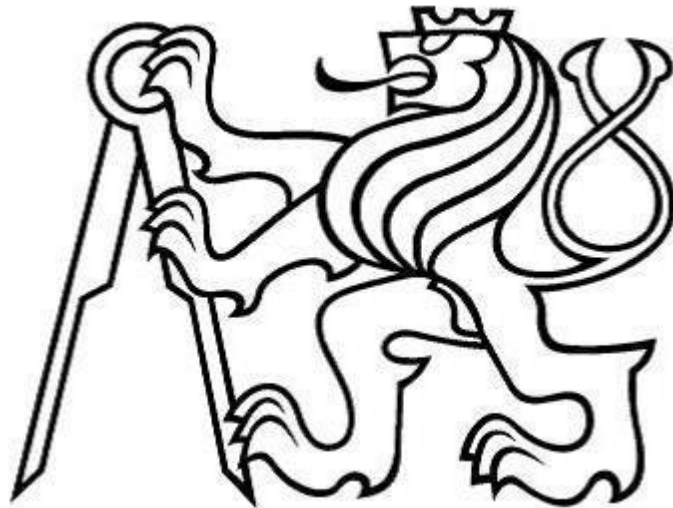

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta strojní

ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE



Bakalářská práce

Technologické možnosti aditivních technologií

Praha 2017

Dvořák Jan

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Dvořák** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **438577**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Technologické možnosti aditivních technologií

Název bakalářské práce anglicky:

Additive manufacturing and its technological possibilities

Pokyny pro vypracování:

Aditivní technologie - přehled, principy jednotlivých metod
Materiály využívané pro aditivní výrobu
Technologičnost konstrukce s využitím aditivních technologií
Nevýhody a omezující faktory nasazení AM

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Libor Beránek Ph.D., ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS


Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **20.04.2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **15.07.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: _____


Podpis vedoucí(ho) práce



Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

25.4. 2017
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

.....

podpis autora

Poděkování

Chtěl bych tímto poděkovat všem, kteří mi při vytváření této práce pomáhali. Svým kolegům z práce za pomoc při 3D tisku, panu Ing. Vladimíru Šulcovi za pomoc při měření. Svoji rodině za podporu a především děkuji svému vedoucímu bakalářské práce, Liboru Beránkovi, Ing., Ph.D. za věnovaný čas, připomínky a cenné rady.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá technologickými možnostmi aditivních technologií. Teoretická část je zaměřena na základní pojmy a definice, stručný popis jednotlivých technologií a hlubší rozebrání těch nejpoužívanějších. Dále je zde popis nejpoužívanějších současných materiálů a trendy do budoucna. Praktická část bakalářské práce se zabývá návrhem testovacího artefaktu pro ověření technologických možností aditivních technologií v kombinaci s použitým materiálem a zařízením. V závěrečné kapitole jsou jednotlivá měření a porovnání dvou artefaktů vytisknutých na dvou zařízeních, kde jsou vidět nedostatky.

Klíčová slova: 3D tisk, aditivní technologie, testovací artefakt, technologické možnosti

Abstract

This bachelor thesis deals with technological possibilities of additive manufacturing. The theoretical part is focused on basic concepts and definitions, a brief description of each current technologies and more detailed analysis of the most used. There is also in the first part description of the most used current materials and trends for the future. The practical part of the bachelor thesis deals with designing a test artifacts for verification of technological possibilities of additive technologies in combination with used material and equipment. In the final chapter there are individual measurements and comparison of two artifacts printed on two devices, where it is possible to see some shortcomings.

Key words: 3D printing, additive technology, test artifact, technological possibilities

Obsah

1.	Definice Aditivní technologie	1
1.1.	Proces výroby pomocí Aditivního Modelování (AM)	1
1.2.	Vývoj 3D tisku	3
2.	Přehled a princip jednotlivých metod	5
2.1.	Stereolitografie (SLA)	7
2.2.	Selective Laser Sintering (SLS)	8
2.3.	Laminated Object Manufacturing (LOM)	9
2.4.	Fused Deposition Modeling (FDM)	10
2.5.	Direct Metal Laser Sintering (DMLS) 3D tisk kovu	12
3.	Materiály používané pro 3D tisk	15
3.1.	Kovové materiály	15
3.2.	Termoplasty	17
3.3.	Neobvyklé materiály	19
4.	Technologičnost konstrukce	23
4.1.	Optimalizace topologie vnějších tvarů	24
4.2.	Optimalizace topologie vnitřních tvarů	25
4.3.	Optimalizace pomocí simulace 3D tisku	25
5.	Trendy v oblasti 3D tisku	28
5.1.	Vícebarevný 3D tisk	28
5.2.	Zlepšení v 3D tisku z kovu	28
5.3.	Tisk orgánů	29
5.4.	Více materiálový 3D tisk	29
6.	Návrh testovacího artefaktu pro posouzení technologických možností AM	31
6.1.	Tisk artefaktu na zařízení FELIX PRO 2	35
6.2.	Tisk artefaktu na zařízení ZOLTRAX M200	36
6.3.	Měření a porovnání obou vytisknutých artefaktů	37
6.4.	Standardizace v oblasti AM	52

Seznam použitých zkratk v angličtině

AM	Additive Manufacturing
CAD	Computer Aided Design
STL	Standard Tessellation Language
RP	Rapid Prototyping
SLA	Stereolitography
SLS	Selective Laser Sintering
LOM	Laminated Object Manufacturing
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
SHS	Selective Heat Sintering
EBF	Electron Beam Fabrication
EBM	Electron Beam Melting
SLM	Selective Laser Melting
DLP	Digital Light Processing

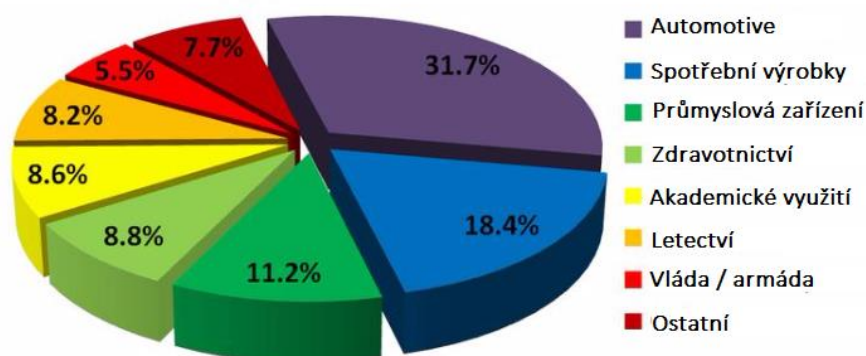
Úvod

V současné době jsou aditivní technologie (3D tisk) na velkém vzestupu a každým rokem se tato oblast posouvá rychle kupředu a to nejen ve strojírenství, ale i ve stavebnictví, zdravotnictví a dalších oblastech. Podstatou je vytvářet trojrozměrné objekty tak, že se postupně vrstvu po vrstvě nanáší materiál, čímž vznikají různé rozličné tvary podle CAD předlohy. Existuje celá řada technologií, které jsou popsány v této bakalářské práci, kde vybrané nepoužívanější jsou popsány více do detailů s uvedenými příklady. Některé technologie jsou určeny pro konkrétní skupinu materiálů (plasty, kovy..). Možnosti použitých materiálů se neustále zvětšují, stejně jako přesnost a kvalita tisku. Dlouhou dobu byly tyto technologie používány spíše pro vytváření prototypů, pro lepší představu a navrhování sériových linek konečných produktů. Se zvyšujícími se technologickými možnostmi a kvalitou se již používá i pro tvorbu složitých konečných součástí, které je obtížné nebo i nemožné vyrobit jinou technologií. Konstrukterům dovoluje přemýšlet nad topologií tvarů bez omezení a vytvářet tak konstrukce, které mohou být velice pevné a zároveň i lehké, což má velký potenciál využití v leteckém nebo i kosmickém průmyslu.

Praktická část je zaměřena na návrh testovacího artefaktu. Díky rychlému vývoji v této oblasti, vzniká celá řada standardů, kde jsem si vybral pro návrh testovacího artefaktu aktuálně nevydaný standard k tomu určený. Artefakt slouží k ověření technologických možností zařízení při použití různých technologií a materiálů. Po fyzickém vytisknutí artefaktu na dvou zařízeních pomocí technologie FDM a použití dvou polymerních materiálů, proběhne měření porovnání součástí.

1. Definice Aditivní technologie

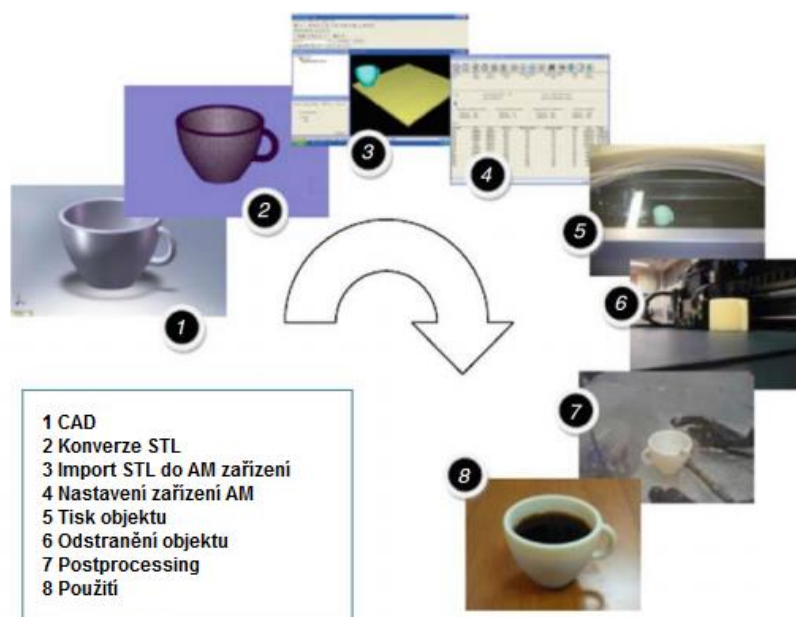
Aditivní technologie označuje proces, při němž vzniká výrobek postupným nanášením tenkých vrstev na sebe. Aditivní technologie je v podstatě totéž, co 3D tisk, nebo rapid prototyping, ačkoliv tyto pojmy se využívají zejména pro označení procesů, při nichž vzniká jen prototyp, nikoliv konečný výrobek. Trojrozměrný tisk nebo zkráceně 3D tisk je možné charakterizovat více způsoby tvoření objektů, avšak v podstatě jde o aditivní proces, tedy přidávání materiálu. Materiál se vrství a spéká, kdy cílem tohoto procesu je vytvoření objektu ze série 3D dat. Princip 3D tisku by se dal přirovnat k jeskyním, kdy během dlouhé řady let, zanechává voda postupné vrstvy minerálů, které vytvoří stalagmity a stalaktity. 3D tiskárna je schopná na základě digitální předlohy, která je vytvořená CAD programem vytvořit hmotnou podobu modelu. Proces výroby pomocí AM je možné vidět níže. [1] Pro představu o použití aditivních technologií v různých oborech lidské činnosti je uveden následující **graf č. 1**.



Graf č.1 Rozsah použití AM v různých oborech [15]

1.1. Proces výroby pomocí Aditivního Modelování (AM)

Proces AM obsahuje řadu kroků od virtuálního CAD modelu k fyzickému objektu. Na **obrázku č.1** je možné vidět postupný proces výroby pomocí AM, který je níže rozepsán dle jednotlivých očíslovaných kroků.



Obr.č.1 Proces výroby pomocí AM [18]

- 1. CAD** – vytvoření 3D modelu, všechny části jsou popsány modelem, který plně popisuje povrch modelovaných objektů. Tento požadavek splňuje pravděpodobně jakýkoliv profesionální CAD software, ale i celá řada volně dostupných programů.
- 2. Konverze STL** - Téměř všechna zařízení pro AM umí pracovat s STL formátem vstupních souborů, který se stal pro AM standardem. Každý CAD software umí generovat takový výstupní formát souborů. STL soubory popisují uzavřené plochy originálního CAD modelu.
- 3. Import STL do AM zařízení** - STL soubory jsou nahrány do AM zařízení a je možnost jednoduchých úprav jako je velikost a orientace při tisku.
- 4. Nastavení zařízení AM** - Nastavení procesu tisku (teploty, množství materiálu, rychlosti, časování, atd.)
- 5. Tisk objektu** - Proces, který většinou probíhá samostatně bez obsluhy.
- 6. Odstranění objektu** - Po tisku musí být vytištěný objekt odstraněn ze zařízení AM
- 7. Postprocessing** - Vytištěný objekt je nutné většinou upravit, odstranit přebytečný materiál a odstranit podpory pokud byly využity.
- 8. Použití** - Vytištěný objekt je připravený pro použití. [8]

1.2. Vývoj 3D tisku

Konec 80. a začátek 90. let, byl počátkem používání aditivní technologie pro takzvaný rapid prototyping. Prototypy nám nabízí možnost zkoumání a testování daných objektů z blízka a fyzicky si je vyzkoušet, než začne samotná výroba součástí. Rapid prototyping známý jako RP, umožňuje mnohem rychlejší výrobu prototypů, často trvajících několik hodin, ale i několik dní, což závisí na složitosti designu součástí. V RP jsou modely vytvářeny pomocí CAD (computer-aided design) systémů. Kde stroje vyrobí prototyp pomocí vytvořeného modelu. Proces konstrukce tisknutí vrstev součástí je známá jako 3D tisk. Iniciativa 3D tisku vznikla v MIT (Massachusettský technologický institut) a ve společnosti 3D systems. Na začátku 90. let vzniklo na MIT certifikované označení 3D tisku, jako 3DP (3D printing) a tím začala historie 3D tisku. [1]

Společnost 3D systems v čele se spoluzakladatelem Chuck Hull, představila v roce 1986 množství 3D technik. Některé z těchto technologií, jako například stereolitografie (SLA) byla patentována a dostala ochrannou známku. Před koncem 90. let pak Hull pod hlavičkou společnosti 3D systems vytvořil první zařízení tisknoucí v 3D formátu pro širokou veřejnost, tzv. stereolitografický aparát SLA-1, který je uveden na **obrázku č.2**.



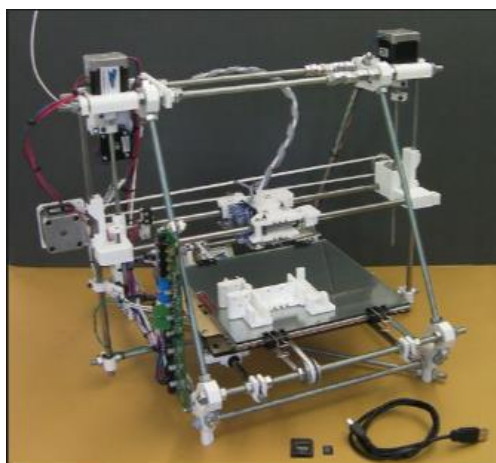
Obr.č.2 stereolitografický aparát SLA-1 [19]

V té době se tomuto zařízení ještě neříkalo 3D tiskárna, nicméně modely SLA se také staly základem vývoje dnešních 3D tiskáren či CNC strojů. SLA -1 byl využíván pouze beta zákazníky a postupně upravován až přišla na svět podoba SLA – 250, která byla nabídnuta široké veřejnosti. [2]

V roce 1987, Carl Deckard, který pracoval na University of Texas, si nechal patentovat RP proces Selective Laser Sintering (SLS). Tento patent byl vydaný v roce 1989

a technologie SLS byla později licencovaná na DTM Inc, kterou později získala společnost 3D systems. Tentýž rok 1989 si nechal Scott Crump, spoluzakladatel společnosti Stratasys Inc. patentovat technologii Fused Deposition Modelling (FDM), který byl vydaný v roce 1992. V roce 1993 MIT patentoval technologii trojrozměrných tiskařských technik, která pracovala s práškovým materiálem a tekutým spojivem. Licenci k této technologii koupila firma Z Corporation a na její bázi započala vývoj 3D tiskáren jako takových. Pojem 3D tiskárna tedy pochází až z druhé poloviny 90. let . [2]

Jedno z nejdůležitějších období v novodobé historii 3D tisku začalo v roce 2005, kdy byl v Anglii na University of Bath založen projekt **RepRap** doktorem Adrianem Bowyerem. Název **RepRap** je zkratkou pro *replicating rapid prototyper*, což znamená že je schopný sebereplikace a rychlého prototypování. Veškerá dokumentace, firmware a řídicí software potřebné pro sestavení a provoz RepRapu, je uvolněna pod licencí GNU (General Public License). Ideou Adriana Bowyera bylo navrhnout 3D tiskárnu, která dokáže vytisknout co nejvíce vlastních součástí. Od začátku byl projekt Open Source, což umožnilo nadšencům z celého světa, zapojení do spolupráce. Díky tomu jsou nyní RepRap tiskárny nejrozšířenějším druhem tiskáren na celém světě. Ukázka RepRap tiskárny je na **obrázku č.3.** [3]



Obr.č.3 Tiskárna RepRap [20]

2. Přehled a princip jednotlivých metod

V současné době existuje celá řada aditivních technologií. Odlišují se způsobem, jakým jsou vytvářeny jednotlivé vrstvy modelu a použitými materiály. Následuje tabulka s přehledem jednotlivých technologií 3D tisku pro názornou představu jak rozmanitý výběr dnes máme, přestože je tato technologie teprve na vzestupu.

Technologie	Popis technologie
Stereolitografie (SLA)	K této metodě se využívá fotopolymer, který po ozáření (nejčastěji UV zářením ztuhne, následně plocha tisku klesne a proces pokračuje další vrstvou. Nevýhoda je pomalá rychlost tisku a problematický tisk vertikálních struktur.
Selective Laser Sintering (SLS)	Metoda je podobná jako SLA, ale zpevňuje se práškové médium. Výhodou je možnost opětovného použití nespotřebovaného prášku. Další výhodou je, že laserové spektrum může být i viditelné světlo (ne jen UV jako u SLA) a k dispozici je široké spektrum materiálů : plasty, kovy, keramika.
Laminated Object Manufacturing	Využívá tenkou plastovou fólii, ze které se výsledná vrstva produktu vyřeže a přilepí lepidlem k ostatním vrstvám. Nevýhodou je až 50% podíl odpadního materiálu oproti materiálu produktu.
Fused Deposition Modeling (FDM)	Používá přímé nanášení materiálu roztavením v hlavě tiskárny a nanáší bod po bodu. Nejčastějšími materiály jsou termoplasty. Je to nejrozšířenější forma 3D tisku. Na rozšíření tohoto typu tisku měl nemalou zásluhu Adrian Bowyer, který v roce 2008 dokázal z 3D tiskárny vytisknout novou 3D tiskárnu a své designy následně uvolnil pod názvem RepRap.
Direct Metal Laser Sintering (DMLS)	Technologie 3D tisku při které se kovový prášek spéká prostřednictvím laserového paprsku do podoby 3D modelu vytvořeného v CAD programech, stejně jako u předchozích technologií. Díly vyrobené pomocí technologie DMLS mají totožné vlastnosti jako díly vyrobené z klasických kovových materiálů pomocí obrábění. Dají se dále upravovat pomocí broušení, leštění, svařování atd.
Powder bed and injekt head	Technologie při které se vrstvy sádrového prášku smíchají s vodou, tak aby vznikla pasta, která se postupně pomocí horkého vzduchu vytvrzuje, tím že se voda odpařuje. Výhodou je rychlost výroby a možnost plnobarevnosti objektu v kompletní škále CMYK. Jako nevýhoda se dá považovat křehkost materiálu a potřeba postprodukce.
Selective Heat Sintering (SHS)	SHS je podobný jako SLS, ale zařízení nepoužívá lasery a ve vertikální ose se posouvá lůžko místo tiskové hlavy. Používá se termoplastický prášek, který je umístěn na lůžku a s kontaktem nahřáté tiskové hlavy se spéká.

Electron Beam Fabrication (EBF)	Proces, který vyvinula NASA a může pracovat skoro s jakoukoliv kovovou slitinou. EBF soustřeďuje paprsek elektronů, kterými spéká kovový materiál ve formě drátu podobným způsobem jako u svařování. Tato technologie byla vyvinuta pro výrobu součástí ve vesmíru.
Electron Beam Melting (EBM)	EBM technologie je velmi podobná technologii EBF, rozdíl je v tom že EBM používá kovový prášek a to převážně Titanové slitiny. Díly vyrobené touto technologií jsou velmi pevné. Proto se používají také pro implantáty ve zdravotnictví.
Selective Laser Melting (SLM)	Používá se především pro kovové slitiny Titanu, Kobalt-chromu, nerezových ocelí a hliníku. Kovový prášek je spékán pomocí laseru stejně jako u technologie SLS. Hodí se pro objekty s dutinami a kanálky. Součásti nejsou tak pevné jako u EBM.
Digital Light Processing (DLP)	Velmi podobná technologii SLA, jediný rozdíl je že SLA používá obvykle UV nebo jinou fotmu laseru, zatímco DLP používá světlo emitované ze zařízení, jako jsou DLP projektory. Velmi přesná technologie oproti FDM, i výrazně rychlejší. Proto je vhodná třeba i na výrobu šperků.

Tab. č.1 Technologie používané při 3D tisku [9]

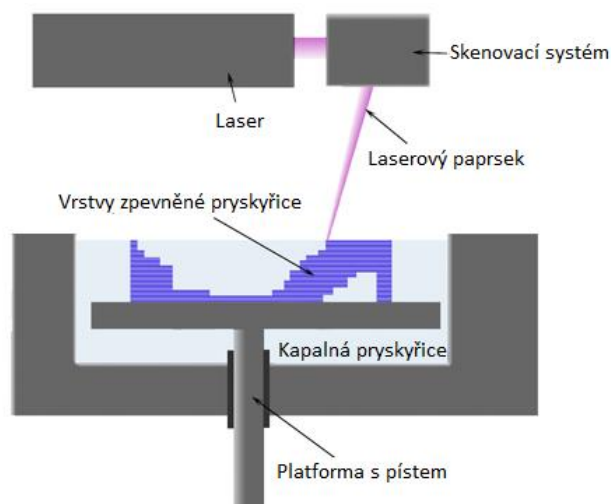
Existuje celá řada klasifikace metod aditivního tisku, kde pravděpodobně nejvíce používaný způsob je klasifikace podle vstupního materiálu. Z výše zmíněných technologií jsem zvolil pro detailnější rozbor pět zástupců kategorií dle vstupního materiálu podle **tabulky č.1**. Z každé skupiny je více rozepsána jedna technologie, krom materiálu z diskretních částic, kde jsou uvedeny dvě technologie a to pro použití plastu a kovu. Mezi tyto technologie jsem zařadil **SLA, SLS, FDM, DMLS a LOM**.

Vstupní materiál	Technologie
Tekutý polymer	Stereolitography - SLA
Diskretní částice	Selective Laser Sintering - SLS, DMLS
Roztavený materiál	Fused Deposition Manufacturing - FDM
Pevné vrstvy	Laminated Object Manufacturing - LOM

Tab. č.2 Rozdělení nejpoužívanějších technologií dle materiálu[16]

2.1. Stereolitografie (SLA)

Při postupu pomocí technologie zvané Stereolitografie, model vzniká působením ultrafialového laserového paprsku na tekutou fotopolymerickou pryskyřici, která je působením laseru ztvrdována ve vrstvách, jejichž tvar vždy odpovídá dané vrstvě řezu STL modelu. Princip této technologie je možné vidět na **obrázku č.4**.

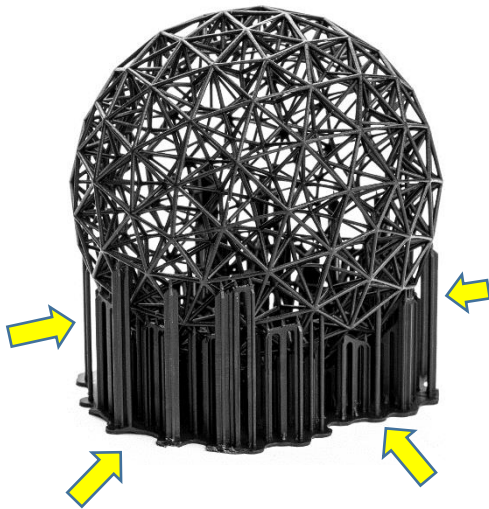


Obr. č.4 Princip technologie SLA [17]

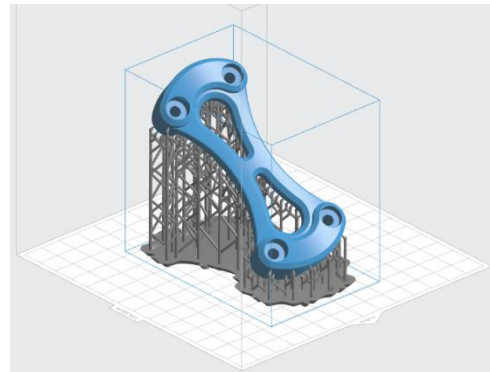
STL(standard tessellation language) – je zkratka pro souborový formát, vycházející z technologie 3D tisku SLA. Byl vyvinut firmou 3D Systems. Soubor popisuje trojrozměrnou povrchovou geometrii modelu a je nejčastěji používán pro export dat do 3D tiskáren z CAD softwaru nebo softwarových 3D modelářů.

Po vytvrzení vrstvy se platforma posune ve vertikálním směru o tloušťku další vrstvy (mezi 0,05 až 0,15 mm), nanese se další vrstva pryskyřice a laser v ní opět vytvrdí vzor dle řezu STL modelu. Pro stavbu tvarově složitějších modelů je při stereolitografii nutno budovat dočasné podpory, které se po vyhotovení modelu manuálně odstraňují. Výhodou stereolitografie je možnost vytvářet velké modely s dobrými fyzikálními vlastnostmi, pro které lze takové výrobky dále obrábět nebo využívat například jako formy pro vstřikování plastů. Zařízením pro stereolitografii je však vlastní vyšší cena, což se týká také používaných materiálů. Na **obrázku č.5** je vidět příklad modelu vytvořeného pomocí technologie SLA. Na spodní straně modelu jsou podpěry (vyznačené pomocí žlutých šipek),

kteře se následně po dokončení tisku manuálně odstraní. **Obrázek č.6** je příklad modelu vytvořeném v programu, než začne samotný 3D tisk. [4]



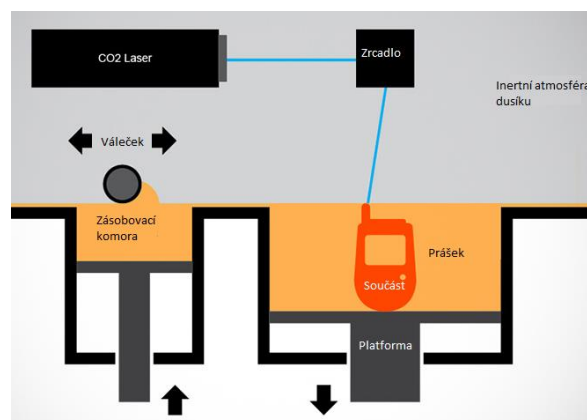
Obr. č.5 SLA vytisknutý model [22]



Obr.č.6 3D CAD model [21]

2.2. Selective Laser Sintering (SLS)

Česky lze přeložit jako selektivní spékání laserem – v praxi se často používá kratší termín „sintrování“. Technologii vyvinuli v polovině osmdesátých let vědci na texaské univerzitě v Austinu, kteří následně založili společnost DTM zaměřenou na výrobu SLS strojů. V roce 2001 tuto firmu koupila konkurenční firma 3D Systems. Výrobek vzniká tavením práškového materiálu (tím může být např. plast, kov, keramika nebo sklo), který je po tenkých vrstvách spékán v ploše řezů dle digitálního modelu vysoce výkonným laserem. Princip této technologie je možné vidět na **obrázku č.7**.



Obr. č.7 Princip technologie SLS [23]

Nejprve je nanášena vrstva prášku v celé ploše stavěcí platformy a stroj tento materiál přehřeje na teplotu blízkou jeho bodu tání, aby laseru umožnil využít veškeré jeho energie ke spečení materiálu v ploše právě vytvářeného řezu modelem. Jakmile laser

osvítí příslušnou plochu, klesne stavěcí platforma o tloušťku jedné stavební vrstvy níže, nanese se další vrstva materiálu a takto se celý proces opakuje až do dokončení výrobku. Výhodou tohoto postupu, kdy je vytvářený model neustále obklopen zbytkovým práškovým materiálem, je eliminace potřeby dočasných podpor. SLS technologie dokáže poskytnout výrobky srovnatelných kvalit, jako konvenční výrobní metody – na rozdíl od nich však může z kovu, keramiky nebo dalších materiálů vytvářet i velmi složité struktury **obr.č.9** nebo funkční součástky. Funkční součástkou je myšlen výtisk, který má okamžitě po dotisknutí finální mechanické vlastnosti. Tento výtisk není křehký a vydrží mechanické namáhání. Například ozubené kolo na **obrázku č.8.** [4]



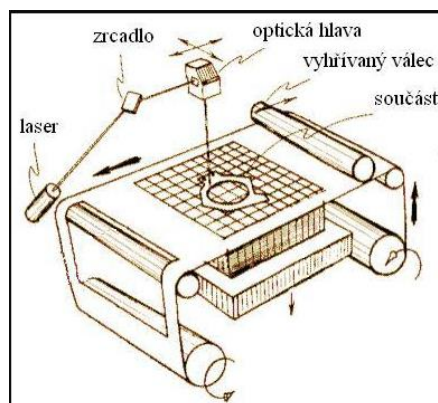
Obr.č.8 SLS vytisknutý funkční model [25]



Obr.č.9 SLS vytisknutý model [24]

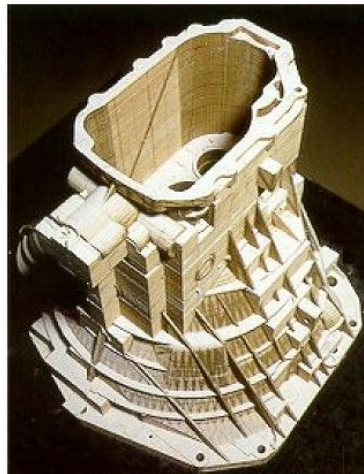
2.3. Laminated Object Manufacturing (LOM)

Technologie LOM byla vyvinuta společností Helisys Inc a je převážně využívána pro prototypování ne pro sériovou výrobu. Vrstvy materiálu jsou postupně nanášeny a lepeny na sebe, jelikož téměř každý materiál může být lepen, je technologie LOM velice univerzální. Princip technologie LOM **obrázek č.10.**



Obr. č.10 Princip technologie LOM [26]

Nejpoužívanější materiál je papír a plast kvůli snadnému dělení, méně využívaný je pak kovový laminát. Každá vrstva je vyříznuta pomocí laseru nebo čepele a plošně přilepena k vrstvě předchozí pomocí nanesené vrstvy lepidla, tloušťka vrstvy objektu je přibližně 0,2 mm. Po dokončení každé vrstvy se platforma sníží o tloušťku vrstvy objektu, tak aby se mohla nanést další vrstva, takto se celý proces opakuje dokud objekt nedostane finální podobu dle 3D modelu. Součásti vytisknuté pomocí této technologie můžou být dodatečně po vytisknutí modifikované pomocí obrábění nebo vrtání. Ukázka modelu vytvořeného pomocí technologie LOM je na **obrázku č.11**. Podpurný materiál se odstraňuje mechanicky. Výhodou je nízká cena stavebního materiálu, rychlost samotného stroje a vysoká kvalita povrchu vodorovných ploch. Avšak nevýhodou je velké množství nevyužitého, tedy odpadního materiálu po vyříznutí což činí zhruba 50% z použitého materiálu. [5]

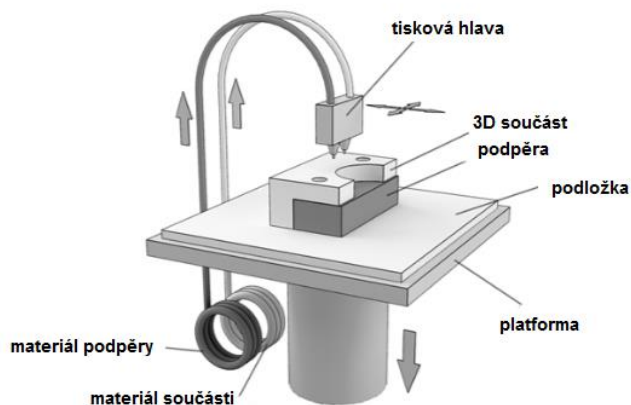


Obr. č.11 LOM vytisknutý model [27]

2.4. Fused Deposition Modeling (FDM)

FDM (Fused Deposition Modeling) nebo také FFF (Fused Filament Fabrication) je pravděpodobně nejpopulárnější technologií 3D tisku, vzhledem k počtu dostupných tiskáren na trhu od základních po profesionální tiskárny vysoké kvality. Princip technologie FDM spočívá v tavení a vytlačování materiálu tryskou ve formě vlákna na podložku, kde je svým pohybem ve dvou osách postupně nanášena velmi tenká vrstva materiálu v rovině horizontálního průřezu budoucího výrobku, která ihned po nanesení ztuhne. Součást vzniká od spodní části k horní. Plastové vlákno nebo kovový drát se odvíjí z cívky a je pomocí šnekového pohonu tlačeno do trysky řízenou rychlostí, kde se nahřeje na určitou teplotu a následně je nanášen. Jakmile je nanášena kompletně celá vrstva, dojde ke snížení podložky

o tloušťku vrstvy (cca 0,25 mm) ve vertikální ose. Tento proces se opakuje dokud produkt nezíská kompletní podobu 3D modelu. Výška vrstvy závisí na kvalitě tiskárny. Na **obrázku č. 12** je možné vidět princip tisku.



Obr. č.12 Princip technologie FDM [28]

Některé tiskárny mohou mít dvě a více tiskových hlav, které mohou tisknout v několika různých barvách či různých materiálech, příklady součástí je zobrazen na **obrázku č. 13**. Je tedy možné vytisknout více barevnou nebo složitější součást, která potřebuje ke zhotovení podpěry u převyslých oblastí. Podpěry se vytisknou z jiného materiálu než je materiál součásti. Tím je jednodušší odstranění podpěr po dokončení tisku. Podpůrný materiál se odstraňuje manuálně. Struktura modelu je hrubá, proto se nehodí na součásti kde je kladen větší důraz na kvalitu povrchu součásti. Nejpoužívanější materiály součástí jsou termoplasty ABS, PLA a polykarbonáty. PVA je používán jako podpůrný materiál. Technologie FDM se využívá i pro medicínské aplikace tkáňového inženýrství. [4] [6]



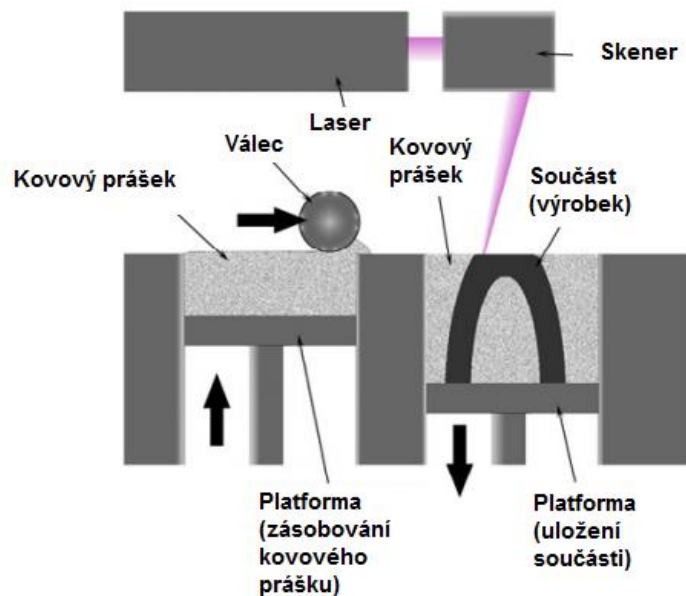
Obr. č.13 FDM vytisknutý model [29]

FDM je cenově dostupný 3D tisk i pro osobní využití ve srovnání s jinými technologiemi 3D tisku. Je ideální pro prototypování náhradních dílů, funkčních modelů,

prototypů výrobních nástrojů i dílů pro konečné využití. Tato technologie stála u zrodu celého hnutí levných 3D tiskáren, jež využívají její odvozeniny (například FFF používaná v projektu RepRap) rozšířené po expiraci původního patentu na FDM v roce 2009.[6]

2.5. Direct Metal Laser Sintering (DMLS) 3D tisk kovu

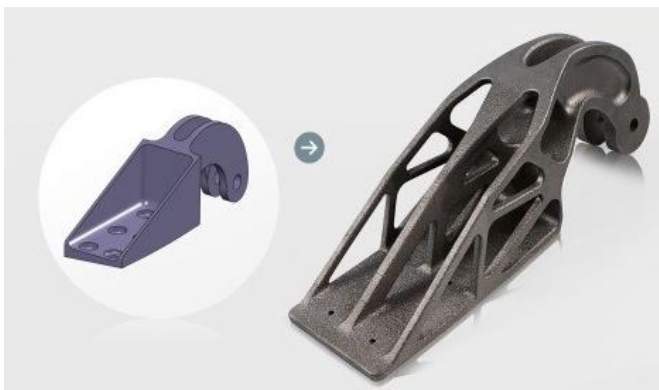
Technologie DMLS slouží pro 3D tisk z kovových materiálů, stejně jako u jiných technologií 3D tisku, produkt nevzniká odběrem materiálu jako u konvenčních metod (např. Obrábění), ale jeho postupným nanášením tenkých vrstev od spodní části po horní do podoby 3D modelu. Tato technologie byla vyvinuta Německou společností EOS, která také poskytla první 3D tiskárnu DMLS v roce 1995 a přišla s možností tisku z titanu. Metoda DMLS je podobná procesu SLS, kdy je materiál v podobě prášku spékán vrstvu po vrstvě pomocí laseru. Hlavním rozdílem je teplota slinování. Polyamid, používaný u metody SLS, potřebuje ke slinování teplotu mezi 160°C až 200°C, zatímco kovový prášek používaný u metody DMLS, má teplotu tání mezi 1510°C až 1600°C. Což znamená, že je zapotřebí laser s vysokým výkonem pro dosažení této teploty. Na **obrázku č.14** je znázorněn princip. [6]



Obr. č.14 Princip technologie DMLS [25]

Princip spočívá v tom že válec nanese vrstvu kovového prášku rovnoměrně po celé platformě a následně je spékán pomocí laseru, který se řídí 3D daty. Po vytvoření vrstvy laserem se platforma posune ve vertikální ose směrem dolů o tloušťku jedné vrstvy a celý

proces se opakuje dokud není vytvořen požadovaný tvar součásti. Po dokončení celého procesu je potřeba nechat součást vychladnout než může být vyjmuta. Pokud byly použity pomocné podpěry, je potřeba je ručně odstranit. Pomocí technologie DMLS je možné vytvářet složité objekty v krátkém časovém intervalu, které není možné vyrobit jinou technologií pro výrobu kovových součástí. Používají se materiály jako například inconel, hliník, nerezová ocel, martenzitická ocel a titan. Díly vytvořené pomocí této technologie jsou pevné, odolné proti opotřebení a tepelně odolné. Kvalita povrchu je nižší, přibližně Ra 12,5. DMLS je zvláště užitečné pro vytvoření unikátních kovových součástí, které jsou plně funkční a rychle k dispozici. Cena součásti se již neodvíjí podle její složitosti, tak jako u jiných technologií, což designerům dává větší možnosti vytvářet složitější a při tom cenově dostupné součásti. Můžou se zaměřit na tvorbu objektů aniž by museli přemýšlet nad možnostmi a složitostí výroby. Součásti jsou o mnohem lehčí, vzhledem k tomu, že jsou vytvořeny pouze z takového množství materiálu, jaký je potřeba, což je velice výhodné zejména pro letecký a automobilový průmysl. **Na obrázku č.15** je vidět rozdíl mezi součástí vytisknutou pomocí technologie DMLS (na pravé straně) a součástí vyrobenou pomocí odlévání (na levé straně). [6] [7]



Obr. č.15 odlévanáná součást (na levo) DMLS (na pravo) [30]

Rekonstrukce poškozených forem – DMLS našlo své uplatnění také při opravách forem. Pokud je rozsah poškození natolik velký, že již nelze využít navařování laserem a je potřeba doplnit určitý objem chybějícího materiálu (například poškozené hrany a rohy), je ideální využít této technologie. Doplněný materiál má v základním stavu mez pevnosti 1100MPa a povrchovou tvrdost 36 až 39 HRC. Pokud však materiál tepelně zušlechťíme, je možné dosáhnout meze pevnosti až 1950MPa a tvrdost 50 až 54 HRC. Díky využití poměrně

nízké teploty se nezmění povrchová tvrdost původního dílu, přičemž doplněná hmota má požadovanou tvrdost. Níže na **obrázku č.16**, je ukázka opravy dílu (části formy). [4]

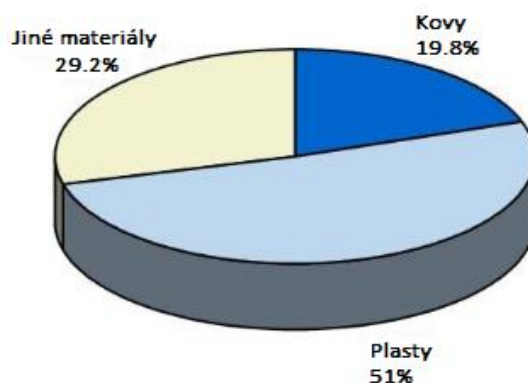


Obr. č.16 DMLS oprava části formy [31]

3. Materiály používané pro 3D tisk

V této kapitole se budeme zabývat materiálovými možnostmi využití u různých technologií 3D tisku a jejich charakteristikami. Kapitola je rozdělena na tři části, **materiály kovové, termoplasty a neobvyklé materiály**.

Materiál, který je možno použít u 3D tisku, bude hrát významnou roli v určování toho, jak a kde bude tento proces využíván. V dnešní době jsou již rozsáhlé materiálové možnosti u aditivní výroby a stále přibývají další, proto se budeme zabývat pouze těmi nejrozsáhlejšími. Na grafu č. 1 je vidět procentuální využití skupin materiálů používaných pro 3D tisk.



Graf č.2 Využití materiálů pro 3D tisk [14]

3.1. Kovové materiály

Průmyslová zařízení mají schopnost používat kovové materiály, což není opravdu volba pro domácí tiskárny z důvodu vysokých nákladů. Kromě použití čistých kovů se hlavně používají slitiny. Hlavní kovy které se v současné době využívají u aditivní výroby jsou:

3.1.1. Slitina hliníku AlSi7Mg0,6

Součásti vytisknuté ze slitiny hliníku AlSi7Mg0.6 jsou vytvořeny z jemného kovového prášku, složené převážně z hliníku (90%), křemíku (7%) a hořčíku (0,6%). Tento materiál má dobré mechanické vlastnosti a může být použit pro díly, které podléhají vysokým napětím. Materiál je odolný a lehký, vhodný pro tvarování. Tato slitina se běžně používá ve slévárnách pro lití součástí se složitou geometrií. Velkou výhodou je nízká

hmotnost součásti. Tyto vlastnosti činí slitinu hliníku $AlSi7Mg0.6$ zvláště vhodnou pro oblast kde je vyžadována vysoká pevnost, nízká hmotnost a dobré tepelné vlastnosti.. Hotový produkt má drsný a zrnitý povrch, což je ve většině případů dostačující, jinak je možné provádět následné povrchové úpravy, dle potřeby. 3D tisk hliníku se provádí pomocí tavení nebo laserového spékání. V současné době existují dvě technologie, DMLS a SLM. Na **obrázku č.17** je možné vidět součást vytisknutou z materiálu $AlSi7Mg0.6$. [6]



Obr. č.17 Slitina hliníku $AlSiMg0,6$ [32]

3.1.2. Slitina titanu Ti64

Součásti vytisknuté ze slitiny titanu Ti64 jsou vytvořeny z jemného kovového prášku, složené převážně z titanu (88-90%), hliníku (5,5-6,5%) a vanadu (3,5-4,5%). Slitina na bázi titanu je velmi tvrdá a vysoce odolná proti kyselinám a oxidaci. Teplota tání je velmi vysoká (1660°C). Má také velmi nízkou toxicitu, což znamená, že mohou být použity v mnoha ohledech. 3D tisk titanem je velmi přesný díky řešení laseru a tloušťce vrstvy, která je (30 až 40 μm). S hustotou materiálu 4.41g/cm³ je slitina velmi lehká a má vynikající mechanické vlastnosti. Vytisknuté části mají matný a lehce drsný povrch. V současné době existují dvě technologie, DMLS a SLM. Na obrázku č.18 je možné vidět součást vytisknutou z materiálu Ti64. Velké využití je v leteckém, automobilovém průmyslu, ale i pro lékařské účely. [6]



Obr. č.18 Slitina titanu Ti64 [32]

3.1.3. Nerezová ocel 316L

Součásti vytisknuté z nerezové oceli 316L jsou vytvořeny z jemného kovového prášku, složené převážně z železa (66-70%), obohacené o chrom (16-18%) nikl (11-14%) a molybden (2-3%). Tento materiál poskytuje vysokou odolnost proti korozi a velkou tažnost. Díky těmto vlastnostem se dá využít v různých průmyslových odvětvích, jako například v medicíně, leteckém a automobilovém průmyslu, hodinářství i výroba šperků. Používá se pro technologii DMLS a SLM. Na **obrázku č.19** je možné vidět součást vytisknutou z nerezové oceli 316L. [6]



Obr. č.19 Nerezová ocel 316L [32]

3.2. Termoplasty

Termoplasty nebo polymery, patří mezi nejlevnější a nejpoužívanější materiály, které mohou být použity v aditivní výrobě. Jsou typické pro komerční 3D tiskárny, které se prodávají pro domácí použití. Mezi hlavní termoplasty používané u 3D tisku jsou - **akrylonitril-butadien-styren (ABS)**, **polylactic acid (PLA)**, **polyvinyl alcohol (PVA)**, **polycarbonate**, **polyetylene terephthalate (PET)**. [10]

3.2.1. Akrylonitril-butadien-styren (ABS)

ABS plast je jeden z nejpoužívanějších materiálů v 3D tisku. Všechny vytisknuté součástky na 3D tiskárnách jsou právě z ABS. Má dobrou tepelnou odolnost a je relativně levný. Jedná se o velmi stálý plast s vysokou pevností. ABS je schopen odolávat teplotám až do 100 °C bez velkých ztrát na pevnosti, jeho tisková teplota se pohybuje kolem 250 °C.

Velká nevýhoda je však jeho tepelná roztažnost, v porovnání s ostatními používanými je na tom nejhůře. To při tisku způsobuje deformaci objektů, a vyžaduje proto vyhřívanou podložku. I tak se však nedají vždy spolehlivě tisknout objekty větší než 15 cm. [3]

3.2.2. Polylactic acid (PLA)

Materiál PLA je nejspíše jako jediný vyroben z kukuřičného škrobu a je tak biologicky odbouratelný v řádu jednotek měsíců. V oblasti 3D tisku je tento materiál velmi rozšířen, hlavně kvůli jeho velmi nízké teplotní roztažnosti, která je tak nízká, že ve většině případů není potřeba vyhřívaná podložka. Prakticky jako jediný se dá použít k tisku velkých objektů přes 20 cm. Mohlo by se zdát, že tento materiál je perfektní, nicméně nevýhoda je v jeho křehkosti (v porovnání s ABS) - výtisky jsou použitelné maximálně do 60 °C, poté materiál začíná být plastický. Může se stát i to, že pokud si necháte vytisknutý objekt na palubní desce auta, po čase se samovolně zdeformuje. Tiskové teploty se pohybují kolem 200 °C. [3]

3.2.3. Polyvinyl alcohol (PVA)

PVA se používá jako materiál pro vytvoření podpěry v rámci procesu aditivní výroby a je úplně rozpustný. Tyto nosiče mohou být odstraněny, jakmile je konečný model vytvořen, stačí je pouze smýt. [10]

3.2.4. Polycarbonate

Polykarbonát je v současnosti nejtvrdějším materiálem, ze kterého je možné tisknout na FDM/FFF 3D tiskárnách. Zároveň je to materiál, který odolává nejvyšším teplotám (až 130°C). Materiál se tedy využívá pro tisk velmi pevných a velmi odolných dílů. Bohužel nevýhodou tohoto materiálu je velká teplotní roztažnost, díky čemuž často při tisku dochází k deformacím modelu, obzvláště těch větších. Materiál se tedy hodí spíše pro tisk malých 3D modelů. [11]

3.2.5. Polyethylene terephthalate (PET)

Stejný materiál, ze kterého si každý den naléváte své oblíbené pití. V poslední době si získává velkou oblibu a to zvláště pro jeho pevnost, stálost a nízkou tepelnou roztažnost.

Bere si tak všechny dobré vlastnosti z ABS a PLA a ty negativní jim nechává. Tepelná roztažnost je velmi malá a to natolik, že opět pro drtivou většinu objektu není třeba vyhřívané podložky. Výtisky z tohoto materiálu lehce odolají i teplotě vyšší než 100 °C, přičemž teploty tisku se pohybují, podobně jako u ABS, kolem 250 °C. Bohužel zatím je většinou dostupný jen v čiré variantě a cenově zhruba o třetinu dražší než ABS. [3]

3.3. Neobvyklé materiály

Polymery a kovy jsou nejběžnější typy materiálů používané v aditivní výrobě, existují však možnosti dalších materiálů, které mohou být použity ikdyž jejich použití není tolik rozšířené. Některé z nich jsou zmíněné v této kapitole, jako například **bio-inkoust a kostní materiál** pro lékařské účely, **potravin, sklo, dřevo, vosk, beton** a spousta dalších.

3.3.1. Bio-inkoust a kostní materiál

3D tisk nachází využití v čím dál širším okruhu, momentálně už i v medicíně, kde se pomocí bio-inkoustu, který je vytvořen z kmenových buněk, tisknou živé tkáně jako například cévy, měchýře, ledvinové části nebo třeba funkční lidské ucho, které je možné vidět na **obrázku č.20**. Tisk probíhá stejně jako při tisku s klasickými materiály, postupným nanášením vrstev.



Obr. č.20 Vytisknuté lidské ucho [33]

Nejsou to jen měkké tkáně které mohou být vytvořeny tímto způsobem. Také nová kost byla úspěšně vytisknuta a vypěstována. Byla použita sloučenina fosforečnanu vápenatého, křemíku, zinku v kombinaci s kostními buňkami. Tím se stimuluje nový růst kostí. Následně je vytištěný materiál rozpuštěn a zůstává pouze nová kost. [10]

3.3.2. 3D tisk potravin

Základem tiskárny jsou chlazené zásobníky s různými jídelními přísadami ve velmi jemné, práškové nebo tekuté formě. Tyto přísady putují do mixéru a tato směs je dopravena k tiskové hlavě. Tisková hlava pak vyrábí potraviny v libovolném množství, libovolného tvaru a složení. Každá částička potravinové směsi může být zároveň individuálně tepelně zpracována, protože lze měnit i teplotu. 3D tisk potravin nabízí řadu potenciálních výhod. Může to být zdravé a šetrné pro životní prostředí. Je možné převést alternativní složky jako jsou proteiny z řas, mangoldu nebo třeba hmyzu do chutných pokrmů. V dnešní době jsou již otevřeny některé restaurace, které používají 3D tisk potravin. NASA poskytla grant na vyvinutí prototypu univerzálního syntetizátoru jídla. Využití by mělo být širší než pro lety do vesmíru. Je vize, kdy bude takovým zařízením vybavena každá kuchyně a kdy bude 12 miliard obyvatel Země koncem tohoto století jíst nutričně přiměřená jídla, syntetizovaná ze zásobníku prášků a oleje, které bude možné koupit v každých potravinách. Příklad jídla vytisknutého takovým způsobem je na **obrázku č. 21**. [12] [15]

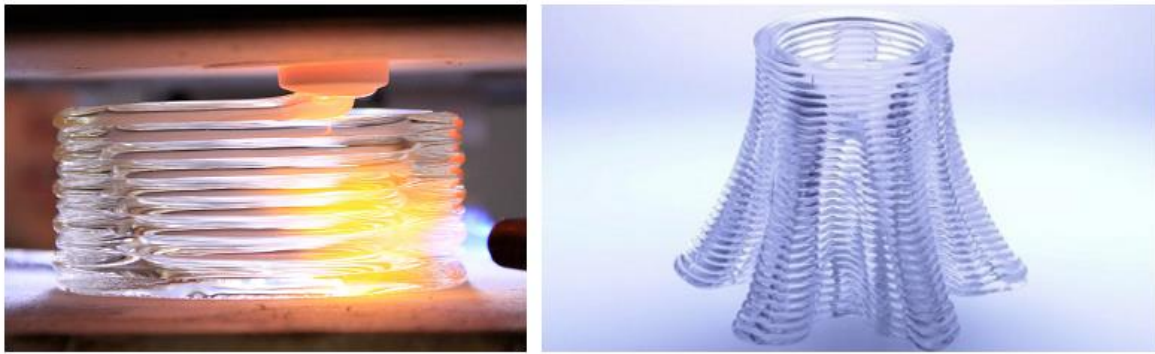


Obr. č.21 Potraviny vytvořené 3D tiskem [15]

3.3.3. 3D tisk ze skla

Skelný materiál je v podobě prášku, tak aby se mohl nanášet v co nejtenších vrstvách dle potřeby. Po dokončení tisku je vyžadováno pečení, před konečným použitím. Prozatím je použití převážně při vytváření umění a dekorací příklad na **obrázku č. 20**.

V blízké budoucnosti se ale směřuje na zajímavé aplikace, jako například ve tvorbě laboratorního skla, konstrukci součástek pro letecké či kosmické technologie nebo na příklad po celém světě experimentuje spousta firem s 3D tiskem čoček do brýlí. Roztavené sklo má při tisku teplotu až 1165 stupňů celsia. [12]



Obr. č.22 3D tisk ze skla [34]

3.3.4. 3D tisk ze dřeva

Výrobek vzniká nanášením tenkých vrstev dřevěných pilin s příměsí látky, která po nanesení vodního aerosolu vrstvu zpevní. Takto lze vytvářet velmi kreativní tvary a dospět k „dřevěným“ výrobkům **obrázek č.23**, jež lze stejně jako běžné dřevo dále opracovávat. [4]



Obr. č.23 3D tisk ze dřeva [35]

3.3.5. 3D tisk voskových modelů

Pro výrobu součástí (např. šperků) z drahých kovů se používá metoda vytavitelného vosku, kde je původní model vytisknut z vosku, následně se vytvoří forma zasypáním voskového modelu nehořlavým pojivem, např pískem, který se udusá. Následně se vosk nechá v peci rozpustit, čímž nám vznikne forma na odlévání kovů, do které se naleje roztavený kov a vznikne konečný model. Tato metoda je specialitovaná spíše pro šperkaře

a výrobu laboratorních pomůcek. Na **obrázku č.24** je vidět voskový model (modrý) a konečný model po odlití. [3]



Obr. č.24 3D tisk vytavitelného vosku [3]

3.3.6. 3D tisk z betonu

Ve stavebnictví se kromě využití 3D tisku pro architekty k tisku návrhů modelů budov, začíná vyvíjet i myšlenka tisku celých objektů z betonu vyztuženém o ocelová vlákna. S tímto převratným využitím technologie 3D tisku přišli vědci z Univerzity v jižní Kalifornii. Metoda je nazvaná Contour Crafting. Hlavní výhodou je rychlost stavby, nízká cena a energetická náročnost. Na **obrázku č.25** je náhled jak takový tisk budovy z betonu bude probíhat. [36]



Obr. č.25 3D tisk budovy (model) [36]

4. Technologičnost konstrukce

Každý prototyp určený k výrobě pomocí technologie 3D tisku by měla být posouzena vhodnost tvaru. Žádná z dostupných aditivních technologií – zejména 3D tisk kovů – zatím nedokáže vyrobit prototyp, který by splňoval vysoké nároky a požadavky na kvalitu i jakost povrchu a geometrickou přesnost. Optimalizované parametry 3D tisku dosahují geometrické přesnosti $\pm 50 \mu\text{m}$ a parametr drsnosti Ra je zpravidla vyšší než $6 \mu\text{m}$ (např. u korozivzdorné oceli). Na řadu pak přicházejí dokončovací operace – tzv. postprocessing.

Prototypy vyrobené 3D tiskem kovů zpravidla vyžadují dokončovací operace (odstranění prototypu ze substrátu, odstranění podpor, obrábění funkčních ploch, broušení a leštění pohledových ploch atd.) Na **obrázku č.26** je vidět bionická součást vytisknutá na podpěrách. [13]

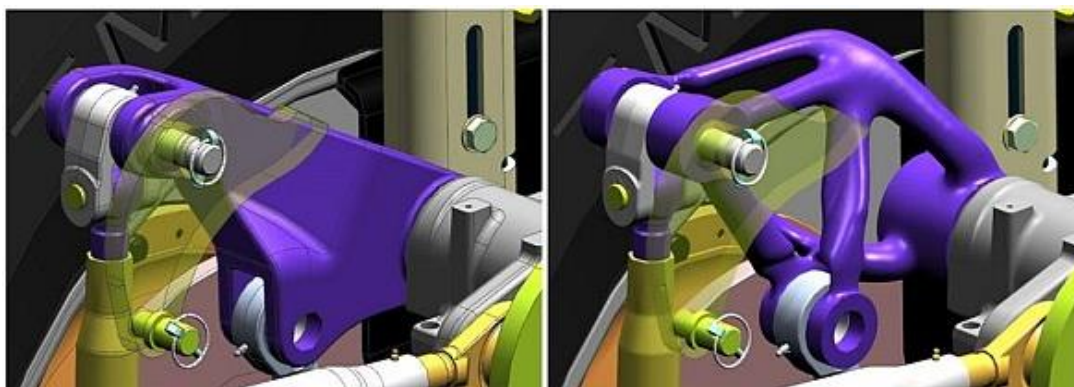


Obr. č.26 Bionická součást na podpěrách [13]

V případech, kdy je model navržen podle standardních konstrukčních zásad, nemusí odpovídat technologičnosti konstrukce modelů určených k výrobě 3D tiskem. Základními nedostatky modelů jsou ostré přechodové hrany, tenkostěnné plochy a malé nebo naopak příliš velké otvory. Takový model je nutné upravit, pokud to záměr návrhu dovolí a konstrukční změny neovlivní funkci dílu.

4.1. Optimalizace topologie vnějších tvarů

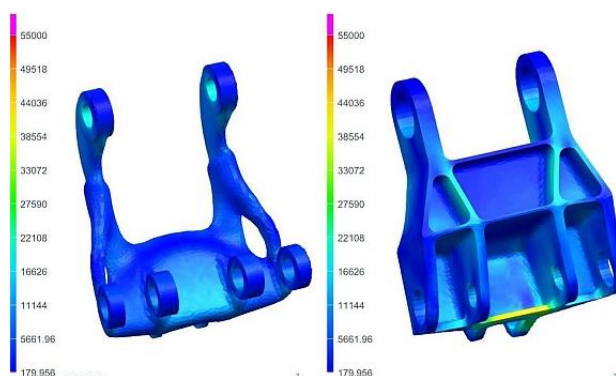
Topologickou optimalizací se rozumí snižování hmotnosti dílů s ohledem na okrajové podmínky (pevnostní namáhání) a výrobitelnost. Pokud se předpokládá výroba aditivní technologií (3D tiskem), může se topologicky navrhnout i tzv. **bionická konstrukce**. Takto jsou označovány díly a sestavy, za jejichž konstrukcí stojí náročné výpočty. Výsledkem bývají netechnicky působící tvary, připomínající zdánlivě biologické struktury. Jak taková struktura vypadá, můžete vidět na **obrázku č. 27** níže. Vlevo je standardní konstrukční návrh vahadla (odlitek), vpravo návrh bionické konstrukce (výroba 3D tiskem). [13]



Obr. č.27 Bionická konstrukce [13]

Optimalizaci je vhodné využít již v prvotní fázi konstrukčních či architektonických návrhů. Porovnání standardního návrhu vahadla (vlevo) a jeho bionické konstrukce (vpravo) s úsporou materiálu (váhy) až 30 %.

Porovnání pevnostních návrhů **obrázek č.28**: bionická, lehká kovová konstrukce (vlevo) a standardní návrh (odlitek).



Obr. č.28 Porovnání pevnostních návrhů [13]

V obou uvedených příkladech splňují návrhy okrajové podmínky (pevnostní namáhání) přičemž bionická konstrukce ušetří mnohdy až 30 % materiálu. Úspora se projeví na celkové váze dílu a sestavy i na finančních nákladech. [13]

4.2. Optimalizace topologie vnitřních tvarů

Další výhodou aditivní výroby je výroba součástí, jejichž model tvoří skořepina (model je zcela dutý) nebo jeho výplň tvoří nosníková konstrukce. Jádro modelu s nosníkovou konstrukcí je duté a ve stěně skořepiny je ponechán malý otvor, kudy je vysypán nespečený prášek. Nosníková konstrukce zvyšuje pevnost dílu a současně snižuje hmotnost jinak plného dílu. Příklad takové konstrukce můžeme vidět na **obrázku č.25**. [13]



Obr. č.29 Vnitřní konstrukce součásti [13]

4.3. Optimalizace pomocí simulace 3D tisku

Simulace 3D tisku je užitečný nástroj, který nám slouží k nasimulování celého procesu před samotným začátkem tisku a tím upravit konstrukci dílu nebo jen pomocných podpěr. Pomocí tohoto nástroje můžeme získat přesnou představu o případných

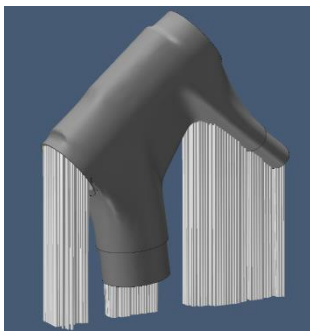
deformacích, zbytkových napětí nebo kompletního zhroucení součásti. Umožní nám navrhnout celý systém tak aby bylo vše optimálně namáhané, rozvržení podpěr, tak aby nedošlo ke kolapsu nebo průhybům, redukuje nám čas a plýtvání materiálu. Účelem je vytisknout součást na poprvé a dobře. K takovým systémům patří například Simufact Additive. Tento systém lze využít u procesů (SLS,SLM,DMLS,EBM). [37]

Výhody simulace:

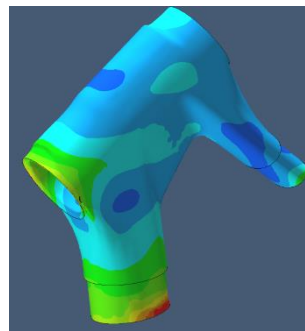
- Výroba na poprvé
- Úspora strojního času
- Úspora materiálu
- Optimalizace počtu a umístění podpěr
- Optimalizace orientace tisku
- Minimalizace zbytkových napětí, deformací

Optimalizace struktury podpěr:

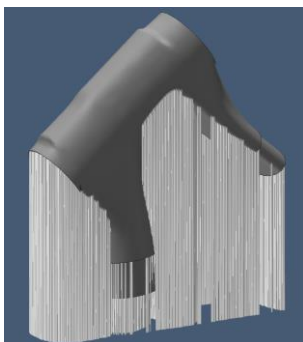
- Určení minimálního počtu potřebných podpěr
- Kontrola vlivu počtu podpěr na deformace a napětí
- Analýza vlivu změny designu a počtu podpěr



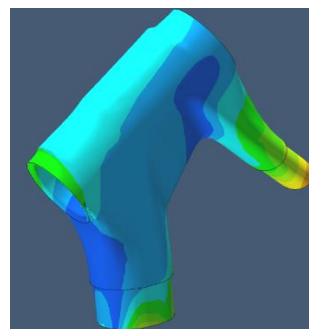
Obr. č.30 Méně podpěr [37]



Obr. č.31 Méně podpěr(větší deformace) [37]



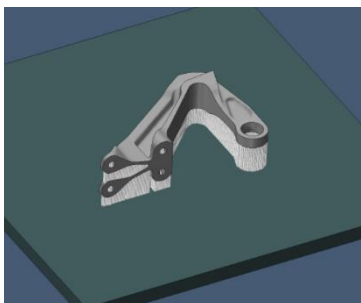
Obr. č.32 Více podpěr [37]



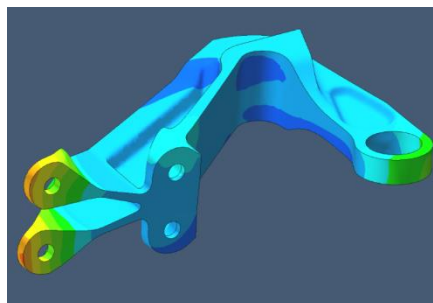
Obr. č.33 Více podpěr(menší deformace) [37]

Optimalizace orientace tisku:

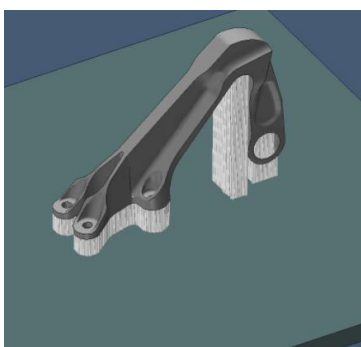
- Porovnání více možností orientace tisku (vertikální, horizontální) a jejich následné namáhání při odstranění součásti od tiskové základny a následně po odstranění podpěr. Po analýze najít optimální řešení orientace tisku.



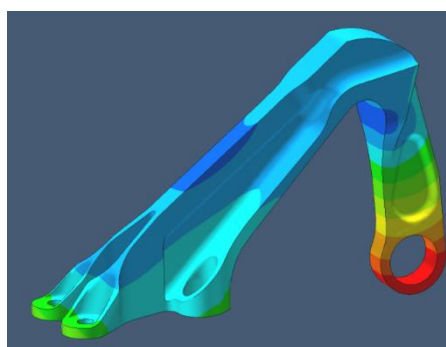
Obr. č.34 Horizontální orientace [37]



Obr. č.35 Působení napětí (horizontální) [37]



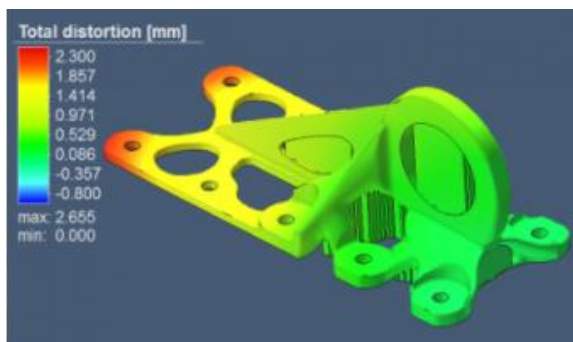
Obr. č.36 Vertikální orientace [37]



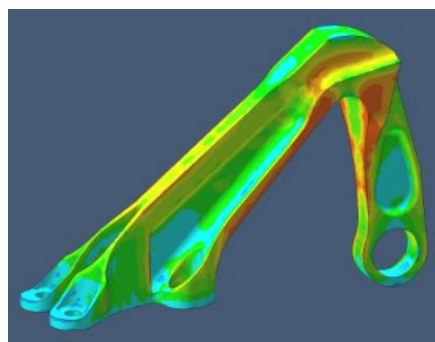
Obr. č.37 Působení napětí (vertikální) [37]

Minimalizace zbytkových napětí a deformací:

- K vyhnutí se následnému praskání a deformacím poslouží analýza průběhu zbytkových napětí po simulaci vytisknutí navrhnuté součásti. Úkolem je detekovat možné deformace a tím se vyhnout následnému vytvoření zmetků.



Obr. č.38 celková deformace v součásti [37]

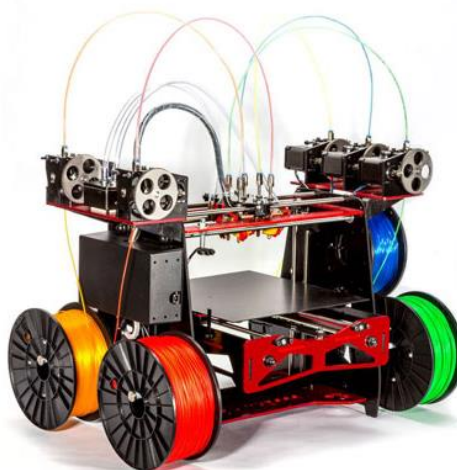


Obr. č.39 zbytková napětí [37]

5. Trendy v oblasti 3D tisku

5.1. Vícebarevný 3D tisk

Jedním z problémů u technologií 3D tisku je, že součásti jsou tištěny pouze jednobarevně. S tím se již v roce 2016 vypořádali některé typy tiskáren, které již podporují vícebarevný tisk. Ovšem zatím se jedná jen o malé množství, což se brzy změní a každý bude mít možnost tisku ve více barvách. V současné době pracuje mnoho společností na vývoji těchto možností tisku. Některé se zaměřují na vývoj nových tiskáren, zatímco jiné na doplňky pro monochromatické 3D tiskové zařízení. Prozatím je cena takových zařízení vysoká a nedokonalá, ale brzy by měla být vlastností každé tiskárny. [12] [38]



Obr. č.40 Vícebarevná 3D tiskárna [39]

5.2. Zlepšení v 3D tisku z kovu

Zaměření se na tisk z kovových materiálů, přinese podnikům velké výhody. Ačkoliv je již 3D tisk kovových předmětů možný, i v dobré kvalitě, je proces pořád poměrně nákladný a omezen na menší součásti. Tisk z kovu je jedním z trendů dnešní doby a situace se v následující době posune směrem k lepšímu. Levnější technologie tisku spolu s možností většího výběru materiálů a tisku větších součástí, může v oblastech jako je například letecký, kosmický průmysl a lékařství, přinést významné změny. Několik společností již pracuje na možnosti použití více materiálů do 3D tiskáren po celém světě. [38]

5.3. Tisk orgánů

Tento koncept se může zdát neobvyklý, ale poslední dobou se farmaceutický sektor posouvá tímto směrem. Není sice zatím možné vytisknout nové srdce, ale vědci experimentují s 3D vytištěnou ledvinou. Největší otázkou je, jak lidské tělo zareaguje na tyto cizí materiály a jak je přijme. V roce 2016 byla testována tepna, jaterní tkáň a různé kosti. Výtisky byly implantovány do živé opice, kde byly přijaty, což je významný pokrok. Není zatím jasné co přinese následující rok, protože je potřeba provést spousty výzkumů, ale vývoj v tomhle oboru se posouvá správným směrem. [38]



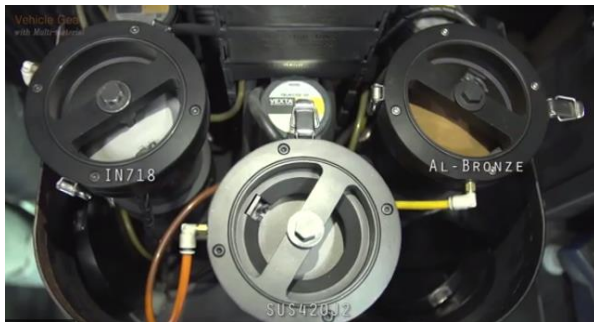
Obr. č.41 Tisk orgánů [40]

5.4. Více materiálový 3D tisk

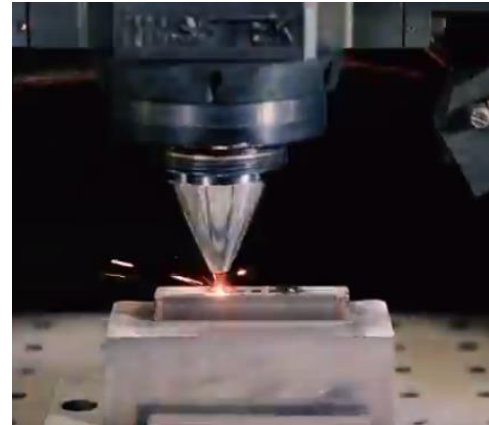
Použití jednoho druhu materiálu je pro 3D tisk už delší dobu normou. I když tím většina spotřebitelů není nijak omezena, výrobci tiskáren pracují na tom, aby umožňovali tisk z více materiálů. Cílem je umožnit více materiálový tisk a to stále za použití jednoho extruderu, který se dnes nachází ve většině 3D tiskáren. To by mohlo být možné použitím například výhybky, která by umožnila střídat více materiálů. Většina fyzických objektů, jak přírodních, tak vyrobených, je složena z různých materiálů. Produkce realistických více materiálových modelů však vyžaduje víceúčelový proces, který se stává nákladný, protože se zavádějí dodatečné výrobní, montážní a dokončovací kroky. Tohle vše by nám odpadlo kdybychom byli schopni vytisknout celý objekt najednou. [38]

Aktuálně se vyvíjí takzvaná tisková hlava "drop-on-demand", která dokáže umístit různé druhy kovových částic při teplotě až 1800 °C. V tiskárně bude více takových hlav,

momentálně je možnost až 4 hlavové tiskárny. Tiskové hlavy jsou staticky uloženy aby se kovy udržovaly ve vysokých teplotách v zásobnících. Plošina, na které lze objekt tisknout se pohybuje pod hlavami. Trikem je poskytnout impuls v pravý okamžik, aby se kovová kapička uložila na předmět ve správné pozici. Další možností je prášek umístěný v hlavě která má dva a více zásobníků jak je vidět na obrázku a následně je materiál tryskán dle potřeby.

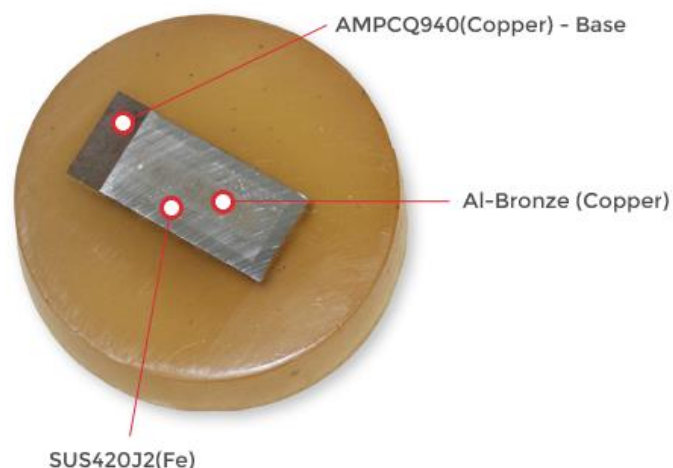


Obr. č.42 zásobníky kovových materiálů [43]



Obr. č.43 ukázka tisku [43]

Velkou výhodou bude možnost rozmístění různých kovů na součásti dle potřeby a požadavků, například v namáhaných místech použít vhodnou slitinu odolnou proti opotřebení, teplotním rázům, s vysokou pevností atd. Razantně se tím může zvýšit životnost součásti. [42] [43]

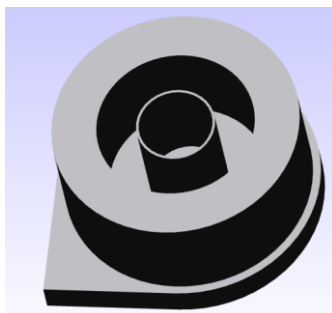


Obr. č.44 vytisknutý vzorek z více kovů [43]

6. Návrh testovacího artefaktu pro posouzení technologických možností AM

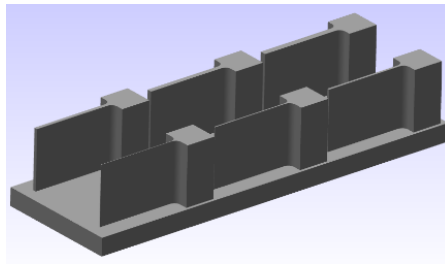
Tento návrh je vytvořen na základě ještě nevydaného standardu ISO/ASTM NP 52902. V poslední kapitole se okrajově věnuji standardům v oblasti AM. Návrh zahrnuje obecný popis srovnávání měření zkušebních součástí vyrobených pomocí různých AM systémů (technologie, zařízení, materiál...) zároveň s kvantitativním a kvalitativním měřením. Tento způsob testování součástí je primárně využíván k posuzování geometrických možností AM systémů. Každá součást je navržena tak, aby se pomocí ní daly zkoumat specifické geometrické tvary. Návrh definuje tvar, rozměry a směr jednotlivých součástí, ale způsob měření ani nastavení tisku u zařízení definován není. Artefakt může sloužit i jako zkušební díl, pro opakované posuzování výsledků na jednom zařízení, například po údržbě nebo kalibraci se součást vytiskne a posoudí s již dříve vytisknutým vzorkem. Do návrhu jsem zařadil níže uvedené díly které jsem usadil na kruhovou podstavu uzpůsobenou pro tisk FDM na dostupných níže uvedených tiskárnách.

- **Kruhový artefakt** – skládá se ze dvou válcových prstenců, vnější a vnitřní, položených na ploché základně, kde jsou součástí dvě roviny, které slouží k rozeznání směru tisku. Artefakt slouží k ověření možnosti tisknout válcové prstence větších i malých průměrů, na základě čehož se zjistí geometrické a rozměrové přesnosti tisku.



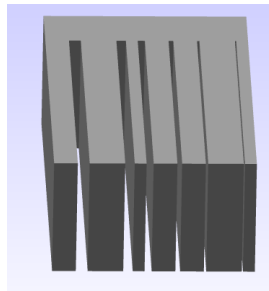
Obr. č.45 kruhový artefakt

- **Vnější žebra** – jedná se o šest žebér různé tloušťky umístěných na obdélníkové podstavě připevněných k sloupkům. Podstatou je zjistit jak tenká žebra je AM systém schopných vytisknout a s jak velkou přesností.



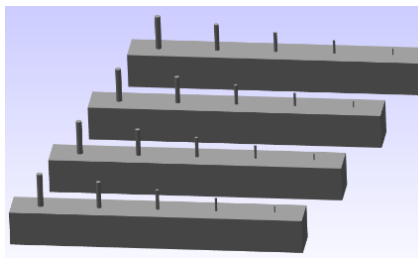
Obr. č.46 vnější žebra

- **Vnitřní žebra** – jedná se o šest vnitřních žebér různé šířky umístěných uvnitř kvádrů. Podobně jako u vnějších žebér je podstatou je zjistit do jak malých rozměrů je AM systém schopný je vytisknout a s jak velkou přesností.



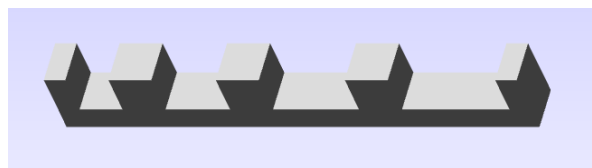
Obr. č.47 vnitřní žebra

- **Sloupky** – následující součást je tvořená ze 4 kvádrů, kde každý je osazený pěti sloupky různých průměrů a výšek. Účelem je zjistit jestli je AM systém schopný tisknout takové detaily a zda se součásti i velmi malých rozměrů dokážou vygenerovat v G-kódu.



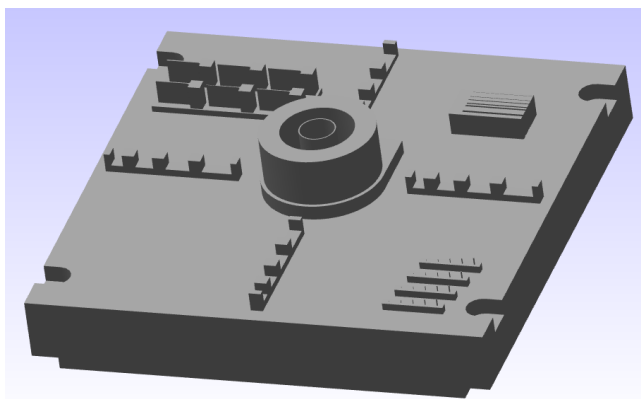
Obr. č.48 sloupky

- **Hřebeny** – tento tvar má za úkol zjistit schopnosti tisku v oblasti orientace součásti. Na artefaktu jsou rozmístěny 4 hřebeny stejné velikosti, každý v jiném směru. Zkoumá se lineární přesnost a rozměry jednotlivých pinů.

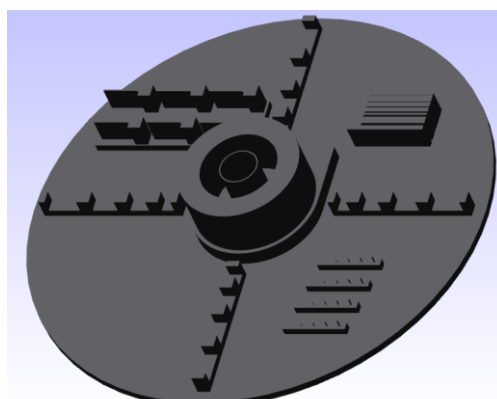


Obr. č.49 hřebeny

Na obrázku pod textem je vidět původně vytvořený testovací artefakt pro metodu tisku z kovu DMLS, kde artefakt je umístěn na platformě. Z důvodu tisku metodou FDM pomocí plastů, byl model upraven dle vyhovujícím rozměrům a umístěn na kruhovou podstavu pro účely měření.



Obr. č.50 Testovací artefakt DMLS



Obr. č.51 Testovací artefakt FDM

Následuje popis jednotlivých kroků získání potřebných dat k provedení tisku artefaktu, který proběhne na dvou zařízeních, pomocí výše popsané technologie FDM. První zařízení Felix Pro 2 s použitým materiálem PLA (žluté barvy). Druhé zařízení je Zoltrax M200 s použitým materiálem ABS (bílé barvy). Po vytisknutí obou modelů proběhne jejich měření a porovnání na souřadnicovém měřícím centru ZEISS PRISMO a na mikroskopu OLYMPUS DSX 110.

- **Vytvoření 3D modelu** - prvním krokem je vytvoření 3D modelu, který plně popisuje povrch všech modelovaných objektů. K vytvoření CAD modelu jsem použil software Catia. Hotový model součástí je umístěný na kruhovou podstavu. Rozměry a umístění jednotlivých součástí je upraven pro tisk FDM oproti standardu.
- **Výkresová dokumentace** – po vytvoření modelu artefaktů je potřeba vytvořit výkresovou dokumentaci aby bylo možné připravit program pro měření na souřadnicovém měřícím. **Výkres je součástí přílohy.**

-
- **Konverze STL** - další krok před začátkem samotného tisku je vygenerování STL formátu z CAD modelu. Tento formát umí generovat každý CAD software a téměř všechna zařízení pro AM s ním umí pracovat. STL formát se stal standardem pro technologii 3D tisku.
 - **Import STL do zařízení 3D tiskárny** - STL soubory jsou nahrány do AM zařízení a je možnost jednoduchých úprav, jako je velikost a orientace při tisku.
 - **Nastavení 3D tiskárny** - Po nahrání STL souboru přichází na řadu nastavení parametrů tisku, u každé ze dvou tiskáren budou parametry trochu jiné, jelikož tisk proběhne ze dvou rozdílných materiálů.
 - **Tisk artefaktů** - samotný tisk může proběhnout bez obsluhy a na dvou zařízeních (Felix Pro 2, Zoltrax M200) čas tisku se liší podle zařízení.
 - **Vizuální kontrola** - Nejprve proběhne vizuální kontrola a porovnání obou vytisknutých artefaktů, pro zjištění nedostatků, popřípadě definování nevytisknutých tvarů a součástí, na kterých nebude dále probíhat měření.
 - **Kontrola a měření na mikroskopu** - Určí se rozměry, které není možné pro jejich tvar či velikost možné změřit na souřadnicovém měřícím zařízení a provede se měření na mikroskopu OLYMPUS DSX 110. Zároveň se provede optická kontrola větších detailů, okem špatně viditelných.
 - **Tvorba programu pro měření** - Na základě dat z výkresu se definuje a vytvoří program měření.
 - **Souřadnicové měření** - Měření proběhne na zařízení ZEISS PRISMO, k čemuž nám poslouží vytvořený program. Zde změříme zbývající rozměrové a geometrické parametry.
 - **Vyhodnocení a porovnání měření** - Výsledkem měření bude protokol, který bude přílohou k této práci a zároveň dojde k porovnání obou součástí a vyhodnocení přesnosti a kvality tisku. **Protokol měření je součástí přílohy.**

6.1. Tisk artefaktu na zařízení FELIX PRO 2

Tisk artefaktu na zařízení Felix Pro 2 proběhl u externí firmy. Technologie tisku u této tiskárny je FDM. Materiál použitý pro tisk byl PLA o průměru struny 1.75 mm žluté barvy. Průměr trysky 0.3 mm o teplotě 215°C. Tloušťka vrstvy je 0.2 mm a celkový čas potřebný k vytisknutí artefaktu byl přibližně 7 hodin. Cena zařízení se pohybuje okolo 70 000 Kč. Na **obrázku č. 52** je vidět zařízení Felix Pro 2.



Obr. č.52 Tiskárna Felix Pro 2

Artefakt se podařilo vytisknout na první pokus a jeho rozbor, měření a porovnání se budu věnovat v kapitole měření. Níže na **obrázku č. 53** je ukázka jak součást z materiálu PLA vypadá.



Obr. č.53 Artefakt z PLA

6.2. Tisk artefaktu na zařízení ZOLTRAX M200

Tisk artefaktu na zařízení Zoltrax M200 proběhl na ČVUT Fakultě strojní - Ústav technologie obrábění , projektování a metrologie. Technologie tisku u této tiskárny je stejně jako u předchozího tisku FDM. Materiál použitý pro tisk byl ABS o průměru struny 1.75 mm bílé barvy. Průměr trysky 0.4 mm o teplotě 220 - 240°C. Tloušťka vrstvy je 0.19 mm a celkový čas potřebný k vytisknutí artefaktu byl přibližně 11 hodin. Cena zařízení se pohybuje okolo 60 000 Kč. Na **obrázku č. 54** je vidět zařízení Zoltrax M200.



Obr. č.54 Tiskárna Zoltrax M200

Artefakt se podařilo vytisknout na první pokus a jeho rozbor, měření a porovnání se budu věnovat v kapitole měření. Níže na **obrázku č.55** je ukázka jak součást z materiálu ABS vypadá.



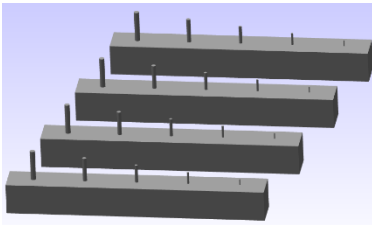
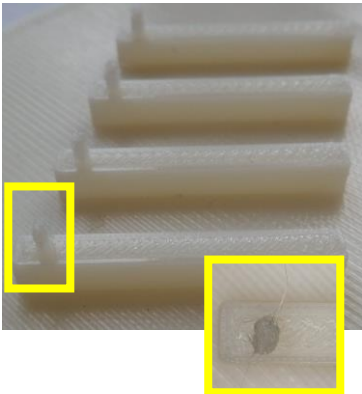

Obr. č.55 Artefakt z ABS

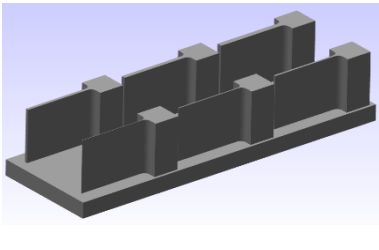
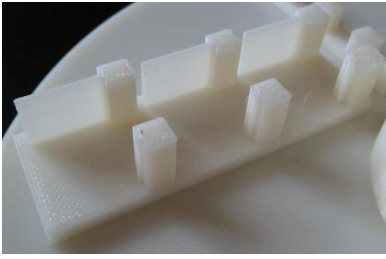
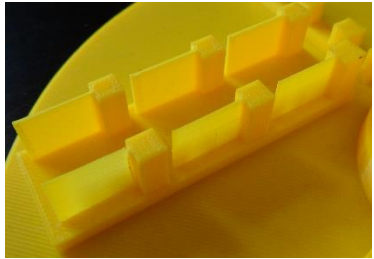
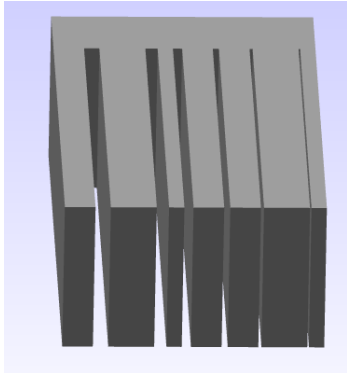
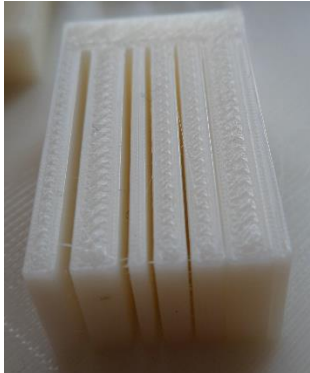
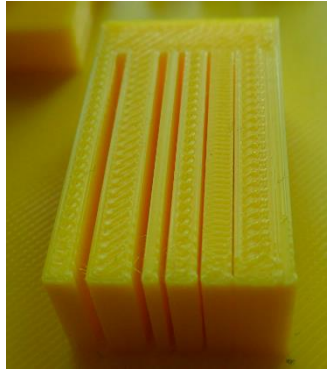
6.3. Měření a porovnání obou vytisknutých artefaktů

Na vytisknutých součástích proběhlo měření a vizuální porovnání v následujících třech kapitolách, první následuje vizuální porovnání, pak měření na mikroskopu a na souřadnicovém měřicím zařízení.

6.3.1. Vizuální porovnání výtisků

Jak již bylo zmíněno tisk proběhl na dvou zařízeních použitím dvou různých materiálů. Žlutý výtisk je z materiálu PLA vytisknutý na zařízení Felix Pro 2 a bílý výtisk z materiálu ABS na zařízení Zoltrax M200. V následující tabulce je porovnání nedostatků vzniklý při tisku, jsou zde zmíněny pouze ty součásti, které nebyly kompletně vytištěny nebo nastaly vizuální chyby.

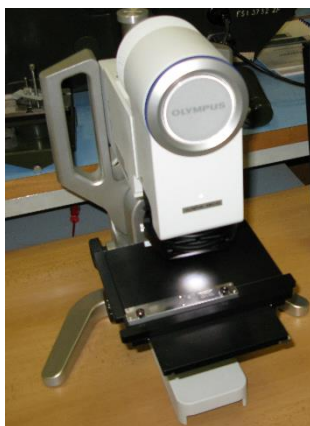
3D model	ABS model (Zoltrax M200)	PLA model (Felix Pro 2)
Sloupky		
		
Zde je vidět jak má součást vypadat, na každém ze čtyř kvádrů je pět sloupků různé tloušťky a výšky	Na obrázku výtisku u modelu z ABS je vidět že se nepodařilo vytisknout žádný sloupek, což není chybou tiskárny, ale chybou SW který nebyl schopen vygenerovat G-kód takto malých rozměrů, chyba tiskárny se projevila jen u sloupku s největším průměrem, který neodpovídá ani tvarem, ani rozměrem.	Na obrázku výtisku u modelu z PLA je vidět že se nepodařilo vytisknout žádný sloupek. Zde se nevygeneroval G-kód ani pro největší průměr sloupku.

Žebra		
		
Zde je vidět jak má součást vypadat, dohromady šest žeber různých tloušťek	Na obrázku vytisku u modelu z ABS je vidět že se podařilo vytisknout pouze tři žebra což jsou žebra s největší tloušťkou (1, 0.8, a 0.6 mm)	Na obrázku vytisku u modelu z PLA je vidět že se podařilo vytisknout všechna žebra i ty nejtenší (1, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2 a 0.1 mm)
Vnitřní žebra		
		
Zde je vidět jak má součást vypadat, dohromady šest vnitřních žeber různých tloušťek	Na obrázku vytisku u modelu z ABS je vidět že se podařilo vytisknout pouze čtyři vnitřní žebra (1, 0.8, 0.6, 0.4 mm) ostatní se při tisku zatavily.	Na obrázku vytisku u modelu z PLA je vidět že se podařilo vytisknout pouze čtyři vnitřní žebra (1, 0.8, 0.6, 0.4 mm) žebro s tloušťkou 0.2 mm se zatavilo na konci, nejužší žebro se zatavilo celé.

Tab. č.3 Vizualní porovnání nedostatků při tisku

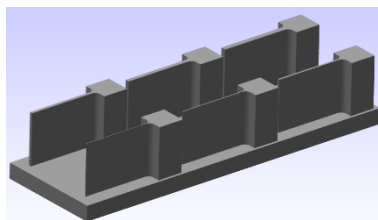
6.3.2. Měření na mikroskopu OLYMPUS DSX 110

Na zařízení Olympus DSX 110, byly měřeny takové rozměry, které nebylo možné změřit na souřadnicovém měřicím zařízení, jedná se o součásti s vnějšími a vnitřními žebry.

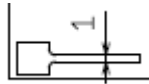

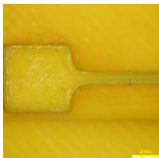

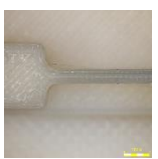
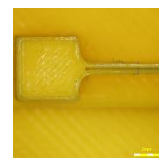








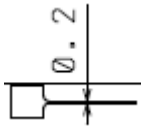
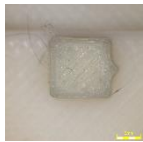

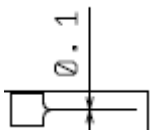

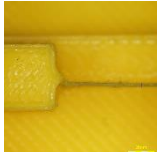
Obr. č.56 Olympus DSX 110

- **Vnější žebra** – součást s vnějšími žebry je příliš křehká a v případě měření na souřadnicovém měřicím zařízení by hrozilo ulomení nejtenších žeber. **Na obrázku č.57** je model součásti.



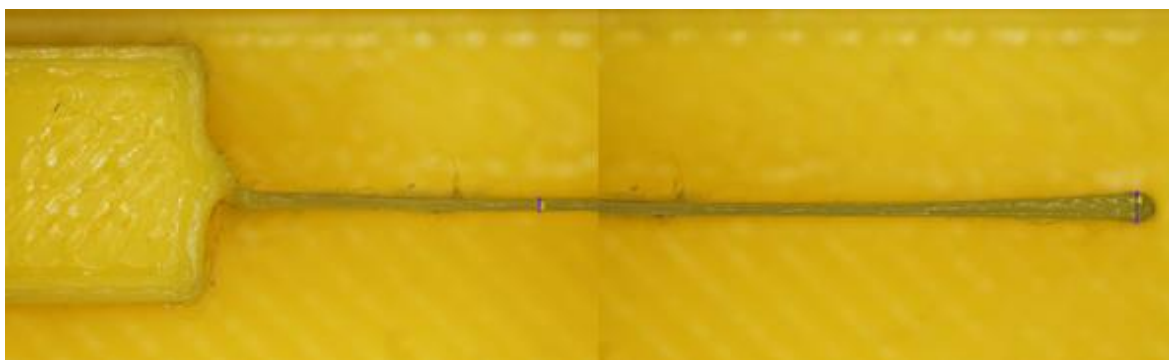
Obr. č.57 Vnější žebra

Kóty (výkresové)	Jm.hod.	Zoltrax M200		Felix Pro 2	
		ABS model	Měř.hod. ABS	PLA model	Měř.hod. PLA
	1 mm		1,202 mm		1,02 mm
	0,8 mm		1,111 mm		0,852 mm
	0,6 mm		0,974 mm		0,685 mm
	0,4 mm		-		0,411 mm

	0,2 mm		-		0,335 mm
	0,1 mm		-		0,213 mm

Tab. č.4 Porovnání měření na Olympus DXS 110

Z výsledků měření vnějších žebër lze vyvodit, že zařízení Zoltrax M200 není schopné vytisknout žebra o tloušťce 0,4 mm a míň. Žebra ostatních tloušťek byly vytisknuté s velkou nepřesností až 0,374 mm u rozměru 0,6. Z toho vyplývá, že čím menší rozměr tím větší nepřesnost tisku žebër. Vhodnější se ukázalo zařízení Felix Pro 2, které vytisklo všechny žebra i s větší přesností, ovšem nedostatky je vidět na obrázcích níže, kde je vidět na **obrázku č.58** ulomené žebro, jedná se o nejtenší žebro, které svou křehkostí nevydrželo namáhání při dokončení tisku. Žebro je přilepené a je vidět že konec žebra je rozšířen několikanásobně oproti jmenovitému rozměru 0,1 mm, rozměr na špičce žebra je 0,533 mm.



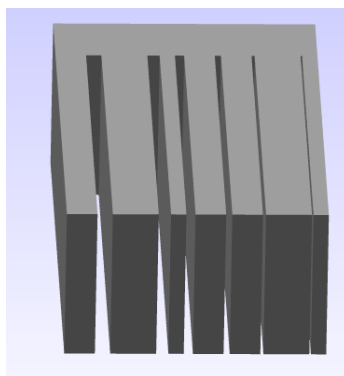
Obr. č.58 Nejtenší žebro (rozšířený konec)

Na **obrázku č.59** je vidět žebro se jmenovitým rozměrem 0,8 mm. Při tisku vznikla dutina uprostřed žebra.






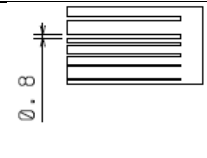
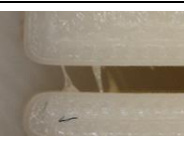
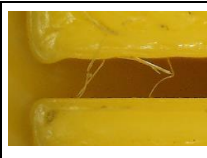
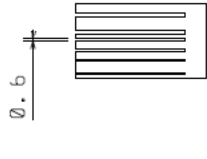


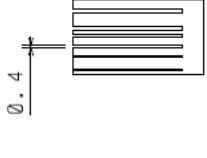


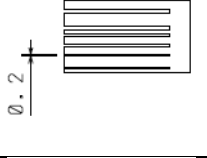


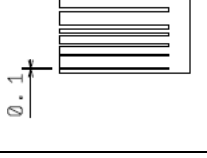


Obr. č.59 Žebro 0,8 mms dutinou uprostřed

- **Vnitřní žebra** - součást s vnitřními žebry nelze změřit na souřadnicovém měřícím zařízení kvůli malým rozměrům u kterých nejde použít měřící sondu . Na **obrázku č.60** je model součásti.



Obr. č.60 Vnitřní žebra

Kóty (výkresové)	Jm.hod.	Zoltrax M200		Felix Pro 2	
		ABS model	Měř.hod. ABS	PLA model	Měř.hod. PLA
	1 mm		0,882 mm		0,913 mm

	0,8 mm		0,624 mm		0,761 mm
	0,6 mm		0,441 mm		0,533 mm
	0,4 mm		0,228 mm		0,289 mm
	0,2 mm		-		0,091 mm
	0,1 mm		-		-

Tab. č.5 Porovnání měření na Olympus DXS 110

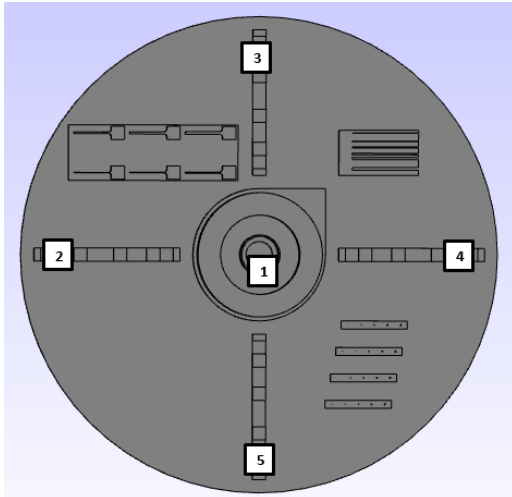
Z výsledků měření vnitřních žebířů lze vidět, že na obou zařízeních není možné vytisknout nejmenší rozměr a u jmenovitého rozměru 0,2 mm nelze vytisknout na zařízení Zoltrax M200, u Felix Pro 2 se sice vytisklo s malou přesností, ale na konci žebra se materiál spekl, jak lze vidět na **obrázku č.61**. Oproti vnějším žebrařům jsou nepřesnosti v mínusových hodnotách. Celková součást vytisknutá na Felix Pro 2 dosahuje vyšších přesností rozměru, ovšem vnitřní povrch na koncích žebířů je více zvlněn než u součásti tisknuté na Zoltrax M200.



Obr. č.61 Žebro 0,2 mm se spečeným koncem

6.3.3. Měření na souř. měřícím zařízení ZEISS PRISMO

Na zařízení ZEISS PRISMO, byly měřeny součásti níže na **obrázku č.62** označeny číslicemi. Kromě rozměrů jednotlivých součástí, byly měřeny i pozice vůči počátku souřadnicového systému a geometrické tolerance jako je válcovitost a kruhovitost. Na dalším **obrázku č.63** je vidět samotné zařízení použité pro měření.

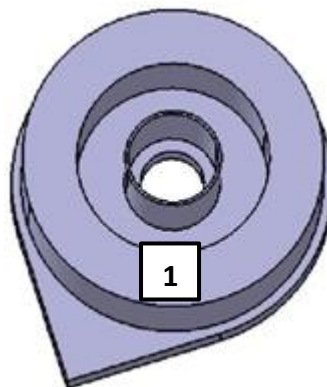


Obr. č.62 Číslování měřených součást

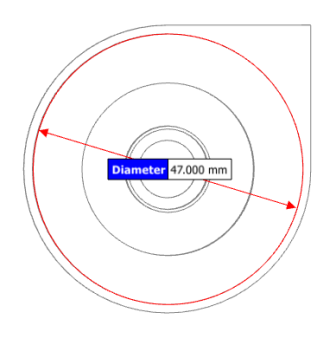
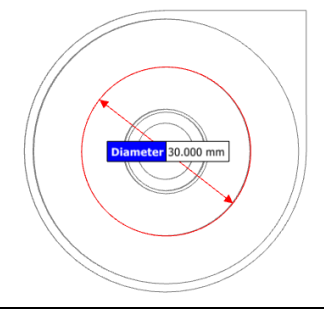
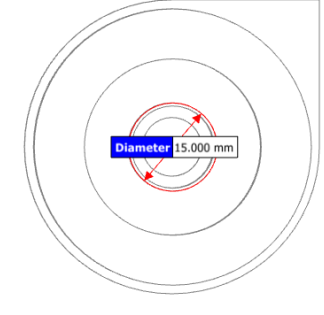
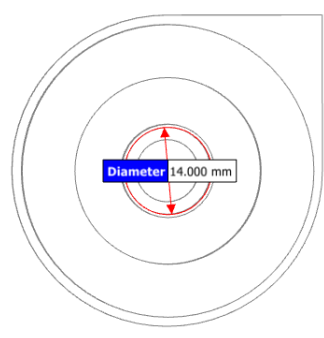
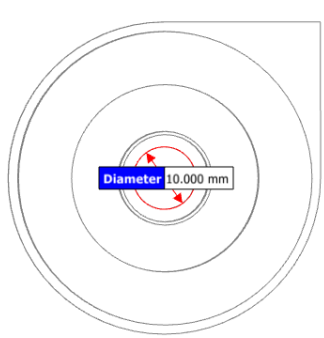


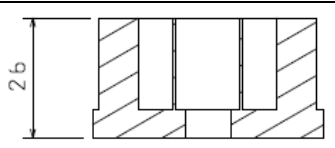
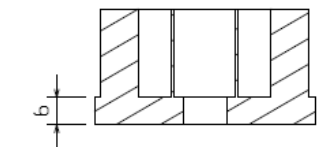
Obr. č.63 Zeiss Prismo

- **Součást č.1** - je umístěna přímo uprostřed artefaktu, jak je zřejmé z obrázku. Na této součásti se měří krom celkových rozměrů (průměrů, výšky) také i geometrické tolerance jako je válcovitost a kruhovitost vnitřní kružnice. Jedná se o součást na **obrázku č.64**.



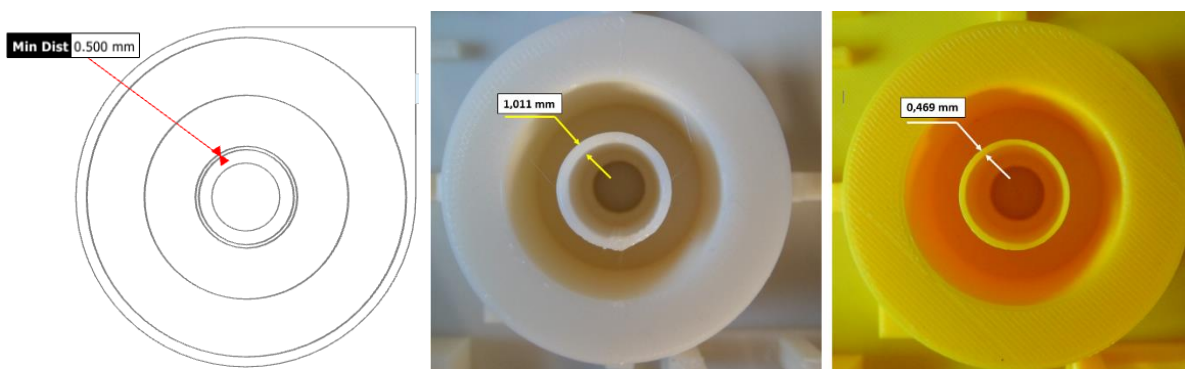
Obr. č.64 Součást č.1

Kóty (výkresové)	Název v protokolu měření	Jm.hod.	Zoltrax M200	Felix Pro 2
			Měř.hod. ABS	Měř.hod. PLA
	Průměr_válec1	Φ 47 mm	Φ 46,882 mm	Φ 46,863 mm
	Průměr_válec2	Φ 30 mm	Φ 29,699 mm	Φ 29,780 mm
	Průměr_válec3	Φ 15 mm	Φ 15,231 mm	Φ 14,763 mm
	Průměr_válec4	Φ 14 mm	Φ 13,209 mm	Φ 13,825 mm
	Průměr_kružnice4	Φ 10 mm	Φ 9,775 mm	Φ 9,830 mm

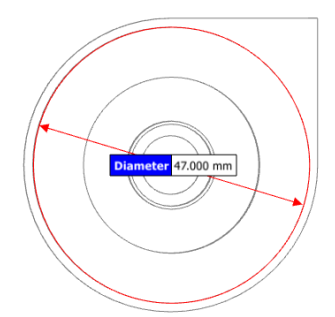
	Rovina2	26 mm	26,047 mm	26,301 mm
	Rovina3	6 mm	5,977 mm	6,272 mm

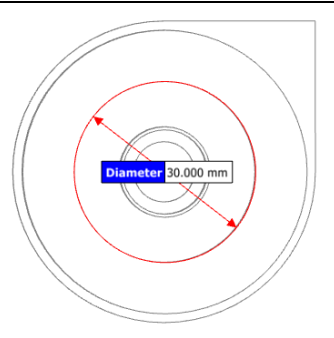
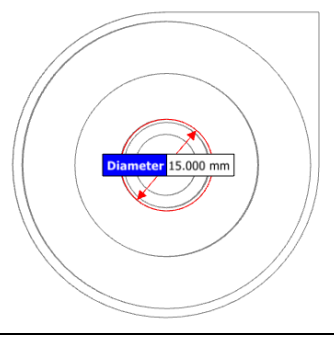
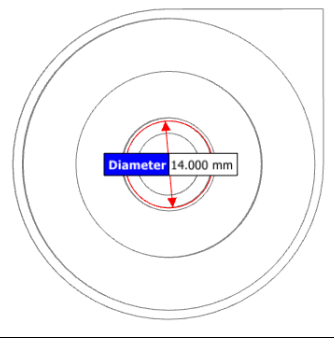
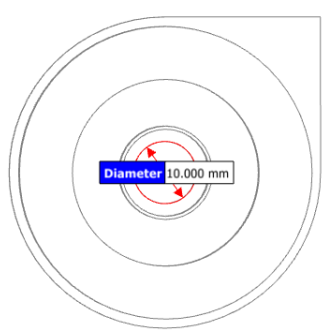
Tab. č.6 Porovnání měření na ZEISS PRISMO součást č.1

Výsledky měření součásti š.1 se u obou artefaktů výrazně nelišily až na výškové rozměry, které jsou přesnější u součásti z ABS. Dalším výraznějším rozdílem je tloušťka prstence na **obrázku č.65**, kde je vidět, že součást vytisknutá na zařízení Zoltrax M200 má oproti jmenovitému rozměru o 0,511 mm větší tloušťku oproti součásti vytisknuté na Felix Pro 2 kde je tloušťka o 0,031 menší.



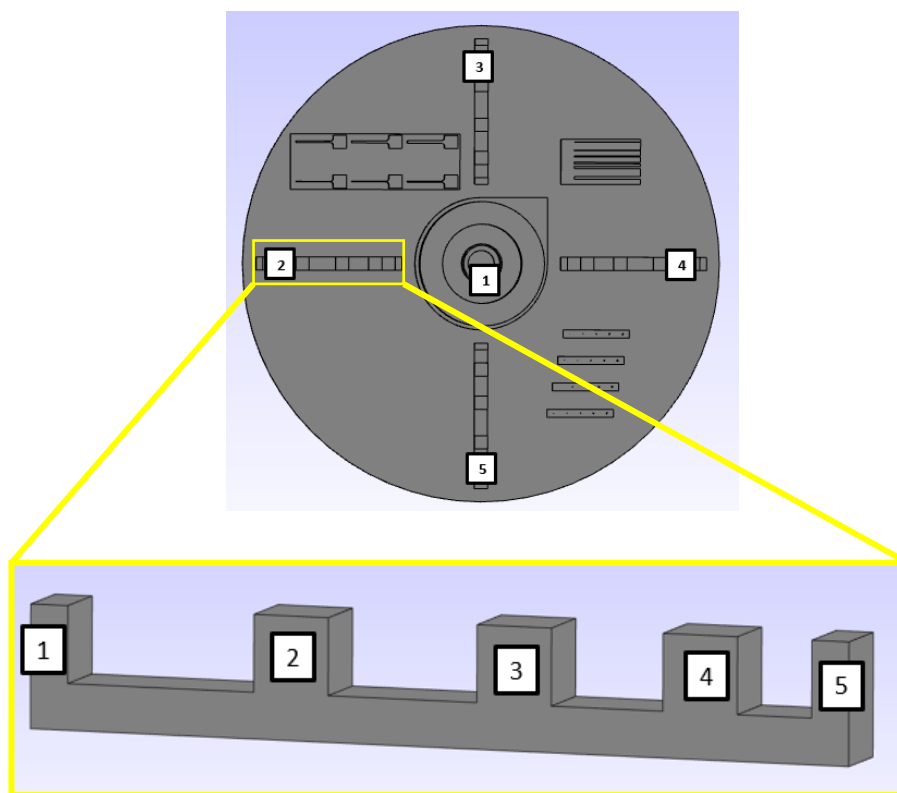
Obr. č.65 Rozdíly u tloušťky prstence

Kóty (výkresové)	Název v protokolu měření	Prvek měření geom. tol.	Zoltrax M200	Felix Pro 2
			Měř.hod. ABS	Měř.hod. PLA
	Válcovitost1	Φ 47 mm	0,176 mm	0,145 mm

	Válcovitost2	Φ 30 mm	0,186 mm	0,125 mm
	Válcovitost3	Φ 15 mm	0,218 mm	0,154 mm
	Válcovitost4	Φ 14 mm	0,207 mm	0,132 mm
	Kruhovitost1	Φ 10 mm	0,085 mm	0,116 mm

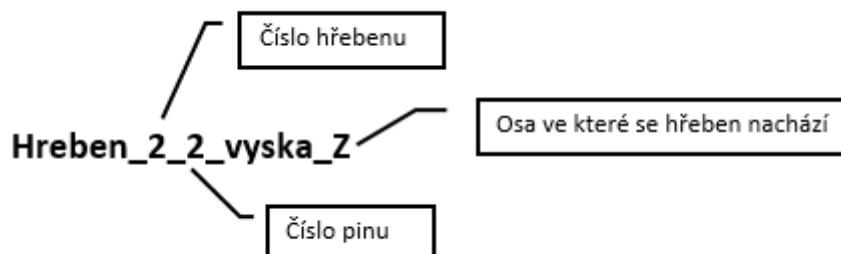
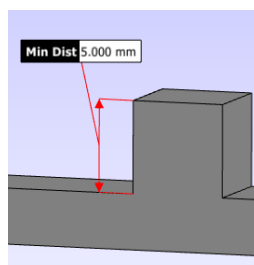
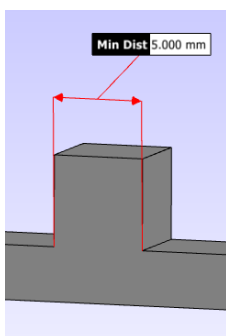
Tab. č.7 Geometrické tolerance

- **Součást č.(2,3,4,5)** – jedná se o čtyři hřebeny, kde každý je jinak orientován vůči počátku souřadnicového systému. Každý hřeben má pět pinů, které jsou označeny číslicemi viz **obrázek č.66**.

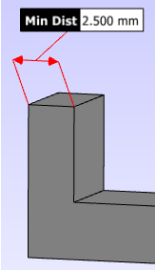
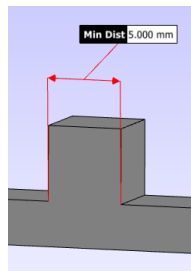
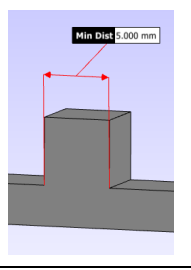
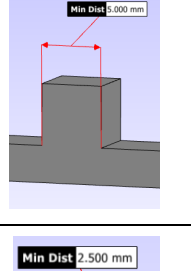
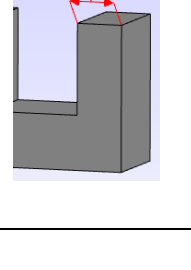
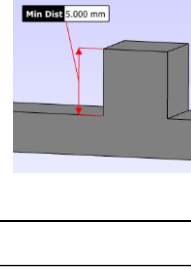


Obr. č.66 Hřeben (značení pinů)

Na každém ze čtyř hřebenů byla měřena výška i šířka každého z pěti pinů. Příklad značení rozměru pinu v protokolu na **obrázku č.67**:

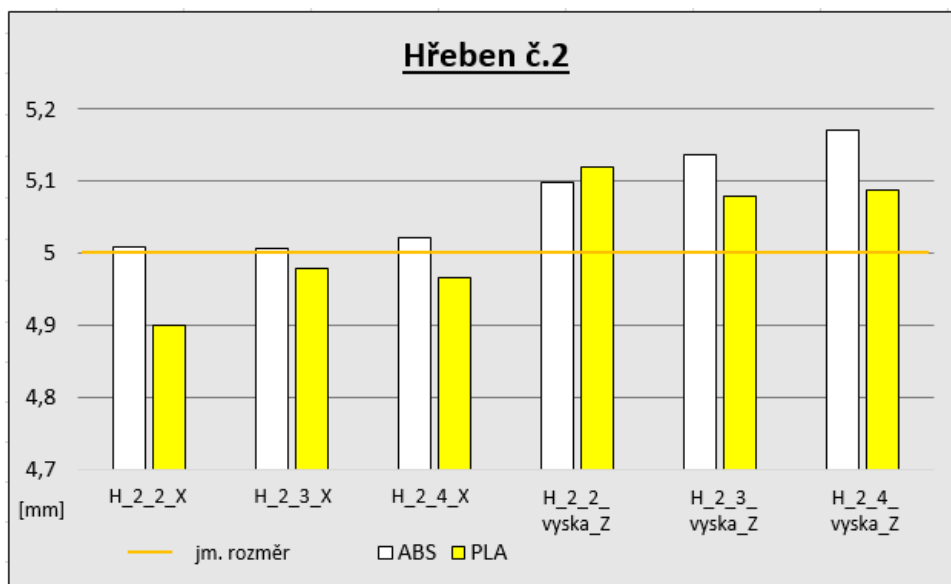


Obr. č.67 příklad značení v protokolu

Hřeben č.2				
Kóty (výkresové)	Název v protokolu měření	Jm.hod.	Zoltrax M200	Felix Pro 2
			Měř.hod. ABS	Měř.hod. PLA
	Hreben_2_1_X	2,5 mm	2,504 mm	2,576 mm
	Hreben_2_2_X	5 mm	5,009 mm	4,900 mm
	Hreben_2_3_X	5 mm	5,007 mm	4,979 mm
	Hreben_2_4_X	5 mm	5,022 mm	4,966 mm
	Hreben_2_5_X	2,5 mm	2,459 mm	2,447 mm
	Hreben_2_2_vyska_Z	5 mm	5,098 mm	5,121 mm

	Hřeben_2_3_vyska_Z	5 mm	5,137 mm	5,080 mm
	Hřeben_2_4_vyska_Z	5 mm	5,171 mm	5,087 mm

Tab. č.8 Rozměry hřebene č.2

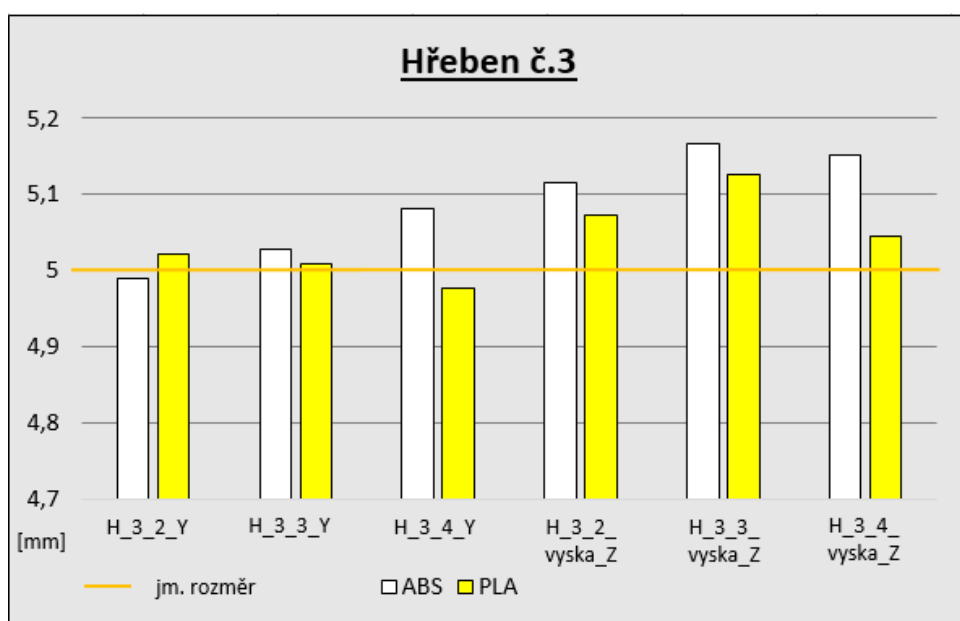


Graf č.3 Porovnání měření hřeben č.2

Z provedeného měření na hřebenu č.2 můžeme vidět že pro takový typ součásti u šířky je více vhodný tisk na zařízení Zoltrax M200 (ABS) u výškového rozměru je na tom lépe Felix Pro 2 (PLA). rozměry jsou přesnější a blíží se k jmenovitým rozměrům. Rozměry hřebenů číslo 3, 4 a 5 budou zobrazeny v následující tabulce již bez grafického zobrazení jmenovitého rozměru.

Hřeben č.3			
Název v protokolu měření	Jm.hod.	Zoltrax M200	Felix Pro 2
		Měř.hod. ABS	Měř.hod. PLA
Hreben_3_1_Y	2,5 mm	2,509 mm	2,577 mm
Hreben_3_2_Y	5 mm	4,990 mm	5,022 mm
Hreben_3_3_Y	5 mm	5,029 mm	5,009 mm
Hreben_3_4_Y	5 mm	5,081 mm	4,978 mm
Hreben_3_5_Y	2,5 mm	2,571 mm	2,512 mm
Hreben_3_2_vyska_Z	5 mm	5,116 mm	5,074 mm
Hreben_3_3_vyska_Z	5 mm	5,167 mm	5,126 mm
Hreben_3_4_vyska_Z	5 mm	5,153 mm	5,046 mm

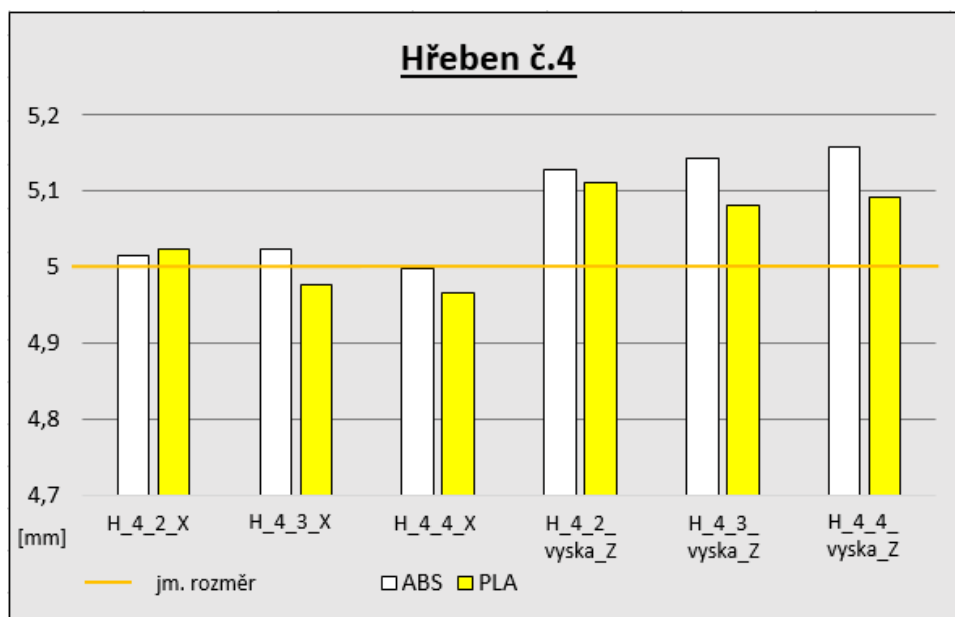
Tab. č.9 Rozměry hřebenů č.3



Graf č.4 Porovnání měření hřebenů č.3

Hřeben č.4			
Název v protokolu měření	Jm.hod.	Zoltrax M200	Felix Pro 2
		Měř.hod. ABS	Měř.hod. PLA
Hreben_4_1_X	2,5 mm	2,514 mm	2,566 mm
Hreben_4_2_X	5 mm	5,015 mm	5,024 mm
Hreben_4_3_X	5 mm	5,025 mm	4,977 mm
Hreben_4_4_X	5 mm	4,999 mm	4,967 mm
Hreben_4_5_X	2,5 mm	2,454 mm	2,558 mm
Hreben_4_2_vyska_Z	5 mm	5,129 mm	5,112 mm
Hreben_4_3_vyska_Z	5 mm	5,144 mm	5,082 mm
Hreben_4_4_vyska_Z	5 mm	5,158 mm	5,092 mm

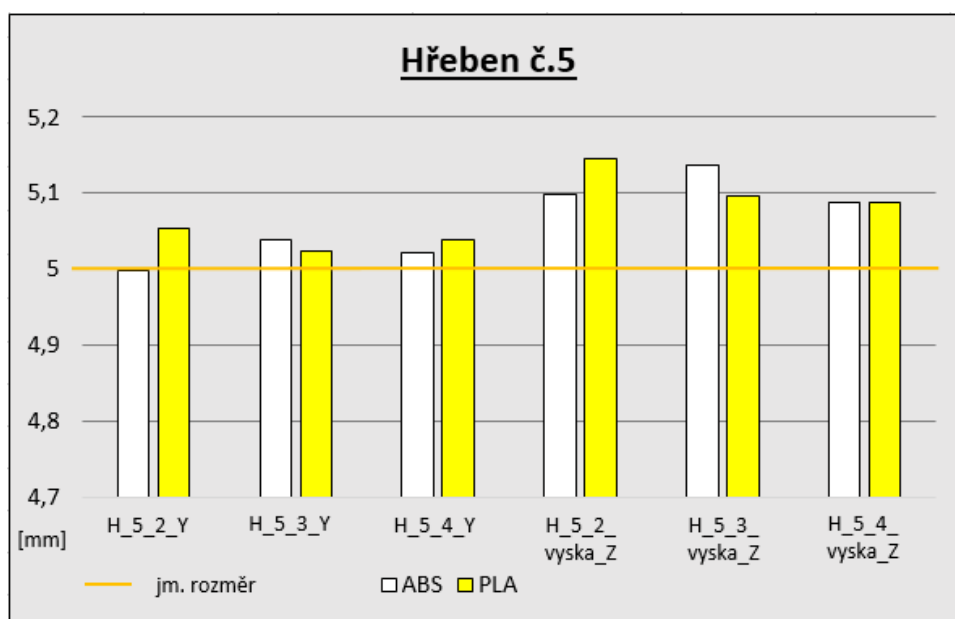
Tab. č.10 Rozměry hřebenů č.4



Graf č.5 Porovnání měření hřebenů č.4

Hřeben č.5			
Název v protokolu měření	Jm.hod.	Zoltrax M200	Felix Pro 2
		Měř.hod. ABS	Měř.hod. PLA
Hreben_5_1_Y	2,5 mm	2,510 mm	2,583 mm
Hreben_5_2_Y	5 mm	4,999 mm	5,054 mm
Hreben_5_3_Y	5 mm	5,038 mm	5,023 mm
Hreben_5_4_Y	5 mm	5,021 mm	5,038 mm
Hreben_5_5_Y	2,5 mm	2,487 mm	2,532 mm
Hreben_5_2_vyska_Z	5 mm	5,099 mm	5,146 mm
Hreben_5_3_vyska_Z	5 mm	5,136 mm	5,097 mm
Hreben_5_4_vyska_Z	5 mm	5,089 mm	5,088 mm

Tab. č.11 Rozměry hřebenů č.5



Graf č.6 Porovnání měření hřebenů č.5

6.4. Standardizace v oblasti AM

Aditivní technologie jsou v současné době na prudkém vzestupu, nejen pro prototypování, tak jak tomu bývalo na počátku, ale čím dál více se začínají tyto technologie využívat i pro výrobu konečných dílů v menších i větších množstvích. Tím vznikla i samostatná kategorie v oblasti norem a standardů ISO/TC 261 Additive manufacturing. Tato norma má již 6 vydaných standardů a 10 ve vývoji. Obsahem těchto standardů je standardizace v oblasti aditivní výroby AM, týkající se jejich procesů, pojmů a definic, procesních řetězců (hardwarových a softwarových), zkušebních postupů, parametrů kvality, dodavatelských dohod a všech základů. Níže jsou dvě tabulky, vytvořené z dat přímo ze stránek ISO.org kde jsou vidět **tabulce č.10** aktuálně vydané standardy a v **tabulce č.11** standardy ve vývoji. [41]

Standard and/or project under the direct responsibility of ISO/TC 261 Secretariat (6)
ISO 17296-2:2015
Additive manufacturing -- General principles -- Part 2: Overview of process categories and feedstock
ISO 17296-3:2014
Additive manufacturing -- General principles -- Part 3: Main characteristics and corresponding test methods
ISO 17296-4:2014
Additive manufacturing -- General principles -- Part 4: Overview of data processing
ISO/ASTM 52900:2015
Additive manufacturing -- General principles -- Terminology
ISO/ASTM 52915:2016
Specification for additive manufacturing file format (AMF) Version 1.2
ISO/ASTM 52921:2013
Standard terminology for additive manufacturing -- Coordinate systems and test methodologies

Tab. č.12 Standardy vydané [41]

Pro návrh artefaktu jak už bylo zmíněno jsem čerpal ze skupiny standardů ve vývoji ISO/ASTM NP 52902, v **tabulce č.11**. Jedná se o testování zařízení a technologií pomocí artefaktů, vytvořených speciálně pro kontrolu a měření schopnosti jednotlivých zařízení

a technologií, vytvářet objekty různých definovaných geometrických tvarů a přesností. Tento standard není ještě plně publikován.

Standard and/or project under the direct responsibility of ISO/TC 261 Secretariat (10)	
ISO/ASTM 52901 [Under development]	Additive manufacturing -- General principles -- Requirements for purchased AM parts
ISO/ASTM NP 52902 [Under development]	Additive manufacturing -- General principles -- Standard test artifacts
ISO/ASTM DIS 52903-1 [Under development]	Additive manufacturing -- Standard specification for material extrusion based additive manufacturing of plastic materials -- Part 1: Feedstock materials
ISO/ASTM CD 52903-2 [Under development]	Additive manufacturing -- Standard specification for material extrusion based additive manufacturing of plastic materials -- Part 2: Process -- Equipment
ISO/ASTM NP 52903-3 [Under development]	Additive manufacturing -- Standard specification for material extrusion based additive manufacturing of plastic materials -- Part 3: Final parts
ISO/ASTM NP 52905 [Under development]	Additive manufacturing -- General principles -- Non-destructive testing of additive manufactured products
ISO/ASTM DIS 52910.2 [Under development]	Guidelines for additive manufacturing design
ISO/ASTM CD 52911-1 [Under development]	Additive manufacturing -- Technical design guideline for powder bed fusion -- Part 1: Laser-based powder bed fusion of metals
ISO/ASTM CD 52911-2 [Under development]	Additive manufacturing -- Technical design guideline for powder bed fusion -- Part 2: Laser-based powder bed fusion of polymers
ISO/NP TR 52912 [Under development]	Design of functionally graded additive manufactured parts

Tab. č.13 Standardy ve vývoji [41]

Závěr

Teoretická část slouží k seznámení s touto rychle se rozvíjející oblastí technologie. V první kapitole je obecné seznámení s principem a postupem 3D tisku, zakončeno podkapitolou o vývoji aditivních technologií. Následuje stručný popis principů jednotlivých technologií, kde je vybráno pět nejpoužívanějších zástupců kategorií dle vstupního materiálu. U každé z pěti technologií je popsán princip s grafickým znázorněním a ukázkou výsledné součásti. Další kapitola je zaměřena na aktuálně používané materiály, která je rozdělena na kovy, termoplasty a neobvyklé materiály. Důležitou kapitolou je technologičnost konstrukcí zaměřená jak na topologickou optimalizaci vnějších tak vnitřních tvarů a s tím související užitečný nástroj simulace 3D tisku. Poslední kapitolou teoretické části jsou trendy v oblasti aditivních technologií zaměřující se na budoucí možnosti, převážně tisku z více materiálů.

Cílem této bakalářské práce bylo zjistit omezující faktory a technologické možnosti aditivních technologií, k tomuhle účelu je v praktické části popsán návrh testovacího artefaktu, který byl následně vytisknut na dvou zařízeních. Pro vymodelování artefaktu jsem zvolil program Catia a následně vygeneroval potřebný formát STL, který slouží k samotnému tisku součásti. Artefakt byl vytisknut na zařízení Felix Pro 2 z materiálu PLA a na zařízení Zoltrax M200 z materiálu ABS, obě verze pomocí technologie FDM. Měření proběhlo v laboratoři ČVUT FS na mikroskopu Olympus DSX110 a na souřadnicovém měřicím zařízení ZEISS PRISMO. Jak porovnání součástí ukázalo, zařízení Felix Pro 2 dokáže vytisknout i ty nejtenší vnější žebra až 0,1mm, ovšem již s menší přesností než je dáno jmenovitým rozměrem, žebra všech tlouštěk jsou v plusových hodnotách. Nepodařilo se však vytisknout sloupky o průměru od 1mm a méně, což však nebylo chybou tiskárny, ale nevygenerováním G-kódu. Ohledně vnitřních žebírek je možné provést tisk do 0,4 mm s malou přesností v minusových hodnotách, u žebírek menších rozměrů dojde ke spečení materiálu. Z grafů měřených hřebenů jde vidět že rozměry obou součástí se pohybují kolem stejných rozměrů v rozmezí plus mínus 0,1 mm. Výsledky tisků a následné měření artefaktů, by se daly použít jako faktor při rozhodování nákupu zařízení dle daného účelu v porovnání s cenou zařízení. Vzhledem k tomu, že zařízení Felix Pro 2 s cenou okolo 70 000 Kč dosáhlo lepších výsledků oproti zařízení Zoltrax M200 s hodnotou kolem 60 000 Kč, je zde výhodnější investovat do mírně dražšího zařízení.

Seznam použitých zdrojů u článků

- [1] *3D printing from scratch* [online]. _: _, 2017 [cit. 2017-07-09]. Dostupné z: <http://3dprintingfromscratch.com/common/history-of-3d-printing/>
- [2] *3D printing industry* [online]. London: 3DPI, 2017 [cit. 2017-07-09]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/about-us/>
- [3] *Základy 3D tisku* [online]. Praha: Prusa Research, 2014 [cit. 2017-07-09]. Dostupné z: <http://www.prusa3d.cz/wp-content/uploads/zaklady-3d-tisku.pdf>
- [4] *3D tisk* [online]. Brno: Nová média, 2014 [cit. 2017-07-09]. Dostupné z: <http://www.3d-tisk.cz/stereolitografie/>
- [5] *Pkmodel* [online]. Praha: PK model, 2006 [cit. 2017-07-09]. Dostupné z: <http://www.pkmodel.cz/3dtisk.html>
- [6] *Sculpteo* [online]. France: Sculpteo, 2009 [cit. 2017-07-09]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/en/glossary/fdm-fused-deposition-modeling-definition/>
- [7] *Stratasys* [online]. Austin: Stratasys, 2017 [cit. 2017-07-09]. Dostupné z: <https://www.stratasysdirect.com/solutions/direct-metal-laser-sintering/>
- [8] *COMTES FHT* [online]. Dobřany: COMTES FHT, 2017 [cit. 2017-07-09]. Dostupné z: <https://www.ctps.cz/cs/uvodni-stranka/soubor-aditivni-technologie/85/>
- [9] *All about 3D printing* [online]. _: All about 3D printing, 2017 [cit. 2017-07-09]. Dostupné z: <http://allabout3dprinting.com/types-of-3d-printing/>
- [10] *Spilasers* [online]. Southampton: SPI LASERS LIMITED, ©2015 [cit. 2017-07-09]. Dostupné z: <http://www.spilasers.com/application-additive-manufacturing/additive-manufacturing-materials/>
- [11] *NC* [online]. Praha: CyberSoft, ©2017 [cit. 2017-07-09]. Dostupné z: <https://www.nc.cz>
- [12] *3dprinting* [online]. _: _, ©2017 [cit. 2017-07-09]. Dostupné z: <https://3dprinting.com>
- [13] *Konstrukter* [online]. Brno: Nová média, ©2017 [cit. 2017-07-09]. Dostupné z: <http://www.konstrukter.cz/2017/01/26/zaciname-s-3d-tiskem-kovu-3-predvyrobni-etapa-topologicka-optimalizace/>
- [16] *Docplayer* [online]. Dobřany: COMTEST FHT, ©2017 [cit. 2017-07-09]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/18792004-Aditivni-technologie-zprava-o-stavu-3d-tisku-proceskou-technologickou-platformu-strojitenstvi-o-s-josef-hodek.html>
- [36] *Topinfo* [online]. Praha: Topinfo, ©2017 [cit. 2017-07-09]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/11123-3d-tisk-a-jeho-vyuziti-ve-stavebnictvi>
- [37] *Simulace 3D tisku* [online]. Hamburg: Simufact, ©2017 [cit. 2017-07-09]. Dostupné z: <https://www.simufact.com/simufact-additive.html>
- [38] *Trendy 3D tisku* [online]. Soquel: themerkle, ©2017 [cit. 2017-07-09]. Dostupné z: <https://themerkle.com/top-4-3d-printing-trends-coming-2017/>
- [41] *Standard test artifacts: Norma ISO/TC 261* [online]. _: _, 2016 [cit. 2017-07-09]. Dostupné z: <https://www.iso.org/committee/629086/x/catalogue/p/1/u/0/w/0/d/0>
- [42] *Multi kovový tisk* [online]. Enschede: Demcon, ©2017 [cit. 2017-07-12]. Dostupné z: <https://www.demcon.nl/en/showcase/the-worlds-first-multi-metal-printer/>
- [43] *Multi kovový tisk* [online]. DAEJEON: InssTek, ©2016 [cit. 2017-07-12]. Dostupné z: http://www.insstek.com/content/multi_materials
-

Seznam použitých zdrojů u grafů

- [14] *Graf procentuální využití skupin materiálů* [online]. _: _, 2016 [cit. 2017-07-09]. Dostupné z: <http://www.plasticsnews.com/article/20170406/NEWS/170409944/wohlers-report-shows-growth-rate-slowing-for-additive-manufacturing>
- [15] *Graf použití aditivních technologií v různých oborech* [online]. _: DocPlayer.cz, 2016 [cit. 2017-07-09]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/18792004-Aditivni-technologie-zprava-o-stavu-3d-tisku-pro-ceskou-technologickou-platformu-strojitenstvi-o-s-josef-hodek.html>

Seznam použitých zdrojů u obrázků

- [17]. Princip technologie SLA
<http://proto3000.com/stereolithography-sla-services-rapid-prototyping.php>
- [18]. Proces výroby pomocí AM – dostupné pod odkazem –
<https://www.ctps.cz/cs/uvodni-stranka/soubor-aditivni-technologie/85/>
- [19]. Stereolitografický aparát SLA-1
<https://sites.google.com/site/sikorovape/home/historie-3d-tisku>
- [20]. Tiskárna RepRap
<http://reprap.org/wiki/File:Reprappro-Mendel.jpg>
- [21]. 3D CAD model
<https://www.3dhubs.com/knowledge-base/how-design-parts-sla-3d-printing>
- [22]. SLA vytisknutý model
<http://www.tested.com/tech/3d-printing/473150-bits-atoms-testing-form-1-sla-desktop-3d-printer/>
- [23]. Princip technologie SLS
<http://www.iotasigma.co.uk/sls.html>
- [24]. SLS vytisknutý model
<http://www.unmannedsystemstechnology.com/company/incodema-group/>
- [25]. SLS vytisknutý funkční model
<http://www.prusa3d.cz/wp-content/uploads/zaklady-3d-tisku.pdf>
- [26]. Princip technologie LOM
<http://slideplayer.com/slide/7054622/>
- [27]. LOM vytisknutý model
<https://www.starrapid.com/blog/top-7-methods-for-making-3d-rapid-prototypes/>
- [28]. Princip technologie FDM
<http://engatech.com/difference-fdm-polyjet-3d-printing/>
- [29]. FDM vytisknutý model
<https://www.mcad.com/3d-printing/3d-printing-materials/fdm-materials/>
- [30]. Odlitek a DMLS model
<http://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/6824/Miniature-DMLS-Prints-Tiny-Metal-Parts.aspx>
- [31]. DMLS vytisknutý model
<https://www.3d-tisk.cz/technologie-dmls-pri-opravach-forem-prostrednictvim-3d-tisku-kovovym-materialem/>
- [32]. Kovové materiály

-
- <https://www.sculpteo.com/en/materials/metals/slm-aluminum-material/>
- [33]. 3D tištěné ucho
<http://www.osel.cz/6929-3d-tistene-modely-srdce-a-bionicke-usi-prijimajici-radio.html>
- [34]. 3D tisk ze skla
<http://www.3dees.cz/a-sklari-nebudou-mit-co-zrat-mit-prislo-s-3d-tiskarnou-na-sklo/>
- [35]. 3D tisk ze dřeva
<https://www.3d-tisk.cz/architekt-vyvinul-3d-tisk-z-dostupnych-materialu-z-cementu-soli-a-drevenych-pilin/>
- [39]. Vícebarevná tiskárna
<http://www.3dprinterworld.com/article/rova3d-offers-multi-color-multi-material-3d-printing>
- [40]. Tisk orgánů
<https://www.cad.cz/aktuality/77-aktuality/4886-3d-tisk-lidskych-organu-bude-od-roku-2016-pravne-regulovan.html>