušení atd. Druhou kategorií jsou metody formativní či tvářecí, kdy je materiál vystaven často tepelnému a mechanickému namáhání. Patří sem lisování, válcování, kování či vytlačování. Třetí možností je již výše zmíněné aditivní zpracování materiálů. Jednotlivé postupy jsou zachyceny na obrázku 2 [1–3].



Obrázek 2: Znárodnění jednotlivých výrobních technologií. Ilustrace a) zachycuje subtraktivní postupy, b) patří aditivní výrobě, c) znázorňuje tvářecí postupy [1].

1.4 Výhody a nevýhody aditivní výroby

Každá výrobní technologie sebou přináší výhody, ale zároveň svá má omezení. Jinak tomu není ani u aditivní výroby. Pro úspěšnou progresi je vždy rozhodující, která ze stran mince bude mít vyšší váhu. Pro 3D tisk je to určitě ta s těmi klady [1,3].

1.4.1 Výhody aditivní výroby vůči ostatním metodám

Mezi hlavní přednosti aditivní výroby řadíme flexibilitu designu. Tato přednost je jednou z nejdůležitějších, jelikož běžné technologie mnohdy neumožňují výrobu složitého produktu bez nutnosti jej zkompletovat z více součástí. Tato nevýhoda v případě aditivní výroby odpadá a můžeme si dovolit navrhnout i vysoce topologicky náročné struktury (buněčné prostředí atd.), kdy jejich výroba probíhá v jednom kroku bez velkého množství odpadu, které doprovází běžné metody výroby a bez nutnosti dodatečné montáže jednotlivých komponent. Další výhodou je cena geometrické komplexity. Pro konstruktéra to znamená velkou svobodu pro návrh konstrukce bez nutnosti přemýšlet o náročnosti její výroby (viz obrázek 3) a tím i ceně takového výrobku. Metoda vstřikování sice umožňuje výrobu tvarově složitých výrobků, ale její cenová návratnost je pouze při masové produkci vzhledem k vysoké pořizovací ceně výrobní formy. Časová a finanční stránka aditivní výroby je další plus. Vzhledem k tomu, že aditivní výroba je téměř bezodpadová technologie pomáhá výrazně šetřit čas a finanční prostředky. Spotřeba materiálu je mnohdy až o 75 % menší než v případě konvenční technologie pro výrobu stejného výrobku. V dnešní době, kdy se klade velký důraz na ochranu životního prostředí je tato vlastnost jedním z tahounů rozvoje aditivní výroby do mnoha oblastí lidského počínání [1,3– 5].



Obrázek 3: Ukázka složitosti výtisku vytvořeného pomocí aditivní výroby [1].

1.4.2 Nevýhody aditivní výroby vůči konvenčním metodám

Rychlost tisku je prvním slabým místem aditivní výroby. Rychlost tisku vůči běžným technologiím je výrazně nižší, už ze své podstaty, kdy dochází k vrstvení materiálu na sebe po relativně tenkých vrstvách. Tato vlastnost se může promítnout i do možnosti použití aditivní výroby pro masovou produkci nebo jako je tomu spíš dnes pro výrobu prototypů, či malosériové nebo unikátní výroby. Dalším nedostatkem jsou fyzikální vlastnosti výtisku. Jak již bylo zmíněno výše, výroba probíhá po vrstvách, což sebou přináší problém, že daný výrobek vykazuje odlišné mechanické vlastnosti v jednotlivých směrech. Zároveň je zde vznik reziduálních napětí mezi jednotlivými vrstvami. Dalším aspektem je relativně omezená možnost výběru materiálu, co se týká především jejich vlastností (přítomnost funkčních skupin pro stereolitografii nebo porozita u výtisku vyráběných pomocí prášků apod.). Rozlišení daného výtisku má výrazný vliv na jeho výsledné vlastnosti a je tedy mnohdy limitující pro použití. Často je pozorován trend, kdy výchozí 3D návrh struktury neodpovídá rozměrově hotovému výrobku. Přesnost výrobku je ovlivněna celou řadou proměnných během procesu výroby zejména tedy tloušťkou vrstvy, kdy rozlišení roste s klesající tloušťkou. Dále jde o přesnost kroku motoru, který zajišťuje dávkování či vytvrzování materiálu a taky se projevuje viskozita nebo velikost částic materiálu. V případě nutnosti kombinování více druhů materiálu v rámci jedné části výrobku může docházet ke komplikacím. Důvodem je odlišná reaktivita, tepelná a toková charakteristika daných materiálů. Tyto efekty vedou mnohdy k vzájemné nekompatibilitě použitých materiálů, což vede k nutnosti aplikace jiných výrobních metod. Vzhledem k možnosti výroby velmi tvarově složitých součástí se aditivní výroba dostává do oblasti medicíny. Konkrétně výroby implantátů. S tím ovšem úzce souvisí biokompatibilita použitých materiálů případně látek vznikajících při samotné výrobě. V případě akrylátů, které jsou cytotoxické pro lidské tělo, a tudíž nevhodné pro lékařské účely. Naopak kyselina polymléčná (PLA) je vhodná z hlediska biokompatibility, ovšem má nízké mechanické vlastnosti. Za zmínku stojí uvést i vliv přenosu vytvořeného 3D modelu do formátu stl. Během této transformace dochází k vytvoření sítě trojúhelníků, které rozdělí model na určitý finální počet částí, ovšem které již přesně nekopírují dané linie modelu a vzniká tak rozměrová nepřesnost. Pro možnou nápravu je možné zvýšit počet segmentů, což na druhou stranu přináší vyšší datový objem souboru a tím i zvýšené nároky na výpočetní sílu počítače, na němž bude takový soubor konvertován do G-kódu. [1,3,6,7].

1.5 Průmysl 4.0 a jeho kontext v oblasti aditivní výroby

Průmysl 4.0 neboli 4. průmyslová revoluce je proces, během kterého dochází k významným změnám v oblasti průmyslu, obchodu, hospodaření, energetiky, ale také společnosti. Hlavním stěžejním pilířem je internet věcí, umělá inteligence a kyberneticko-fyzické systémy a jejich implementace do všech odvětví. A tedy propojení kybernetické stránky se světem fyzické reality, tak jak ji známe dnes. Implementace Průmyslu 4.0 do každodenní praxe vyžaduje celou řadu kroků, které jsou klíčové pro udržení technologického a společenského pokroku. Vlivem zavádění konceptu Průmyslu 4.0 bude docházet ke zvýšení produkce práce, ale zároveň i změně požadavků na pracovníky. Tento jev musí vést ke změně vzdělávacích procesů a reagovat tak na změnu na trhu práce. Mezi hlavní přednosti nástupu tzv. 4. průmyslové revoluce bude jednak již zmíněná efektivita práce, snížení surovinové a energetické nákladnosti, chytrá městská infrastruktura nebo optimalizace logistických cest. Ale vzápětí je nutné pamatovat i na možné komplikace vzhledem k dostatečnému zabezpečení dat a infrastruktur, ochraně duševního vlastnictví a soukromí. Celkový náhled na další průmyslovou revoluci, která přichází je ten, kdy je důležité vnímat všechny souvislosti s dostatečným mezioborovým nadhledem, během kterého dochází k transformaci od izolovaných systémů k systémům plně integrovaným[8].

1.5.1 Průmysl 4.0 a aditivní výroba

Jednou z důležitých technologií, která umožní změnu a zároveň povede k vyšší flexibilitě je aditivní výroba, jde tedy o velmi široce uplatnitelný systém, který zpracovává digitální soubory. Vzhledem k relativní jednoduchosti obsluhy může být celý proces výroby po-mocí aditivní výroby poloautomatický, což výrazně ovlivňuje cenu a energetickou náročnost procesu. Za pomoci aditivní výroby se celý vývojový proces zrychluje a není zatížen technologickými mantinely. Precizní odhad množství materiálu pro výrobu následně zjednodušuje skladové hospodářství a řízení zakázek. Rozmach aditivních technologií přináší i změnu na trhu práce, především zvýšení poptávky po osobách vzdělaných v oblasti IT, technických věd a logistice [8].

2. TECHNIKY ADITIVNÍ VÝROBY, JEJICH ROZDĚLENÍ A CHARAKTERISTIKA

Techniky aditivní výroby můžeme dělit hned několika způsoby.

Nejjednodušším možným dělením všech výrobních technologií, a tedy i aditivní výroby je rozdělení dle zpracovávaného materiálu, a to tedy na aditivní metody zpracovávající:

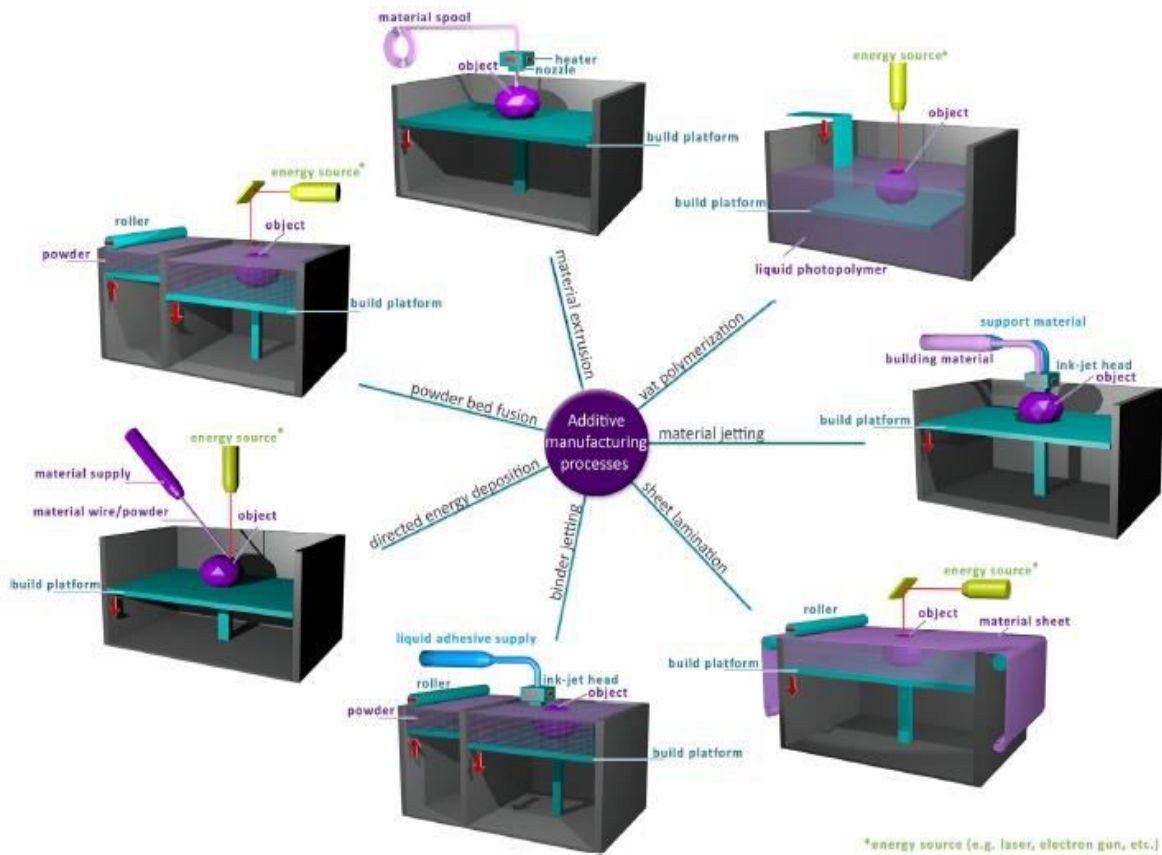
- kov
- keramiku
- polymer, případně jejich kombinace (tj. kompozit)

Jedním z dalších dělení je na základě povahy výchozího materiálu. Dělení je následující:

- na bázi práškových materiálů (příkladem je Selective Laser Sintering)
- na bázi tuhých materiálů (příkladem je Fused Deposition Modeling)
- na bázi fotopolymerů (příkladem je Stereolitografie)

Další dělení je na základě dle normy ISO/ASTM 52900:2015. Nadcházející obrázek 4 znázorňuje následující dělení, zároveň obrázek 5 přináší podrobný přehled procesů a technologií k nim patřících. Klasifikace aditivních procesů je v tomto případě následující [1,9,10]:

- kád'ová fotopolymerizace
- řízená energetická depozice
- slinování prášků
- tryskání materiálu
- tryskání pojiva
- listová laminace
- vytlačování materiálu



Obrázek 4: Rozdělení procesů aditivní výroby dle normy ISO/ASTM 52900:2015[9].

typ výrobního procesu	technologie	materiál
tryskání pojiva	3D Printing Ink-jetting S-print M-print	kov polymer keramika
řízená energetická depozice	Direct Metal Deposition Laser Deposition Laser Consolidation Electron Beam Direct Melting	kov: prášek a drát
vytlačování	Fused Deposition Modeling	polymer
tryskání materiálu	Polyjet Ink-jetting Thermojet	fotopolymer vosk
spékání	Selective Laser Sintering Selective Laser Melting Electron Beam Melting	kov polymer keramika
listová laminace	Ultrasonic Consolidation Laminated Object Manufacture	hybridy kov keramika
káďová fotopolymerizace	Stereolithography Digital Light Processing	fotopolymer keramika

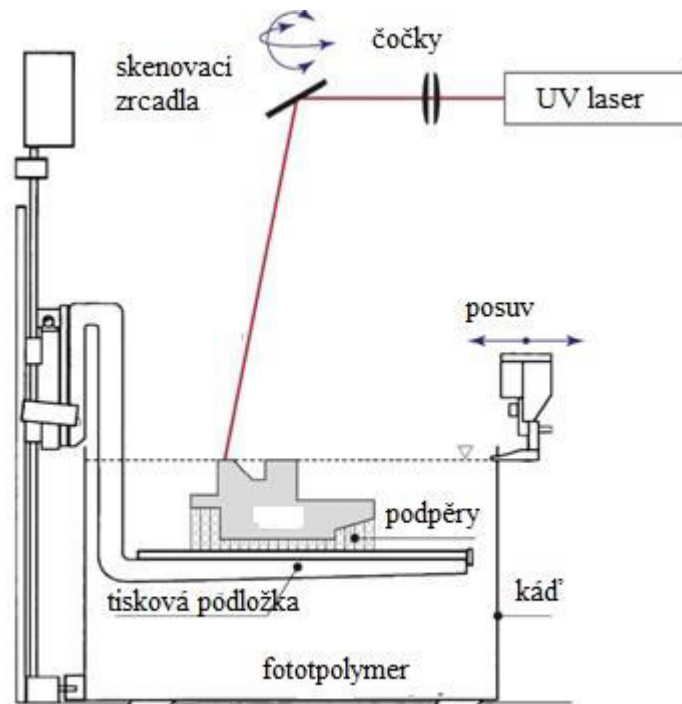
Obrázek 5: Rozdělení procesů spolu s vybranými technologiemi a materiály, které lze takto zpracovávat [10].

2.1 Technologie aditivní výroby využívající jevu fotopolymerizace

Technologie aditivní výroby využívající fotopolymeru jsou vůbec těmi nejstaršími a stály u zrodu celého odvětví 3D tisku. Když mluvíme o stáří, bavíme se o 80. letech minulého století. Základním principem je vytvrzení fotopolymeru pomocí působení světelné energie. V odborném textu se setkáváme s anglickým označením Vat Photopolymerization, což lze přeložit jako kádřová polymerizace, jelikož pracujeme s roztokem polymeru, který je po jednotlivých vrstvách síťován, zbylý roztok slouží zároveň jako opora pro vznikající objekt. I tak je však většinou nezbytné u geometricky komplikovanějších dílců tiskové podpěry využít. Do této skupiny řadíme celkem 4 techniky. Jedná se o Stereolitografii (SLA), Digital Light Processing (DLP), Continuous Liquid Interface Production (CLIP) a Multiphoton Polymerization (MPP). U jednotlivých technologií je princip stále stejný, pouze se mění některé parametry procesu [1,2].

2.1.1 SLA

Základy této techniky byly položeny již v roce 1984, kdy byla patentována. Popis této techniky, je relativně jednoduchý. Pracujeme s roztokem fotosenzitivní pryskyřice, kdy vlivem působení světelného paprsku dochází v daných místech k její polymerizaci a vzniku rigidní struktury. Světelný paprsek prochází přes systém čoček a zrcadel, které umožňují přesné zacílení na požadované místo. Po vytvrzení jednotlivé vrstvy dojde k posunu podložky o tloušťku jedné vrstvy dolů a dochází k vytvoření další vrstvy. Takto se celý proces opakuje až do vytvoření hotového výrobku. Po ukončení tisku je výtisk vyjmut a zbaven zbytků pryskyřice. Takto vyčištěný produkt je následně vložen pod UV lampu k dokončení vytvrzení pryskyřice. Rychlost ozáření fotopolymeru je vlastnost, která limituje rychlost celého procesu výroby. Jako zdroj je využíván nejčastěji UV laser. Působením právě UV záření dochází k vytvoření příčných vazeb u použitého substrátu a tím ke vzniku pevného tělesa s danými vlastnostmi. Mezi hlavní přednost stereolitografie patří vysoké rozlišení výtisků, vlivem velmi přesného cílení paprsku. Vertikální rozlišení je dáno především hloubkou penetrace světelného svazku, kterou lze do jisté míry ovlivnit přidáním vhodného absorbéru. Opět platí čím menší penetrace tím větší výsledné rozlišení. Obrázek 6 schematicky znázorňuje celý proces spolu se základními komponenty přístroje [1,10].



Obrázek 6: Stereolitografie [10].

2.1.2 DLP

Technologie DLP je téměř identická s metodou SLA, až na ten rozdíl, že u technologie DLP je využívána mřížka, díky ní dochází k ozáření pouze požadovaného místa, kde má dojít k zesíťování pryskyřice a zbytek pryskyřice je tak chráněn. Proto je tato metoda někdy v literatuře označována jako Dynamic Mask Photolithography. Jako stínítko slouží projekce bílých a černých obrázků na povrch roztoku polymeru. V bílých místech dochází k vytvrzení, naopak černá místa zůstávají neozářená. Tato metoda tvorby obrazců je běžně používána v projektorech. Díky tomu DLP dosahuje výrazně vyšší rychlost tisku než SLA, rychlost tisku je obvykle v cm h^{-1} . Zároveň je tato metoda méně ovlivněna působením kyslíku na pryskyřici, jelikož vytvrzovaná vrstva se nachází ve spodní části [11, 12].

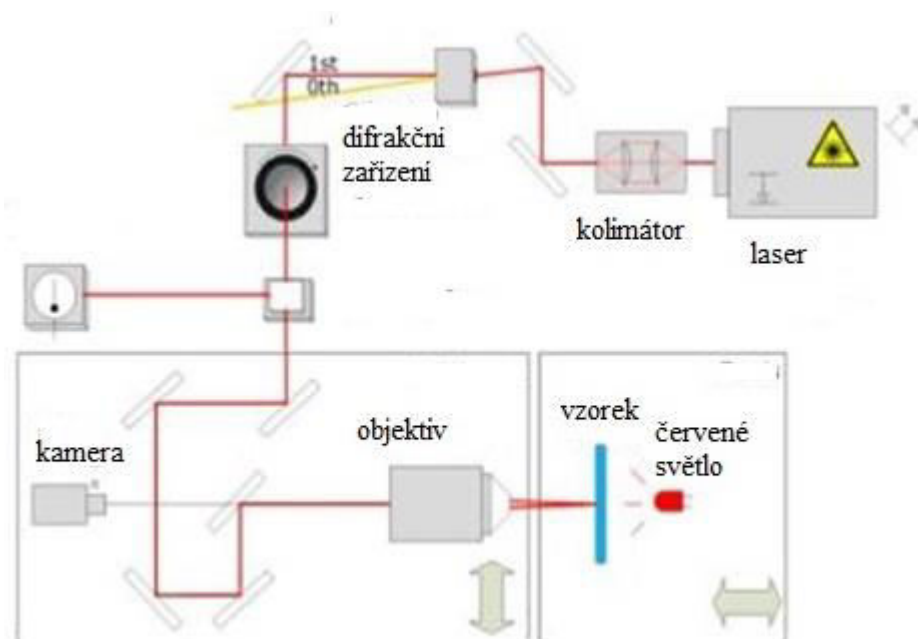
2.1.3 CLIP

Jedná se o metodu, kterou rozvinul DeSiomone a kol., přičemž její podstata spočívá ve využití propustného filmu pro kyslík za účelem ukončení polymerace na povrchu výtisku, což vede k odstranění nutnosti vytvoření jakési přechodné vrstvy pro další vznikající vrstvu. Dochází k vytvoření mrtvé zóny mezi UV a kyslík propustnou membránou a samotným

produktem, který zamezuje právě bouřlivé polymerizaci a její tloušťka je obvykle kolem 20 až 30 μm . Metoda CLIP posouvá hranice rychlosti tisku až k 30 cm h^{-1} . Pokud bychom překročili rychlost 100 cm h^{-1} , tak dojde k poklesu rozlišení výrobku. Rozlišení je rovněž ovlivněno i množstvím absorbéru záření. Snížíme-li jeho koncentraci, zvýšíme pak hloubku penetrace a tím i rychlost tisku [13,14].

2.1.4 MPP

Podstatou je současná absorpce dvou fotonů zároveň, která byla popsána již v roce 1931, ale až ke konci 20. století s rozvojem femtosekundových laserů na bázi titanu a safíru došlo k aplikaci tohoto děje v technické praxi. Příkladem takovéto aplikace je právě metoda MPP. Díky tomuto dochází k vytváření objektu skutečně ve 3D, což není možné při tvorbě jednotlivých vrstev po sobě. Celý přístroj je relativně komplikovaný oproti předešlým. Zachycuje jej obrázek 7. Přednosti této metody jsou ve využití při zpracování hybridních struktur na bázi zirkonia a fotosenzitivně modifikovaných gelů. Zároveň jako světelný zdroj je využíváno záření emitující v oblasti blízké infračervené oblasti, které daleko lépe prochází živou tkání bez denaturačních efektů na proteiny. A tím je tato metoda vhodná v oblasti zpracování biomateriálů [1, 15 – 17].

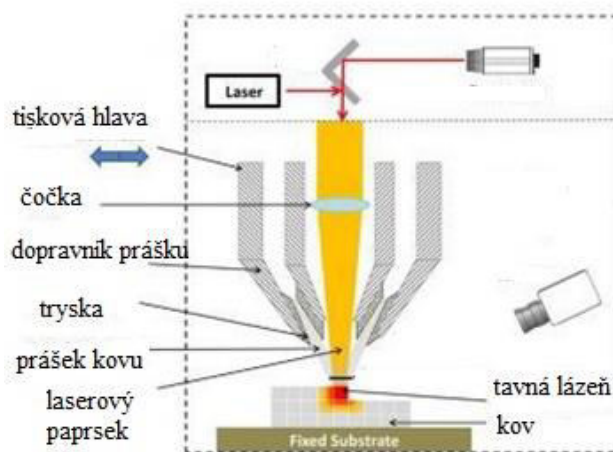


Obrázek 7: Schematický náčrt přístroje pracující metodou MPP [1].

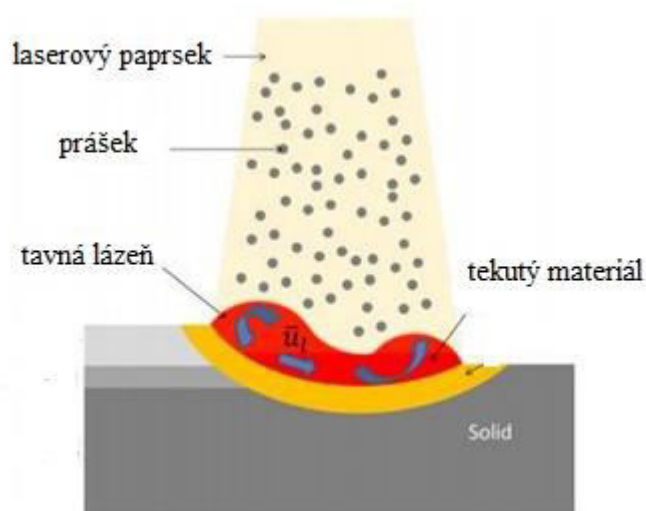
2.2 Technologie aditivní výroby pracující na základě řízené energetické depozice

Pokud se bavíme o zpracování kovů pomocí 3D tisku, tak jednou ze dvou nejčastěji používanou metodou je technologie a anglickým označením Direct Energy Deposition ve zkratce pak DED (viz obrázek 8). Tuto technologii můžeme zařadit pod širší skupinu označení aditivní technologie postavené na působení laseru. DED technologie zařazuje velkou škálu technologií, které pracují na stejném mechanismu, ale vždy s malou obměnou využití či procesních podmínek. Jako příklad lze uvést technologie náležející do skupiny DED metod jsou to: Laser Cladding, Laser Direkt Casting, Laser Powder Fusion, Direct Metal Deposition či Laser-Aided Direkt-Metal/Material Deposition a mnohé další. Všechny technologie aditivní výroby zpracovávající kovy pracují na základě sintrování jednotlivých vrstev materiálu, a to nejčastěji ve formě prášku za pomoci vysokoenergetického zdroje, kterým může být svazek elektronů, laser či elektrický oblouk. V případě použití laseru se setkáváme nejčastěji s přístrojem na bázi Nd:YAG, který je velmi hojně používán i u tradičních zpracovatelských technologií (svařování apod.) či CO₂, u kterých se pohybuje vlnová délka okolo 1067 nm, což má za následek menší účinnost. U svazku elektronů dosahuje výkon až okolo 4kW. Nejčastěji je výkon zdroje v rozmezí 100 až 5000 kW. Metoda DED je specifická tím, že dávkování prášku je zajištěno pomocí trysky nebo i trysek přímo do místa, kde má materiál být vložen. Čímž vzniká něco, co lze nazvat tokem energetického záření obsahující částice kovu, které dopadají na povrch vznikající vrstvy a tvoří tavnou lázeň podobně jako je tomu u svařování. Ta následně tuhne a dochází k vytvoření kompaktní vrstvy materiálu (viz obrázek 9). Na rozdíl od metody Powder Bed Fusion (PBF), jenž patří také do skupiny nejfrekventovanějších metod pro zpracování kovových prášků, kde dochází k nanesení vrstvy prášku pomocí stěrky. Díky tomuto mechanismu aplikace materiálu je metoda DED unikátní a skrývá velký potenciál pro aplikace v oblasti výroby vysoce čistých kovových součástek a zároveň je velmi vhodná pro využití v oblasti oprav komponent v běžné praxi a poskytuje vhodnou náhradu za dnes běžně používané subtraktivní metody. Vyrobené součástky vynikají minimem defektů, vysokou hustotou, přesnou depozicí a metalurgickými vazbami. Vzniklá mikrostruktura je vysoce homogenní, což zaručuje vynikající mechanické vlastnosti jednotlivých součástek. Využití nachází v oblasti medicíny, letectví a armády. Mezi nejčastěji zpracovávané druhy

kovů technologií DED řadíme titanové slitiny, hliníkové slitiny, ocel a superslitiny na bázi niklu. Parametrů, které ovlivňují výsledné vlastnosti, máme hned několik: výkon energetického zdroje, průměr energetického paprsku (v řádech milimetrů), velikost a tvar částic materiálu, typ použité trysky atd. Vhodná velikost jednotlivých částic kovu se pohybuje v rozmezí 10 – 100 μm a tvar je nejhojněji kulovitý. Důležité je i to, že celý proces probíhá v inertní atmosféře, která brání nežádoucí oxidaci kovu. Rychlost dávkování materiálu se pohybuje v mantinelech 1 až 10 g min^{-1} . Pouze jako příklad lze uvést, že při použití laseru o výkonu 500 W a průměru svazku 1 mm je výsledný tepelný tok 50 000 W cm^{-2} [1,2,18 –21].



Obrázek 8: Metoda DED [14].



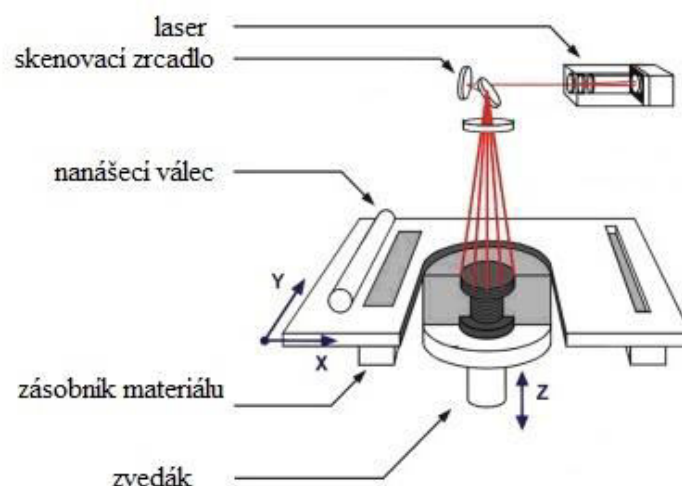
Obrázek 9: Znárodnění energetického svazku s částicemi kovu dopadající na povrch vznikajícího výtisku [14].

2.3 Technologie aditivní výroby pracující na základě slinování prášků

Tento typ aditivních technologií je opět jako předešlá technologie zaměřena primárně na zpracování kovových prášků, ale setkáváme se i se zpracováním keramik a polymerů. V odborném textu se setkáváme se označením Powder Bed Fusion. Do jisté míry je analogem metody DED [1].

2.3.1 Selektivní laserové sintrování

Nejdůležitějším zástupcem je SLS. Tato metoda byla poprvé popsána v roce 1986 na univerzitě v Texasu Carlem Deckardem. Princip této metody můžeme popsat ve třech po sobě jdoucích krocích. Nejprve dochází k nanesení vrstvy prášku odpovídající jedné vrstvě, poté dochází k solidifikaci částic a následuje opět převrstvení vrstvou materiálu, jejichž tloušťka je v rozmezí 100 až 200 μm . Tyto kroky se opakují, až do vytvoření kompletního výrobku. Ilustrace přístroje využívaná technologií SLS je zobrazena na nadcházejícím obrázku.



Obrázek 10: SLS [46].

Metodou SLS mohou být zpracovávány kovy, keramiky a polymery, a to ve formě prášku, přičemž velikost a struktura částic je klíčovou podmínkou výsledných vlastností výrobku. Optimální velikost částic se pohybuje okolo 100 μm . Dalším efektem, který může výrazně ovlivnit výsledné vlastnosti negativním směrem je přítomnost reziduálních napětí vlivem vznikajících teplotních gradientů během sintrování částic materiálu. Vznik napěťových mostů ovšem neovlivňuje pouze distribuce částic, ale i procesní parametry (tloušťka vrstvy, teplota atd.). Mezi další negativní jev, který výrazně ovlivní konečný charakter výrobku je vznik póru mezi jednotlivými slinutými částicemi. Tyto pak výrazně sníží mechanické vlastnosti

výrobku. Ovšem i tato nevýhoda může být v některých aplikacích výhodná. Například u využití, kde je nižší hmotnost žádanou proměnou. Pro samotné slinutí materiálu jsou využívány lasery. Právě typ a výkon použitého laseru bude výrazně ovlivnit hloubku penetrace a tím i výsledné rozlišení výtisku. V některých případech je přidáváno aditivum, pracující jako absorbér záření. Takovou přísadou u polymerů jsou často saze. Při sintrování polymerů hraje důležitou roli právě teplota. Je důležité důkladně znát teplotu tání v případě semikrystalických polymerů nebo teplotu tečení u amorfních polymerů. U semikrystalických polymeru je fázový přechod z pevné do kapalného stavu rychlý a nastává v úzkém intervalu teplot a je charakteristický prudkým poklesem hustoty a viskozity. U amorfních polymerů je změna méně strmá a interval je širší. Interval tání/tečení u polymerů není ovlivněn jen střední molekulovou hmotností, ale i molekulární strukturou a distribucí molekulových hmotností. Při srovnání dvou na první pohled stejných polymerů PA 6 a PA 12, je struktura identická je použití u metody SLS odlišná. Vlivem vyššího počtu vodíkových vazeb je teplota tání PA 6 233 °C ve srovnání s PA 12, který taje při teplotě 187 °C. Vedle termoplastických polymerů, lze metodami PBF zpracovávat rovněž termoelastomery a elastomery. Pokud se podíváme na aspekt recyklace, který je v současnosti skloňován ve všech pádech je nutné jej zohlednit i u metody SLS. Kde na rozdíl od předešlé metody, kde se pracuje pouze s materiálem, který je sintrován se u metod PBF v komoře nachází s výrobkem přebytečný materiál, který je nutné znovu začlenit do výroby a snížit, tak dopad na životní prostředí. Využití metod PBF je z důvodu použití širokého spektra materiálů vysoce adaptabilní pro velké množství užitných aplikací. Jedním příkladem může být zpracování hi-tech materiálů, kterým je dozajista PEEK. Tyto materiály jsou typické pro své náročné zpracovatelské postupy, které jsou mnohdy i odlišné od běžných materiálů. Díky jeho vysoké odolnosti vůči působení teploty a vynikajícím mechanickým vlastnostem a chemické odolnosti je předurčen pro vy-užití ve speciálních případech. U takových materiálů je velmi často použit speciální výrobní přístup i vzhledem ke konkrétnímu využití. Metody aditivní výroby přináší postup umožňující výroby na míru. PEEK nachází kromě použití v letectví taky své místo v jako biomateriál, ze kterého mohou být pomocí metod PBF konstruovány nástroje nebo implantáty [1, 2, 20–23, 46].

2.4 Technologie aditivní výroby pracující na základě tryskání materiálu nebo pojiva

Dle rozdělení metod aditivní výroby v úvodu této kapitoly bylo tryskání materiálů a tryskání pojiva uvedeno jako dva samostatné body ovšem pro jejich velkou podobnost byly spojeny pro jejich popis do jedné kategorie. Do rodiny Binder Jetting, což je anglický název pro tryskání pojiva řadíme především metody Thermal Injekt Printing, PolyJet Process a Aerosol Jet Printing. Do skupiny technologií spadající pod Material Jetting řadíme 3D Powder Binding Technology nebo zkráceně 3DP. Technologie 3D tisku založené na tryskání pojiva byly vyvinuty v MIT v 90. letech minulého století. Během těchto technologií pracujeme se dvěma materiály a to pojivem, kterým je často tekutá složka a pevná složka, kterou je kov nebo keramika. Pojivo slouží jako složka, u které je hlavní funkce spojení jednotlivých částic materiálu. Po vytisknutí produktu následují operace post-processingu. Tyto zahrnují kroky, jako jsou: vytvrzení, infiltrace, sintrování apod. Mnohdy je jejich časová náročnost vyšší než u samotného tisku. Nedostatkem této výrobní technologie je nízká užitnost výtisků pro konstrukční účely vlivem často vysoké porozity a tím nízkých mechanických vlastností. Materiály, které jsou používány, se vyznačují nízkou viskozitou při teplotách vytvrzování. Tuto podmínku dokonale splňují pryskyřice na bázi uretanoakrylátů. Zároveň je nutná dostatečná tepelná stabilita. Volba vhodného pojiva je klíčová pro soudržnost výtisku. Zástupcem vosku jako pojiva může být kombinace 70% oktadekanolu s 30% talovým olejem[24 – 27].

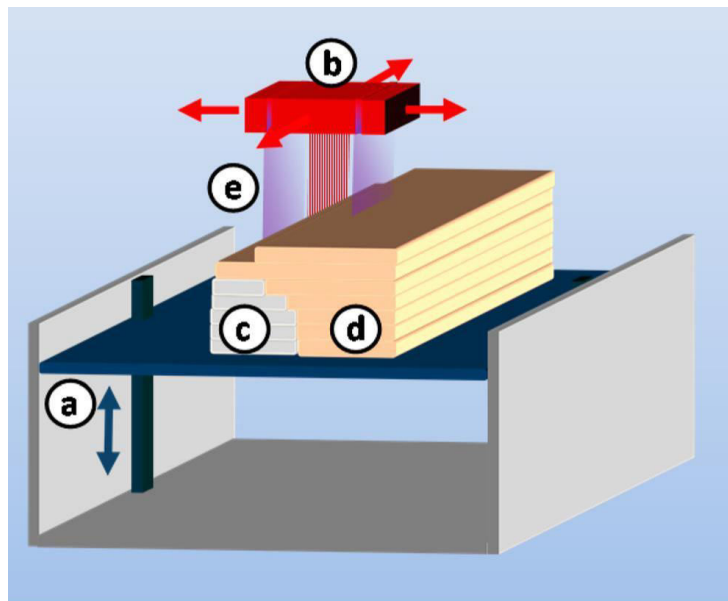
2.4.1 Thermal Injekt Printing

Tato metoda je z nejpoužívanějších v případě zpracování dvojdimenzionálních substrátů. Působením tepla na tekutou složku (pojivo) se vyvíjí bublina, která se hromadí v zásobníku a následně se tekutina dostává přes otvor tiskové hlavy ven mikroskopickou kapilárou na substrát. Za pojivo je v tomto případě nejčastěji použita pryskyřice nebo vosk. Substrátem neboli nosným materiálem je nejčastěji kov nebo keramika ve formě prášku[24,26].

2.4.2 Polyjet Process

Zde jsou propojeny dvě silné stránky dvou výrobních postupů, a to litografie a 3D tisku. Pomocí PolyJet Process dosahujeme vysokého rozlišení a dobrých povrchových vlastností a zároveň velkého stavebního objemu a vysoké rychlosti tisku. Názorný nákres metody spolu

se základními částmi se nachází na obrázku 11. Tisková hlava je opatřena stovkami trysek, které dávkuje pojivo (nejčastěji fotopolymer). Po nanesení pojiva dochází za pomoci UV světelného zdroje, který je připevněn na tiskové hlavě k vytvrzení a spojení jednotlivých částic materiálů, kde bylo použito adhezivum. Velkou výhodou je, že podpurný materiál není přímo svázán s výtiskem a tím je i jeho odstranění více než snadné a zároveň ekologické. Při použití více dimenzionálních trysek lze vyrábět produkty složené z více odlišných materiálů či barev [1,24,28,29]

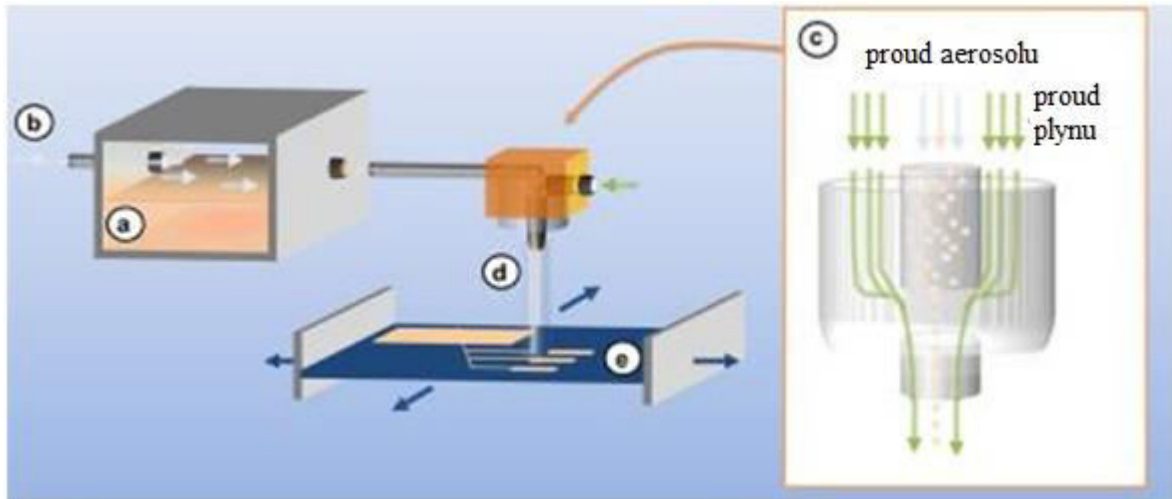


Obrázek 11: PolyJet Process; a) podložka, b) trysková hlava, c) vrstvy podpurného materiálu, d) vrstvy materiálu, e) UV zdroj [1].

2.4.3 Aerosol Jet Printing

Tato metoda pochází z dílny společnosti OPTOMECH Inc. z roku 2004. Kouzlo této technologie tkví v k atomizaci stavebního materiálu v aerosolové komoře pomocí výkonného ultrazvuku pracující s frekvencí v rozsahu 1,6 až 2,4 MHz nebo ultrazvuk může být nahrazen pneumatickou atomizací (viz obrázek 12). Aerosol obsahuje jak nosný materiál, tak i pojivo, které je nanášeno na tiskovou podložku současně. Nárok na použitý materiál jsou následující, v případě pojiva je nutné volit látky o viskozitě nižší než 2500 mPa s a pro částice nosného materiálu je důležitý malý průměr (1–5 μm). Inertní plyn slouží k usnadnění depozice na podklad. Délka trysky je nejčastěji 2 cm o vnitřním průměru 50 až 300 μm . Rychlost tisku je vyšší než 200 mm s^{-1} a tloušťka jedné vrstvy se pohybuje okolo 100 nm.

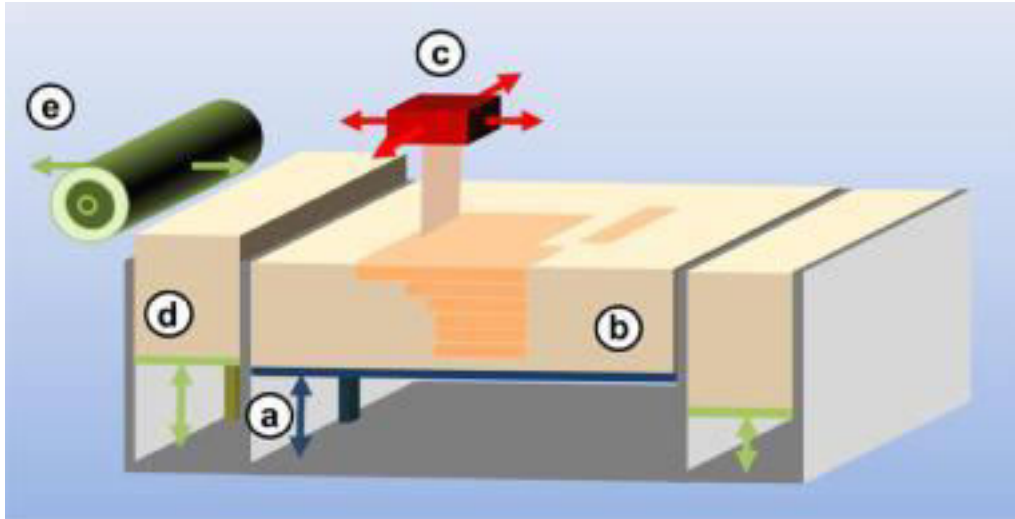
Metoda je poměrně co do počtu tisknutelných materiálů značně pestrá. Mezi zástupce stojí za zmínku uvést: teflon, karbon, stříbro, platina, polyamid či polyvinylpyrolidon. Uplatnění této metody se nachází především v oblasti elektrotechniky (fotorezisty, elektrody, kontakty a senzory), ale též v sekci biomateriálů (tkáňové inženýrství).[30, 31]



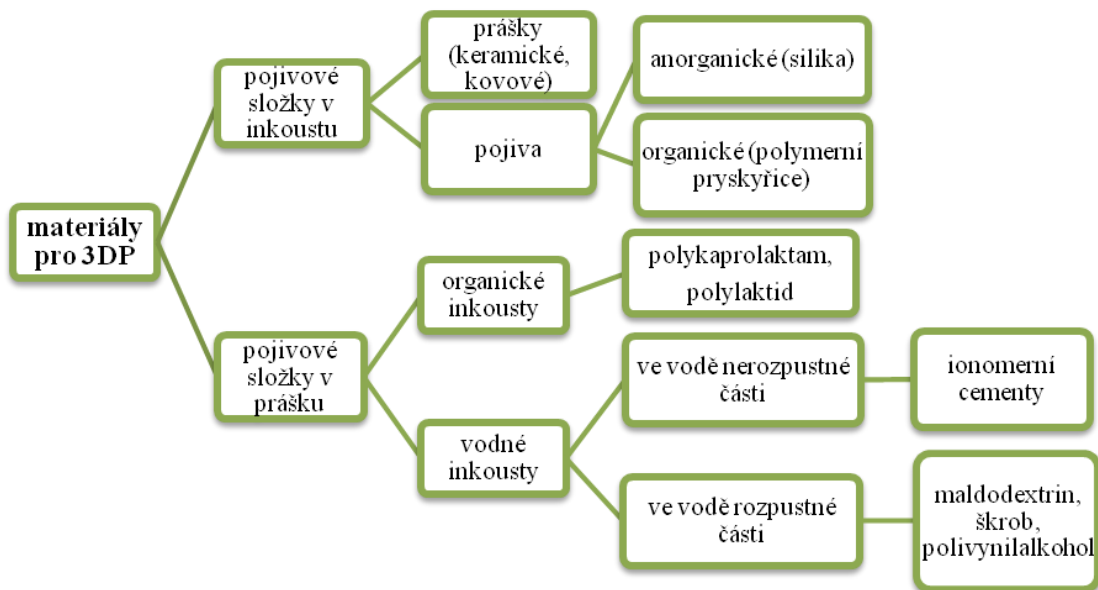
Obrázek 12: Aerosol Jet Printing; a) aerosolová komora, b) přívod inertního plynu, c) detail trysky, kde dochází k mísení aerosolu a inertního plynu, d) tryska a e) vodorovně posuvná podložka [1].

2.4.4 3D Powder Binding Process

Výrobní postup popsany již v roce 1986, o jehož komerční rozšíření se zasloužily společnosti 3D Systems a Soligen technologies. Komponenty tiskárny využívající technologii 3DP jsou zachyceny na obrázku 13. Celý proces tisku lze rozfázovat do třech základních kroků. Nejprve dochází k navrstvení nezpevněného materiálu na tiskovou podložku, následuje aplikování tekuté disperze, která způsobí zpevnění částic do pevného stavu a následuje opět převrstvení novým materiálem. Obklopující nezpevněný materiál slouží jako opora a je znovu lehce recyklovatelný. Takto vzniklý polotovár je zbaven přebytků pojiva a nespojených částic a v poté je solidifikován. V porovnání s podobným přístupem jako je SLS je tento přístup levnější variantou díky používání méně sofistikovaných tiskových a zároveň za použití již předpřipravených vodných inkoustů. Ale nevýhodou je nižší přesnost než u metod SLS či SLA. Velké oblibě se tato metoda těší při výrobě mnohabarevných součástí. Materiály využitelné jako vhodné pro zpracování metodou 3DP je celá řada. Pro ucelenou představu slouží obrázek 14, který zachycuje možné kombinace prášku a pojiva [2, 3, 32].



Obrázek 13: 3DP; a) svisle pohyblivá podložka, b) výtisk spolu s podporou tvořící nezpevněným materiálem, c) tisková hlava, d) zásobník materiálu a e) zařízení pro vrstvení materiálu [32].

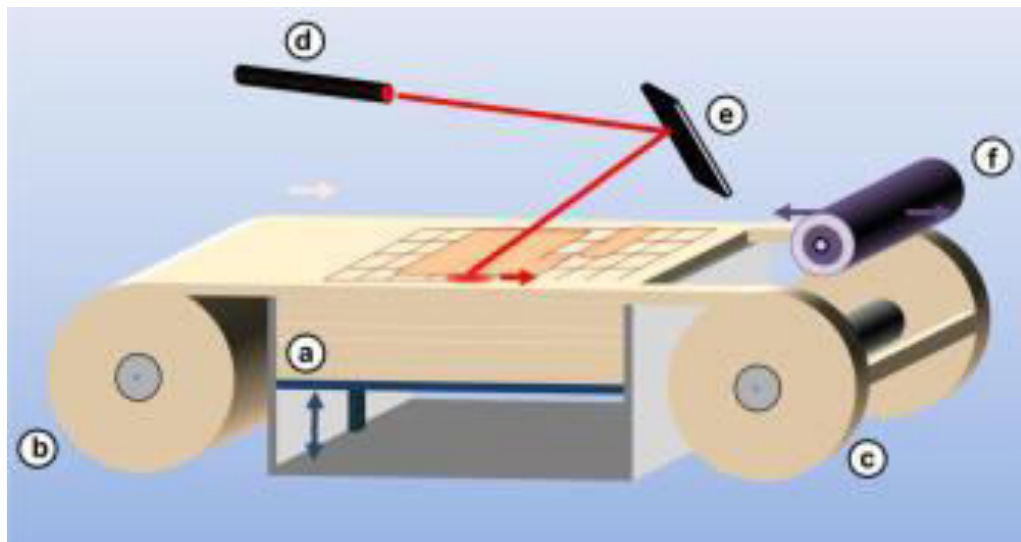


Obrázek 14: Možné kombinace prášek-pojivo použitelné pro zpracování technologií 3DP [1].

2.5 Technologie aditivní výroby pracující na základě listové laminace materiálu

Zpracovatelskou technologií pracující na vrstvení tenkých plátů materiálu na sebe nazýváme anglickým názvem Laminated Object Manufacturing (LOM). Ve své podstatě jde o spojení dvou technických přístupů aditivní technologie a konvenčních technologií.

Jednotlivé vrstvy materiálu jsou tvořeny papírem nebo polymerem, který je navinut na cívce, ze které je dle potřeby odmotáván. Ke spojení jednotlivých vrstev pro vznik laminární struktury je používán vyhřívaný válec. Pro vyřiznutí požadovaného tvaru jednotlivých vrstev slouží CO₂ laser. Přebytek nevyužitého materiálu je navinut na paralelní zásobník a současně dochází k navrstvení nové vrstvy. Hlavní výhodou je možnost výroby velkých objektů s nízkými výrobními náklady. V počátku této technologie byl používán především papír, který ovšem nedosahuje mechanických vlastností pro aplikaci v průmyslu. Až s užitím polymerů (např. PMMA, PC a další) našla LOM technologie uplatnění v konstrukčních účelech. V současnosti je často využívána pro výrobu vícevrstevných keramických produktů za použití polymerní matrice [1-3,33 – 35].



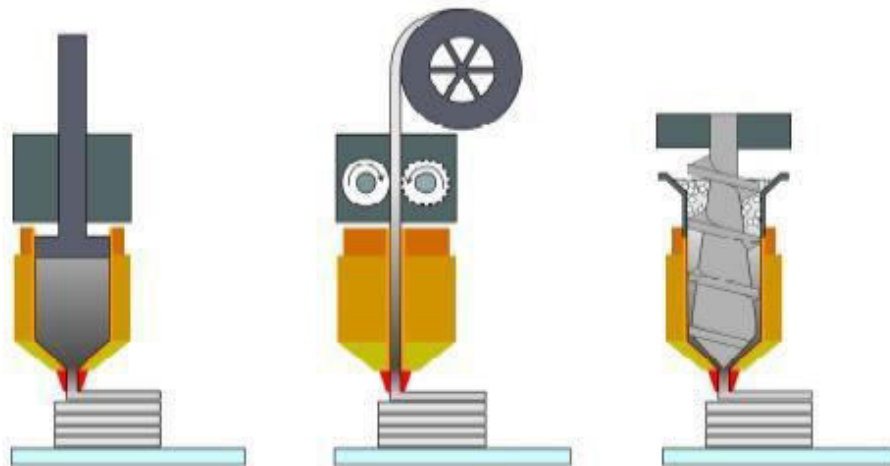
Obrázek 15: LOM; a) vertikálně pohyblivá tisková podložka, b) a c) zásobníky materiálu, laser, e) optika pro zacílení paprsku a f) vyhřívaný válec [33].

2.6 Technologie aditivní výroby pracující na základě extruze materiálu

Jeden z posledních tradičních a zároveň z nejrozšířenějších zástupců aditivní výroby je založen na vrstvení taveniny, pasty, roztoku či disperze polymeru pomocí trysky nebo úzké kapiláry, která je v extruzní vytlačovací hlavě. V anglicky psané literatuře se setkáváme s označením Material Extrusion Additive Manufacturing (MEAM). Mezi jednotlivé

zástupce řadíme FDM, 3D mikrovláknová extruze, 3D mikroextruze atd. Ovšem největší rozšíření a zároveň největší uplatnění má FDM. U samotného zrodu stál Scott Crump, který tuto metodu vymyslel a později i patentoval. Tato technologie dala vzniknout jedné z největších společností zabývajících se 3D tiskem a to společnosti Stratasys Inc. Metoda FDM se dostala do popředí i díky myšlence RepRap, která je popsána výše. Pokud vyslovíme právě termín 3D tisk, tak se často jako asociace k tomuto označení objeví termín FDM, což svědčí o její unikátnosti mezi ostatními technologiemi aditivní výroby [1,37].

U FDM se můžeme setkat se třemi různými způsoby vytlačování materiálu. Jednotlivé typy jsou voleny především s ohledem na použitý materiál (viz obrázek 17). Prvním zástupcem je vytlačování materiálu pomocí pístu (na obrázku vlevo), druhou možností je vytlačování materiálu za použití materiálu ve formě struny (obrázek uprostřed) a poslední možností je použití šneku (obrázek vpravo) [1, 10, 36, 37].



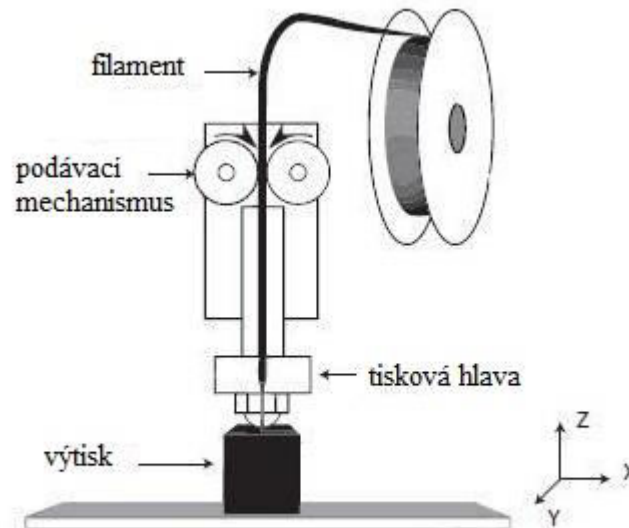
Obrázek 16: Různé typy vytlačovacích mechanismů u FDM [13].

2.6.1 MEAM za použití pístu

U tiskáren využívající píst pro vytlačování je nejčastěji používán materiál ve formě prášku. Zpracováváme, tak tedy především keramiky nebo kovy spolu s polymerem sloužícím jako pojivo. Výsledkem je produkt se strukturou vysoce plněného termoplastického kompozitu. Jako zásobník materiálu slouží cartridge, ze kterých se jemný materiál dostává do dutiny ve vytlačovací hlavě, ze které je pomocí pístu dávkován. V některých případech se můžeme setkat s ultrazvukovým vibrátorem, zajišťující správné vrstvení materiálu[36, 37].

2.6.2 MEAM za použití filamentu

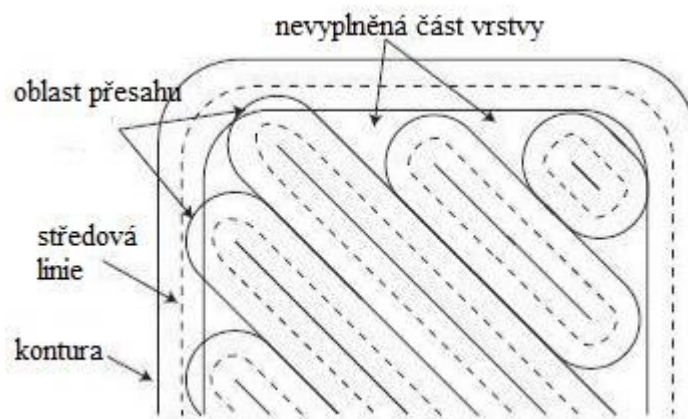
Druhým zástupcem je nejběžnější systém využívající pro extruzi filament. Pro první bližší aproximaci celého procesu slouží následující obrázek, který zachycuje základní komponenty tiskárny pracující na tomto principu.



Obrázek 17: FDM [35].

Mezi základní součásti patří zásobník materiálu, tisková hlava opatřená tryskou a vytlačovacím mechanismem a tisková podložka. Nejčastěji se setkáváme se situací, kdy materiál je ve formě filamentu neboli struny o průměru 1,75 nebo 3 mm, který je dávkován z cívky. Nejčastěji tisk probíhá v Kartézských souřadnicích. Za zmínku zde stojí uvést i speciální příklad tzv. Delta Robota, který pracuje se čtyřmi stupni volnostmi (3 patří XYZ translaci a 4 odpovídá rotaci, kterou umožňuje jedno z ramen). Jeho konstrukci tvoří tři páry ramen, které zajišťují vodorovnost pracovní plošiny, kdy jejich pohyb posouvá plošinu ve třech směrech. Tohoto je často využíváno ve světě 3D tisku. Pomocí podávacího zařízení je polymer posouván ze zásobníku do vyhřívané extruzní hlavy, ve které je materiál taven a pomocí trysky dávkován v jednotlivých vrstvách na tiskovou podložku. Pro správné dávkování je důležité nastavení krouticího momentu motoru a rychlosti podávacího mechanismu, kterým jsou proti sobě umístěná dvě ozubená kola. Zároveň je důležité, aby tření mezi soukolím a filamentem bylo vhodné s ohledem na typ materiálu. Uvnitř vytlačovací hlavy je povrch potažen antiadhezivní vrstvou, často PTFE, který brání ulpění materiálu na stěnách a usnadňuje extruzi. U některých tiskáren se můžeme setkat se dvěma či více tryskami a tím máme možnost vyrábět produkty z více

materiálů nebo v mnoha případech je druhý materiál použit pro výstavbu podpěr při tvarově složitých výtiscích. Tyto podpěry jsou mechanicky či chemicky následně odstraněny. Vhodným materiálem pro použití jako podpěry je PVA, který je rozpustný ve vodě. Celý proces je ovlivněn mnoha parametry, které je nutné nastavit pro konkrétní typ materiálu. Výsledné vlastnosti jsou determinovány těmito parametry. Nejedná se pouze o nastavení podávacího mechanismu, ale také o přehřev tiskové hlavy a podložky, šířka jednotlivé vrstvy a její výška, úhel nanášení vrstev, stupeň plnění a celá řada dalších. To, jak vypadá jedna nanesená vrstva pod úhlem 45° je zachycena na obrázku 18. Je zde patrné, že při vrstvení jednotlivých vrstev na sebe se nachází místa, kde dochází k převrstvení materiálu v rámci jedné vrstvy nebo, kde naopak se nachází volný prostor.



Obrázek 18: Nanesená vrstva materiálu [14].

S ohledem na typ zvoleného materiálu, jak bylo již uvedeno výše, je důležité zvolení vhodné teploty extruze a tiskové podložky. Následující obrázek přináší přehled nejčastějších typů používaných materiálů a jejich teplotní intervaly při vytlačování.

materiál	teplota vytlačování (°C)	teplota podložky (°C)
PLA	175 – 220	60 – 90
ABS	230 – 260	80 – 100
HIPS	220 – 250	80 – 110
PC	290 – 315	110 – 130
PA	240 – 280	100 – 120
PEEK	360 – 400	110 – 120
PEI	330 – 360	110 – 160

Obrázek 19: Přehled materiálů spolu s rozmezím teplot pro jejich aplikaci [21].

Pokud bychom chtěli shrnout výhody této metody tak je to především nízká pořizovací cena, velká flexibilita, možnost zpracovávat více materiálů najednou a krátký čas tisku při nastavení nízkého stupně plnění a tenkých stěn výtisku. Na druhou stranu jsou zde i nevýhody, jde především o nutnost tisku podpěr u komplikovaných dílů, povrchové vlastnosti výrobku a nutnost pracovat s materiály o nízké teplotě tečení [1, 10, 36, 37].

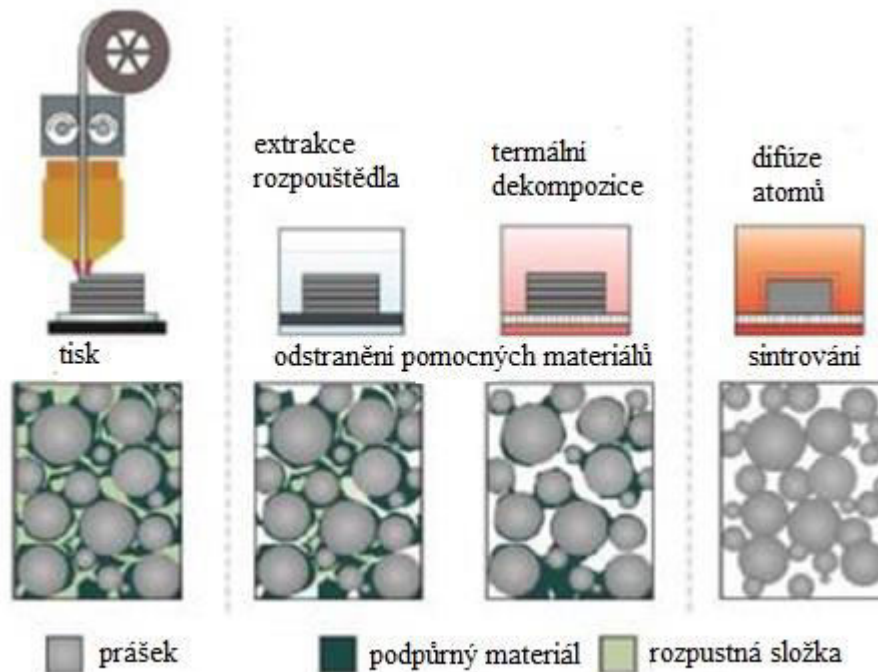
2.6.3 MEAM za použití šneku

Poslední možností je využití šneku jako vytlačovacího mechanismu. Tento typ je častý u konvečního vytlačování. Ovšem i při 3D tisku jsou případy, kdy nelze některé materiály zpracovávat jako struny, pro tyto případy slouží právě šnek. Zpracováváme tím materiál ve formě pelet. Tak jako u běžného vytlačování můžeme rozdělit šnekový extrudér do několika zón - násypnou, tavicí a vytlačovací. V první zóně dochází k dávkování materiálu a dochází k posunu materiálu bez velkého smykového namáhání do tavicí oblasti. V tavicí sekci dochází k přechodu z pevného skupenství do taveniny a materiál je přitlačován ke stěně vyhřívaného válce. Dochází k posunu taveniny do vytlačovací zóny, kde je smyková deformace nejvyšší a tavicí sekce je ukončena vytlačovací hlavou v našem případě tryskou. V současnosti se setkáváme s různými větvemi tohoto způsobu extruze u aditivní výroby. Byly vyvinuty tiskárny se šnekovým mechanismem pro tisk drobných komponent nebo naopak pro tisk velkých součástí například pro automotive. Vytlačovací výkon takového stroje je až 36 kg h^{-1} a v literatuře je tato metoda známá jako Big Area Additive Manufacturing (BAAM). Mezi materiály tisknuté pomocí šneku řadíme: ABS, PPS, PEEK, PEI nebo kompozity plněné skleněnými či uhlíkovými vlákny[37].

2.6.4 Tisk vysoce plněných polymerů pomocí MEAM

Za vysoce plněný polymer považujeme při plnění vyšším než 20 obj. %. Běžně vysoce plněné materiály byly doposud zpracovávány nejčastěji pomocí vstřikování a to jak v případě keramik, tak i kovů. S možností použití takových materiálů pro 3D tisk se začalo v 90. letech minulého století a byla to právě společnost Stratasys. Použila k tomu materiál ve formě filamentu, který byl vytlačován při teplotách vyšších, než je teplota tečení surového materiálu. A s využitím poznatků u postupů jako jsou používány v případě Powder Injection Molding (PIM), kdy dochází k odstranění pojiva a sinterování za vzniku finálního výrobku došlo k rozvoji tohoto způsobu zpracování plněných materiálů i u aditivních výrob. Celý proces lze poté rozdělit do třech kroků po sobě jdoucích.

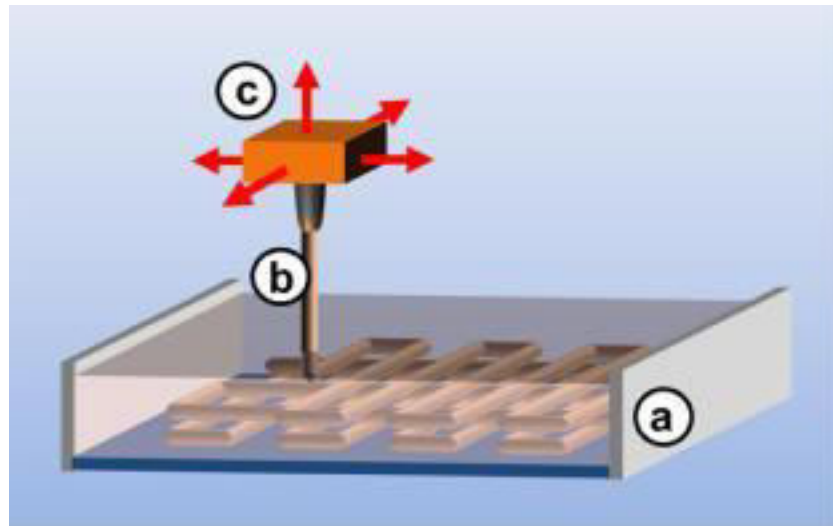
Nejprve dochází k tisku materiálu, ve druhém kroku je použito rozpouštědlo a poté vysoká teplota k dokonalému odstranění všech zbytků pojiva a následuje již samotné spékání. Celý pochod je zachycen na následujícím obrázku [36].



Obrázek 20: Postup zpracování vysoce plněných materiál pomocí MEAM [36].

2.6.5 3D dávkování

Tento technologický postup využívá vlastností při dávkování prostorovém umístění lepivých spojovacích linek jedno, dvousložkových lepidel nebo tavných adheziv. Tento postup dal vzniku rozvoji metody, kterou dnes známe pod označením 3D Bioplotter. Jednotlivé komponenty se od ostatních zařízení využívající postupy MEAM neodlišují, až na vytlačovací hlavu, která je kombinací zásobníku a trysky a pohyb je ve vodorovném, tak i svislém směru. Řízení pohybu hlavy je zajištěno stlačeným vzduchem o proměnlivém tlaku, dle aktuální potřeby (viz obrázek 21).



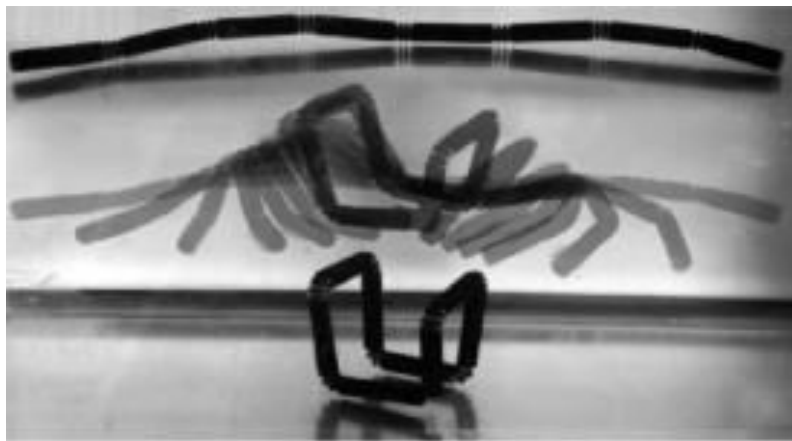
Obrázek 21: 3D dávkování; a) tisková podložka obsahující vzduch či imerzní kapalinu, b) tryska a c) vytlačovací hlava [1].

V tomto případě rozlišujeme dvě základní možnosti toho, jak dochází k vytvrzení materiálu. V prvním případě se jedná o fyzikální přístupy, jako je koagulace polymerních disperzí, krystalizace a teplota skelného přechodu u termoplastů či sušení a srážení polymerních roztoků. Druhou možností je logicky vyplívající chemický přístup, který zahrnuje možnosti chemických reakcí reaktivních prepolymerů za vzniku ionomerů a polyelektrolytických komplexů po případně je zde ještě možnost tisku v imerzních tekutinách. U využití fyzikálních přístupů solidifikace odpadá nutnost použití struny, materiál je dávkován ze zásobníků. Tento přístup umožňuje zpracovávat velké množství materiálů (ABS, polyolefiny, polyester, keramiky na bázi titanu a další). V případě vytvrzení chemickou cestou se jedná především o různé typy pryskyřic. Při nanášení jednotlivých vrstev a jejich křížení je důležité dostatečná doba pro vznik rigidní struktury a zabránění tak nechtěným defektům struktury. Pokud materiál dispergujeme v tekutině, přináší to výhody, kdy není nutné tisku podpěr a tím odpadá nutnost dodatečným úprav výtisku. Využití této technologie má velký význam v oblasti medicíny (přístupy jako je CAD/CAM technologie – tisk green těles, pro výrobu keramických implantátů pro zubní medicínu), další využití je tisk hydrogelů na bázi agarů, alginátů atd. [38, 39].

2.7 4D tisk

Dle samotného názvu, lze snadno dedukovat, že v případě čtyř dimenzionálního tisku bude kromě rozměrů vystupovat čtvrtá proměnná a to čas. Cílem je připravit “chytrou“

strukturu, u které bude možné ovlivňovat pomocí vnějších podnětů rozměry výtisku. Jako vnější stimul může být použito tepelné působení, voda, světlo, změna pH nebo elektromagnetické záření. Pro samotnou výrobu musí být volen materiál, u něhož je tato schopnost možná. Za materiály mohou sloužit tvarově paměťové slitiny či více funkční materiálové systémy. Jedna složka takového materiálu je zodpovědná za trvalé rozměrově stabilní strukturu a druhá složka je schopna vlivem vnějšího vlivu měnit svůj objem (příkladem může být hydrogel, kdy působením vody dochází až ke 200 % expanzi původního objemu). Ukázka toho, jak dochází ke změně rozměrů vlivem působení vody na kombinaci dvou polymerů je na obrázku 17. Aplikaci těchto systémů můžeme najít v oblasti dopravy léčiv, smart textilií, medicíny nebo robotiky (viz obrázek 18) [1, 40 – 43].



Obrázek 22: Změna výtisku vlivem působení vodného prostředí [44].



Obrázek 23: Postupná tvarová změna proces chapadla vlivem změny teploty [45].

3. MATERIÁLY VYUŽITELNÉ PRO ADITIVNÍ VÝROBU

Co do výčtu materiálů lze pro aditivní tisk použít všechny typy materiálů (kovy, plasty, keramiku) a co se formy týká, nejčastěji jde o strunu, prášek kapalinu nebo list. Daný typ a formu materiálu volíme vzhledem k použité technologii aditivní výroby a výsledným vlastnostem, které od daného produktu očekáváme. Následující přehled (obrázek 24) přináší ucelený obraz o nejvíce využívaných materiálech a možnostech využití v daných technologiích [47].

	Amorphous	Semi-crystalline	Thermoset	Material extrusion	Vat polymerization	Material jetting	Powder bed fusion	Binder jetting	Sheet lamination	Directed energy deposition
ABS [Acrylonitrile Butadiene Styrene]	X			X						
Polycarbonate	X			X						
PC/ABS Blend	X			X						
PLA [Polylactic Acid]	X			X						
Polyetherimide (PEI)	X			X						
Acrylics			X		X	X				
Acrylates			X		X	X				
Epoxies			X		X	X				
Polyamide (Nylon) 11 and 12		X					X			
Neat		X					X			
Glass filled		X					X			
Carbon filled		X					X			
Metal (Al) filled		X					X			
Polymer bound	X	X		X						
Polystyrene	X						X			
Polypropylene		X					X			
Polyester ("Flex")							X			
Polyetheretherkeytone (PEEK)		X		X			X			
Thermoplastic polyurethane (Elastomer)				X			X			
Chocolate		X		X						
Paper									X	
Aluminum alloys							X	X	X	X
Co-Cr alloys							X	X		X
Gold							X			
Nickel alloys							X	X		X
Silver							X			
Stainless steel							X	X	X	X
Titanium, commercial purity							X	X	X	X
Ti-6Al-4V							X	X	X	X
Tool steel							X	X		X

Obrázek 24: Přehled metod a jejich využití v technologiích aditivní výroby [47].

3.1 Keramika

Jistou překážkou pro zpracování keramiky v oblasti aditivní výroby, ale i u běžných metod je často vysoká teplota tání a nízká lomová houževnatost. Proto je keramika nejčastěji ve formě prášku a je následně tisknuta za pomoci pojiva a následně sintrována. Další komplikací je dosažení 100 % hustoty výtisku bez pórů. Jedním z hlavních zástupců keramiky je alumina (Al_2O_3), kterou zpracováváme ve formě prášku pomocí DED a PBF. S využitím keramik se setkáváme i u metod MEAM, ale i u listové laminace, kde jsou používány materiály jako je karbid křemíku, nitrid křemíku a kombinace aluminu a zirkonia. U extruze keramik je možné pracovat za snížených teplot, kdy je tisknut materiál ve formě pasty. Komplikací je nukleace příliš velkých krystalů a následný

vznik pórů a tím snížení celkové hustoty. Řešením tohoto problému, se nachází za pomoci práce při laboratorní teplotě, kdy jednotlivé vrstvy jsou vystaveny radiačnímu záření mezi nanášením jednotlivých vrstev, což vede ke vzniku ideální mikrostruktury a dosažení hustoty čistého materiálu. V případě SLA se využívají pryskyřice spolu s keramickými částicemi z aluminu nebo karbidu křemíku. Důležité je dbát o to, aby suspenze nesesedimentovala a částice byly s úzkou distribucí velikosti [47,49, 50].

3.2 Kovy

Techniky aditivní výroby, kde nejčastěji zpracovávaným materiálem je kov je bezesporu DED a PBF. Produkty těchto technologií jsou běžně používány jako kvalitní kovové součásti v průmyslu. Jako pojiva v některých metodách je použito polymerní pojivo, které je během dalších procesů zcela odstraněno. Pro výrobu kovových prášků se nejčastěji používá vodou, plynem nebo plazmou buzená atomizace, ale v některých situacích pro snížení ceny je používána elektrolytická metoda nebo metalotermické procesy. Odlišnost použitého výrobního postupu se zrcadlí ve výsledných vlastnostech prášku. Odlišnosti pozorujeme ve velikosti, morfologii nebo chemických vlastnostech částic. Důležité je získání materiálu o relativně vysoké hustotě, dobrých tokových a homogenních vlastnostech. Aby byl daný kovový materiál zpracovatelný, je nutné, aby splňoval, některé parametry, kam řadíme především svařitelnost, obrobitelnost a vykazoval kulovitý tvar částic s úzkou distribuční křivkou velikostí. Do skupiny nejčastěji používaných kovů patří: nerezová ocel, titan a jeho slitiny (Ti-6Al-4V), slitina Co-Cr-Mo, Al-Si-10Mg a superslitiny na bázi niklu. Oceli jsou vůbec nejtradičnějším kovem pro konstrukční účely. Během jejich zpracování je důležitá kontrola teploty, jelikož právě proces chlazení ovlivňuje vznik výsledné struktury (např. martenzit vs. austenit). Hliník a jeho slitiny jsou díky horší zpracovatelnosti a ceně méně používané než slitiny titanu. Titan a jeho slitiny se nacházejí naopak v popředí zájmu zpracovatelnosti procesy aditivní výroby. Díky svým vlastnostem, kam řadíme různorodost slitin, alotropie, mikrostrukturu a vysoké teplotní stabilitě se jedná o nejvíce využívané kovy pro 3D tisk. Sloučeniny na bázi niklu se vyznačují vysokou teplotní odolností naopak slitiny s kobaltem a chromem se využívají v biomedicíně. Při spojování částic působením zdroje záření (laser či svazek elektronů) je nutné brát na zřetel, že stejně dochází k vytvoření místní tavné lázně, kde je teplota vyšší, než v blízkém okolí. Během chlazení jednotlivých vrstev dochází ke vzniku teplotních gradientů mezi těmito oblastmi a vzniku reziduálních napětí a rozdílnosti v mikrostrukturu. Tyto pak negativním způsobem snižují mechanické vlastnosti produktu.

Efekty, na které je důležité brán důraz při zpracovávání kovů během procesů 3D tisku je hned několik. Jedná se o reakci s okolní atmosférou, odrazivost a tepelná vodivost, reziduální napětí a mikrostruktura. Pokud pracujeme v podmínkách běžných laboratorních podmínek, může mít přítomnost kyslíku, dusíku a vzdušné vlhkosti vliv na výsledné vlastnosti. U slitin na bázi titanu se s rostoucím obsahem kyslíku ve struktuře sice zvyšuje pevnost, ale snižuje vodivost slitiny. Proto je v mnoha situacích pracovat v inertní atmosféře a zajistit, tak požadované mechanické vlastnosti a zachovat recyklovatelnost kovového prášku. U některých kovů vlivem jejich vysoké odrazivosti a velké tepelné vodivosti je svařitelnost omezená. Příkladem takových kovů je stříbro, zlato měď či hliník. Pro svařování takových materiálů je nutné použít laser o vysokém výkonu vyšším než 1 kW. Zamrzlá nebo též reziduální napětí jsou další komplikací během zpracování. Vznikají, díky již výše popsanému trendu, a to rozdílu teplot při spojování částic. Vznik reziduálních napětí sebou nese za následek snížení mechanických vlastností díky náchylnosti vzniku mikrotrhlin vedoucí až k porušení výrobku. Vliv mikrostruktury je poslední významný atribut podílející se na konečných vlastnostech výtisku. Rychlost chlazení jednotlivých vrstev je klíčová pro vznik dané mikrostruktury. Výslednou mikrostrukturu lze ovlivnit i výkonem a rychlostí laseru a dosáhnout tím požadovaných vlastností [47, 48, 51– 53].

3.3 Polymery

Polymery lze dělit mnoha způsoby, základní klasifikace je na termoplasty a termosety. Termoplasty, které lze opakovaně zpracovávat, jelikož nedochází k vytvoření příčných vazeb mezi jednotlivými řetězci, využíváme je pro většinu procesů aditivní výroby. Termoplasty dále dělíme na semikrystalické a amorfní. Semikrystalické se využívají u technik typu PBF, zatímco amorfní nachází své uplatnění u MEAM. Naopak termosety je nutné pro dosažení požadovaných vlastností vytvrdit, což není nic jiného než vytvoření příčných vazeb mezi jednotlivými polymerními řetězci. Tímto se polymer stává zpětně nerecyklovatelný a tento stav je již trvalý. V 3D tisku se s termosety setkáváme v celé řadě forem. Mohou sloužit jako nosný materiál, antioxidant či jako pojivo[47,48].

3.3.1 Termoplasty pro PBF

U této techniky je pro vytvoření kompaktního tělesa využíván energetický zdroj, nejčastěji IČ laser nebo UV lampa. Pro nastavení parametrů tisku je důležité znát teplotu tání a krystalizace. Jelikož po roztavení a následné rekrystalizaci materiálu dochází k vnitřním změnám a může docházet ke vzniku zbytkových napětí [54, 55].

3.3.2 Termoplasty pro MEAM

Při vytlačování materiálu volíme raději amorfni polymery, díky jejich tokovým vlastnostem. Mezi nejčastěji používané patří PLA a ABS. Pro extruzi je nejčastěji průměr trysky volen v rozsahu 0,2 až 0,5 mm. Během samotného procesu pracující na extruzi materiálu je v mnoha situacích, především při tisku tvarově komplikovaných součástí nutností současný tisk podpěr. Pro tyto účely jsou voleny materiály, které lze následně jednoduše odstranit, například rozpustit v rozpouštědle. Tím mnohdy nejefektivnějším způsobem je zvolení vody, polymer, který lze rozpustit ve vodě je PVA [54].

3.3.3 Termosety pro SLA

Jedním z prvních systémů, které stály u počátků aditivní výroby vůbec, byly kombinace UV iniciátoru s monomerem akrylátu. Další skupinou, které byla využívána, jako jedna z prvních je rodina vinyléterů. U obou zmíněných zástupců se setkáváme s rozměrovou kontrakcí během síťování a to o 5 až 20 %. Tento jev představuje technologický problém, se kterým je nutné při zpracování počítat. Dalším problémem je vznik reziduálních napětí mezi jednotlivými vrstvami materiálu. U pryskyřic na bázi akrylátu je problémem přítomnost vzdušného kyslíku, který terminuje polymerizaci. Na základě těchto komplikací se během 90. let minulého století začaly využívat epoxidové monomery. Epoxidy mají ve své struktuře charakteristický kyslíkový kruh, který se během síťování otvírá a slouží pro vytvoření příčných vazeb. Díky tomuto mechanismu síťování je objemová změna výrazně menší než u předešlých zástupců fotopolymery. Při srovnání reaktivity, fotopolymery na bázi akrylátů reagují výrazně rychleji oproti epoxidovým. Důvodem je chemická podstata reakce. Tu můžeme rozdělit do tří po sobě jdoucích kroků (iniciace, propagace a terminace) Akryláty síťují radikálovým mechanismem, naopak u epoxidů probíhá polymerizace kationtovou cestou. Pro iniciaci samotné reakce je nutné přidat iniciátor, což je skupina speciálních látek na bázi polymerů[56 – 59].

3.3.4 Termosety pro procesy pracující na bázi tryskání pojiva/materiálu

Ve své podstatě jsou pro tento způsob využívány polymery analogické, jako je tomu u stereolitografie. Důležité je ovšem využít materiál o vhodné viskozitě, která je limitní pro tento druh technologií (při pokojové teplotě by měla dynamická viskozita být vyšší než 50 cP). Zpracování polymerů pomocí těchto procesů sebou přináší výhodu oproti předešlé metodě, kdy lze volně kombinovat více materiálů v rámci jednoho produktu.

Výsledkem může být výrobek, který bude vykazovat mechanické vlastnosti, které budou jakýmsi průmětem vlastností použitých materiálů.[54, 56, 58, 59]

3.4 Kompozity

Kompozitní strukturu můžeme charakterizovat jako soustavu dvou a více materiálů odlišitelných od sebe. Základními složky jsou matrice a pojivo. Matrice slouží pro zajištění rovnoměrné distribuce pojiva, a drží tvar výrobku. Zatímco pojivo je přidáváno za účel zvýšení mechanických vlastností, nebo třeba jen z důvodu snížení ceny. U kompozitu je využito předností jednotlivých složek pro dosažení požadovaných vlastností [47].

3.4.1 Keramické kompozity

Využití kompozitu na bázi keramik zpracovávanými technologiemi 3D tisku nacházíme zejména v oblasti biomedicíny. Slouží pro výrobu scaffoldů, tedy struktur, které dočasně nahrazují mezibuněčný prostor. Keramika je nejhojněji zpracovávána ve formě prášku pomocí technologií SLS a PBF. Tyto technologie zpracování keramických kompozitu přináší přesnost, vytvoření složitých geometrií s četnými převisy a vytvoření tím tak složité struktury pro již zmíněné scaffoldy. Zástupcem takového kompozitu je Si-SiC. Ovšem nemusí se vždy jednat pouze o prášek, můžeme zpracovávat suspenze, u nichž lze snadno kontrolovat hustotu výrobku během zpracování. Součástí suspenze je UV vytvrditelný polymer a pojivo může být použito kombinace aluminy a oxidu zinečnatého. Sofistikovaná metoda je kombinace keramické sol-gel syntézy a SLS tuto metodu označujeme termínem selektivní laserová gelace. Princip metody je totožný s metodou SLS, kdy je využito zachycení pojiva uvnitř gelu. Použití gelu sebou přináší benefity flexibility a aplikace. Zástupcem takového systému je silika v kombinaci s nerezovou ocelí. V některých případech se můžeme setkat i s výrobou vysoce plněných keramik jiným prvkem. K tomuto účelu slouží proces tváření za snížené teploty. Zástupcem takového systému je například ZrC a W. Tyto kompozity ovšem vykazují určité defekty: heterogenní distribuce a porosita [60 – 63].

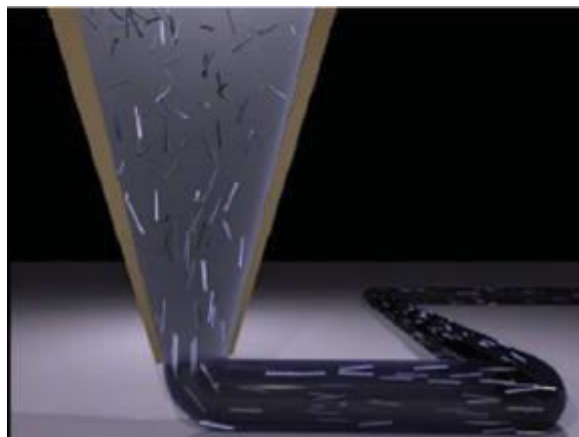
3.4.2 Kovové kompozity

Technologie pro zpracování kovových kompozitů v rámci 3D technologií jsou SLS a PBD. Kov je zpracováván ve formě prášku, laminátu nebo vlákna. U prášku je postup relativně jednoduchý dochází ke spojení s tekutou fází (polymer), která slouží pro zajištění distribuce. A následně během sintrování je matrice odstraněna a zůstává pouze čistý kov. Můžeme se setkat i s kompozity typu WC-Co/Cu, kde částice karbidu wolframu jsou rozdispergovány v kobaltu. Příklad mědi slouží jako aditivum kvůli zpracovatelnosti. Příklad aditiv na bázi lanthanu pak slouží ke snížení povrchového napětí, či kontrole růstu zrna nebo ke zvýšení spékavosti. U postupů využívající řízené laserové depozice jsou využity materiály o podobné hodnotě koeficientu délkové teplotní roztažnosti. Zástupci takovým kompozitů jsou kombinace kovu a keramiky, jedná se o systémy Ti6-4/TiAl, Ti6-4/WC apod. Vy-užití nachází v oblasti letectví, kde je zapotřebí materiálů specifických mechanických vlastností. U kovových kompozitů se můžeme setkat s využitím ultrazvuku pro vytvoření kompozitní struktury v pevném stavu. Zajistíme tak vytvoření komplikovaných 3D struktur, kdy například vkládáme kovové fólie 3D struktury. Nebo lze využít kovové vlákno do kovové matrice a vytvořit tak složitou strukturu a komplexní geometrii a vysokou přesností, jelikož není použito vysokých teplot (teploty jsou nižší než polovina teploty tání kovu). Díky tomu nedochází k vytvoření reziduálních napětí a disintegrit. Takový kompozit je využit pro výrobu senzorů [47, 48,64 – 66].

3.4.3 Polymerní kompozity

Využití polymerů v oblasti kompozitů je v současnosti běžnou rutinou a v mnoha případech si nedokáže již představit jejich účelnou náhradu. Jejich přednosti jsou především nízký bod tání, nízká hmotnost, cena a vysoká flexibilita. Pro zajištění geometrické komplexity při zachování funkčnosti a mechanických vlastností je dosaženo právě při kombinaci více materiálů, tj. vytvoření polymerního kompozitu. Možností, jak využít polymer pro výrobu kompozitu je hned několik. Jednou z prvních možností je distribuce částic materiálu uvnitř polymerní matrice. Zde je využito především pro nízkou cenu polymeru a snadné distribuce částic v polymeru. Zpracování probíhá pomocí SLS, SLA nebo MEAM. Částice volíme dle požadované cílové aplikace. Pokud chceme zvýšit modul, použijeme skleněné, železnaté či měděné částice, zatímco pro zvýšení odolnosti použijeme hliník nebo oxid hlinitý. Pro zvýšení dielektrické permitivity pak slouží wolfram nebo keramika. Co se tvaru týká, jedná se o kulovité, krychlové nebo válcové částice.

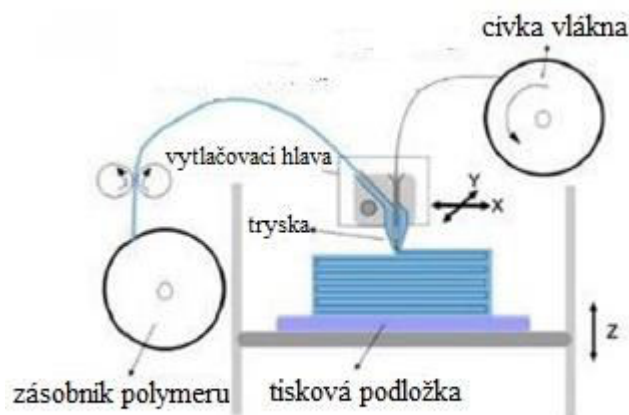
Pro použití kompozitů nemluví pouze zlepšení vlastností výtisku, které jsou uvedeny výše, ale v některých případech dochází ke zlepšení tiskařských vlastností samotného materiálu. Například přídavek plniva (železa) eliminuje riziko zborcení výtisku. Kombinací mědnatých a železnatých částic spolu s akrylobutadienstyrenem je výrazně snížen koeficient délkové teplotní roztažnosti polymeru. Nebo omezení anizotropie vlastností u termoplastických elastomerů. Přídavek magnetických částic na bázi oxidu hlinitého do UV vytvrditelné pryskyřice umožňuje výrobu biokompozitů s mikroarchitekturou. Druhou formou plniva využitelných při zpracování polymerních kompozitů pomocí technologií 3D tisku jsou vlákna. K těmto účelům je nejčastěji využíváno metod založených na principu extruze materiálu nejčastěji se jde o FDM. Před samotným tiskem dochází k mísení polymeru a vlákna, tato směs je dávkována do extrudéru a následně nanášena na podložku. Následující obrázek zachycuje detail uvnitř trysky, která dávkuje vlákna s polymerní matricí na podložku. Metody pro



Obrázek 25: Detail vytláčovací trysky při zpracování krátkovláknového kompozitu [54].

zpracování prášku nejsou vhodné pro výrobu vláknových kompozitů, z důvodu problematického míchání prášku a vláken. Vlákno je nejčastěji sekané. Nejčastěji jde o skelné nebo uhlíkové vlákno. Pro výsledné vlastnosti je důležitá orientace vláken uvnitř struktury. Maximálních mechanických vlastností je dosaženo při namáhání ve směru vláken. Pro zachování zpracovatelnosti pomocí extruze materiálu je důležité dodržet stupeň plnění. Pro FDM je kritické plnění při 40 hm. %, při vyšších hodnotách by byla směs již nezpracovatelná z důvodu ucpávání trysky extrudéru. Určitou výzvou je zpracování dlouhovláknového kompozitu pomocí aditivních technologií. Publikace, které byly na toto téma doposud publikovány, zobrazují kompozit jako sendvičovou strukturu, kde je vlákno uloženo uprostřed termoplastické matrice. K dávkování obou materiálu dochází paralelně a mluvíme tedy o

koextruzi. Význam výroby dlouhovláknových kompozitů je především v mechanických vlastnostech, které lze díky použití dlouhých vláken dosáhnout. Přístroj pro zpracování koextruzi vlákna a polymerní struny je na obrázku 26. Mezi speciální využití polymerních kompozitů je výroba materiálů s tvarovou pamětí. Tímto posouváme 3D tisk do oblasti 4D



Obrázek 26: Zařízení pro zpracování dlouhých vláken pomocí technik 3Dtisku [17].

tisku. Polymer je totiž schopen se za určitých okolností v čase vratně deformovat. Nejedná se vlastnost materiálu, nýbrž jde o kombinaci více efektů jako je morfologie, kombinace materiálů atd. Pro zpracování materiálů s tvarovou pamětí je používána často technologie PolyJet. Ke změně tvaru je nutný impuls z vnějšího prostředí, kterým může být působení teploty či vodního prostředí [67–75].

3.5 Nanokompozity

Pokud je řeč o kompozitech, nelze opomenout skupinu, kterou označujeme nanokompozity. Pracujeme se stejnými materiály, ovšem jedná se o nanomateriál, což je látka, u které je alespoň jeden z jejich rozměrů menší než 100 nm. Mezi zástupce řadíme: grafit, grafen, uhlíkové nanotrubičky, keramické a kovové nanočástice. Co nás vede k využití právě nanomateriálů do polymerních kompozitů? Jsou to vlastnosti, kterých je dosaženo již při malých plněních těmito materiály. Přidáním pouze 10 hm. % uhlíkových vláken nebo 5 hm. % nanočástic oxidu titaničitého zvýší o 39 nebo 13,2 % pevnost v tahu oproti neplněnému polymeru. Dochází ke zmenšení prodloužení a snížení rizika vzniku trhlin. Pro zpracování nanokompozitů pomocí aditivních technologií je důležité dodržení několika zásad. Nejdůležitější je zabránění tvorbě aglomerátů má zajištění dobré adheze mezi polymerem a plnivem. Povrch nanočástic je proto před tiskem chemicky upraven. U částic oxidu hlinitého se setkáváme s povrchovou úpravou pomocí vytvoření vrstvy polystyrenu.

Povrch nanočástic je proto před tiskem chemicky upraven. U částic oxidu hlinitého se setkáváme s povrchovou úpravou pomocí vytvoření vrstvy polystyrenu. Obecně lze konstatovat, že technologie 3D tisku jsou velmi vhodné pro zpracování nanokompozitů, díky své schopnosti vytvářet vysoce funkční struktury a realizovat odlišné objemové plnění jednotlivých sekcí výrobku [67, 76 – 79].

4. VYBRANÉ APLIKACE ADITIVNÍ VÝROBY

Aditivní výrobu lze teoreticky aplikovat do všech oblastí lidského poznání. Ovšem vždycky není využití 3D technologie vhodné, a to nejen z důvodu výsledné ceny, ale i některých technických nedostatků jednotlivých technologií. Proto bude řeč pouze o odvětvích, kde se 3D tisk těší oblibě, anebo kde se naopak skýtá potenciál do budoucnosti[18].

4.1 Konstrukční aplikace

Myšlenku využít aditivní výrobu pro konstrukční účely datujeme již do samého počátku expanze aditivní výroby. Jednou z prvních myšlenek byl 3D tisk betonu, metoda byla dokonce podle betonu pojmenována 3D Concrete Printing. V oblasti konstrukce došlo i na tisk celého domu. Vesmírná společnost NASA zamýšlela tisk z materiálu dostupných na jiných planetách přímo na místě. Konkrétním příkladem je administrativní budova v Dubai, která byla během 17 dnů – obrázek 27. Celkové náklady na její tisk činily 140 000 USD a plocha měla výměru 242 m^2 . Dobré je zmínit, že s použitím 3D tisku dochází ke snížení vyprodukovaného odpadu o 30 až 60 % v porovnání s klasickými stavebními technikami[80].



Obrázek 27: Administrativní budova v Dubai vyrobena aditivními technologiemi [80].

U konstrukčních aplikací se bez materiálu jako je kov, nedokážeme skoro obejít. Proto je kov velmi často zpracováván aditivní technologií pro komponenty pro technické využití. Spíše se jedná o menší součástky nebo jednotlivé části větších celků. Vytisknuté kovové komponenty nalezneme v letectví nebo energetice. Jisté limity rozšíření jsou způsobeny právě vyšší cenou a nízkou rychlostí ve srovnání s konvenčními technologiemi. Co se týká mechanických vlastností dílců, tak jsou srovnatelné výrobky zhotovené pomocí subtraktivních způsobů, ovšem výše nákladů brání jejich expanzi [80].

U polymerů jsou jistým omezením nižší mechanické vlastnosti až na pár světlých výjimek. Proto jejich uplatnění je spíše pro estetické účely nebo je nutné je zpracovávat jako kompozity, plněné vhodným plnivem. To nic nemění ve velkém potenciálu výroby pro unikátní architektonické účely za nižších nákladů a složitosti výroby běžnými způsoby [80].

4.2 Medicínské aplikace

Tato oblast aplikací je jedna z nejvíce rozvinutých, a má to logické odůvodnění. Aditivní výroba dokáže vyrábět tvarově složité konstrukce s dostatečnými mechanickými vlastnostmi, a to na míru dle požadavku jednotlivých lékařských diagnóz. Co se používaných materiálů týká lze se setkat se všemi tradičními zástupci od polymerů přes kovy, keramiku a jejich kompozity [81-83].

4.2.1 Protetika a zubní implantologie

Vůbec prvním pokusem použití aditivních technologií v oblasti lékařství byl tisk lidského ucha na základě vytvořeného snímku již více než před 20 lety. S postupem času se z ojedinělosti stává téměř rutina. Právě výhoda použití 3D snímku umožňuje výrobu rozměrově identické náhrady, čímž dochází ke zvýšení pohodlí pacienta a eliminuje nutnost dodatečných úprav náhrady, jako je tomu u výroby běžnými metodami. Důležitá je správná volba materiálu, který musí mimo mechanických parametrů navíc splňovat parametry jako je biokompatibilita či bioinertnost. Pro kostní implantáty je často použit práškový titan, kalcium fosfát, trikalcium fosfát, hydroxit apatit a mnohé další. Následující obrázek zachycuje kraniální segment z trikalciumfosfátu vytvořený pomocí tryskání pojiva



Obrázek 28: Kraniální segment lebky vytvořený z trikalcium fosfátu [81].

V případě zubní protetiky se výraznou měrou uplatňují metody CAD/CAM. Celý proces probíhá v několika krocích. Dochází k vytvoření digitálního snímku postižené oblasti, následně dochází k modelování požadované zubní náhrady, tak aby co nejvíce odpovídala původnímu stavu. Následuje 3D tisk samotného “green” tělesa a následuje sintrování za vzniku hotového produktu. Za materiály jsou nejčastěji používány keramiky typu aluminy, leucitu, disilikátu lithia či zirkonia. Velkou výhodou je možnost tisku zubních náhrad přímo v ordinacích zubních lékařů, čímž by došlo ke snížení nákladů a čekacích lhůt. Důležité je ovšem zajištění tisku s vysokou přesností, kdy tolerance rozměrové nepřesnosti je menší než 0,1 mm. I přesto má aditivní technologie v této oblasti velmi dobře našlápnuto [1, 81—83].

4.2.2 Regenerativní medicína a tkáňové inženýrství

Regenerativní medicína a tkáňové inženýrství spolu velmi úzce souvisí. Jejich snahou je vyrobit a nahradit určitou část lidského organismu, které je již nefunkční nebo chybí z důvodu prodělaného traumatu. Tkáňové inženýrství se snaží o kombinaci nativní tkáně spolu s materiálem, který má za úkol nahradit a zajistit prostředí pro následný růst a dělení buněk. Rozlišujeme dva základní přístupy tkáňového inženýrství. Jednak mohou být buňky vloženy do 3D struktur, které nazýváme scaffoldy nebo k proliferaci dochází bez těchto podpůrných konstrukcí [1, 82].

Při zvolení prvního přístupu je nutné brát ohled na dodržení přesných geometrií, jelikož každá jednotlivé typy buněk vyžadují odlišné prostředí pro správný růst a dopravu živin. Za vhodný materiál může být zvolen polykaprolaktam, což je semikrystalický biodegradabilní polymer s teplotou tání 62 °C. Široké uplatnění v tkáňovém inženýrství nachází i hydrogely na bázi chitosanu, kyseliny hyaluronové nebo želatiny [1, 82].

U tkáňového inženýrství bez použití podpůrných struktur pro růst buněk slouží konstrukce pouze pro transport živin a krve. Tohoto přístupu je využito především u dentální regenerativní medicíny. Tkáňové inženýrství využívající 3D tisk je ovšem stále ve fázi spíše vývoje než každodenních aplikací [1, 82].

4.2.3 Doprava léčiv

Využití 3D tisku pro řízenou dopravu léčiv je na rozdíl od běžných farmakologických přístupů přizpůsobeno pacientům dle jejich specifických potřeb a individualitě problému. S využitím aditivních technologií lze dosáhnout daleko lepšímu naplánování kinetiky uvolňování léčiva díky schopnosti výroby vysoce komplikovaných struktur. Pokud jde o jednotlivé

technologie, tak uplatnění nachází hned celá řada z nich. Pro ilustraci lze uvést SLA pro výrobu mikrofluidních systému pro dopravu léčiv nebo MEAM pro výrobu léčiv pro perorální podání atd. U technologií pracujících na bázi extruze materiálu jsou s velkou oblibou používány filamenty tvořené biokompatibilním a ve vodě rozpustným polymerem polyvinylalkoholem (PVA) spolu se 4% paracetamolem, který slouží jako často užívaná analgetikum a antipyretikum [1]

4.3 Aplikace v oblasti elektroniky a optiky

Využití předností aditivních technologií jako je dosažení relativně velkého rozlišení a možnost kombinovat více materiálů v rámci jednoho výrobku nachází uplatnění při konstrukci součástek pro elektroniku[1].

V oblasti optických aplikací a fotonice je věnován zájem nízkým ztrátovým polymerům a organicky modifikované keramice. Často je využíván přímo 3D zápis do opticky transparentního média. Nejvíce se 3D tisk uplatňuje v litografii, kde právě dochází k vytvrzování pryskyřice pouze v požadovaných místech a zbytek je vhodně vymyt. Po nanesení vodivých cest se proces opakuje dle potřeby, až do vytvoření hotové součástky [1].

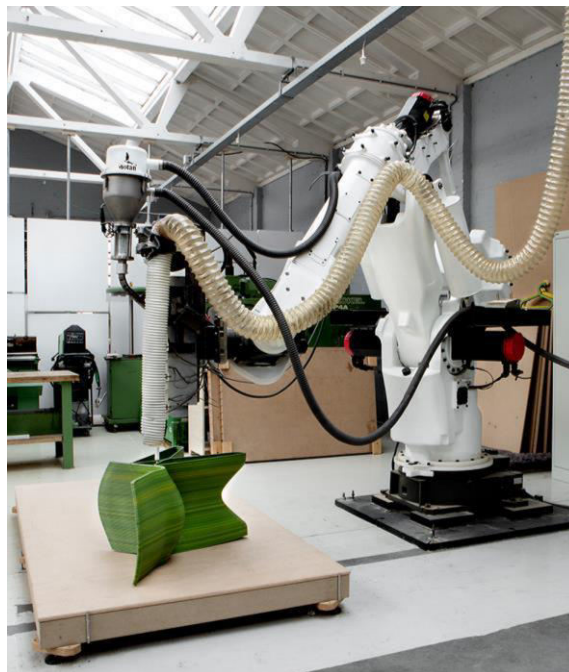
4.4 Uplatnění v energetice

Právě využití aditivních technologií místo běžných výrobních postupů může vést k výraznému snížení energetické náročnosti celého procesu výroby. Konstrukce geometricky a materiálově složitých součástek v podstatě v jednom kroku umožní snížit energetický a tím i environmentální dopad. Byl srovnán cyklus výrobku vyrobeného z ABS a PLA tradičními technologiemi versus s otevřeným přístupem RepRap a bylo zjištěno, že v druhém případě došlo ke snížení o 41 až 64 % energetické náročnosti než při využití konvenčních metod výroby. Větší implementace aditivní výroby je zatím stále ve svých začátcích, jelikož její rozmach je brzděn některými zatím nepřekonanými problémy (rychlost tisku, cena atd.). Úspora energie a její lepší využití není pouze díky samotné expanzi aditivní výroby, ale taky možností výroby materiálů převyšující svými vlastnostmi materiály současné. Konkrétním příkladem může být využití FDM pro výrobu flexibilní buněčné struktury na bázi termoplastického polyuretanu pro aplikace v oblasti absorpce elektrické energie. Nebo jde o výrobu piezoelektrického elementu pro ultrazvukové snímání a energetické zaostřování pomocí stereolitografie [1, 81, 84, 85].

4.5 Umění a móda

Zájem návrhářů z oblasti umění a módy o 3D tisk nenechal na sebe dlouho čekat. 3D technologie umožňují výrobu zcela nových estetických a neotřelých věcí, které nebyly doposud možné nebo velmi finančně náročné. V současnosti se setkáváme s návrhy nábytků (viz obrázek 29), nářadí, domácích potřeb, módy ale i různých kutilských vymožeností. Právě možnost otevřených zdrojových dat široké palety věcí umožňuje výrazně rozvíjet 3D tisk. Nejčastěji jde o zpracování polymerních materiálů (ABS, PLA) pomocí metodami MEAM, ale setkáváme se i s metodou SLS, kterou využívají například přední výrobci obuvi pro tisk elastomerních materiálů.

Jednou z mnoha předností aplikace aditivní výrobu pro umělecké účely je schopnost vícebarevného tisku. Zároveň dostupnost celé řady barev jednotlivých filamentů využívaných pro zpracování je rovněž velkým přínosem. A relativně nízká pořizovací cena tiskárny pracující s technologií FDM umožňuje rozvíjet se a umělecky tvořit téměř komukoliv [1,86, 87].



Obrázek 29: 3D tisk nábytku z recyklovaného polymeru – ABS [88].

5. MECHANICKÉ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ

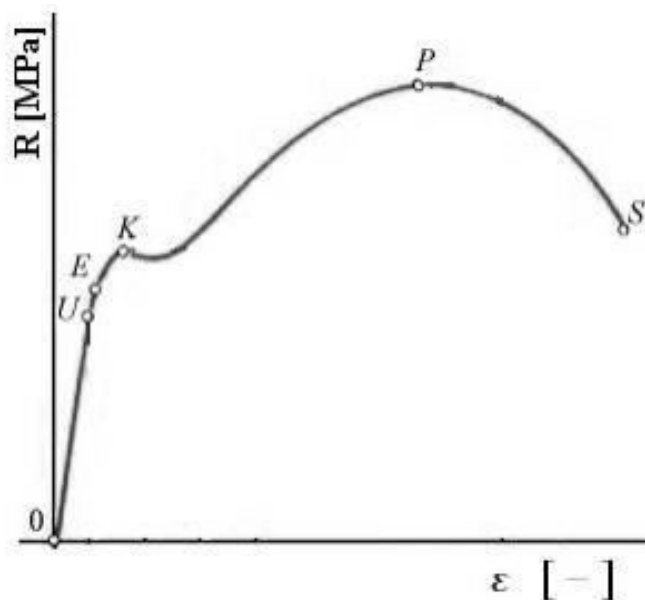
Pro posouzení povahy daného materiálu nebo pro porovnání mezi více materiály navzájem musíme daný materiál vystavit různým zkouškám pro stanovení charakteristických veličin, a k tomu slouží široká oblast testování materiálů. Posuzovat můžeme chemické, fyzikální či mechanické vlastnosti. Blíže se budeme věnovat posledním uvedeným, a to mechanickým vlastnostem materiál [89 – 92].

Mezi základní mechanické vlastnosti patří tvrdost, pevnost, pružnost a tvárnost. Materiály jsou nejčastěji vystaveny některému z typů namáhání. Mezi základní patří namáhání v tahu, krutu, tlaku ohybu a smyku-stříhu. Ovšem je nutné podotknout, že v mnoha situacích je materiál namáhán i více typy namáhání současně. Mechanické testování lze rozdělit do několika sekcí: statické, dynamické a zvláštní zkoušky. Největší pozornost budeme věnovat zkouškám statickým, u kterých rozlišujeme zkoušky právě na základě základních typů namáhání. V každodenní praxi se setkáváme s již s polotovary či hotovými výrobky, u těchto by bylo běžné testování destruktivní, proto se nejčastěji setkáváme s testováním cíleně vytvořených testovacích vzorků. Tyto vzorky se liší dle jednotlivých zkoušek. Tvary těchto testovacích těles jsou nejčastěji ve tvaru oboustranných lopatek nebo trámů [89 – 92].

5.1 Statické namáhání v tahu

Základní mechanickou zkouškou je tzv. zkouška tahem dle normy ČSN EN ISO 527. Pro samotné testování slouží jednoúčelový nebo univerzální testovací přístroj. V případě tahové zkoušky je vzorek upevněn do čelistí stroje a následně dochází k vyvození jednoosého namáhání v tahu. Podstatou zkoušky je plynulé zatěžování zkušebního vzorku tahovým napětím do doby jeho přetržení nebo do stanovené hodnoty napětí (síly). Výsledkem je diagram tahové zkoušky (viz následující obrázek), který je závislostí tahového napětí (nebo síly) na poměrném prodloužení (nebo absolutním prodloužení). Během statické zkoušky vzniká v materiálu napětí, které rozeznáváme buď normálové, které působí kolmo k rovině a poté smykové, které působí ve směru tečny k rovině. Napětí vyjádříme jako podíl síly na plochu. V reálné situaci dochází, ke změně průřezu vzorku, poté tohle napětí označujeme, jako skutečné, ovšem v technické praxi uvažujeme neměnicí se průřez zkušební tyče a zde mluvíme o tzv. smluvním jmenovitém napětí. Jednotkou napětí je N/m^2 nebo Pa, v technické praxi častěji MPa. Pro popis prodloužení zkušební tě-

lesa je zavedena veličina poměrné relativní deformace, která je vyjádřena poměrem změny délky vůči výchozí délce. Jedná se tedy o bezrozměrnou veličinu. Do oblasti meze úměrnosti viz předchozí obrázek, platí Hookův zákon. Ten nám říká, že v této oblasti se materiál chová elasticky, tudíž pokud nepřekročíme napětí odpovídající mezi úměrnosti je materiál schopný se vrátit do svého výchozího stavu. Hookův zákon vyjadřuje lineární závislost mezi napětím a deformací. Konstantou úměrnosti je Youngův modul. Lze jej poté vyjádřit jako poměr napětí vůči deformaci. Jednotkou je Pascal. Youngův modul je jednou z nejdůležitějších materiálových konstant. S jeho rostoucí hodnotou roste i tuhost testovaného materiálu. Hodnoty pro jednotlivé materiály jsou tabelovány. V případě polymerů je hodnota zvláště závislá na teplotě, okolním prostředí a čase. Další důležitou materiálovou veličinou je mez pevnosti, která odpovídá bodu P na tahové křivce. Jednoduše řečeno se jedná o nejvyšší hodnotu smluvního tahového napětí, kterou materiál snese a je vztažena na konstantní průřez plochy zkušebního tělesa [89 – 92].



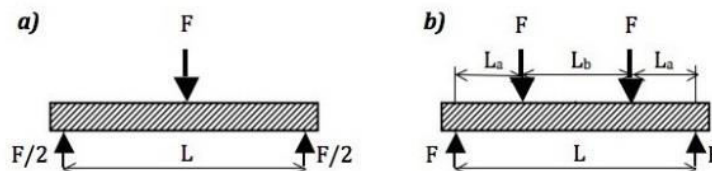
Obrázek 30: Tahový diagram pro měkkou ocel; bod U odpovídá mezi úměrnosti, bod E představuje mezi pružnosti, bod K označuje mez kluzu, bod P je mez pevnosti a bod S je místo porušení vzorku[89].

5.2 Statické namáhání v ohybu

Namáhání v ohybu (ČSN EN ISO 178) přináší cenné informace o materiálu, který je zatěžován při použití jako nosné konstrukce nebo u materiálů křehkých. Zároveň je možné zvolit testování ohybem u již hotových dílců (jeřáby, mostů atd.). Rozeznáváme základní dva typy namáhání v ohybu a to: tříbodový a čtyřbodový ohyb. Základním rozdílem je tedy,

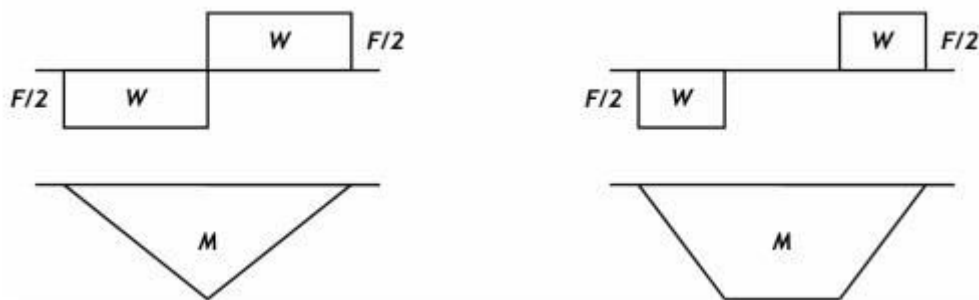
kdy v případě tříbodového ohybu působí síla pouze v jednom bodě u čtyřbodového je působení ve dvou místech. Jednotlivé uspořádání zachycuje následující obrázek. Během

tříbodového ohybu je vzorek deformován do tvaru písmene „V“ naopak u čtyřbodového ohybu je deformace ve tvaru „U“. Pro testování se používají, tělesa ve tvaru trámů po případně, je možné testovat i tělesa kruhového průřezu [89].



Obrázek 31: Namáhání v ohybu; a) tříbodový ohyb a b) čtyřbodový ohyb[90].

Během zkoušky v ohybu je rozložení napětí ve středu vzorku nulové a směrem ke krajním vrstvám roste k maximální hodnotě. Během postupného zvyšování síly dochází k zaznamenávání průhybu až do okamžiku porušení či trvalé deformace zkušebního tělesa. Rozložení ohybového modulu (M) a modulu průřezu u obou typů testování je zobrazen na obrázku 31[89].



Obrázek 32: Znárodnění průběhu ohybového a modulu průřezu pro tříbodový ohyb (vpravo) a čtyřbodový ohyb (vlevo)[90].

Výsledkem testování je poté určení napětí v ohybu, které je definováno:

$$\sigma_y = \frac{M_o}{W} \text{ [MPa]} \quad (1)$$

V případě tříbodového ohybu u tělesa s obdélníkovým průřezem je stanoven ohybový moment ze vztahu:

$$M_{max} = \frac{F_{max} \cdot l}{4} \text{ [N mm]} \quad (2)$$

Kde F_{\max} odpovídá maximální zatěžující síle a I je moment setrvačnosti.

Pro modul průřezu poté platí definice:

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6} [\text{mm}^3] \quad (3)$$

Kde b je délka a h šířka nosníku [89 — 92].

6. POVRCHOVÉ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ V PEVNÉM STAVU

Z hlediska užitných vlastností materiálů je právě povrch mnohdy tou nejdůležitější částí celého vzorku. Jelikož povrch je v přímém kontaktu s okolním prostředím a ovlivňuje tedy celou řadu vlastností. Povrch lze chápat hned několika způsoby, mezi ty nejběžnější patří definice, že se jedná o poslední atomární vrstvu a může se lišit svým uspořádáním či složením vzhledem k možné adsorpci nečistot nebo difuzí z objemu. Právě povrch tvoří rozhraní mezi dvěma fázemi a dává výrobku výsledný vzhled. Pro využití materiálů v praxi je často velice důležité znát, jak se materiál chová na povrchu a jaký je jeho profil z čehož může být následně odvozeno, zda pro danou aplikaci je vhodný či nikoliv [93, 94].

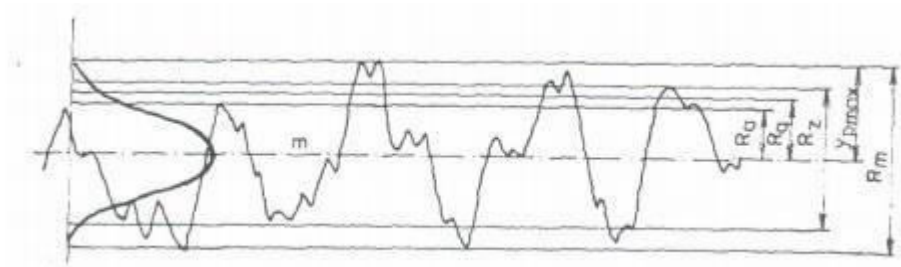
6.2 Drsnost povrchu

Jak již bylo řečeno v úvodu této kapitoly, jakost povrchu hraje významnou roli v posouzení vlastností daného produktu. Docílení ideálního hladkého a rovinného povrchu je doposud nemožné. Způsob obrábění daného povrchu má za následek vznik nerovností, které vytváří skutečnou strukturu povrchu. Rozlišujeme dva druhy nerovností a to mikronerovnosti, kterou charakterizuje drsnost a pak makronerovnosti, které jsou způsobeny spíše vibracemi obráběcího stroje, a sem řadíme vlnitost povrchu. Mezi nerovnosti dále patří úchylny tvaru či vady materiálu, které se ovšem do struktury povrchu nezapočítávají. Celý povrch lze tedy rozdělit do tří částí, které se navzájem překrývají a tvoří tedy reálný povrch. Drsnost je nejmenší nerovností, která je zapříčiněna způsobem obrábění, tj. působením nástroje a obrobku. Na ni navazuje vlnitost, kde je činitelem vliv otřesů a vibrací obráběcího stroje či velkého přítlaku řezného nástroje. A na konec následuje samotný tvar plochy, který tvoří skutečný povrch materiálu bez zahrnutí drsnosti a vlnitosti [93, 94].

6.2.1 Kvantifikování drsnosti povrchu

V současnosti, kdy vzrůstají požadavky na větší univerzálnost strojů, ekonomičnost procesů výroby a preciznější a spolehlivější měření vlastností dochází větší pozornost i na vliv povrchů a tedy drsnosti. Právě velikost drsnosti povrchu se výrazně podílí na mechanických vlastnostech a životnosti výrobku. Pro posouzení drsnosti plochy slouží dva

hlavní přístupy. Tím prvním je využití komparátoru, pomocí kterého je na základě pohledu a pohmatu přisouzena drsnost našeho obrobku. Tohle posouzení slouží pro rychlé posouzení a v některých případech je dostačující. Pokud chceme drsnost vyčíslit přesněji, využijeme speciálních přístrojů - profilometrů, profiloměrů či speciálních mikroskopů. Výsledkem je soubor hodnot charakterizující daný povrch dle normy ČSN EN ISO 4287. Dle normy pro charakterizaci drsnosti povrchu slouží následující veličiny (viz obrázek 33): střední aritmetická úchylka profilu (R_a), výška nerovnosti profilu z deseti bodů (R_z), největší výška nerovností profilu (R_m), výška výstupu profilu (y_{\max}) a průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu (R_q) [93, 94].



Obrázek 33: Základní charakteristiky drsnosti povrchu [93].

II. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

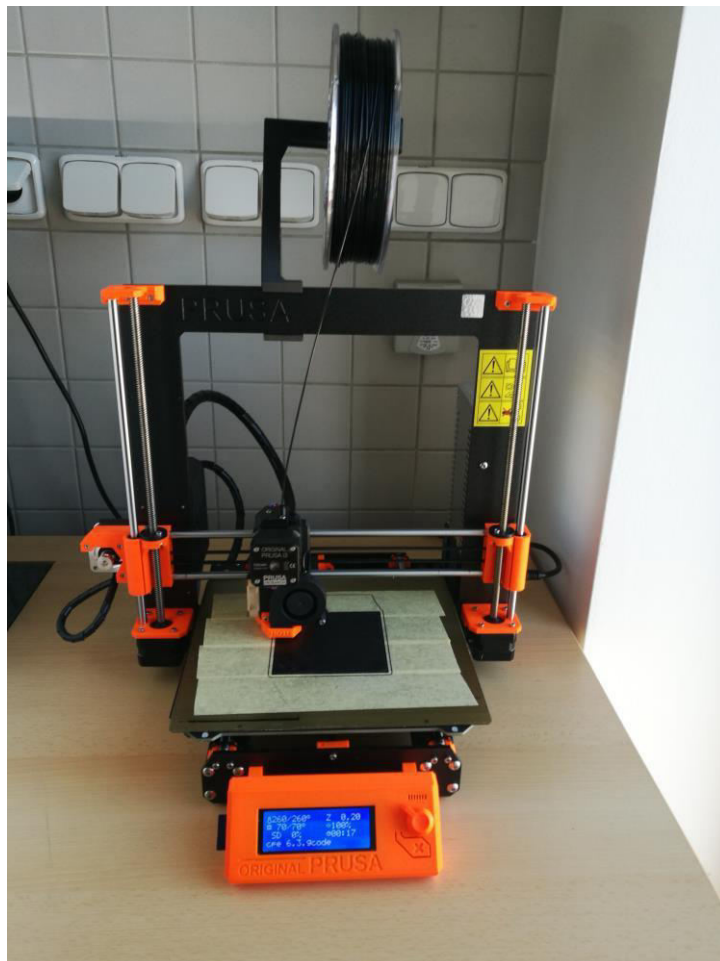
7. CÍL PRÁCE

- Příprava geometrického modelu zkušebních těles a jejich převedení formátu čitelného pro 3D tiskárnu (G-kódu).
- Nastavení parametrů tisku pro jednotlivé typy materiálů s cílem dosáhnouti co nejlepších výtisků a samotný tisk testovacích objektů.
- Testování a vyhodnocení mechanických a povrchových vlastností výtisků u daných materiálů.

8. POPIS 3D TISKÁRNY, POUŽITÝCH MATERIÁLŮ A NAVRŽENÝCH MODELŮ PRO TISK

8.1 3D tiskárna

Pro tisk zkušebních vzorků byla zvolena technologie FDM, za pomoci 3D tiskárny od českého výrobce Josefa Průši s označením Original Prusa i3 MK3 (viz nadcházející obrázek). Mezi základní přednosti této tiskárny patří: tichý a rychlý tisk, kvalitní rám z extrudovaného hliníku, optický senzor filamentu, hlídání přívodu energie, pružný tiskový plát opatřený vrstvou z PEI, celokovovou tryskou E3D V6, extruderem od společnosti Bondtech a kvalitními termistory. Nejen díky těmto parametrům se tato tiskárna stala nejlepší tiskárnou roku 2018 v kategorii “Pracant”, kterou pořádá web 3DHUBS.com[95].



Obrázek 34: 3D tiskárna Original Prusa i3MK3.

8.2 Stručný přehled použitých materiálů

8.2.1 PLA

Kyselina polymléčná je zástupcem biodegradabilních polymerů konkrétně polyesterů. Výhodou je, že je snadno depolymerizovatelná na výchozí monomer (laktid kyseliny mléčné). Nejčastěji je vyráběná z kukuřičného škrobu. Co se vlastností týká, jedná se o materiál průhledný, s nízkou tažností, dobrými mechanickými vlastnostmi, zdravotně nezávadný a v přírodě plně odbouratelným [96].

Z pohledu vlastností materiálu pro 3D tisk je PLA je vhodný pro tisk výtisků velkých rozměrů a zároveň pro výrobky s četnými detaily. Vzhledem k nízké hodnotě teploty tání (175 °C) je materiál opakovaně zpracovatelný a vyniká nízkou degradací. Jedná se o tvrdý, a tudíž i křehký materiál. Zároveň není odolný vůči UV záření a povětrnosti. Své uplatnění v rámci aditivní výroby nachází pro tisk hraček a prototypů[96].

8.2.2 ABS

Akrylobutadienstyren je zástupcem kopolymerů styrenu. Jedná se o terpolymer, které je snadno zpracovatelný a vyniká dobrými mechanickými vlastnostmi, houževnatostí a chemickou odolností. Výrobky jsou typická svým lesklým povrchem s vysokou tvrdostí. Často se s ním setkáváme s využitím v oblasti automobilového průmyslu nebo různých krytů v oblasti elektrotechniky apod [97].

Na rozdíl od PLA má ABS vyšší teplotu tání, která zaručuje vynikající teplotní odolnost výrobků až do 98 °C. Odolává opotřebení a nárazům, je rozpustný v acetonu což usnadňuje jeho snadnou lepidlost. Problém během zpracování 3D tiskem přináší velkou tvarovou nestabilitu, která vede k problémům během tisku (odlepování z podložky) a následnému smrštění výtisku po ochlazení až o 3 %. Z hlediska použití v oblasti 3D tisku je ABS využito pro výrobu modelů, krytů či součástí interiérů vozidel [97].

8.2.3 PET/PET-G

Jedná se o nejdůležitější polymer ze skupiny termoplastických elastomerů. S polyethylentereftalátem se setkáváme nejčastěji ve formě vláken, fólií a lahví pro nápoje a další kapalně prostředky. Využití vlákna z PET má své dnes již nezastupitelné místo při výrobě

textilií. Vlákno se vyznačuje stálostí, tepelnou odolností, tvarovou stálostí a částečnou chemickou odolností [97].

Svými přednostmi jako je houževnatost a tepelná odolnost si získalo své místo jako materiál vhodný pro 3D tisk. S malou teplotní odolností nedochází ke kroucení při tisku a umožňuje tak tisk i rozměrných konstrukcí. Písmeno G v označení znamená glykol, který je přidáván během výroby. Problémem při tisku přináší právě vláknovorné vlastnosti PETu a tím může docházet k tzv. stringování. Jedná se o materiál vhodný pro celou řadu aplikací, a to i pro venkovní využití [97].

8.2.5 CPE HG 100

V tomto případě se jedná o ko-polyester vycházející z PET-G. Jedná se tedy o materiál velmi podobný výše popsanému zástupci, s tím rozdílem, že poskytuje některé pozitiva vůči PETG. Přináší tisk objektů o vysoké kvalitě a dobrých mechanických vlastnostech. Vyniká především vynikající odolností vůči průrazu, vysokou houževnatostí a odolností vůči povětrnostním vlivům. Je rovněž dobře odolný vůči vysokým teplotám a chemickému prostředí. Je zcela recyklovatelný [98].

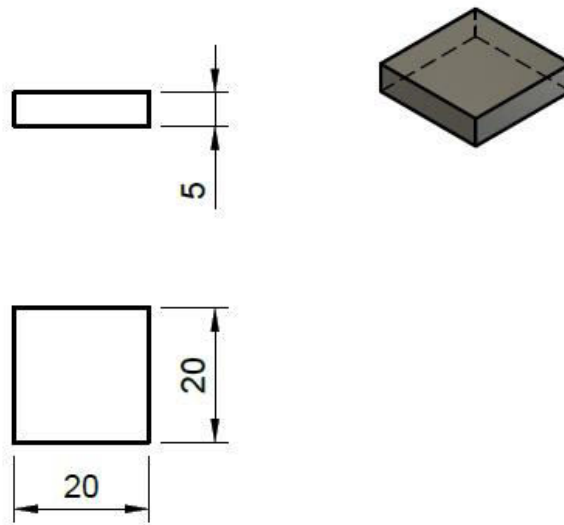
8.2.6 Flexfill 98A

Z hlediska chemické struktury se jedná o termoplastický polyuretan. Jedná se speciální typ polymerů, který ve své struktuře kombinuje vlastnost elastomerů (elasticitu, velká vratná deformace) a termoplastů (recyklovatelnost). Struktura takovéto látky je chápána, jako střídání tvrdých (krystalických) a měkkých (amorfních) segmentů [97].

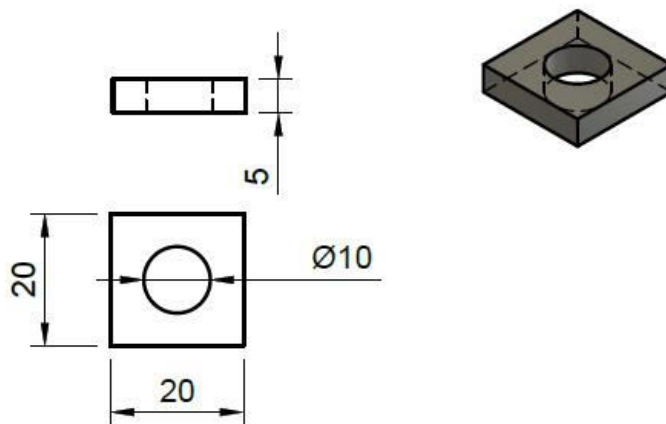
Materiál FlexFill je díky svým vlastnostem vhodný pro aplikace. Kde je vhodné tlumit vibrace či hluk. Dále je vhodný pro tisk krytů telefonů nebo ochranných obalů. Pro zpracování je volena teplota podobná, jako je u PLA, ale důležité je dbát nižšího frikce mezi filamentem a podávacím zařízením [97, 99].

8.3 Přehled navržených 3D modelů pro tisk

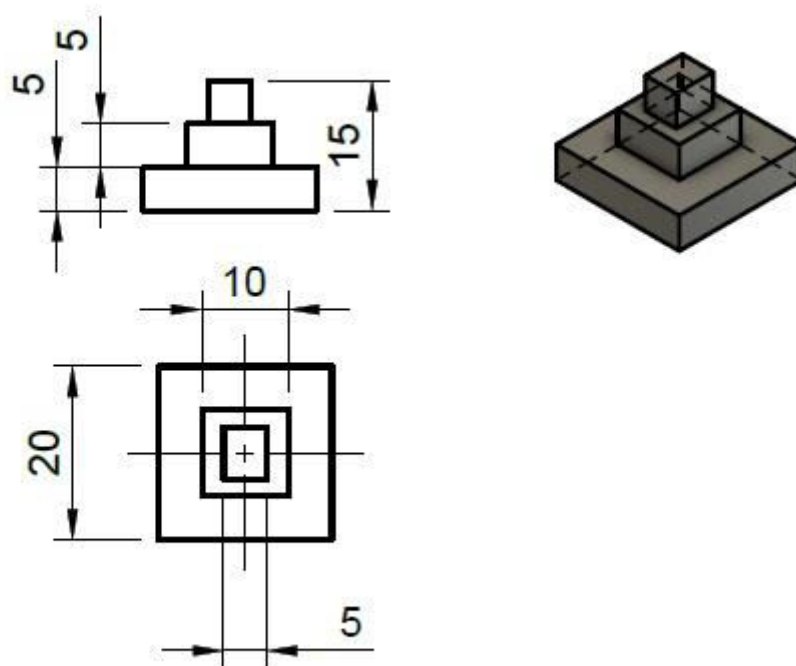
Za účelem rozměrové a vizuální analýzy byly zkonstruovány 3D modely (viz obrázky 35 až 39) a převzat ucelený model pro vizuální posouzení tisku – obrázek 40. Rovněž byly vytvořeny 3D modely zkušebních těles pro zkoušku v ohybu – obrázek 41 a tahovou zkoušku – obrázek 42.



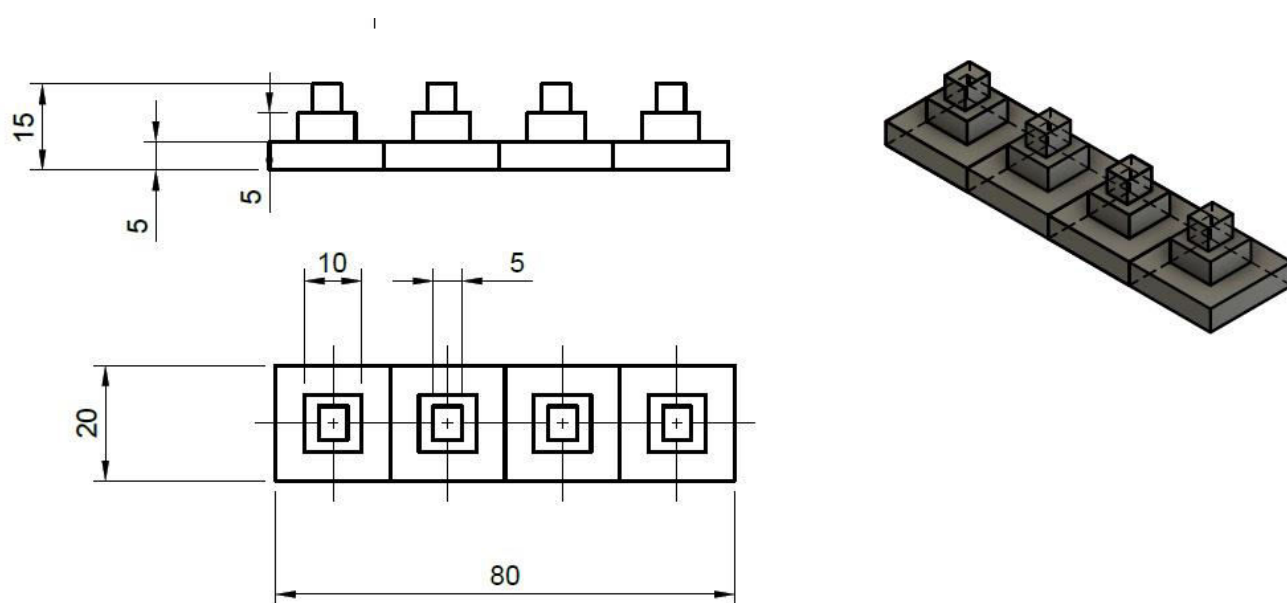
Obrázek 35: Kvádr



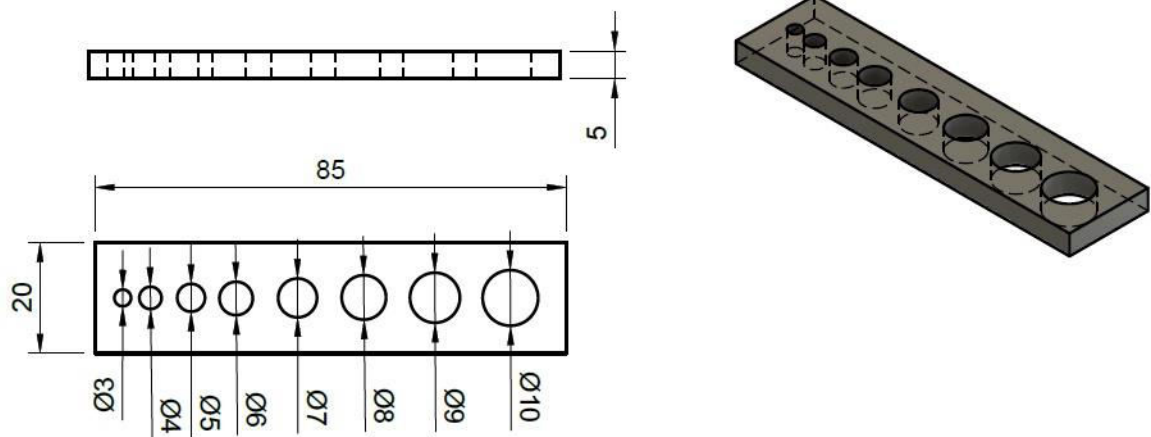
Obrázek 36: Kvádr s otvorem



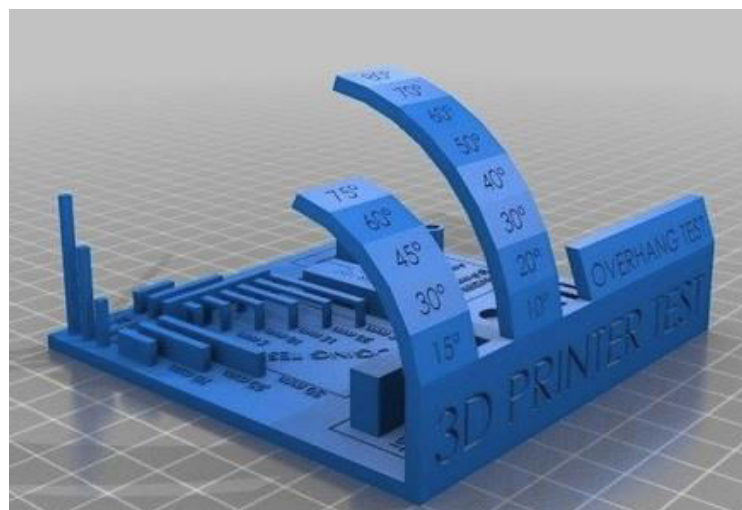
Obrázek 37: Pyramida



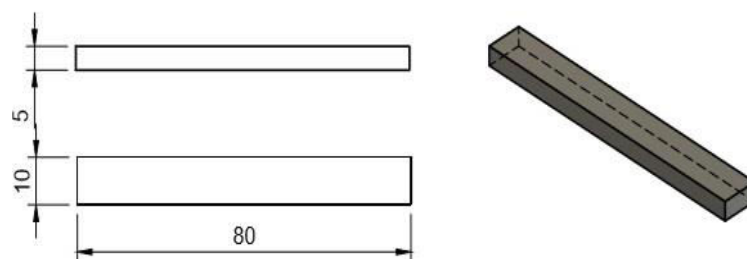
Obrázek 38: Sada 4 pyramid



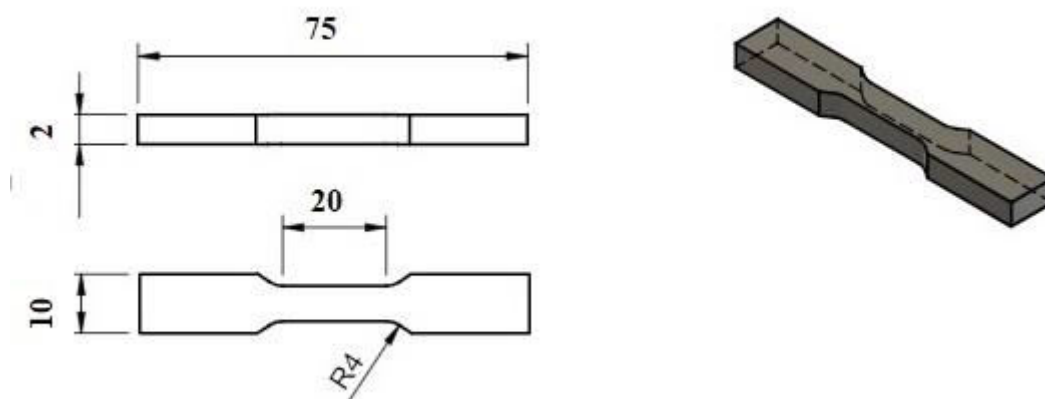
Obrázek 39: Sada otvorů



Obrázek 40: Kompletní 3D tiskařský test [100]



Obrázek 41: 3D model zkušebního tělesa pro zkoušku v ohybu dle normy ČSN EN ISO178.



Obrázek 42: 3D model zkušebního tělesa pro tahovou zkoušku v poměru 1:2 vůči velikosti definované normou ČSN EN ISO527.

9. VÝSLEDKY

9.1 Optimalizace procesních podmínek 3D tisku za účelem produkce výrobků s co nejlepšími užitnými vlastnostmi

Pro správný tisk daného materiálu bylo nutné pomocí doporučených parametrů spolu s vlastním experimentováním najít vhodné podmínky tisku jednotlivých materiálů – viz následující tabulka.

Tabulka 1: Shrnutí podmínek pro 3D tisk u použitých materiálů za dosažení nejlepších užitných vlastností výrobků

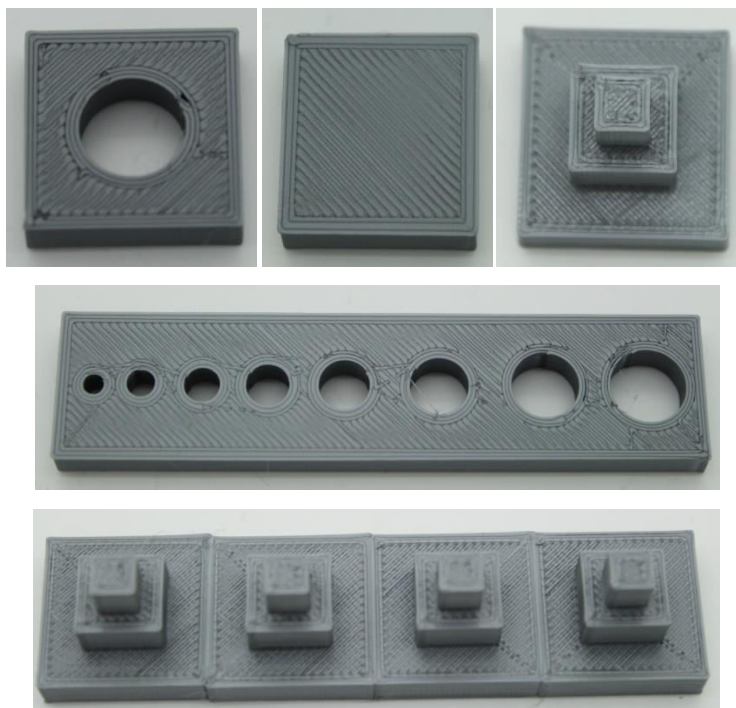
materiál; průměr filamentu (mm)	typ trysky; průměr (mm)	teplota podložky/ trysky (°C)	tloušťka vrstvy (mm)	rychlost tisku výplně/stěn (mm/s)	hustoty výplně (%)	úprava podložky
PLA; 1,75	E3D; 0,4 mm	215/60	0,15	45/40	100	isopropylalkohol
ABS; 1,75	E3D; 0,4 mm	250/100	0,15	35/30	100	ABS juice (aceton+ABS)
PETG; 1,75	E3D; 0,4 mm	240/70	0,15	35/20	100	papírová lepicí páska
CPE HG 100; 1,75	E3D; 0,4mm	245/70	0,15	35/20	100	papírová lepicí páska
Flexfill 98 A; 1,75	E3D; 0,4mm	210/70	0,15	25/20	100	isopropylalkohol

9.2 Rozměrová a vizuální analýza

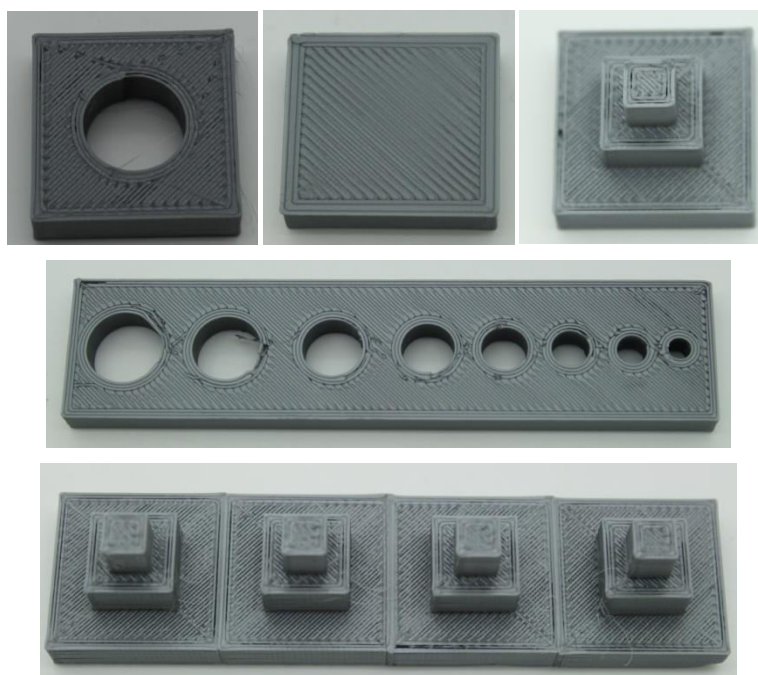
Mezi základní aspekty pro posouzení jestli je možné novou výrobní technologii aplikovat do každodenní praxe je ověření stupně rozměrové přesnosti a posouzení vizuální kvality jednotlivých výrobků. Za tímto účelem byla navrhnutá tělesa, která mají přinést odpověď jak je technologie modelování depozicí taveniny přesná a zda návrh odpovídá rozměrům výsledného produktu. Pro celkový pohled na jakost tisku byl převzat komplexní 3D model pro testování, který představuje ucelený soubor konstrukčních prvků, které jsou běžně využívány. U navrhnutých testovacích vzorků bude u vybraných materiálů analyzována změna rozměrů po vytištění s rozměry výchozími a bude diskutováno, zda typ materiálu či změna procesních parametrů ovlivní přesnost výrobku.

Za materiály pro testování byly zvoleny již výše uvedené a to konkrétně: PLA, ABS, PETG a CPE HG 100. U prvních dvou byl rovněž posuzován vliv nastavené rychlosti tisku, konkrétně za účelem posouzení zda změna rychlosti tisku ovlivní výsledné rozměry výtisků. Podmínky tisku, které byly použity, jsou shrnuty v úvodní tabulce 1, až na výjimku, kdy nižší rychlost tisku (stěn i výplně) u PLA a ABS byla zvolena navíc trojnásobně nižší, než je uvedena v tabulce 1.

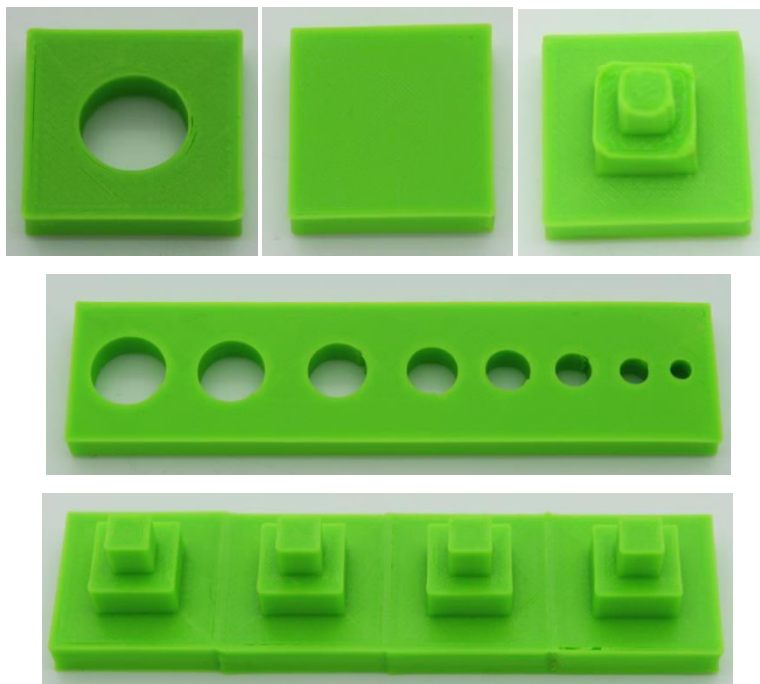
Po vytisknutí jednotlivých testovacích těles (obrázky 43 až 48) bylo provedeno změření jednotlivých rozměrů a naměřené hodnoty byly statisticky zpracovány a zapsány do tabulek 2 až 6 a jejich výsledky byly dále debatovány v diskuzi. U převzatého 3D modelu (obrázky 49 až 54), obsahující sestavu konstrukčních prvků byla vizuálně sledována kvalita tisku a výsledky dále komentovány.



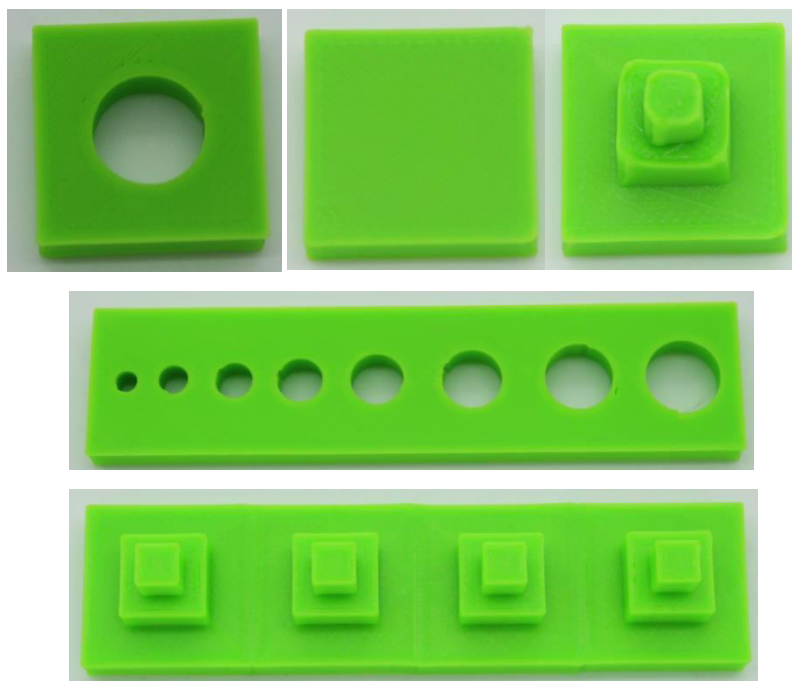
Obrázek 43: Fotografie zkušebních těles pro rozměrovou analýzu z PLA při tisku nižší rychlostí.



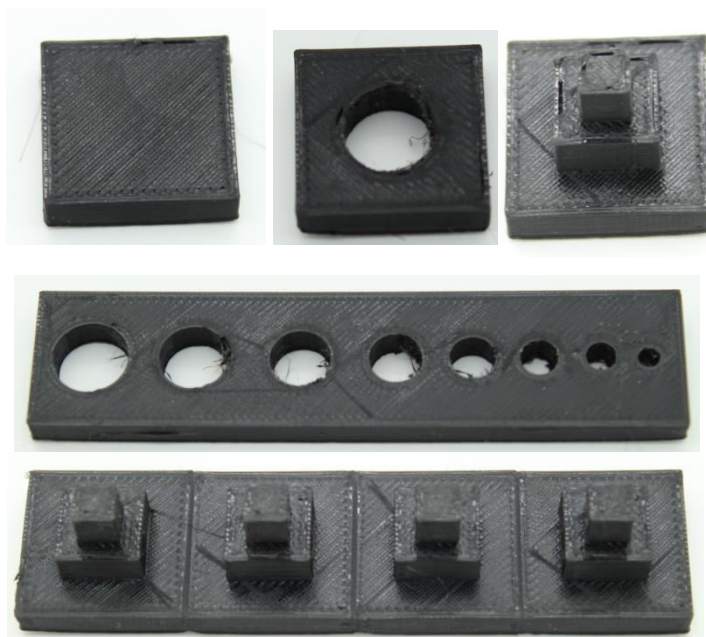
Obrázek 44: Fotografie zkušebních těles pro rozměrovou analýzu z PLA při tisku vyšší rychlostí.



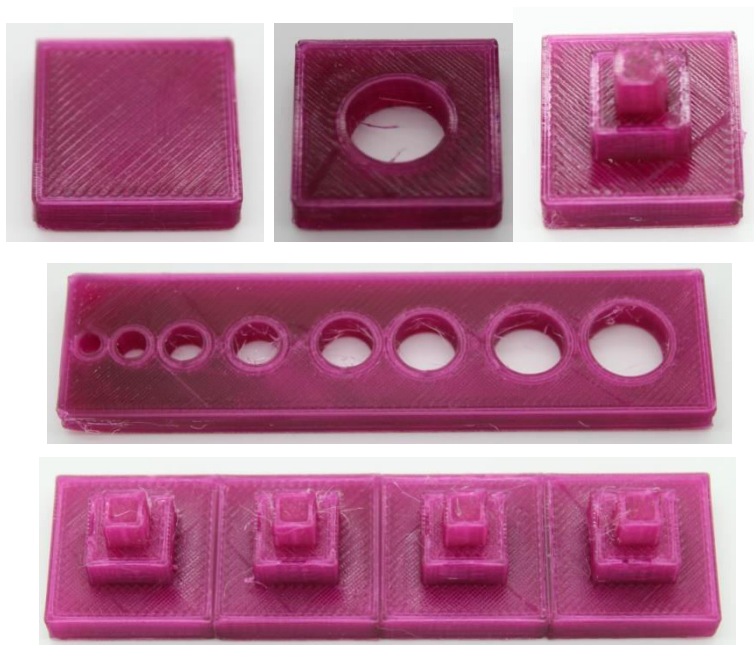
Obrázek 45: Fotografie zkušebních těles pro rozměrovou analýzu z ABS při tisku nižší rychlosti.



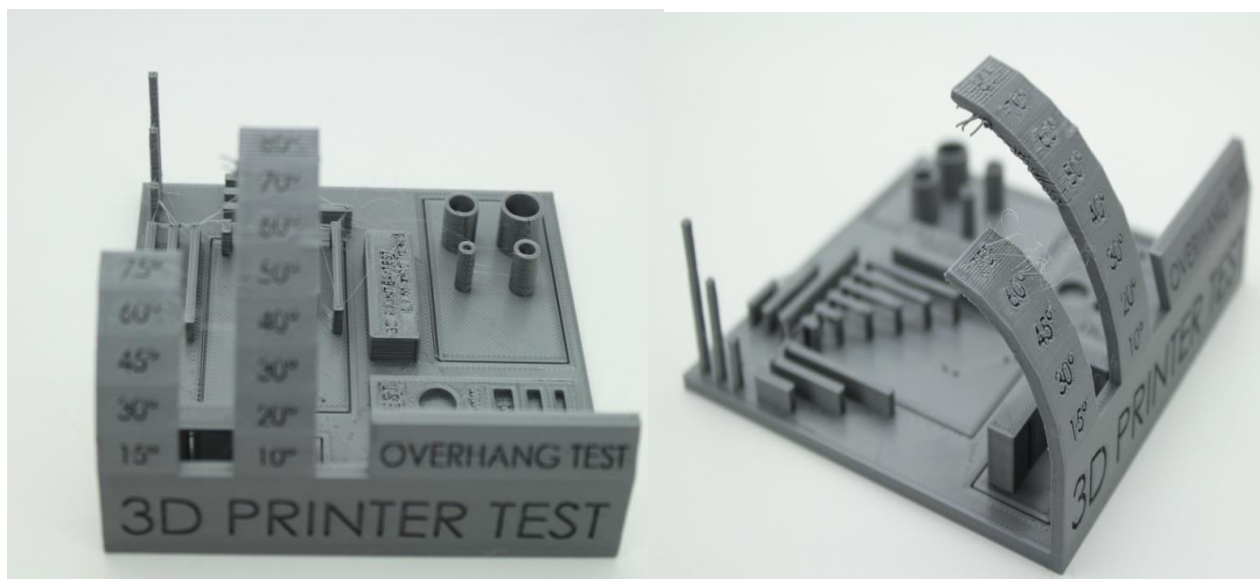
Obrázek 46: Fotografie zkušebních těles pro rozměrovou analýzu z ABS při tisku vyšší rychlosti.



Obrázek 47: Fotografie zkušebních těles pro rozměrovou analýzu z CPE HG 100.



Obrázek 48: Fotografie zkušebních těles pro rozměrovou analýzu z PETG.



Obrázek 49: Fotografie kompletního 3D tiskařského testu pro vizuální posouzení kvality tisku z PLA při tisku nižší rychlosti.



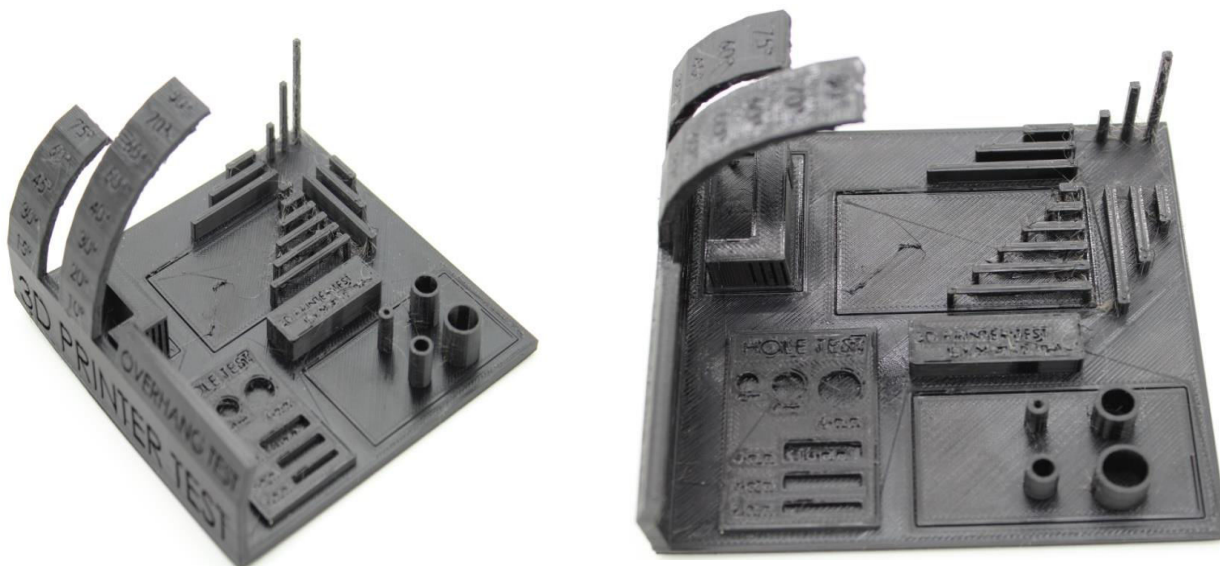
Obrázek 50: Fotografie kompletního 3D tiskařského testu pro vizuální posouzení kvality tisku z PLA při tisku vyšší rychlosti.



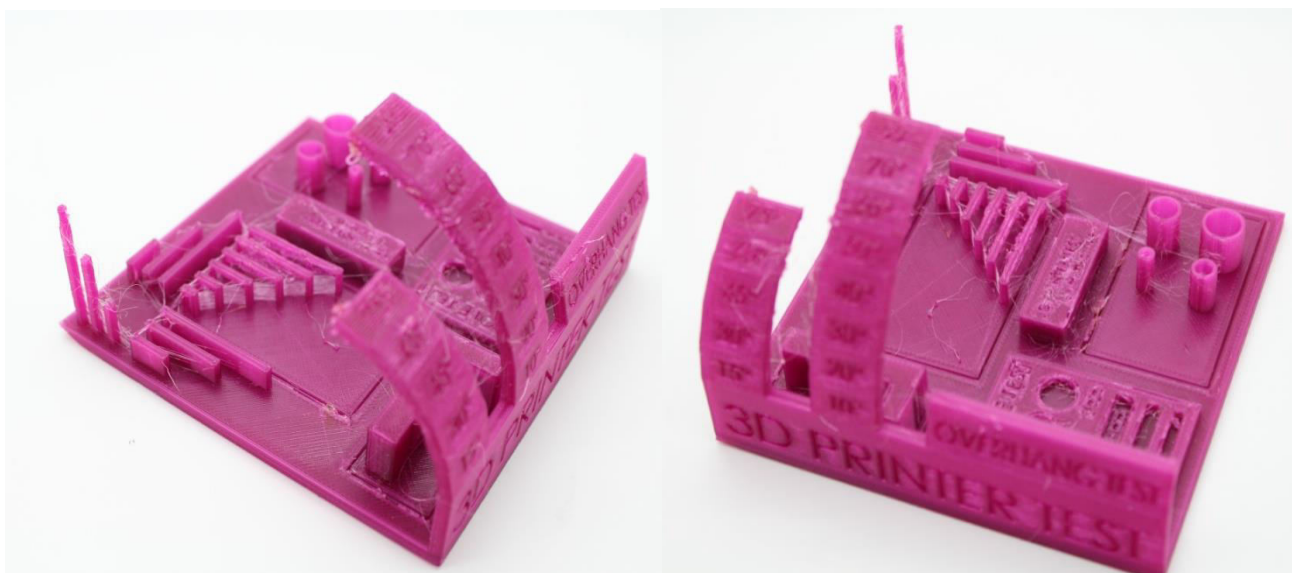
Obrázek 51: Fotografie kompletního 3D tiskařského testu pro vizuální posouzení kvality tisku z ABS při tisku nižší rychlosti.



Obrázek 52: Fotografie kompletního 3D tiskařského testu pro vizuální posouzení kvality tisku z ABS při tisku vyšší rychlosti.



Obrázek 53: Fotografie kompletního 3D tiskařského testu pro vizuální posouzení kvality tisku z CPE HG 100.



Obrázek 54: Fotografie kompletního 3D tiskařského testu pro vizuální posouzení kvality tisku z PETG.

Tabulka 2: Rozměrová analýza kvádrů

rozměr (mm)/procent. změna (%)	materiál					
	PLA_nižší rychlost	PLA_vyšší rychlost	ABS_nižší rychlost	ABS_vyšší rychlost	CPE HG 100	PETG
délka	20,01±0,02/ +0,05	20,43±0,06/ +2,15	19,84±0,06/ -0,80	20,09±0,02/ +0,45	20,28±0,05/ +1,4	20,26±0,04/ +1,3
šířka	19,89±0,04/ -0,55	20,32±0,02/ +1,6	20,32±0,02/ +1,6	20,08±0,03/ +0,40	20,11±0,02/ +0,55	20,14±0,06/ +0,70
tloušťka	4,97±0,02/ -0,60	4,99±0,02/ -0,20	4,99±0,02/ -0,20	4,97±0,01/ -0,60	5,0±0,1/ 0	4,99±0,03/ -0,20

Tabulka 3: Rozměrová analýza kvádrů s otvorem

rozměr (mm)/procent. změna (%)	materiál					
	PLA_nižší rychlost	PLA_vyšší rychlost	ABS_nižší rychlost	ABS_vyšší rychlost	CPE HG 100	PETG
délka	20,00±0,03/ 0	20,083±0,017/ +0,42	19,88±0,02/ -0,60	19,78±0,02/ -1,1	20,21±0,09/ +1,1	20,14±0,03/ +0,7
šířka	19,99±0,03/ -0,05	20,14±0,02/ +0,70	19,89±0,02/ -0,55	19,84±0,04/ -0,80	20,03±0,02/ +0,15	20,19±0,03/ +0,95
tloušťka	5,04±0,03/ +0,80	5,023±0,011/ +0,46	4,98±0,02/ -0,40	5,02±0,02/ +0,40	4,97±0,04/ -0,60	4,95±0,02/ -1,0
průměr otvoru	9,90±0,07/ -1,0	9,77±0,06/ -2,3	9,82±0,02/ -1,8	9,83±0,02/ -1,7	9,65±0,09/ -3,5	9,63±0,10/ -3,6

Tabulka 4: Rozměrová analýza pyramidy

rozměr (mm)/procent. t. změna (%)		materiál					
		PLA_nižší rychlost	PLA_vyšší rychlost	ABS_nižší rychlost	ABS_vyšší rychlost	CPE HG 100	PETG
základna	délka	20,09±0,02/ +0,45	20,29±0,08/ +1,5	19,76±0,04/ -1,2	19,72±0,03/ -1,4	20,16±0,06/ +0,8	20,04±0,02/ +0,20
	šířka	20,05±0,03/ +0,25	20,33±0,07/ +1,7	19,79±0,06/ -1,1	19,89±0,02/ -0,55	20,20±0,05/ +1,0	20,13±0,04/ +0,65
	výška	5,02±0,03/ +0,40	5,04±0,04/ +0,80	4,88±0,04/ -2,4	4,85±0,08/ -3,0	5,05±0,04/ +1,0	5,03±0,04/ +0,60
střed	délka	9,90±0,02/ -1,0	9,98±0,02	9,85±0,04/ -1,5	9,88±0,03/ -1,2	10,10±0,03/ +1,0	9,91±0,05/ -0,9
	šířka	9,80±0,03/ -2,0	9,95±0,02/ -0,5	9,90±0,03/ -1,0	9,80±0,05/ -2,0	10,080±0,012/ +0,80	9,85±0,02/ -1,5
	výška	5,010±0,012/ +0,20	5,062±0,015/ +1,2	5,06±0,02/ +1,2	5,06±0,04/ +1,2	5,25±0,03/ +5,0	4,89±0,03/ -2,2
vrchol	délka	5,03±0,02/ +0,60	5,07±0,02/ +1,4	5,07±0,02/ +1,4	5,12±0,02/ +2,4	5,19±0,02/ +3,8	5,20±0,04/ +4,0
	šířka	5,0±0,0/ 0	5,06±0,02/ +1,2	5,03±0,02/ +0,6	5,03±0,02/ +0,6	5,09±0,03/ +1,8	5,06±0,05/ +1,2
	výška	4,98±0,02/ -0,40	4,95±0,03/ -1,0	4,90±0,04/ -2,0	5,30±0,02/ +6,0	5,19±0,03/ +3,8	5,01±0,02/ +0,2

Tabulka 5: Rozměrová analýza sady pyramid

rozměr (mm)/procent t. změna (%)		materiál					
		PLA_nižší rychlost	PLA_vyšší rychlost	ABS_nižší rychlost	ABS_vyšší rychlost	CPE HG 100	PETG
základna	délka	79,38±0,02/ -0,75	78,91±0,03/ -1,4	78,58±0,02/ -1,8	78,83±0,02/ -1,5	79,832±0,011/ -0,21	79,88±0,02/ -0,15
	šířka	20,08±0,03/ +0,40	19,95±0,03/ -0,25	19,86±0,05/ -0,7	19,89±0,04/ -0,55	20,20±0,03/ +1,0	20,22±0,03/ +1,1
	výška	5,00±0,02/ 0	5,03±0,03/ +0,60	4,92±0,03/ -1,6	4,95±0,05/ -1,0	5,02±0,02/ +0,40	5,01±0,03/ +0,20
střed	délka	10,04±0,03/ +0,40	10,01±0,02/ +0,10	9,96±0,03/ -0,40	9,93±0,02/ -0,70	10,190±0,016/ +0,19	10,13±0,03/ +1,3
	šířka	10,01±0,02/ +0,10	10,021±0,013/ +0,21	9,88±0,03/ -1,2	10,02±0,04/ +0,20	10,20±0,02/ +2,0	10,10±0,02/ +1,0
	výška	5,01±0,02/ +0,20	4,98±0,02/ -0,40	5,07±0,03/ +1,4	5,16±0,04/ +3,2	5,02±0,03/ +0,40	4,960±0,012/ -0,80
vrchol	délka	5,03±0,02/ +0,60	5,04±0,02/ +0,80	5,12±0,02/ +2,4	5,04±0,05/ +0,80	5,16±0,02/ +3,2	5,13±0,05/ +2,6
	šířka	5,02±0,02/ +0,40	5,03±0,03/ +0,60	5,04±0,04/ +0,80	5,05±0,03/ +1,0	5,16±0,02/ +3,2	5,09±0,02/ +1,8
	výška	5,010±0,012/ +0,20	4,98±0,03/ -0,40	4,99±0,02/ -0,20	5,09±0,02/ +1,8	4,98±0,04/ -0,40	5,05±0,02/ +1,0

Tabulka 6: Rozměrová analýza sady otvorů

rozměr (mm)/procent. změna (%)		materiál					
		PLA_nižší rychlost	PLA_vyšší rychlost	ABS_nižší rychlost	ABS_vyšší rychlost	CPE HG 100	PETG
základna	délka	85,01±0,03/ +0,010	84,96±0,03/ -0,050	84,570±0,010/ -0,51	84,72±0,04/ -0,40	85,07±0,02/ +0,080	85,09±0,04/ +0,10
	šířka	20,10±0,02/ +0,50	19,89±0,04/ -0,52	19,94±0,03/ -0,30	19,97±0,05/ -0,15	20,26±0,02/ +1,3	20,15±0,02/ +0,75
	tloušťka	5,05±0,03/ +1,0	5,03±0,02/ +0,60	4,94±0,04/ -1,2	5,01±0,02/ +0,20	5,00±0,02/ 0	5,03±0,02/ +0,60
průměry	d ₃	2,94±0,04/ -2,0	2,96±0,05/ -0,14	2,92±0,05/ -2,7	2,94±0,04/ -2,0	2,89±0,05/ -3,8	2,88±0,07/ -4,0
	d ₄	3,89±0,03/ -2,8	4,00±0,03/ 0	3,89±0,04/ -2,8	3,94±0,04/ -1,5	3,88±0,05/ -3,0	3,89±0,05/ -2,8
	d ₅	4,932±0,013/ -1,4	5,02±0,04/ +0,40	4,94±0,04/ -1,2	4,92±0,05/ -1,6	4,84±0,03/ -3,2	4,89±0,03/ -2,2
	d ₆	5,960±0,012/ -0,70	5,93±0,02/ -1,2	5,96±0,02/ -0,70	5,94±0,02/ -1,1	5,83±0,02/ -2,9	5,93±0,02/ -1,2
	d ₇	6,98±0,03/ -0,30	7,02±0,02/ +0,3	6,98±0,02/ -0,3	6,92±0,02/ -1,1	6,92±0,02/ -1,1	6,79±0,02/ -3,0
	d ₈	7,99±0,03/ -0,22	8,01±0,02/ +0,12	8,01±0,02/ +0,12	7,94±0,02/ -0,75	7,87±0,03/ -1,6	7,70±0,02/ -3,8
	d ₉	8,98±0,02/ -0,23	8,97±0,03/ -0,34	9,06±0,03/ +0,70	9,03±0,03/ +0,30	8,84±0,04/ -1,8	8,88±0,03/ -1,4
	d ₁₀	9,97±0,03/ -0,30	10,010±0,015/ +0,10	9,89±0,02/ -1,1	9,850±0,016/ -1,5	9,92±0,02/ -0,8	9,90±0,02/ -1,0

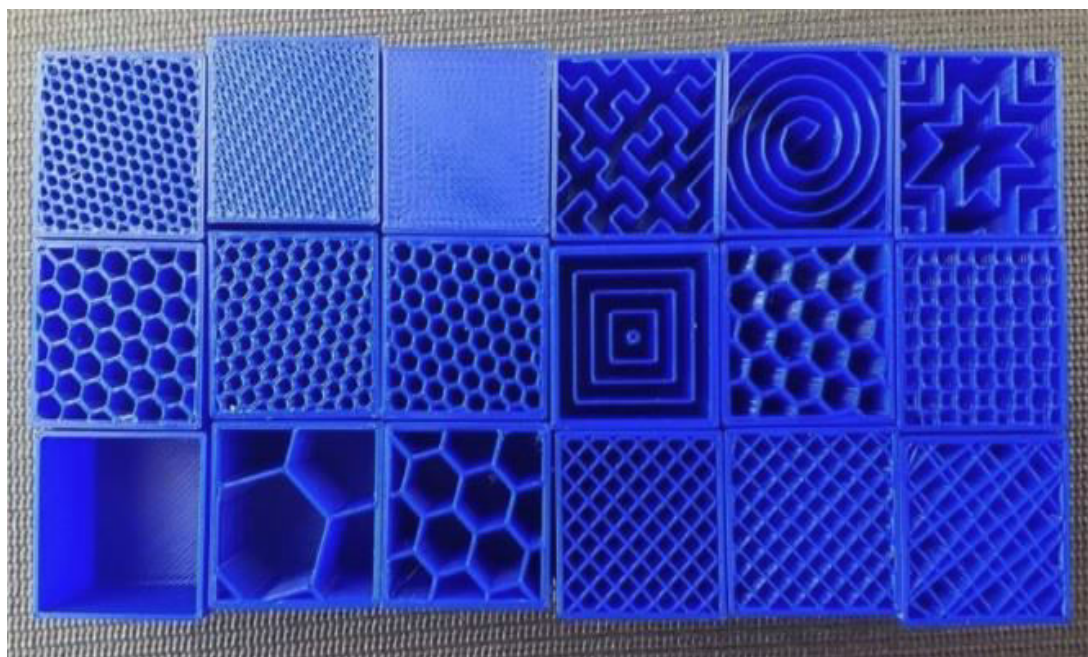
9.3 Mechanické testování

Pro posouzení vhodnosti materiálu pro konkrétní aplikaci je nutné znát jeho vlastnosti. Zejména pokud je materiál využit pro konstrukční účely. Jak již bylo uvedeno výše v kapitole o mechanických vlastnostech, rozlišujeme základní typy namáhání. V našem případě bylo zvoleno statické testování v tahu a v tříbodovém ohybu. Mnoho konstrukčních prvků je právě namáháno v ohybu (nosníky, obklady apod.) nebo tahu. Jedná se tedy o vhodné typy testování pro posouzení vhodnosti použitelnosti daného materiálu [89, 101].

V případě 3D tisku je důležité zohlednit typ výplně a procento plnění vzhledem ke konkrétní aplikaci daného výtisku. Pro každý výrobek, je nutné zvážit, pro jaký typ použití bude použit a k tomu vhodně zvolit typ a hustotu výplně. Zároveň je důležité zohlednit dobu potřebnou pro tisk, spotřebu materiálu a tím i cenu výroby. Pro názorný přehled můžeme typy výplně rozdělit do čtyř základních kategorií [101– 103]:

1. nízkopevnostní:
 - čáry
2. Středně pevné:
 - mřížka
 - trojúhelníky
 - trihexagonální
3. vysokopevnostní:
 - kubické
 - oktet
 - částečně kubický
 - gyroidní
4. flexibilní:
 - soustředné
 - kříž
 - kříž 3D

Zároveň stupeň výplně výrazně ovlivňuje výsledné vlastnosti výrobku a dobu tisku. Pro výrobky, které mají sloužit pro výrobu ukázkových prototypů či dalších nenamáhaných produktů je vhodná výplň mezi 0 až 15 %, nejběžněji se setkáváme s výplní od 15 do 50 %, kdy daný objekt je vhodný pro středně namáhané prvky a nakonec pro funkční součásti či výrobky, u kterých dochází k vysokému mechanickému namáhání, je vhodné zvolit stupeň výplně vyšší než 50 %. Jednotlivé typy výplní s různou hustotou jsou zobrazeny na nadcházejícím obrázku [101 – 103].



Obrázek 55: Typy výplní s různými stupni hustoty vnitřní sítě[102].

9.3. 1. Tahová zkouška

Během mechanického testování v tahu byl použit univerzální trhací stroj Instron 3345 (viz obrázek 56) opatřen silovým snímačem – 5kN. Za materiály pro testování byly zvoleny tři výše popsané, konkrétně se jednalo o PLA, ABS a Flexfill 98A. Tvar a velikost testovacích těles je zobrazen výše na obrázku 42.

U prvních dvou materiálů byla stanovena rychlost posuvu čelistí na 10 mm/min a počet testovacích těles byl 10. U materiálu Flexfill na základě výše uvedených vlastností byla testovací sada rozdělena na dvakrát po 5 kusech, kdy první sada byla testována při stejné rychlosti jako první dva materiály a pro porovnání byla zvolena druhá, vyšší rychlost posuvu

a to 500 mm/min. Upnutí vzorku bylo provedeno pomocí pneumatických čelistí – obrázek 57. Výsledkem měření byly tahové křivky jednotlivých materiálů při různých rychlostech posuvu čelistí spolu s určením důležitých materiálových veličin pomocí softwaru přístroje. Jednotlivé výsledky jsou součástí sekce přílohy (*P 1* až *P 4*), výsledné průměrné hodnoty měřených veličin jsou uvedeny v následující tabulce.



Obrázek 56: Trhací stroj Instron 3345.



Obrázek 57: Detail uchycení vzorku v čelistech trhacího stroje během tahové zkoušky.

materiál	rychlost posuvu čelistí [mm/min]	Youngův modul [MPa]	tahové napětí při pevnosti v tahu [MPa]	tahové napětí při porušení [MPa]	maximální zatížení [N]
ABS	10	2735 ± 30	29,2 ± 0,3	27,2 ± 0,4	291±3
PLA	10	3992 ± 79	48,9 ± 0,4	39,9 ± 1,9	489 ± 4
Flexfill 98A	10	46,2 ± 1,9	51,7 ± 0,9	51,5 ± 1,0	516 ± 9
	500	184 ± 9	30,8 ± 0,7	30,6 ± 0,7	308 ± 7

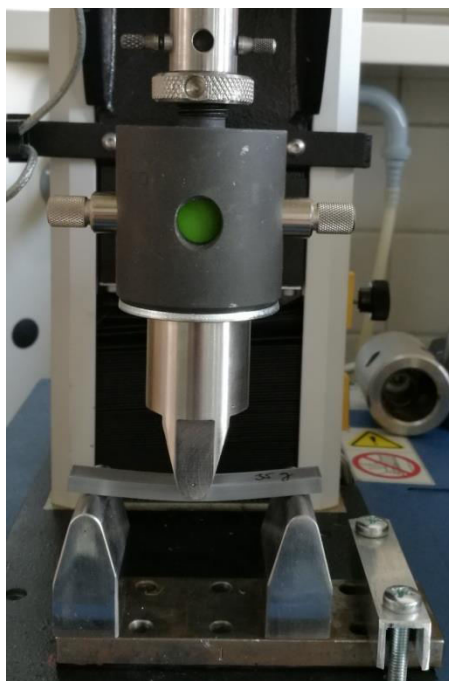
Tabulka 7: Shrnutí výsledků statické zkoušky v tahu pro zvolené materiály

9.3.2. Ohybová zkouška

Jako druhý typ namáhání byl zvolen tříbodový ohyb, který se řídí platnou normou ČSN EN ISO 178. Na jejímž základě byly navrženy a vytisknuty tělíska ve tvaru trámců (viz obr. č. 41). Testovanými materiály byly PLA a ABS. Uložení vzorku a uspořádání zkoušky je zobrazeno na nadcházejícím snímku, kdy vzdálenost podpěr činila 64 mm. Na základě výše uvedené normy byly stanoveny rychlosti posuvu pro PLA, jakožto křehký materiál 2 mm/min a pro houževnatý ABS byla zvolena testovací rychlost 5 mm/min. Testovací stroj i typ siloměru byly analogické se zkouškou v tahu.

Ohybová zkouška byla zvolena jako vhodná testovací metoda, ne tak kvůli posouzení materiálových vlastností materiálu jako takových u monolitu, ale především o zhodnocení vlivu typu a hustoty výplně na výsledné materiálové charakteristiky a diskuzi vhodného řešení pro danou aplikaci. Za účelem testování byly zvoleny dva ze čtyř výše uvedených materiálů, konkrétně se jednalo o PLA a ABS. U každého materiálu byly zvoleny tři typy výplně s různými třemi stupně plnění. Jednalo se o výplň typů čáry (lines), mřížka (grid) a kubické (cubic) a stupně plnění dosahovaly hodnot 20, 35 a 55 %. Další procesní parametry tisku se shodují s údaji uvedenými v tabulce 1.

Výsledkem měření byly křivky zachycující průběh ohybové zkoušky u jednotlivých materiálů s určením důležitých materiálových veličin pomocí softwaru přístroje. Jednotlivé výsledky jsou součástí sekce přílohy (*P 5až P 22*), výsledné průměrné hodnoty měřených veličin jsou uvedeny v následujících tabulkách. Výsledky pak rozvedeny v následující kapitole diskuze.



Obrázek 58: Detail uložení vzorku při tříbodovém ohybu.



Obrázek 59: Typy výplní (vlevo: cubic, uprostřed: grid a vpravo: lines).

Tabulka 8: Shrnutí výsledků statické zkoušky v ohybu pro PLA

typ výplně	hustota výplně [%]	Ø modul [MPa]	Ø ohybové zatížení při pevnosti v tahu [N]	Ø ohybové napětí při pevnosti v tahu [MPa]
lines	20	1314 ± 55	119 ± 3	46,7 ± 0,9
	35	1566 ± 10	137,8 ± 0,5	52,92 ± 0,19
	55	1757 ± 76	158 ± 4	61 ± 1
grid	20	1277 ± 59	114 ± 3	44 ± 1
	35	1510 ± 23	128 ± 1	49,5 ± 0,5
	55	1679 ± 18	138 ± 1	53,2 ± 0,4
cubic	20	1332 ± 69	124 ± 3	47 ± 2
	35	1623 ± 14	139 ± 1	53,7 ± 0,4
	55	1983 ± 6	165 ± 1	63,6 ± 0,3

Tabulka 9: Shrnutí výsledků statické zkoušky v ohybu pro ABS

typ výplně	hustota výplně [%]	Ø modul [MPa]	Ø ohybové zatížení při pevnosti v tahu [N]	Ø ohybové napětí při pevnosti v tahu [MPa]
lines	20	919 ± 4	106,6 ± 0,9	40,9 ± 0,3
	35	977 ± 13	114 ± 2	43 ± 1
	55	1102 ± 7	129,2 ± 0,7	49,6 ± 0,3
grid	20	925 ± 4	102,9 ± 0,8	39,5 ± 0,3
	35	991 ± 6	111 ± 2	42,9 ± 0,9
	55	1093 ± 8	121 ± 2	46,7 ± 0,5
cubic	20	948 ± 4	108,2 ± 0,4	41,6 ± 0,2
	35	1047 ± 6	118 ± 1	45,5 ± 0,4
	55	1177 ± 5	135 ± 0,8	52,0 ± 0,3

9. 4. Povrchové vlastnosti

Poslední částí pro celistvé posouzení užitečných vlastností jednotlivých výtisků byl změřen profil povrchu u všech materiálů. Za vzorek byl zvolen kvádr, viz obrázek 35, u kterého bylo pomocí profilometru Diavite DH-8 (následující obrázek) opakovaně proměřeny všechny strany vzorku (spodní část, která je v kontaktu s podložkou, boční stěna a horní stěna). Měřená délka byla pro spodní a horní stranu vzorku 5 mm a cut off 0,8 mm, pro boční stranu byla měřená délka zvolena na 1,6 mm a cut off 0,2 mm. Z výsledků byly statisticky určeny hodnoty Ra, Rt a Rq (tabulka 10) a zkonstruovány grafy zachycující tvar profilu (zahrnutí drsnosti a vlnitosti) – obrázky 61 až 78 a dále také závislosti výšky profilu vzhledem k jeho % zastoupení (obrázky 79 až 96), která zobrazuje podíl plného profilu vzhledem k výšce řezu. Následně byly jednotlivé výsledky diskutovány.

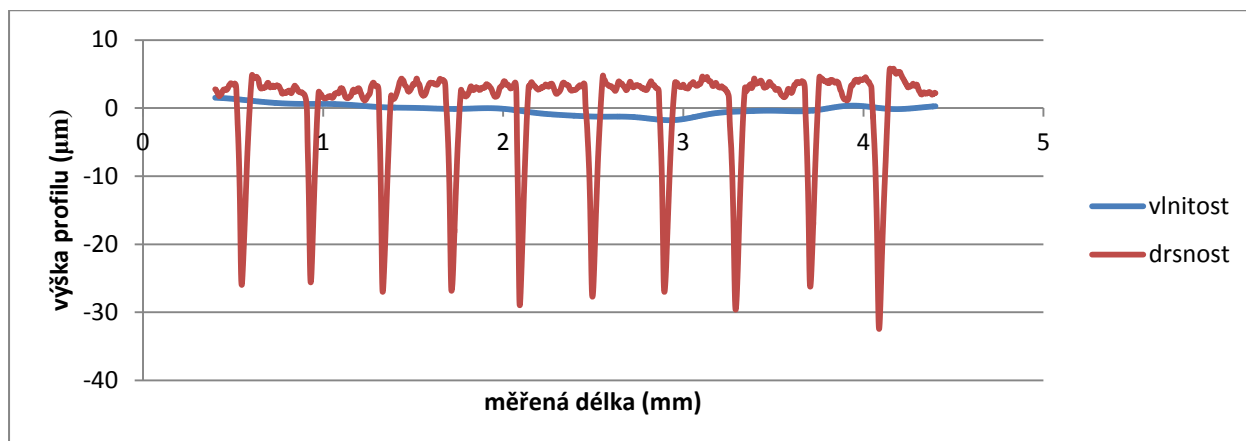


Obrázek 60: Profilometr Diavite DH-8.

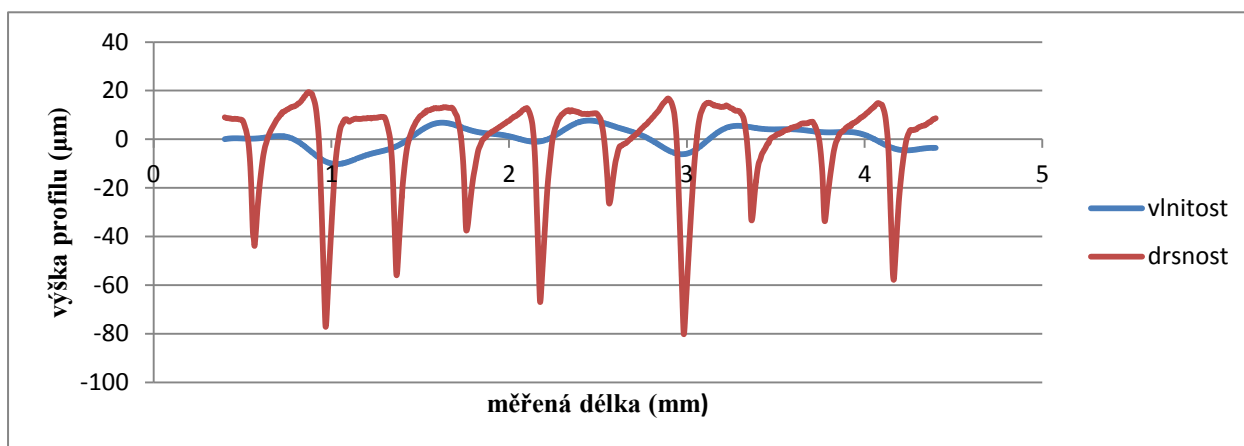
Tabulka 10: Shrnutí výsledků měření drsnosti povrchu pro dané materiály

materiál	část vzorku	Ra [μm]	Rq [μm]	Rt [μm]
PLA_lv	spodní strana	$0,998 \pm 0,002$	$9,9 \pm 0,4$	$12,25 \pm 0,15$
	horní strana	$13,3 \pm 0,9$	86 ± 3	$98,8 \pm 0,8$
	boční strana	$7,99 \pm 0,06$	39 ± 1	$42,25 \pm 1,2$
PLA_hv	spodní strana	$5,83 \pm 0,19$	$37,5 \pm 0,5$	45 ± 4
	horní strana	18 ± 2	$93,1 \pm 0,3$	109 ± 5
	boční strana	$8,13 \pm 0,08$	$31,7 \pm 1,6$	$36,3 \pm 0,9$
ABS_lv	spodní strana	$5,06 \pm 0,06$	$35,6 \pm 0,3$	$40,2 \pm 1,8$
	horní strana	$7,14 \pm 1,2$	$50,7 \pm 0,8$	75 ± 3
	boční strana	$7,91 \pm 0,12$	31 ± 1	$36,1 \pm 1,8$
ABS_hv	spodní strana	$8,9 \pm 0,7$	$67,4 \pm 0,9$	76 ± 9
	horní strana	$8,50 \pm 0,08$	$55,3 \pm 0,4$	83 ± 2
	boční strana	$8,04 \pm 0,06$	$30,5 \pm 0,7$	33 ± 1
CPE HG 100	spodní strana	$5,5 \pm 0,9$	$41,4 \pm 0,7$	48 ± 3
	horní strana	$3,750 \pm 0,010$	$29,4 \pm 0,9$	$39,9 \pm 0,9$
	boční strana	$7,87 \pm 0,15$	$38,9 \pm 1,2$	44 ± 2
PETG	spodní strana	$3,7 \pm 0,4$	$19,3 \pm 0,2$	24 ± 2
	horní strana	$1,21 \pm 0,07$	$6,78 \pm 0,08$	$9,7 \pm 0,5$
	boční strana	$8,17 \pm 0,17$	$34,3 \pm 0,9$	$37,5 \pm 1,5$

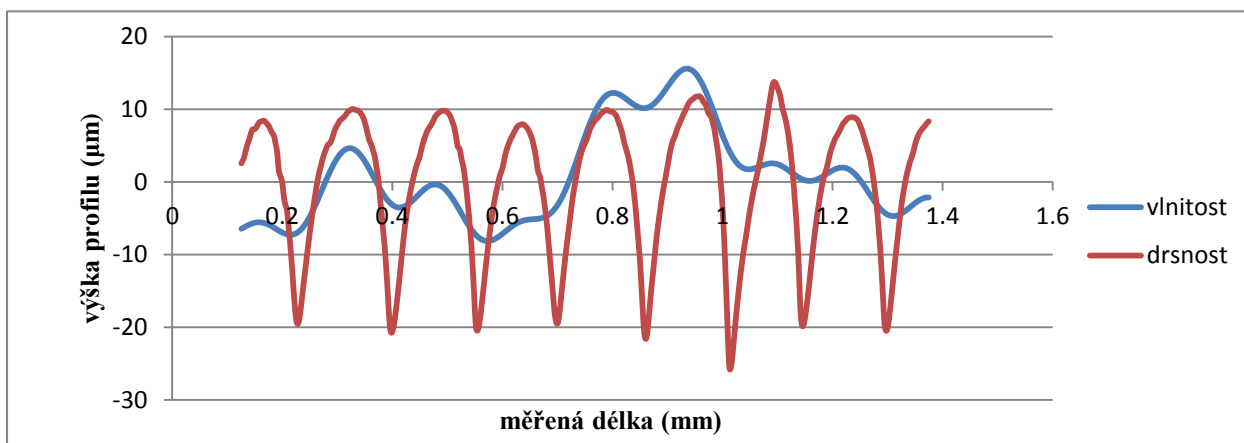
Pozn.: Označení vzorku *lv* značí tisk s nižší rychlostí a naopak vzorek s označením *hv* naopak tisku s vyšší rychlostí viz uvedené výše.



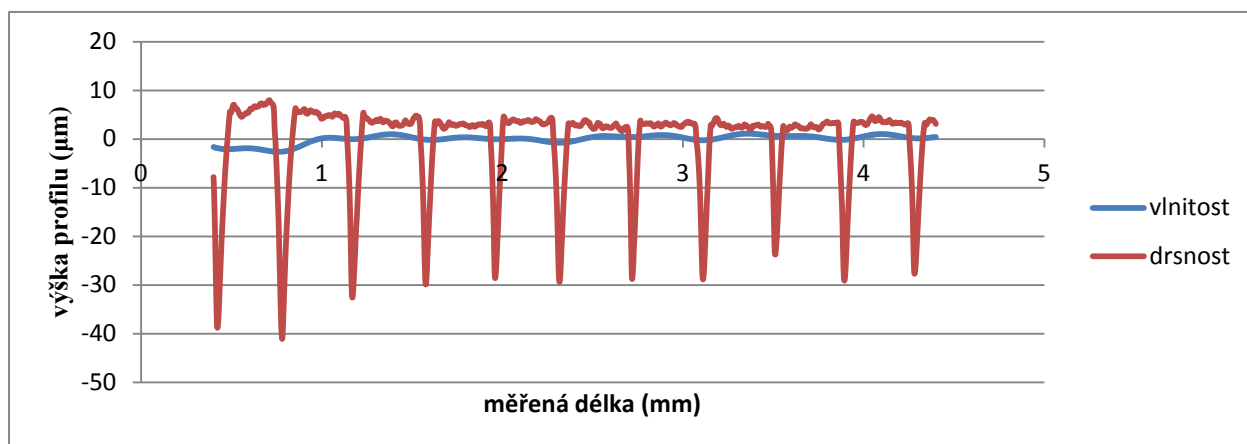
Obrázek 61: Graf závislosti zachycující průběh drsnosti a vlnitosti na měřené délce u spodní strany vzorku PLA_lv.



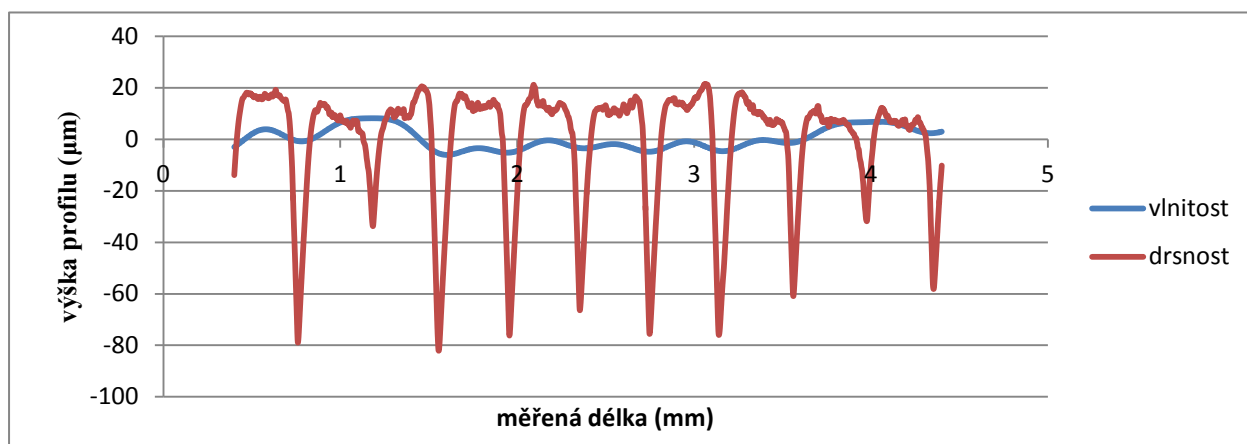
Obrázek 62: Graf závislosti zachycující průběh drsnosti a vlnitosti na měřené délce u horní strany vzorku PLA_lv.



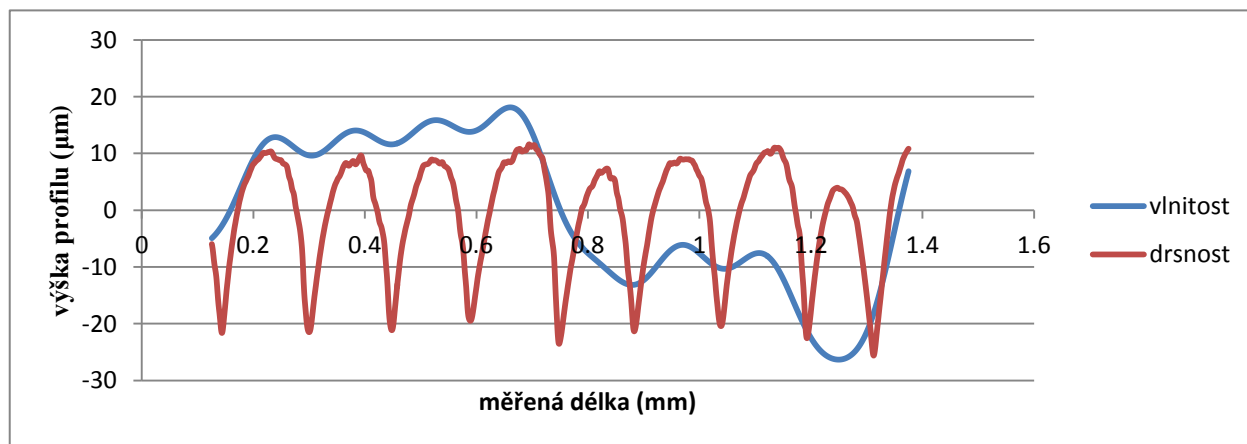
Obrázek 63: Graf závislosti zachycující průběh drsnosti a vlnitosti na měřené délce u boční strany vzorku PLA_lv.



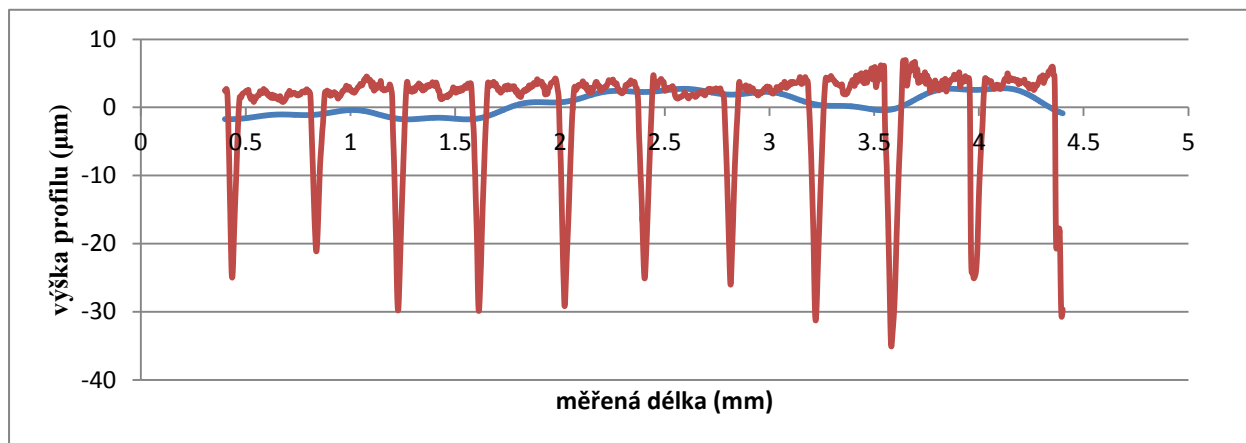
Obrázek 64: Graf závislosti zachycující průběh drsnosti a vlnitosti na měřené délce u spodní strany vzorku PLA_{hv}.



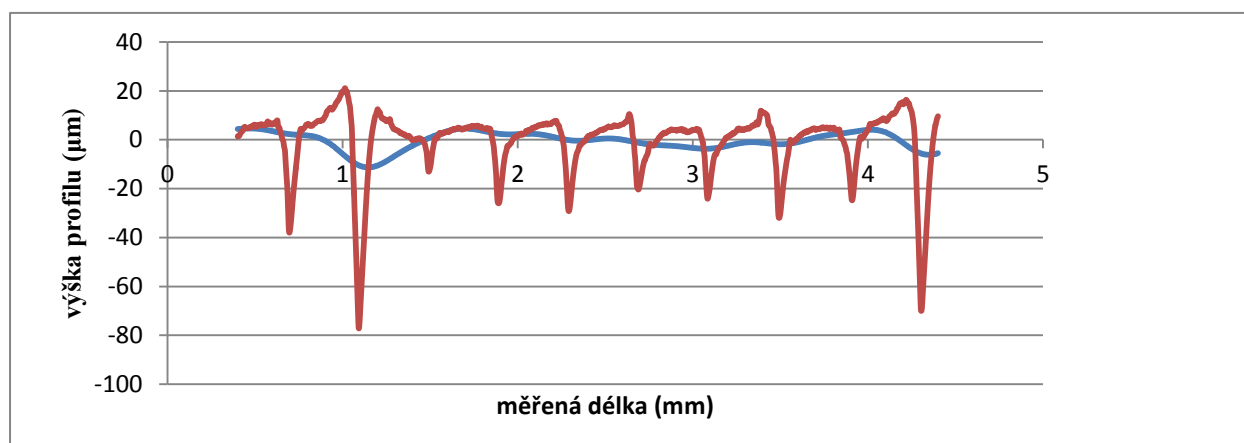
Obrázek 65: Graf závislosti zachycující průběh drsnosti a vlnitosti na měřené délce u horní strany vzorku PLA_{hv}.



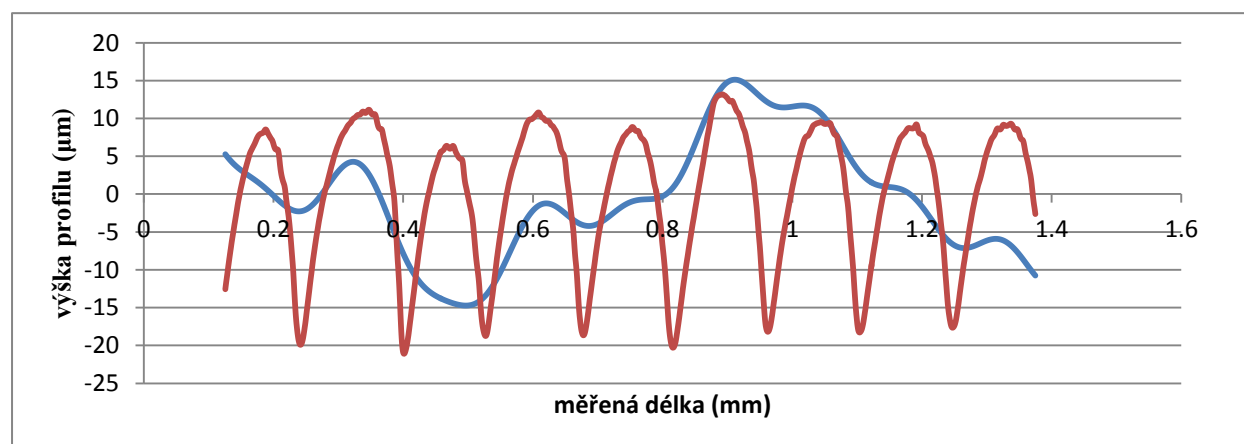
Obrázek 66: Graf závislosti zachycující průběh drsnosti a vlnitosti na měřené délce u boční strany vzorku PLA_{hv}.



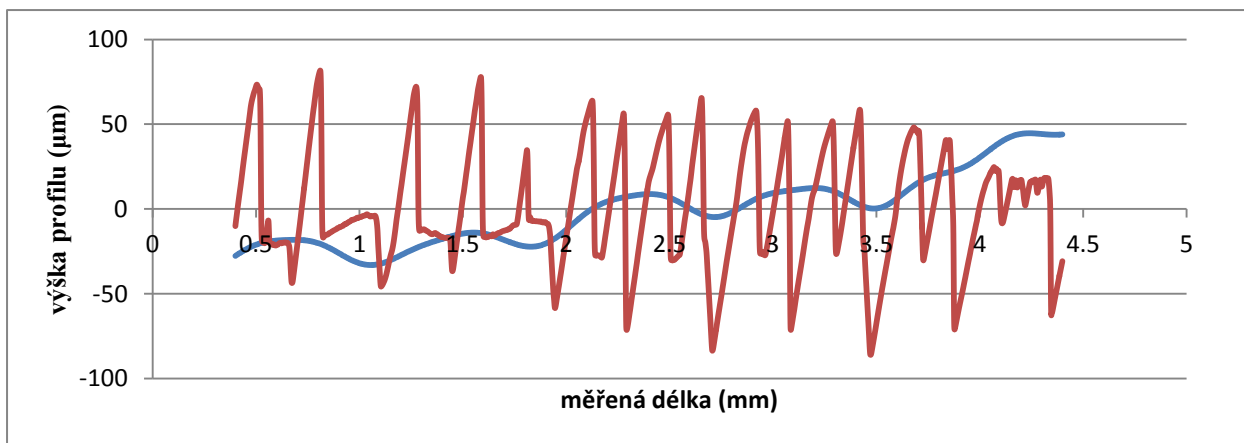
Obrázek 67: Graf závislosti zachycující průběh drsnosti a vlnitosti na měřené délce u spodní strany vzorku ABS_lv.



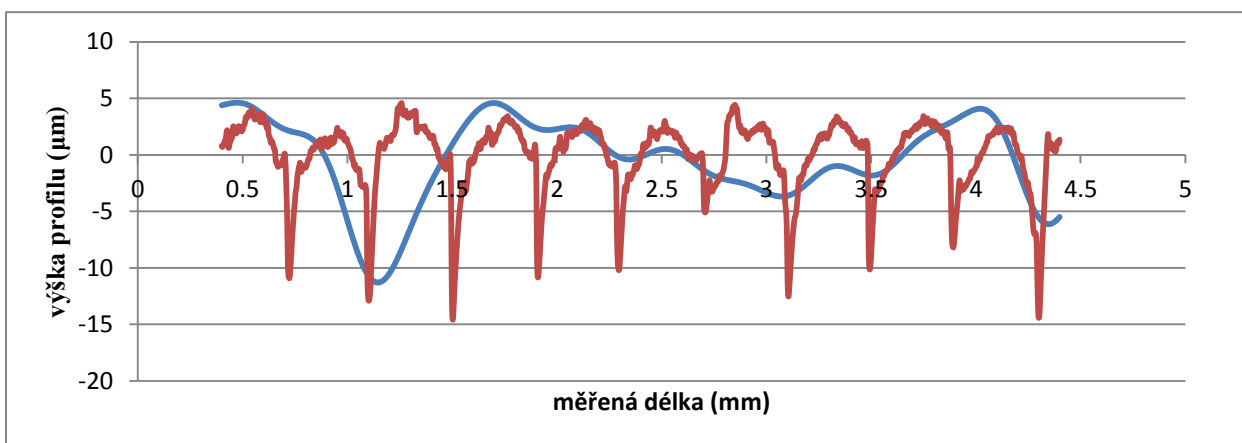
Obrázek 68: Graf závislosti zachycující průběh drsnosti a vlnitosti na měřené délce u horní strany vzorku ABS_lv.



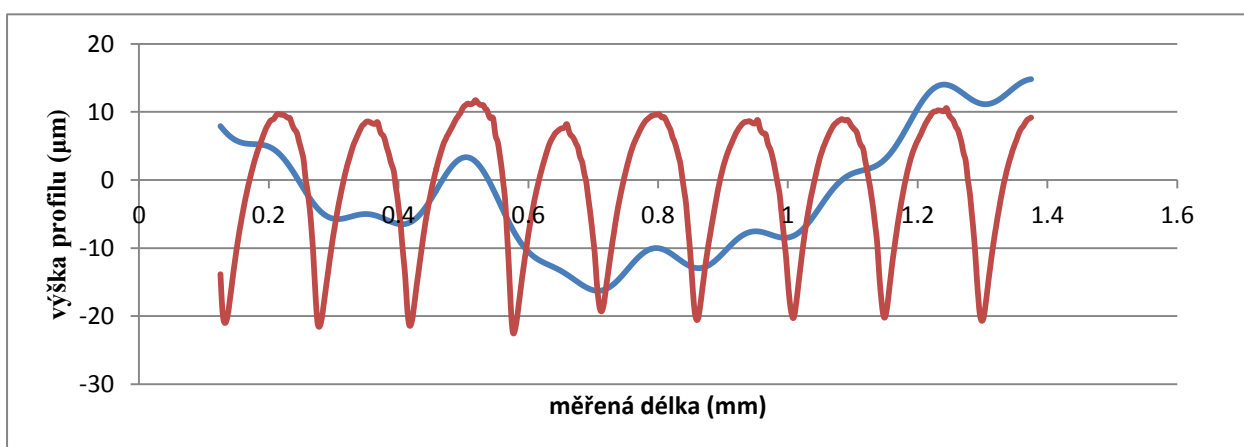
Obrázek 69: Graf závislosti zachycující průběh drsnosti a vlnitosti na měřené délce u boční strany vzorku ABS_lv.



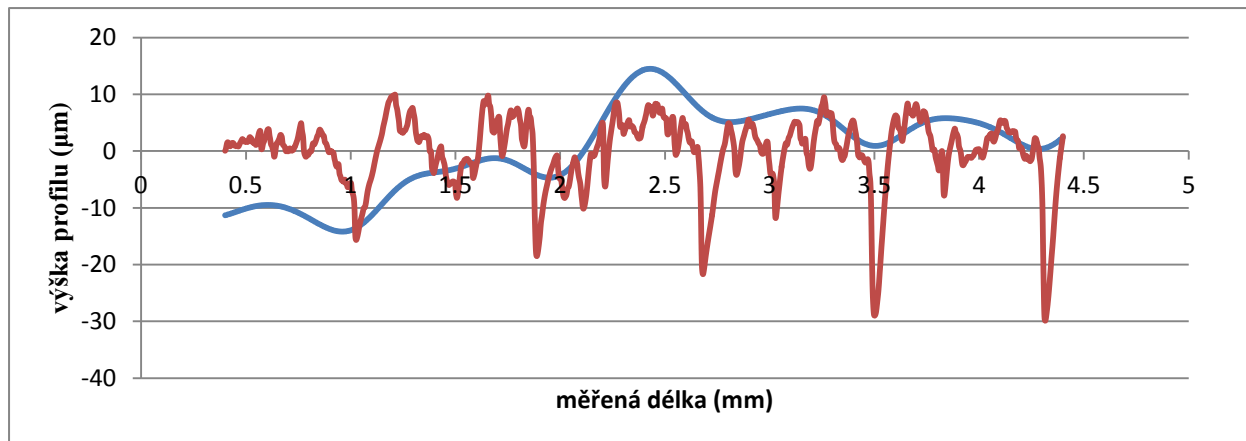
Obrázek 70: Graf závislosti zachycující průběh drsnosti a vlnitosti na měřené délce u spodní strany vzorku ABS_hv.



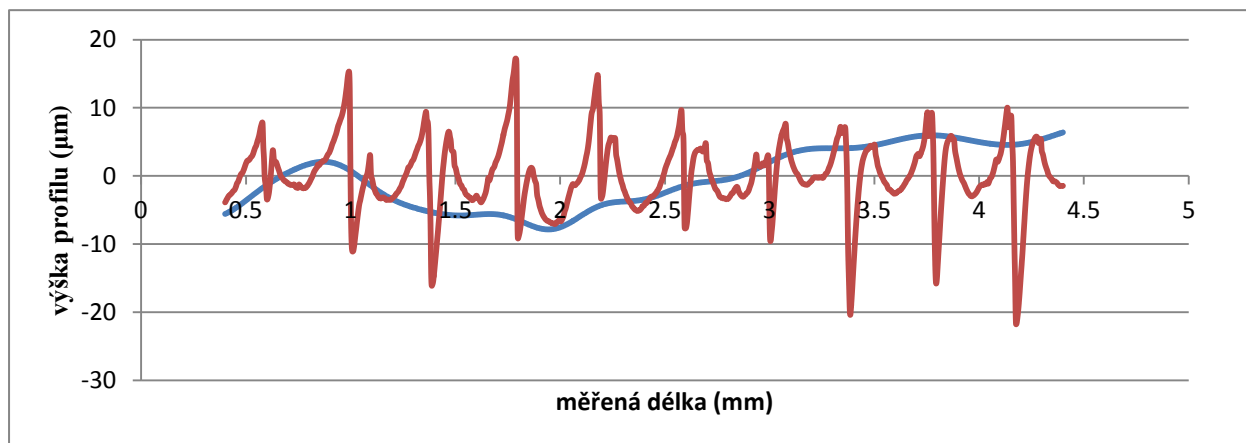
Obrázek 71: Graf závislosti zachycující průběh drsnosti a vlnitosti na měřené délce u horní strany vzorku ABS_hv.



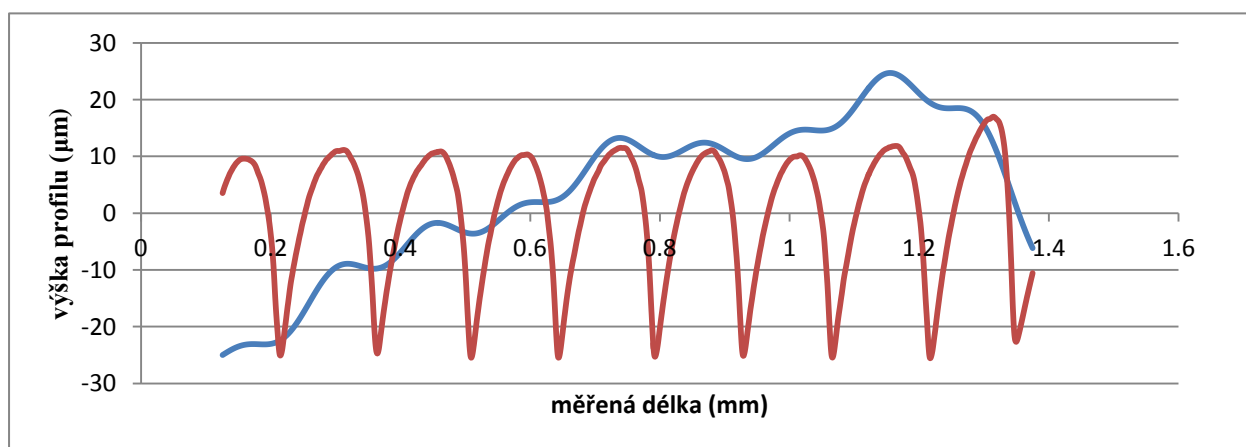
Obrázek 72: Graf závislosti zachycující průběh drsnosti a vlnitosti na měřené délce u boční strany vzorku ABS_hv.



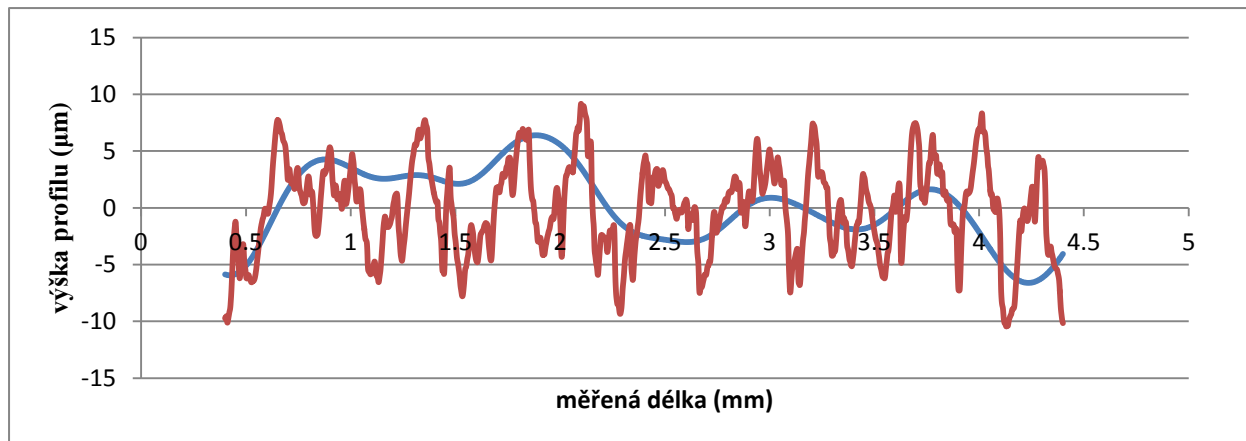
Obrázek 73: Graf závislosti zachycující průběh drsnosti a vlnitosti na měřené délce u spodní strany vzorku CPE HG 100.



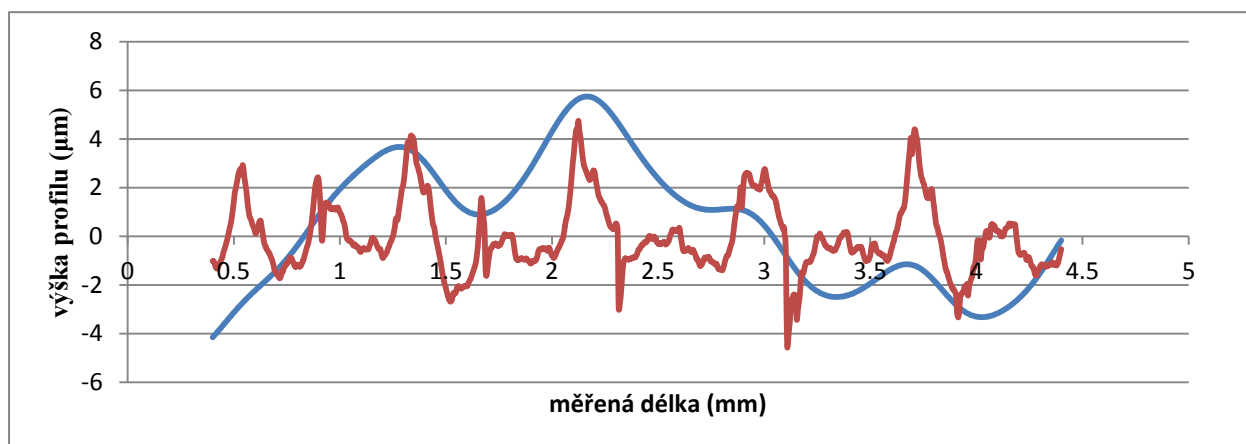
Obrázek 74: Graf závislosti zachycující průběh drsnosti a vlnitosti na měřené délce u horní strany vzorku CPE HG 100.



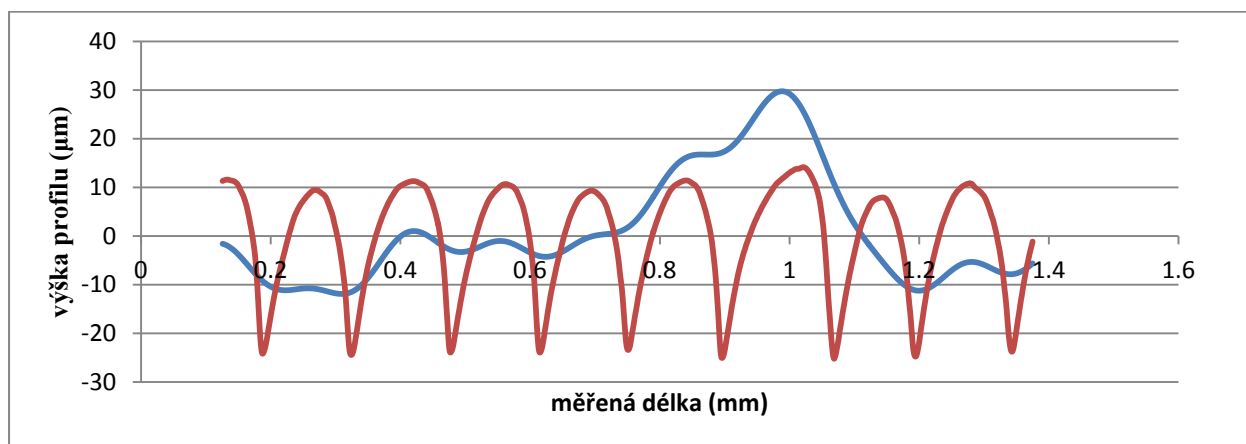
Obrázek 75: Graf závislosti zachycující průběh drsnosti a vlnitosti na měřené délce u boční strany vzorku CPE HG 100.



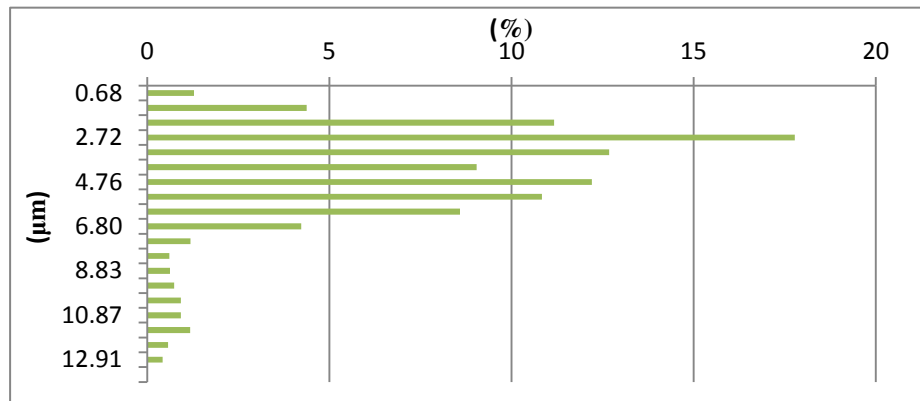
Obrázek 76: Graf závislosti zachycující průběh drsnosti a vlnitosti na měřené délce u spodní strany vzorku PETG.



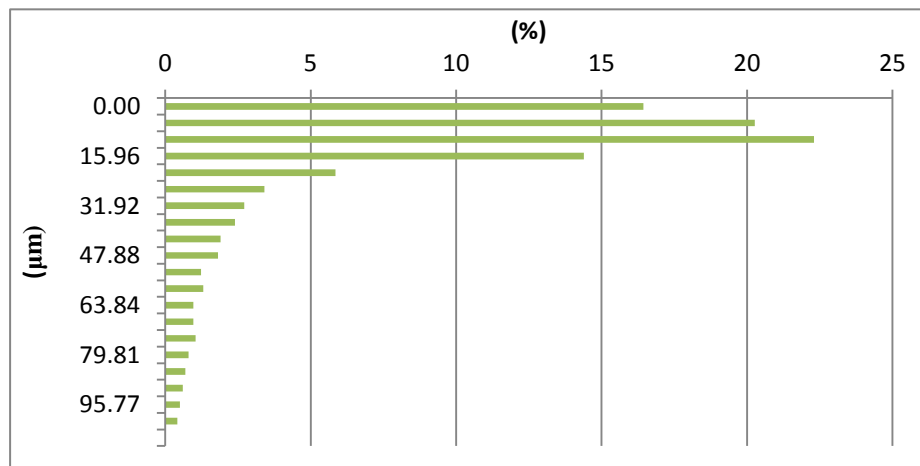
Obrázek 77: Graf závislosti zachycující průběh drsnosti a vlnitosti na měřené délce u horní strany vzorku PETG.



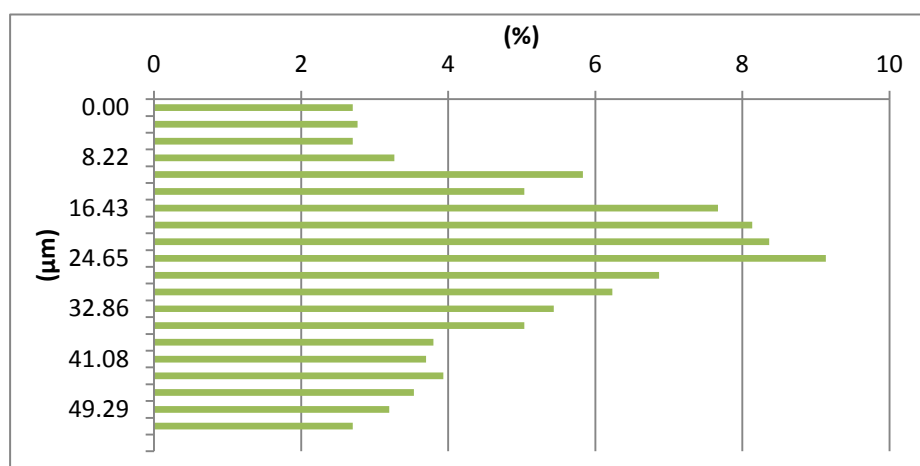
Obrázek 78: Graf závislosti zachycující průběh drsnosti a vlnitosti na měřené délce u boční strany vzorku PETG.



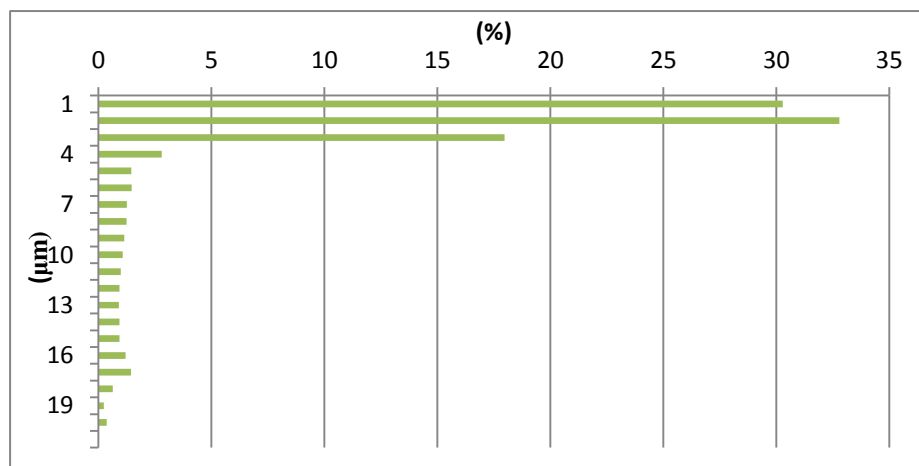
Obrázek 79: Graf výšky profilu vzhledem k jeho % zastoupení pro spodní část vzorku PLA_iv.



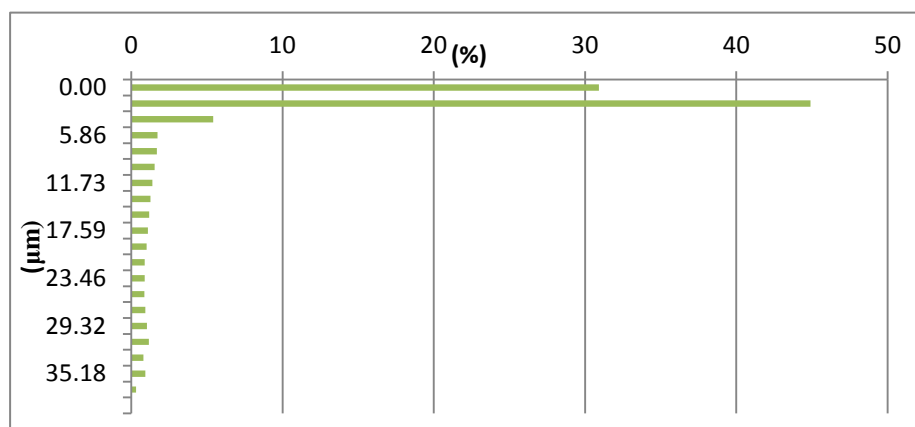
Obrázek 80: výšky profilu vzhledem k jeho % zastoupení pro horní část vzorku PLA_iv.



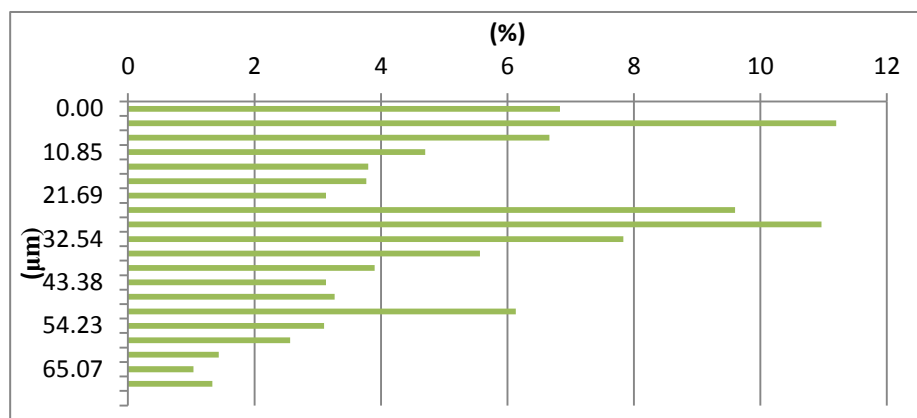
Obrázek 81: Graf výšky profilu vzhledem k jeho % zastoupení pro boční část vzorku PLA_iv.



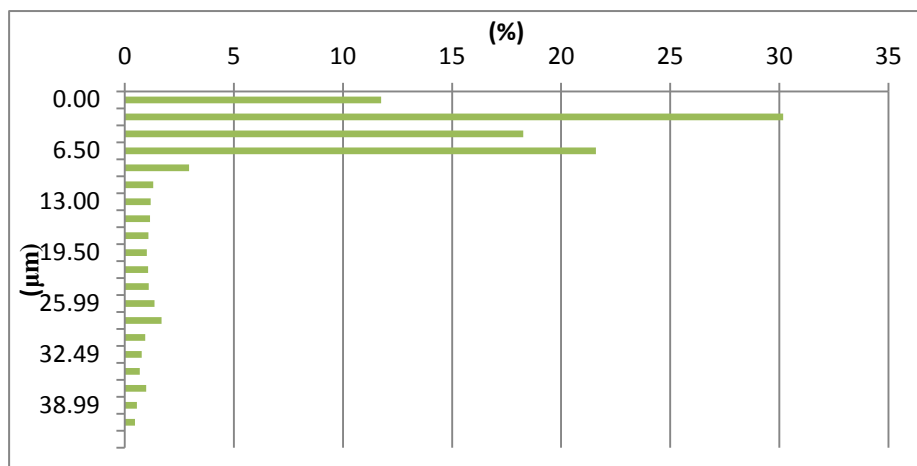
Obrázek 82: Graf výšky profilu vzhledem k jeho % zastoupení pro spodní část vzorku PLA_hv.



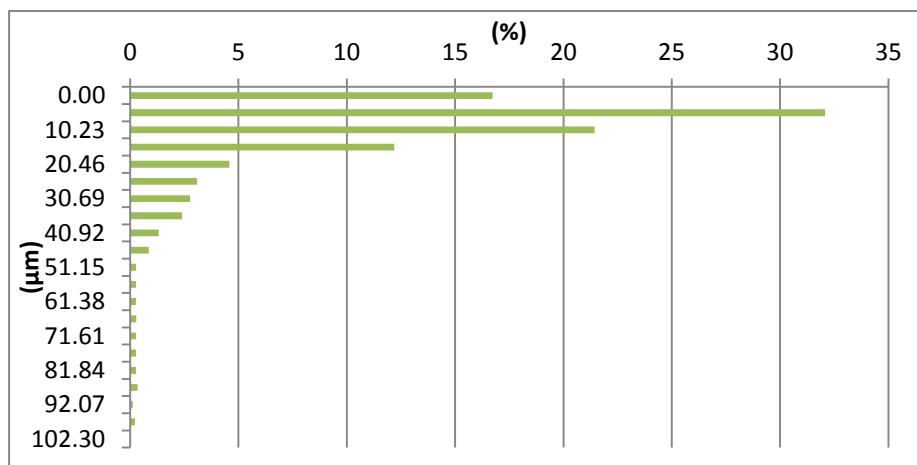
Obrázek 83: Graf výšky profilu vzhledem k jeho % zastoupení pro horní část vzorku PLA_hv.



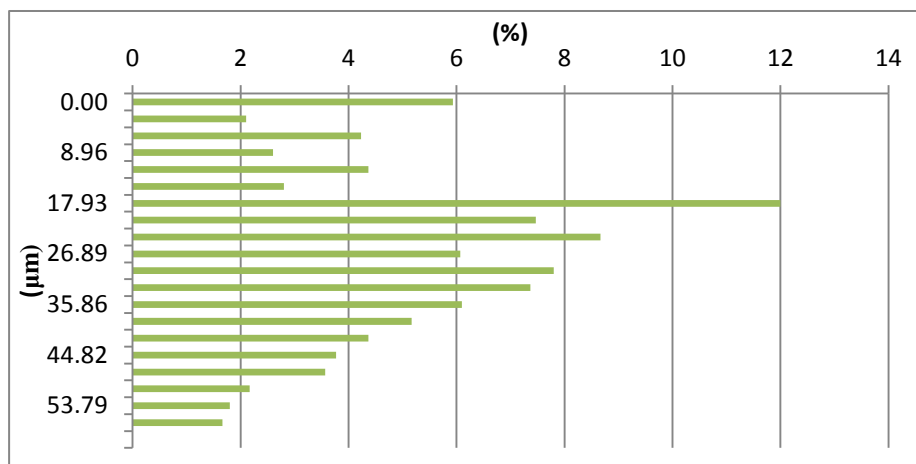
Obrázek 84: Graf výšky profilu vzhledem k jeho % zastoupení pro boční část vzorku PLA_hv.



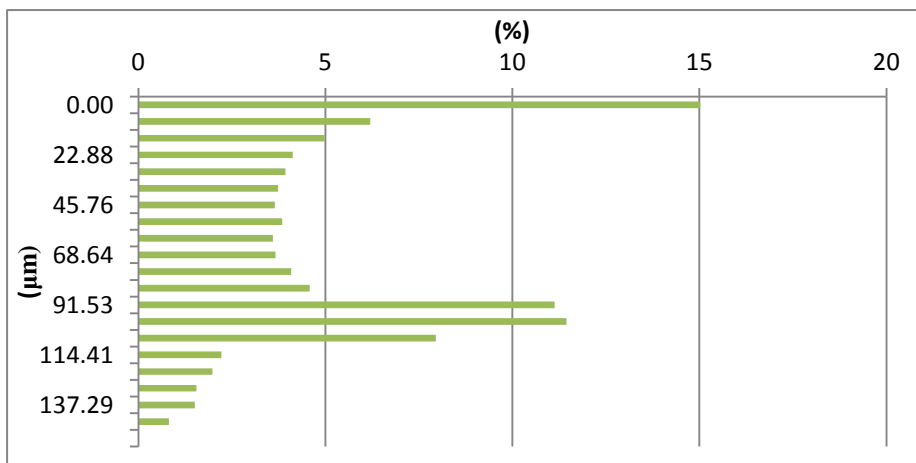
Obrázek 85: Graf výšky profilu vzhledem k jeho % zastoupení pro spodní část vzorku ABS_iv.



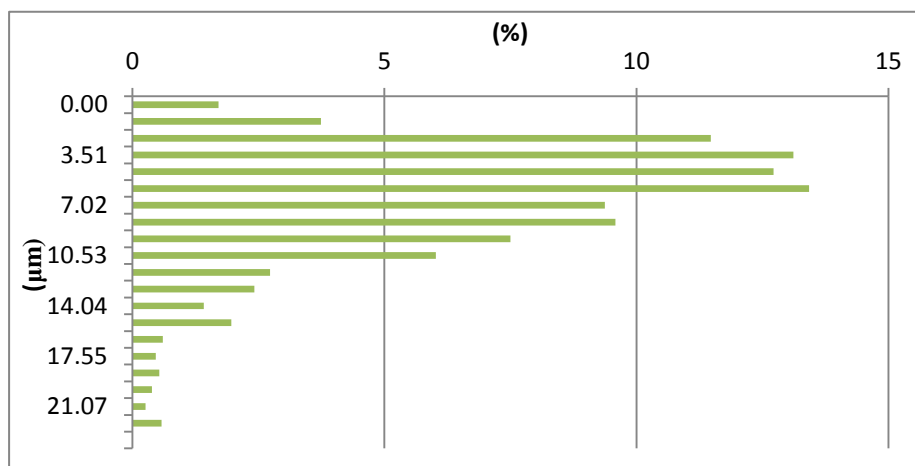
Obrázek 86: Graf výšky profilu vzhledem k jeho % zastoupení pro horní část vzorku ABS_iv.



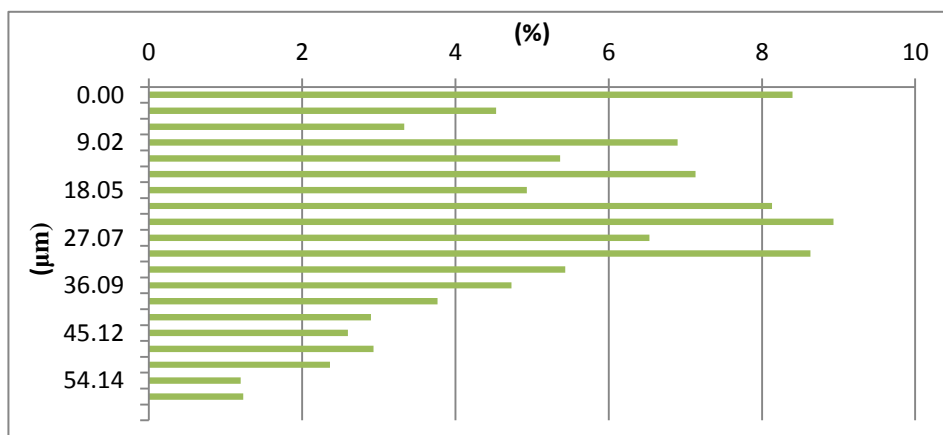
Obrázek 87: Graf výšky profilu vzhledem k jeho % zastoupení pro boční část vzorku ABS_iv.



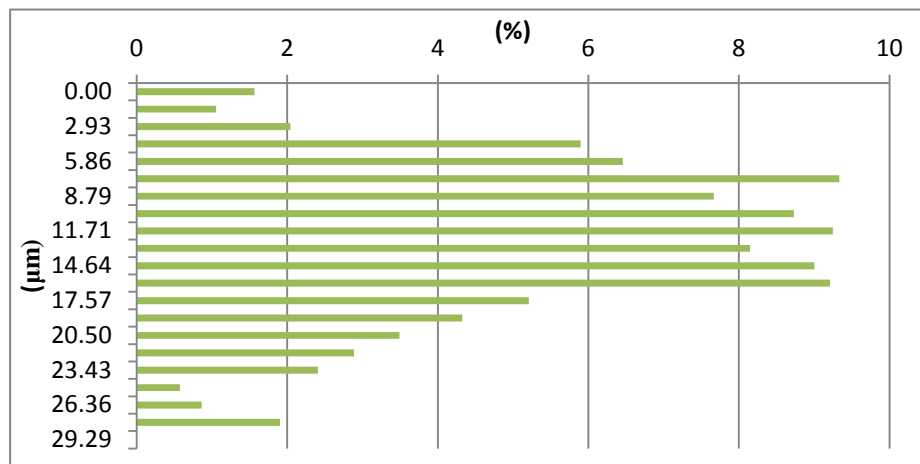
Obrázek 88: Graf výšky profilu vzhledem k jeho % zastoupení pro spodní část vzorku ABS_hv.



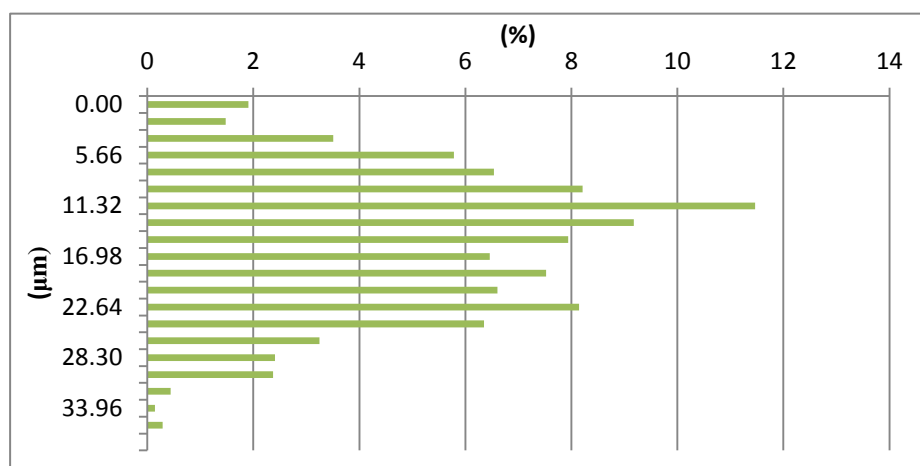
Obrázek 89: Graf výšky profilu vzhledem k jeho % zastoupení pro horní část vzorku ABS_hv.



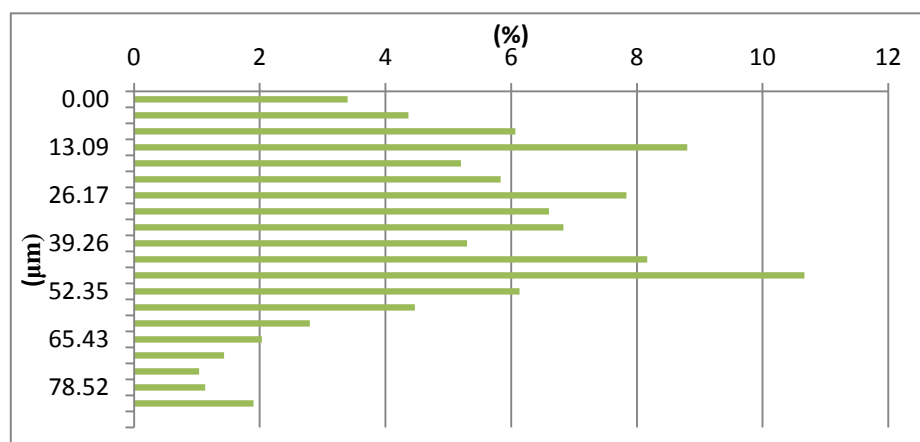
Obrázek 90: Graf výšky profilu vzhledem k jeho % zastoupení pro boční část vzorku ABS_hv.



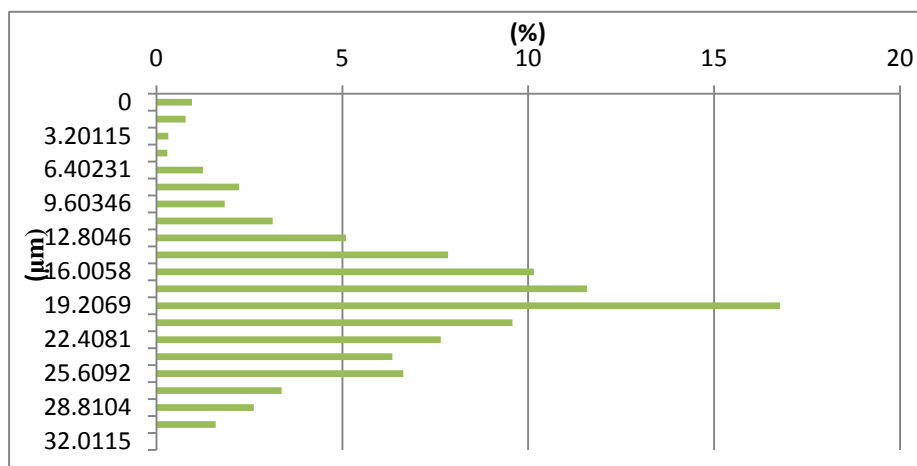
Obrázek 91: Graf výšky profilu vzhledem k jeho % zastoupení pro spodní část vzorku CPE HG 100.



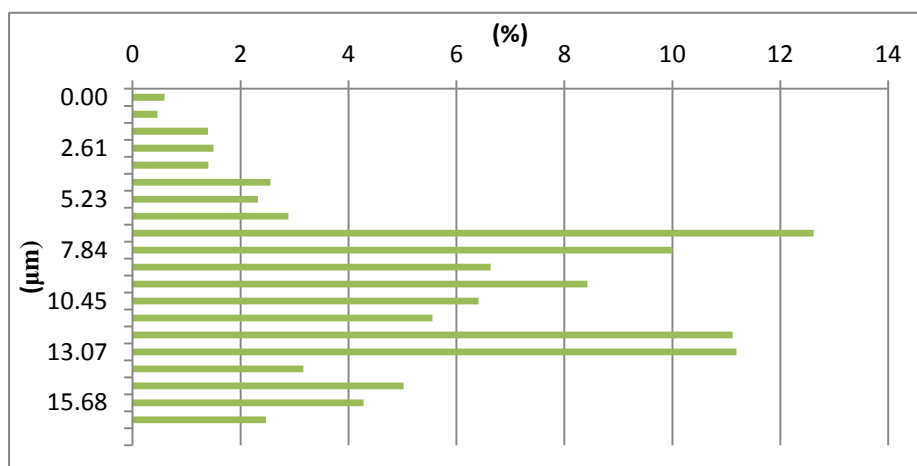
Obrázek 92: Graf výšky profilu vzhledem k jeho % zastoupení pro horní část vzorku CPE HG 100.



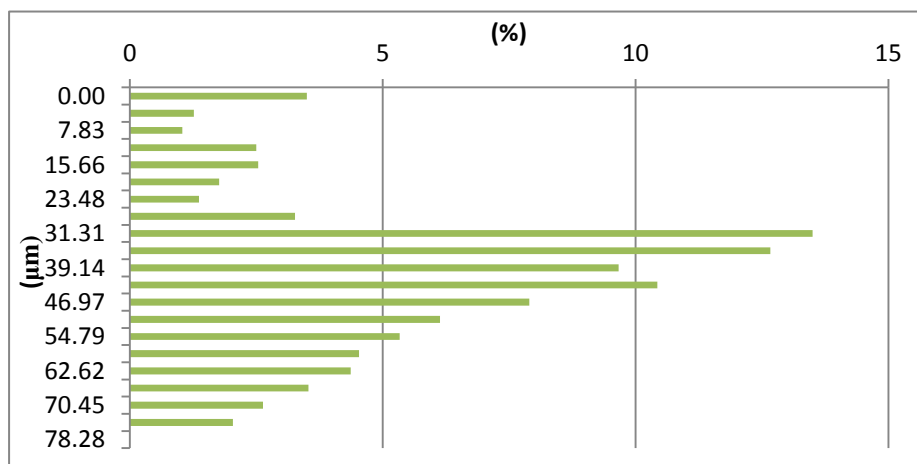
Obrázek 93: Graf výšky profilu vzhledem k jeho % zastoupení pro boční část vzorku CPE HG 100.



Obrázek 94: Graf výšky profilu vzhledem k jeho % zastoupení pro spodní část vzorku PETG.



Obrázek 95: Graf výšky profilu vzhledem k jeho % zastoupení pro horní část vzorku PETG.



Obrázek 96: Graf výšky profilu vzhledem k jeho % zastoupení pro boční část vzorku PETG

10. DISKUZE

Základním pilířem diplomové práce se stalo seznámení se s 3D tiskárnou pracující na principu technologie FDM. Pro splnění tohoto zadání bylo nutné nejen nastudovat potřebnou literaturu, ale zároveň zkusit individuálně nastavit parametry tisku pro každý materiál zvlášť. Pro tento účel byly vybrány materiály od společnosti Fillamentum Manufacturing Czech s. r. o. a jednalo se o PLA, ABS, CPE HG 100 a PETG, které byly již dříve popsány. Výsledkem kombinace obou zmíněných faktorů je tabulka 1 shrnující základní podmínky tisku pro dané materiály. Důležité bylo vždy zhodnotit, o jaký typ materiálu se jedná z hlediska tokových a mechanických vlastností a posoudit jakou teplotu trysky a podložky nastavit. U materiálů, které vykazují dobré tokové vlastnosti i při nižších teplotách (210 °C) a u kterých zároveň nedochází vlivem chladnutí jednotlivých vrstev k rozměrovým změnám je tisk takového materiálu výrazně jednodušší, typickým zástupcem je PLA. Na druhé straně stojí naopak materiály, u nichž je nutné pro tisk nastavit vyšší teploty trysky a zároveň i díky svým mechanickým vlastnostem i teplotu podložky, do této skupiny patří ABS, pro který je typické výrazná změna rozměru během procesu chlazení, proto je vhodné dostatečně temperovat podložku, tak aby během tisku nedošlo během nanášení jednotlivých vrstev ke kontrakci a tím i možnému vzniku zmetku. Zbylé dva použité materiály můžeme zařadit do skupiny spíše hůře tisknutelných materiálů, ovšem svými mechanickými vlastnostmi a to jak flexibilitou typickou pro CPE HG 100 a Flexfill 98 A a odolností vůči mechanickému opotřebení, což je výhodou PETG si zaslouží tyto materiály testovat a využívat pro široké spektrum aplikací. U ABS a PETG je rovněž důležité během tisku náročnějších prvků, jako jsou převisy nastavit dodatečné chlazení trysky, aby materiál, který je při vysoké teplotě (okolo 250 °C) vytlačován měl čas ztuhnout do doby nanášení další vrstvy. Materiál PETG je typický svou vláknovitostí na což je důležité pamatovat a zabránit tak nežádoucímu jevu tzv. stringování vyšší hodnotou retrakční vzdálenosti místo běžných 2 mm na hodnotu 6 mm. U materiálu Flexfill 98 A díky již své výše uvedené flexibilitě a houževnatosti je důležité dostatečně povolit přítláčné šrouby extrudéru, aby byl materiál vhodně dodáván do vytlačovacího zařízení a nedocházelo ke vzniku hromadění struny před extrudérem. Po otestování a nastavení vhodných procesních podmínek následoval 3D návrh geometrických těles, která byla

rozměrově přesná, a zda kvalita tisku je dostatečná pro vlastní využití. K tomu navíc bylo u materiálu PLA a ABS testováno, zda se rychlost tisku projeví na užitných vlastnostech výtisku. Jako metoda vyhodnocení byla zvolena rozměrová analýza, kdy po jejím zpracování lze jasně říci, zda výsledek odpovídá zadání. Pokud si projdeme výsledky, pro jednotlivé typy navrhnutých těles zjistíme, že ani jeden měřený rozměr zcela neodpovídá rozměrům návrhu. Tento fakt je způsobem jednak samotnou technologií, která nedokáže tisknout části s pravoúhlou přesností nýbrž vždy pod určitým zakřivením. Navíc se uplatňují mechanicko-fyzikální pochody u jednotlivých materiálů během procesu chlazení, kdy materiál zaujímá těsnější uspořádání a tím i zmenšuje své rozměry. U vzorků tisknutých odlišnou rychlostí nelze pomocí rozměrové analýzy jasně rozhodnout, jestli nižší či vyšší rychlost znamená větší rozměrovou přesnost. U převzatého návrhu kombinující jednodušší i komplikovanější prvky spolu s převisy apod. bylo vizuálně sledováno, jak se projeví tisk takového návrhu. Lze říci, že v případě PLA, ABS a CPE HG 100 proběhl tisk na podobné úrovni. U tisku převisů pod zvyšujícím se úhlem bylo patrné, že u nejvyšších naklonění bylo nastaveno nedostačující chlazení trysky a tím tisknutý materiál nestihnul přejít do pevného stavu. U výtisku z PETG se i díky vyšší retrakční vzdálenosti projevilo stringování. Stringování je jev při kterém dochází k tahání tenkých vláken za tryskou během přejezdu. Následku tohoto jevu lze odstranit díky krátkému působení teplého vzduchu např. pomocí horkovzdušné pistole. Pro dosažení ideálního výtisku by bylo nutné upravit převzatý model, doplněním tisku podpěr v místech převisů po případně upravení teplot trysky či stupně chlazení vzhledem k jednotlivým typům prvků.

Významná část experimentální části této diplomové práce se věnovala mechanickému testování vytisknutých těles pomocí 3D tisku. Pro tyto účely byly zkonstruovány modely zkušebních těles dle příslušných norem. Pro tahovou zkoušku byly zvoleny tři materiály, které zastupují základní typy materiálů: PLA – křehký a tvrdý, ABS – houževnatý a Flexfill 98 A – vysoká elasticita a vratná deformace. Naměřené výsledky jednotlivých veličin byly statisticky zpracovány a uvedeny v tabulce 7. Pokud se podíváme na jednotlivé výsledky podrobně a srovnáme je s mezi sebou, lze konstatovat, že nejvyšší pevnosti a tedy i tuhosti dosahuje PLA, poté následuje ABS a naopak nejnižší pevnost vykazuje Flexfill 98A. Zároveň bylo potvrzeno, že s rostoucí rychlostí zatěžování roste i Youngův modul spolu s dalšími měřenými veličinami. V rámci technické praxi je velmi důležité znát výsledky mechanického testování, jelikož je to jediný kvalitativní přístup pro

posouzení vhodnosti materiálu pro danou aplikaci, zejména v případě konstrukčního využití. Druhým typem namáhání bylo zvoleno statické namáhání v třibodovém ohybu. Cílem je přinést odpověď na otázku jakým způsobem se stupeň plnění a druh výplně promítá do mechanických vlastností. Na základě literatury byly vybrány tři typy výplní, vždy reprezentující jednu skupinu dle vhodnosti stupně namáhání. A tři stupně hustoty výplně opět na základě doporučení jak je uvedeno v úvodu předchozí kapitoly. Na základě výsledků, které jsou shrnuty v tabulce 8 pro PLA a tabulce 9 pro ABS, lze vyslovit následující závěr. U obou materiálů bylo potvrzeno, že s rostoucí hodnotou stupně plnění dochází ke zvyšování mechanických vlastností přímo úměrně. U posouzení typu výplně, bylo zjištěno, že nejlepších výsledků je dosaženo u výplně typu cubic, což je v souladu s referencí, druhou nejlepší je typ výplně lines a naopak nejhorších výsledků bylo určeno u výplně grid. Tento závěr je v rozporu s očekáváním, ovšem je nutné podotknout, že je možné, že při odlišném typu namáhání by mohl být výsledek jiný.

Poslední úkolem bylo posouzení kvality povrchu na základě pomoci profilometru. Výsledkem měření byly grafy závislosti výšky profilu na měřené délce, které zobrazují průběh drsnosti a vlnitosti vzorku, dále byly sestrojeny křivky výšky profilu vzhledem k jeho % zastoupení a určeny veličiny, které kvantitativně popisují stav povrch. Jednotlivé výsledky jsou uvedeny v kapitole 10. Pokud se pokusíme popsat a shrnout naměřené hodnoty či sestrojené grafy musíme zohlednit několik aspektů. Jednak u spodní strany vzorku, která byla v kontaktu s tiskovou podložkou a vlivem tlakového působení, byla přitlačena na velmi rovný povrch je nutné vzít tento aspekt v potaz při diskuzi výsledků. Tento jev byl i následně potvrzen jednotlivým proměřováním daných ploch, kdy výsledné hodnoty všech měřených veličin jsou výrazně nižší než v případě strany horní. V případě PETG a CPE HG100 bylo navíc na tiskovou podložku umístěna papírová lepicí páska pro zvýšení adheze výtisku, což opět ovlivnilo naměřené výsledky u spodní strany. Drsnost u PLA a ABS, které byly tisknuty přímo na speciální podložku potaženou PEI, jsou výsledky drsnosti nižší než u předchozích dvou zmíněných, kde se projevil profil povrchu lepicí pásky. U výsledků týkajících se boční strany výtisku, je patrná velká shoda, což je způsobeno stejnými parametry tisku (konkrétně v tomto případě výšky jednotlivé vrstvy) a tudíž, by bylo možné i tyto výsledky využít k hrubšímu posouzení výšky vrstvy u neznámých vzorků. Posledním aspektem, který stojí za zmínku je vliv rychlosti tisku u materiálů ABS a PLA, kde bylo prokázáno, že s nižší rychlostí tisku roste kvalita povrchu. Ovšem na úkor doby tisku a tedy i ceny. Tudíž je nutné v rámci praxe konkrétní posouzení situace a následně i nastavení parametrů tisku pro dosažení požadovaného cíle.

11. ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývala popisem aditivní technologie a ohledem na její přednosti či nedostatky vzhledem ke konvenčním technologiím. Klasifikovala a popsala základní metody 3D tisku s aspektem na použití jednotlivých materiálů a uvedla některé z mnoha způsobu využití. V rámci experimentální části byly popsány vhodné procesní parametry tisku zvolených materiálů u použité tiskárny pracující pomocí technologie FDM a posouzeny fyzikální vlastnosti daných výtisků. Experimentální výsledky lze v budoucnosti použít při 3D tisku konkrétních konstrukčních dílců, s ohledem na optimalizaci výsledných vlastností výrobku. U konceptů to bude zjevně rychlost tisku, u zatěžovaných částí mechanické vlastnosti, u spotřebního zboží například kvalita povrchu. Výsledky také mohou napovědět, s jakými potížemi se bude konstruktér potýkat při tisku různých druhů materiálů – vyšší smrštění u ABS, tvorba vláken u PETG, blokování filamentu v extrudéru u flexibilních materiálů.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] LIGON, Samuel Clark et al., 2017. Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing. *Chemical Reviews*. **117**(15), 10212-10290. DOI: 10.1021/acs.chemrev.7b00074. ISSN 0009-2665.
- [2] ZHAI, Yuwei, Diana A. LADOS a Jane L. LAGOY, 2014. Additive Manufacturing: Making Imagination the Major Limitation. *JOM*. **66**(5), 808-816. DOI: 10.1007/s11837-014-0886-2. ISSN 1047-4838.
- [3] GAO, Wei et al., 2015. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design*. **69**, 65-89. DOI: 10.1016/j.cad.2015.04.001. ISSN 00104485.
- [4] Gebhardt, A. Rapid Tooling. Der Schnelle Weg Zum Spritzgießwerkzeug. *Kunststoffe* 1998, 88, 1992–2000.
- [5] ISLAS RUIZ DDS, Ma. del Socorro et al., 2015. Fundamentals of Stereolithography, an Useful Tool for Diagnosis in Dentistry. *Odovtos - International Journal of Dental Sciences* [online]. **17**(2), 15-21 [cit. 2019-04-14]. DOI: 10.15517/ijds.v17i2.20730. ISSN 2215-3411. Dostupné z: <http://revistas.ucr.ac.cr/index.php/Odontos/article/view/20730>
- [6] HOFMANN, Manfred et al., 2014. 3D Printing Gets a Boost and Opportunities with Polymer Materials. *ACS Macro Letters* [online]. **3**(4), 382-386 [cit. 2019-04-14]. DOI: 10.1021/mz4006556. ISSN 2161-1653. Dostupné z: <http://pubs.acs.org/doi/10.1021/mz4006556>
- [7] ZHA, Wentao a Sam ANAND, 2015. Geometric approaches to input file modification for part quality improvement in additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. **20**, 465-477 [cit. 2019-05-13]. DOI: 10.1016/j.jmapro.2015.06.021. ISSN 15266125. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1526612515000663>
- [8] SCHWAB, Klaus, 2017. *The Fourth Industrial Revolution*. Portfolio. ISBN 9780241300756.
- [9] ZADPOOR, Amir A. a Jos MALDA, 2017. Additive Manufacturing of Biomaterials, Tissues, and Organs. *Annals of Biomedical Engineering*. **45**(1), 1-11. DOI: 10.1007/s10439-016-1719-y. ISSN 0090-6964.
- [10] CALIGNANO, Flaviana et al., 2017. Additive Manufacturing of Biomaterials, Tissues, and Organs. *Proceedings of the IEEE*. **105**(4), 1-11. DOI: 10.1109/JPROC.2016.2625098. ISSN 0018-9219.
- [11] FELZMANN, Ruth et al., 2012. Lithography-Based Additive Manufacturing of Cellular Ceramic Structures. *Advanced Engineering Materials* [online]. **14**(12), 1052-1058 [cit. 2019-04-14]. DOI: 10.1002/adem.201200010. ISSN 14381656. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/adem.201200010>
- [12] TESA VIBUL, Passakorn et al., 2012. Processing of 45S5 Bioglass® by lithography-based additive manufacturing. *Materials Letters* [online]. **74**(12), 81-84 [cit. 2019-04-14]. DOI: 10.1016/j.matlet.2012.01.019. ISSN 0167577X. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167577X12000390>
- [13] Desimone, J. M.; Samulski, E. T.; Ermoshkin, A.; DeSimone, P.M. (Eipi Systems, Inc.) Rapid 3D Continuous Printing of Casting Molds for Metals and Other Materials. *Int. Patent Appl.* WO2015080888, 2015.

[14] Desimone, J. M.; Samulski, E. T.; Rolland, J. P. (Carbon3D, Inc.) Methods and Apparatus for Continuous Liquid Interface Production with Rotation. Int. Patent Appl. WO2016007495A1, 2016.

[15] Torgersen, J.; Ovsianikov, A.; Mironov, V.; Pucher, N.; Qin, X.; Li, Z.; Cicha, K.; Machacek, T.; Liska, R.; Jantsch, V.; et al. Photo-Sensitive Hydrogels for Three-Dimensional Laser Microfabrication in the Presence of Whole Organisms. *J. Biomed. Opt.* 2012, 17, 105008–105008.

[16] JANUSZIEWICZ, Rima et al., 2016. Layerless fabrication with continuous liquid interface production. *Proceedings of the National Academy of Sciences* [online]. 113(42), 11703–11708 [cit. 2019-04-14]. DOI: 10.1073/pnas.1605271113. ISSN 0027-8424. Dostupné z: <http://www.pnas.org/lookup/doi/10.1073/pnas.1605271113>

[17] André, J.-C.; Mehauté, A. L.; De Witte, O. (Compagnie Industrielle des Lasers Cilas Alcatel) Dispositif pour Realiser un Modele de Piece Industrielle. French Patent App. 2567668, 1984.

[18] SABOORI, Abdollah et al., 2017. An Overview of Additive Manufacturing of Titanium Components by Directed Energy Deposition: Microstructure and Mechanical Properties. *Applied Sciences* . 7(9), 593-612 DOI: 10.3390/app7090883. ISSN 2076-3417.

[19] DEBROY, T. et al., 2018. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties: Microstructure and Mechanical Properties. *Progress in Materials Science*. 92(9), 112-224 . DOI: 10.1016/j.pmatsci.2017.10.001. ISSN 00796425.

[20] SHAMSAEI, Nima et al., 2015. An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part II: Mechanical behavior, process parameter optimization and control. *Additive Manufacturing*. 8(9), 12-35. DOI: 10.1016/j.addma.2015.07.002. ISSN 22148604.

[21] THOMPSON, Scott M. et al., 2015. An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part I: Transport phenomena, modeling and diagnostics. *Additive Manufacturing*. 8(9), 36-62. DOI: 10.1016/j.addma.2015.07.001. ISSN 22148604.

[22] SCHMID, Manfred et al., 2016. Additive Manufacturing: Polymers Applicable for Laser Sintering (LS). *Procedia Engineering*. 149(9), 457-464. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.692. ISSN 18777058.

[23] SCHMIDT, M. et al., 2007. Selective Laser Sintering of PEEK: Polymers Applicable for Laser Sintering (LS). *CIRP Annals*. 56(1), 205-208. DOI: 10.1016/j.cirp.2007.05.097. ISSN 00078506.

[24] Allen, R. R.; Meyer, J. D.; Knight, W. R. Thermodynamics and Hydrodynamics of Thermal Ink Jets. Hewlett Packard J. 1985, 36, 21–27.

[25] Wigand, J. T.; Winey, C. M., III; Varanka, M. (Solidscape, Inc.) Method and Apparatus for Fabricating Three Dimensional Models. U.S. Patent 7700016, 2010.

[26] Masters, W. Computer Automated Manufacturing Process and System. U.S. Patent 4665492, 1987.

[27] Yamane, M.; Kawaguchi, T. (Brother Kogyo Kabushiki Kaisha) Apparatus for Forming Three-Dimensional Article. U.S. Patent 5140937, 1992.

[28] Kritchman, E. M.; Zeytoun, I. (Objet Geometries Ltd.) Rapid Prototyping Apparatus. U.S. Patent 7896639, 2011.

[29] Napadensky, E. (Objet Geometries Ltd.) Compositions and Methods for Use in Three Dimensional Model Printing. U.S. Patent 6569373, 2003.

[30] Hoey, J. M.; Akhatov, I. S.; Swenson, O. F.; Schulz, D. L. (NDSU Research Foundation) Convergent-Divergent-Convergent Nozzle Focusing of Aerosol Particles for Micron-Scale Direct Writing. U.S. Patent App. 20090053507, 2009.

[31] JANUSZIEWICZ, Rima et al., 2008. 2009 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). *IEEE Transactions on Electron Devices* [online]. **55**(11), 3320-3320 [cit. 2019-04-14]. DOI: 10.1109/TED.2008.2008783. ISSN 0018-9383. Dostupné z:

UTB ve Zlíně, Fakulta technologická

108

<http://ieeexplore.ieee.org/document/4668549/>

[32] PFISTER, Andreas et al., 2005. Polymer Ionomers for Rapid Prototyping and Rapid Manufacturing by Means of 3D Printing. *Macromolecular Materials and Engineering* [online]. **290**(2), 99-113 [cit. 2019-04-14]. DOI: 10.1002/mame.200400282. ISSN 14387492. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4668549/>

[33] Feygin, M.; Pak, S. S. (Helisys Corporation) Apparatus for Forming an Integral Object from Laminations. U.S. Patent 5637175, 1997.

[34] Cubic Technologies. Dostupné z: <http://www.cubicttechnologies.com/index.htm> [cit. 2019-04-14].

[35] Emamjomeh, A.; Prasad, K. A.; Haddick, G. T. (Hewlett-Packard Development Company, L.P.) Three-Dimensional (3D) Printing System. Int. Patent App. WO2016053245A1, 2016.

[36] GONZALEZ-GUTIERREZ, M. et al., 2018. Selective Laser Sintering of PEEK: Polymers Applicable for Laser Sintering (LS). *Materials*. **11**(5), 205-208. DOI: 10.3390/ma11050840. ISSN 1996-1944.

[37] CARNEIRO, O.S. et al., 2015. Fused deposition modeling with polypropylene: A Review and Future Perspectives. *Materials*. **83**(5), 768-776. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.06.053. ISSN 02641275.

[38] de Hazan, Y.; Wozniak, M.; Heinecke, J.; Müller, G.; Märkl, V.; Graule, T. *Advanced Processing and Manufacturing Technologies for Structural and Multifunctional Materials IV*; John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, 2010; pp 85–95.

[39] Muelhaupt, R.; Landers, R.; John, H. (Envision Technologies GmbH) Device and Method for the Production of Three-Dimensional Objects. Int. Patent App. WO2001078968A1, 2001.

[40] Studies from Massachusetts Institute of Technology Provide New Data on Technology (3D-Printed Wood: Programming Hygroscopic Material Transformations). *Journal of Engineering*. 2016, 1145. ISSN:1945-8711.

[41] GE, Qi, Conner k DUNN, H jerry QI a Martin I DUNN. Active origami by 4D printing. *Smart Materials and Structures* [online]. Iop Publishing, 2014, **23**(9), 94007-94021 [cit. 2019-04-14]. DOI: 10.1088/0964-1726/23/9/094007. ISSN 09641726.

[42] RAVIV, Dan, Wei ZHAO, Carrie MCKNELLY, et al. Active printed materials for complex self-evolving deformations. *Scientific Reports* [online]. Nature Publishing Group, 2014, **4**(1), 7422-7429 [cit. 2019-04-14]. DOI: 10.1038/srep07422. ISSN 20452322.

[43] Findings on Technology Reported by Investigators at Hansung University (4D Printing Technology: A Review). *Journal of Engineering*. 2016, 545. ISSN:1945-8711.

[44] TIBBITS, Skylar. 4D Printing. *Architectural Design* [online]. John Wiley, 2014, **84**(1), 116-121 [cit. 2019-04-14]. DOI: 10.1002/ad.1710. ISSN 00038504

[45] GE, Qi et al., 2016. Multimaterial 4D Printing with Tailorable Shape Memory Polymers. *Scientific Reports* [online]. **6**(1), 99-113 [cit. 2019-04-14]. DOI: 10.1038/srep31110. ISSN 2045-2322. Dostupné z: <http://www.nature.com/articles/srep31110>.

[46] SHAHZAD, Khuram et al., 2014. Additive manufacturing of zirconia parts by indirect selective laser sintering. *Journal of the European Ceramic Society* [online]. **34**(1), 81-89 [cit.

2019-04-14]. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2013.07.023. ISSN 09552219. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0955221913003531>

[47] BOURELL, David et al., 2017. Materials for additive manufacturing: A Review and Future Perspectives. *CIRP Annals*. **66**(2), 659-681. DOI: 10.1016/j.cirp.2017.05.009. ISSN 00078506.

[48] HERZOG, Dirk et al., 2016. Additive manufacturing of metals: A Review and Future Perspectives. *Acta Materialia*. **117**(2), 371-392. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.07.019. ISSN 13596454.

[49] NIU, Fangyong et al., 2015. Effect of second-phase doping on laser deposited Al₂O₃ ceramics. *Rapid Prototyping Journal* [online]. **21**(2), 201-206 [cit. 2019-04-15]. DOI: 10.1108/RPJ-12-2014-0167. ISSN 1355-2546. Dostupné z: <http://www.emeraldinsight.com/doi/10.1108/RPJ-12-2014-0167>

[50] NIU, F. Y. et al., 2017. Process Optimization for Suppressing Cracks in Laser Engineered Net Shaping of Al₂O₃ Ceramics. *JOM* [online]. **69**(3), 557-562 [cit. 2019-04-15]. DOI: 10.1007/s11837-016-2191-8. ISSN 1047-4838. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11837-016-2191-8>

[51] DING, Donghong et al., 2015. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. **81**(1-4), 465-481 [cit. 2019-04-15]. DOI: 10.1007/s00170-015-7077-3. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-015-7077-3>

[52] THUIS, Lore et al., 2010. A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V: technologies, developments and future interests. *Acta Materialia* [online]. **58**(9), 3303-3312 [cit. 2019-04-15]. DOI: 10.1016/j.actamat.2010.02.004. ISSN 13596454. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S135964541000090X>

[53] YU, Jun et al., 2012. Material Properties of Ti6Al4V Parts Produced by Laser Metal Deposition: technologies, developments and future interests. *Physics Procedia* [online]. **39**(9), 416-424 [cit. 2019-04-15]. DOI: 10.1016/j.phpro.2012.10.056. ISSN 18753892. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1875389212025837>

[54] SCHMID, Manfred et al., 2014. Materials perspective of polymers for additive manufacturing with selective laser sintering: technologies, developments and future interests. *Journal of Materials Research* [online]. **29**(17), 1824-1832 [cit. 2019-04-15]. DOI: 10.1557/jmr.2014.138. ISSN 0884-2914. Dostupné z: http://www.journals.cambridge.org/abstract_S0884291414001381

[55] VERBELEN, Leander et al., 2016. Characterization of polyamide powders for determination of laser sintering processability: technologies, developments and future interests. *European Polymer Journal* [online]. **75**(17), 163-174 [cit. 2019-04-15]. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2015.12.014. ISSN 00143057. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0014305715300938>

[56] Jacobs PF (1996) Stereolithography and Other RP&M Technologies, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, MI.

[57] Bassi GL (1993) Formulation of UV-Curable Coatings—How to Design Specific Properties. in Fouassier JP, Rabek JF, (Eds.) Radiation Curing in Polymer Science and

Technology—Vol II: Photoinitiated Systems, Elsevier Applied Science, London & New York 239.

[58] Napadensky E, Kritchman EM, Cohen A (2007) Compositions and methods for use in three dimensional model printing, US Patent 7,300,619.

[59] Mueller J, Shea K (2015) The Effect of Build Orientation on the Mechanical Properties in Inkjet 3D Printing. Proceedings of SFF Symposium, Austin TX USA, 983–992.

[60] ASHBY, M.F. et al., 2003. Designing hybrid materials: technologies, developments and future interests. *Acta Materialia* [online]. **51**(19), 5801-5821 [cit. 2019-04-15]. DOI: 10.1016/S1359-6454(03)00441-5. ISSN 13596454. Dostupné z:

UTB ve Zlíně, Fakulta technologická

110

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359645403004415>

[61] Vaezi M, Chianrabutra S, Mellor B, Yang S (2013) Multiple Material Additive Manufacturing—Part 1: A Review. *Virtual and Physical Prototyping* **8**(1):19–50.

[62] FU, Z. et al., 2013. Three-dimensional printing of SiSiC lattice truss structures: technologies, developments and future interests. *Materials Science and Engineering: A* [online]. **560**(19), 851-856 [cit. 2019-04-15]. DOI: 10.1016/j.msea.2012.09.107. ISSN 09215093. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509312014372>

[63] ZOCCA, Andrea et al., 2015. Additive Manufacturing of Ceramics: Issues, Potentialities, and Opportunities. *Journal of the American Ceramic Society* [online]. **98**(7), 1983-2001 [cit. 2019-04-15]. DOI: 10.1111/jace.13700. ISSN 00027820. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1111/jace.13700>

[64] Hagedorn Y-C, Balachandran N, Meiners W, Wissembach K, Poprawe R (2011) SLM of Net-Shaped High Strength Ceramics: New Opportunities for Producing Dental Restorations. Proceedings of the SFF Symposium, Austin TX USA, 536–546.

[65] KRUTH, J.-P. et al., 2007. Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing: Issues, Potentialities, and Opportunities. *CIRP Annals* [online]. **56**(2), 730-759 [cit. 2019-04-15]. DOI: 10.1016/j.cirp.2007.10.004. ISSN 00078506. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850607001540>

[66] GU, Dongdong et al., 2008. Direct laser sintered WC-10Co/Cu nanocomposites: Issues, Potentialities, and Opportunities. *Applied Surface Science* [online]. **254**(13), 3971-3978 [cit. 2019-04-15]. DOI: 10.1016/j.apsusc.2007.12.028. ISSN 01694332. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169433207017266>

[67] WANG, Xin et al., 2017. 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Composites Part B: Engineering*. **110**(2), 442-458. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.11.034. ISSN 13598368.

[68] D'URSO, Paul S. et al., 2000. Custom cranioplasty using stereolithography and acrylic: Issues, Potentialities, and Opportunities. *British Journal of Plastic Surgery* [online]. **53**(3), 200-204 [cit. 2019-04-15]. DOI: 10.1054/bjps.1999.3268. ISSN 00071226. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S000712269993268X>

[69] KUMAR, S. et al., 2010. Composites by rapid prototyping technology: Issues, Potentialities, and Opportunities. *British Journal of Plastic Surgery* [online]. **31**(2), 850-856 [cit. 2019-04-15]. DOI: 10.1016/j.matdes.2009.07.045. ISSN 02613069. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306909003860>

[70] MarkForged, Markforged mechanical properties [online],[cit. 2019/ 04/15]. Dostupné z: <https://markforged.com/materials/>

- [71] WACHTMAN JOHN, B; JOHN, Matthewson; ROGER, Cannon. Mechanical Properties of Whisker-, Ligament-, and Platelet-Reinforced Ceramic Matrix Composites. *Mechanical Properties of Ceramics*. 2009, 1.
- [72] Voxel8 (2015) 3D Printed Electronics, Bringing Functional Materials to 3D Printing.[online] [cit. 2019-04-15]Dostupné z: <http://www.voxel8.co/materials/>.
- [73] GUO, Nannan et al., 2013. Additive manufacturing: technology, applications and research needs. *Frontiers of Mechanical Engineering* [online]. **8**(3), 215-243 [cit. 2019-04-15]. DOI: 10.1007/s11465-013-0248-8. ISSN 2095-0233. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11465-013-0248-8>
- [74] COMPTON, Brett G. et al., 2014. 3D-Printing of Lightweight Cellular Composites: technology, applications and research needs. *Advanced Materials* [online]. **26**(34), 5930-5935

- [cit. 2019-04-15]. DOI: 10.1002/adma.201401804. ISSN 09359648. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/adma.201401804>.
- [75] *Smart Materials and Structures* [online], 2014. **26**(9) [cit. 2019-04-15]. ISSN 0964-1726. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/09641726/23/i=9/a=094007?key=crossref.b77e5da2653ac838509a57efc6aad68>
- [76] GE, Qi et al., 2014. Active origami by 4D printing: technology, applications and research needs. *Smart Materials and Structures*[online]. **23**(9), 5930-5935 [cit. 2019-04-15]. DOI: 10.1088/0957-4484/26/43/434003. ISSN 0964-1726. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/0964-1726/23/i=9/a=094007?key=crossref.b77e5da2653ac838509a57efc6aad683>
- [77] Kim HC, Hahn HT, Yang YS. Synthesis of PA12/functionalized GNP nanocomposite powders for the selective laser sintering process. *J Compos Mater* 2012. 0021998312441812.
- [78] SHOFNER, M. L. et al., 2003. Nanofiber-reinforced polymers prepared by fused deposition modeling: technology, applications and research needs. *Journal of Applied Polymer Science* [online]. **89**(11), 3081-3090 [cit. 2019-04-15]. DOI: 10.1002/app.12496. ISSN 00218995. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/app.12496>
- [79] CHUNG, Haseung et al., 2008. Functionally graded Nylon-11/silica nanocomposites produced by selective laser sintering: technology, applications and research needs. *Materials Science and Engineering: A* [online]. **487**(1-2), 251-257 [cit. 2019-04-15]. DOI: 10.1016/j.msea.2007.10.082. ISSN 09215093. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509307018096>
- [80] DELGADO CAMACHO, Daniel et al., 2018. Applications of additive manufacturing in the construction industry – A forward-looking review: A review and prospective. *Automation in Construction*. **89**(2), 110-119. DOI:10.1016/j.autcon.2017.12.031. ISSN 09265805.
- [81] YANG, Li, 2017. CERAMIC ADDITIVE MANUFACTURING: A REVIEW OF CURRENT STATUS AND CHALLENGES. *Solid Freeform Fabrication 2017: Proceedings of the 28th Annual International* [online]. 29 [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: www.researchgate.net/publication/321716472_ceramic_additive_manufacturing_a_review_of_current_status_and_challenges
- [82] BHARGAV, Aishwarya et al., 2018. Applications of additive manufacturing in dentistry: A review. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*. **106**(5), 2058-2064. DOI: 10.1002/jbm.b.33961. ISSN 15524973.
- [83] JAVAID, Mohd. et al., 2018. Additive manufacturing applications in orthopaedics: A review. *Journal of Clinical Orthopaedics and Trauma* [online]. **9**(3), 202-206 [cit. 2019-04-15].

DOI: 10.1016/j.jcot.2018.04.008. ISSN 09765662. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S097656621830122X>

[84] KREIGER, Megan et al., 2013. Environmental Life Cycle Analysis of Distributed Three-Dimensional Printing and Conventional Manufacturing of Polymer Products: A review. *Journal of Clinical Orthopaedics and Trauma* [online]. **1**(12), 1511-1519 [cit. 2019-04-15]. DOI: 10.1021/sc400093k. ISSN 2168-0485. Dostupné z: <http://pubs.acs.org/doi/10.1021/sc400093k>

[85] WANG, Xin et al., 2017. 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Composites Part B: Engineering* [online]. **110**(12), 442-458 [cit. 2019-04-15]. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.11.034. ISSN 13598368. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836816321230>

[86] Dirk Vander Kooij's Incredible 3D Printed Furniture from Recycled Dostupné z: <http://www.3dprinter.net/> (cit. 2019-04-15).

[87] Best 3D Pen 2017: Guide to 95 3D Pens + 3doodler Review. Dostupné z:

UTB ve Zlíně, Fakulta technologická

112

<https://all3dp.com/best-3d-pen-buyers-guide-3d-printing-pens/> (cit. 2019-04-15).

[88] RAVIV, Dan et al., 2015. Active Printed Materials for Complex Self-Evolving Deformations: A review and prospective. *Scientific Reports* [online]. **4**(1), 442-458 [cit. 2019-04-15]. DOI: 10.1038/srep07422. ISSN 2045-2322. Dostupné z: <http://www.nature.com/articles/srep07422>

[89] *Kontrolní a zkušební metody: Statické zkoušky krátkodobé* [online], [cit. 2019-04-08]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_09.pdf

[90] ŠVEC, MARTIN, 2009. *PŘEHLED ZKUŠEBNÍCH STROJŮ PRO MECHANICKÉ ZKOUŠKY MATERIÁLŮ A KONSTRUKCÍ NA FSI VUT V BRNĚ* [online]. Brno [cit. 2019-04-08]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=18445. Bakalářská práce. VUT Brno.

[91] FOLDYNOVÁ, KATEŘINA, 2017. *MECHANICKÉ VLASTNOSTI 3D TISKU* [online]. Ostrava [cit. 2019-04-08]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=18445. Bakalářská práce. Technická univerzita Ostrava.

[92] ŠČULDOVÁ, Jolana, Brno. *ANALÝZA MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ POLYMERŮ A POLYMERNÍCH KOMPOZITŮ Z VIDEOZÁZNAMU TAHOVÉ ZKOUŠKY* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=25590. Diplomová práce. VUT Brno.

[93] 3D TISKÁRNA ORIGINAL PRUSA I3 MK3, *Prusa 3D* [online]. [cit. 2019-04-08]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/original-prusa-i3-mk3/>

[94] KUBIS, David, Brno. *Výzkum podmínek kopírování nedokonalosti povrchu na polymerní výrobky* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/413/kubis_2006_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Diplomová práce. UTB ve Zlíně.

[95] ŠTEFAN, Vojtěch, Brno. *Filtrace dat při měření drsnosti povrchu* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11025/15066>. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.

[96] *Kyselina polymléčná dostupná nejen jako biodegradabilní polymer* [online], [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/kyselina-polymlecna-nejen-jako-biodegradabilni-polymer>

- [97]DUCHÁČEK, Vratislav, 2011. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití* [online]. Vyd. 3., přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze [cit. 2019-04-10]. ISBN 978-80-7080-788-0.
- [98]*CPE HG100* [online], [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <https://fillamentum.com/products/cpe-hg100-natural>
- [99]*Termoplastické elastomery* [online], [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/23.html>
- [100]*All In One 3D Printer test* [online], [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <https://www.thingiverse.com/thing:2656594>
- [101]*Ultimaker Cura infill settings* [online], [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <https://ultimaker.com/en/resources/52670-infill>
- [102] *What Is an Infill Pattern?* [online], [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/cura-infill-patterns-all-you-need-to-know/>
- [103] *How to use 3D Print Infill Settings ?* [online], [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <https://rigid.ink/blogs/news/optimum-infill>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

FDM	Fused Deposition Modeling.
SLS	Selective Laser Sintering.
SLA	Stereolithography.
DLP	Digital Light Processing.
CLIP	Continuous Liquid Interface Production.
MPP	Multiphoton Polymerization.
DED	Direct Energy Deposition.
PBF	Powder Bed Fusion.
3DP	3D Powder Fusion.
LOM	Laminated Object Manufacturing.
MEAM	Material Extrusion Additive Manufacturing.
BAAM	Big Area Additive Manufacturing.
PIM	Powder Injection Molding.
R _a	Střední aritmetická úchylka profilu.
R _z	Výška nerovnosti profilu z deseti bodů.
R _m	Největší výška nerovnosti profilu.
y _{max}	Maximální výška výstupu profilu.
R _q	Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Schematický popis principu aditivní výroby.....	16
Obrázek 2: Znázornění jednotlivých výrobních technologií. Ilustrace a) zachycuje subtraktivní postupy, b) patří aditivní výrobě, c) znázorňuje tvářecí postupy [1].	17
Obrázek 3: Ukázka složitosti výtisku vytvořeného pomocí aditivní výroby [1].	18
Obrázek 4: Rozdělení procesů aditivní výroby dle normy ISO/ASTM 52900:2015[9].	22
Obrázek 5: Rozdělení procesů spolu s vybranými technologiemi a materiály, které lze takto zpracovávat [10].	22
Obrázek 6: Stereolitografie [10].	24
Obrázek 7: Schematický náčrt přístroje pracující metodou MPP [1].	25
Obrázek 8: Metoda DED [14].	27
Obrázek 9: Znázornění energetického svazku s částicemi kovu dopadající na povrch vznikajícího výtisku [14].	27
Obrázek 10: SLS [46].	28
Obrázek 11: PolyJet Process; a) podložka, b) trysková hlava, c) vrstvy podpůrného materiálu, d) vrstvy materiálu, e) UV zdroj [1].	31
Obrázek 12: Aerosol Jet Printing; a) aerosolová komora, b) přívod inertního plynu, c) detail trysky, kde dochází k mísení aerosolu a inertního plynu, d) tryska a e) vodorovně posuvná podložka [1].	32
Obrázek 13: 3DP; a) svisle pohyblivá podložka, b) výtisk spolu s podporou tvořící nepevným materiálem, c) tisková hlava, d) zásobník materiálu a e) zařízení pro vrstvení materiálu [32].	33
Obrázek 14: Možné kombinace prášek-pojivo použitelné pro zpracování technologií 3DP [1].	33
Obrázek 15: LOM; a) vertikálně pohyblivá tisková podložka, b) a c) zásobníky materiálu,	34
Obrázek 16: Různé typy vytlačovacích mechanismů u FDM [13].	35
Obrázek 17: FDM [35].	36
Obrázek 18: Nanesená vrstva materiálu [14].	37
Obrázek 19: Přehled materiálů spolu s rozmezím teplot pro jejich aplikaci [21].	37
Obrázek 20: Postup zpracování vysoce plněných materiál pomocí MEAM [36].	39
Obrázek 21: 3D dávkování; a) tisková podložka obsahující vzduch či imerzní kapalinu, b) tryska a c) vytlačovací hlava [1].	40
Obrázek 22: Změna výtisku vlivem působení vodného prostředí [44].	41
Obrázek 23: Postupná tvarová změna proces chapadla vlivem změny teploty [45].	41
Obrázek 24: Přehled metod a jejich využití v technologiích aditivní výroby [47].	42
Obrázek 25: Detail vytlačovací trysky při zpracování krátkovláknového kompozitu [54].	48
Obrázek 26: Zařízení pro zpracování dlouhých vláken pomocí technik 3Dtisku [17].	49
Obrázek 27: Administrativní budova v Dubai vyrobená aditivními technologiemi [80].	51
Obrázek 28: Kraniální segment lebky vytvořený z trikalcium fosfátu [81].	52
Obrázek 29: 3D tisk nábytku z recyklovaného polymeru – ABS [88].	55
Obrázek 30: Tahový diagram pro měkkou ocel; bod U odpovídá mezi úměrností, bod E představuje mezi pružnosti, bod K označuje mez kluzu, bod P je mez pevnosti a bod S místo porušení vzorku[89].	57
Obrázek 31: Namáhání v ohybu; a) tříbodový ohyb a b) čtyřbodový ohyb[90].	58
Obrázek 32: Znázornění průběhu ohybového a modulu průřezu pro tříbodový ohyb (vpravo) a čtyřbodový ohyb (vlevo)[90].	58
Obrázek 33: Základní charakteristiky drsnosti povrchu [93].	61
Obrázek 34: 3D tiskárna Original Prusa i3MK3.....	64
Obrázek 35: Kvádr.....	67
Obrázek 36: Kvádr s otvorem.....	67
Obrázek 37: Pyramida	68
Obrázek 38: Sada 4 pyramid.....	68
Obrázek 39: Sada otvorů	69
Obrázek 40: Kompletní 3D tiskařský test [100]	69
Obrázek 41: 3D model zkušební tělesa pro zkoušku v ohybu dle normy ČSN EN ISO178.....	69
Obrázek 42: 3D model zkušební tělesa pro tahovou zkoušku v poměru 1:2 vůči velikosti definované normou ČSN EN ISO527.	70
Obrázek 43: Fotografie zkušebních těles pro rozměrovou analýzu z PLA při tisku nižší rychlostí.	73
Obrázek 44: Fotografie zkušebních těles pro rozměrovou analýzu z PLA při tisku vyšší rychlostí.....	73
Obrázek 45: Fotografie zkušebních těles pro rozměrovou analýzu z ABS při tisku nižší rychlostí.	74
Obrázek 46: Fotografie zkušebních těles pro rozměrovou analýzu z ABS při tisku vyšší rychlostí.	74
Obrázek 47: Fotografie zkušebních těles pro rozměrovou analýzu z CPE HG 100.	75
Obrázek 48: Fotografie zkušebních těles pro rozměrovou analýzu z PETG.	75

Obrázek 49: Fotografie kompletního 3D tiskařského testu pro vizuální posouzení kvality tisku z PLA při tisku nižší rychlostí.	76
Obrázek 50: Fotografie kompletního 3D tiskařského testu pro vizuální posouzení kvality tisku z PLA při tisku vyšší rychlostí.	76
Obrázek 51: Fotografie kompletního 3D tiskařského testu pro vizuální posouzení kvality tisku z ABS při tisku nižší rychlostí.	77
Obrázek 52: Fotografie kompletního 3D tiskařského testu pro vizuální posouzení kvality tisku z ABS při tisku vyšší rychlostí.	77
Obrázek 53: Fotografie kompletního 3D tiskařského testu pro vizuální posouzení kvality tisku z CPE HG 100.	78
Obrázek 54: Fotografie kompletního 3D tiskařského testu pro vizuální posouzení kvality tisku z PETG.	78
Obrázek 55: Typy výplní s různými stupni hustoty vnitřní sítě[102].	82
Obrázek 56: Trhací stroj Instron 3345.	83
Obrázek 57: Detail uchycení vzorku v čelistech trhacího stroje během tahové zkoušky.	83
Obrázek 58: Detail uložení vzorku při tříbodovém ohybu.	85
Obrázek 59: Typy výplní (vlevo: cubic, uprostřed: grid a vpravo: lines)	85
Obrázek 60: Profilometr Diavite DH-8.	87
Obrázek 61: Graf závislosti zachycující průběh drsnosti a vlnitosti na měřené délce u spodní strany vzorku PLA_lv.	88
Obrázek 62: Graf závislosti zachycující průběh drsnosti a vlnitosti na měřené délce u horní strany vzorku PLA_lv.	88
Obrázek 63: Graf závislosti zachycující průběh drsnosti a vlnitosti na měřené délce u boční strany vzorku PLA_lv.	88
Obrázek 64: Graf závislosti zachycující průběh drsnosti a vlnitosti na měřené délce u spodní strany vzorku PLA_hv.	89
Obrázek 65: Graf závislosti zachycující průběh drsnosti a vlnitosti na měřené délce u horní strany vzorku PLA_hv.	89
Obrázek 66: Graf závislosti zachycující průběh drsnosti a vlnitosti na měřené délce u boční strany vzorku PLA_hv.	89
Obrázek 67: Graf závislosti zachycující průběh drsnosti a vlnitosti na měřené délce u spodní strany vzorku ABS_lv.	90
Obrázek 68: Graf závislosti zachycující průběh drsnosti a vlnitosti na měřené délce u horní strany vzorku ABS_lv.	90
Obrázek 69: Graf závislosti zachycující průběh drsnosti a vlnitosti na měřené délce u boční strany vzorku ABS_lv.	90
Obrázek 70: Graf závislosti zachycující průběh drsnosti a vlnitosti na měřené délce u spodní strany vzorku ABS_hv.	91
Obrázek 71: Graf závislosti zachycující průběh drsnosti a vlnitosti na měřené délce u horní strany vzorku ABS_hv.	91
Obrázek 72: Graf závislosti zachycující průběh drsnosti a vlnitosti na měřené délce u boční strany vzorku ABS_hv.	91
Obrázek 73: Graf závislosti zachycující průběh drsnosti a vlnitosti na měřené délce u spodní strany vzorku CPE HG 100.	92
Obrázek 74: Graf závislosti zachycující průběh drsnosti a vlnitosti na měřené délce u horní strany vzorku CPE HG 100.	92
Obrázek 75: Graf závislosti zachycující průběh drsnosti a vlnitosti na měřené délce u boční strany vzorku CPE HG 100.	92
Obrázek 76: Graf závislosti zachycující průběh drsnosti a vlnitosti na měřené délce u spodní strany vzorku PETG.	93
Obrázek 77: Graf závislosti zachycující průběh drsnosti a vlnitosti na měřené délce u horní strany vzorku PETG.	93
Obrázek 78: Graf závislosti zachycující průběh drsnosti a vlnitosti na měřené délce u boční strany vzorku PETG.	93
Obrázek 79: Graf výšky profilu vzhledem k jeho % zastoupení pro spodní část vzorku PLA_lv.	94
Obrázek 80: výšky profilu vzhledem k jeho % zastoupení pro horní část vzorku PLA_lv.	94
Obrázek 81: Graf výšky profilu vzhledem k jeho % zastoupení pro boční část vzorku PLA_lv.	94
Obrázek 82: Graf výšky profilu vzhledem k jeho % zastoupení pro spodní část vzorku PLA_hv.	95
Obrázek 83: Graf výšky profilu vzhledem k jeho % zastoupení pro horní část vzorku PLA_hv.	95
Obrázek 84: Graf výšky profilu vzhledem k jeho % zastoupení pro boční část vzorku PLA_hv.	95
Obrázek 85: Graf výšky profilu vzhledem k jeho % zastoupení pro spodní část vzorku ABS_lv.	96
Obrázek 86: Graf výšky profilu vzhledem k jeho % zastoupení pro horní část vzorku ABS_lv.	96
Obrázek 87: Graf výšky profilu vzhledem k jeho % zastoupení pro boční část vzorku ABS_lv.	96
Obrázek 88: Graf výšky profilu vzhledem k jeho % zastoupení pro spodní část vzorku ABS_hv.	97
Obrázek 89: Graf výšky profilu vzhledem k jeho % zastoupení pro horní část vzorku ABS_hv.	97
Obrázek 90: Graf výšky profilu vzhledem k jeho % zastoupení pro boční část vzorku ABS_hv.	97
Obrázek 91: Graf výšky profilu vzhledem k jeho % zastoupení pro spodní část vzorku CPE HG 100.	98

Obrázek 92:Graf výšky profilu vzhledem k jeho % zastoupení pro horní část vzorku CPE HG 100.....	98
Obrázek 93:Graf výšky profilu vzhledem k jeho % zastoupení pro boční část vzorku CPE HG 100.	98
Obrázek 94:Graf výšky profilu vzhledem k jeho % zastoupení pro spodní část vzorku PETG.	99
Obrázek 95:Graf výšky profilu vzhledem k jeho % zastoupení pro horní část vzorku PETG.....	99
Obrázek 96:Graf výšky profilu vzhledem k jeho % zastoupení pro boční část vzorku PETG	99

SEZNAM TABULEK

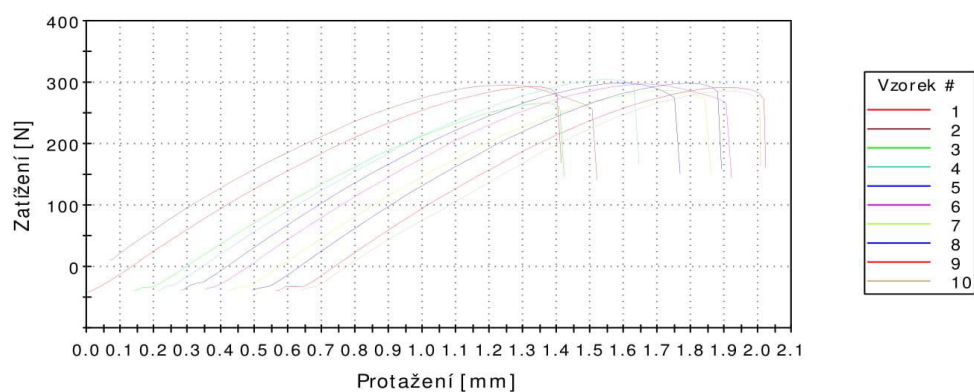
Tabulka 1: Shrnutí podmínek pro 3D tisk u použitých materiálů za dosažení nejlepších užitných vlastností výrobků	70
Tabulka 2: Rozměrová analýza kvádrů.....	78
Tabulka 3: Rozměrová analýza kvádrů s otvorem.....	78
Tabulka 4: Rozměrová analýza pyramidy	78
Tabulka 5: Rozměrová analýza sady pyramid	79
Tabulka 6: Rozměrová analýza sady otvorů	79
Tabulka 7: Shrnutí výsledků statické zkoušky v tahu pro zvolené materiály.....	83
Tabulka 8: Shrnutí výsledků statické zkoušky v ohybu pro PLA.....	85
Tabulka 9: Shrnutí výsledků statické zkoušky v ohybu pro ABS	85
Tabulka 10: Shrnutí výsledků měření drsnosti povrchu pro dané materiály	86

SEZNAM PŘÍLOH

P 1 – Zpráva z tahové zkoušky pro ABS pro rychlost 10 mm/min.	119
P 2 – Zpráva z tahové zkoušky pro PLA pro rychlost 10 mm/min.....	121
P 3 – Zpráva z tahové zkoušky pro Flexfill 98A pro rychlost 10 mm/min.	122
P 4 – Zpráva z tahové zkoušky pro Flexfill 98A pro rychlost 500 mm/min.	123
P 5 – Zpráva z ohybové zkoušky pro PLA; hustota výplně: 20 % a typ výplně: lines.....	124
P 6 – Zpráva z ohybové zkoušky pro PLA; hustota výplně: 35 % a typ výplně: lines.....	125
P 7 – Zpráva z ohybové zkoušky pro PLA; hustota výplně: 55 % a typ výplně: lines.....	126
P 8 – Zpráva z ohybové zkoušky pro PLA; hustota výplně: 20 % a typ výplně: grid.	127
P 9 – Zpráva z ohybové zkoušky pro PLA; hustota výplně: 35 % a typ výplně: grid.	128
P 10 – Zpráva z ohybové zkoušky pro PLA; hustota výplně: 55 % a typ výplně: grid.	129
P 11 – Zpráva z ohybové zkoušky pro PLA; hustota výplně: 20 % a typ výplně: cubic.....	130
P 12 – Zpráva z ohybové zkoušky pro PLA; hustota výplně: 35 % a typ výplně: cubic.....	131
P 13 – Zpráva z ohybové zkoušky pro PLA; hustota výplně: 55 % a typ výplně: cubic.....	132
P 14 – Zpráva z ohybové zkoušky pro ABS; hustota výplně: 20 % a typ výplně: lines.	133
P 15 – Zpráva z ohybové zkoušky pro ABS; hustota výplně: 35 % a typ výplně: lines.	134
P 16 – Zpráva z ohybové zkoušky pro ABS; hustota výplně: 55 % a typ výplně: lines.	135
P 17 – Zpráva z ohybové zkoušky pro ABS; hustota výplně: 20 % a typ výplně: grid.....	136
P 18 – Zpráva z ohybové zkoušky pro ABS; hustota výplně: 35 % a typ výplně: grid.....	137
P 19 – Zpráva z ohybové zkoušky pro ABS; hustota výplně: 55 % a typ výplně: grid.....	138
P 20 – Zpráva z ohybové zkoušky pro ABS; hustota výplně: 20 % a typ výplně: cubic.	139
P 21 – Zpráva z ohybové zkoušky pro ABS; hustota výplně: 35 % a typ výplně: cubic.	140
P 22 – Zpráva z ohybové zkoušky pro ABS; hustota výplně: 55 % a typ výplně: cubic.	141

P 1 – Zpráva z tahové zkoušky pro ABS pro rychlost 10 mm/min.

Vzorek 1 až 10

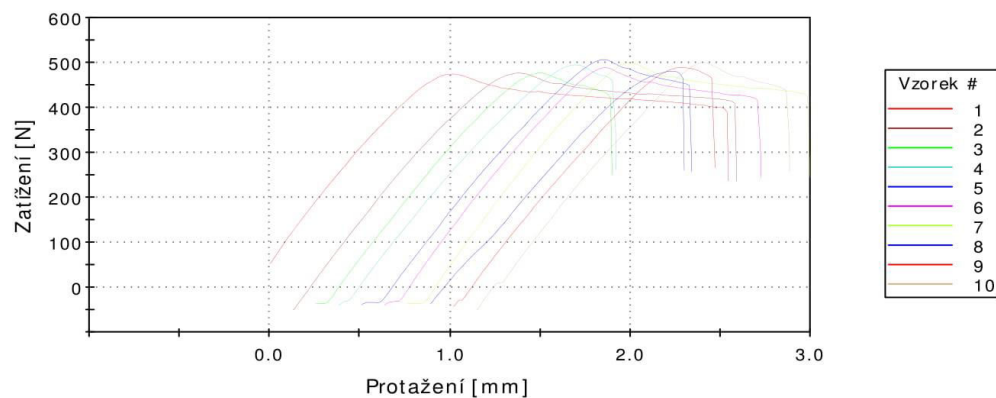


	Modul (Automatický Youngův modul pružnosti) [MPa]	Tahové napětí při Pevnost v tahu [MPa]	Zatížení při Pevnost v tahu [N]
1	2726,30804	29,32344	293,23441
2	2870,44113	29,58793	295,87927
3	2646,28892	26,63912	266,39124
4	2717,64517	30,47675	304,76746
5	2804,85280	29,91134	299,11343
6	2760,52111	29,72766	297,27664
7	2739,84123	28,68335	286,83347
8	2807,06473	29,86136	298,61365
9	2750,15097	29,20058	292,00583
10	2534,19446	28,58062	285,80618

	Tahové napětí při Porušení (Standardní) [MPa]
1	28,08664
2	25,71707
3	25,96154
4	29,45528
5	27,48610
6	26,57499
7	27,21242
8	28,52714
9	27,27636
10	25,38058

P 2 – Zpráva z tahové zkoušky pro PLA pro rychlost 10 mm/min.

Vzorek 1 až 10

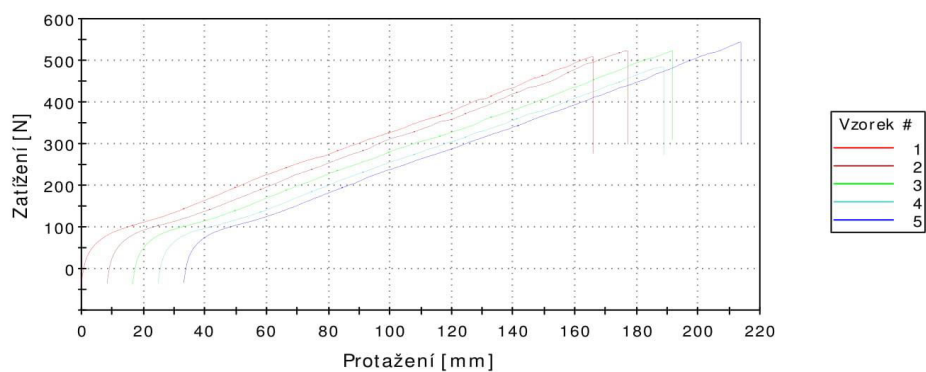


	Modul (Automatický Youngův modul pružnosti) [MPa]	Tahové napětí při Pevnost v tahu [MPa]	Zatížení při Pevnost v tahu [N]
1	4336,88651	47,44910	474,49097
2	4011,99708	47,69658	476,96579
3	3951,28768	47,72120	477,21201
4	3917,78938	49,51624	495,16245
5	3947,61202	50,66906	506,69064
6	4222,58416	48,83857	488,38568
7	4274,64421	50,04515	500,45148
8	3476,23748	48,10895	481,08948
9	3979,68689	48,90365	489,03653
10	3807,06297	50,01841	500,18411

	Tahové napětí při Porušení (Standardní) [MPa]
1	39,03954
2	40,95835
3	42,09272
4	34,20527
5	44,93880
6	29,35306
7	42,63041
8	46,50258
9	46,63766
10	33,31304

P 3 – Zpráva z tahové zkoušky pro Flexfill 98A pro rychlost 10 mm/min.

Vzorek 1 až 5

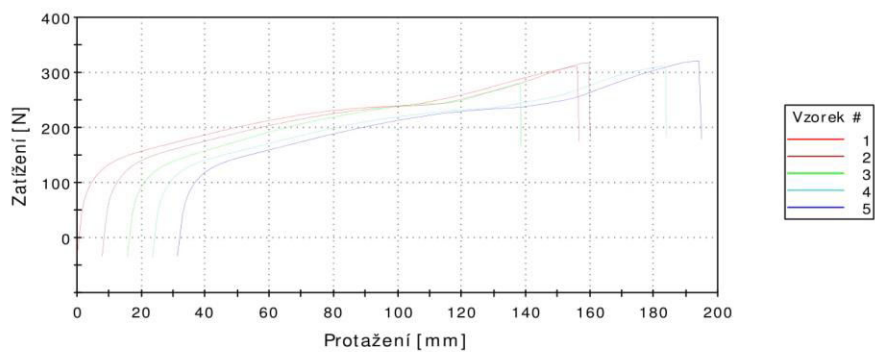


	Modul (Automatický Youngův modul pružnosti) [MPa]	Tahové napětí při Pevnost v tahu [MPa]	Zatížení při Pevnost v tahu [N]
1	49,25889	50,92894	509,28943
2	46,34959	52,31907	523,19073
3	43,41477	52,25153	522,51526
4	51,12545	48,47355	484,73544
5	41,24952	54,35645	543,56445

	Tahové napětí při Porušení (Standardní) [MPa]
1	50,81466
2	52,06948
3	52,17040
4	48,20877
5	54,35973

P 4 – Zpráva z tahové zkoušky pro Flexfill 98A pro rychlost 500 mm/min.

Vzorek 1 až 5

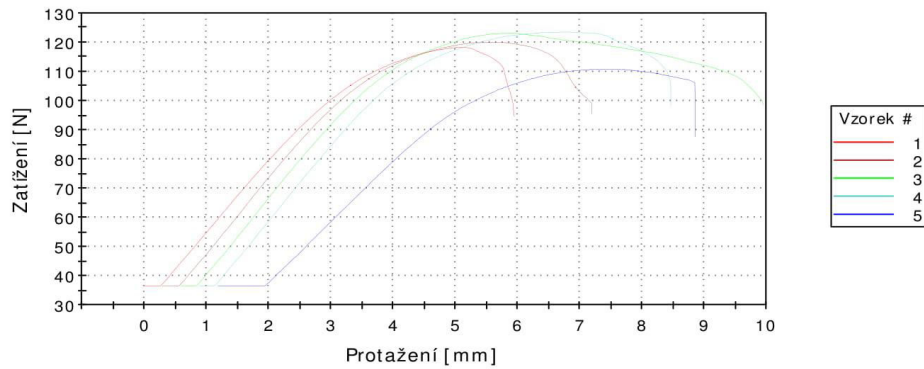


	Modul (Automatický Youngův modul pružnosti) [MPa]	Tahové napětí při Pevnost v tahu [MPa]	Zatížení při Pevnost v tahu [N]
1	130,70374	31,13289	311,32895
2	377,50782	31,72932	317,29324
3	154,79818	27,96818	279,68182
4	130,61340	31,08675	310,86749
5	129,76428	32,08071	320,80710

	Tahové napětí při Porušení (Standardní) [MPa]
1	31,03716
2	31,66117
3	27,68969
4	30,60164
5	32,07337

P 5 – Zpráva z ohybové zkoušky pro PLA; hustota výplně: 20 % a typ výplně: lines.

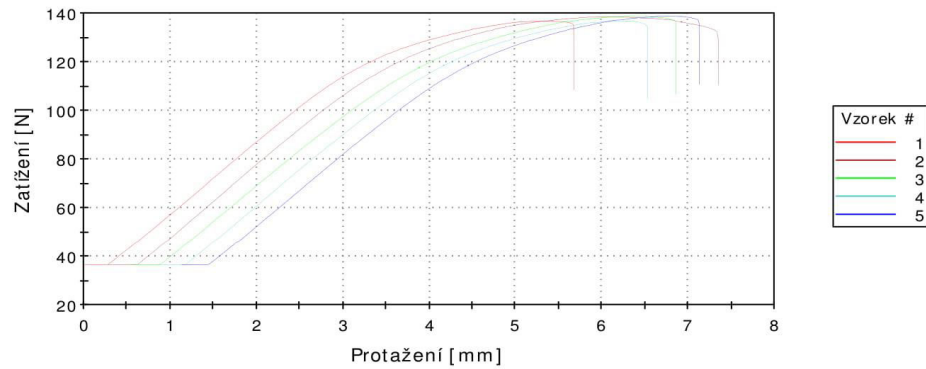
Vzorek 1 až 5



	Modul (Automatická) [MPa]	Ohybové zatížení při Pevnost v tahu [N]	Ohybové napětí při Pevnost v tahu [MPa]
1	1320,18562	118,21087	45,39297
2	1384,27899	119,98442	46,07402
3	1398,32782	123,16927	47,29700
4	1367,48824	123,49328	47,42142
5	1101,74355	110,76458	42,53360

P 6 – Zpráva z ohybové zkoušky pro PLA; hustota výplně: 35 % a typ výplně: lines.

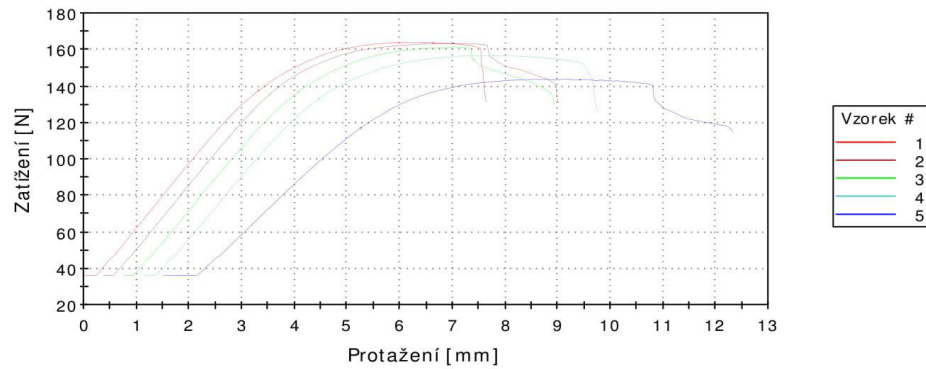
Vzorek 1 až 5



	Modul (Automatická) [MPa]	Ohybové zatížení při Pevnost v tahu [N]	Ohybové napětí při Pevnost v tahu [MPa]
1	1573,55647	136,58560	52,44887
2	1594,23666	138,39673	53,14434
3	1534,42007	138,61979	53,23000
4	1575,07373	136,66724	52,48022
5	1554,48041	138,68298	53,25426

P 7 – Zpráva z ohybové zkoušky pro PLA; hustota výplně: 55 % a typ výplně: lines.

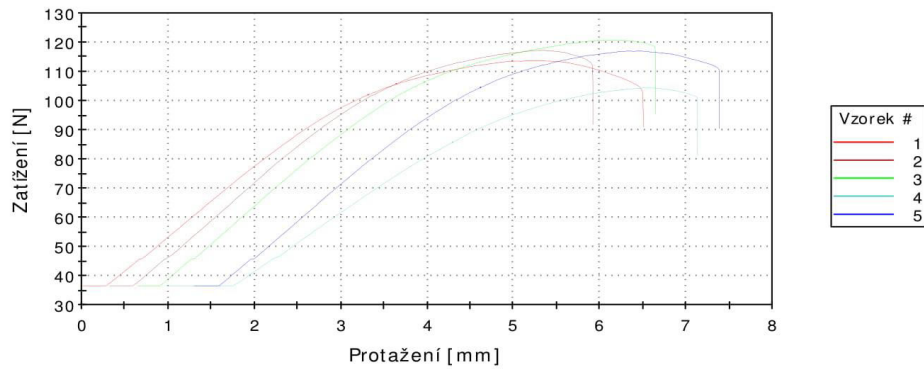
Vzorek 1 až 5



	Modul (Automatická) [MPa]	Ohybové zatížení při Pevnost v tahu [N]	Ohybové napětí při Pevnost v tahu [MPa]
1	1860,49679	163,91074	62,94172
2	1849,36052	162,98758	62,58723
3	1829,32581	161,48730	62,01112
4	1791,70256	156,76862	60,19915
5	1458,30880	143,92877	55,26865

P 8 – Zpráva z ohybové zkoušky pro PLA; hustota výplně: 20 % a typ výplně: grid.

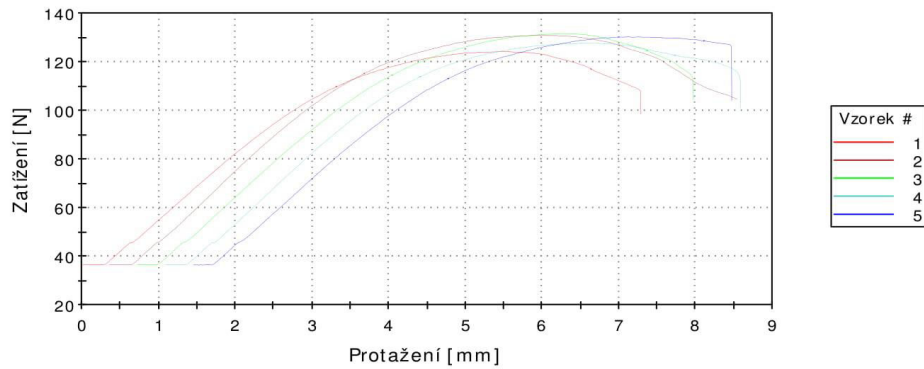
Vzorek 1 až 5



	Modul (Automatická) [MPa]	Ohybové zatížení při Pevnost v tahu [N]	Ohybové napětí při Pevnost v tahu [MPa]
1	1288,83290	113,67389	43,65077
2	1354,58656	117,22186	45,01319
3	1354,31347	120,76330	46,37310
4	1047,65060	104,39587	40,08801
5	1341,54860	116,98280	44,92140

P 9 – Zpráva z ohybové zkoušky pro PLA; hustota výplně: 35 % a typ výplně: grid.

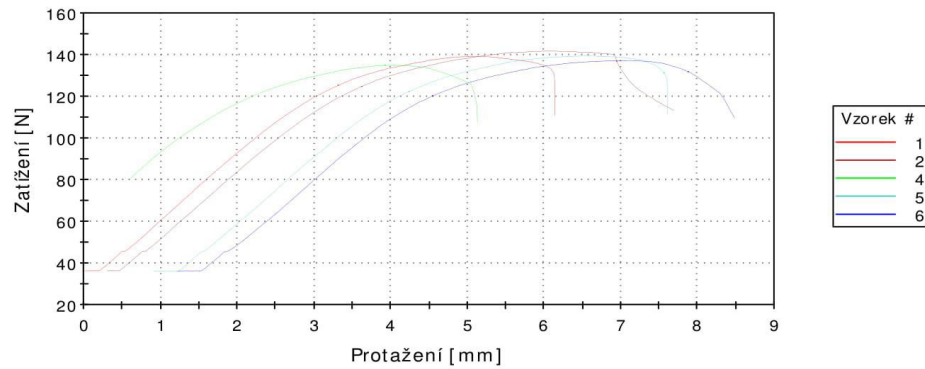
Vzorek 1 až 5



	Modul (Automatická) [MPa]	Ohybové zatížení při Pevnost v tahu [N]	Ohybové napětí při Pevnost v tahu [MPa]
1	1447,73051	124,14528	47,67179
2	1580,59172	130,79379	50,22481
3	1507,89193	131,52036	50,50382
4	1534,16837	127,70146	49,03736
5	1484,46845	130,12871	49,96942

P 10 – Zpráva z ohybové zkoušky pro PLA; hustota výplně: 55 % a typ výplně: grid.

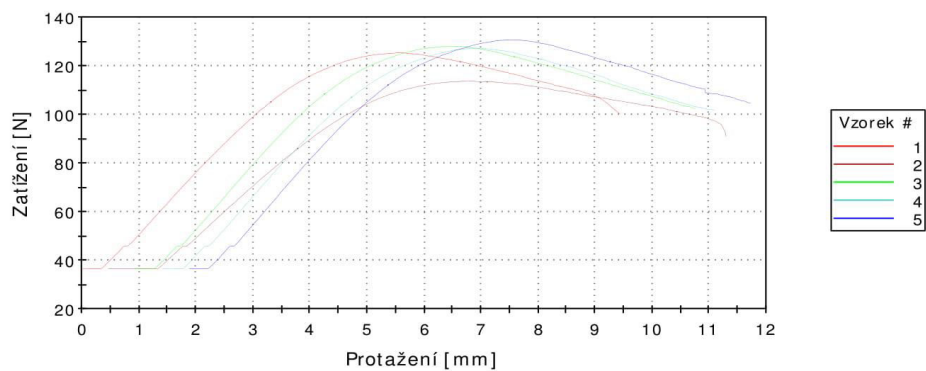
Vzorek 1 až 6



	Modul (Automatická) [MPa]	Ohybové zatížení při Pevnost v tahu [N]	Ohybové napětí při Pevnost v tahu [MPa]
1	1734,99919	139,25381	53,47346
2	1679,65759	141,74371	54,42958
4	1622,73850	135,03004	51,85154
5	1690,85150	139,49022	53,56424
6	1668,93178	137,24562	52,70232

P 11 – Zpráva z ohybové zkoušky pro PLA; hustota výplně: 20 % a typ výplně: cubic.

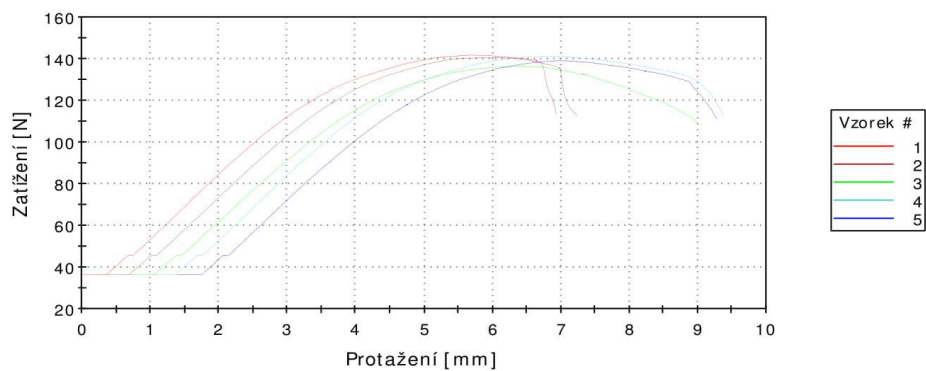
Vzorek 1 až 5



	Modul (Automatická) [MPa]	Ohybové zatížení při Pevnost v tahu [N]	Ohybové napětí při Pevnost v tahu [MPa]
1	1351,98830	125,26905	48,10331
2	1062,33983	113,72188	43,66920
3	1411,36654	127,97701	49,14317
4	1412,72565	127,17007	48,83331
5	1424,71546	130,66231	50,17432

P 12 – Zpráva z ohybové zkoušky pro PLA; hustota výplně: 35 % a typ výplně: cubic.

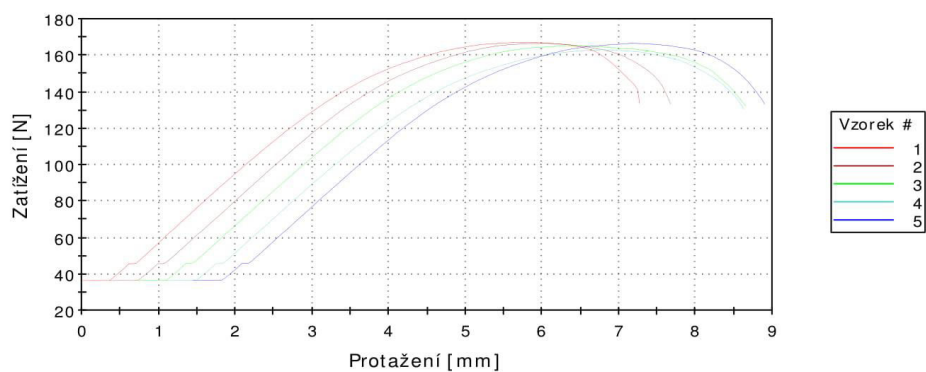
Vzorek 1 až 5



	Modul (Automatická) [MPa]	Ohybové zatížení při Pevnost v tahu [N]	Ohybové napětí při Pevnost v tahu [MPa]
1	1649,11413	141,70818	54,41594
2	1618,80279	140,62323	53,99932
3	1574,02472	136,24197	52,31692
4	1649,37461	141,13213	54,19474
5	1628,17343	139,11775	53,42121

P 13 – Zpráva z ohybové zkoušky pro PLA; hustota výplně: 55 % a typ výplně: cubic.

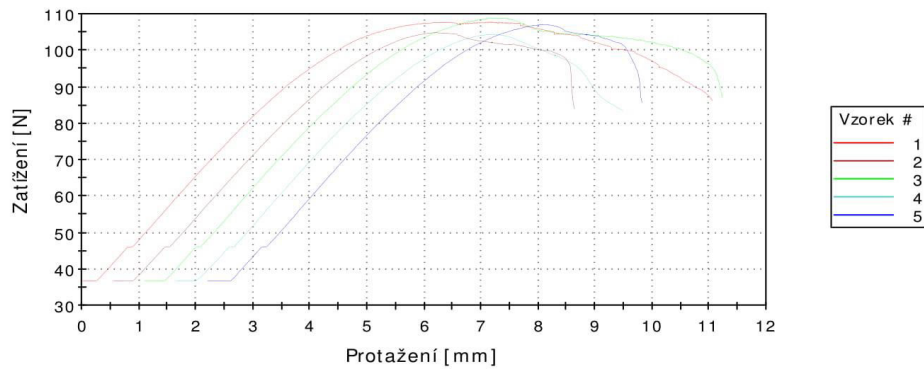
Vzorek 1 až 5



	Modul (Automatická) [MPa]	Ohybové zatížení při Pevnost v tahu [N]	Ohybové napětí při Pevnost v tahu [MPa]
1	2006,30667	167,08543	64,16080
2	1973,77652	166,58262	63,96772
3	1983,38526	165,20372	63,43822
4	1974,05149	162,98957	62,58799
5	1981,82089	166,50774	63,93897

P 14 – Zpráva z ohybové zkoušky pro ABS; hustota výplně: 20 % a typ výplně: lines.

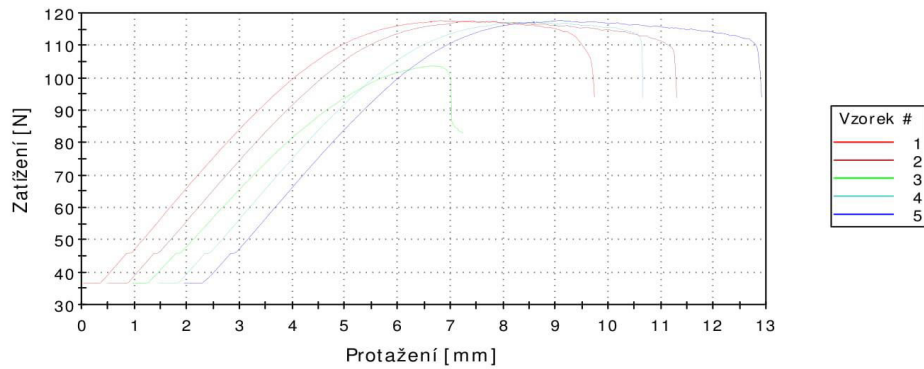
Vzorek 1 až 5



	Modul (Automatická) [MPa]	Ohybové zatížení při Pevnost v tahu [N]	Ohybové napětí při Pevnost v tahu [MPa]
1	920,61727	107,80125	41,39568
2	910,46211	104,82825	40,25405
3	933,22527	108,82268	41,78791
4	912,00591	104,29005	40,04738
5	920,82974	106,99679	41,08677

P 15 – Zpráva z ohybové zkoušky pro ABS; hustota výplně: 35 % a typ výplně: lines.

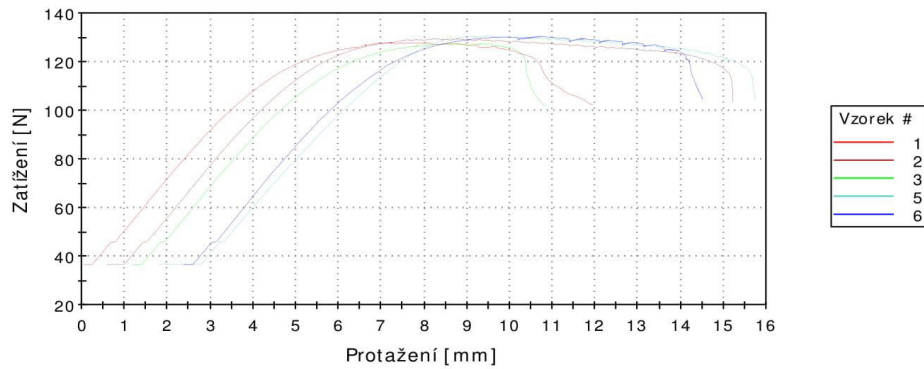
Vzorek 1 až 5



	Modul (Automatická) [MPa]	Ohybové zatížení při Pevnost v tahu [N]	Ohybové napětí při Pevnost v tahu [MPa]
1	1003,09954	117,65849	45,18086
2	987,87159	117,41824	45,08860
3	926,82602	103,68219	39,81396
4	984,41468	117,26860	45,03114
5	986,30341	117,72561	45,20663

P 16 – Zpráva z ohybové zkoušky pro ABS; hustota výplně: 55 % a typ výplně: lines.

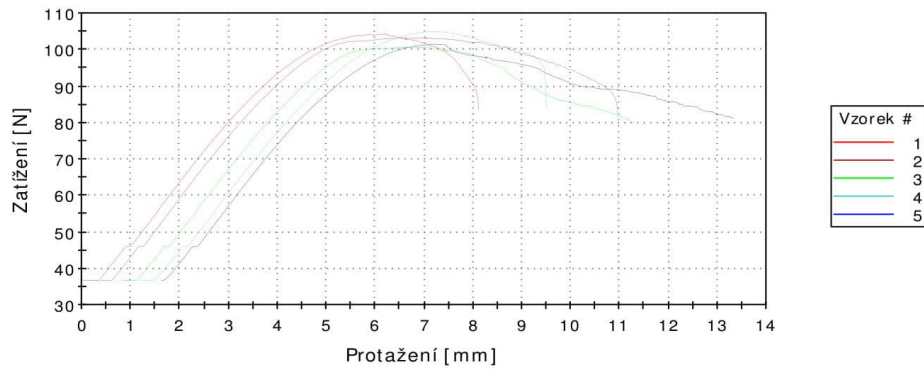
Vzorek 1 až 6



	Modul (Automatická) [MPa]	Ohybové zatížení při Pevnost v tahu [N]	Ohybové napětí při Pevnost v tahu [MPa]
1	1119,07237	127,78429	49,06917
2	1121,88247	129,48461	49,72209
3	1096,68539	127,23800	48,85939
5	75,19537	130,62749	50,16095
6	1085,77068	130,56805	50,13813

P 17 – Zpráva z ohybové zkoušky pro ABS; hustota výplně: 20 % a typ výplně: grid.

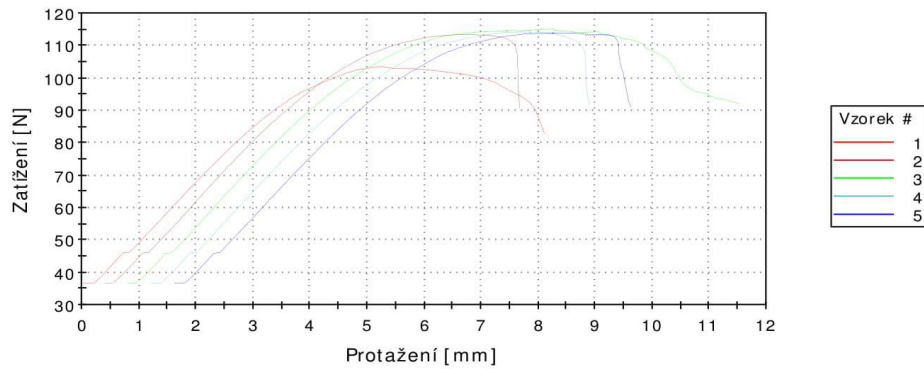
Vzorek 1 až 5



	Modul (Automatická) [MPa]	Ohybové zatížení při Pevnost v tahu [N]	Ohybové napětí při Pevnost v tahu [MPa]
1	925,30650	104,19961	40,01265
2	932,25245	103,21993	39,63645
3	918,04888	100,65820	38,65275
4	935,99023	104,85767	40,26535
5	915,89709	101,40539	38,93967

P 18 – Zpráva z ohybové zkoušky pro ABS; hustota výplně: 35 % a typ výplně: grid.

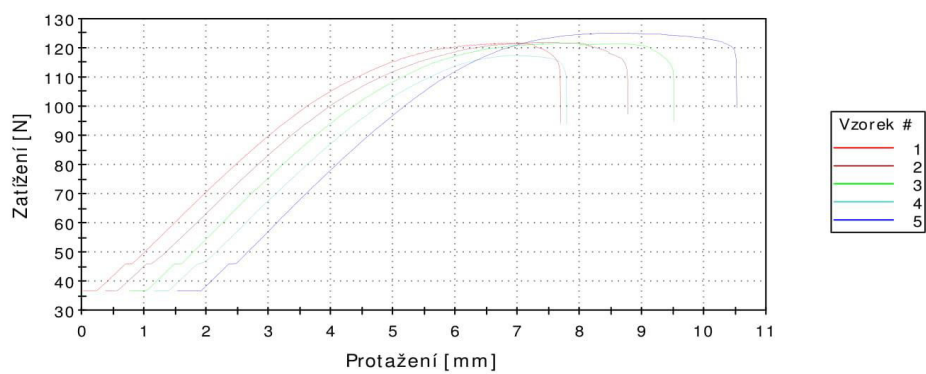
Vzorek 1 až 5



	Modul (Automatická) [MPa]	Ohybové zatížení při Pevnost v tahu [N]	Ohybové napětí při Pevnost v tahu [MPa]
1	979,74843	103,53628	39,75793
2	1013,38314	113,32184	43,51558
3	992,81486	115,09907	44,19804
4	989,21364	114,07661	43,80542
5	982,46828	113,81784	43,70605

P 19 – Zpráva z ohybové zkoušky pro ABS; hustota výplně: 55 % a typ výplně: grid.

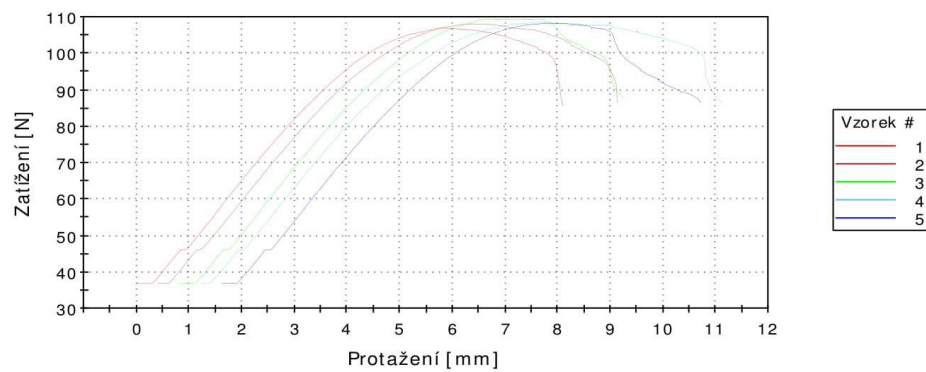
Vzorek 1 až 5



	Modul (Automatická) [MPa]	Ohybové zatížení při Pevnost v tahu [N]	Ohybové napětí při Pevnost v tahu [MPa]
1	1084,13222	121,57663	46,68542
2	1070,66048	121,82068	46,77914
3	1094,64115	121,73303	46,74548
4	1102,89943	117,45365	45,10220
5	1112,71456	125,07706	48,02959

P 20 – Zpráva z ohybové zkoušky pro ABS; hustota výplně: 20 % a typ výplně: cubic.

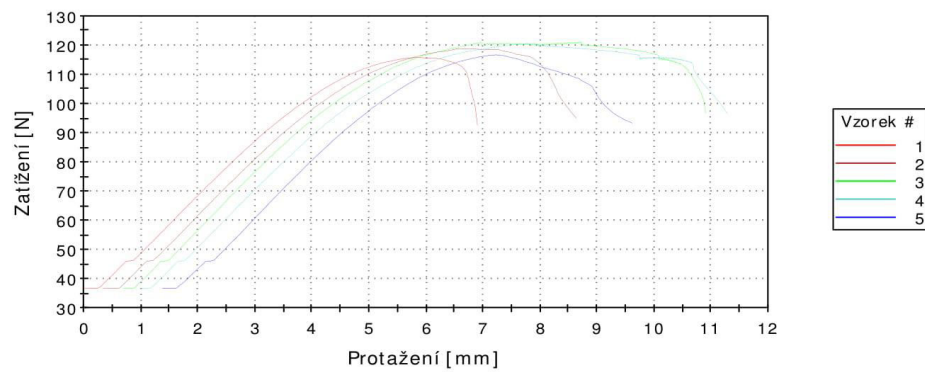
Vzorek 1 až 5



	Modul (Automatická) [MPa]	Ohybové zatížení při Pevnost v tahu [N]	Ohybové napětí při Pevnost v tahu [MPa]
1	954,41627	106,94411	41,06654
2	938,76108	108,08274	41,50377
3	960,53264	109,43160	42,02173
4	938,79270	108,36410	41,61181
5	948,46841	108,21925	41,55619

P 21 – Zpráva z ohybové zkoušky pro ABS; hustota výplně: 35 % a typ výplně: cubic.

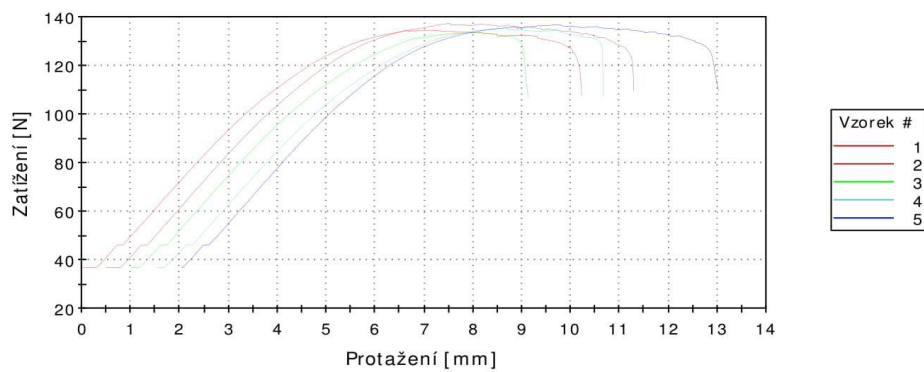
Vzorek 1 až 5



	Modul (Automatická) [MPa]	Ohybové zatížení při Pevnost v tahu [N]	Ohybové napětí při Pevnost v tahu [MPa]
1	1039,23384	115,80750	44,47008
2	1051,14456	118,70903	45,58427
3	1058,72755	120,83241	46,39964
4	1027,50263	120,72200	46,35725
5	1060,14345	116,68901	44,80858

P 22 – Zpráva z ohybové zkoušky pro ABS; hustota výplně: 55 % a typ výplně: cubic.

Vzorek 1 až 5



	Modul (Automatická) [MPa]	Ohybové zatížení při Pevnost v tahu [N]	Ohybové napětí při Pevnost v tahu [MPa]
1	1182,84958	134,49139	51,64470
2	1191,41893	137,23917	52,69984
3	1173,50834	133,26559	51,17399
4	1167,39701	135,30516	51,95718
5	1172,55010	136,73172	52,50498