

# Možnosti výroby forem pomocí aditivních technologií

Marian Paukovič

---

Bakalářská práce  
2020



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2019/2020

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Marian Paukovič**  
Osobní číslo: **T18448**  
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Technologická zařízení**  
Forma studia: **Prezenční**  
Téma práce: **Možnosti výroby forem pomocí aditivních technologií**

### **Zásady pro vypracování**

1. Vypracujte literární studii na dané téma.
2. Proveďte analýzu možných řešení.
3. Zhodnotte kritická místa alternativních technologií.
4. Ekonomicky zhodnotte možnosti výroby forem pomocí 3D tisku.

Forma zpracování bakalářské práce: **Tištěná/elektronická**

**Seznam doporučené literatury:**

GEBHARDT, Andreas a Jan-Steffen HÖTTER. Additive manufacturing: 3D printing for prototyping and manufacturing. Munich: Hanser Publishers, [2016], xx, 591. ISBN 978-1-56990-582-1.

PRUNER, Harry a Wolfgang NESCH. Understanding injection molds. Munich: Hanser Publishers, [2013], 1 online zdroj (xii, 145 pages). ISBN 9781569905357.

MENGES, Georg, Walter MICHAELI a Paul MOHREN. How to make injection molds. 3rd ed. Munich: Hanser, c2001, xvii, 612 s. ISBN 3446212566.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jakub Huba, Ph.D.**  
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2020**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **22. května 2020**

L.S.

---

**prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D.**  
děkan

---

**prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.**  
ředitel ústavu

## **PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

Beru na vědomí, že:

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

### **Prohlašuji,**

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....  
podpis studenta

## **ABSTRAKT**

Tato práce je zaměřena na analytické srovnání aditivních technologií na současném trhu. Následně kritického hledání vlastností tímto způsobem vyrobených a opracovaných součástí. Práce je zaměřena pouze na teoretickou část z důvodu nedostupnosti experimentální části. Po dokončení analytického ohodnocení jednotlivých metod je potřeba vybrat vhodnou metodu pro výrobu vstřikovací formy a ohodnotit jí z ekonomického hlediska.

Klíčová slova: Aditivní technologie, 3D tisk, Výroba forem, vlastnosti 3D tisku

## **ABSTRACT**

This thesis is focused on analytical comparison of additive technologies in the current market. Subsequently, a critical search for the properties of the components produced by additive manufacturing. The thesis is focused only on the theoretical part due to the unavailability of the experimental part. After completion of the analytical evaluation of individual methods, it is necessary to select a suitable method for the production of injection molds and evaluate it from an economic point of view.

Keywords: Additive technology, 3D printing, Manufacture of molds, Features of 3D printing

Poděkování, motto a čestné prohlášení, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická, nahraná do IS/STAG jsou totožné ve znění:

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

## **PODĚKOVÁNÍ**

Chtěl bych poděkovat všem přátelům a rodině, za pomoc a motivaci ke studiu. Dále bych chtěl poděkovat vedoucímu Ing. Jakubovi Hubovi, Ph.D. za poskytnutí příležitosti dokončení studia.

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>10</b>
<b>1 ADITIVNÍ TECHNOLOGIE</b> .....	<b>11</b>
1.1 POPIS PROCESU ADITIVNÍ VÝROBY .....	13
1.1.1 CAD .....	13
1.1.2 Zařízení aditivní výroby .....	14
1.1.3 Postprocessing .....	15
1.2 ROZDĚLENÍ METOD ADITIVNÍ VÝROBY .....	16
<b>2 3D TISK PLASTOVÝCH VÝROBKŮ</b> .....	<b>19</b>
2.1 Modelování tavené depozice (FDM) .....	19
2.2 Selective laser sintering (SLS) .....	20
2.3 Stereolytografie (SLA) .....	21
2.4 Digital light processing (DLP) .....	22
2.5 Material jetting (MJ) .....	24
2.6 Masked Stereolithografie (MSLA) .....	25
<b>3 3D TISK KOVOVÝCH VÝROBKŮ</b> .....	<b>27</b>
3.1 Rozdělení metod 3D tisku kovových součástí .....	27
3.2 Selective Laser Melting (Direct Metal Laser Melting) .....	27
3.3 Direct Metal Laser Sintering (DMLS) .....	29
3.4 Metal Binder Jetting .....	30
3.5 Electron beam melting (EBM) .....	31
3.6 Laser metal deposition (LMD) .....	33
3.7 Laser Metal Fusion (LMF) .....	34
3.8 Directed energy deposition (DED) .....	35
<b>4 PARAMETRY OVLIVŇUJÍCÍ VLASTNOSTI 3D VÝROBKŮ</b> .....	<b>37</b>
4.1 Povrchová úprava .....	37
4.2 Tepelné zpracování .....	39
4.3 Orientace tisku .....	40
4.4 Teplota při výrobě .....	40
<b>5 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ 3D TISKNUTÝCH FOREM</b> .....	<b>42</b>
5.1 VÝHODY A NEVÝHODY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ FOREM VYROBENÝCH 3D TISKEM .....	42
5.2 EXPERIMENT FOREM PRO MALOSÉRIOVOU VÝROBU .....	46
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>49</b>

<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>50</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>54</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>55</b>



## ÚVOD

V oblasti technologické výroby součástí máme mnoho možností, jak se dostat k požadované finální podobě. Jednou z moderních podob výroby jsou aditivní technologie. Tento způsob je opakem konvenční technologie obrábění, kterou lidé používají a zdokonalují dlouhou dobu.

Aditivní technologie se v dnešní době aktivně využívají pro výrobu prototypů. Zde je tato technologie výhodná, cenově dostupná a časově nenáročná, takže se stala oblíbenou v moderních průmyslových a technologických špičkách. Aditivní výroba má také své místo také ve zdravotnictví, letectví, kosmonautice, šperkařství, designu, architektuře a jsou alternativou pro konvenční výrobní metody.

Stejně tak, je tomu i v oblasti výroby polymerních součástí pomocí forem a injekčního vstřikování. Nyní se nabízí možnost výroby formy pomocí aditivní technologie a možnosti použití všech kladných vlastností 3D tisku, které mohou posunout tento způsob výroby o krok dál. Hlavně náklady na výrobu formy jsou v současné době jeden z nejpodstatnějších faktorů při sériové výrobě.

Tato technologie je ovšem stále extrémně náročná na hledání optimálního řešení a vyžaduje pozornost profesionálů. Některé aditivní metody mohou být už i desítky let staré, ale na trhu se objevují stále nové patenty a vylepšení, které mohou na vždy změnit dosavadní podobu výroby.

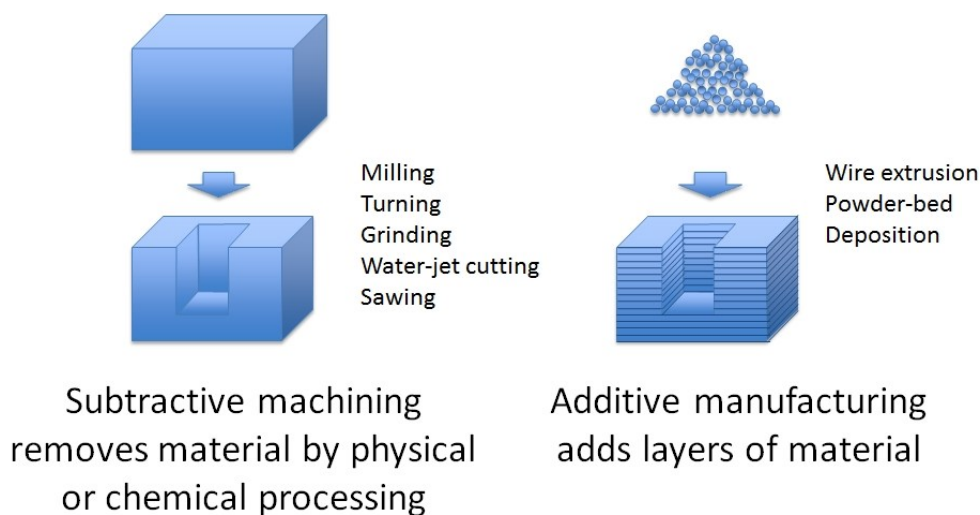
Tato práce bude hlavně zaměřena na analytické srovnání současných metod aditivní výroby a hledání vhodného řešení, ze strany vhodných mechanických vlastností i ekonomického hlediska, pro výrobu formy.

## I. TEORETICKÁ ČÁST

## 1 ADITIVNÍ TECHNOLOGIE

Aditivní technologie neboli také aditivní výroba (additive manufacturing) je proces, při kterém je vyráběna součást pomocí postupného nanášení tenkých vrstev materiálu na sebe. Na rozdíl od termínů 3D tisk nebo rapid prototyping, které mohou označovat výrobu prototypu, je aditivní výroba využívána i pro sériovou výrobu funkčních součástí [1].

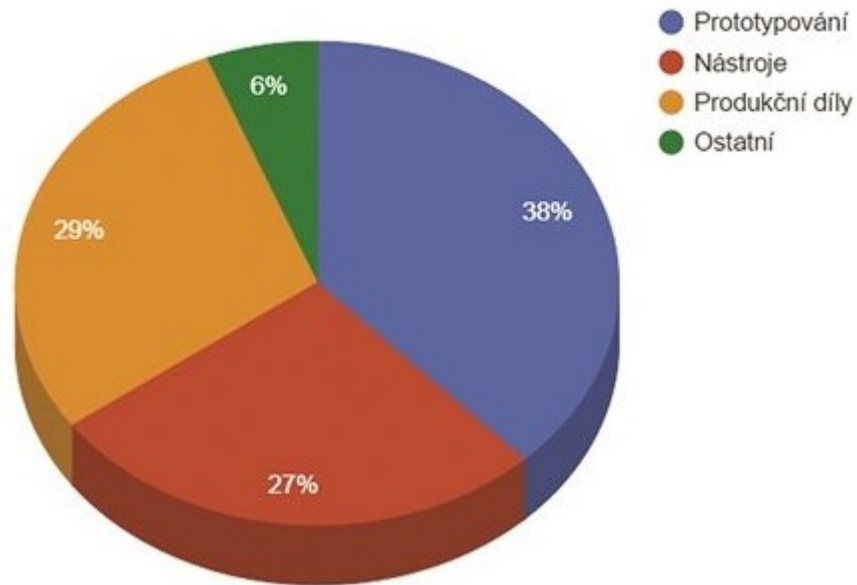
Přímým opakem aditivních technologií jsou konvenční metody. Ty jsou založené na odebrání materiálu, kterými jsou například řezání, frézování, vrtání a jiné, při kterých je zapotřebí větší množství počátečního materiálu a také vzniká jisté množství odpadu.



Obr. 1 Metody subtraktivní a aditivní výroby [3].

Stejně jako u konvenčních metod je pro aditivní výrobu potřeba počítačem vytvořený model v CAD systému nebo model vytvořený naskenováním reálného předmětu pomocí reverzního inženýrství. Poté se použije CAM systém pro vytvoření konkrétního řešení pro výrobu dané součásti námi zvolenou metodou. Při této metodě je virtuální model nařezán na jednotlivé vrstvy – layery. Toto zpracování se poté přesune do formátu G-kódu s kterých dokáže pracovat 3D tiskárna.

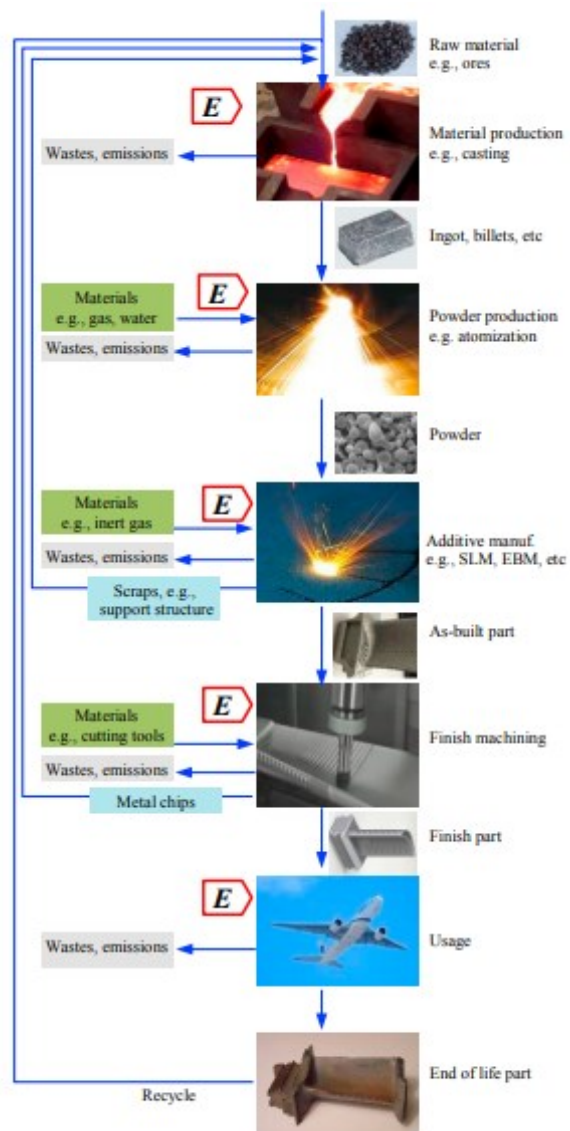
Aditivní technologie jsou založené na metodách spékání a slinování materiálů různých mechanických a chemických vlastností. Je potřeba najít vhodné výrobní podmínky pro tvorbu součástí s dostatečnou kvalitou pro vysoké (reálné) zatížení. Z toho vyplývá, že můžeme hledat vhodné vlastnosti při malých, a hlavně rychlých úpravách výrobního procesu, hlavně v malosériové výrobě.



Obr. 2 využití 3D tisku ve firmách podle společnosti Deloitte [2].

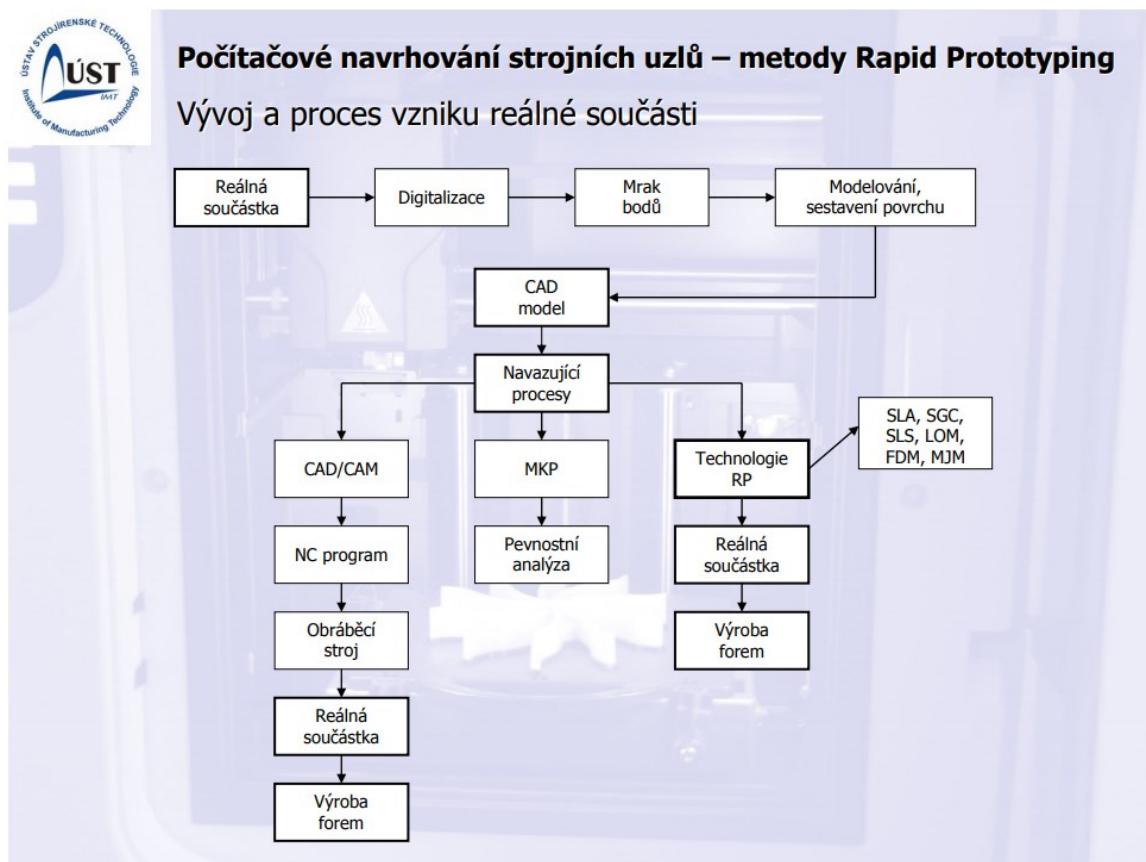
Na trhu je velké množství výrobců 3D tiskáren pro osobní i průmyslové použití. Mezi nejvýznamnější výrobce můžeme jmenovat Stratasys, Ultimaker, MakerBot, FlashForge, 3D Systems. Za nejpopulárnějšího výrobce na světě můžeme považovat Prusa3D od Josefa Průši s tiskárnami Original Prusa.

Proces aditivní výroby můžeme rozdělit do třech částí. Preprocessing, který zahrnuje přípravu dat. Processing, ve kterém je součást vyráběna a postprocessing, kde se výrobek dokončí a opracuje [2].



Obr. 3 Cyklus výroby součástí pomocí aditivních technologií [11].

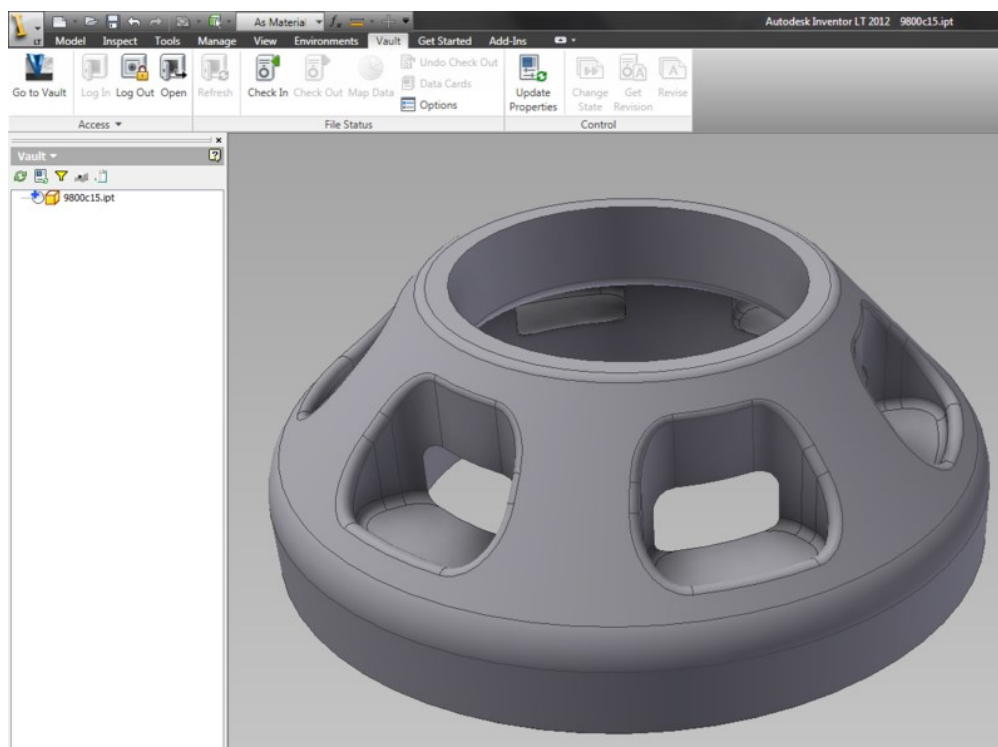
## 1.1 Popis procesu aditivní výroby



Obr. 3.1 Vývoj a proces vzniku reálné součásti [4].

### 1.1.1 CAD

V prvním kroku musíme navrhnu a nakreslit vhodný 3D model, který reálně bude reprezentovat naši požadovanou součást. Computer-aided design (CAD) je softwarové řešení, kterým projektant dosáhne požadovaného 2D nebo 3D výkresu. Lze kreslit tělesa, povrchy a objekty sítě pomocí rozhraní API [5]. Mezi nejpoužívanější 3D CAD programy se řadí Autodesk Inventor nebo Dassault Systemes Solidworks. Po dokončení 3D modelu musí dojít k vytvoření jednotlivých vrstev a návržení procesu výroby součásti na 3D tiskárně. Po dokončení této operace vygenerujeme G-kód, který můžeme použít pro aditivní výrobu v softwaru tiskárny.

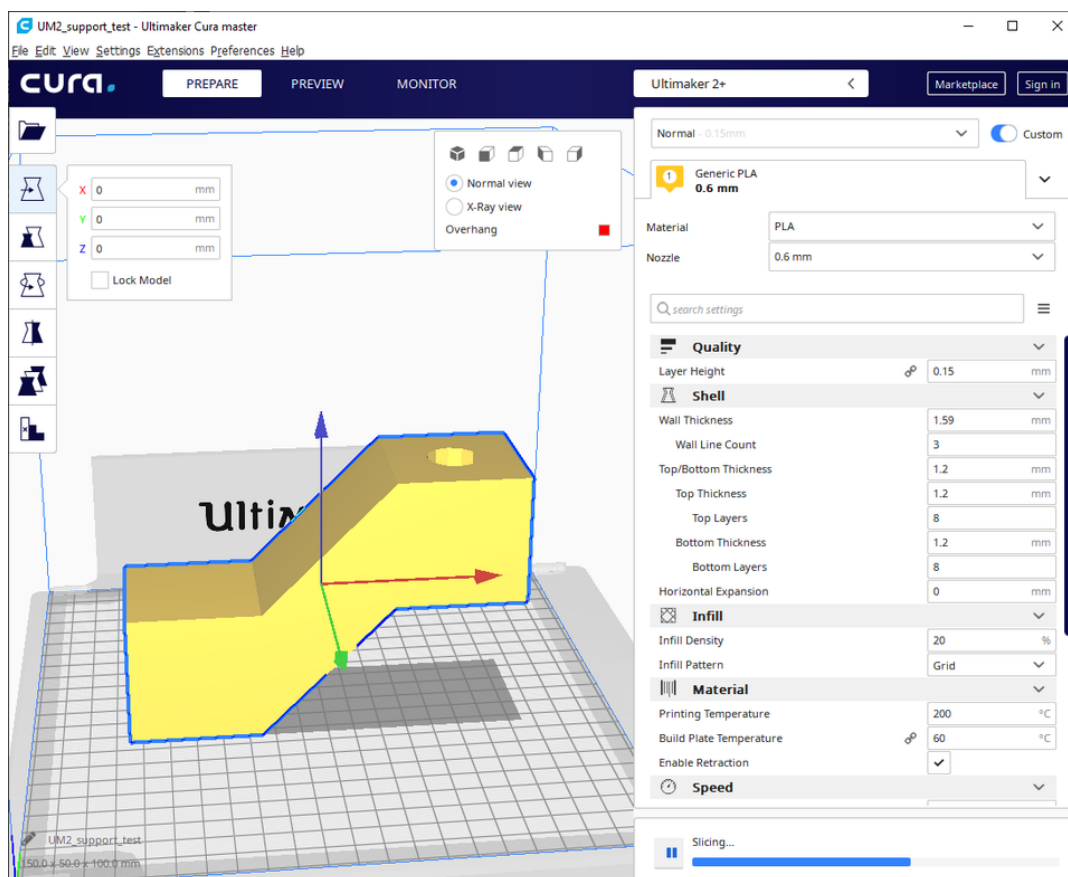


Obr. 3.2 Zhotovená součást v programu Autodesk Inventor [6].

### 1.1.2 Zařízení aditivní výroby

Do zařízení 3D tiskárny nahrajeme vytvořený G-kód. Nyní můžeme nastavit proces výroby tiskárny. Můžeme použít doporučené parametry výrobce tiskárny, dodavatele materiálu a nebo můžeme experimentovat a vyzkoušet různé parametry a poté sledovat výsledné vlastnosti výrobku. Parametry mohou být výkon tisku (teplota hlavy tiskárny, výkon laseru), teplota podložky, teplota komory, množství materiálu, velikost jednotlivých vrstev, rychlost tisku, zrnitost materiálu. Dále můžeme nechat vypočítat a vygenerovat podpory pro výrobu geometricky náročnějších dílů (obsahují převisy).

Po nastavení procesu můžeme spustit výrobu. Tato část je automatická a probíhá bez nutnosti přítomnosti obsluhy. Na obrazovce můžeme vidět odhad zbývajících času tisku a postup v reálném čase.



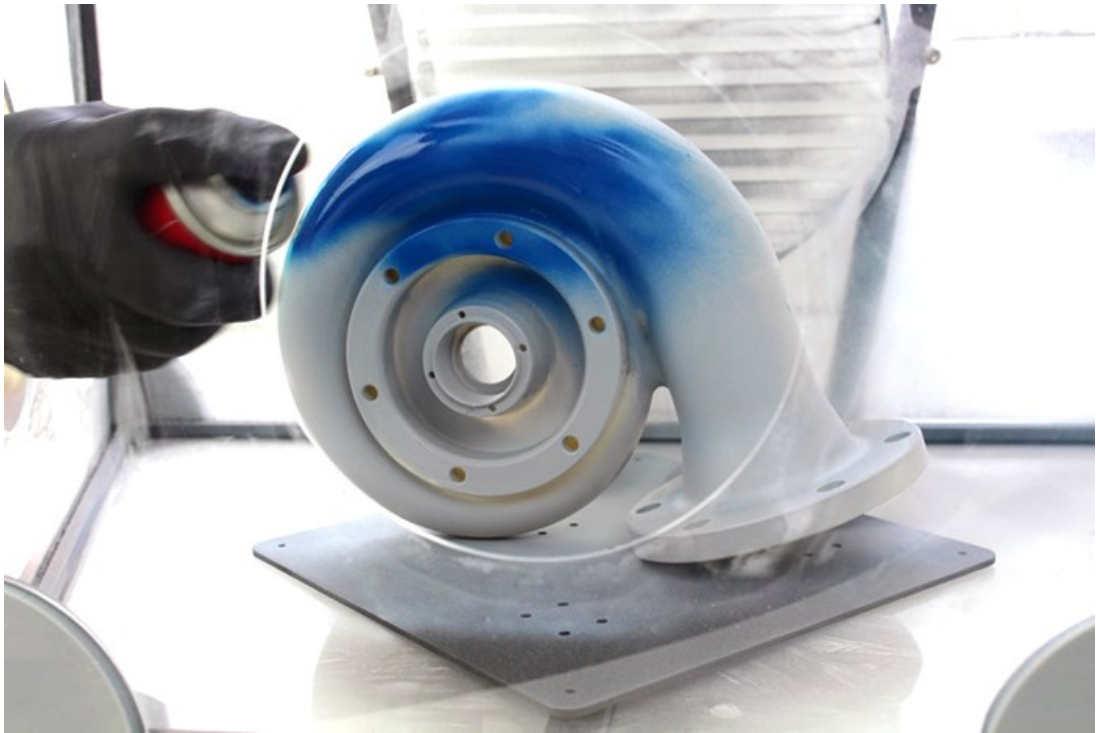
Obr. 4 Grafické rozhraní systému CURA 4.1 pro nastavení 3D tisku [7].

### 1.1.3 Postprocessing

Po dokončení 3D tisku je potřeba výrobky upravit. Odebrat podpory sloužící ke stabilitě náročnějších dílů. Pokud se jedná o náročnější kovové díly, může být tiskárna vybavena i pro dokončovací povrchové operace. Pokud tuto možnost nenabízí, musíme dokončovací úpravy, jako je dokončení povrchu pomocí broušení, nanesení nátěru apod. nebo tepelnou úpravu součásti, dokončit pomocí dalších zařízení. Některé součásti dokončovací operace vyžadují minimálně, ale některé metody vyžadují úplné dokončení pro dostatečně vhodné mechanické vlastnosti.

Výslednou součást poté můžeme testovat na různé mechanické vlastnosti, můžeme analyzovat její materiálovou strukturu a zatěžovat pro reálné podmínky. Při nalezení nedostatku, můžeme proces v preprocessingu jednoduše upravit a celý proces opakovat, dokud nenačteme výrobek s ideálními dosažitelnými vlastnostmi [8].

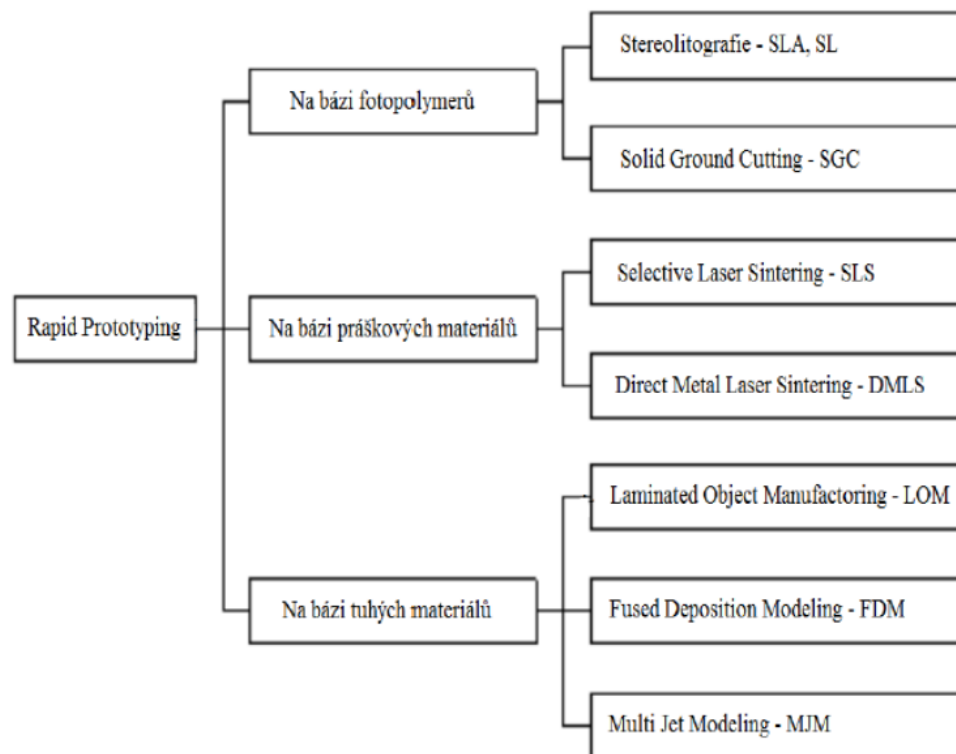




Obr. 5 Dokončovací práce na 3D tištěném výrobku [8].

## 1.2 Rozdělení metod aditivní výroby

Můžeme rozlišit jednotlivé metody různými způsoby. Nejčastější je způsob rozdělení podle použitých materiálů a rozdělení podle způsobu nanášení jednotlivých vrstev. Základní rozdělení metod dle materiálů jsou kategorie na bázi fotopolymerů, na bázi práškových směsí a na bázi tuhých materiálů. Rozdělení dle materiálu můžeme také zredukovat na kategorii na bázi polymerů a kategorii na bázi kovů.



Obr. 5.1 Rozdělení metod aditivních technologií podle materiálu [9].

## 2 3D TISK PLASTOVÝCH VÝROBKŮ

Při metodách tisku polymerů se vrstvy mezi sebou spojují tavením, lepením nebo svářením. Lze vyrábět náročné součásti, které jsou geometricky komplikované pro běžnou výrobu plastů. Tato metoda výroby je vhodná pro malé série anebo pro výrobu prototypů, kde se nejprve ověří požadované vlastnosti před zahájením výroby.

Existuje mnoho různých druhů procesů výroby pomocí 3D tisku. Nejrozšířenější metodou 3D tisku je modelování tavené depozice (FDM), kde se používá jednotný dlouhý filament, který je nejčastěji termoplast [10].



Obr. 6 Příklady výrobků 3D tisku polymerních materiálů [10].

### 2.1 Modelování tavené depozice (FDM)

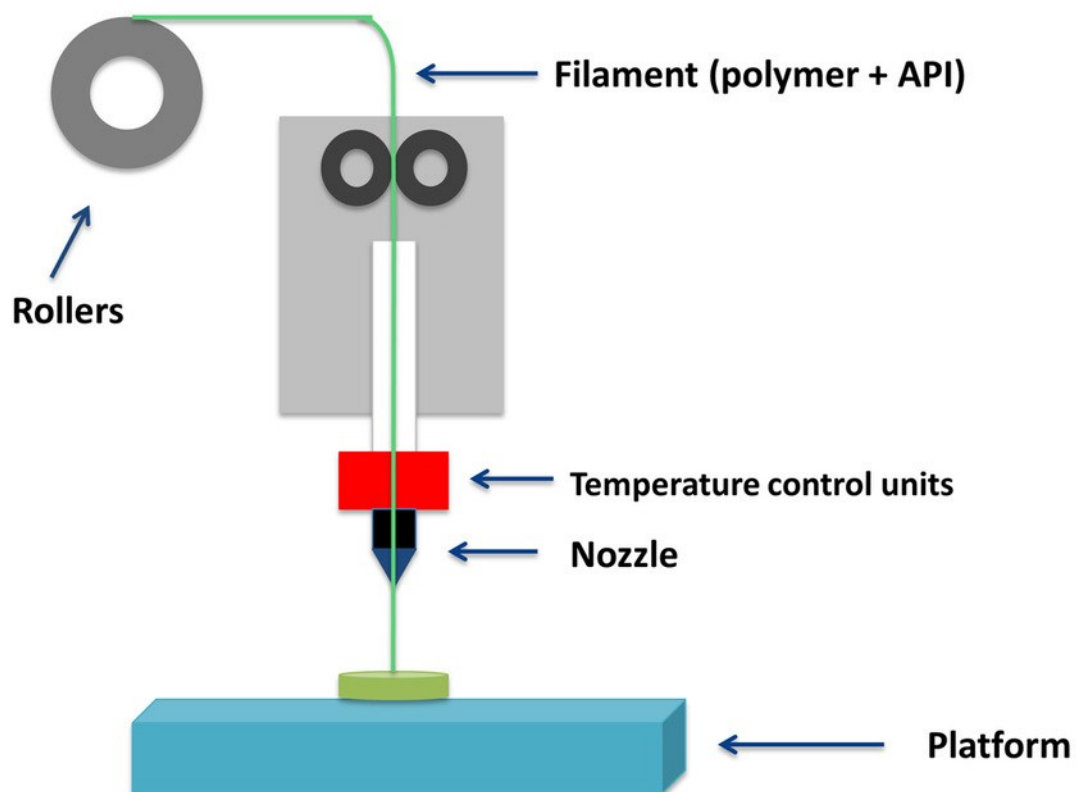
Při tomto procesu výroby se používá dlouhý nepřerušovaný filament, nejčastěji se jedná o termoplast. Filament se vtlačuje do pohyblivé se rozžhavené hlavy a je nanášen na rostoucí povrch. Hlava je řízena počítačem, který určuje všechny vlastnosti tisku. Hlava se většinou pohybuje ve dvou směrech, ve kterých nanese jednu rovinu, pak se hlava posune vertikálně nahoru a pokračuje v další rovině nanášení. Tato metoda je dostupná pro použití i mimo průmysl, je jednoduchá a levná. Bohužel jiné metody nabízejí lepší výsledky v kvalitě výrobku, ale jsou většinou dražší.

Materiál v této metodě 3D tisku je protlačován jednou stranou studený a druhou horký. Studená strana natahuje filament z kotouče za použití točivého momentu. Rychlost natáčení

je regulována krokovým motorem. Filament je tlačěn k horkému konci, kde se nachází vyhřívací komora a tryska. Filament se natavuje a přeměňuje se na tenkou kapalinu. Tryska může mít průměr mezi 1 až 0.1 milimetrů. Tryska a metody zahřívání se volí v závislosti na materiálu, kterým tiskneme.

Tato metoda začíná vytvořením softwarového modelu a souboru STL (Stereolithography file format), kde se model matematicky řeže a natočí tak, aby vyhovoval výrobnímu procesu. V této části můžeme přidávat podpory a struktury, které zaručí stabilitu při výrobě. Pokud podpory nevytvoříme, nelze zaručit dostatečnou stabilitu a může dojít k pádu převislých a dlouhých částí výrobku.

Tryska se pohybuje ve dvou směrech, rovině xy. Při výrobě se postupuje v předepsané geometrii a vytváří vrstvy nataveného materiálu. K pohybu hlavy ve třech směrech se používá krokový motor nebo servomotor. Pro zajištění spojování jednotlivých rovin, musíme kontrolovat teplotu prostředí.



Obr. 7 Systém tisknutí modelování tavené dispozice (FDM) [13].

Součásti vyrobené touto metodou se dají použít pro kryty na elektrické zařízení, upínací přípravky. Nedá se použít jako namáhané součásti strojů. Výroba je dražší než u stereolithografie (SLA) [12].

Materiál: Termoplastický filament (PLA, ABS, PET, PETG, TPU)

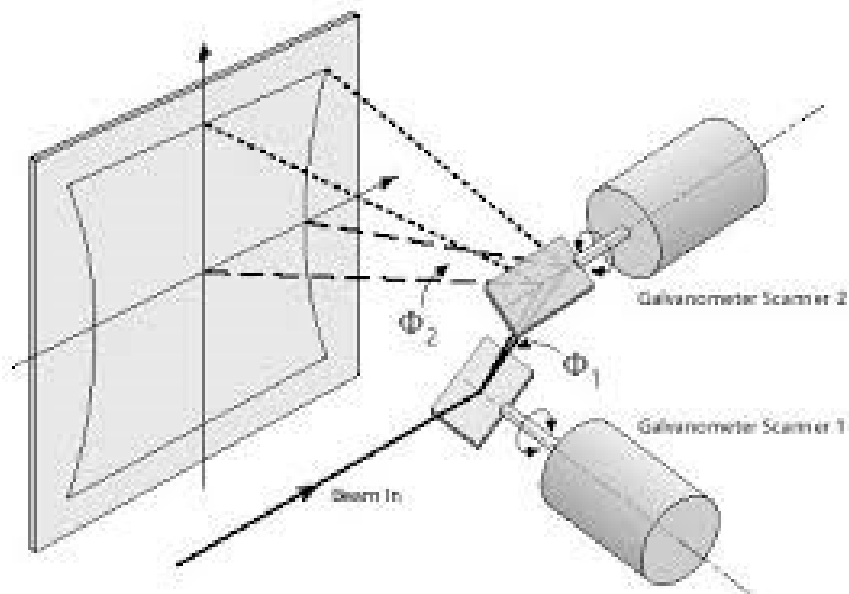
Přesnost:  $\pm 0.5$  mm

## 2.2 Selective laser sintering (SLS)

Proces, při kterém zdroj tepelné energie selektivně indukuje fúzi mezi částicemi prášku ve stavební oblasti. Některé SLS 3D tiskárny také aplikují mechanismus pro současné vyhlazování prášku při výrobě součásti. Finální produkt je pokrytý v nepoužitém prášku, který funguje také jako stavební podpora.

Nejdříve se nahřeje prášek polymeru pod bod tání. Prášek je potom nanesen nátěrovou čepelí nebo stěračem do tenké vrstvy, tloušťka typicky 0.1 mm, na stavební platformu. Poté začne tiskárna skenovat povrch. Laser (nejčastěji CO<sub>2</sub>) pak začne selektivně slinovat prášek, který se tímto způsobem vytvrdí.

Stejně jako u stereolithografie je laser soustředěn na přesné místo pomocí dvojice galvanometrů. Po dokončení jedné vrstvy se stavební platforma posune dolů o jednu tloušťku vrstvy. Nátěrová čepel poté nanese čerstvou vrstvu prachu a proces se znovu opakuje.



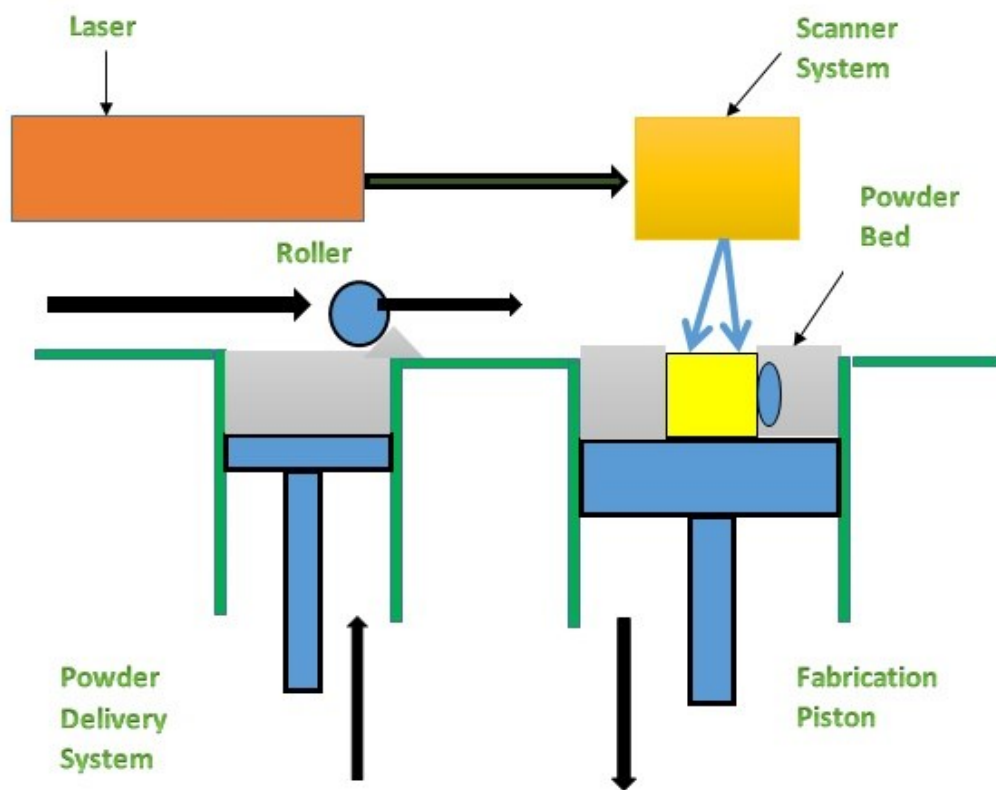
Obr. 8 Schéma dvojice galvanometrů pro soustředění paprsku laseru [14].

Stavební prášek, který nebyl slinován zůstane okolo součásti jako stavební podpora, takže nemusíme vytvářet vlastní podpory.

Výrobky se dají aplikovat jako funkční součásti, složité potrubní s dutým designem nebo nízká produkce. Součást vyrobená metodou SLS má dobré mechanické vlastnosti a lze vytvořit i komplexní geometrii. Metoda je dražší než FDM [15].

Materiál: Termoplastický prášek (Nylon 6, Nylon 11, Nylon 12).

Přesnost:  $\pm 0.3$  mm



Obr. 9 Schéma fungování metody tisku SLS [15].

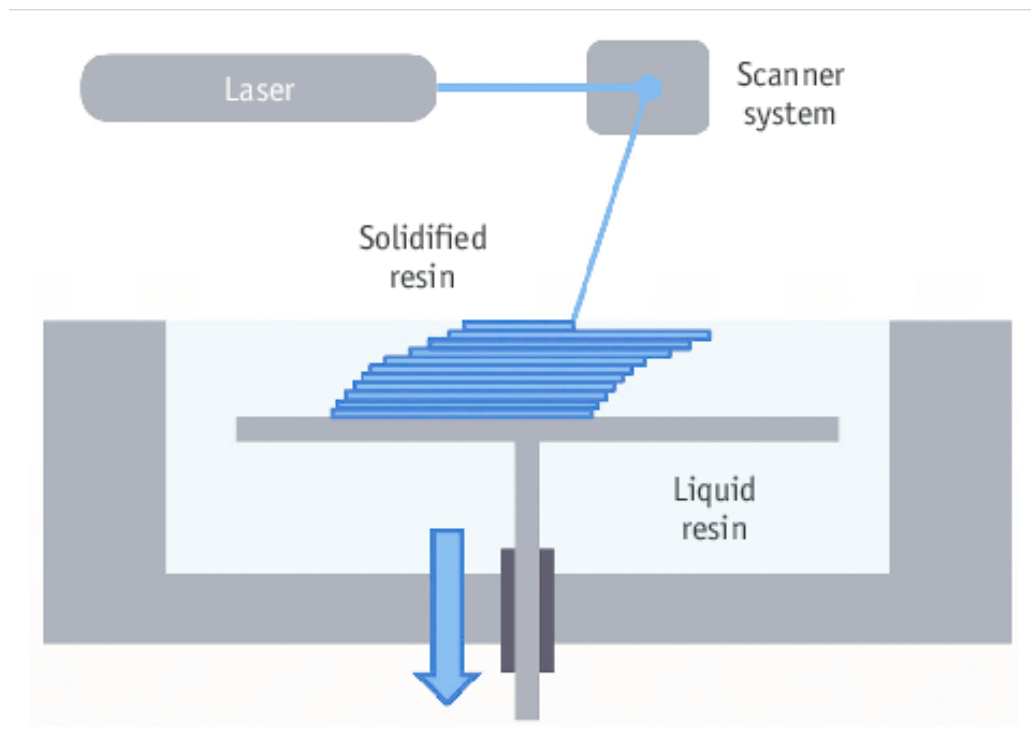
### 2.3 Stereolytografie (SLA)

Jedná se o historicky prvotní aditivní technologii. SLA tiskárna používá zrcadla – galvanometry, které jsou umístěny jeden na ose X a druhý na ose Y. Tyto zrcadla míří paprskem laseru přes vanu s pryskyřicí a selektivně jí vytvrzuje ve stavební části vrstvu po vrstvě. Nejčastěji je při této metodě použitý solid state laser.

Použití v oblasti prototypů s výslednými vlastnostmi vstřikovacího formování. Může být také aplikováno v oblasti medicíny [12].

Materiál: Fotopolymerová pryskyřice (standardní, odlévatelná, transparentní, vysoká teplota).

Přesnost:  $\pm 0.15$  mm



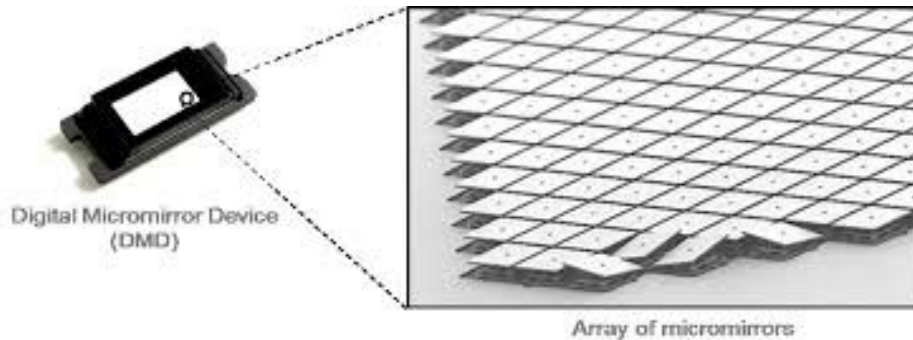
Obr. 9.1 Schéma principu metody stereolithografického tisku [16].

## 2.4 Digital light processing (DLP)

Tato metoda je podobná stereolithografii. Pro výrobu se používá digitální světelný projektor, který zábleskem jednoho obrazu vytvrdí celou vrstvu záraz. Pokud je součástí větších rozměrů, může být záblesků na každou vrstvu více.

Protože je projektor digitální, každý obraz se skládá z množství pixelů, výsledná vrstva je zformována z malých čtvercových bloků – voxelů. Oproti stereolithografii je tato metoda rychlejší, kvůli vytvrzování celé vrstvy záraz.

Světlo z projektoru je emitováno buď LED obrazovkou nebo UV lampou. Světlo je kontrolováno pomocí DMD – digital micromirror device – řadou mikro zrcadel, které generují schéma na stavebním povrchu.

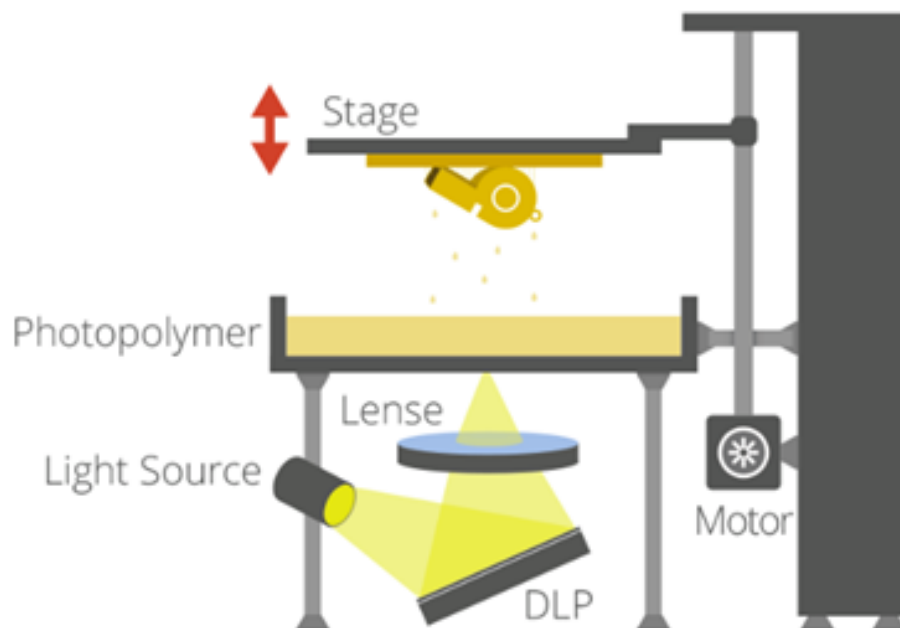


Obr. 10 DMD – digital micromirror device [17].

Součást vyrobená metodou DLP má hladký povrch a jemný detail. Není vhodná jako namáhaná část strojů. Vhodné pro prototypovou výrobu součástí s vlastnostmi jako po výrobě vstříkovací formou. Může být použito pro dentální hygienu nebo pomůcky při špatném sluchu [18].

Materiál: Fotopolymerová pryskyřice (standardní, odlévatelná, transparentní, vysoká teplota).

Přesnost:  $\pm 0.2$  mm



Obr. 11 Schéma metody digital light processing [18].



## 2.5 Material jetting (MJ)

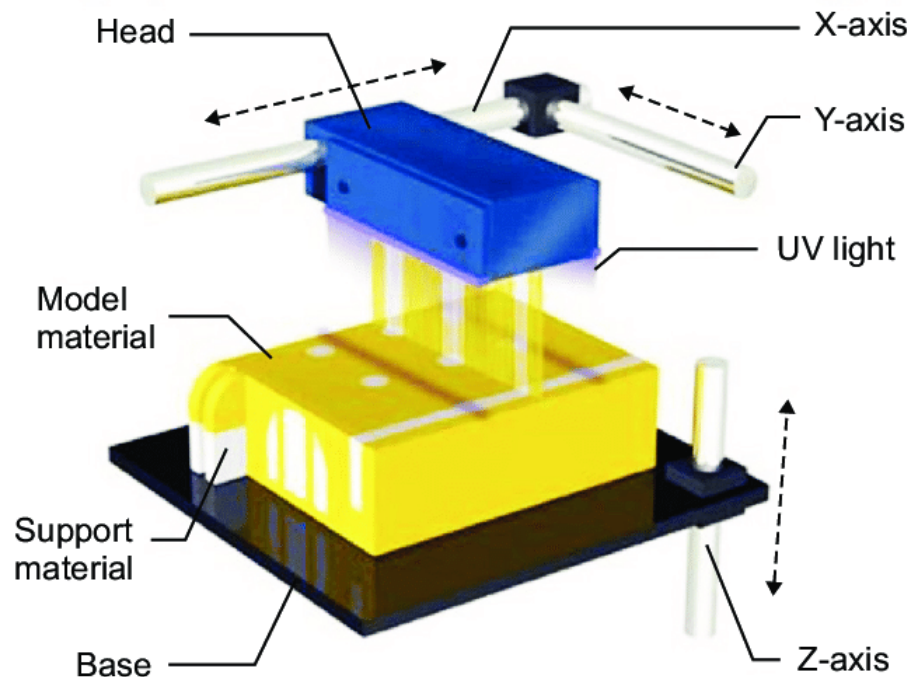
Tato technologie funguje podobně jako běžná inkoustová tiskárna. Hlavním rozdílem je, že místo jedné rozložené vrstvy jsou aplikovány vrstvy jedna na druhou, dokud nedokončíme výrobu součásti.

Hlava tiskárny vylučuje množství miniaturních kapek photopolymeru nebo vosku a poté je preservuje pomocí ultrafialového (UV) záření. Po dokončení jedné vrstvy a jejího vytvrzení, stavební platforma je snížena o tloušťku jedné vrstvy a poté se proces znovu opakuje další vrstvou.

Material jetting na rozdíl od běžných metod depositování, slinování nebo preservování, které používají bodové ukládání materiálu při výrobě, používá metodu ukládání materiálu celé plochy po liniích zároveň, což do určité míry zrychlí proces výroby.

Výhodou ukládání materiálu po liniích je, že dokáží vytvářet více součástí zároveň, bez dopadu na rychlost výroby, pokud jsou modely správně seřazeny a mezery mezi každou stavební linií jsou optimalizovány.

Výrobky zhotovené touto metodou musí mít při výrobě podpory, které se tisknou současně při výrobě modelu a jsou vytvořeny z rozpustného materiálu, který se odstraní při dokončovacích operacích. Tato technologie také nabízí výrobu z různorodých materiálů zároveň včetně kompletního obarvení.



Obr. 12 Schéma Objet Connex350 PolyJet MJ tiskárny [19].

Součásti vyrobené touto metodou nejsou vhodné pro strojní použití, výrobní cena je dražší než standartní metody. Vhodné pro prototypy v medicíně, pro nízkotlaké formy nebo pro modely vyžadující barvu s dobrým povrchem [19].

Materiál: Fotopolymerová pryskyřice (standardní, odlévatelná, transparentní, vysoká teplota)

Přesnost:  $\pm 0.1$  mm

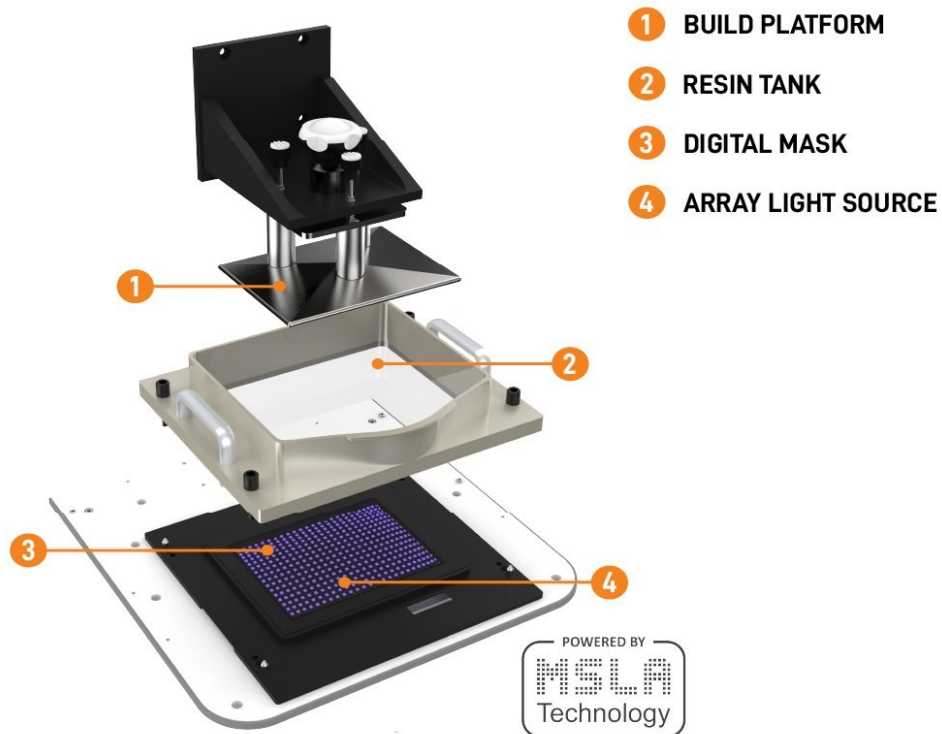
## 2.6 Masked Stereolithografie (MSLA)

Tato metoda používá pole LED jako zdroj světla, které vyzařuje UV světlo skrze LCD obrazovku. Obrazovka zobrazuje řez jedné vrstvy jako masku. Stejně jako digital light processing, LCD fotomaska je digitálně zobrazena z množství pixelů.

Množství pixelů zobrazené na LCD fotomasce definuje zrnitost tisku. Přesnost v osách X a Y je fixní a nezávisí na míře přiblížení nebo měřítka čočky, na rozdíl od metody DLP. Další rozdíl je mezi množstvím světelných zdrojů. U metody MSLA se jedná o pole stovek LED a u metody DLP je to pouze jeden zdroj světla.

Stejně jako Digital light processing (DLP) je tato technologie rychlejší než běžné metody, protože se celá vrstva tiskne naráz. Protože cena LCD displejů je nízká, můžeme dosáhnout nízké ceny výroby součástí.

Součást vyrobená metodou MSLA má hladký povrch a jemný detail, stejně jako u metody DLP. Není vhodná jako namáhaná část strojů. Vhodné pro prototypovou výrobu součástí s vlastnostmi jako po výrobě vstřikovací formou. Může být použito pro dentální hygienu nebo pomůcky při špatném sluchu [12].



Obr. 13 Schéma částí tiskárny metody MSLA [20].

Materiál: Fotopolymerová pryskyřice (standardní, odlévatelná, transparentní, vysoká teplota).

Přesnost:  $\pm 0.15$  mm

### 3 3D TISK KOVOVÝCH VÝROBKŮ

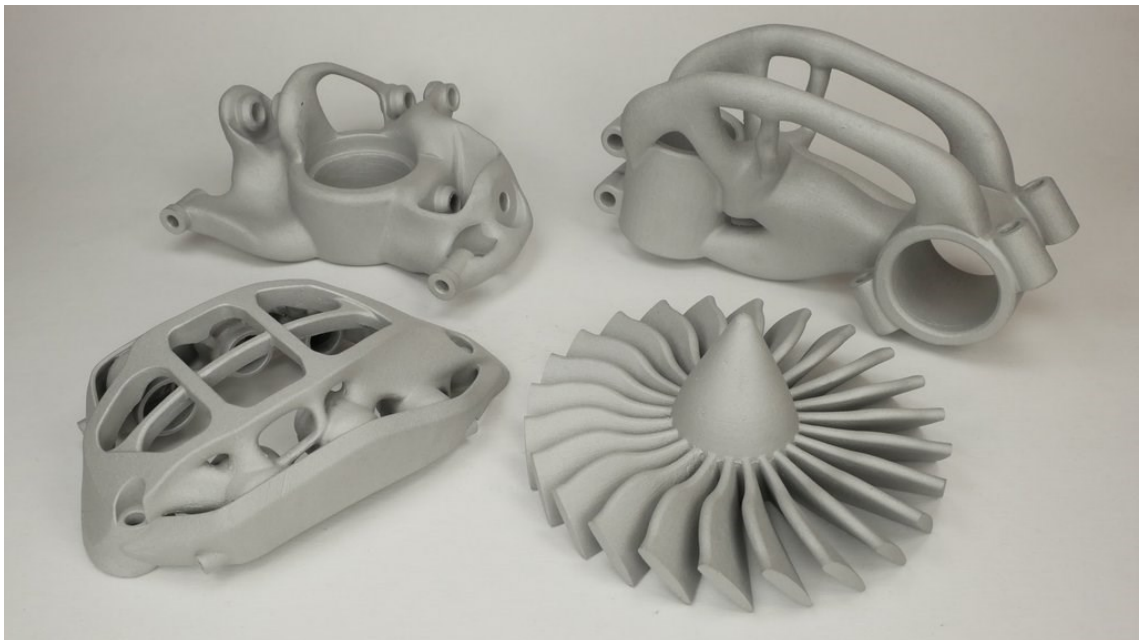
#### 3.1 Rozdělení metod 3D tisku kovových součástí

A – Práškové metody:

- Selective Laser Melting (SLM)
- DML
- LMF
- EBM

B – Aditivní metody:

- LMD
- DED
- DMD
- MPA



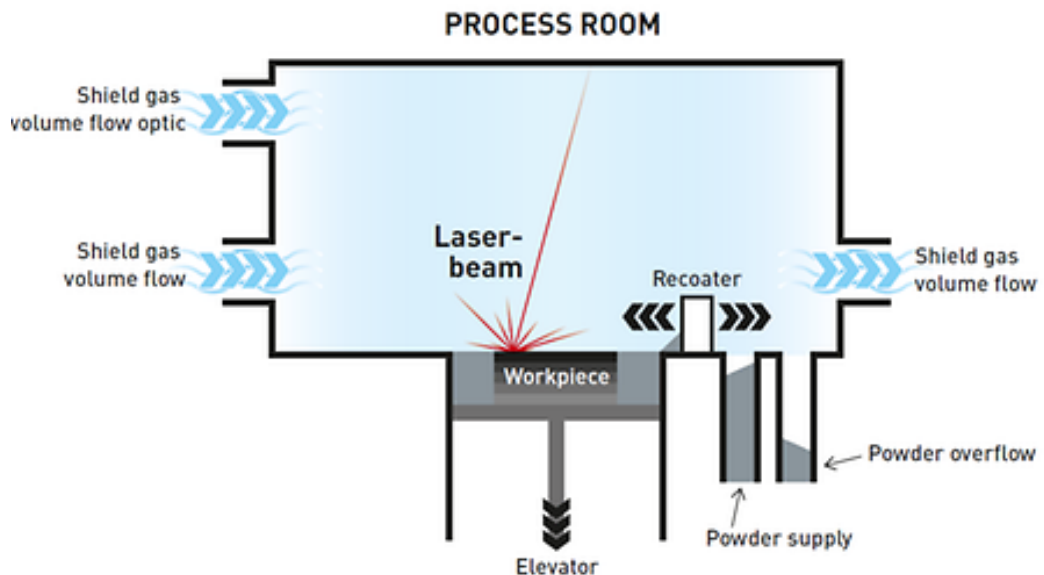
Obr. 14 Součásti vyrobené 3D tiskem kovů [21].

#### 3.2 Selective Laser Melting (SLM)

Při této technologii se používá prášek velikosti 20 až 50  $\mu\text{m}$ , ale může se tisknout částice až do 100  $\mu\text{m}$ . Prostor pro tisk se nahřeje na teplotu pod teplotou tání materiálu, tento krok sníží energetickou náročnost laseru a může zabránit vzniku nepravidelnosti tvaru. Atmosféra v prostoru je dusíkatá nebo argonová a to v hustotě pod 500 částic na milion.

Tenké vrstvy prášku jsou rovnoměrně rozděleny na substrátovou desku, která je připevněná na stůl, který se pohybuje ve směru osy Z. Každá vrstva prášku se potom selektivně taví pomocí vysoce výkonného laserového paprsku (až několik stovek wattů). Laserový paprsek se pohybuje v osách X a Y a svařuje kov k sobě. Tato operace se opakuje vrstvu po vrstvě, dokud nedojde k úspěšnému vytvoření součásti. Nepoužitý prášek může být znovu použit po dostatečném odstranění nežádoucích částic přes síto.

Tato metoda požaduje nosné podpory pouze pokud jsou převisy pod větším úhlem než  $45^\circ$  nebo pokud je výrobek při tisku pod větším napětím. Nosné podpory jsou vyráběny před samotným tiskem, a to zvýšenou rychlostí tisku s nižší energií [22].



Obr. 15 Schéma procesu tisku metodou SLM [22].

Použití je v medicíně, dentální hygieně nebo pro funkční strojní součásti v aerospace a automobilu. Součást má skvělé mechanické vlastnosti a můžeme vytvořit komplexní geometrii, která je v běžném obrábění nemožná. Technologie je jedna z nejdražších na trhu. Lze vyrobit pouze součásti menších velikostí [12].

Materiál: prášky hliníku, nerezové oceli nebo titanu

Přesnost:  $\pm 0.1$  mm

### 3.3 Direct Metal Laser Sintering (DMLS)

Jedná se o stejnou metodu jako selective laser melting (SLM). Jako hlavní rozdíl je, že práškový materiál se nezahřeje až přes teplotu tání. Při této technologii dojde pouze k zahřání na teplotu pod teplotou tání, takže prášek má možnost sloučit se na molekulární úrovni. Výrobek má heterogenní vlastnosti a chová se jako běžně vyrobená slitina.

Stejně jako při selective laser melting se po dokončení tisku součásti tepelně zpracují stále když jsou na stavební ploše. Výroba požaduje zajištění podpor, samotný nepoužitý prášek nestačí k zaručení nezkrivení tvaru.

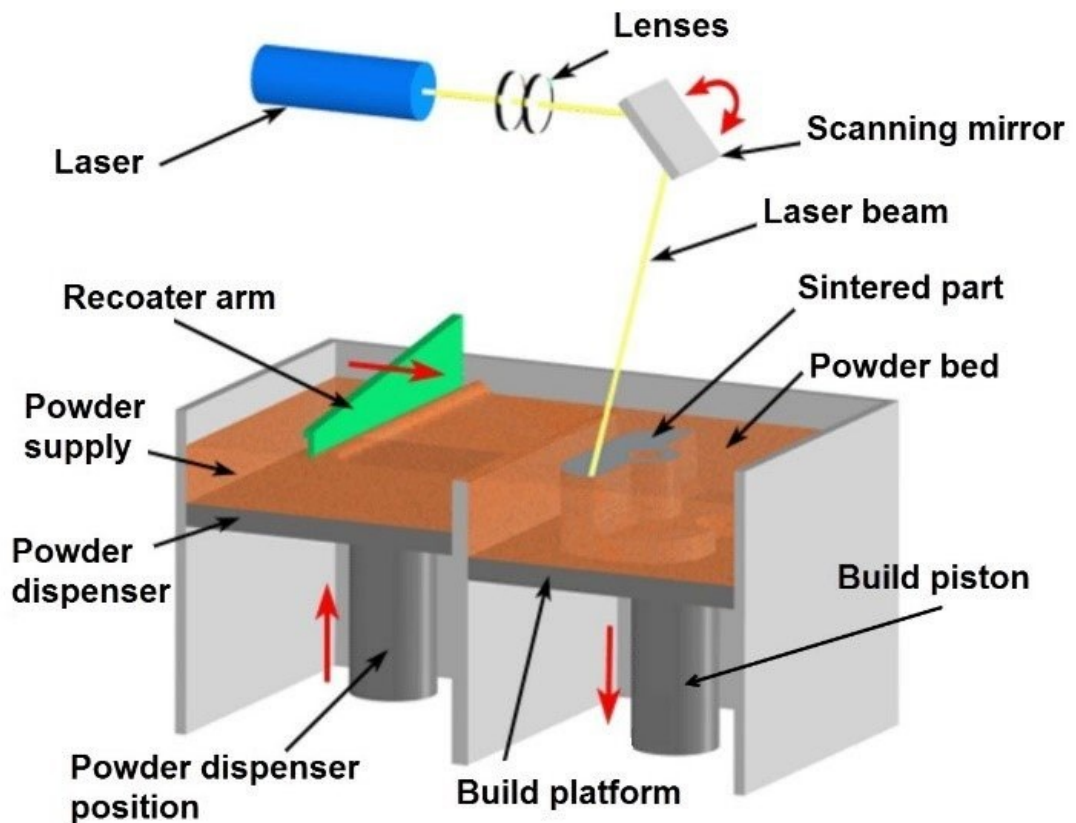


Obr. 16 Součásti vyrobené metodou DMLS s náročnou geometrií [23].

Použití stejně jako u metody SLM: v aerospace, automotive, medicíně. Součást má skvělé mechanické vlastnosti a můžeme vytvořit komplexní geometrii, která je v běžném obrábění nemožná [23].

Materiál: prášky hliníku, nerezové oceli nebo titanu

Přesnost:  $\pm 0.1$  mm



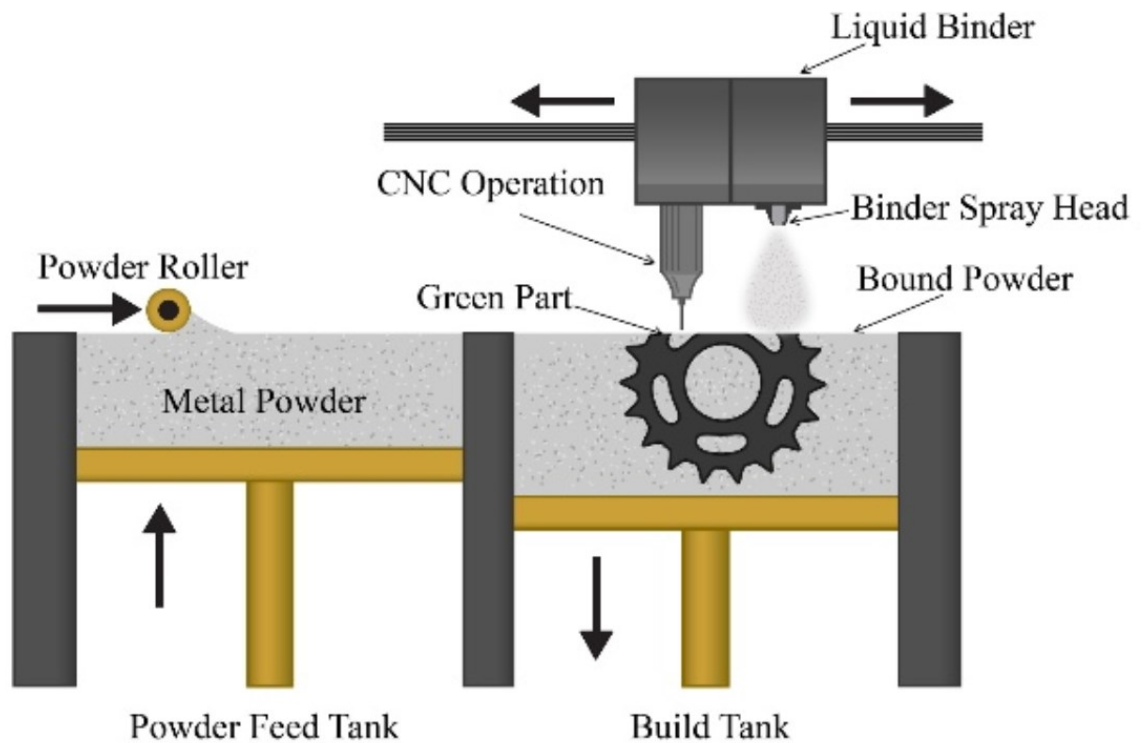
Obr. 17 Schéma metody tisku DMLS [24].

### 3.4 Metal Binder Jetting

Podobná metoda jako selective laser sintering s požadavkem na prvotní vrstvu prášku na stavební platformě. U této technologie je součást vyráběna tryskáním polymerového pojiva z tiskové hlavy v kapalném stavu, které selektivně spojuje materiál ve vaně s práškem. Tiskárna přesouvá hlavu postupně a kapky pojiva spojují kovový prášek dohromady.

Po dokončení jedné vrstvy se lóže s práškem sníží o úroveň jedné vrstvy a proces se opakuje. Po dokončení všech vrstev se součást nechá v prášku, aby se vytvrdila. Po vyjmutí se součást očistí zatlačeným vzduchem od přebytečného prášku.





Obr. 18 Schéma metody tisku metal binder jetting [25].

Výrobky mohou být použity jako funkční části strojů, ale mají poznamatelně horší vlastnosti než výrobky z DMLS nebo SLM, ale náklady na výrobu jsou nižší než u těchto metod. Můžeme vyrábět součásti většího objemu. Lze vytvořit komplexní geometrie, které by při konvenčním obrábění bylo nemožné vytvořit [12, 25].

Materiál: metalický prášek nerezové oceli, prášek bronzu

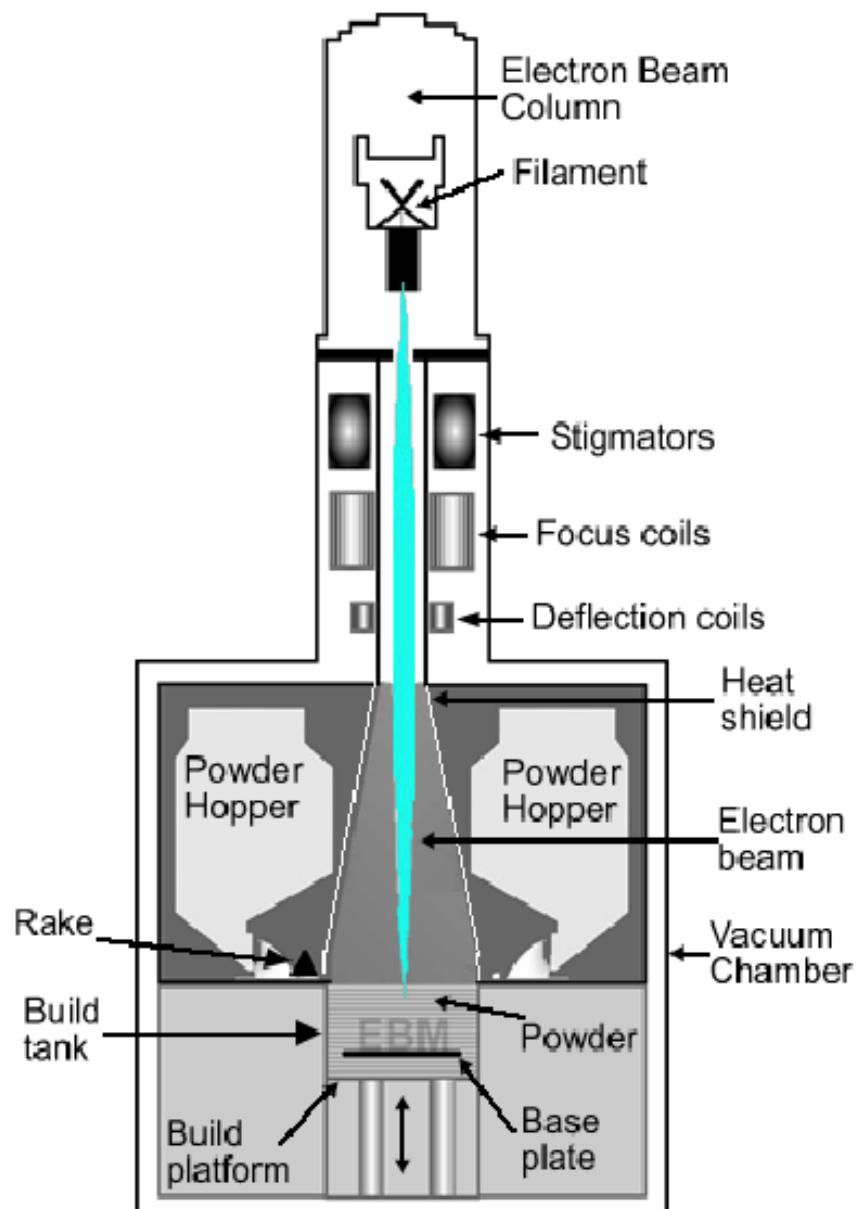
Přesnost:  $\pm 0.2$  mm

### 3.5 Electron beam melting (EBM)

Tato metoda využívá paprsek vysoké energie nebo elektronů k indukování fúze mezi částicemi kovového prachu. Soustředěný paprsek přechází přes tenkou vrstvu prachu, který částečně natavuje a vytvrzuje.

Technologie electron beam melting má vyšší rychlost výroby součásti, než ostatní podobné metody SLM nebo DMLS, hlavně kvůli vyšší objemové hustotě energie. Velikost částic prášku, tloušťka jedné vrstvy, velikost jednotlivých rysů a povrchové úpravy jsou typicky větší než u podobných metod.





Obr. 19 Schéma přístroje pro tisk metodou EBM [26].

Součásti jsou vytvářeny touto metodou ve vakuové komoře a pro tento proces můžeme použít pouze vodivé materiály. Vhodné pro použití v medicíně, dentální hygieně, aerospace, raketové inženýrství [27].

Materiál: biokompatibilní kovové prášky titanu

Přesnost:  $\pm 0.1$  mm



Obr. 20 Raketová tryska s porézní sktrukturou vyrobená metodou EBM [27].

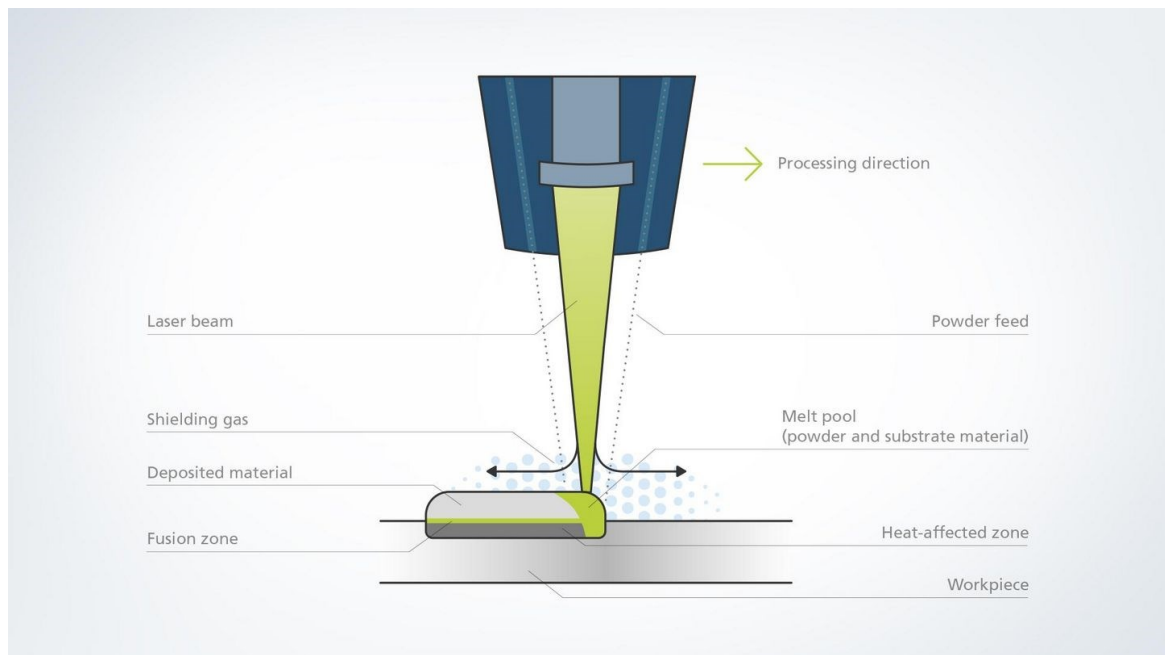
### 3.6 Laser metal deposition (LMD)

Tato metoda kromě výroby součástí je také vhodná pro opravu zničených součástí, pokud chybí část materiálu nebo k vytvoření ochranných vrstev. Také můžeme změnit design materiálu přidáním některých částí.

Hlava s několika tryskami a laserem je umístěna nad výrobní zónou. Laser zahřívá prášek těsně pod teplotu tání a předehřáté částice prášku jsou absorbovány do laserem indukované taveniny. Při procesu vznikají hrubé i jemné struktury. Během jednoho aktivního procesu máme k dispozici několik práškových zásobníků, dle volby můžeme vytvořit vlastní slitiny (sendvičové struktury) kombinací těchto materiálů.

Laserový paprsek zahřívá výrobek a vytváří tavnou lázeň. Do této natavené oblasti se tryská materiál ve formě prášku. Při dopadu se materiál roztaví a spojí se základním materiálem. Při procesu se používá ochranná atmosféra.

Tato metoda má rozmanitou oblast použití. Může se jednat o povlakování s dlouhou životností, opravy poškozených součástí nebo svařování jednotlivých částí dohromady [28].



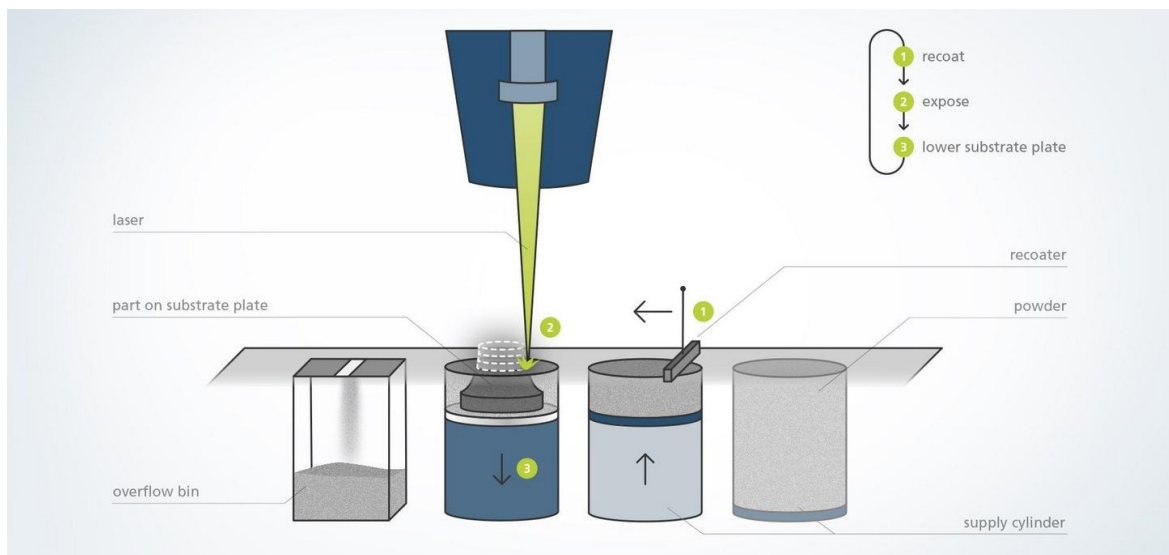
Obr. 21 Schéma procesu laserového navařování LMD [28].

### 3.7 Laser Metal Fusion (LMF)

Metoda laserového tavení na práškovém loži. Výrobek je zhotoven po vrstvách v práškovém loži pomocí laseru. Ten natavuje vrstvy materiálu v požadovaných místech. Při této metodě je možné odvádět teplo přímo z místa, kde vzniká (obrysově přesné chlazení).

Výrobky vznikají v komoře s ochranou atmosférou na desce s práškem. V komoře jsou v jedné ose osazeny zásobní, stavební a přepadový válec. Nanášecí zařízení posouvá prášek ze zásobního do stavebního válce. Laser poté roztaví práškovou vrstvu a stavební válec se spustí o jednu vrstvu. Tento proces se opakuje až po dokončení výrobku.

Lze vyrobit součásti s komplexním uspořádáním, mřížkovou strukturou a geometricky náročnými tvary pro konvenční výrobu. Při této metodě je potřeba vytvářet podpůrné struktury. Oblast použití je v medicíně, aerospace, automobilovém průmyslu, dentální hygieně, a zejména v oblasti industriálního výzkumu ve formě rapid prototypingu [29].



Obr. 22 Schéma metody tisku laserového tavení (LMF) [29].

### 3.8 Directed energy deposition (DED)

Metoda přímého energetického nanášení používá zdroj energie laser nebo elektronový paprsek. Materiál v podobě prášku nebo filamentu se taví v natavené oblasti a v uzavřené atmosféře ochranného netečného plynu.

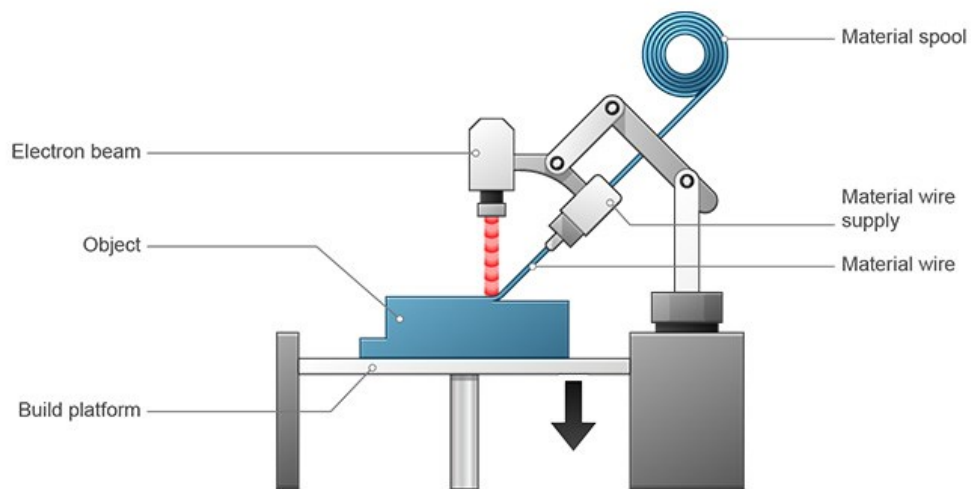
Tisková hlava s laserovým paprskem a přívodem materiálu je schopna pohybu až v pěti osách. Natavení probíhá postupně v případě tvorby součásti nebo lokálně, pokud pouze opravujeme část součásti.

Tato metoda dokáže generovat součásti většího objemu, některé technologie dokáží touto metodou tisknout až několika metrové části. Výrobky mají vysokou kvalitu a kvalitní povrch, který nemusí vyžadovat dokončovací operace.

Výroba touto metodou neumožňuje použití podpor, takže limituje náročnost geometrie součástí a převisů. Výrobky jsou používány v oblasti aerospace (titanové součásti), lodní nebo těžební průmysl [12, 30].

Materiál: titanové slitiny, nerezová ocel, nástrojová ocel, hliníkové slitiny

Přesnost:  $\pm 0.1$  mm

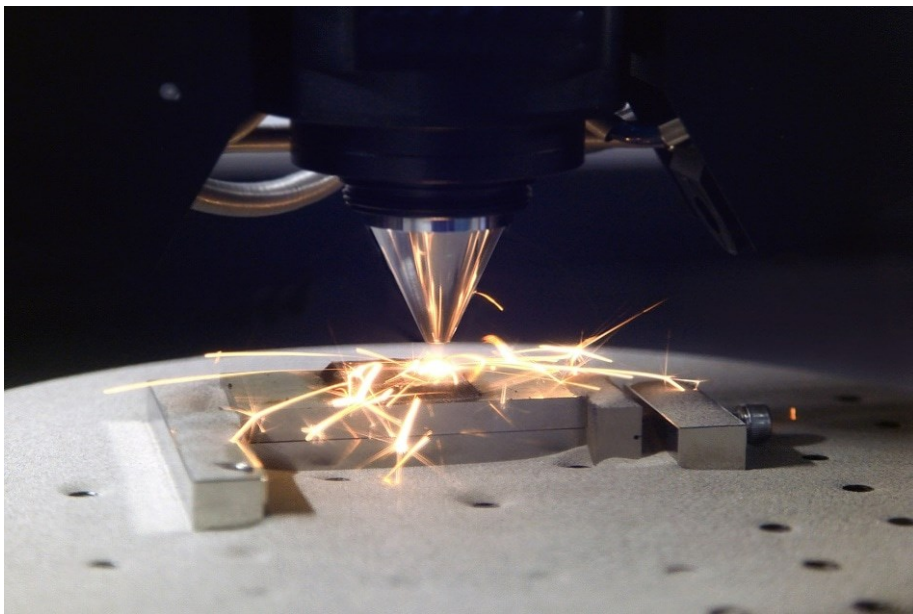


Obr. 23 Schéma metody tisku přímého energetického nanášení (DED) [30].

## 4 PARAMETRY OVLIVŇUJÍCÍ MECHANICKÉ VLASTNOSTI 3D TIŠTĚNÝCH MATERIÁLŮ

Hlavní rozdělení parametrů ovlivňujících mechanické vlastnosti 3D tištěných kovových materiálů:

- Povrchová úprava
- Tepelné zpracování
- Orientace tisku
- Teplota při výrobě



Obr. 24 Příklad výroby kovové součásti aditivní technologií [31].

### 4.1 Povrchová úprava

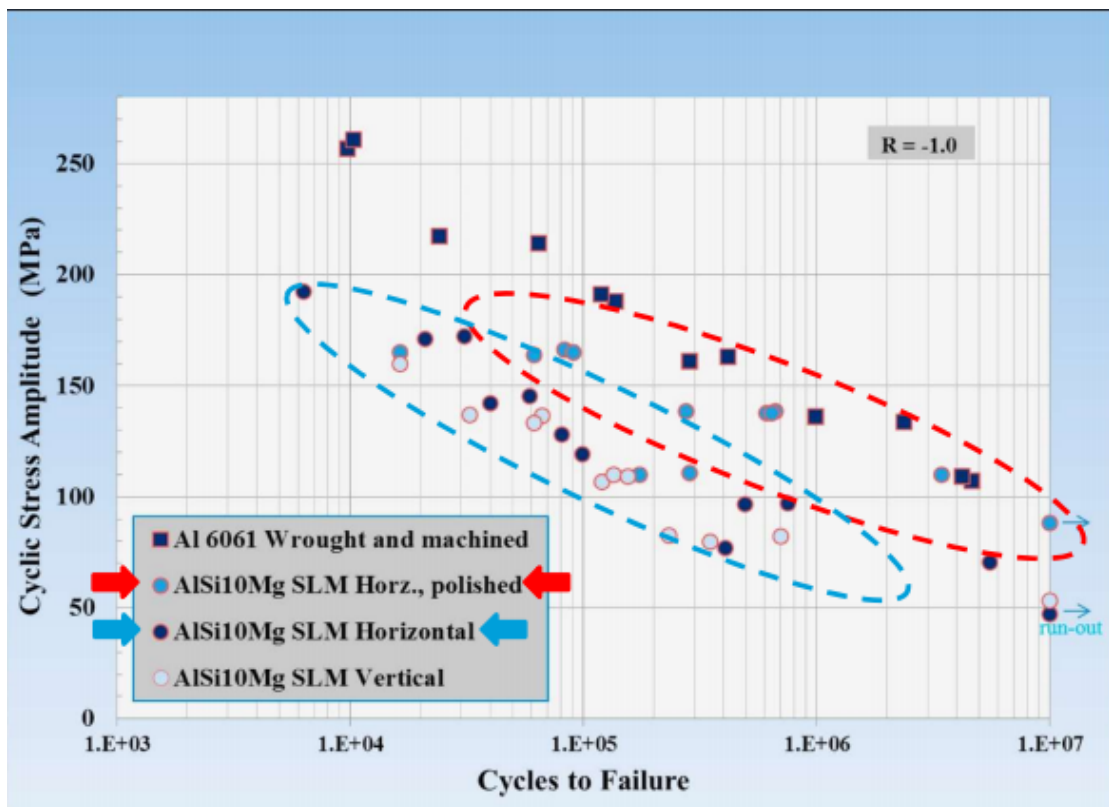
Kovová součást vyrobená aditivně podle nějaké metody 3D tisku, má dle měření vždy horší vlastnosti v křivce únavy materiálů. Materiál bez povrchové úpravy může mít mez únavy i několika násobně nižší než materiál po úpravě.

Standartní součást vyrobená konvenčním obráběním má hodnotu amplitudy napětí daleko větší při stejném počtu cyklů. Při testování součásti na únavu, se opakovaně zatěžuje s nízkou hodnotou napětí, to znamená, že mikrostrukturní nehomogenity a defekty mají větší vliv na snížení hodnoty amplitudy napětí na počet cyklů.

Dále má na únavu materiálu vliv povrchová úprava. 3D tištěné materiály mají drsnější povrch oproti standartním obráběcím metodám. Mechanismus vrstva po vrstvě má přirozeně drsnější povrch, stejně tak se mohou objevovat pouze částečně tavené částice, které také mají vliv na vlastnost povrchu.

3D tištěné materiály z kovu mají obecně lepší vlastnosti v únavě materiálu až po povrchové úpravě. Můžeme zvolit několik způsobů, nejčastější lze aplikovat například:

- Leštění (získáme dokonalý vzhled (zrcadlový) bez požadavků na přesnost. Leštíme ohýbací a tažné hrany nástrojů, dutiny forem apod.)
- Broušení (materiál ubíráme tvrdým brusivem (práškem, kotoučem ap.) s množstvím nepravidelných a nahodile orientovaných břitů)
- Frézování (třískové obrábění kovů vícebřitým nástrojem)
- Kuličkování (tváření povrchové vrstvy otryskáváním kulovitými částicemi tryskacího prostředku)
- Tryskání (opracování povrchu proudem natlakovaných abrazivních částic)



Obr. 25 Závislost únavy materiálu na povrchové úpravě [32].



## 4.2 Tepelné zpracování

Stejně jako u povrchové úpravy, má tepelné zpracování vyrobené součásti formou 3D tisku také za následek zlepšení vlastností únavy a posunutí meze únavy až několika násobně výše. Tepelná úprava sníží pórovitost struktury materiálu.

Příklady možností tepelného zpracování 3D tištěných kovových materiálů:

- Uvolnění stresu (ohřívání materiálu pod nižší kritickou hodnotu, poté rovnoměrné chlazení)
- Žihání a popouštění (ohřívají na danou teplotu, poté následuje výdrž na této teplotě (prodleva) a následné pomalé ochlazování na vzduchu nebo v nevytápěné peci)
- Izostatické lisování za horka (zpracování za zvýšené teploty a vysokého tlaku pomocí inertního plynu)
- Stárnutí (precipitační vytvrzení matrice řízeným vyloučením určitých fází, které je přirozené (při pokojové teplotě), nebo umělé (při vyšších teplotách))
- Vakuové tepelné zpracování (vakuové žihání a vakuové slinování) ve vakuové peci

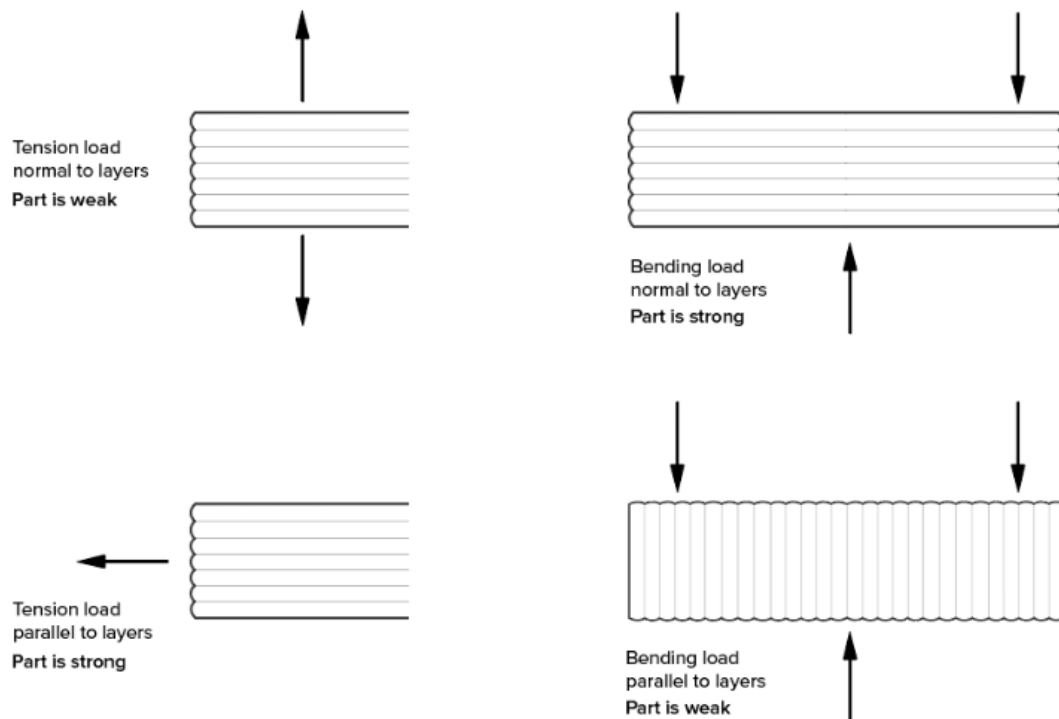


Obr. 26 Vakuová pec pro tepelné zpracování výrobku [34].



### 4.3 Orientace tisku

Orientace sestavení součásti na 3D tiskárně určuje, kterým směrem budou defekty a kde budou slabá spojení. Orientace tisku ovlivňuje stupeň napěťových koncentrátů ve slabých místech. To má za následek různou mez únavy v různých směrech zatížení. Dále mezi jednotlivými vrstvami vznikají koncentrátoři napětí, ve kterých může vzniknout trhlina.



Obr. 27 Závislost orientace tisku na směru zatížení [33].

### 4.4 Teplota při výrobě

U aditivních technologií kovového tisku mají vliv zejména tyto parametry:

- Výkon laseru – P
- Rychlost skenování (tisku) – v
- Mezery mezi zrny – s
- Tloušťka vrstvy – l
- Dohromady nám uvádí objemovou hustotu energie:

$$\text{Objemová hustota energie} = \frac{P}{v d l}$$

Pokud je objemová hustota energie příliš nízká, dostáváme produkt s nízkou kvalitou. Bude obsahovat nedostatek tepelných spojů a neroztavené částice kovu.

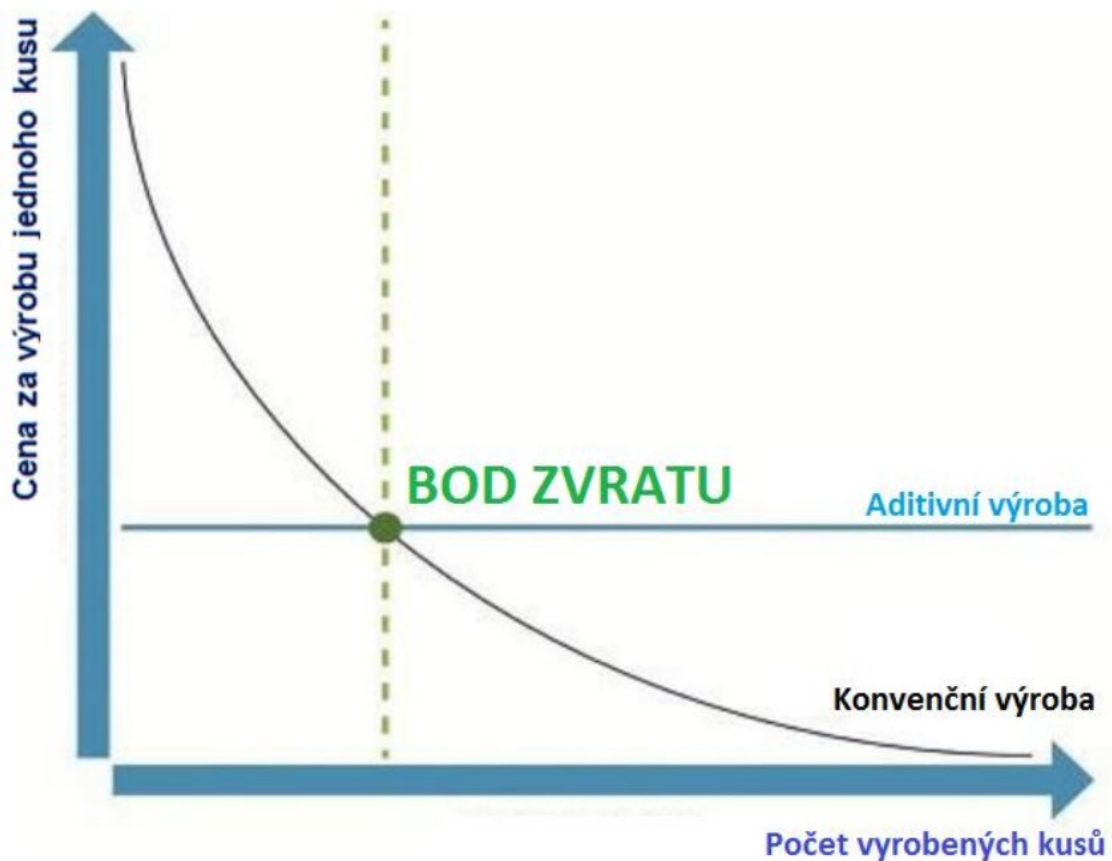
Stejně pokud je objemová hustota energie příliš vysoká, má to za následek nízkou kvalitu finální součásti. Materiál bude mít zvýšenou hustotu pórů, objevují se častěji sférické a keyhole pórovitosti, které jsou nežádoucí a mají za příčinu zhoršení mechanických vlastností výrobku.

Požadovaná je optimální objemová hustota energie. Pokud dokážeme optimalizovat tuto hodnotu, dostáváme výrobek s vysokou kvalitou, lepšími mechanickými vlastnostmi, a hlavně zvýšením životnosti materiálu. Optimalizovat hodnotu můžeme především rychlostí tisku (skenování), kde pomalá rychlost zvýší tepelný příkon a vyšší rychlost ho sníží [32].

## 5 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ 3D TISKNUTÝCH FOREM

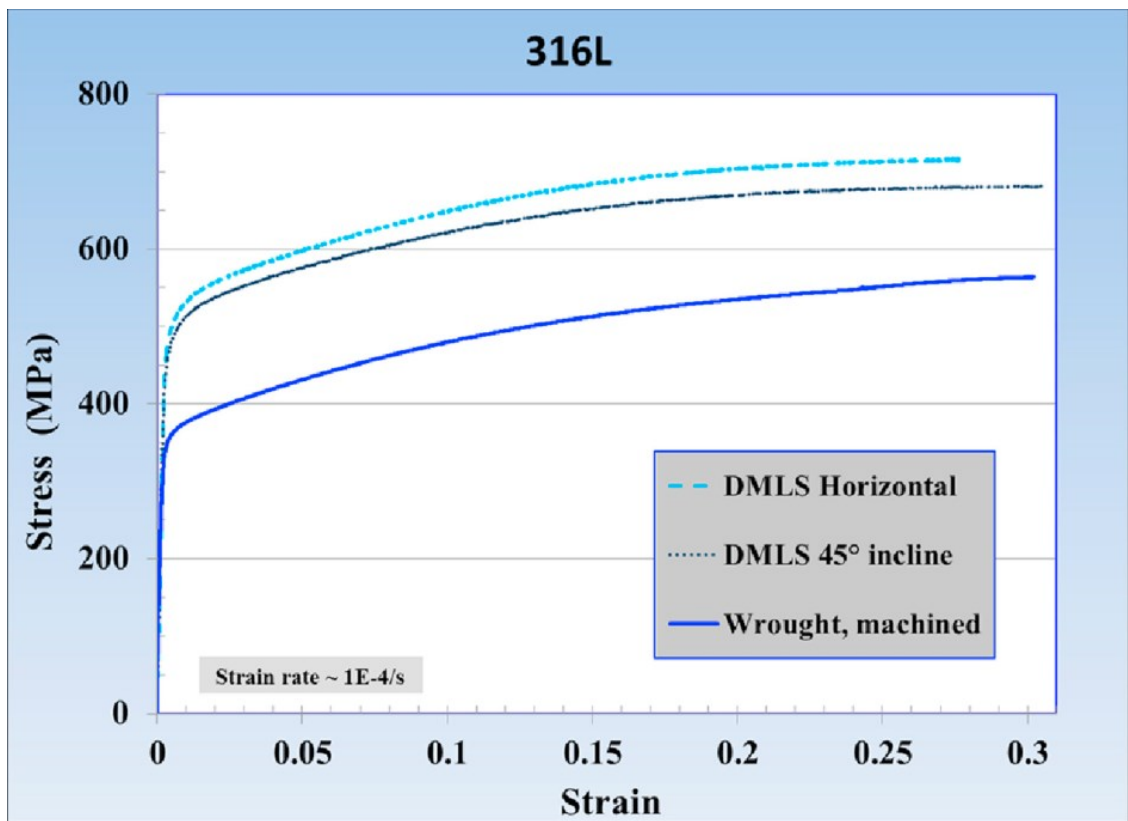
### 5.1 Výhody a nevýhody mechanických vlastností forem vyrobených 3D tiskem

K výrobě formy si poptáme službu 3D tisku. Necháme si vytisknout a obrobit tvárník. Tímto ušetříme peníze za nákup tiskárny, čas lidské práce a množství materiálu. Tvárník si můžeme také nechat povrchově a tepelně upravit, pro zajištění vhodných vlastností. Jelikož se jedná pouze o jednu formu (nebo menší množství), bude výsledná cena formy vyrobené metodou aditivní technologie stále výhodná.

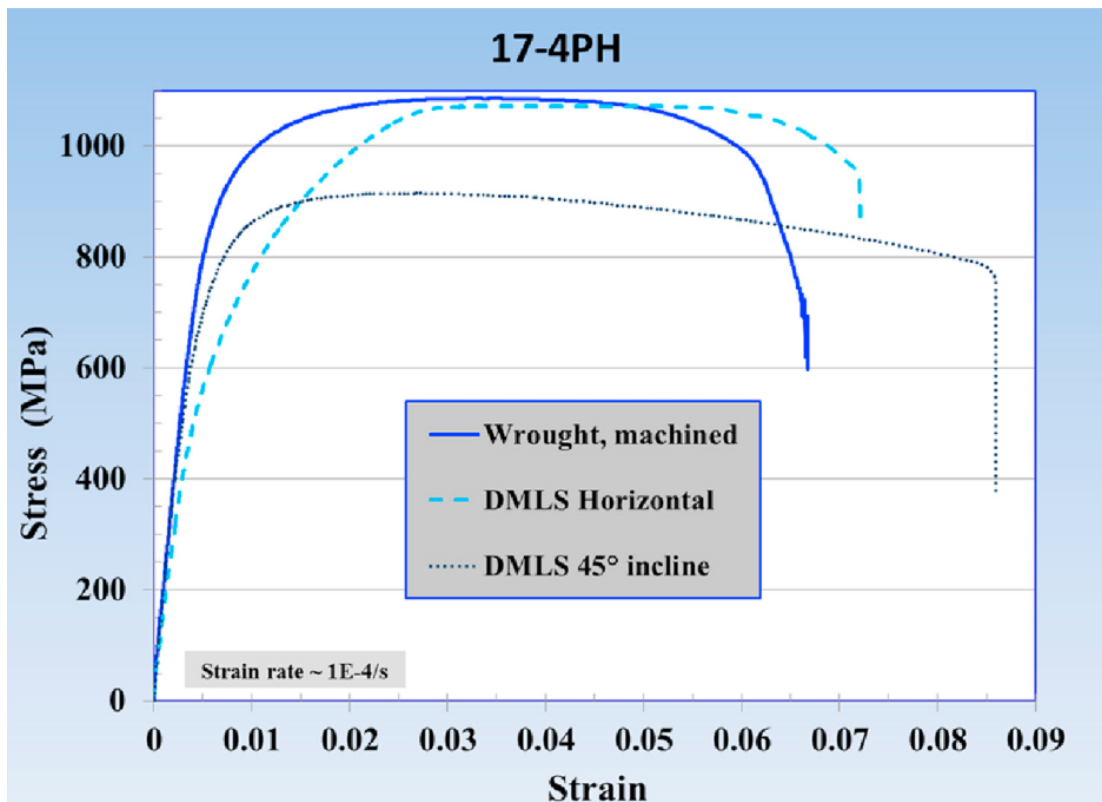


Obr. 28 Aditivní a konvenční výroba z ekonomického hlediska [2].

Výsledné mechanické vlastnosti forem vyrobených aditivní technologií (AM), jako například modul pružnosti, může v některých případech být i lepší než v materiálech vyrobených konvenční obráběcí metodou. Ve většině budou vlastnosti podobné. K ovlivnění můžeme použít například jiný směr orientace tisku.



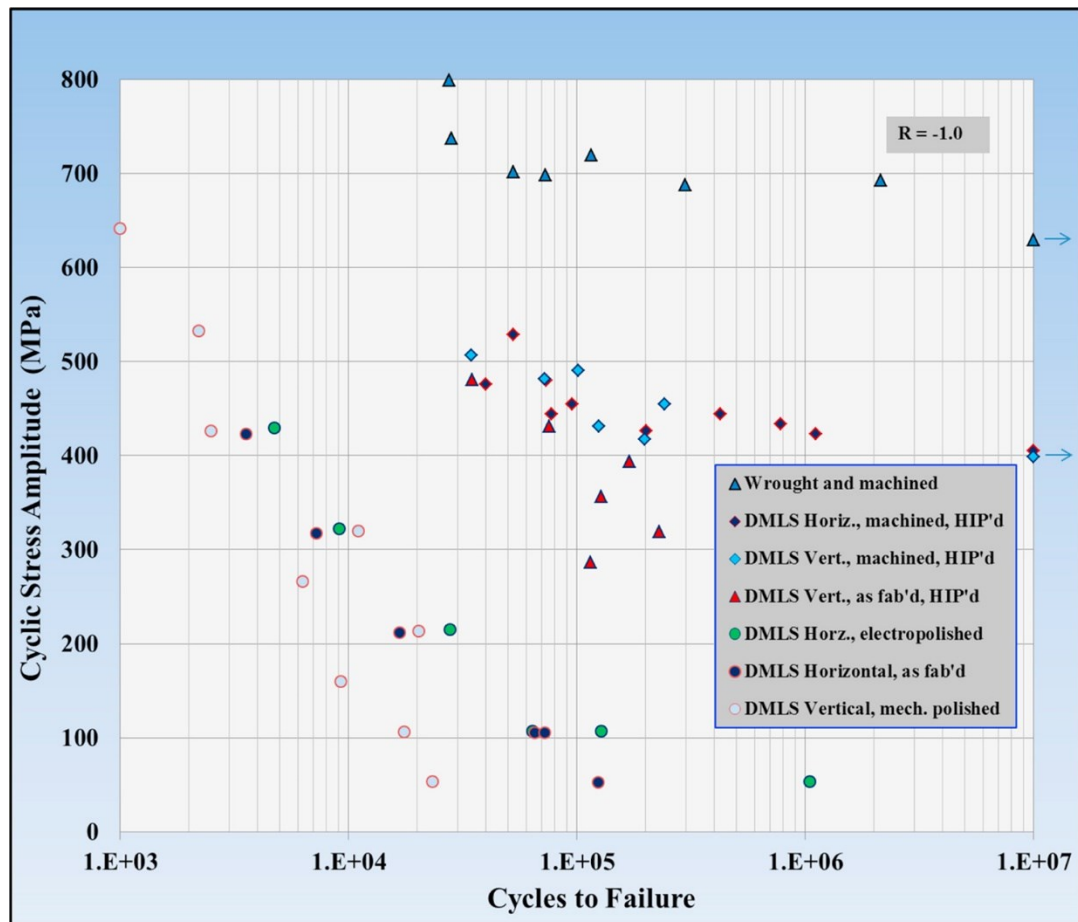
Obr. 29 Zkouška tahem pro ocel 316L vyrobenou konvenční a aditivními metodami [35].



Obr. 30 Zkouška tahem pro ocel 17-4PH vyrobenou konvenčními a aditivními metodami [35].

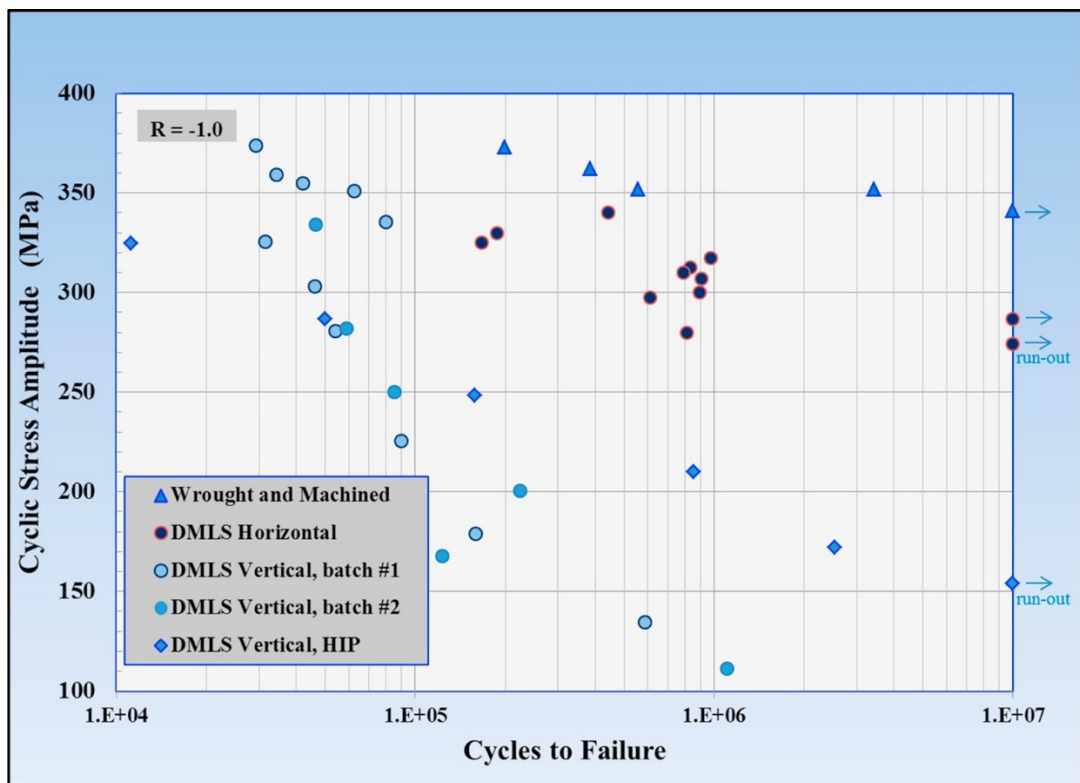
Jelikož nám aditivní technologie nabízí daleko náročnější geometrii, můžeme vyrobit extrémně náročnou formu s promyšlenými chladícími kanály v místech, kde bychom nemohli použít klasické konvenční metody. Pokud skombinujeme vhodný materiál, výhodné dokončovací operace a optimalizujeme proces výroby formy, můžeme dosáhnout výrobku s daleko lepší výslednou kvalitou.

Hlavním problémem zůstává cyklická únava materiálu. V některých případech se může jednat o pouhý pokles 10 % oproti obráběnému materiálu, ale v některých případech můžeme s křivkou únavy spadnout až k 50 %. V takových případech může vzniknout trhlina na povrchovém defektu (dutiny, nepravidelné části) daleko dříve.

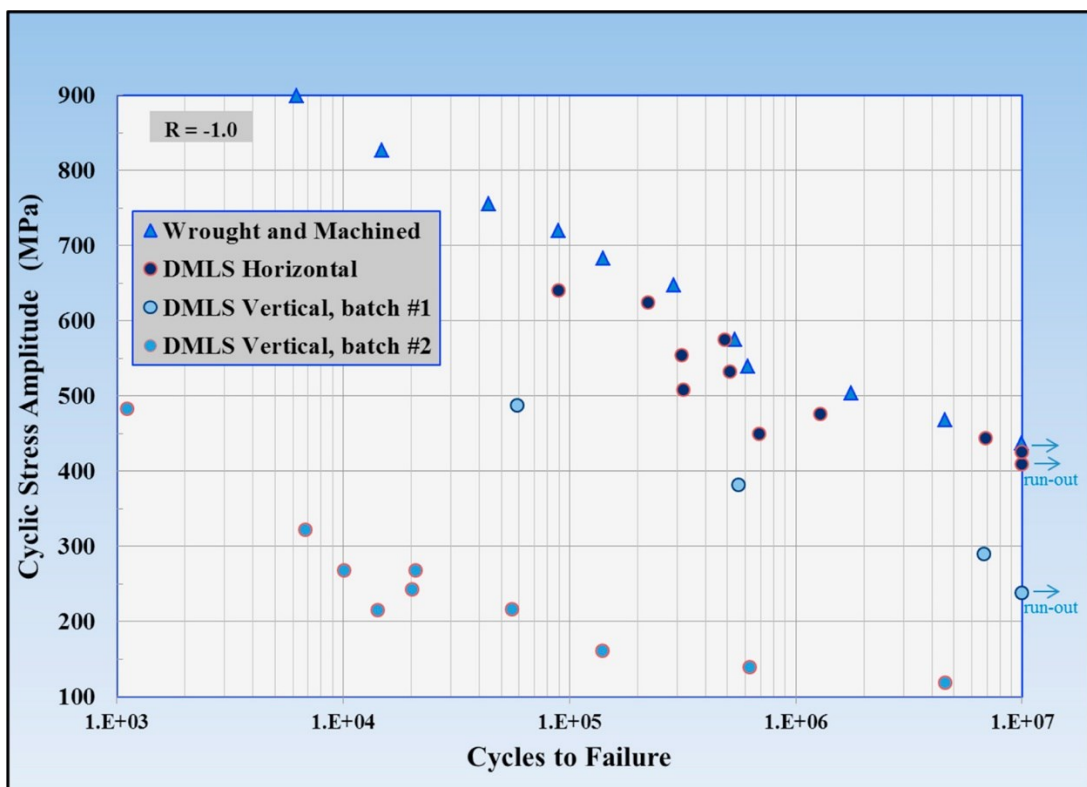


Obr. 31 S-N křivky únavy materiálu Ti6Al4V vyrobeno konvenční metodou a aditivními metodami s různými dokončovacími operacemi [35].

Mechanické ani elektrochemické úpravy vyrobené formy nemají výrazný vliv na zlepšení vlastností únavy materiálu. Tento jev můžeme pozorovat například u slitiny titanu, hliníku a vanadia, která je často v průmyslu používána. Při nejvhodnějších dokončovacích metodách získáme pouze 70% únavové pevnosti konvenčně vyrobeného materiálu [35].



Obr. 32 S-N křivky únavy oceli 316L vyrobené konvenční metodou a aditivními metodami s různými dokončovacími operacemi [35].



Obr. 33 S-N křivky únavy oceli 17-4PH vyrobené konvenční metodou a aditivními metodami s různými dokončovacími operacemi [35].

Dále se můžeme podívat na slitiny nástrojových ocelí 316L a 17-4PH. Výrobky zhotovené z těchto ocelí trpí na únavové trhliny z důvodu oddělení materiálu skrz konstrukční roviny. U obou materiálů můžeme pozorovat daleko lepší vlastnosti při změně výroby z vertikální na horizontální [35].

## 5.2 Experiment forem pro malosériovou výrobu

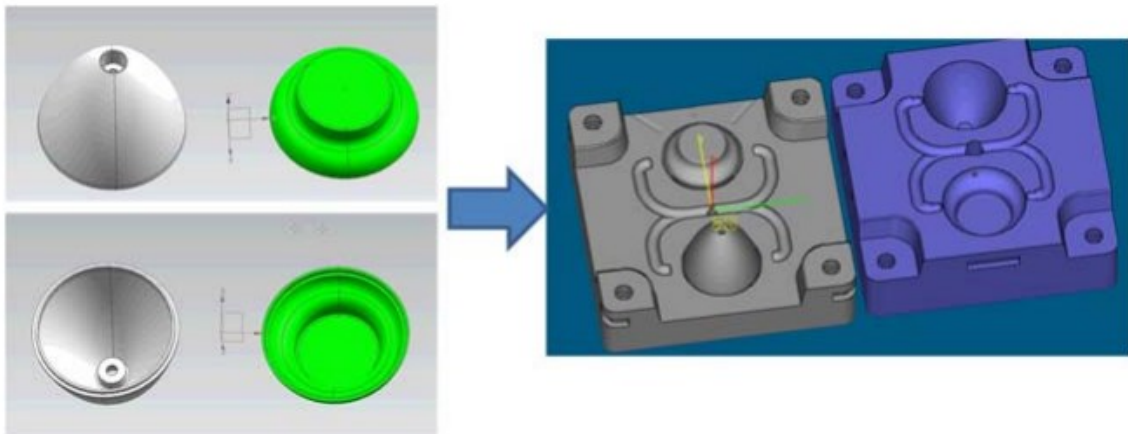
Použijeme experiment pro výrobu forem, který se uskutečnil v technologickém centru AIJU ve Španělsku v roce 2017 [33]. První formy byly vyrobeny metodou stereolitografie (SLA). Materiály pro tuto metodu jsou HT pryskyřice a THO pryskyřice. Další použitou metodou je selective laser sintering (SLS) s materiálem PA50A1 a poslední metodou pro výrobu formy byla foto-polymerizace s materiálem pryskyřice s vlastnostmi stejnými jako ABS.

Všechny použité materiály byly nejprve testovány pro jejich mechanické vlastnosti ve zkoušce tahem, rázem a ohybem, pro zjištění přesných vlastností po přidání uhlíkových aditiv do pryskyřice.

		High Temp resin	Though resin	PA50A1	ABS like
Tensile test	Maximum Tensile Strength (MPa)	29.3 ± 4.8	20.4 ± 0.7	42.4 ± 1.6	59.2 ± 0.8
	Young Modulus (MPa)	608 ± 302	151 ± 74.2	3610 ± 195	1950 ± 50
	Elongation at Maximum Tensile Strength (%)	2.8 ± 0.2	30.5 ± 15	2.9 ± 0.9	4.6 ± 0.1
Flexural test	F (3.5%), MPa	60.5 ± 0.6	10.5 ± 1.3	55.6 ± 1.2	67 ± 2.9
	Flexural Modulus (MPa)	1970 ± 111	368 ± 60.6	2530 ± 55	2100 ± 82
Impact Test	Charpy Impact	3.4 ± 0.7	8.8 ± 1.9	27.7 ± 1.7	20.1 ± 7.0

Obr. 34 Souhrn mechanických vlastností zkoušených materiálů [34].

V další části se navrhly vhodné formy v CAD systému. Zvolila se forma pro točící hračku. Tyto formy mají různé tvary, chladicí systémy, tloušťky stěn a jiné, pro dostatečné zjištění doby formování a kvality výsledného produktu.



Obr. 35 Design navržených prototypů forem [34].

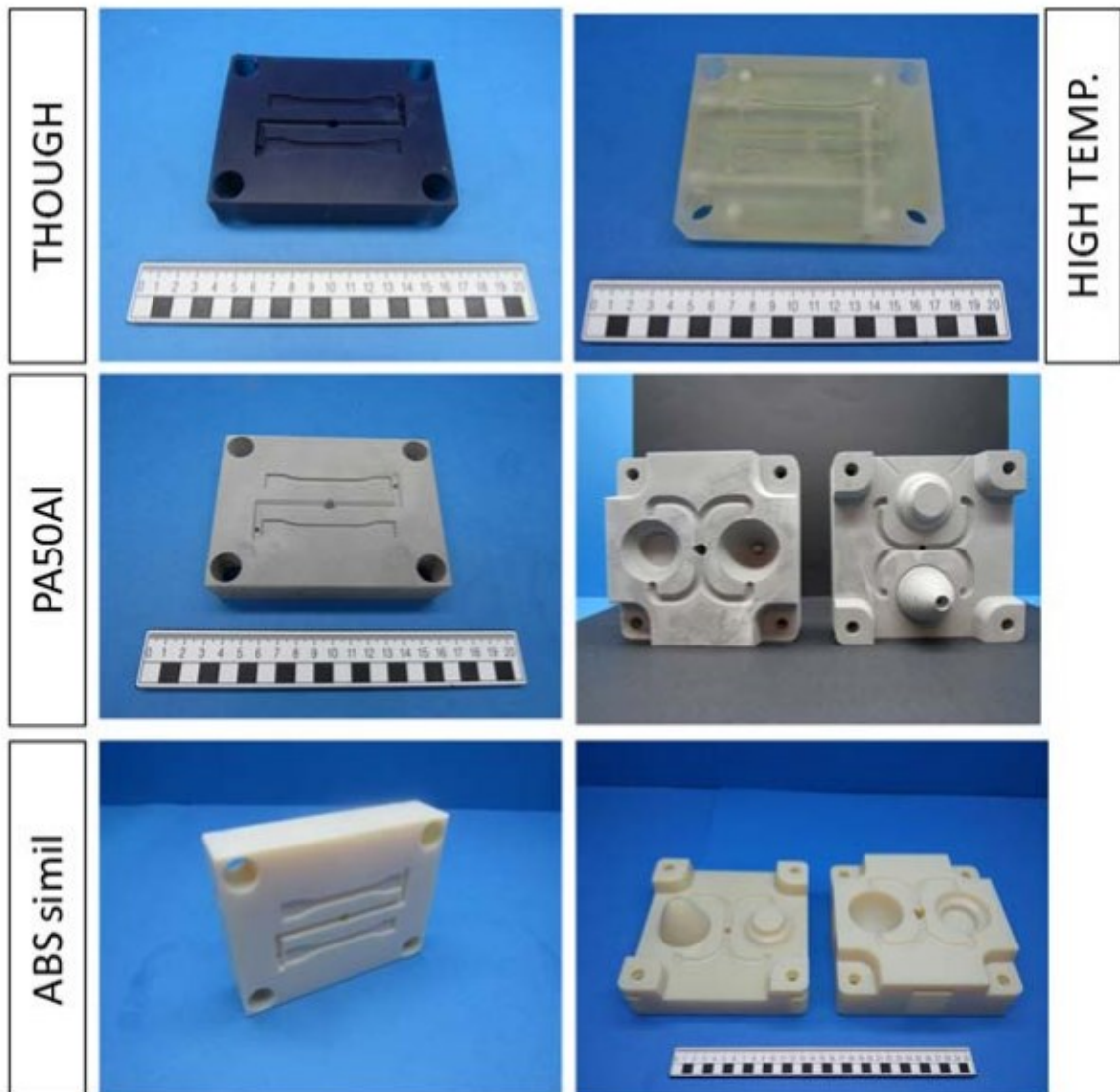
Formy byly vyrobeny pomocí všech tří metod, které byly určeny pro jednotlivé materiály. Hlavním parametrem pro výrobu je tloušťka vrstvy, která určí výslednou kvalitu povrchu. Čím menší velikost vrstvy, tím lepšího povrchu můžeme dosáhnout. SLA pryskyřicové formy byly po vyrobení vytvrzeny v UV komoře a ABS formy byly tepelně zpracovány.

	HT resin	THO resin	PA50Al	ABS like
Layer (mm)	0.025	0.05	0.1	0.027
Temperature (°C)	-	-	174	-
Laser power	250mW	250mW	14W	-

Obr. 36 Experimentální podmínky pro výrobu forem [34].

Bohužel forma vyrobená metodou SLA z materiálu pryskyřice THO byla nepoužitelná z důvodu zvlnění struktury po vytvrzení UV.





Obr. 37 Fotografie jednotlivých forem po dokončení výroby [34].

Následně byly formy použity pro vstřikování jednotlivých polymerů v pořadí PP (s nejnižší teplotou vstřikování 95°C), PE (s teplotou vstřiku 200°C) a ABS (se vstřikovací teplotou 270°C). Všechny tyto formy byly úspěšně ověřeny pro výrobu malých sérií a pro získání finálních produktů k ověření výsledných vlastností. Tyto formy ovšem nemohou být používány po delší dobu, jejich životnost se očekává velice omezená.

## ZÁVĚR

Pro výrobu formy pomocí aditivní technologie je nejvhodnější zvolit metodu tisku kovového materiálu. Forma vyrobená z foto-polymeru nebo pryskyřice může dosáhnout minima požadovaných vlastností pro zadaný výrobek, což vyplývá z předchozích experimentů, ale její životnost bude extrémně nízká.

Nejvhodnější je zvolit nejmodernější metody jako je laserové slinování nebo tavení. Při chytrém výběru materiálu, optimálním procesu výroby a vhodně zvolených dokončovací metodách můžeme dosáhnout vysoké kvality formy. Při výrobě jednoho kusu bude dostatečně pravděpodobné, že forma nebude tak finančně nákladná, jako při výrobě konvenční metodou. Cena se odvíjí také od násobnosti formy a náročnosti vnitřní geometrie. Hlavně při vyšší náročnosti vnitřní geometrie aditivní technologie exceluje před konvenčními metodami.

Hlavní nevýhodou formy vyrobené 3D tiskem je podstatně horší cyklická únava materiálu. Pokud bychom chtěli formu zatěžovat při velkých výrobních sériích, může dojít k opotřebení daleko dříve než u klasicky vyrobené formy. Na povrchu se mohou objevit trhliny, které byly iniciovány předchozí nedokonalostí a forma se může stát nepoužitelnou pro další výrobu. Proto musíme co nejlépe zvolit způsob výroby tisku a poté vhodně dokončit pomocí dokončovací metod. Leštění na povrchu nás může zbavit nedokonalostí a tepelné zpracování nám může pomoci s dalšími vadami.

Pokud chceme investovat do formy, která má požadavky na vyšší stupeň geometrie, důraz na kvalitu povrchu, náročnost formy a použití v malosériové výrobě, je vhodné použít metody 3D tisku. Je ale nutné detailně otestovat materiál na mechanické vlastnosti pro danou metodu, což může dále zvýšit náklady na výrobu.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

1. Aditivní výroba [online]. [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <http://www.3dtisk.cz/aditivni-vyroba/>
2. KOŠTURIÁK, Ján, Jan MAŠEK, Martin TVARŮŽEK a Tomáš MICHÁLEK, MSC. Inovace 2015, Téma 7: Role technologie 3D tisku v inovačním procesu [online]. Praha: MM Průmyslové spektrum, 2015 [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/inovace-2015-tema-7-roletechnologie-3d-tisku-v-inovacnim-procesu.html>. Kód článku: 170421 Vyšlo v MM: 2017 / 4, 12.04.2017 v rubrice Trendy / Moderní výrobní technologie, Strana 53.
3. 3Dexter [online]. 2018 [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <https://3dexter.com/additive-manufacturing-vs-subtractive-manufacturing/>
4. Aditivní technologie technologie – metody Rapid metody Rapid Prototyping [online]. [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/podklady/sto\\_bak/cv\\_STV\\_04\\_Aditivni\\_techologie\\_metody\\_Rapid\\_Prototyping.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/podklady/sto_bak/cv_STV_04_Aditivni_techologie_metody_Rapid_Prototyping.pdf)
5. Autodesk [online]. 2020 [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <https://www.autodesk.cz/products/autocad/overview?plc=ACDIST&term=1-YEAR&support=ADVANCED&quantity=1#internal-link-what-is-autocad>
6. Manufacturing Toolbox [online]. 2011 [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <https://manufacturingtoolbox.typepad.com/my-blog/2011/06/you-might-be-surprised-what-autodesk-inventor-lt-2012-can-do.html>
7. Reddit/r/3Dprinting [online]. 2019 [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: [https://www.reddit.com/r/3Dprinting/comments/c02jx5/the\\_sidebar\\_gui\\_plugin\\_is\\_now\\_compatible\\_with/](https://www.reddit.com/r/3Dprinting/comments/c02jx5/the_sidebar_gui_plugin_is_now_compatible_with/)
8. Zortax 3D printing [online]. 2016 [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <https://zortrax.com/blog/post-processing-in-additive-manufacturing-zortrax-support-center-manuals/>
9. TESARŮ, Jaroslav. Aplikace moderních metod pro výrobu odkládacího stojanu na mobilní telefon. Brno 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 70 s. 3 přílohy. Vedoucí práce: Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

10. 3D Printing Media Network [online]. 2018 [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <https://www.3dprintingmedia.network/advanced-materials-additive-manufacturing/>
11. LIU, Z.Y., C. LI, X. Y. FANG a B. GUO. Energy Consumption in Additive Manufacturing of Metal Parts. *Procedia Manufacturing* [online]. 2018, **2018**(26), 834-845 [cit. 2020-05-21]. ISSN 2351-9789. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.104>.
12. REDWOOD, Ben, Filemon SCHFFER a Brian GARRET. *The 3D Printing Handbook: Technologies, Design and Applications* [online]. 1. 2017 [cit. 2020-05-21]. ISBN 9082748509. Dostupné z: <https://dl.acm.org/doi/book/10.5555/3199991>
13. *ResearchGate* [online]. [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/Fused-deposition-modelling-FDM-Printing-system\\_fig3\\_319987351](https://www.researchgate.net/figure/Fused-deposition-modelling-FDM-Printing-system_fig3_319987351)
14. *Precision Laser Scanning* [online]. [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <https://precisionlaserscanning.com/2016/03/galvanometer-scanners-not-fast-enough-for-your-new-laser-or-application/>
15. *Manufactur3D Magazine on 3D printing* [online]. 2018 [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <https://manufactur3dmag.com/how-selective-laser-sintering-works/>
16. *ResearchGate* [online]. [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/Basic-principle-of-stereolithography-apparatus-method\\_fig3\\_297605485](https://www.researchgate.net/figure/Basic-principle-of-stereolithography-apparatus-method_fig3_297605485)
17. PASCAL, Nelson. *DLP®Technology for Spectroscopy* [online]. 2014, 9 [cit. 2020-05-21]. DOI: DLPA048A. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/wp/dlpa048a/dlpa048a.pdf?ts=1590092571125>
18. *Think 3D* [online]. 2016 [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <https://www.think3d.in/digital-light-processing-dlp-3d-printing-service-india/>
19. *Design, Research, and Education for Additive Manufacturing Systems* [online]. 2020 [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <http://seb199.me.vt.edu/dreams/material-jetting/>
20. *Structo 3D MSLA Technology* [online]. 2020 [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <https://www.structo3d.com/pages/mask-stereolithography-msla-technology>

21. *3D Printing Industry* [online]. 2020 [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/metalmaker-3d-launches-rapid-prototyping-service-for-3d-printed-metal-parts-142735/>
22. *DMG MORI SLM* [online]. 2020 [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <https://dk.dmgmori.com/products/machines/additive-manufacturing/powder-bed/lasertec-30-slm>
23. FEENEY, David. *SD3D: Direct Metal Laser Sintering – DMLS 3D Printing Services Now Available* [online]. 2019 [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <https://www.sd3d.com/dmls-3d-printing/>
24. *ResearchGate* [online]. [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/A-schematic-diagram-of-direct-metal-laser-sintering-DMLS-process-6\\_fig1\\_334114846](https://www.researchgate.net/figure/A-schematic-diagram-of-direct-metal-laser-sintering-DMLS-process-6_fig1_334114846)
25. *AMFG: All You Need to Know About Metal Binder Jetting* [online]. 2019 [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <https://amfg.ai/2019/07/03/metal-binder-jetting-all-you-need-to-know/?cn-reloaded=1>
26. *ResearchGate* [online]. [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/Schematic-drawing-of-an-electron-beam-melting-system\\_fig2\\_269836411](https://www.researchgate.net/figure/Schematic-drawing-of-an-electron-beam-melting-system_fig2_269836411)
27. *Design World: Electron Beam Melting Is Just as Metal as It Sounds* [online]. 2016 [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <https://www.designworldonline.com/electron-beam-melting-is-just-as-metal-as-it-sounds/>
28. *TRUMPF: Laserové práškové navařování (LMD)* [online]. [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: [https://www.trumpf.com/cs\\_CZ/pouziti/aditivni-vyroba/laser-metal-deposition-lmd/](https://www.trumpf.com/cs_CZ/pouziti/aditivni-vyroba/laser-metal-deposition-lmd/)
29. *TRUMPF: Laser Metal Fusion – výhody, funkční principy a aplikace aditivní technologie* [online]. [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: [https://www.trumpf.com/cs\\_CZ/pouziti/aditivni-vyroba/laser-metal-fusion-lmf/](https://www.trumpf.com/cs_CZ/pouziti/aditivni-vyroba/laser-metal-fusion-lmf/)
30. *3D Natives: The Complete Guide to Directed Energy Deposition (DED) in 3D Printing* [online]. 2019 [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/directed-energy-deposition-ded-3d-printing-guide-100920194/>
31. *AZO Materials: Developments in 3D Metal Printing* [online]. 2018 [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=16018>

32. AFKHAMI, Shahriar. *Me3DI: Fatigue Properties of 3D Printed Metals* [online]. 2019 [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <https://mfg40.fi/wp-content/uploads/2019/12/Fatigue-Properties-of-3D-Printed-Metals.pdf>
33. HUDSON, Ben. *3D Hubs: How to design parts for FDM 3D printing* [online]. 2019 [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/how-design-parts-fdm-3d-printing/>
34. LEÓN-CABEZAS, M.A., A. MARTÍNEZ-GARCÍA a F.J. VARELA-GANDÍA. *Procedia Manufacturing: Innovative advances in additive manufactured moulds for short plastic injection series* [online]. 2017, **13**, 732-737 [cit. 2020-05-22]. ISSN 2351-9789. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.124>.
35. MOWER, Todd M. a Michael J. LONG. *Materials Science and Engineering: A: Mechanical behavior of additive manufactured, powder-bed laser-fused materials* [online]. 2016, **651**, 198-213 [cit. 2020-05-22]. ISSN 0921-5093. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.10.068>.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

AM	Additive manufacturing
2D	Dvourozměrný.
3D	Trojrozměrný.
CAD	Computer aided design.
CAM	Computer aided manufacturing.
FDM	Modelování tavené dispozice.
SLS	Selective laser sintering.
SLA	Stereolytografie.
DLP	Digital light processing.
MJ	Material jetting.
MSLA	Masked Stereolithografie.
DMLS	Direct Metal Laser Sintering.
EBM	Electron beam melting.
LMD	Laser metal deposition.
LMF	Laser Metal Fusion.
DED	Directed energy deposition.

## SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1 Metody subtraktivní a aditivní výroby [3].
- Obr. 2 využití 3D tisku ve firmách podle společnosti Deloitte [2].
- Obr. 3 Cyklus výroby součástí pomocí aditivních technologií [11].
- Obr. 3 Vývoj a proces vzniku reálné součásti [4].
- Obr. 3.1 Vývoj a proces vzniku reálné součásti [4].
- Obr. 3.2 Zhotovená součást v programu Autodesk Inventor [6].
- Obr. 4 Grafické rozhraní systému CURA 4.1 pro nastavení 3D tisku [7].
- Obr. 5 Dokončovací práce na 3D tištěném výrobku [8].
- Obr. 5.1 Rozdělení metod aditivních technologií podle materiálu [9].
- Obr. 6 Příklady výrobků 3D tisku polymerních materiálů [10].
- Obr. 7 Systém tisknutí modelování tavené dispozice (FDM) [13].
- Obr. 8 Schéma dvojice galvanometrů pro soustředění paprsku laseru [14].
- Obr. 9 Schéma fungování metody tisku SLS [15].
- Obr. 9.1 Schéma principu metody stereolithografického tisku [16].
- Obr. 10 DMD – digital micromirror device [17].
- Obr. 11 Schéma metody digital light processing [18].
- Obr. 12 Schéma Objet Connex350 PolyJet MJ tiskárny [19].
- Obr. 13. Schéma částí tiskárny metody MSLA [20].
- Obr. 14 Součásti vyrobené 3D tiskem kovů [21].
- Obr. 15 Schéma procesu tisku metodou SLM [22].
- Obr. 16 Součásti vyrobené metodou DMLS s náročnou geometrií [23].
- Obr. 17 Schéma metody tisku DMLS [24].
- Obr. 18 Schéma metody tisku metal binder jetting [25].
- Obr. 19 Schéma přístroje pro tisk metodou EBM [26].
- Obr. 20 Raketová tryska s porézni sktrukturou vyrobená metodou EBM [27].



- Obr. 21 Schéma procesu laserového navařování LMD [28].
- Obr. 22 Schéma metody tisku laserového tavení (LMF) [29].
- Obr. 23 Schéma metody tisku přímého energetického nanášení (DED) [30].
- Obr. 24 Příklad výroby kovové součásti aditivní technologií [31].
- Obr. 25 Závislost únavy materiálu na povrchové úpravě [32].
- Obr. 26 Vakuová pec pro tepelné zpracování výrobku [34].
- Obr. 27 Závislost orientace tisku na směru zatížení [33].
- Obr. 28 Aditivní a konvenční výroba z ekonomického hlediska [2].
- Obr. 29 Zkouška tahem pro ocel 316L vyrobenou konvenční a aditivními metodami [35].
- Obr. 30 Zkouška tahem pro ocel 17-4PH vyrobenou konvenčními a aditivními metodami [35].
- Obr. 31 S-N křivky únavy materiálu Ti6Al4V vyrobeno konvenční metodou a aditivními metodami s různými dokončovacími operacemi [35].
- Obr. 32 S-N křivky únavy oceli 316L vyrobené konvenční metodou a aditivními metodami s různými dokončovacími operacemi [35].
- Obr. 33 S-N křivky únavy oceli 17-4PH vyrobené konvenční metodou a aditivními metodami s různými dokončovacími operacemi [35].
- Obr. 34 Souhrn mechanických vlastností zkoušených materiálů [34].
- Obr. 35 Design navržených prototypů forem [34].
- Obr. 36 Experimentální podmínky pro výrobu forem [34].
- Obr. 37 Fotografie jednotlivých forem po dokončení výroby [34].