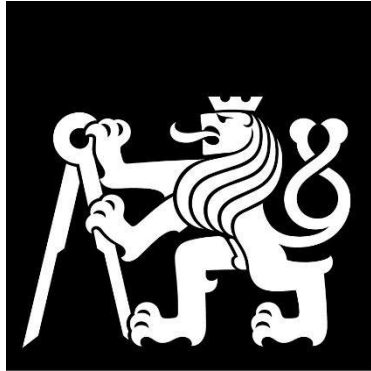


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

DĚLENÍ ADITIVNÍCH TECHNOLOGIÍ VČETNĚ TYPICKÝCH
APLIKACÍ V PRŮMYSLU

Vedoucí práce: Ing. Libor Beránek, Ph.D.

Ondřej Poskočil

Leden 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Poskočil** Jméno: **Ondřej** Osobní číslo: **466534**
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:

Dělení aditivních technologií včetně typických aplikací v průmyslu

Název bakalářské práce anglicky:

Categorization of additive technologies, including typical applications in industry

Pokyny pro vypracování:

1. Aditivní technologie výroby a moderní vývojové trendy.
2. Dělení technologií aditivní výroby a popis základních funkčních principů.
3. Vhodné aplikace dle jednotlivých principů.

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: **30.10.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **17.01.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: _____



Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce



Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
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.

1.12.2020

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem tuto práci dokončil samostatně a uvedl jsem všechny použité zdroje a literaturu.

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). Souhlasím také s případnou publikací výsledků bakalářské práce nebo její podstatné části, pokud budu uveden jako její spoluautor.

V Praze dne 17. 1. 2021

.....

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat hlavně svému vedoucím doktoru Beránkovi za pomoc při zpracování praktické části a také za cenné náměty a připomínky pro zpracování práce. Dále také rodině a přátelům za morální podporu při psaní práce a studiu jako takovém.

Abstrakt

Tato práce pojednává o aditivních technologiích výroby, moderních vývojových trendech, dělení technologií aditivní výroby, vhodných aplikací jednotlivých principů v průmyslu, popisu základních funkčních principů a také o topologické optimalizaci ve výrobě obecně. Aditivní technologie jsou zde rozděleny do sedmi kategorií na základě technologických principů, a to material extrusion, powder bed fusion, vat photopolymerization, material jetting, binder jetting, sheet lamination, direct energy deposition. Konkrétní technologie spadající do zmíněných kategorií jsou zasazeny do kontextu a principiálně popsány. Dále jsou popsány jejich možné aplikace v různých odvětvích průmyslu, jako je automobilový průmysl, kosmonautika, letectví, zdravotnictví, high-pressure casting, lost wax casting, spotřební průmysl, luxusní zboží, či stavebnictví. Společně s možnými aplikacemi technologií jsou zde popsány i současné trendy ve výrobě, moderní vývojové trendy a krátké pojednání o možné budoucnosti těchto technologií, jako je například bourání konvenčních hranic výrobního procesu, kde se konzument pozvolna stává i výrobcem. V porovnání s ostatními aditivními technologiemi se práce o něco více podrobněji věnuje technologii tisku FDM jakožto technologii komerčně nejrozšířenější. Společně s popisem je zde i vlastní praktická ukázka tisku, kde je současné hobby FDM zařízení porovnáno se dvěma zařízeními střední třídy na základně měření kvality tisku pomocí přístroje výpočetní tomografie. Praktickou ukázkou je zde obohacena i část topologické optimalizace ve výrobě.

Klíčová slova:

Additive Manufacturing, Fused Deposition Modeling, Topologická Optimalizace

Abstract

This thesis deals with additive manufacturing technologies, modern development trends, division of additive manufacturing technologies, suitable applications of individual principles in the industry, description of basics and functional principles, and topological optimization in production. Additive technologies are divided into seven categories based on technological principles, namely material extrusion, powder bed fusion, vat photopolymerization, material jetting, binder jetting, sheet lamination, direct energy deposition. Specific technologies falling into the mentioned categories are put into context and described in principle. Furthermore, their possible applications are described among various industries such as the automotive industry, aviation, aerospace, healthcare, high-pressure casting, lost wax casting, consumer industry, luxury goods and civil engineering. Apart from the possible applications of technologies, current trends in production, modern development, or a short discussion of the potential future of these technologies are described as well, such as breaking down the conventional boundaries of the production process where the consumer becomes a producer. The work deals with FDM printing technology in a little more detail compared to the other additive technologies, as it is the most commercially widespread technology. There is also a practical demonstration of printing, where the current hobby FDM device stands against two middle-class devices. The comparison is based on measurements of print quality using a computed tomography device. Chapter of the topological optimization in production is also enriched with a practical example.

Keywords:

Additive Manufacturing, Fused Deposition Modeling, Topological Optimization

Obsah

| | | |
|-----|---|----|
| 1. | Úvod | 9 |
| 2. | Aditivní technologie..... | 11 |
| 2.1 | Obecný postup v praxi | 14 |
| 2.2 | Rozdíl mezi AM, CNC obráběním a sléváním | 14 |
| 3. | Dělení dle standardu ASTM | 17 |
| 3.1 | Material extrusion | 18 |
| 3.2 | Powder Bed Fusion | 23 |
| 3.3 | Vat Photopolymerization Processes | 28 |
| 3.4 | Material Jetting | 31 |
| 3.5 | Binder Jetting | 32 |
| 3.6 | Sheet Lamination | 34 |
| 3.7 | Direct Energy Deposition | 36 |
| 3.8 | Porovnání aditivních technologií | 38 |
| 4. | Aplikace v průmyslu | 39 |
| 4.1 | Automobilový průmysl | 39 |
| 4.2 | Kosmonautika a letectví | 40 |
| 4.3 | Zdravotnictví | 41 |
| 4.4 | High-pressure casting, Lost wax casting | 42 |
| 4.5 | Spotřební průmysl, luxusní zboží | 44 |
| 4.6 | Stavebnictví | 45 |
| 5. | Moderní vývojové trendy | 46 |
| 6. | Možnosti topologické optimalizace ve výrobě | 49 |
| 6.1 | Ukázka topologická optimalizace | 49 |
| 7. | Porovnání kvality tisku FDM | 53 |
| 7.1 | Testovací vzorky | 53 |
| 7.2 | Použitá měřidla | 54 |
| 8. | Výsledky | 55 |
| 8.1 | Porovnání testovacích vzorků..... | 55 |
| 9. | Závěr | 65 |
| | Seznam obrázků | 67 |
| | Literatura | 71 |

Seznam použitých zkratek

ABS - Akrylonitrilbutadienstyren
AM - Additive manufacturing - Aditivní výroba
ASTM - American Society for Testing and Materials
AT - Additive Technology – Aditivní technologie
BJ - Blinder Jetting
CNC - Computer Numeric Control
DED - Direct Energy Deposition
DLP - Digital Light Processing
DMLS - Direct Metal Laser Sintering
EBM - Electron Beam Melting
FDM - Fused Deposition Modeling
LENS - Laser Engineered Net Shaping
LOM - Laminated Object Manufacturing
ME - Material Extrusion
MIT - Massachusetts Institute of Technology
MJ - Material Jetting
PBF - Powder Bed Fusion
PLA - Polylactic Acid
RIC - Rapid Investment Casting
RP - Rapid Prototyping
SL - Sheet Lamination
SLM - Selective Laser Melting
SLS - Selective Laser Sintering
SW - Software
TO - Topology Optimization
VP - Vat Photopolymerization

ÚVOD

Všudypřítomnost AM kolem nás a čím dál tím častější výskyt nejen ve strojírenském průmyslu vzbuzuje poslední dekády velký zájem nejen expertů, ale i široké veřejnosti. Čím dál tím více je v médiích slyšet o revolučních výtiscích nejrůznějších tvarů a struktur napříč všemožnými odvětvími. Každému se také jistě vybaví sci-fi vize domácí tiskárny, která stisknutím tlačítka zázračně zhmotní vše od snídaně až po jízdní kolo. Otázkou je, jak jsme od této vize daleko a zda to bude vůbec někdy možné? Překvapivě, můžeme být daleko blíže, než si vlastně uvědomujeme.

Potenciál AM technologií s sebou přináší spoustu otázek, co se týče budoucího vývoje, posouvání dosavadních hranic, ale také ohledně rozšiřování již zažitých technologií, pohlížíme-li na ně jako na produkty z hlediska businessu. AM totiž dávno nenajdeme pouze v laboratorním prostředí s nutností investice miliónových částek. Měřítek, úkonů a možností, ve kterých se tyto technologie dají implementovat, je nespočet. AM je tedy poměrně širokou tematikou a záleží na úhlu pohledu.

Chceme-li porozumět AM a jejich budoucnosti, je nutné si položit několik otázek. Je toto “ta” budoucnost? Může tato technologie nahradit současné výrobní postupy? Jaké jsou její silné a slabé stránky? Čeho všeho se v tomto poli dá ještě dosáhnout? Komu vlastně je tato technologie dostupná? A pro mou práci dvě nejpřínosnější otázky: Na jaké úrovni jsou profesionální přístroje a na jaké dnešní hobby přístroje? A jak lze efektivně pracovat s materiálem? Na tyto otázky jsem hledal ve své bakalářské práci odpověď. Zprvu však bylo nezbytné AM definovat, kategorizovat do širšího kontextu a zjistit, v jakém vývojovém stádiu se AM momentálně nachází.

Pro porozumění toho, jak tenká je hranice mezi zařízeními střední třídy a zařízeními dostupnými široké veřejnosti, a jak se za poslední roky vyvinula přesnost zařízení AM, bylo potřeba zjistit, jak tyto technologie fungují v praxi a provést měření jejich přesnosti. Pro tento účel byla zvolena AM široké veřejnosti nejdostupnější, a to

FDM. Změřením výtisků z různých přístrojů je možné otestovat jejich přesnost. Velkým tématem nejen u AM je také efektivnost procesu. V práci se tedy setkáme i s topologickou optimalizací.

2. Aditivní technologie

Aditivní technologie, také nazývána 3D tisk, je definována řadou technologií, které jsou schopny rychle a snadno převést data z virtuálního modelu do modelu fyzického. Na rozdíl od konvenční výroby je odlišná tím, že se pro dosažení požadovaného tvaru, materiál neodebírání, ale naopak je do vyráběné součásti materiál přidáván. Při výrobě jsou data rozdělena do série 2D průřezů o konečné tloušťce. Tyto průřezy jsou převáděny do strojů AM, aby mohly být kombinovány a přidávány v sekvenci po vrstvách tak, aby se vytvořila fyzická a celistvá část.

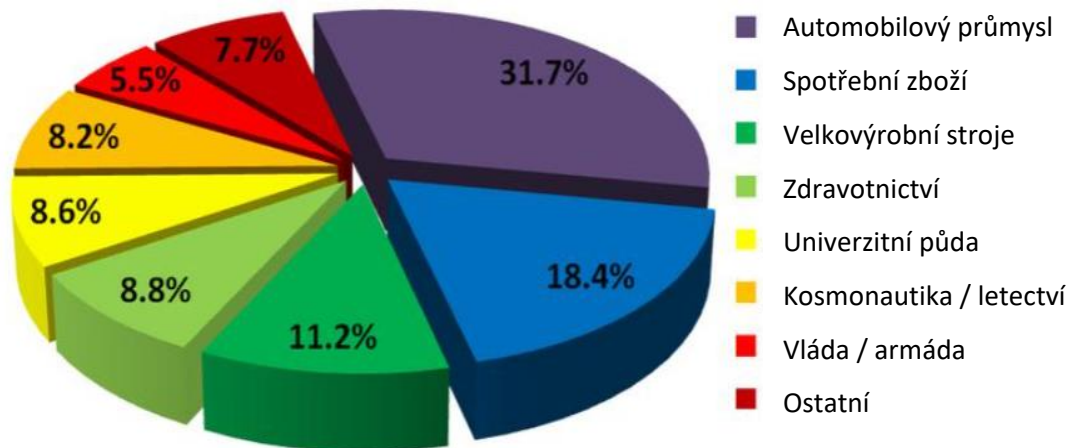
Gibson a kol. ve své publikaci [1] jednoduše definují proces AM jako *“What You See Is What You Build”*, v překladu *“Co vidíš, je to co stvoříš”*. Geometrie dílu je na stroji AM jasně reprodukována softwarem z virtuálního 3D modelu do realizovatelného fyzického modelu. Čím složitější geometrie, tím výhodnější může AM být. Bereme-li v potaz faktory výroby, jako jsou rychlost, tloušťka vrstvy, škála materiálů, přesnost a také samozřejmě cena.

Historie AM sahá až do 50. let 20. století, kdy jej poprvé popsal Raymond F. Jones [5] jako molekulární sprej v článku v tehdejší science fiction časopise. První reálné zařízení podobné těm dnešním si v roce 1971 patentoval Johannes F. Gottwald. O tři roky později David E. H. Jones představil světu pojem 3D tisk.[6] V dubnu roku 1980 Hideo Kodama vynalezl dvě nové metody AM tisku plastových součástí, které se ovšem ve své době neujaly a vývoj byl následně ukončen. [7] V roce 1984 americký podnikatel Bill Masters představil první počítačově řízený 3D tisk.[8] V roce 1992 byla poprvé představena komerčně dostupná na bázi FDM od firmy Stratasys. Devadesátá léta byla pro AM ve znamení experimentů s různými technologiemi a materiály, portfolio AM se tak rozšířilo a 3D tisk se postupně dostával do více odvětví průmyslu. V roce 2009 skončil patent firmy Stratasys na technologii FDM a ta se tak mohla komerčně šířit po celém světě. Celkový podíl technologie FDM na trhu je zhruba 46% (2018), z důvodu cenové dostupnosti a jednoduchosti procesu.[9].

První záměr využití AM byl pro vytvoření modelů výrobků, které měly za účel vývoj a testování různých technologických provedení. Poznatky získané z těchto prototypů byly následně využity pro sériovou výrobu. Zavedení AM do procesu výroby může výrazně snížit náklady a zkrátit vývoj produktů. Využití AM pro koncové výrobky vysvětluje vzniknutí termínu “Additive manufacturing” z termínu “Rapid prototyping”, který označoval pouze výrobu zkušebních modelů. [1]

V současnosti se AM dělí do sedmi hlavních kategorií podle standardu F2792-12a [3]. Kategorie jsou (1) Material extrusion (ME), (2) Powder bed fusion (PBF), (3) Vat photopolymerization (VP), (4) Material jetting (MJ), (5) Binder jetting (BJ), (6) Sheet lamination (SL), (7) Direct energy deposition (DED) viz tabulka č. 2. Ve své práci pracuji s původními názvy metod, aby nedošlo k záměně významu z důvodu českého překladu. Jednotlivé kategorie a metody jsou dále podrobněji popsány v kapitole 2.

AM se využívají ve všech možných odvětvích, jako například automobilový průmysl, spotřební zboží, velkovýroba, zdravotnictví, univerzitní a vědecká půda, kosmonautika, armáda a ostatní, viz obrázek č. 1.



obr. č. 1: Procentuální zastoupení AM v sektorech průmyslu [11]

AM mají v budoucnosti velký potenciál. S tím jak budou postupně končit patenty na jednotlivé technologie 3D tisku, bude se 3D tisk postupně více rozšiřovat a tím pádem bude i více zlevňovat [2]. V tabulce č. 1 je vidět množství firem a startupů investujících

do vývoje 3D tisku a jeho komercializace. Velké zastoupení mají zejména výrobci přístrojů pro domácí použití a hobby.

tabulka č. 1: Kategorizace výrobců AM a jejich cílové sektory [2]

| | Small Printers Desktop-size | Medium Printers Fridge-size | Large Printers Wardrobe-size |
|---------------------------------------|---|--|--|
| Home and hobbyist use printers | UP series; (3D Systems) Cube®; CubePro™; (Afinia) H480; (Aleph Objects) LulzBot™; (Deezmaker) Bukobot; (Envision TEC) Perfactory®; Fabicator; (FELIXprinters) Felix; (Formlabs) Form 1+; HYREL 3D; (MakerGear) M Series; (MakerBot) Replicator; (Mcor Technologies) IRIS; MiiCraft; Portabee; Printrbot; Printxel, Pwdr; (RepRapPro) Ormerod; Prusa; RoBo3D; SandBox; Orion Delta™; Solido3D; Solidoodle; (Tinkerine) Ditto™ Pro; (Type A Machines) Series 1; Newton 3D | (Stratasys) Mojo, (3D Systems) ProJet® 1200; Deltamaker™; (Makerbot) Replicator 2X | (Stratasys) uPrint |
| Professional use printers | (3D Systems) ProJet® 1200; (Asiga) Freeform; (Envision TEC) Perfactory®; (Nanoscribe) Photonic Professional GT; | (3D Systems) ProJet® 3500, 3510, 6000, 7000; (EOS) Precious; ExOne™ X1-Lab; (Stratasys) Dimension; Objet Eden, 260, 350, 500; (Envision TEC) ULTRA®; (SLM Solutions) SLM 125 | (3D Systems) ProJet® 660, 4500, 5000, 5500; Optomec® LENS 450; Aerosol Jet 300; (EOS) EOS M; (ExOne™) M-Flex |
| Industrial use printers | Optomec® Aerosol Jet 200; (Nanoscribe) Photonic Professional; | (Stratasys) Fortus 360, 400; (Envision TEC) Xede®; Xtreme® | (Voxeljet) VX series; Optomec® Aerosol Jet 5X, LENS 850-R, MR-7; (EOS) EOSINT; (Acram AB) Q series; (ExOne™) S Print, M Print; (Stratasys) Fortus 900; Objet 1000; |

Nevýhodu dnes nejvíce rozšířených metod 3D tisku je například jejich neschopnost tisknout kombinaci více materiálů. Tuto nevýhodu překonává technologie multi-materiálového 3D tisku. Každý element modelu je teoreticky možné tisknout jiným materiálem. Tato technologie byla zatím použita jen v hrstce projektů, nicméně pro toto odvětví má velký potenciál. Hlubou blízké budoucnosti je také vývoj technologie zvaný 4D tisk. Tato technologie využívá dynamické struktury materiálů, které mají možnost přizpůsobit tvar, vlastnosti a funkci na základě vnějších vlivů. Výzva u technologie 4D tisku je zejména vývoj mikrostruktury materiálů.

2.1 Obecný postup AM v praxi

Hlavním zdrojem pro tuto kapitolu byla rozsáhlá knižní publikace [1] od autorů Gibson a spol. Dle této publikace je proces výroby aditivních technologií rozdělen do devíti stěžejních fází. První fáze spočívá v modelování vyráběné součástky v CAD SW, nebo se také dá součást vymodelovat pomocí tzv. reverzního inženýrství. Druhá fáze je převedení vymodelované součásti do formátu STL, protože tento formát obsahuje nejvíce informací, ze kterých se pak následně dají vypočítat jednotlivé vrstvy zhotovované součásti. Třetí krok je převedení modelu STL do programu tiskárny, který generuje postup tisku. Čtvrtý krok je správné seřízení tiskárny, tedy správně nastavené teploty, kontrola dostatku materiálu, rychlosti atd. Pátý krok je samotný tisk vyráběné součásti, který již probíhá bez obsluhy stroje. Šestý krok je odebrání vytisknuté součásti ze stroje, některé stroje mají ochranu proti vysoké teplotě, tudíž odebrání umožní až po zchlazení vzorku. Sedmý krok je tzv. postprocessing, který spočívá v odstranění podpor, přebytečných materiálů, broušení, vyhlazení povrchové textury, lakování či ostatních nedostatků vzorku. Osmý krok je aplikace výrobku.

2.2 Rozdíl mezi AM, CNC obráběním a sléváním

Technologie AM a CNC výroby mají pár společných atributů, jako například počítačově řízený proces, který slouží k výrobě součástek. Nicméně nejpodstatnějším rozdílem

mezi nimi je to, že při výrobě pomocí AM je materiál na výrobek přidáván a při procesu CNC obrábění je naopak odebírán z polotovaru [1].

Výrobky zhotovené pomocí AM mají vysokou míru anizotropie, což znamená, že součást musíme vyrobit tak, aby výrobky byly zatěžovány co nejvíce po směru nanášení materiálu. Kdyby byla součást vyrobena tak, že by síla působila kolmo na směr nanášení materiálu, tak by součást měla větší tendence ke kolapsu. To je značná výhoda součástek vyrobených CNC obráběním, protože jsou víceméně homogenní a proces obrábění může postupovat nesusledně. Při CNC obrábění také vzniká součást s mnohem vyšší přesností. Rozdíl ve výrobních časech je naprosto markantní ve prospěch CNC obrábění. Značnou nevýhodou AM oproti CNC obrábění je to, že součást zhotovená pomocí AM většinou není připravena k používání, ale musí projít postprocessingem. Tato operace může celý výrobní proces velmi prodražit a prodloužit čas.

Platí zde ale pravidlo, že čím geometricky komplexnější výrobek, tím vhodnější je užití AM z důvodu toho, že ani nejmodernější pětiosé CNC frézky nedokážou vytvořit tak komplexní tvary jako za pomoci AM. Jak je citováno v knižní publikaci [1] od autorů Gibson a spol. "How would you machine the ship while it is still inside the bottle?" což se dá volně přeložit jako "Jak byste vyrobili loď, když je umístěna v láhvi", Gibson na tomto příkladu prezentuje, že takové zadání není pro AM problém, jelikož se lahev bude vyrábět společně s lodí, kdežto pro CNC obrábění je úkol skoro nemožný.

Primární rozdíl mezi AM a sléváním spočívá v tom, že pro výrobu pomocí slévání je nejprve nutné si vyrobit model a formu. Zatímco při výrobě pomocí AM lze součást vyrobit bez těchto příprav. Při návrhu modelu a formy je třeba brát v potaz nutnost vtokové soustavy a vytvoření kapes materiálu pro kompenzaci staženin. Důležité je také to, že samotný model musí mít o něco větší rozměry kvůli teplotní roztažnosti. Spojení těchto dvou technologií je možné využít u metody "Lost-Wax Metal Casting" což je v podstatě vytvoření vytavitelného, nebo spalitelného modelu pomocí AM pro odlévání kovů do pískových forem. Zároveň je třeba zmínit, že největší potenciál ve spojení těchto dvou technologií je využití topologické optimalizace, jak bude popsáno dále v práci.

Užití AT ve výrobě je oproti těmto dvěma technologiím stále “v plenkách” a proto je vhodná spíše pro výrobu prototypů a do malosériové výroby. Technologie obrábění a slévání jsou známy již velmi dlouhou dobu, a i proto se v tomto aspektu jedná o mnohem dokonalejší technologie.

3. Dělení AT dle standardu ASTM

Každá z AT vyžaduje odlišné nároky na zpracování, to samé platí pro volbu použitého materiálu. Dále je pak tedy možno jednotlivé technologie dělit podle principu technologie, zdroje energie, materiálu, jeho struktury, vlastností, nebo využití pro konkrétní průmysl. [3]

Podle standardu mezinárodní standardové organizace Americké společnosti pro testování a materiály (American Society for Testing and Materials) jsou AM rozděleny do sedmi kategorií viz tabulka č. 2.

tabulka č. 2: Dělení aditivních technologií inspirované standardem ASTM F2792-12a[2]
[3]

| Kategorie | Technologie | Tisknutý materiál | Zdroj energie |
|-------------------------|-------------------------------------|---|--|
| Material Extrusion | Fused Deposition Modeling (FDM) | Termoplasty, keramická kaše, kovová pasta | Teplo |
| | Contour Creating | | |
| Powder Bed Fusion | Selective Laser Sintering (SLS) | Polyamidy, polymery | Laserový paprsek |
| | Direct Metal Laser Sintering (DMLS) | Atomizovaný kovový prášek (17-4 PH) | |
| | Selective Laser Melting (SLM) | nerezová ocel, kobaltchromtitan | Elektronový paprsek |
| | Electron Beam Melting (EBM) | Ti6Al-4V), keramický prášek | |
| Vat Photopolymerization | Stereolithography (SLA) | Fotopolymery, keramika | Ultrafialový laser |
| | Digital Light Processing (DLP) | | Projektor ultrafialového světla |
| Material Jetting | Polyjet/Inkjet printing | Fotopolymery, vosk | Teplo, vytvrzování ultrafialovým světlem |

| Kategorie | Technologie | Tisknutý materiál | Zdroj energie |
|--------------------------|--|---|------------------|
| Binder Jetting | Indirect Inkjet Printing (Blinder 3DP) | Polymerový prášek (omítka, pryskyřice), keramický prášek, kovový prášek | Teplo |
| Sheet Lamination | Laminated Object Manufacturing (LOM) | Plastový film, kovový plátek, keramická páska | Laserový paprsek |
| Direct energy deposition | Laser engineered net shaping (LENS) | Roztavený kovový prášek, drát | Laserový paprsek |

3.1 Material Extrusion

Material extrusion je v současnosti nejrozšířenější metoda AM zejména proto, že tento typ zařízení se dnes dá koupit již za pár tisíc korun. Z angličtiny by se tato metoda dala přeložit jako “vytlačování materiálu”. To je realizováno pomocí malé komory, kde je materiál, většinou ve formě struny o průměru řádově pár milimetrů, roztaven a je vytlačován do výsledného tvaru. Dalo by se také říci, že při tomto procesu má tisková hlava již předdefinované dráhy, které vycházejí z vhodného SW pro jednotlivý přístroj, a které pak jenom opisuje a zanechává v drahách roztavený materiál. V publikaci [1] od autorů Gibson a spol. je tento princip přirovnáván ke zdobení dortů s podobností toho, že je materiál uložený v zásobníku a je protlačován skrze trysku formující jeho tvar. Následně tvoří celistvou vrstvu, a pak vrší vrstvu po vrstvě až vznikne finální produkt. Jediná technologie tohoto druhu, které má materiál v tekuté formě již v zásobníku je “Contour creating” viz níže.

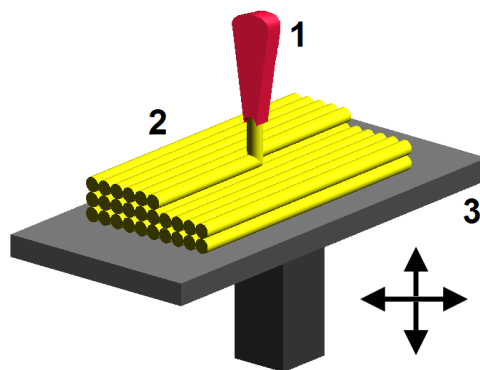
Důležité u tohoto procesu je konstantní rychlost průchodu materiálu skrze trysku a tomu odpovídají rychlost pohybu hlavy. Pokud by tomu tak nebylo, výsledný produkt bude nevhodný pro další užívání z důvodu narušení kontinuity vrstev a to by znamenalo horší mechanické a vzhledové vlastnosti. Vytlačovaný materiál po průchodu tryskou by měl mít tzv. “polotuhé” skupenství, aby po nanesení na tvořenou vrstvu přilnul k předchozím vrstvám a ztuhnul. Jakmile přístroj fungující na tomto principu dokončí

vrstvu v ose Z, musí nastat tzv. retrakce filamentu, což znamená, že je struna vysunuta z hlavy pomocí extruderu řádově o pár setin mm z důvodu přerušení toku materiálu a hlava nepatrně vyjede v ose Z nahoru. Extruder zpětně zasune materiál do hlavy až po přejezdu hlavy do souřadnic X a Y kde začíná tvořit další vrstvu.

Hlava je zahřívána pomocí odporového drátu. Každý materiál má předepsané teploty, při kterých by měl být vytlačován. Kdyby tato teplota byla příliš vysoká, mohl by materiál zkapalnit úplně a vytvářet nepřesnou vrstvu. Kdyby naopak byla teplota extruderu příliš nízká, tak by materiál mohl být příliš pevný a nespojoval by se s již vytvořenými vrstvami a tím pádem by byl proces kontraproduktivní. Výsledný tvar nanášených vrstev je primárně ovlivněn tvarem trysky. Čím větší je otvor v trysce, tím méně precizní je výsledná kvalita produktu, ale produkt je rychleji vytvořen. Rychlost vytlačování filamentu z trysky je určována tlakem extruderu.

3.1.1 Fused Deposition Modeling

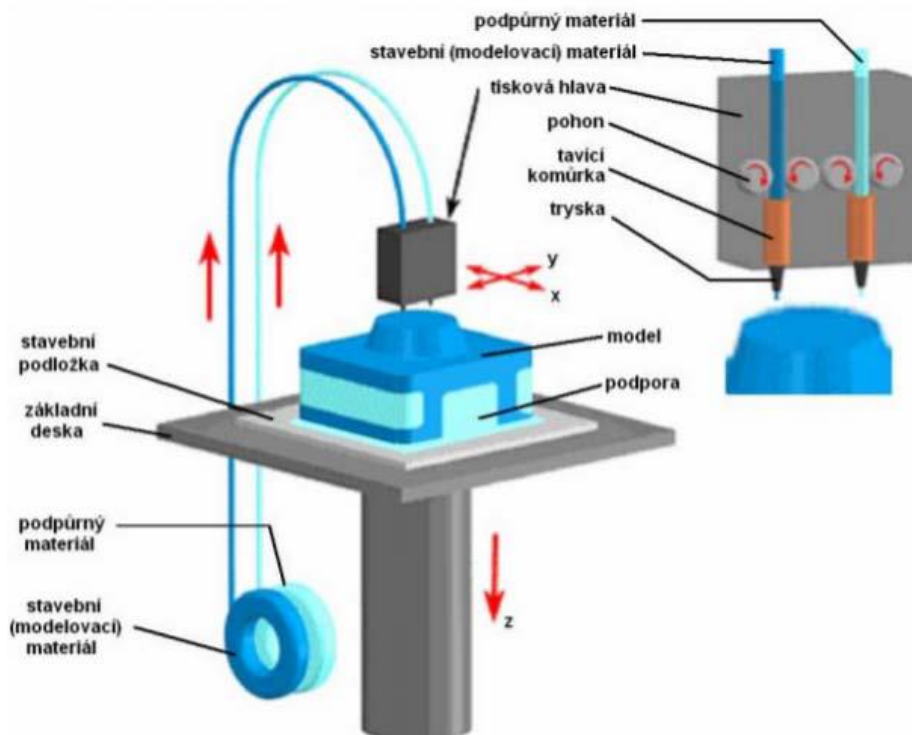
Jak jsem již zmiňoval, nejpoužívanější technologie AM jsou stroje fungující na principu vytlačování materiálu. Ale zdaleka nejrozšířenější poddruh těchto strojů jsou FDM tiskárny, které byly vyvinuty společností Stratasys ve Spojených státech. Do češtiny by se tento název dal přeložit jako “Modelování roztaveného materiálu”. Tato metoda je nejčastěji používaná pro tisk prototypů. Pro práci s tímto zařízením je potřeba opravdu minimum a stačí stažený model z internetu a vhodný SW, který vytvoří podmínky tisku.



obr. č. 2: Způsob nanášení materiálu

Při tisku touto metodou můžeme využívat podpor z odlišného materiálu, než je naše součást, které se následně dají odstranit pomocí rozpuštěcího roztoku. Pro výrobu takovýchto podpor ale musí být tiskárna vybavena dvěma tryskami, což většina běžných tiskáren dnes nemá.

FDM tiskárny bývají také vybaveny vyhřívanou základnou z důvodu eliminace vnitřních pnutí a dodržení rozměrové přesnosti. Pro tisk z plastu s označením ABS může být základna vyhřívána až na 80°C.



obr. č. 3: Konstrukce FDM zařízení

FDM tiskárny můžeme dále rozdělit na tiskárny s uzavřeným a otevřeným pracovním prostorem. Uzavřený pracovní prostor mají především profesionální tiskárny. Otevřený pracovní prostor, mají tiskárny primárně určené pro hobby využití.



obr. č. 4: Tiskárna s uzavřeným pracovním prostorem od firmy Creality model CR5-5-pro
obr. č. 5: Tiskárna s otevřeným pracovním prostorem od firmy Creality model Ender 3

K pohonu jednotlivých os FDM tiskáren je využíváno krokových motorků v případě hobby tiskáren a servopohonu v případě profesionálně používaných tiskáren. Každá osa má svůj koncový spínač, od kterého si tiskárna určuje polohy jednotlivých os. Krokový motor je využíván také v extruderu, kde je za jeho pomoci tlačén drát do tavicí hlavy. Pokud se jedná o klasickou tiskárnu, nikoli o tzv. tripod, tak se osy pohybují na profilech za pomoci koleček a přenos momentu z motorů je realizována pomocí řemene. Některé z novějších tiskáren jsou také vybaveny informačním panelem, který uvádí odhadovaný zbývající čas tisku, teplotu hlavy, teplotu základny a vzdálenost os X,Y a Z od výchozí polohy atd. Nejčastější způsob dodávky materiálu je cívka s navinutým drátem, který vede do extruderu.



obr. č. 6: Vlastní výtisk nástrčného klíče na olejový filtr, FDM tiskárna Ender 3, materiál PLA, teplota hlavy: 215°C a podložky: 40°C, doba tisku zhruba 4 hodiny, výška vrstvy 0,24 mm.

Materiály používané pro FDM tiskárny:

Nejpoužívanější materiál pro tisk na těchto zařízeních je termoplast s označením PLA. Velkou výhodou tohoto termoplastu je to, že je velice levný a že jej lze tisknout i na přístroji bez vyhřívané podložky. Kilogram toho materiálu lze dnes koupit již za 400,- Kč. Druhý nejpoužívanější termoplast je ABS, ten má podobné vlastnosti jako PLA, ale měl by být tištěn na přístroji s vyhřívanou podložkou. Dalšími materiály jsou PVA, PET-G, CPE atd. [2]

tabulka č. 3: Vlastnosti plastových ABS materiálů pro FDM tisk [1]

| Property | ABS | ABSi | ABSplus | ABS/PC |
|---------------------------------|------------|----------|------------|-----------|
| Tensile strength (MPa) | 22 | 37 | 36 | 34.8 |
| Tensile modulus (MPa) | 1,627 | 1,915 | 2,265 | 1,827 |
| Elongation (%) | 6 | 3.1 | 4 | 4.3 |
| Flexural strength (MPa) | 41 | 61 | 52 | 50 |
| Flexural modulus (MPa) | 1,834 | 1,820 | 2,198 | 1,863 |
| IZOD impact (J/m ²) | 106.78 | 101.4 | 96 | 123 |
| Heat deflection at 66 psi (°C) | 90 | 87 | 96 | 110 |
| Heat deflection at 264 psi (°C) | 76 | 73 | 82 | 96 |
| Thermal expansion (in./in./F) | 5.60E – 05 | 6.7E – 6 | 4.90E – 05 | 4.10E – 5 |
| Specific gravity | 1.05 | 1.08 | 1.04 | 1.2 |

3.1.2 Contour Creating

Contour creating je technologie vyvinutá doktorem Bohrokhem Khoshnevisem na univerzitě v jižní Kalifornii. Využívá se především u betonových staveb, kde je tryskou nanášen beton s drobným kamením a během nanášení je uhlazován žlabem do obdélníkového průřezu. Její rozvoj je především ve stavitelství, kde je možné touto technologií během 24 hodin zhotovit skelet budovy. Jedná se tedy o nejrychlejší AM z pohledu objemu. [1]



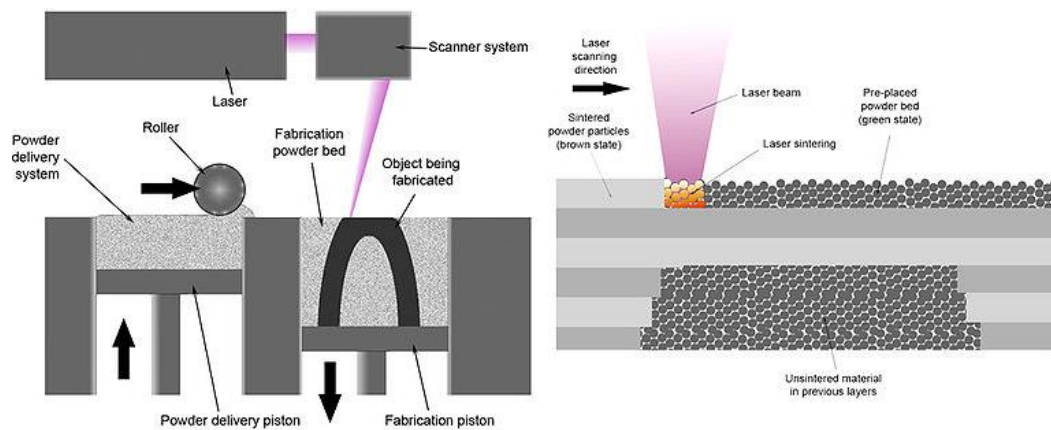
obr. č. 7: Princip výroby skeletu domu pomocí Contour Creating

3.2 Powder Bed Fusion

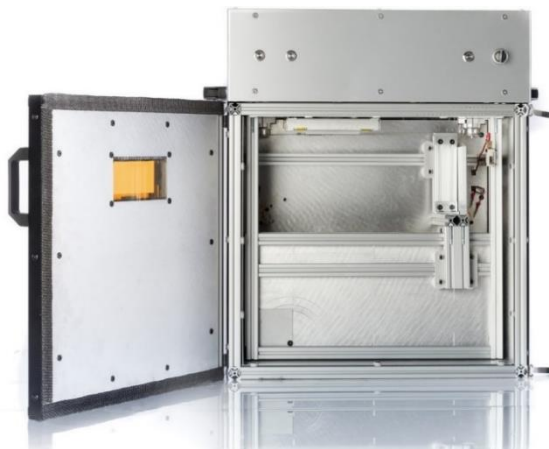
Tento termín lze do češtiny volně přeložit jako “spékání prášku po vrstvách”. Jedná se o jednu z prvních AM technologií používaných v průmyslu, vyvinuta byla na univerzitě v Texasu ve městě Austin. Každá z těchto technologií obsahuje zdroj tepla, které je postupně koncentrováno v určité vrstvě a systém sloužící k postupné dodávce dalších vrstev prášku pro následné spékání. Nejvyužívanějším zdrojem tepla jsou velmi výkonné lasery (technologie LS - Laser Sintering - více druhů), ale také elektronový paprsek (technologie EBM - Electron Beam Melting). Technologie LS byla původně vyvinuta pro spékání plastových prototypů a následně začala být užívána i pro spékání keramických a kovových prášků [1] [20].

3.2.1 Selective Laser Sintering

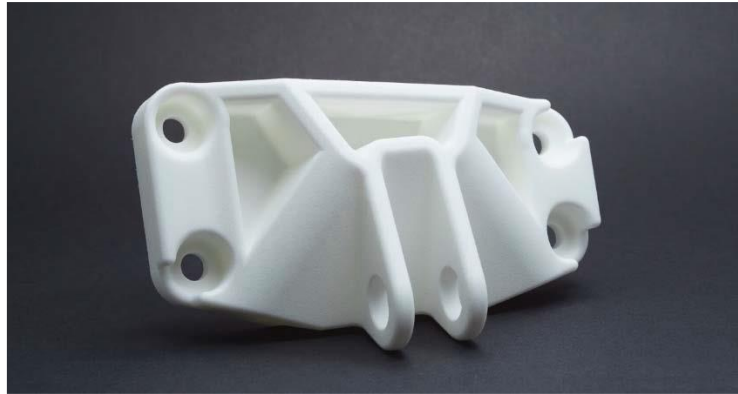
Princip této technologie spočívá v tom, že na podkladovou vrstvu je nanесena prvotní vrstva práškového materiálu. Prášek je vystaven vysoké teplotě laseru a dochází k jeho spékání pouze v požadovaném místě. Okolní materiál zůstává stále ve formě prášku a slouží tak jako podpora vytvářených vrstev. Následně je nosná deska posunuta o tloušťku vrstvy dolů a na již spečený prášek je nanесena další vrstva válečkovým mechanismem. Tento proces se opakuje až do dokončení. Takto spékáným materiálem mohou být plasty, pryže a keramika. Velikost částic prášku se pohybuje mezi 20-100 μm [1] [20].



obr. č. 8: Princip fungování SLS tiskáren



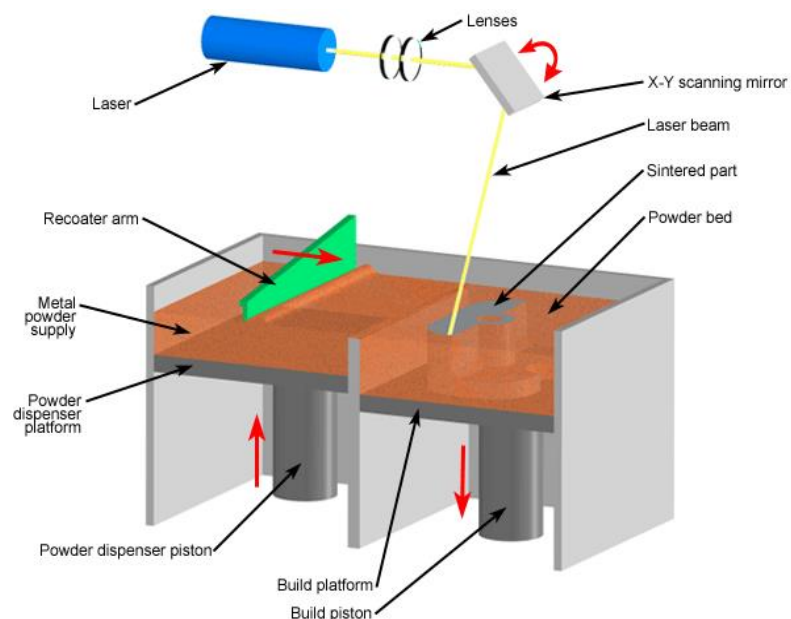
obr. č. 9: Tiskárna SLS od firmy Sintratec model Sintratec KIT, cena se pohybuje okolo 5 000 USD



obr. č. 10: Plastový výtisk z SLS zařízení

3.2.2 Direct Metal Laser Sintering / Selective Laser Melting

V překladu “Laserové spékání kovových prášků”. Vyvinuto v roce 1989 doktorem Carlem Deckardem na univerzitě v texaském Austinu. Proces nejčastěji začíná frézováním základní desky, pokud již tedy byla použita, pro zajištění lepšího spojení prvně nanášených vrstev. Následně rameno s keramickým břitem rozprostře první vrstvu na povrchu základní desky a v místě dopadu laseru je kovový prášek spékán. Teplo je odvedeno do základní desky a tím pádem již spečený prášek tuhne. Základní deska se posouvá o vrstvu materiálu níže a proces je opakován až do dokončení. Hlavní rozdíl mezi pojmenováním těchto technologií spočívá v tom, že u SLM je prášek taven a při DMLS je prášek spékán [1] [20].



obr. č. 11: Princip fungování SLM/DMLS tiskárny



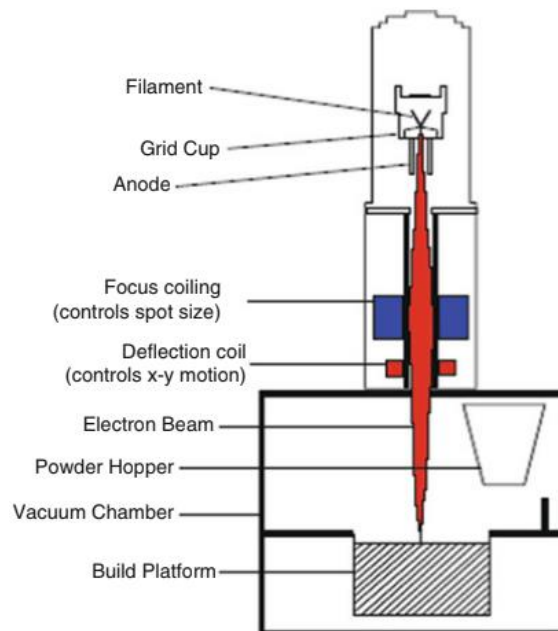
obr. č. 12: Tiskárna DMLS od firmy EOS model M290,
cena se pohybuje okolo 700 000 USD



obr. č. 13: Výtisk z DMLS zařízení

3.2.3 Electron Beam Melting (EBM)

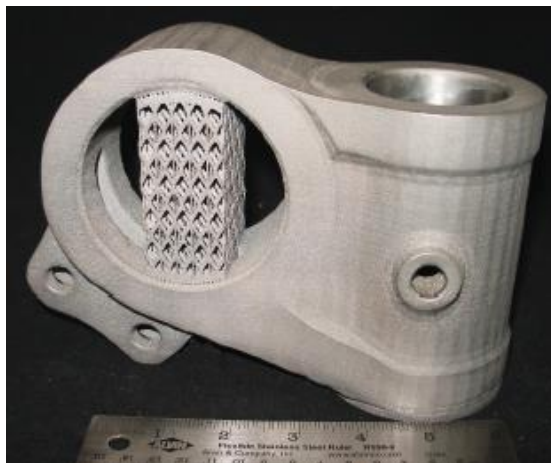
EBM bylo vyvinuto v roce 2001 na švédské Chalmers University. Oproti technologiím využívajícím laserový paprsek dosahuje vyšších teplot. Technologie EBM produkuje teplo vysokovýkonným elektronovým paprskem a využívá se pro tisk kovových dílů. Tisk je prováděn v ochranné atmosféře vakua. Podobně jako u zařízení využívajících laser je zde taven kovový materiál ve formě prášku. Vysoká rychlost tisku je zde docílena rychlým polohováním paprsku řízeným elektromagnetickými cívkami. Používá se především v strojírenství a zdravotnictví. Velká výhoda oproti kovovému tisku laserem je zde ta, že lze snáze dosáhnout lepších podmínek pro ochrannou atmosféru. Také je zde možnost předejít prostředí tisku na vysokou teplotu a tím lze kompenzovat staženiny ve výtisku. Oproti SLM/DMLS zařízením je zde dosahováno horší kvality povrchu, ale díky možnostem kompenzace vnitřních staženin má výtisk lepší pevnostní vlastnosti. Tím pádem je na EBM větší spolehnutí pro náročnější aplikace a tato technologie se vyplatí užít i přes to, že je náročnější na postprocessing [1] [20].



obr. č. 14: Princip fungování EBM tiskáren



obr. č. 15: Tiskárna EBM od firmy GE Additive model Arcam EBM Spectra H, cena se pohybuje okolo 200 000 USD



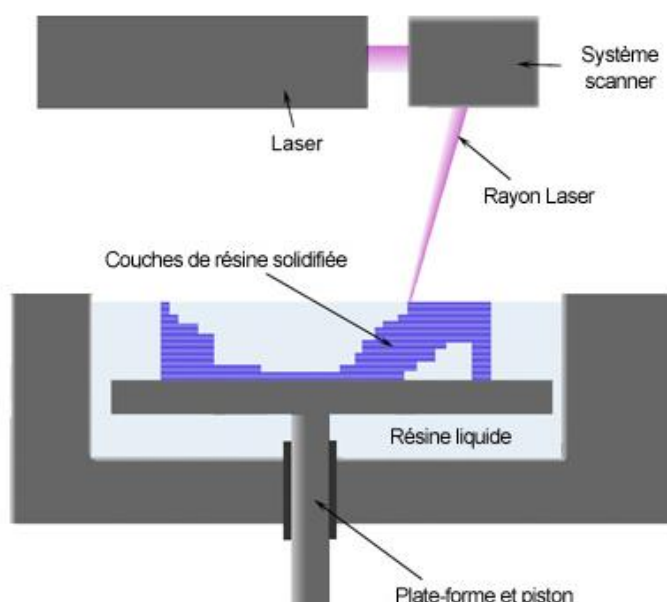
obr. č. 16: Výtisk z EBM zařízení s podporami

3.3 Vat Photopolymerization Processes

Technologie založená na vytvrzování fotopolymerické pryskyřice v tekuté formě pomocí ultrafialového laseru/projektoru. Jako všechny AM je i tato založena na principu postupného vytvrzování jednotlivých 2D vrstev, které jsou generovány příslušným SW. Jedná se o velice přesnou technologii [2] [20].

3.3.1 Stereolithography (SLA)

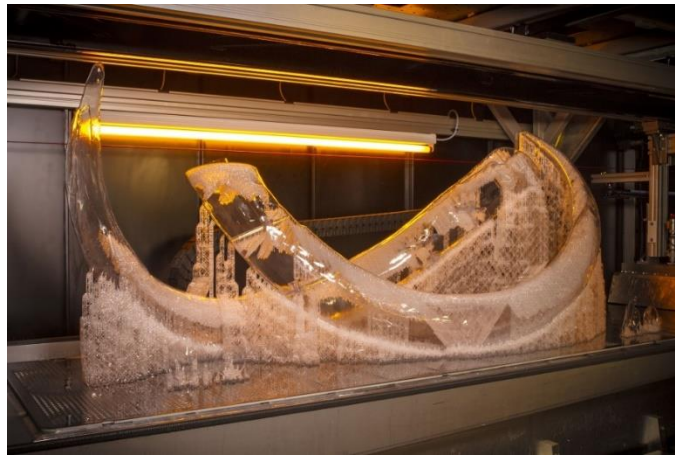
Jak již bylo zmiňováno tato technologie funguje na principu vytvrzování tekuté pryskyřice za pomoci ultrafialového laseru. Laser je schopen vytvářet vrstvy o tloušťce 0,05 až 0,25 mm. Po každé vytvořené vrstvě sjede nebo vyjede nosná deska o výšku vrstvy a laser následně vytvrdí další vrstvu. Jsou dva druhy zařízení, která fungují na tomto principu a to buď s podložkou, která s výrobkem sjíždí nebo s podložkou, která s ním vyjíždí [2] [20].



obr. č. 17: Princip fungování SLA tiskáren



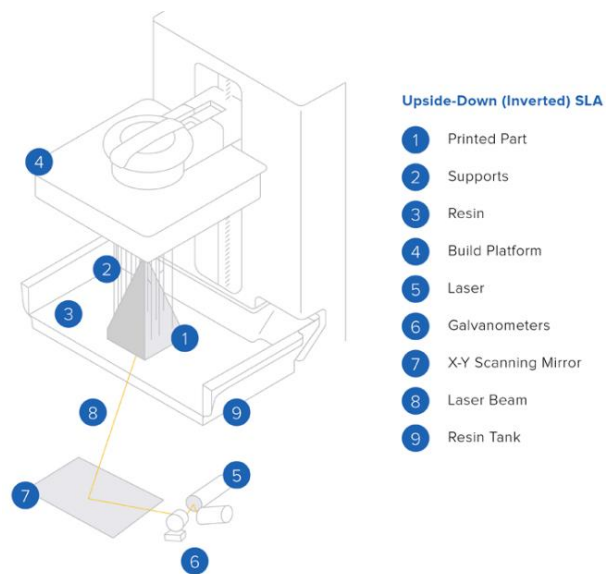
obr. č. 18 Tiskárna SLA od firmy Formlabs model Form 2, cena se pohybuje okolo 2500 USD



obr. č. 19 Výtisk mamutích kel z SLA zařízení s podporami

3.3.2 Digital Light Processing (DLP)

Technologie DLP pracuje na obdobném principu jako technologie SLA, tudíž na desku, která je ponořena v tekuté pryskyřici, jsou vrstvy postupně vytvrzovány pomocí ultrafialového záření. Hlavní rozdíl je v tom, že u technologie SLA je pryskyřice vytvrzována laserem v jednom bodě a u technologie DLP je vytvrzována přes projektor, který je schopen vytvrdit celou vrstvu najednou. Tudíž je technologie DLP mnohonásobně rychlejší, než technologie SLA. Výsledná kvalita tisku závisí na kvalitě projektoru, čím vyšší rozlišení, tím jemnější detail tisku. Obraz záření je tvořen pomocí mikroskopicky malých zrcadel umístěných na polovodičovém čipu. Každé zrcadlo představuje jeden pixel [2] [20].



obr. č. 20: Princip technologie Digital Light Processing



obr. č. 21: Tiskárna DPL od firmy Flashforge model Hunter, cena se pohybuje okolo 5000 USD



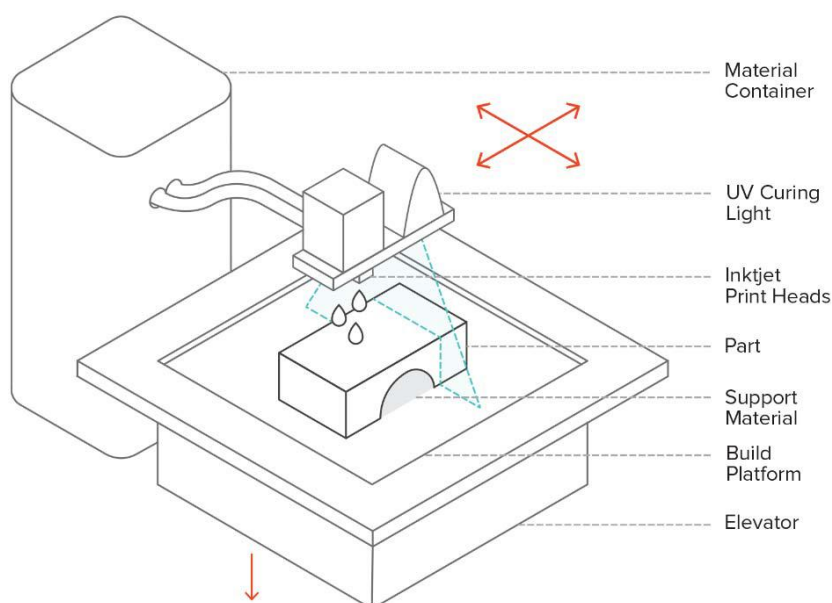
obr. č. 22: Výtisk z DLP zařízení

3.4 Material Jetting

Tato aditivní technologie je nejpodobnější klasickému 2D tisku. Tisková hlava je rozdělena na velké množství malých trysek, které postupně dávkují fotosenzitivní materiál, který je po nanesení vytvrzený ultrafialovým světlem. Výtisk je uložen na posuvné podložce a sjíždí dolů po každé vytvrzené vrstvě [1].

3.4.1 Polyjet / Inkjet printing

Velmi přesná technologie s vysokým rozlišením. Výtisky mohou být zhotoveny z více barev a druhů materiálu. Tato je technologie je schopna tisknout součást až ze sedmi materiálů odlišných barev a tvrdostí od gumových a po velmi tvrdé struktury. Podpory se dají zhotovit ze speciálního materiálu, který lze odstranit teplem, nebo rozpustit. Tato metoda má schopnost tisknout velmi tenké vrstvy až o tloušťce 16 μ m. Velkou výhodou této technologie je velmi hladký povrch výtisku. Často se výrobky zhotovené tímto procesem využívají jako modely pro investment casting. Nevýhodou této technologie je to, že materiál má relativně krátkou dobu trvanlivosti a při použití prošlého materiálu může dojít i k poškození zařízení [1].



obr. č. 23: Princip technologie Polyjet/inkjet printing



obr. č. 24: Tiskárna od firmy Stratasys model J850,
cena se pohybuje okolo 250 000 USD

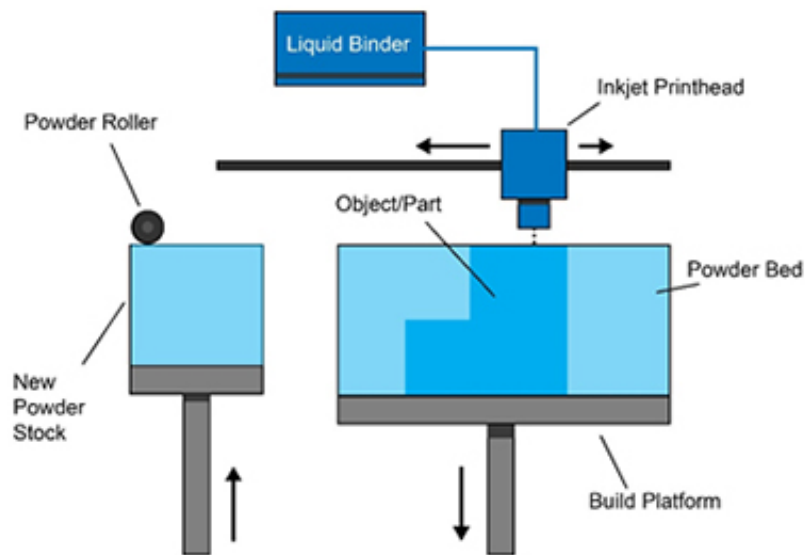


obr. č. 25: Výtisk technologií Polyjet printing

3.5 Binder Jetting

3.5.1 Indirect Inkjet Printing

Metoda Indirect Inkjet Printing, byla vyvinuta na počátku 90. let. Zásluhy se připisují především MIT, kde vyvinuli postup, který nazývali proces 3D tisku. V tomto procesu se pojivo “tiskne” do práškového lože, kde se následným posouváním podložky ve vertikálním směru vytváří dílčí průřezy. Tento koncept může být snadno zaměněn s velice podobným konceptem Powder Bed Fusion (PBF), kde se vrstvy nelepí, ale práškové částice se taví laserem, čímž vznikají spojené průřezy součástí. Oproti technologii PBF jde o velice rychlý proces a zařízení je schopno tisknout kovové a plastové součástky [2] [20].



obr. č. 26: Princip technologie Indirect Inkjet Printing



obr. č. 27: Tiskárna od firmy 3D Systems model Z Printer 450



obr. č. 28: Výtisk technologií Indirect Inkjet Printing

3.6 Sheet Lamination

3.6.1 Laminated Object Manufacturing (LOM)

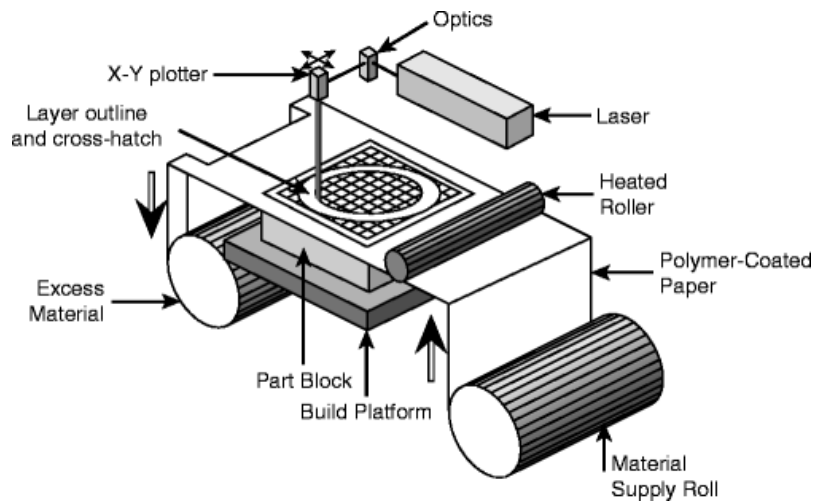
Volně lze přeložit jako “Výroba laminovaných předmětů”. Jedná se o technologii, při které jsou modely tvořeny velkým množstvím tenkých fólií. Jde o jednu z prvních AM používaných v průmyslu. Každá vrstva fólie odpovídá jedné vrstvě z modelu součásti v CAD SW. Dle publikace [1] od autorů Gibson a spol. je tato technologie dělena do čtyř kategorií dle způsobů spojování vrstev: 1) Gluing or Adhesive Bonding, 2) Thermal Bonding, 3) Clamping, 4) Ultrasonic welding. V zásadě se liší jen pár detaily [1] [21].

První z procesů Gluing or Adhesive Bonding je nejvíce rozšířený. Tloušťka jednotlivých vrstev se v případě užití papíru pohybuje od 70 do 200 μm . Jednotlivé vrstvy se odřezávají laserem a to buď před aplikací na součást, nebo po aplikaci [1] [21].

Druhá technologie Thermal Bonding, je velmi efektivní metoda pro spojování kovových plátů do komplexního tvaru. Spojování plátů je realizováno pomocí tenkých hliníkových destiček s nízkou teplotou tání, takže se v podstatě jedná o pájení. Každá součást vyrobená touto technologií je vyrobena s přesahy a je následně dokončena [1] [21].

Třetí z procesů, tedy Clamping, využívá spojování plátu tzv. “za studena” tj. jednotlivé pláty jsou spojovány pomocí šroubů, nebo zalisovány. Jedná se velmi rychlou a levnou metodu. Nevýhoda této metody je ta, že je zapotřebí užití výkonného stroje a že vyrobená součást nemusí vždy mít dokonalý povrch [1] [21].

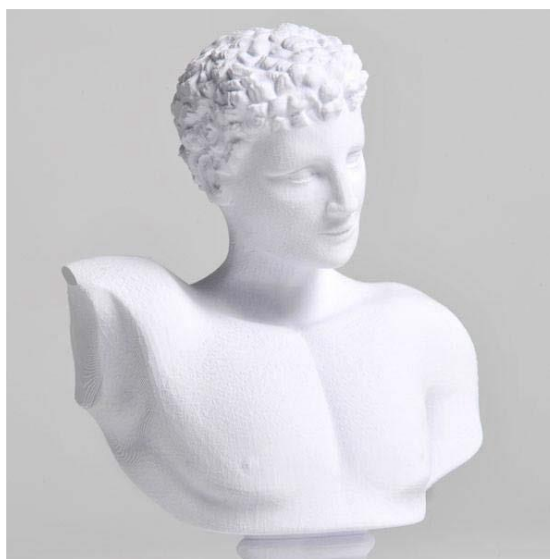
Čtvrtá technologie v sobě kombinuje ultrazvukové svařování a CNC frézku. Jednotlivé kovové pláty jsou na sebe vrstveny a svařeny za pomoci ultrazvuku. Následně jsou pláty až čtyř vrstev vyfrézovány do vyžadovaného tvaru. Tloušťka kovových plátů se pohybuje v rozmezí 100–150 μm . Celý proces probíhá při teplotě zhruba 200°C [1] [21].



obr. č. 29: Princip fungování LOM tiskáren, technologie Gluing or Adhesive Bonding



obr. č. 30 Tiskárna LOM od firmy Mcor model Matrix 300+,
cena se pohybuje okolo 22 000 USD



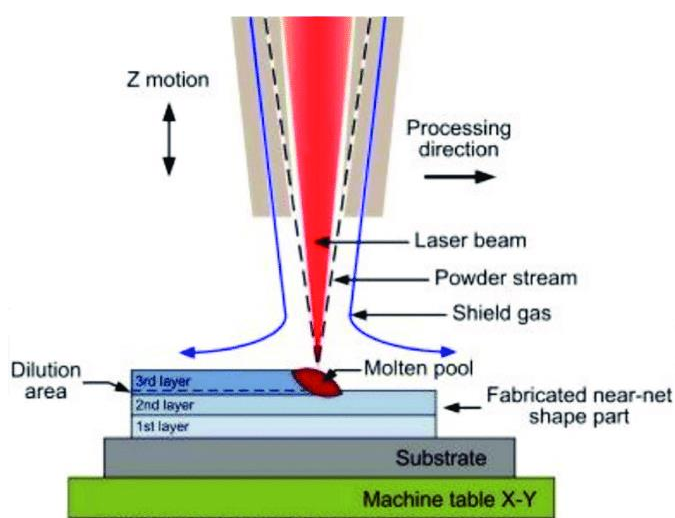
obr. č. 31 Výtisk z LOM zařízení

3.7 Direct Energy Deposition (DED)

V českém jazyce by se tato metoda dala nepřímě popsat jako “Přímé nanášení materiálu”. Při tomto procesu je přímo k tepelnému paprsku dodáván materiál ve formě prášku, nebo drátu. Po přivedení materiálu k laseru je materiál taven a nanášen vrstvou po vrstvě na součást. Ve své podstatě je tato technologie podobná svařování tavnou elektrodou s přidávaným materiálem ve formě drátu. Metoda DED je schopna fungovat ve více osách, tím pádem je schopna vytvářet komplexnější tvary [1].

3.7.1 Laser Engineered Net Shaping (LENS)

Zdrojem tepelné energie pro tento proces je laserový paprsek. Proces výroby pomocí LENS probíhá v ochranné atmosféře argonu a kyslíku. Některá zařízení fungující na tomto principu mohou během výroby kombinovat až čtyři druhy prášku, což umožňuje vytvořit výrobek z více materiálů. Tato metoda má široké možnosti užití materiálů např. ocel, titan, niklové slitiny, hliník a různé druhy keramických prášků. Je zde také možnost oprav a přídavků na již vyrobené díly. Během výrobního procesu pomocí LENS je možné kombinovat postupné nanášení materiálu a následné CNC obrábění. Po proběhnutí procesu obrábění pokračuje proces nanášení, až do zhotovení součásti [1] [2].



obr. č. 32: Princip fungování LENS tiskáren



obr. č. 33: Tiskárna LENS od firmy Optomec model LENS 860,
cena se pohybuje okolo 250 000 USD



obr. č. 34: Ukázka výroby pomocí technologie LENS

3.8 Porovnání aditivních technologií

tabulka č. 4: Klady a zápory jednotlivých AM

| Kategorie | Technologie | Klady | Zápory |
|--------------------------|---|---|--|
| Material Extrusion | Fused Deposition Modeling (FDM); Contour Creating | <ul style="list-style-type: none"> Nízká pořizovací cena Možnost multi-materiálového 3D tisku | <ul style="list-style-type: none"> Limitované rozlišení Nedokonalá textura povrchu |
| Powder Bed Fusion | Selective Laser Sintering (SLS); Direct Metal Laser Sintering (DMLS); Selective Laser Melting (SLM); Electron Beam Melting (EBM) | <ul style="list-style-type: none"> Relativně vysoká přesnost a detail Plná hustota bez pórů Vysoká měrná pevnost a tuhost Možnost recyklace | <ul style="list-style-type: none"> Horší manipulace s práškem, po vdechnutí toxický, třeba co nejvíce separovat od obsluhy Dlouhá doba tisku Vyšší pořizovací náklady Relativně vysoké náklady na materiál |
| Vat Photopolymerization | Stereolithography (SLA); Digital Light Processing (DLP) | <ul style="list-style-type: none"> Vysoká rychlost tisku Dobré rozlišení Oproti technologii FDM lepší drsnost povrchu | <ul style="list-style-type: none"> Vlivem působení záření i po procesu výroby dochází k přetvrzení materiálů a začíná být křehký Vysoká cena doplňků a materiálu |
| Material Jetting | Polyjet/Inkjet Printing | <ul style="list-style-type: none"> Možnost multi-materiálového 3D tisku Vysoká kvalita povrchové textury | <ul style="list-style-type: none"> Nízká pevnost materiálů Materiál má určitou trvanlivost a použitím prošlého materiálu lze přijít i o záruku na zařízení |
| Binder Jetting | Indirect inkjet printing (Blinder 3DP) | <ul style="list-style-type: none"> Možnost tisku ve více barvách Široký výběr materiálů | <ul style="list-style-type: none"> Vysoká porozita ve výtiscích |
| Sheet Lamination | Laminated Object Manufacturing (LOM) | <ul style="list-style-type: none"> Vysoké výrobní rychlosti Nízké nákladu na materiál, přístroj i výrobní proces Komponenty nevyžadují podpůrné konstrukce | <ul style="list-style-type: none"> Relativně špatná povrchová úprava Nevytváří dobré vazby mezi vrstvami Obtíž při vytváření dutých dílů |
| Direct Energy Deposition | Laser Engineered Net Shaping (LENS) | <ul style="list-style-type: none"> Možnost opravení poškozených či použitých částí Tisk materiálů s proměnlivou hustotou a pevností | <ul style="list-style-type: none"> Vyžaduje dodatečné opracování Relativně nízká přesnost vyráběných dílů |

4. Aplikace aditivních technologií v průmyslu

Aditivní technologie podstupují již skoro čtvrtou vývojovou dekádu a za tuto dobu se již stihly rozšířit do více odvětví průmyslu. První užití si AM našli v automobilovém průmyslu, kosmonautice, letectví a zdravotnictví, primárně pro provedení fyzické vizualizace výrobku. S postupným vývojem přesnosti a lepší cenovou dostupností se rozšiřovali do dalších odvětví průmyslu. S nástupem “Rapid Prototyping” (což je vlastně vytvoření fyzického modelu za pomoci AM) se také velmi urychlil a zlevnil vývoj produktů.

4.1 Automobilový průmysl

První, kdo v tomto odvětví průmyslu využil Rapid Prototyping pro vývoj součástek byl americký výrobce General Motors Company (GMC). Technologií SLA byl zhotoven model válce a hlavy motoru, na kterém bylo simulováno proudění vzduchu [12]. V současném automobilovém průmyslu je brán velký zřetel na rychlý proces vývoje nových technologií a proto jsou pro vývoj užívány primárně aditivní technologie. AM umožňuje konstruktérům vyvíjet zcela nové tvary a design budoucích součástek automobilů. Při vývoji a výrobě závodních speciálů je často využíváno AM, hlavně kvůli malosériové výrobě a také kvůli ušetření hmotnosti. Závodní formule CTU CarTech má na příklad zhotovený řídicí segment kovovým tiskem. V dnešní době již také najdeme “end-use” výrobky i v sériově vyráběných vozidlech, nicméně implementace takto zhotovených výrobků je z mého pohledu spíše marketingový tah, protože AT je oproti konvenčním technologiím relativně pomalá a drahá. Na brzdovém třmenu uvedeném na obr. č. 35 bylo dle Bugatti [19] dosaženo díky topologické optimalizaci až 40% úspory váhy, což je u sportovního vozidla velmi důležitý aspekt.



obr. č. 35: Brzdové třmeny z vozu Bugatti Chiron zhotovené technologií SLM z titanu

Další kdo v tomto odvětví využívá AM je například společnost Michelin, která za pomoci kovového tisku vytváří formy pro tvorbu dezénu pneumatiky [22].



obr. č. 36: Forma pro lisování dezénu automobilových pneumatik zhotovených technologií SLM

4.2 Kosmonautika a letectví

V současné době tvoří tento průmysl 16.8% podílu na trhu s aditivními technologiemi, tudíž je pro toto odvětví velmi zásadní. AM se zde užívají nejenom pro výrobu prototypů, ale také pro finální výrobky. Užití AM je zde výhodné zejména kvůli maloobjemové výrobě, úspoře váhy, vysoké efektivitě užití materiálu a možnosti oprav již vyrobených dílů. Kovový tisk se v tomto odvětví využívá především pro výrobu raket, kde může být takto vyrobena vstřikovací hlava technologií EBM nebo SLM/DMLS. Bez užití AM jsou

běžně vstříkovací hlavy vyráběny až ze stovky kusů a následně svařeny. Při užití AM lze vstříkovací hlavu vyrobit už jako jeden kus.

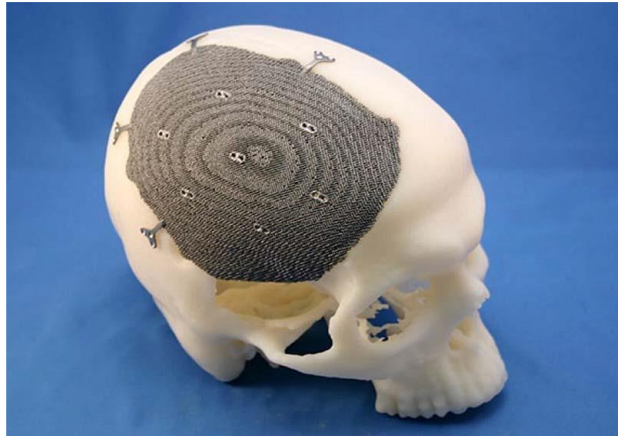
Užití AM nachází také velké uplatnění v letectví. Je zde zapotřebí malosériová a někdy i zakázková výroba. V současné době probíhá atestace tištěných dílů pro náročnější aplikace, jako na příklad vytištěný držák křídla letadla technologií EBM. [12]



obr. č. 37: Vstříkovací tryska raketového motoru vytvořená pomocí AM

4.3 Zdravotnictví

Aditivní technologie nachází již dnes velmi široké uplatnění také ve zdravotnictví a v budoucnu jejich zastoupení ještě rapidně poroste. AM se zde využívají například pro výrobu protéz, implantátů, modelů orgánů, náhrad čelistí atd. Ty nejjednodušší operace AM jsou například výtisky modelů pro vzdělávací účely a jejich složitost roste až po tisk kolenních implantátů. K minimalizaci operačních rizik jsou AM využívány pro vytvoření fyzického modelu orgánu i s vrozenou vadou na kterém si chirurgové nastudují postup operace. Kovový tisk je ve zdravotnictví využíván pro výrobu implantátů, které jsou implementovány jako náhrada kostí, nebo kloubů. Prozatím největší naděje jsou vkládány do tzv. biotisku, který je schopen tisknout tkáň, cévy, kosti a orgány. Tisková hlava během biotisku nanáší buněčnou hmotu do nosné konstrukce. Konstrukce je tvořena z hydrogelu, ve kterém mají buňky schopnost růstu, a tak vzniká organická tkáň. [13]



obr. č. 38: Ukázka implementace kovové destičky do lebky, destička byla vytisknuta technologií SLS



obr. č. 39: Biovýtisk lidského ucha a nosu

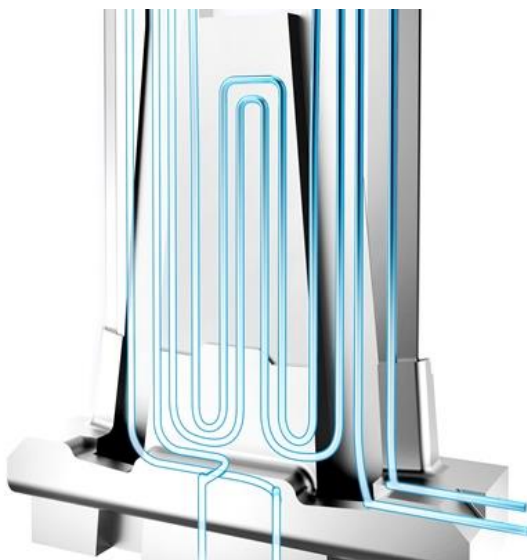
4.4 High-pressure die casting, Lost-wax casting

Aditivní technologie si nachází široké uplatnění také při slévání, tlakovém lití a rychlé výrobě nástrojů. Kromě finálních výrobků a prototypů je zde například užíváno metody “Rapid Investment Casting”, jež spočívá ve výrobě vytavitelných, nebo spalitelných modelů pro odlévání kovů. Nejčastěji je užíváno výtisků z vosku pomocí technologie FDM kvůli jeho dobré vytavitelnosti. Díky možnosti topologické optimalizace je to velmi efektivní proces. Hlavní výhoda využití lití na vytištěný voskový model oproti kovovému tisku je zbavení se anizotropie materiálu, možnost využití širšího spektra materiálů a také je to levnější proces. [14]



obr. č. 40: Ukázka odlitku litého na vytavitelný model s postupným provedením topologické optimalizace, vytavitelný model byl vytištěn z vosku pomocí technologie FDM

Využití AM v procesu “High pressure die casting” spočívá v tisku forem pro tlakové odlévání. Hlavní výhoda užití AM u této technologie spočívá v možnosti využití konformního chlazení. Konformní chlazení je chladicí okruh navržený tak, že v nejkratší možné vzdálenosti od stěny vylisku kopíruje jeho povrchový tvar a odvádí teplo od vstříkovaného materiálu. To má primárně za cíl zkrácení chladicího cyklu až o 50% a tím pádem se může vstříkovací forma otevřít za kratší dobu a celý proces se zrychluje [23].



obr. č. 41: Konformní chlazení

obr. č. 42: Vstříkovací forma

4.5 Spotřební průmysl, luxusní zboží

Aditivní technologie ve spotřebním průmyslu, který zahrnuje především oděvnictví, kosmetické výrobky, šperky, obuvnictví a výrobu spotřební elektroniky. AM pomáhá primárně v realizaci fyzického modelu. Díky AM je spotřební průmysl schopen mnohem rychlejšího vývoje produktů. Užití AM pro tvorbu finálních produktů zde má spíše minoritní podíl a je jej využíváno například pro výrobu spíše luxusního zboží jako plastových obrouček brýlí, zlatých prstenů a zakázkových bot se speciálním podešvem. [15]



obr. č. 43: Brýlové obroučky zhotovené pomocí technologie FDM



obr. č. 44: Kolekce 3D tištěných šatů od návrhářky Iris Van Herpen

4.6 Stavebnictví

Aplikace AT ve stavebnictví je v dnešních dnech spíše na svém počátku a ještě ji čeká velký vývoj. I když možnost vytvoření betonového skeletu bez nutnosti bednění, do kterého se beton lije, zní lákavě, tak je to v dnešních dnech spíše nereálné. Velká výhoda v užití AM ve stavebnictví by mohla spočívat v tom, že by odpadla nutnost jádrového vrtání a stěna už by se zhotovila s prostupy na vodní potrubí, elektrické sítě apod. Je zde také důležité mít na paměti to, že by bylo možné vytisknout pouze obvodové stěny a všechny stavební otvory by se musely vyložit podporami. Prozatím je zde AM užito jen při výrobě samotných stěn, které se následně montují v jeden celek.



obr. č. 45: Dům Prvok, první dům v ČR zhotovený pomocí AM

5. Moderní vývojové trendy

Dle Gibson a spol. [1] je budoucí koncept zcela prostý. Frázi “design anywhere, build anywhere”, v českém překladu “navrhni kdekoliv, vytvoř kdekoliv”, poukazují na propojení hardwaru a softwaru pomocí internetu na celém světě. Kde například autor poskytuje práva k modelu pouze virtuálně a samotná replikace již probíhá nezávisle, na jiném místě. Jde tak o postupné bourání hranice mezi osobou konzumující a mezi osobou obsah tvořící. Ve zmíněné publikaci je tento fenomén popsán jako “digiproneurship”. Jako je tomu ostatně na internetu jako takovém, u AT je silná crowdsourcingová základna zpřístupňující technologie široké veřejnosti. Technologie pro “desktopové” aplikace jsou dnes dostupné prakticky komukoliv. To hlavně díky stále zlevňujícímu hardwaru a velkému množství open source softwarů.

Pro zasazení moderních vývojových trendů do kontextu velkovýroby je lepší se nejprve podívat na celou věc z hlediska financí a snižování výrobních nákladů. Což je chťe nechtě hlavní motivace pro vývoj technologií ve většině odvětví ve 21. století. V této vizi jde pak také hlavně o omezení logistických bariér, snížení nákladů na dopravu, či nákladů na výrobu a pracovní sílu. V praxi může velkoformátové zavádění AM do průmyslové výroby mít za následek například:

- menší spotřeba materiálu a nižší náklady na uvedení do provozu z důvodu toho, že nejsou potřeba formy pro výrobky
- méně spojovacího zařízení a méně kapitálu vázaného na infrastrukturu z důvodu menší potřeby spojování jednotlivých dílů
- méně pracovní síly a méně montážních zařízení a s tím spojené i snížení nákladů za externí montáž (montáž jinou společností) z důvodu menší nutnosti spojování jednotlivých dílů
- menší nároky na úložné prostory a snížení velikosti továren a skladů z důvodu toho, že není potřeba skladování náhradních dílů

AT konceptuálně mění dosavadní zažité modely a postupy výroby. Je tedy potřeba se zamyslet, co vlastně by budoucí vývoj AT mohl znamenat, a co jsou / byly hlavní

faktory jeho rozšíření. Za poslední dekády to bylo hlavně vypršení duševních vlastnictví, zejména u klíčových patentů AM. Ty hrály v EU velmi důležitou roli a způsobily náhlý nárůst obchodního zájmu. Mají-li se výrobní haly začít plnit řadami 3D tiskáren, tak se budou muset nevyhnutelně představit nové výrobní modely jak v designu, tak ve výrobních procesech. Jednou z vizí AM je decentralizovaná výroba s nízkým až středním objemem produkce umožňující společnosti přizpůsobit se významným změnám na trhu a v dodavatelském řetězci [2]. Mezi tyto změny patří, snížení nákladů, schopnost výroby produktů blíže k zákazníkům, flexibilnější portfolio produktů, snížení logistické složitosti, zapojení spotřebitelů do návrhových procesů a snížení nutné investice do rozvoje. Pro tento rozvoj jsou zapotřebí nové obchodní modely například na hobby úrovni, na úrovni výroby prototypů, či krátkodobé velkovýroby. Zároveň je nesmírně důležité reflektovat současné a budoucí mezery na trhu vhodné pro AM.

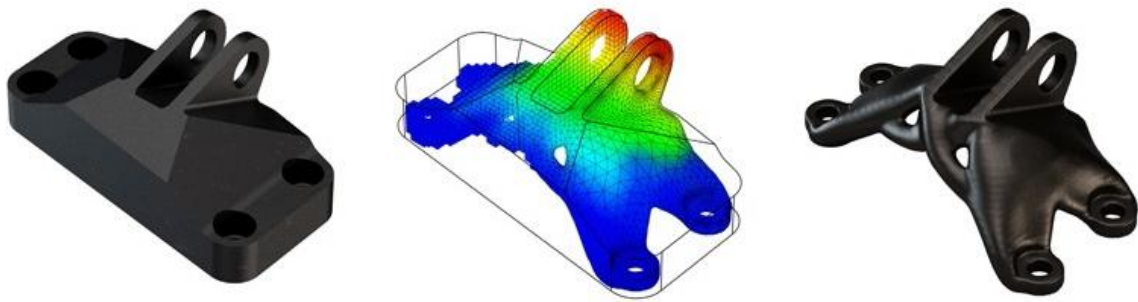
Dle současného vývoje je budoucnost AM, stejně jako u každé technologie, v pokořování limitů a zvyšování laetek. V současnosti AM vyniká schopností tvorby velice komplexních předmětů z komplikovaných geometrických ploch. Další nesmírnou výhodou je možnost adaptace, či personalizace produktu pro jeden specifický účel. Příkladem mohou být třeba lidské protézy navržené přímo na míru pro jejich nositele, replikace fyzických objektů na základně 3D skenování, či vytváření prototypů produktů pro velkovýrobu. Bereme-li v potaz současné limity, tak je to přesnost, rozměry vytvořeného objektu, rychlost, cena, a hlavně fyzické vlastnosti použitého materiálu. Všech těchto pět aspektů spolu úzce souvisí a je to právě těchto pět aspektů, kterým definují budoucí vývoj AT. Velký význam je kladen materiálovému inženýrství, zde je trend ve vývoji a potenciál opravdu vysoký.

Materiálové inženýrství v kombinaci s AM dalo vzniknout technologiím jako je multi-materiálový 3D tisk a 4D tisk. Technologie multi-materiálového 3D tisku umožňuje použití několika různým materiálů najednou. Tato technologie je kompatibilní s již zmíněnými principy FDM, SLA a 3DP [10]. Stroje podporující tuto technologii mají o poznání vyšší pořizovací náklady avšak jejich možnosti využití jsou mnohem více všestranné. Mluvíme-li o moderních vývojových trendech, pak je to právě technologie

4D tisku. Tato technologie je teprve v raném stádiu vývoje a dosud je zatím limitovaná. V zásadě jde o kombinaci multi-materiálového 3D tisku, materiálového inženýrství, fyziky, chemie, biochemie a mnoho dalších vědních oborů a principů. Produkty vytvořené pomocí 4D tisku mají schopnost reagovat na vnější fyzikální, či chemické vlivy a přizpůsobit se jim svými vlastnostmi [10]. Přesnější definicí by tedy byla spíše proměna materiálu v čase. Se 4D tiskem úzce souvisí pojmy jako 4D bio tisk organismů, aktivní origami, morfující systémy, nebo také programovatelná hmota.

6. Možnosti topologické optimalizace ve výrobě

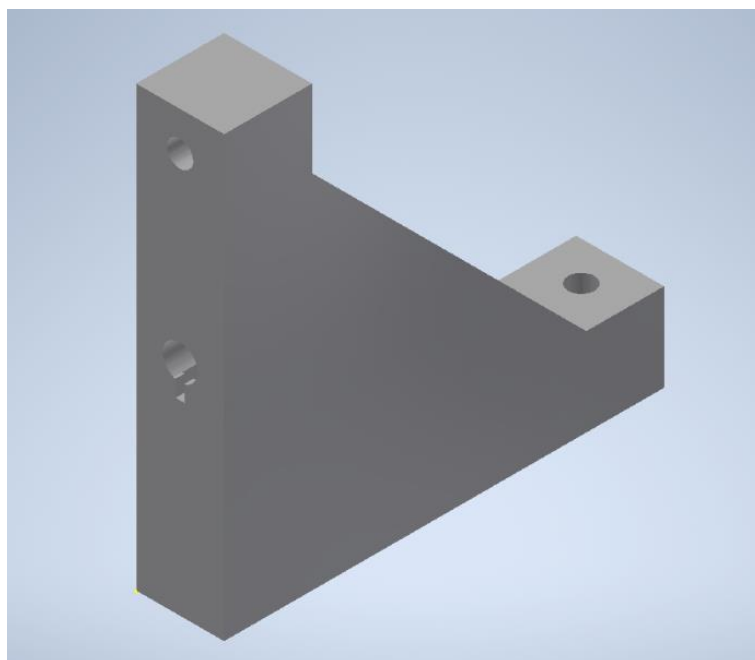
Aditivní technologie mají velkou výhodu v tom, že při výrobě lze s jejich pomocí do procesu snadno implementovat topologickou optimalizaci. Tato optimalizace spočívá v tom, že se vezme vymodelovaná součást a zanesou se do ní základní podmínky, jako přípojovací rozměry, obálka dílu (design space) a zatěžovací podmínky. Primární výhodou tohoto procesu spočívá v úspoře hmotnosti, což se následně promítá i do spotřeby materiálu a celkových nákladů na výrobu. Topologická optimalizace je matematická metoda, která optimalizuje rozložení materiálu v daném návrhovém prostoru pro dané zatížení, ohraničení a omezení s cílem maximalizovat efektivitu procesu [17]. Jak bylo již zmiňováno, proces topologické optimalizace se mimo vytavitelných modelů a všech druhů tisku využívá i v ostatních disciplínách strojírenství i mimo něj.



obr. č. 46: Příklad topologické optimalizace

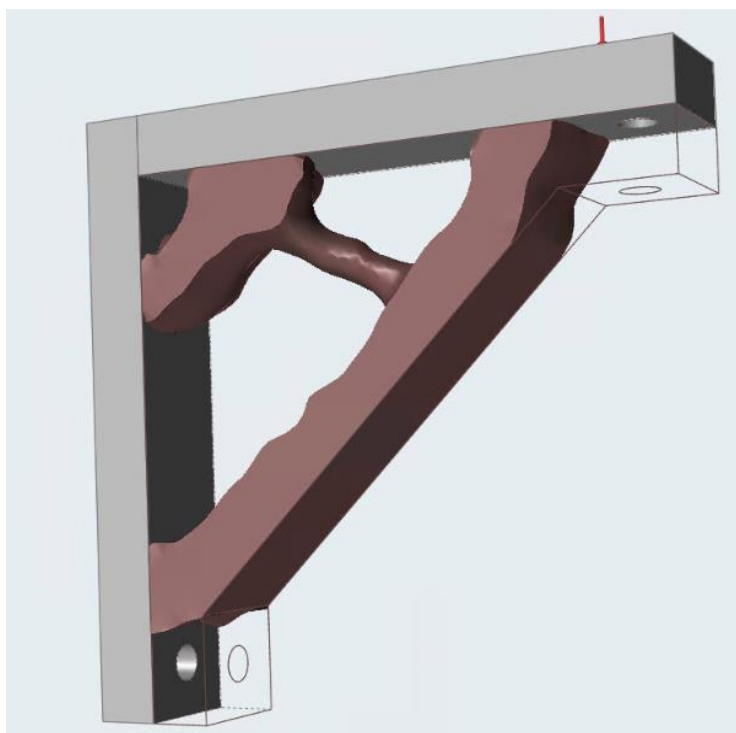
6.1 Ukázka topologická optimalizace

V práci byla provedena ukázka topologické optimalizace na pravoúhlém nosném profilu a následně byla převedena do fyzického modelu. Jako první krok bylo v SW Autodesk Inventor provedeno vymodelování součásti, kam byli zaneseny primární požadavky, jako jsou rozteče děr a velikost celého modelu. Následný model byl vygenerován ve formátu STEP. Formát STEP byl volen místo formátu STL kvůli tomu, že obsahuje více informací o modelu a lze s ním lépe pracovat v prostředí Altair Inspire.



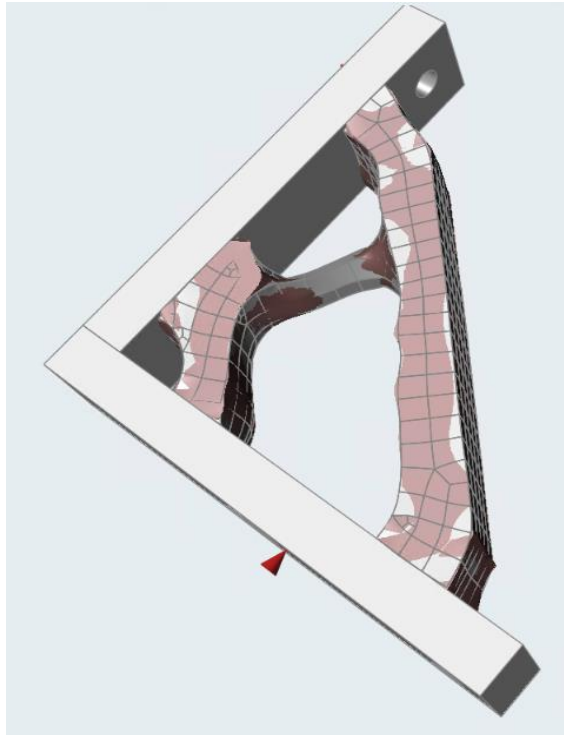
obr. č. 47: Model v prostředí SW Inventor

Topologická optimalizace byla provedena v SW Altair Inspire, kam byl model importován a bylo simulováno zatížení 150 N na jedno rameno. Druhé rameno bylo určeno jako podpora, což simuluje upevnění na zeď. Mým primárním cílem nebylo ušetřit až tolik materiálu, tak jsem design space ponechal spíše plnější pro zachování větší pevnosti.



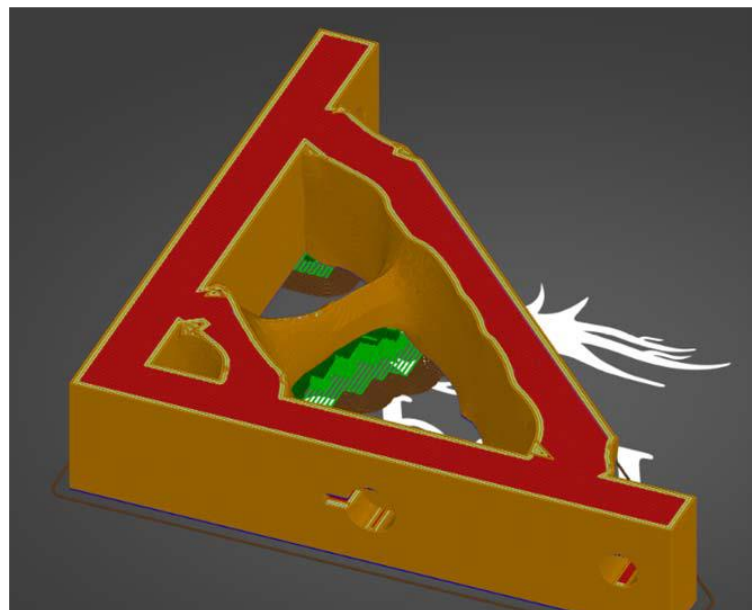
obr. č. 48: Model po TO v prostředí SW Altair Inspire

Po vyhodnocení provedení topologické optimalizace bylo vykonáno vyhlazení vygenerovaných tvarů. Následně byl model uložen ve formátu STL.



obr. č. 49: Vyhlazení tvarů v prostředí SW Altair Inspire

Jako čtvrtý krok byl model ve formátu STL importován do SW PrusaSlicer, kde byl model připraven pro výtisk. Součástí příprav bylo zanesení podpěr a nastavení podmínek tisku.



obr. č. 50: Model v prostředí SW PrusaSlicer



obr. č. 51: Výsledný fyzický model

Výsledný fyzický model po odstranění podpěr z FDM tiskárny Ender 3. Zvolený materiál byl plast PLA. Na povrchu lze vidět hrubší drsnost, struktura by se dala více zjemnit nastavením menší nanášené vrstvy, nebo jinou orientací tisku.

Provedení topologické optimalizace na úhlovém nosném profilu v této práci měla za výsledek ušetření materiálu z 50,59 g PLA na 43,52 g, což je úspora 13,98 % viz tabulka č. 5. Tato úspora materiálu byla dosažena bez ztráty požadovaných vlastností, za prodloužení času o 17 minut. Při velkovýrobě tohoto profilu, by užití topologické optimalizace měla za následek výrazné snížení nákladů za materiál, ale složitější proces vývoje.

tabulka č. 5: Porovnání efektivity topologické optimalizace

| | Bez využití topologické optimalizace | S využitím topologické optimalizace | Optimalizace v procentech |
|--|--------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|
| Použitý filament (m) | 16,96 | 14,59 | 13,97 % |
| Použitý filament (mm³) | 40795,23 | 35098,87 | 13,96 % |
| Použitý filament (g) | 50,59 | 43,52 | 13,98 % |
| Cena | 20,24 Kč | 17,41 Kč | 13,98 % |
| Čas | 6h 4min | 6h 21min | - 4,67 % |

7. Porovnání kvality tisku mezi technologiemi FDM

Tato praktická část práce navazuje a rozšiřuje bakalářskou práci pana Dvořáka z roku 2017 [18]. V oné práci byly porovnány dvě zařízení na bázi FDM, a to FELIX PRO 2 (představení září 2016) a ZORTRAX M200 (představení březen 2014). Tato práce rozšiřuje porovnání o další zařízení, a to hobby tiskárnu Creality Ender 3 (představení březen 2018) s mnohonásobně nižší pořizovací cenou. Cenově se jedná o tiskárny v cenových relacích 80 tisíc, 50 tisíc a 5tisíc korun. Hlavní motivací bylo prověřit na jak vysokou úroveň se za poslední roky posunuly FDM zařízení dostupné široké veřejnosti a zda jsou schopny konkurovat dražším zařízením starších ročníků. V práci pana Dvořáka byla kvalita tisku hodnocena na základě měření stejného vzorového výtisku na obou tiskárnách. Pro účely této práce byl vytištěn obdobný vzorek dle normy DIN EN ISO / ASTM 52902 [16].

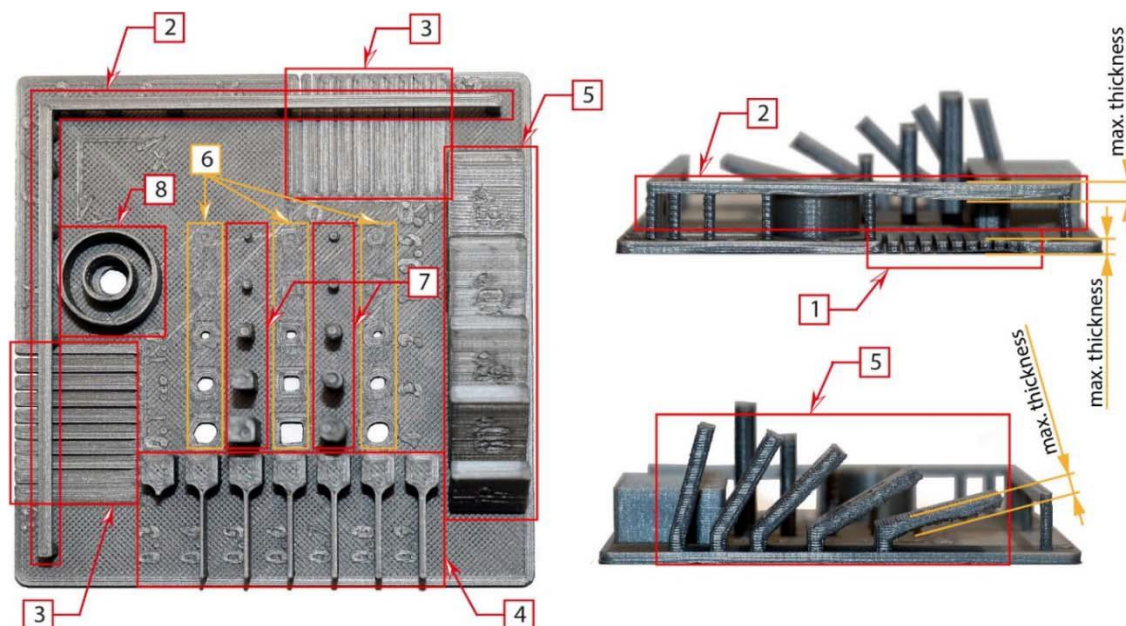
7.1 Testovací vzorky

Oba testovací vzorky, model z práce pana Dvořáka i model použitý pro tuto práci, splňují normu DIN EN ISO / ASTM 52902 [16], tudíž i navzdory odlišnému vzhledu se jedná o srovnatelné vzorky z pohledu rozměrů a technologické náročnosti. Pro vzorek v této práci je k dispozici osm posuzovacích aspektů na základě kterých se pak hodnotí přesnost výtisku viz obrázek č. 46. Jelikož na testovaném vzorku použitým v této práci lze srovnat pouze čtyři tvarové podobnosti s vzorkem pana Dvořáka, tak čtyři zbylé aspekty měřeny nebyly. Měřené aspekty jsou vyznačeny tučně. Testovaný vzorek byl vytištěn za 6 hodin 35 min ve výšce osy Z 26mm. Tloušťka tisknuté vrstvy byla nastavena na 0,1 mm.

Posuzovací aspekty:

- pokřivení
- přemostění
- **vnitřní žebra**
- **vnější žebra**
- výška profilu převisu

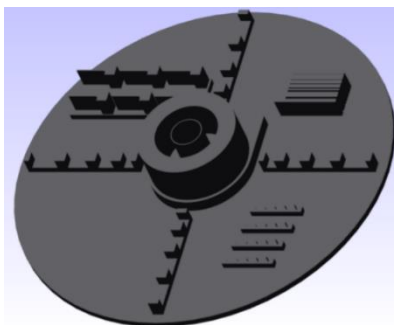
- velikost průřezu
- průřez pilířů
- soustřednost válců



obr. č. 52: Testovací vzorek dle normy DIN EN ISO / ASTM 52902 [17] použitý pro tuto práci. Popis jednotlivých posuzovacích aspektů: (1) pokřivení, (2) přemostění, (3) vnitřní žebra, (4) vnější žebra, (5) výška profilu převisu, (6) velikost průřezu, (7) průřez pilířů, (8) soustřednost válců.

7.2 Použitá měřidla

Pro naskenování vzorku použitého v práci bylo využito zařízení výpočetní tomografie. Následný mrak bodů byl vyhodnocen a změřen v SW myVGL 3.3.4. Testovaný vzorek byl podložen polystyrenem, jelikož má mnohem menší hustotu než vzorek zhotovený z plastu PLA. Pan Dvořák ve své práci [18] využil pro měření souřadnicový měřicí přístroj Zeiss Prismo.



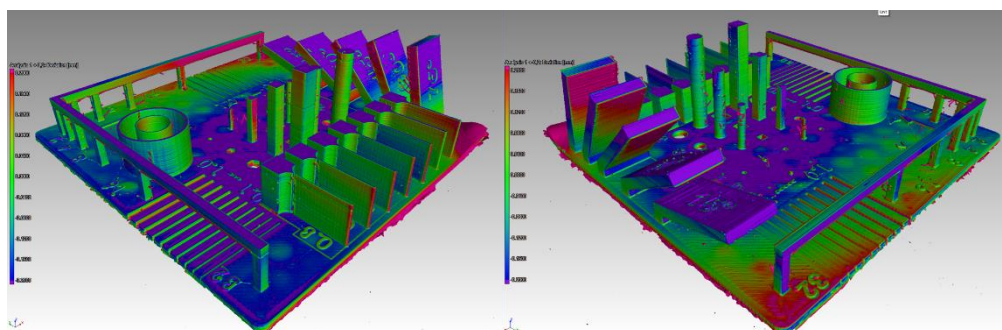
obr. č. 53: Testovací vzorek dle normy DIN EN ISO / ASTM 52902 [16] použitý v práci [18]

8. VÝSLEDKY

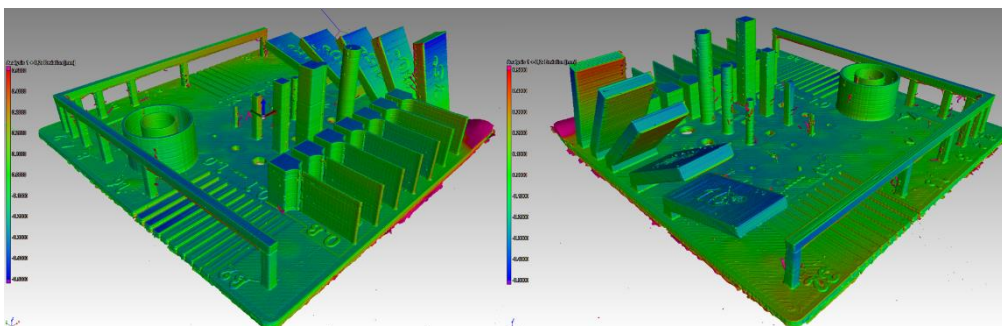
Tato kapitola sumarizuje výsledky měření mnou vytištěného vzorku na hobby FDM tiskárně Creality Ender 3. Testovací vzorek odpovídá standardu EN ISO / ASTM 52902. Porovnání výsledků z měření vzorku je zde navíc rozšířeno o porovnání měření obdobného vzorku stejné normy vytištěného na dvou profesionálních zařízeních Zortrax M200 a Felix pro 2 převzaté z práce pana Dvořáka [18].

8.1 Porovnání testovacího vzorku

Z vytištěného vzorku pro tuto práci bylo možné porovnat s prací pana Dvořáka [18] čtyři tvarové podobnosti. Porovnávanými tvary tedy byly vnitřní žebra, vnější žebra, čtvercový, kruhový průřez pilířů a odchylka od průměrů válců. Naměřené hodnoty z této práce a práce pana Dvořáka jsou vyneseny do čtyř tabulek.

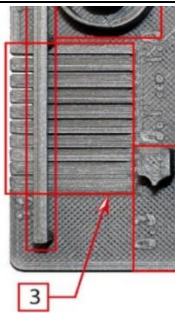
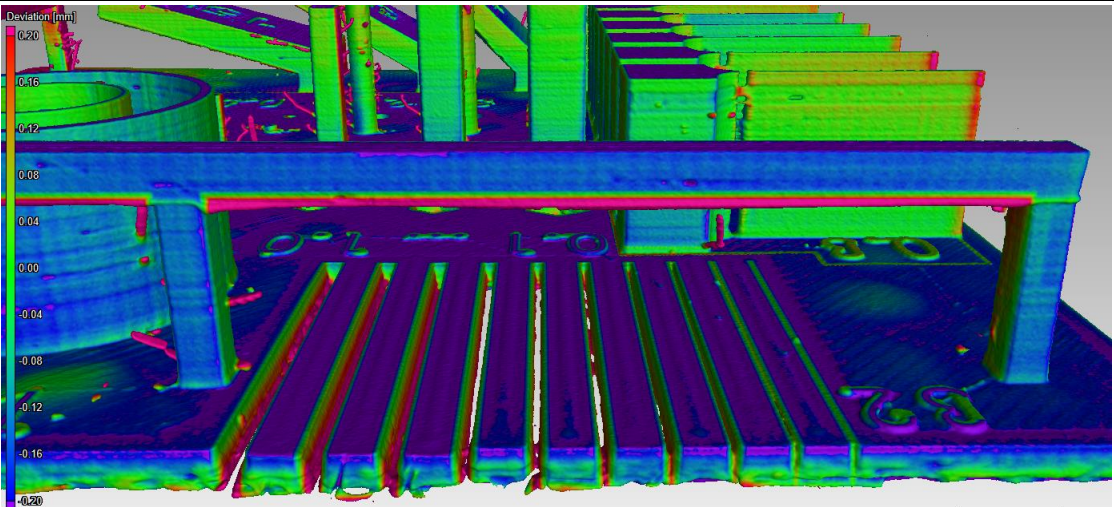


obr. č. 54: Reálný naskenovaný vzorek porovnaný s modelem STL s tolerancí $\pm 0,2$ mm.



obr. č. 55: Reálný naskenovaný vzorek porovnaný s modelem STL s tolerancí $\pm 0,5$ mm.

tabulka č. 6: Výsledky měření posuzovacích aspektů vytištěného vzorku – Vnitřní žebra

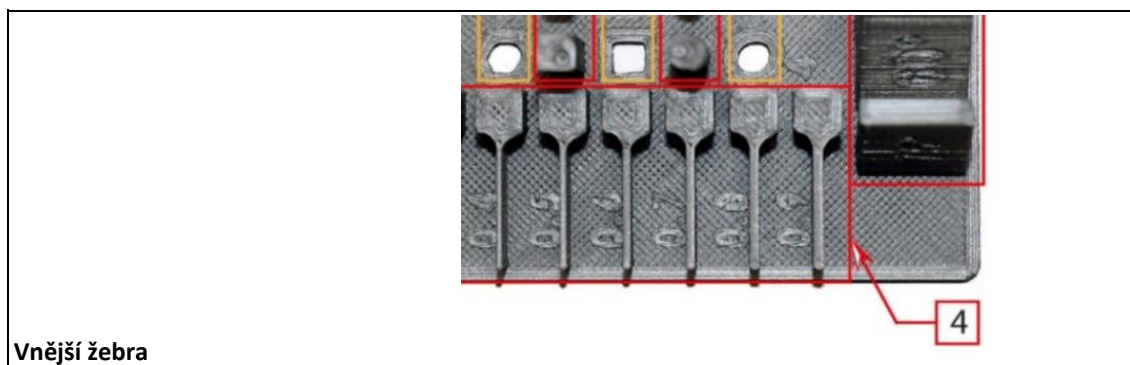
| | | | | | |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|
|  | | | | | |
| Vnitřní žebra | | | | | |
| Odchylky mezi digitálním 3D modelem a CT scanem fyzického 3D modelu vzorku | | | | | |
|  | | | | | |
| Hodnoty měřené za účelem porovnání kvality tisku mezi jednotlivými tiskárnami | | | | | |
| Vnitřní žebra orientovaná v ose X ➔ | | | | | |
| Výšková úroveň řezné roviny v ose Z = 1.7 [mm] | | | | | |
| Skutečná tloušťka [mm] | Měření 1 | Měření 2 | Měření 3 | Ø Měření | Odchylka |
| 1 | 0.90 | 0.97 | 0.97 | 0.95 | 0.05 |
| 0.9 | 0.81 | 0.90 | 0.89 | 0.87 | 0.03 |
| 0.8 | 0.71 | 0.77 | 0.76 | 0.75 | 0.05 |
| 0.7 | 0.60 | 0.62 | 0.65 | 0.62 | 0.08 |
| 0.6 | 0.45 | 0.57 | 0.56 | 0.53 | 0.07 |
| 0.5 | 0.29 | 0.46 | 0.48 | 0.41 | 0.09 |
| 0.4 | 0.20 | 0.31 | 0.33 | 0.28 | 0.12 |
| 0.3 | 0.00 | 0.18 | 0.20 | 0.13 | 0.17 |
| 0.2 | Zataveno | Zataveno | Zataveno | Zataveno | Zataveno |
| 0.1 | Zataveno | Zataveno | Zataveno | Zataveno | Zataveno |
| Vnitřní žebra orientovaná v ose Y ⬇ | | | | | |
| Výšková úroveň řezné roviny v ose Z = 1.7 [mm] | | | | | |
| Skutečná tloušťka [mm] | Měření 1 | Měření 2 | Měření 3 | Ø Měření | Odchylka |
| 1 | 0.96 | 1.01 | 0.98 | 0.98 | 0.02 |
| 0.9 | 0.83 | 0.81 | 0.79 | 0.81 | 0.09 |

| | | | | | |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0.8 | 0.77 | 0.77 | 0.79 | 0.78 | 0.02 |
| 0.7 | 0.70 | 0.66 | 0.61 | 0.66 | 0.04 |
| 0.6 | 0.57 | 0.57 | 0.53 | 0.56 | 0.04 |
| 0.5 | 0.47 | 0.47 | 0.43 | 0.46 | 0.04 |
| 0.4 | 0.39 | 0.40 | 0.37 | 0.39 | 0.01 |
| 0.3 | 0.26 | 0.26 | 0.24 | 0.25 | 0.05 |
| 0.2 | 0.11 | 0.1 | 0.05 | 0.09 | 0.11 |
| 0.1 | Zataveno | Zataveno | Zataveno | Zataveno | Zataveno |

tabulka č. 7: Porovnání kvality výtisku mezi hobby a tiskárnami střední třídy (vnitřní žebra)

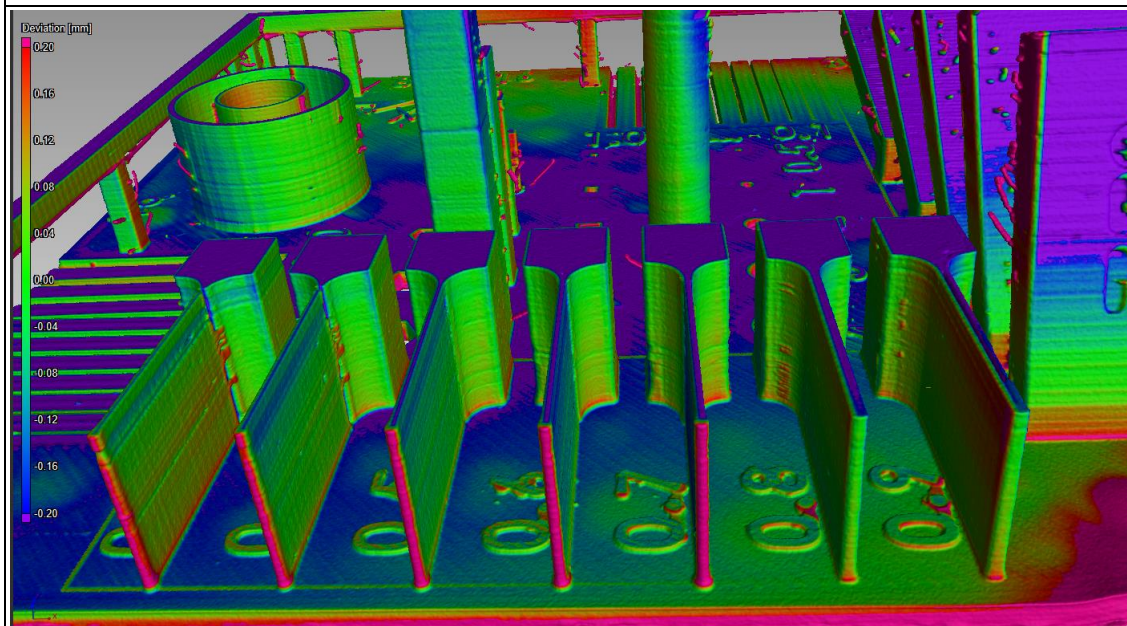
| Výsledné hodnoty z měření v porovnání v převzatými hodnotami tiskáren střední třídy | | |
|---|------------------------|-----------------|
| Hobby - Creality Ender 3 | | |
| Skutečná tloušťka [mm] | ∅ Měřená tloušťka [mm] | ∅ Odchylka [mm] |
| 1.00 | 0.97 | 0.03 |
| 0.90 | 0.84 | 0.06 |
| 0.80 | 0.76 | 0.04 |
| 0.70 | 0.64 | 0.06 |
| 0.60 | 0.54 | 0.06 |
| 0.50 | 0.43 | 0.07 |
| 0.40 | 0.33 | 0.07 |
| 0.30 | 0.19 | 0.11 |
| 0.20 | 0.09 | 0.11 |
| 0.10 | Zataveno | Zataveno |
| Zortrax M200 | | |
| Skutečná tloušťka [mm] | ∅ Měřená tloušťka [mm] | ∅ Odchylka [mm] |
| 1.000 | 0.882 | 0.118 |
| 0.800 | 0.624 | 0.176 |
| 0.600 | 0.441 | 0.159 |
| 0.400 | 0.228 | 0.172 |
| Felix pro 2 | | |
| Skutečná tloušťka [mm] | ∅ Měřená tloušťka [mm] | ∅ Odchylka [mm] |
| 1.000 | 0.913 | 0.087 |
| 0.800 | 0.761 | 0.039 |
| 0.600 | 0.533 | 0.067 |
| 0.400 | 0.289 | 0.111 |

tabulka č. 8: Výsledky měření posuzovacích aspektů vytištěného vzorku – Vnější žebra



Vnější žebra

Odchylky mezi digitálním 3D modelem a CT scanem fyzického 3D modelu vzorku



Hodnoty měřené za účelem porovnání kvality tisku mezi jednotlivými tiskárnami

Vnější žebra

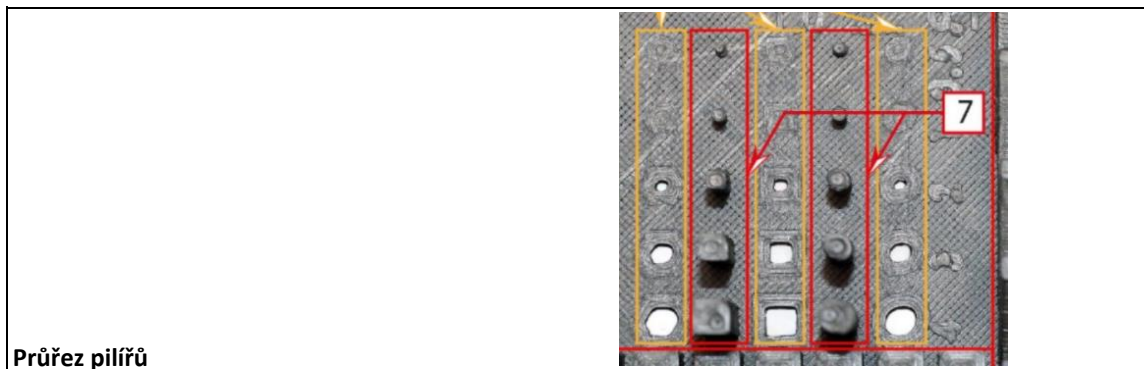
Výšková úroveň řezné roviny v ose Z = 5 [mm]

| Skutečná tloušťka [mm] | Měření 1 | Měření 2 | Měření 3 | Ø Měření | Odchylka |
|------------------------|----------|----------|----------|----------|-------------|
| 0.90 | 0.81 | 0.81 | 0.80 | 0.81 | 0.09 |
| 0.80 | 0.70 | 0.70 | 0.70 | 0.70 | 0.10 |
| 0.70 | 0.38 | 0.36 | 0.38 | 0.37 | 0.33 |
| 0.60 | 0.37 | 0.37 | 0.40 | 0.38 | 0.22 |
| 0.50 | 0.37 | 0.36 | 0.37 | 0.37 | 0.13 |
| 0.40 | 0.36 | 0.37 | 0.33 | 0.35 | 0.05 |
| 0.30 | 0.36 | 0.34 | 0.34 | 0.35 | 0.05 |

tabulka č. 9: Porovnání kvality výtisku mezi hobby a tiskárnami střední třídy (vnější žebra)

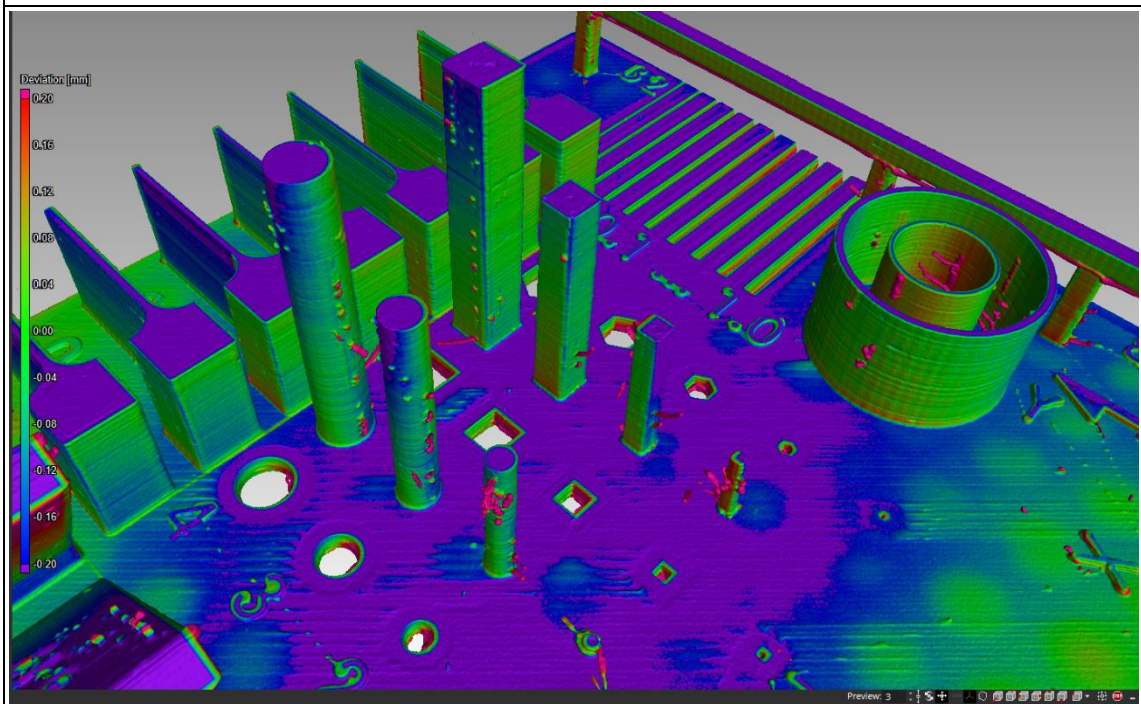
| Výsledné hodnoty z měření v porovnání v převzatými hodnotami tiskáren střední třídy | | |
|---|------------------------|-----------------|
| Hobby - Creality Ender 3 | | |
| Skutečná tloušťka [mm] | ∅ Měřená tloušťka [mm] | ∅ Odchylka [mm] |
| 0.90 | 0.81 | 0.09 |
| 0.80 | 0.70 | 0.10 |
| 0.70 | 0.37 | 0.33 |
| 0.60 | 0.38 | 0.22 |
| 0.50 | 0.37 | 0.13 |
| 0.40 | 0.35 | 0.05 |
| 0.30 | 0.35 | 0.05 |
| Zortrax M200 | | |
| Skutečná tloušťka [mm] | ∅ Měřená tloušťka [mm] | ∅ Odchylka [mm] |
| 1.000 | 1.202 | 0.20 |
| 0.800 | 1.111 | 0.31 |
| 0.600 | 0.947 | 0.35 |
| 0.400 | Nevytištěno | Nevytištěno |
| 0.200 | Nevytištěno | Nevytištěno |
| 0.100 | Nevytištěno | Nevytištěno |
| Felix pro 2 | | |
| Skutečná tloušťka [mm] | ∅ Měřená tloušťka [mm] | ∅ Odchylka [mm] |
| 1.000 | 1.020 | 0.02 |
| 0.800 | 0.852 | 0.05 |
| 0.600 | 0.685 | 0.09 |
| 0.400 | 0.411 | 0.01 |
| 0.200 | 0.335 | 0.14 |
| 0.100 | 0.213 | 0.11 |

tabulka č. 10: Výsledky měření posuzovacích aspektů vytištěného vzorku – Průřez pilířů



Průřez pilířů

Odchylky mezi digitálním 3D modelem a CT scanem fyzického 3D modelu vzorku



Hodnoty měřené za účelem porovnávat kvalitu tisku mezi jednotlivými tiskárnami

Průřez pilířů (čtverec) orientovaný v ose X

Výšková úroveň řezné roviny v ose Z = 5, 7, 9 [mm]

| Skutečný průřez [mm] | Měření 1 | Měření 2 | Měření 3 | Ø Měření | Odchylka |
|----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 4.00 | 3.99 | 3.98 | 3.99 | 3.99 | 0.01 |
| 3.00 | 3.01 | 3.02 | 3.02 | 3.02 | 0.02 |
| 2.00 | 2.00 | 2.01 | 2.01 | 2.01 | 0.01 |
| 1.00 | Deformace | Deformace | Deformace | Deformace | Deformace |
| 0.50 | Nevytištěno | Nevytištěno | Nevytištěno | Nevytištěno | Nevytištěno |

Průřez pilířů (čtverec) orientovaný v ose Y

Výšková úroveň řezné roviny v ose Z = 5, 7, 9 [mm]

| Skutečný průřez [mm] | Měření 1 | Měření 2 | Měření 3 | Ø Měření | Odchylka |
|----------------------|----------|----------|----------|----------|-------------|
| 4.00 | 3.98 | 3.99 | 3.98 | 3.98 | 0.02 |
| 3.00 | 3.03 | 2.97 | 3.02 | 3.01 | 0.01 |

| | | | | | |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 2.00 | 2.00 | 1.99 | 1.99 | 1.99 | 0.01 |
| 1.00 | Deformace | Deformace | Deformace | Deformace | Deformace |
| 0.50 | Nevytištěno | Nevytištěno | Nevytištěno | Nevytištěno | Nevytištěno |
| Průřez pilířů (kruh) orientovaný v ose X | | | | | |
| Výšková úroveň řezné roviny v ose Z = 5, 7, 9 [mm] | | | | | |
| Skutečný průřez [mm] | Měření 1 | Měření 2 | Měření 3 | ∅ Měření | Odchylka |
| 4.00 | 4.01 | 3.94 | 3.97 | 3.97 | 0.03 |
| 3.00 | 2.91 | 2.91 | 2.94 | 2.92 | 0.08 |
| 2.00 | 1.93 | 1.92 | 2.02 | 1.96 | 0.04 |
| 1.00 | Deformace | Deformace | Deformace | Deformace | Deformace |
| 0.50 | Nevytištěno | Nevytištěno | Nevytištěno | Nevytištěno | Nevytištěno |
| Průřez pilířů (kruh) orientovaný v ose Y | | | | | |
| Výšková úroveň řezné roviny v ose Z = 5, 7, 9 [mm] | | | | | |
| Skutečný průřez [mm] | Měření 1 | Měření 2 | Měření 3 | ∅ Měření | Odchylka |
| 4.00 | 3.93 | 3.99 | 3.92 | 3.95 | 0.05 |
| 3.00 | 2.88 | 2.91 | 3.01 | 2.93 | 0.07 |
| 2.00 | 2.02 | 1.99 | 1.96 | 1.99 | 0.01 |
| 1.00 | Deformace | Deformace | Deformace | Deformace | Deformace |
| 0.50 | Nevytištěno | Nevytištěno | Nevytištěno | Nevytištěno | Nevytištěno |

tabulka č. 11: Porovnání kvality výtisku mezi hobby a tiskárnami střední třídy (průřez pilířů)

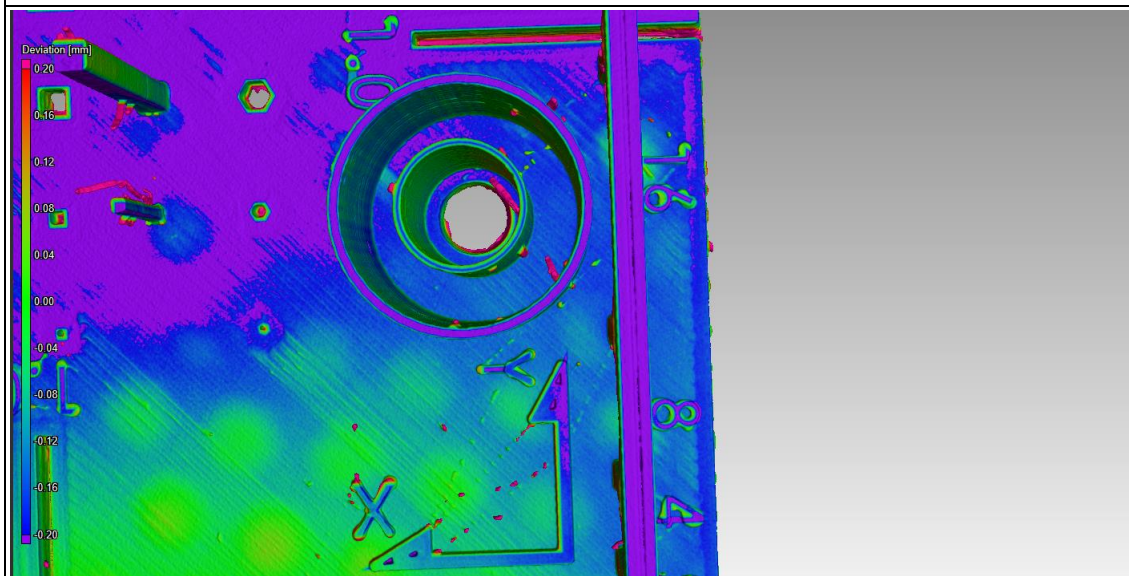
| Výsledné hodnoty z měření v porovnání v převzatými hodnotami tiskáren střední třídy | | |
|---|----------------------|-----------------|
| Hobby - Creality Ender 3 | | |
| Skutečný průřez [mm] | ∅ Měřený průřez [mm] | ∅ Odchylka [mm] |
| 4.00 | 3.97 | 0.03 |
| 3.00 | 2.97 | 0.03 |
| 2.00 | 1.99 | 0.01 |
| 1.00 | Deformováno | Deformováno |
| 0.50 | Nevytištěno | Nevytištěno |
| Zortrax M200 | | |
| Skutečný průřez [mm] | ∅ Měřený průřez [mm] | ∅ Odchylka [mm] |
| 5.000 | 5.076 | 0.076 |
| 2.500 | 2.488 | 0.012 |
| Felix pro 2 | | |
| Skutečná průřez [mm] | ∅ Měřený průřez [mm] | ∅ Odchylka [mm] |
| 5.000 | 5.045 | 0.045 |
| 2.500 | 2.544 | 0.044 |

tabulka č. 12: Výsledky měření posuzovacích aspektů vytištěného vzorku – Odchylka od průměru válců



Odchylka od průměru válců

Odchylky mezi digitálním 3D modelem a CT scanem fyzického 3D modelu vzorku



Hodnoty měřené za účelem porovnávat kvalitu tisku mezi jednotlivými tiskárnami

Průměry válců

| Objekt | Skutečný průměr [mm] | Měření 1 [mm] | Měření 2 [mm] | Měření 3 [mm] | Ø Měřený [mm] | Odchylka [mm] |
|---------------|----------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Vnitřní otvor | 5 | 4.95 | 4.95 | 4.96 | 4.95 | 0.05 |
| Vnitřní válec | 8 | 8.15 | 7.96 | 7.94 | 8.02 | 0.02 |
| Vnější válec | 16 | 16.05 | 15.84 | 15.82 | 15.90 | 0.10 |

tabulka č. 13: Porovnání kvality výtisku mezi hobby a tiskárnami střední třídy (Odchylka od průměru válců)

| Výsledné hodnoty z měření v porovnání v převzatými hodnotami tiskáren střední třídy | | | |
|---|----------------------|----------------------|-----------------|
| Hobby - Creality Ender 3 | | | |
| Objekt | Skutečný průměr [mm] | ∅ Měřený průměr [mm] | ∅ Odchylka [mm] |
| Vnitřní otvor | 5 | 4.95 | 0.05 |
| Vnitřní válec | 8 | 8.02 | 0.02 |
| Vnější válec | 16 | 15.90 | 0.10 |
| Zortrax M200 | | | |
| | Skutečný průměr [mm] | ∅ Měřený průměr [mm] | ∅ Odchylka [mm] |
| Válec 1 | 15.000 | 15.231 | 0.23 |
| Válec 2 | 30.000 | 29.699 | 0.30 |
| Válec 3 | 47.000 | 46.882 | 0.12 |
| Felix pro 2 | | | |
| | Skutečný průměr [mm] | ∅ Měřený průměr [mm] | ∅ Odchylka [mm] |
| Válec 1 | 15.000 | 14.763 | 0.24 |
| Válec 2 | 30.000 | 29.780 | 0.22 |
| Válec 3 | 47.000 | 46.863 | 0.14 |

tabulka č. 14: Vyhodnocení porovnání jednotlivých tiskáren

| Hodnocení v porovnání 1 - nejlepší, ... , 3 - nejhorší | Tiskárna | | |
|---|------------------|---------------|-------------|
| | Hobby | Střední třída | |
| Posuzovací aspekt | Creality Ender 3 | Zortrax M200 | Felix pro 2 |
| Vnitřní žebra | 1 | 3 | 2 |
| Vnější žebra | 2 | 3 | 1 |
| Průřez pilířů | 1 | 2 | 3 |
| Odchylka od průměru válců | 1 | 2 | 3 |
| Celková známka | 1.25 | 2.5 | 2.25 |

Z naměřených hodnot vyplývá, že modernější hobby tiskárna může v jednodušších aplikacích konkurovat mnohem dražším strojům staršího data vydání, nebo je dokonce i překonat. Je zde ale nutné brát v potaz další faktory, například to, že v případě tisku na zařízení Creality Ender 3 je nutné po každém tisku rektifikovat "bed" (podložku, na kterou je nanášen materiál). Tyto problémy mohou způsobovat nestálost v kvalitě výtisku. U zařízení Creality Ender 3 sice vyplývá z měření, že tiskne přesněji, ale je zde

také třeba mít na paměti, že výtisky z Ender 3 na sobě mohou mít roztavené struny kvůli špatné retrakci filamentu, což u výtisků v práci pana Dvořáka nebylo. V těchto aspektech se testovaná hobby tiskárna nevyrovná zařízením střední třídy. Dalším důležitým faktorem je, že měření pana Dvořáka a měření v této práci probíhalo za zcela odlišných podmínek a zcela odlišnými přístroji s odlišnou přesností. Navzdory těmto okolnostem nevylučuji možnost využití hobby zařízení k široké škále aplikací, hlavně z důvodu velmi znatelné finanční úspory, která může být pro někoho hlavním aspektem koupě takového zařízení. Z lidového hlediska poměru ceny a výkonu se skutečně jedná o dobré výsledky.

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo popsat aditivní technologie výroby, moderní vývojové trendy, dělení technologií aditivní výroby, vhodné aplikace jednotlivých principů v průmyslu, popis základních funkčních principů a také možnost optimalizace ve výrobě, konkrétně pak topologickou optimalizaci. Jakožto přidaná hodnota k popisu a kategorizaci AT byla praktická ukázka topologické optimalizace a užití technologie FDM s porovnáním výsledné kvality výtisku.

AT byly dle standartu ASTM rozděleny do sedmi kategorií na základě technologických principů a byly popsány konkrétní technologické postupy, principy a jejich možné aplikace v různých odvětvích průmyslu. U každé z těchto sedmi kategorií byly popsány jednotlivé konkrétní technologie, jejich princip i s grafickým zobrazením, ukázkou zařízení a výslednou součástí. Zvýšená pozornost byla věnována technologii tisku FDM, jakožto technologii komerčně nejrozšířenější. Téma AT bylo zasazeno do širšího kontextu trendů současné moderní výroby z pohledu širokého spektra odvětví včetně stručného náhledu do možné budoucnosti a potenciálu této technologie.

V práci byla také prezentována i praktická ukázka topologické optimalizace ve výrobě, kde byly porovnány dva výtisky z hobby zařízení *Creality Ender 3*, první vzorek před optimalizací a druhý po. Topologická optimalizace měla za výsledek ušetření 13.97% materiálu na úkor prodloužení doby tisku o 4.67%. Topologická optimalizace si naklade za cíl šetřit čas, ale spíše ušetřit váhu a samotný materiál při zachování požadovaných vlastností. Jedna z možných příčin delší doby trvání výtisku po optimalizaci mohla být větší komplexita křivek a geometrií vzniklých topologickou optimalizací.

V další praktické ukázce bylo porovnáno hobby zařízení se zařízeními střední třídy FDM technologie, kde byl testovací vzorek vytištěný na hobby zařízení *Creality Ender 3* naskenován pomocí přístroje výpočetní tomografie a následně byl porovnán s dvěma obdobnými výtisky ze zařízení *Zortrax M200* a *Felix pro 2* s hodnotami měření převzatými z již realizované bakalářské práce z roku 2017. Kvalita jednotlivých výtisků byla posouzena

na základně čtyř posuzovacích aspektů. V provedeném testování se *Creality Ender 3* umístilo jako první, následováno *Felix pro 2* a pak nakonec *Zortrax M200*. Avšak výsledky je nutné brát s rezervou, protože měření výtisků v referenční a této práci probíhalo za zcela odlišných podmínek a zcela odlišnými přístroji s odlišnou přesností. Také se

Vzhledem k okolnostem dnešní doby, kdy po většinu semestru nebyly přístupné laboratoře pro praktická měření, se zde použité měření alespoň pokusilo přiblížit běžným standardům a nárokům na závěrečnou práci. Proto jejich výpovědní hodnota není pro akademickou půdu zcela relevantní. Hlavním cílem této části práce tedy bylo spíše osvojení si dovednosti práce se skutečnými daty a rozvinutí schopnosti vyhodnocování dat ze skutečného měření pokročilými technologiemi CT.

Seznam obrázků

- obr. č. 1: Josef Hodek (2013); Aditivní technologie; Zpráva o stavu 3D tisku pro Českou technologickou platformu STROJÍTENSTVÍ, o.s.
- obr. č. 2: webová stránka easycnc.cz
<https://www.easycnc.cz/inpage/informace-o-technologiich-3d-tisku/>
- obr. č. 3: výukový materiál SPŠ NA PROSEKU, Praha, ČR. FDM – Fused Deposition Modeling (2017)
<http://www.sps-prosek.cz/soubory/S/CAX/FDM.pdf>
- obr. č. 4: webová stránka firmy Creality
https://cdn.shopify.com/s/files/1/0217/6004/9216/products/CR-5-Pro_1024x1024@2.jpg?v=1586254929
- obr. č. 5: vlastní fotografie
- obr. č. 6: vlastní fotografie
- obr. č. 7: webová stránka sculpteo.com
https://cdn2.sculpteo.com/blog/wp-content/uploads/2018/06/CC_Curve_House.jpg
- obr. č. 8: webová stránka livescience.com
<https://www.livescience.com/38862-selective-laser-sintering.html>
- obr. č. 9: webová stránka firmy Sintratec
<https://staticcontent.sintratec.com/wp-content/uploads/2020/04/07131621/sintratec-kit-3d-printer-frontview.png>
- obr. č. 10: webová stránka 3dhubs.com
<https://www.3dhubs.com/knowledge-base/hp-mjf-vs-sls-3d-printing-technology-comparison/>
- obr. č. 11: webová stránka custompart.net
<https://www.custompartnet.com/wu/direct-metal-laser-sintering>
- obr. č. 12: webová stránka 3dLogistics.com
<https://www.3dlogics.com/wp-content/uploads/2020/06/dmlsheroimage@2x-1.png>
- obr. č. 13: webová stránka ResearchGate.net
<https://www.researchgate.net/publication/305346356/figure/fig5/AS:384241557884933@1468621734859/Examples-of-parts-made-by-DMLS-methods-24.png>

- obr. č. 14: Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2015); Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing, second edition. In Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing, Second Edition; str. 138
- obr. č. 15: webová stránka firmy GE
https://www.ge.com/additive/sites/default/files/2020-06/spectrah_0.jpg
- obr. č. 16: webová stránka AeroDefehseTech.com
<https://www.aerodefensetech.com/component/content/article/adt/features/articles/20342>
- obr. č. 17: webová stránka 3dilla.com
<https://www.3dilla.com/assets/img/stereolithographie.jpg>
- obr. č. 18: webová stránka firmy Formlabs
<https://formlabs.com/checkout-media/catalog/product/600x600/f/o/form-2-refurb-1200x1200.png>
- obr. č. 19: webová stránka Manufactur3dMag.com
<https://manufactur3dmag.com/wp-content/uploads/2018/07/Tusks-of-the-Mammoth-skeleton-being-printed-on-stereolithography-printers.jpg>
- obr. č. 20: webová stránka FormLabs.com
<https://formlabs.com/blog/resin-3d-printer-comparison-sla-vs-dlp/>
- obr. č. 21: webová stránka firmy Flashforge
<https://www.flashforge.com/product-category/10>
- obr. č. 20: webová stránka 3DF.io
<https://3df.io/dlp-vs-sla-print-speed/>
- obr. č. 23: webová stránka 3dhubs.com
<https://f.3dhubs.com/sDg38yEPAjaebWjn2RKMsj.png>
- obr. č. 24: webová stránka firmy Stratasys
<https://www.stratasys.com/-/media/features/printers-filter/j850.png>
- obr. č. 25: webová stránka all3dp.com
<https://all3dp.com/2/polyjet-3d-printing-technologies-simply-explained/>
- obr. č. 26: webová stránka Loughborough University
<https://www.lboro.ac.uk/media/wwwlboroacuk/external/content/research/amrg/binde-rjetting-process.jpg>
- obr. č. 27: webová stránka Loughborough University
<https://www.lboro.ac.uk/media/wwwlboroacuk/external/content/research/amrg/Binder%20Jetting11.jpg>

- obr. č. 28: webová stránka 3dhubs.com
<https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-binder-jetting-3d-printing/>
- obr. č. 29: online článek Sheet Lamination Processes
https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4419-1120-9_8
- obr. č. 30: webová stránka RedBrick3d.com
<https://cdn.shopify.com/s/files/1/0756/6321/products/mcor-matrix-300-3d-printer.jpg?v=1428616236>
- obr. č. 31: webová stránka RedBrick3d.com
https://cdn.shopify.com/s/files/1/0756/6321/products/mcor-matrix-art-example_grande.jpg?v=1428616236
- obr. č. 32: webová stránka ResearchGate.net
<https://www.researchgate.net/publication/337695042/figure/fig2/AS:831872024195072@1575345154140/Laser-engineered-net-shaping-LENS-process-11.png>
- obr. č. 33: webová stránka firmy Optomec
<https://optomec.com/wp-content/uploads/2018/08/LENS860-machine.png>
- obr. č. 34: webová stránka 3DPrintingIndustry.com
https://3dprintingindustry.com/wp-content/uploads/2018/08/39215997_2138389162856689_7211221253573574656_o.jpg
- obr. č. 35: webová stránka firmy Bugatti
<https://www.bugatti.com/media/news/2018/world-premiere-brake-caliper-from-3-d-printer/>
- obr. č. 36: webová stránka Metal AM
<https://www.metal-am.com/articles/metal-3d-printing-gains-ground-in-the-tyre-industry/>
- obr. č. 37: webová stránka gfwSpeak.com
<https://gfwSpeak.com/wp-content/uploads/2017/06/LEAP-Nozzel-e1498214364654.png>
- obr. č. 38: webová stránka TCT Magazine
<https://www.tctmagazine.com/downloads/2576/download/Medical%20Modeling.jpg?cb=89c99a27c36f5fb494b271dbc016e6fc&w=925&h=>
- obr. č. 39: webová stránka magazínu Wired
<https://www.wired.com/2013/11/dont-like-your-face-3-d-print-a-new-one/>
- obr. č. 40: článek Design and Topology Optimization of 3D-Printed Wax Patterns for Rapid Investment Casting; dostupný na <https://www.researchgate.net/publication/334556687>

- obr. č. 41: webová stránka innomia.com
<https://www.innomia.cz/konformni-chlazení>
- obr. č. 42: webová stránka protoservices.co
<http://www.protoservices.co.in/rapid.htm>
- obr. č. 43: webová stránka fillamentum.com
<https://fillamentum.com/blogs/news/arturo-anoni-3d-printed-his-own-glasses>
- obr. č. 44: webová stránka TrendGrupa
<https://trendgrupa.tumblr.com/>
- obr. č. 45: webová stránka deníku E15
<https://www.e15.cz/byznys/technologie-a-media/u-streleckeho-ostrova-zakotvil-prvok-prvni-plovouci-dum-vyrobeny-3d-tiskem-1372504>
- obr. č. 46: webová stránka metrology.news
<https://metrology.news/topology-optimization-dmp-meet-aircraft-challenge/>
- obr. č. 47: vlastní obrázek – SW Autocad Inventor
- obr. č. 48: vlastní obrázek – SW Altair Inspire
- obr. č. 49: vlastní obrázek – SW Altair Inspire
- obr. č. 50: vlastní obrázek – SW PrusaSlicer
- obr. č. 51: vlastní fotografie
- obr. č. 52: University of applied science Kufstein Tirol. (2019). Test report. URL:
<https://grabcad.com/library/test-object-with-elements-of-the-standard-din-en-iso-astm-52902-1>
- obr. č. 53: Dvořák, J. (2017). Technologické možnosti aditivních technologií. ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE.
https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/73084/F2-BP-2017-Dvorak-Jan-BP_Dvorak.pdf?sequence=-1
- obr. č. 54: vlastní obrázek – SW myVGL 3.3.4
- obr. č. 55: vlastní obrázek – SW myVGL 3.3.4

Literatura

- [1] Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2015). Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing, second edition. In Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing, Second Edition. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3>
- [2] Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C. B., Wang, C. C. L., Shin, Y. C., Zhang, S., & Zavattieri, P. D. (2015). The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. CAD Computer Aided Design. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001>
- [3] ASTM International. (2013). F2792-12a - Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. In Rapid Manufacturing Association. URL: <http://www.astm.org/Standards/F2792.htm>.
- [4] Kratochvíl, J. (2020). Úvod do studia materiálů. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Ústav chemie pevných látek. URL: <https://uchpel.vscht.cz/files/uzel/0022888/0106~M9RTODyrLD9FISVfobikNCUzUSE3sSS1KPPwpyj6wE.pdf?redirected>
- [5] Jones, R. F. (listopad, 1950). Tools of the Trade. Astounding Science Fiction magazine.
- [6] Information, Reed Business (říjen 1974). Ariadne. New Scientist. 64 (917): 80. ISSN 0262-4079.
- [7] Kodama, H. (1981). Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer. Review of Scientific Instruments. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1136492>
- [8] Wang, B. (1999). Concurrent Design of Products, Manufacturing Processes and Systems. CRC Press. ISBN 978-90-5699-628-4.
- [9] Statista. (2019). Most used 3D printing technologies in 2017 and 2018. Technology and Telecommunications.
- [10] Rafiee, M., Farahani, R. D., & Therriault, D. (2020). Multi-Material 3D and 4D Printing: A Survey. V Advanced Science. DOI: <https://doi.org/10.1002/advs.201902307>
- [11] Pham, S. (2001). Rapid manufacturing. Springer.
- [12] AMFG. (2020). Industrial Applications of 3D Printing: The Ultimate Guide. URL: <https://amfg.ai/industrial-applications-of-3d-printing-the-ultimate-guide/>
- [13] Kollerová, M. (2015) Využití 3D tisku ve zdravotnictví
- [14] Wang, J., Sama, S. R., Lynch, P. C., Manogharan, G.. (2019). Design and Topology Optimization of 3D-Printed Wax Patterns for Rapid Investment Casting

- [15] EOS. (2020). Make Any Shape Into a Product With Additive Manufacturing eos.info URL: <https://www.eos.info/en/3d-printing-examples-applications/people-health/sports-lifestyle-consumer-goods>
- [16] ISO/ASTM TC261. (2018). ISO/ASTM/DIS 52902 -- Additive manufacturing -- Test artifacts -- Standard guideline for geometric capability assessment of additive manufacturing systems. In ISO/ASTM TC261.
- [17] Rosinha, I. P., Krühne, U. (2015). 12th International Symposium on Process Systems Engineering and 25th European Symposium on Computer Aided Process Engineering. V Computer Aided Chemical Engineering. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/topology-optimization>
- [18] Dvořák, J. (2017). Technologické možnosti aditivních technologií. ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE. URL: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/73084/F2-BP-2017-Dvorak-Jan-BP_Dvorak.pdf?sequence=-1
- [19] BUGATTI AUTOMOBILES S.A.S.. (2018). WORLD PREMIERE: BRAKE CALIPER FROM 3-D PRINTER. bugatti.com. URL: <https://www.bugatti.com/media/news/2018/world-premiere-brake-caliper-from-3-d-printer/>
- [20] Additive Manufacturing Research Group, Loughborough University. (2020). About Additive Manufacturing. URL: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/powderbedfusion/>
- [21] Elizabeth Palermo, (2013). What is Laminated Object Manufacturing. livescience.com. URL: <https://www.livescience.com/40310-laminated-object-manufacturing.html>
- [22] Michelin, (2020). 3D Printing. Michelin.com URL: <https://www.michelin.com/en/activities/high-tech-materials/3d-printing/>
- [23] Konformní chlazení, (2017). Konformní chlazení. konformni-clazeni.cz URL: <http://www.konformni-chlazeni.cz/dalsi-informace-o-konformnim-chlazeni/konformni-chlazeni-a-jeho-prinosy>