

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Výroba kovových součástí metodou 3D tisku

Bakalářská práce

Vedoucí práce: prof. Ing. Milan Brožek, CSc.

Autor práce: Jakub Jareš

© 2018 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jakub Jareš

Technologická zařízení staveb

Název práce

Výroba kovových součástí metodou 3D tisku

Název anglicky

Production of metal parts using 3D printing

Cíle práce

- shromáždit informace o výrobě kovových součástí metodou 3D tisku, jeho výhodách, nevýhodách a použití v praxi,
- shromáždit informace o používaných materiálech a zařízeních.

Metodika

- současný stav řešeného problému (literární rešerše),
- závěry a přínos práce.

Doporučený rozsah práce

cca 30 stran

Klíčová slova

výroba prototypu; 3D tisk; design; kovy

Doporučené zdroje informací

- BENIAK, J.: Systém rapid prototyping. Vydavatelství STU 2015, 134 s.
- BERMAN, B.: 3-D printing: The new industrial revolution. *Business Horizons*, 2012, 55 (2), s. 155-162.
- COOPER, K. G.: Rapid Prototyping Technology: Selection and Application. Taylor & Francis Inc. 2001, 248 s.
- GALLIMORE, J. J., BROWN, M. E.: Visualization of 3-D Computer-Aided Design Objects. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 1993, 5 (4), s. 361-382.
- HOPKINSON, N., HAGUE, R., DICKENS, P.: Rapid Manufacturing: An Industrial Revolution for the Digital Age. John Wiley & Sons 2006. 304 s.
- CHUA, CH. K., LEONG, K. F., LIM, Ch. S.: Rapid Prototyping. Principles and Applications. 3rd Edition. WSPC 2010. 600 s.
- CHUA, CH. K., LEONG, K. F.: 3D Printing and Additive Manufacturing. Principles and Applications. Fifth Edition. World Scientific Publishing Co Pte Ltd. 2014. 540 s.
- KHOO, Z. X., TEOH, J. E. M., LIU, Y. et al.: 3D printing of smart materials: A review on recent progresses in 4D printing. *Virtual and Physical Prototyping*, 2015, 10 (3), s. 103-122.
- OROPALLO, W., PIEGL, L. A.: Ten challenges in 3D printing. *Engineering with Computers*, 2016, 32 (1), s. 135-148.
- RAYNA, T., STRIUKOVA, L.: From rapid prototyping to home fabrication: How 3D printing is changing business model innovation. *Technological Forecasting and Social Change*, 2016, 102, s. 214-224.
-

Předběžný termín obhajoby

2017/18 LS – TF

Vedoucí práce

prof. Ing. Milan Brožek, CSc.

Garantující pracoviště

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Elektronicky schváleno dne 13. 1. 2017

doc. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 23. 1. 2017

prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan

V Praze dne 29. 03. 2018

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Výroba kovových součástí metodou 3D tisku vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů. Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby. Jsem si vědom, že moje bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí. Jsem si vědom že, na tuto bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.“

V Praze dne 31. března. 2018

Jakub Jareš

Poděkování:

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu prof. Ing. Milanu Brožkovi, CSc. za vstřícnost a odborné konzultace bakalářské práce.

Výroba kovových součástí metodou 3D tisku

Abstrakt: Tato bakalářská práce se zabývá výrobou modelů pomocí 3D tiskáren. V textu jsou vysvětleny metody, které se pro tento účel využívají. U jednotlivých metod výroby jsou popsány jejich výhody, nevýhody a oblasti využití. U některých z nich, jsou přidány technické parametry 3D tiskáren. V práci je také vysvětlen pracovní postup, který se využívá pro zhotovení 3D modelů. Zvláštní kapitola je vyčleněna pro 3D tvorbu z kovových materiálů, doplněná ukázkou vyrobeného testovacího dílu z Technické univerzity v Liberci. Představena jsou odvětví, do kterých tyto technologie již pronikly. Díky novým výrobním postupům se otevírá firmám možnost alternativní výroby a výrobky vzniklé touto metodou usnadňují mnoha lidem život.

Klíčová slova: Výroba prototypů, 3D tisk, design, kovy

Production of metal parts using 3D printing

Summary: This thesis describes the production of models made by 3D printers. The text explains the methods that are used for this purpose. The individual production methods are described with their advantages, disadvantages and applications. The technical parameters of the 3D printers are added to some of these methods. The workflow used for the manufacture of 3D models is also explained in this thesis. A special chapter is devoted to the creation of 3D metal materials, accompanied by a sample of the prototype produced at the Technical University in Liberec. The thesis also presents the sectors to which these technologies have already penetrated. Companies have new possibilities of alternative production due to these new production methods now. The products of these new methods make people's lives easier.

Key words: Rapid prototyping, 3D print, design, metals

Obsah

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Úvod | 1 |
| 1.1 | Historie 3D tisku | 1 |
| 2 | Cíle práce | 2 |
| 3 | Metodika práce | 3 |
| 4 | Výroba prototypů | 4 |
| 4.1 | Rapid Prototyping („Rychlá výroba prototypů“) | 4 |
| 4.2 | Hlavní metody používané u Rapid Prototyping | 5 |
| 4.2.1 | FDM (Fused Deposition Modeling) | 5 |
| 4.2.2 | LOM (Laminated Object Manufacturing) | 8 |
| 4.2.3 | 3DP (3 Dimensional Printing) | 9 |
| 4.2.4 | SLA (Stereolitography) | 10 |
| 4.2.5 | BPM (Ballistic Particle Manufacturing) | 13 |
| 4.3 | Rapid Prototyping – Postup výroby 3D modelu | 14 |
| 4.3.1 | Preprocessing | 14 |
| 4.3.2 | Processing | 14 |
| 4.3.3 | Postprocessing | 14 |
| 5 | 3D tisk kovů | 15 |
| 5.1 | Obory ve kterých se vyskytuje 3D tisk kovů | 15 |
| 5.2 | Technologie 3D tisku kovu | 15 |
| 5.2.1 | SLS (Selective Laser Sintering) | 16 |
| 5.2.2 | DMLS (Direct Metal Laser Sintering) | 18 |
| 5.2.3 | EBM (Electron Beam Melting) | 20 |
| 5.2.4 | LENS (Laser Engineered Net Shaping) | 21 |
| 5.2.5 | SLM (Selective Laser Melting) | 22 |
| 5.3 | Hybridní technologie | 25 |
| 5.3.1 | MLSHM (Metal Laser Sintering Hybrid Milling) | 25 |
| 5.4 | Programy pro výrobu 3D modelů | 26 |
| 5.5 | Základní programy pro výrobu 3D modelu | 27 |
| 5.5.1 | Tinkercad | 27 |
| 5.5.2 | Meshmixer | 27 |
| 5.5.3 | 123D | 28 |
| 5.5.4 | Fusion 360 | 28 |

| | | |
|-------|--|----|
| 5.6 | Formát STL (Standart Transform Language) | 28 |
| 5.7 | Další formáty pro 3D tisk | 29 |
| 6 | Využití 3D tisku | 30 |
| 6.1 | 3D tisk v gastronomii..... | 30 |
| 6.2 | 3D stavba budov | 31 |
| 6.2.1 | Contour Crafting | 31 |
| 6.3 | 3D tisk zbraní..... | 32 |
| 6.3.1 | 3D granátomet..... | 32 |
| 6.4 | 3D tisk ve zdravotnictví..... | 33 |
| 6.5 | Strojírenství..... | 33 |
| 6.5.1 | Výroba jeřábového háku | 34 |
| 6.5.2 | Výroba lopatek do plynových turbín | 34 |
| 6.6 | Automobilový průmysl | 35 |
| 6.6.1 | Montážní přípravky v automobilce Opel | 35 |
| 7 | Závěr..... | 36 |
| 8 | Citovaná literatura | 37 |

Seznam obrázků

| | |
|---|----|
| <i>Obrázek 1 - Technologie 3D tisku FDM</i> | 6 |
| <i>Obrázek 2 - Technologie 3D tisku LOM</i> | 8 |
| <i>Obrázek 3 - Technologie 3D tisku 3DP</i> | 9 |
| <i>Obrázek 4 - Technologie 3D tisku SLA</i> | 10 |
| <i>Obrázek 5 - Technologie 3D tisku MJM</i> | 12 |
| <i>Obrázek 6 - Technologie 3D tisku SLS</i> | 16 |
| <i>Obrázek 7- Výrobek pomocí DMLS</i> | 19 |
| <i>Obrázek 8 - Model a skutečný testovací díl</i> | 24 |
| <i>Obrázek 9 - Přesnost testovacího dílu před a po žíhání</i> | 25 |
| <i>Obrázek 10- STL formát</i> | 29 |
| <i>Obrázek 11 - využití 3D tisku v gastronomii</i> | 30 |
| <i>Obrázek 12 - Projekt Contour Crafting</i> | 32 |
| <i>Obrázek 13 - První hák vyrobený pomocí 3D technologie</i> | 34 |

Seznam tabulek

| | |
|--|----|
| <i>Tabulka 1- Parametry tiskárny Solid SD 300 Pro</i> | 9 |
| <i>Tabulka 2 - Parametry tiskáren používaných u SLA</i> | 11 |
| <i>Tabulka 3 - Parametry tiskáren SLS</i> | 17 |
| <i>Tabulka 4 - Parametry tiskárny EOSINT M280</i> | 19 |
| <i>Tabulka 5 - Technické parametry tiskárny LENS MR-7</i> | 21 |
| <i>Tabulka 6 - Porovnání materiálů vyrobených pro LENS a vyrobených klasicky</i> | 22 |
| <i>Tabulka 7 - Parametry SLM 280HL</i> | 23 |
| <i>Tabulka 8 - Parametry vytisknutého modelu</i> | 24 |

Seznam zkratek

| | |
|------------|---|
| RP | Rapid Prototyping |
| CNC | Computer Numerical Control |
| FDM | Fused Deposition Modeling |
| LOM | Laminated Object Manufacturing |
| PLT | Paper Lamination Technology |
| SLS | Selective Laser Sintering |
| DMLS | Direct Metal Laser Sintering |
| EBM | Electron Beam Melting |
| LENS | Laser Engineered Net Shaping |
| MJS | Multiphase Jet Solidification |
| 3DP | Three-Dimensional Printing |
| SLA | Stereolithography |
| SCS | Solid Creation System |
| SGC | Solid Ground Curing |
| MJM | Multi-Jet Modeling |
| BPM | Ballistic Particle Manufacturing |
| PLA | Polylaktidové vlákno |
| ABS | Akrylonitrilbutadienstyren |
| HIPS | High-impact Polystyrene |
| SLM | Selective Laser Melting |
| MLSHM | Metal Laser Sintering Hybrid Milling |
| STL | Standard Triangle Language |
| PVA | Polyvinyl Alcohol |
| VRML | Virtual Reality Modeling Language |
| SVG | Scalable Vector Graphics |
| STEP | Standard for Exchange of Product model data |
| IGES | Initial Graphics Exchange Specification |
| R.A.M.B.O. | Rapid Additively Manufactured Ballistics Ordnance |
| PLY | Polygon File Format |

1 Úvod

3D tisk je poměrně nová technologie. V současnosti se stává velkým hitem a je používána v mnoha odvětvích. Díky němu se firmám daří urychlovat výrobu a vylepšovat vlastnosti vyráběných součástí. Jeho další výhodou je, že při tisku se využije jen potřebné množství materiálu a nevzniká žádný odpad. Jedná se o tvorbu trojrozměrných objektů pomocí digitálních modelů. Tisk probíhá nanášením jednotlivých vrstev materiálu až do dokončení požadovaného modelu. Při složitějších tvarech je zapotřebí navrhnout spolu s modelem i podpůrnou konstrukci. Pro 3D tisk se využívá nepřeberné množství materiálů. Nejčastěji se tiskne z plastu a kovu. Tisk pomocí 3D tiskáren je aditivní pochod. To znamená, že materiál se při něm přidává. Na rozdíl od obráběcích strojů, které materiál odebírají, než zůstane požadovaný výsledek. V této práci je popsána historie 3D tisku, jednotlivé metody a hlavně technologie pro tisk kovových součástí. U každé z nich jsou uvedeny výhody, nevýhody a použití. Představeny zde jsou i některé programy pro výrobu 3D modelů. V poslední kapitole je přiblíženo využití 3D tiskáren v gastronomii, výrobě zbraní, stavbě domů, zdravotnictví, strojírenství a automobilovém průmyslu. [1]

1.1 Historie 3D tisku

Historie 3D tisku se začala psát již ve 2. polovině 20. let. Přesně v roce 1986 získal Charles Hull patent na obor zvaný stereolitografie. V 90. letech minulého století byl vyvinut první stroj, který dokázal tisknout 3D technologií. Byl to stereolitografický aparát SLA-1. Bohužel kvůli vysoké pořizovací ceně byl veřejnosti nabídnut až model s označením SLA-250. Dominantní postavení v tomto oboru držela dlouho firma 3D Systems ve které působil již zmiňovaný Charles Hull. Tato firma dokázala prodat přes 600 přístrojů během roku 1996. Postupem času se začala objevovat konkurence a s ní i nové metody 3D tisku. Jednou z těchto metod byl tisk pomocí technologie zvané FDM (Fused Deposition Modeling). Další technologií, kterou si nechal patentovat Massachusettský technologický institut, byla metoda trojrozměrných tiskařských technik. Licenci k ní si poté zakoupila firma Z Corporation a začala s vývojem 3D tiskáren. Velký posun toto odvětví zaznamenalo v roce 2003, kdy vypršely některé patenty a objevilo se spoustu novinek. [2]

2 Cíle práce

Cílem této bakalářské práce je ukázat možnosti výroby modelů pomocí metod 3D tisku z různých materiálů. Největší pozornost je věnována především výrobě z kovů. V jednotlivých kapitolách jsou k popisovaným technologiím doplněny používané druhy materiálů a jejich fyzikální vlastnosti. Jsou zde také představeny 3D tiskárny s jejich technickými parametry. V závěru práce se nacházejí pracovní odvětví, ve kterých se můžeme setkat s 3D tiskem.

3 Metodika práce

Metodou psaní této bakalářské práce je literární rešerše. Vyhledáváním informací na toto téma je vytvořen ucelený přehled současné literatury, která se zabývá problematikou 3D tisku kovů. Informace zjištěné studiem nově rozvíjející se metody výroby modelů jsou sepsány do jednotlivých kapitol. Ke sběru informací jsou použity nejen knižní, ale i elektronické zdroje. V závěru práce je zmíněna Technická univerzita v Liberci, ve které se nachází Ústav pro nanomateriály a pokročilé technologie. Přínos bakalářské práce je zaznamenán v závěrečné kapitole.

4 Výroba prototypů

Prototypy se vyrábí z důvodu ověření vlastností navrhovaného produktu. Pomocí nich se kontrolují jejich rozměry, pevnost a pružnost. Lze je vyrábět ručně, nebo strojově. Hlavní nevýhodou těchto postupů je, že výroba probíhá odebráním materiálů z celistvého bloku až do požadovaného tvaru. Problémem těchto metod je, že při nepřesnosti výroby a odebrání více materiálu je celý model znehodnocen. Další možností je výroba prototypu pomocí CNC obráběcích strojů. Výhodou této metody je poměrně vysoká přesnost, ale naopak nevýhodou je, že každý polotovar, ze kterého vyrábíme náš prototyp, musí být upnutý ve sklíčidle. [1]

4.1 Rapid Prototyping („Rychlá výroba prototypů“)

„Pod výrazem Rapid Prototyping se skrývá skupina nových technologií použitelných na rychlou výrobu prototypů, zmenšených modelů, reálných dílů anebo dokonce celých funkčních sestav s využitím 3D modelů, navržených a připravených pomocí CAD systémů.“¹

Hlavním rozdílem mezi výrobou prototypu pomocí RP a klasickými technologiemi je způsob vytvoření konečného tvaru modelu. U RP je materiál po vrstvách přidáván až do finální podoby, ale u konvenčního obrábění je naopak odebírán z polotovaru do dosažení požadovaného tvaru.

Rozdělení podle materiálu použitého na výrobu modelu:

- 1) **Systémy RP na bázi pevných materiálů**
 - FDM (Fused Deposition Modeling)
 - LOM (Laminated Object Manufacturing)
 - PLT (Paper Lamination Technology)

¹ BENIAK, Juraj. *Systémy rapid prototyping*. 2014, s. 11. ISBN 978-80-227-4287-0.

U této skupiny systémů se používají skoro všechny materiály. Výjimku tvoří práškové materiály, pro které byla vytvořena samostatná skupina. Nejčastěji používané jsou zde dráty namotané na cívkách, materiály ve tvaru pelet, nebo filamenty, což jsou struny z různých druhů plastu.

2) Systémy RP na bázi práškových materiálů

- SLS (Selective Laser Sintering)
- DMLS (Direct Metal Laser Sintering)
- EBM (Electron Beam Melting)
- LENS (Laser Engineered Net Shaping)
- MJS (Multiphase Jet Solidification)
- 3DP (Three-Dimensional Printing)

Zvláštní skupina tvořená jen práškovými materiály. Ty mohou být z plastu, kovu, keramiky, nebo skla.

3) Systémy RP na bázi tekutých materiálů

- SLA (Stereolithography)
- SCS (Solid Creation System)
- SGC (Solid Ground Curing)
- MJM (Multi-Jet Modeling)
- BPM (Ballistic Particle Manufacturing)

V této skupině jsou využívány materiály, které jsou na počátku v kapalném stavu. Při vytváření modelu jsou vytvrzované a vznikne tuhé těleso. [1; 3]

4.2 Hlavní metody používané u Rapid Prototyping

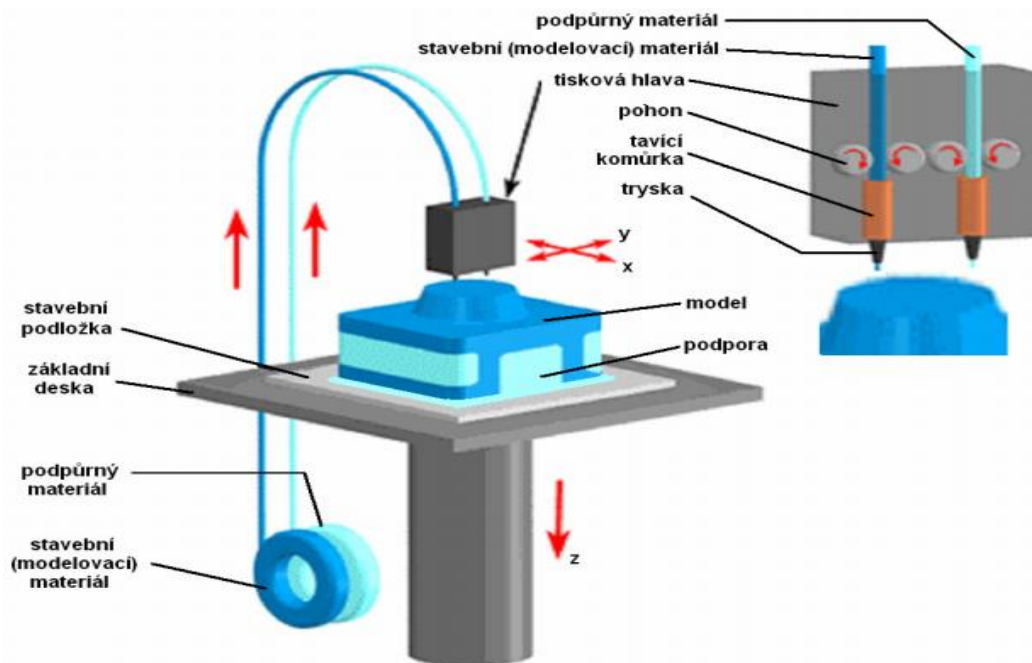
V současnosti existuje celá řada metod 3D tisku. Hlavní z nich jsou zde představeny.

4.2.1 FDM (Fused Deposition Modeling)

Poprvé se tato technologie objevila v roce 1989, kdy jí vyvinul Scott Cramp a patent byl udělen v USA roku 1992. Nejvíce se liší od ostatních tím, že u ní není použit laser, ale rozehřátý materiál je nanášen přímo tryskou ve vrstvách na vznikající model.

Tato metoda je jednou z nejpoužívanějších a to hlavně díky své jednoduchosti a také stále klesající ceně. Využívají se u ní dva druhy materiálů. Modelovací, ze kterého vzniká model a podpurný, který bývá použit u tvarově náročných modelů k jejich vyztužení. „Princip technologie FDM je založen na technologii povrchové energie, tepelné energie a výroby po vrstvách. Je známá svou spolehlivostí, odolnými částmi a vytlačováním tenkých čar roztaveného termoplastu, které tuhnou, když jsou nanášeny.“² [1; 4]

Obrázek 1 - Technologie 3D tisku FDM



Zdroj: <http://autoroad.cz/pictures/article/2013/09/13/1379070934-hdd.png>

Výhody FDM:

- Možnost vytvořit funkční model - hlavně při vývoji nových součástí
- Minimální odpad
- Nízká cena oproti ostatním technologiím 3D tisku
- Velké množství nabízených materiálů s různými vlastnostmi

² CHUA, Chee Kai a Kah Fai LEONG. *3D printing and additive manufacturing*. 2014, s. 135. ISBN 978-9814571418.

Nevýhody FDM

- Omezené vytváření detailů a omezená přesnost výroby
- Smršťování modelu [1]

Druhy podpůrných materiálů

- Základní (Basic)- jeho úkolem je jen plnit roli podpory modelu.
- Obklopující (Surround)- nachází se okolo celého modelu a využívá se především u modelů s jemnou strukturou, kde je vysoké riziko porušení.
- Strukturovaný (Sparse)- má menší hustotu než ostatní, využije se ho méně a tím se zkrátí čas výroby modelu.
- Odlamující (Break-away)- tento druh je určen k jednoduchému odstranění pomocí odlomení. [1]

Nejpoužívanější materiály

- PLA

Vyrábí se z kukuřičného, bramborového škrobu, nebo z cukrové třtiny. Mezi záporné vlastnosti tohoto materiálu řadíme pohlcování vlhkosti z okolí. Díky tomu může docházet k tvorbě bublin na povrchu modelu. Tisk probíhá při teplotě 185 – 235 °C. [5]

- ABS (Akrylonitrilbutadienstyren)

Jedná se o amorfní termoplastický polymer. Vyznačuje se svou odolností proti kyselinám a hydroxidům. Jeho teplota zpracování je přibližně 210-250 °C. Mezi jeho slabiny se řadí vyšší smrštitelnost, která dosahuje hodnoty až 0,7 %. K lepení ABS se nejčastěji používají akrylátová lepidla. Využívá se v automobilovém průmyslu, nebo v elektronice. Cena tohoto materiálu je 0,5 Kč/g. [6]

Porovnání PLA a ABS:

PLA je snadněji zpracovatelný materiál, ale má horší odolnost vůči teplotě než ABS. PLA výrobky disponují menší pružností, ale mají menší sklony k deformacím při chladnutí modelů. Výhodou ABS je snadné odstranění podpůrné konstrukce. [5]

Pro podpůrné konstrukce se používá PVA (Polyvinyl Alcohol). Druhým materiálem je HIPS (High-impact Polystyrene). Jeho hlavní výhodou jsou objemová stálost a možnost jeho lepení. [1]

4.2.2 LOM (Laminated Object Manufacturing)

Tuto technologii tisku přivedla na trh firma Helisys Inc. v roce 2000. Model se tvoří nanášením folie nejčastěji z plastu, nebo papíru. Ta je poté laminována a laserem ořezána na požadovaný tvar. Tloušťka nanášené vrstvy je dána tloušťkou materiálu. Příbuznou technologií této je PLT (Paper Lamination Technology). U toho typu 3D tisku se jako materiál využívá klasický papír. K dokonalému sjednocení jednotlivých vrstev naneseného materiálu slouží laminovací válec.

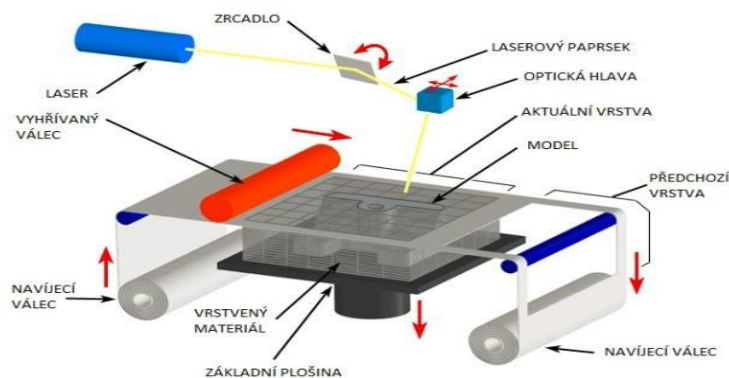
Výhody

- Vysoká rychlost výroby
- Nepoužívají se žádné podpůrné materiály
- Malé tepelné smršťování použitého materiálu

Nevýhody

- Velký odpad a jeho složité odstranění
- Vysoká hrubost povrchu vyrobeného modelu
- Tvorba tenkých stěn hlavně ve vertikálním směru [1; 4]

Obrázek 2 - Technologie 3D tisku LOM



Zdroj: <http://www.custompartnet.com/wu/images/rapid-prototyping/lom.png>

Tiskárna SD300 Pro

Tato tiskárna je určená pro tisk modelů z PVC metodou LOM.

Tabulka 1- Parametry tiskárny Solid SD 300 Pro

| | |
|-------------------------------|------------------------|
| Rozměry tiskárny [mm] | 465x770x420 |
| Hmotnost [kg] | 36 |
| Používaný materiál | PVC (PolyVinylChlorid) |
| Tloušťka nanášené vrstvy [mm] | 0,168 |
| Hraniční rozměr modelu [mm] | 160x210x135 |
| Přesnost ve směru x, y [mm] | 0,1 |

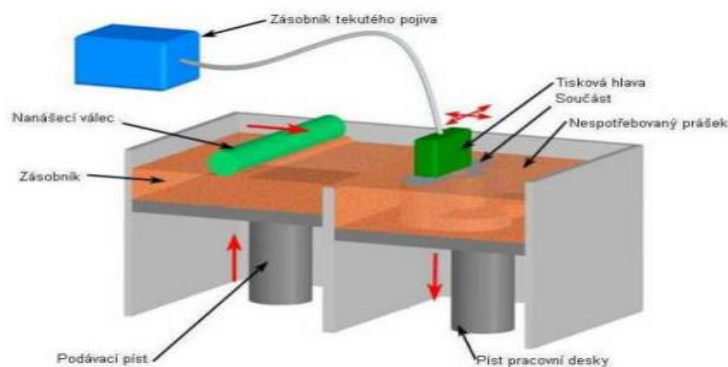
Zdroj: BENIAK, Juraj. Systémy rapid prototyping. Bratislava: STU, 2014, s. 45. ISBN 978-80-227-4287

4.2.3 3DP (3 Dimensional Printing)

Jedná se o podobnou technologii jako je obyčejný 2D tisk. Z ostatních technologií 3D tisku se nejvíce podobá technologii SLS (Selective Laser Sintering), ale na rozdíl od ní se nevyužívá laseru, ale lepidla, které je nanášeno pomocí hlavičky a spojuje práškový materiál.

Výroba modelu u metody 3DP je zhruba 10x rychlejší než u ostatních technologií a to s výrazně nižšími náklady. Používají se zde materiály na bázi sádky, škrabu a keramického prášku. [1]

Obrázek 3 - Technologie 3D tisku 3DP



Zdroj: <http://www.custompartnet.com/wu/images/rapid-prototyping/3dp.png>

Výhody:

- Vysoká rychlost výroby
- Snadné ovládání tisku
- Možnost výroby barevných modelů
- Možnost recyklace a znovu použití nespojeného prášku

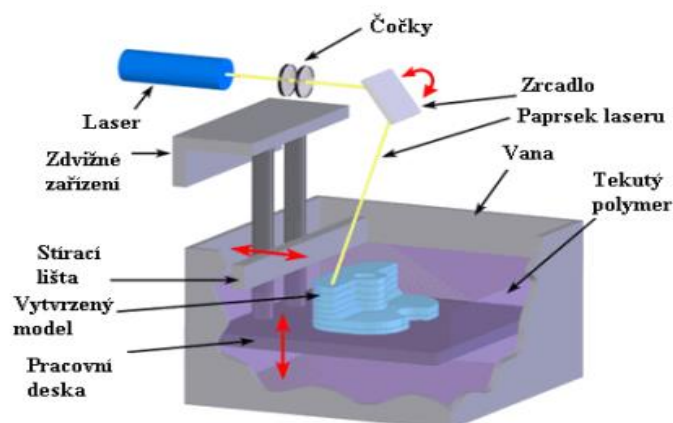
Nevýhody:

- Omezená životnost
- Nedokonalý konečný vzhled povrchu [1]

4.2.4 SLA (Stereolitography)

Jedná se o vůbec první metodu, která se objevila na trhu. Základem je působení ultrafialového laserového paprsku na tekutou fotopolymerickou pryskyřici a vznik modelu. Laser vytvrzuje tuto pryskyřici po vrstvách. Vždy po vytvrzení se platforma posune ve vertikálním směru. Poté se pro odstranění nečistot používá stírací lišta a pokračuje se další vrstvou. Slabinou je, že při tvorbě velkých a tvarově náročných modelů je potřeba používat podpory. Po dokončení tisku je model velmi křehký a je nutné jeho vytvrzení v peci, kde je ozařován ultrafialovým zářením. [1; 3; 7]

Obrázek 4 - Technologie 3D tisku SLA



Zdroj: <http://www.custompartnet.com/wu/images/rapid-prototyping/sla.png>

Výhody:

- Tuhé a trvanlivé modely
- Tenké stěny modelu
- Možnost tvorby velkých modelů s dobrými fyzikálními vlastnostmi

Nevýhody:

- U složitých modelů je potřeba podpůrných konstrukcí
- Po skončení tisku nutnost dalších úprav modelů
- Pomalé vytvrzování fotopolymeru [1; 4]

Tabulka 2 - Parametry tiskáren používaných u SLA

| | ProX 950 | ProJet 6000 HD |
|---------------------------------|------------------|-----------------|
| Pracovní prostor (x, y, z) [mm] | 1500 x 750 x 550 | 250 x 250 x 250 |
| Přesnost [mm] | 0,025-0,05 | 0,025-0,05 |
| Podporované vstupní formáty [-] | STL, SLC | STL, SLC |
| Hmotnost tiskárny [kg] | 1951 | 181 |
| Hlučnost [dB] | Do 70 | Do 65 |

Zdroje: <http://www.protocom.cz/projet-6000-hd>, <http://www.protocom.cz/prox-950>

Používané materiály u SLA

Jedná se o všechny polymery, které je možné vytvrdit laserovým paprskem.

Accura 25- epoxidová pryskyřice, která se nejčastěji používá pro výrobu dílů do interiéru automobilu a pro tvorbu hraček.

Accura Bluestone- nejpevnější nanokompozit současnosti pro tisk metodou SLA, který se využívá v automobilovém, leteckém a elektronickém průmyslu.

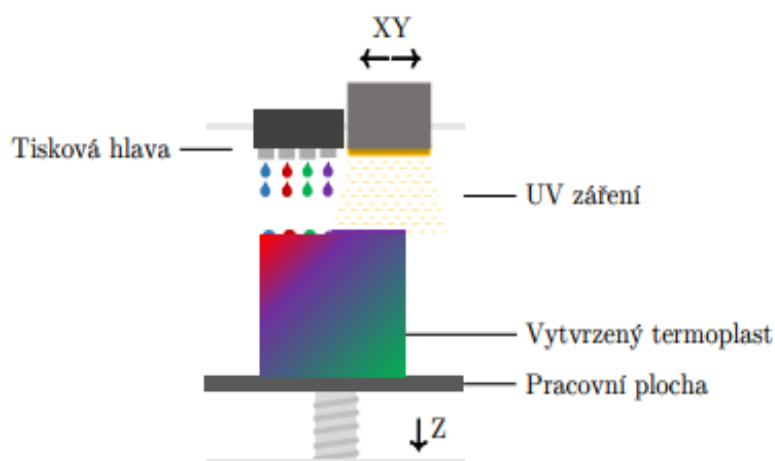
Dalšími používanými materiály jsou: Somos NeXt, Somos NanoTool, Accura Amethyst a mnoho dalších. [1; 8]

MJM (Multi-Jet Modeling System)

Jedná se o systém, kde v pracovní hlavici jsou umístěny trysky. Podle jejich počtu se odvíjí doba potřebná k výrobě modelu. Hlavice se pohybuje ve směru X a Y nad pracovní platformou, která se může pohybovat ve směru osy Z. [1]

„Podstata MJM je nanášení tekutého materiálu na vytváření modelu a podpůrného materiálu v tenkých vrstvách. První vrstva materiálu je nanášena na stavební platformu. Další vrstvy jsou nanášené na předchozí vrstvu. Nanášení materiálu je realizované pomocí drobných kapiček materiálu, které jsou vytlačené přes větší počet trysek, umístěných na pracovní hlavici.“³

Obrázek 5 - Technologie 3D tisku MJM



Zdroj: <http://www.custompartnet.com/wu/images/rapid-prototyping/inkjet-printing-small.png>

Výhody:

- Rychlá výroba modelů
- Nízkonákladová výroba modelů
- Efektivní a snadné použití

³ BENIAK, Juraj. *Systémy rapid prototyping*. 2014, s. 98. ISBN 978-80-227-4287-0.

Nevýhody:

- Nízký počet použitelných materiálů- využívají se jen VisiJet termopolymery od firmy 3D Systems.
- Malý výrobní prostor- tato technologie nabízí relativně malý prostor oproti ostatním metodám, proto se zaměřuje na tisk drobných modelů. Často je využívána v klenotnickém průmyslu. [1; 4]

Používané materiály pro MJM

- VisiJet Cristal

Jedná se o čirý plast. Používá se při vytváření prototypů. Díky své šetrnosti k životnímu prostředí se může používat na lékařské aplikace.

- VisiJet C4 Spectrum

Tento plast vyniká svojí vysokou pevností. Používá se k barevnému tisku.

- Dalšími používanými materiály jsou: VisiJet FTX Clear, VisiJet PearlStone, VisiJet M3 ProPlast [1; 9; 10]

4.2.5 BPM (Ballistic Particle Manufacturing)

V současnosti se tato metoda nepoužívá. U této technologie není potřeba podpůrných konstrukcí. Jako materiál jsou zde využity termoplasty. [1]

„Technologie využívá principu inkoustových tiskáren. Je založena na tlakovém nanášení materiálu (termoplastu) ve formě kapek a jejich následném vytvrzení. Nanášení materiálu je docíleno tím, že jednotlivé malé kapky materiálu jsou vystřelovány z tlakové hlavy na pracovní plochu, a tam bezprostředně po dopadu vytvrzeny.“⁴

⁴ BPM [online]. [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-10-dil.html>

4.3 Rapid Prototyping – Postup výroby 3D modelu

Výrobní proces 3D modelu se dělí do tří základních fází.

4.3.1 Preprocessing

Jedná se o fázi, která probíhá před samotným 3D tiskem. Jejím základním úkolem je zajištění 3D modelu objektu, který chceme tisknout. Pro jeho získání máme dvě možnosti. První varianta je, že námi požadovaný model už někdo vytvořil a můžeme ho stáhnout na internetu. Druhou možností je vlastní zhotovení modelu. Nejčastěji se používají programy CAD. Po vymodelování konečného tvaru je potřeba soubor převést do programu kompatibilního s 3D tiskárnou. Nejčastěji se jedná o formát STL (Standard Triangle Language). Dále musíme použít software, pomocí kterého vyrobený model nařezeme na jednotlivé vrstvy. Podle vytvořených vrstev bude 3D tiskárna nanášet materiál a modelovat požadovaný tvar. Podle potřeby navrheme podpory při požadovaných složitých tvarech modelu. Dalším krokem je vygenerování tzv. „G-kódu“. Jedná se o kód, ve kterém 3D tiskárna dokáže číst. Následně tento kód nahrajeme do 3D tiskárny.

4.3.2 Processing

V této fázi dochází k samotnému 3D tisku. Materiál je nanášen po definovaných vrstvách až do finální podoby vyráběného modelu. Podle požadavků na materiál tisknuté součástky a jejich rozměrů se volí nejvhodnější metoda 3D tisku.

4.3.3 Postprocessing

Tato poslední fáze nastává po dosažení požadovaného tvaru. Nejprve je potřeba model vyjmout z tiskárny a očistit od přebytečného materiálu. Některé technologie výroby vyžadují po dokončení tisku použití dodatečných úprav. Jednou z nejčastějších je vytvrzování modelu pomocí UV záření. Poté dochází k odstranění dočasných podpor. Dalšími prováděnými úpravami jsou přebrušování spár, lakování a u větších modelů lepení jednotlivých částí k sobě. [11; 12; 34]

5 3D tisk kovů

Tato technologie 3D tisku v současnosti zažívá raketový rozvoj. V posledních letech se dostává i na území České republiky, ale zatím se používá převážně k výrobě prototypů.

5.1 Obory ve kterých se vyskytuje 3D tisk kovů

- *„Automobilový průmysl – prototypová výroba se v současnosti rozšiřuje do sériové výroby (výroba komponentů motoru, karosérie, chladicích kanálů, nosných dílů, dílů vnitřního prostoru, atd.)*
- *Letecký průmysl – technologie je již využívána pro opravy a sériovou výrobu (výroba odlehčených součástí (úspora hmotnosti = úspora paliva) jako jsou lopatky turbín motorů, části palivových systémů, atd.)*
- *Výroba forem – vytvoření chladicích kanálů, které kopírují tvar vylisku, a proto je větší následná produktivita výroby, delší životnost formy a nižší zmetkovitost.*
- *Zdravotnictví – výroba vysoce kvalitních zubních komponent (korunek, šroubů, můstků), kostních náhrad, netypických prototypů implantátů a nástrojů.*
- *Umělecké obory – využití v průmyslových oborech jako je architektura, šperkařství a zábavní průmysl díky novým možnostem designu“⁵*

5.2 Technologie 3D tisku kovu

Existuje několik používaných technologií. Od sebe se liší jen v detailech a nejčastěji využívaným materiálem jsou kovové prášky.

Používané technologie

- SLS (Selective Laser Sintering) a DMLS (Direct Metal Laser Sintering)
- EBM (Electron Beam Melting)
- LENS (Laser Engineered Net Shaping)
- SLM (Selective Laser Melting)

⁵ *Obory 3D tisku kovů* [online]. [cit. 2018-03-03]. Dostupné z: <http://www.lascam.cz/technologie-3d-tisku-kovu-2/>

Technologie DMLS a LENS používají k tisku laserový paprsek a EBM elektronový. [1; 13]

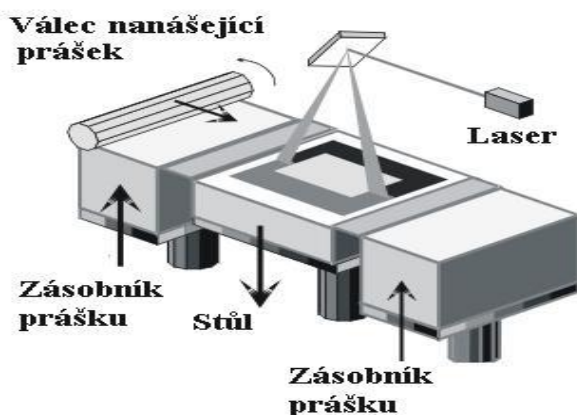
5.2.1 SLS (Selective Laser Sintering)

Pro tuto technologii existuje české označení selektivní spékání laserem. Vyvinuli ji vědci z univerzity v Austinu a poté si založili firmu DTM. Model vzniká roztavením prášků různých druhů a složení. Při tvorbě modelů rozlišujeme dvě varianty. První možností je nanesení materiálu po celé stavěcí ploše. Následně paprsek laseru spojí jen ten, ze kterého bude vznikat model. Zbylý nespojený prášek je použit jako podpůrná konstrukce.

Druhou variantou jsou 3D tiskárny, jejichž tiskové hlavy jsou opatřeny výstupem materiálu i laseru. Prášek se vypouští jen v místech, kde ho potřebujeme pro tvorbu modelu.

„V pracovní komoře je stálá teplota jen o něco nižší než je teplota tavení práškového materiálu, takže laser může lehce dodat potřebnou energii na roztavení prášku. Zrna prášku nejsou roztavené úplně, ale jen se natavuje jejich povrch a to značně urychluje celý proces výroby modelu.“⁶ [1]

Obrázek 6 - Technologie 3D tisku SLS



Zdroj: <http://www.14220.cz/technologie/3d-tisk-metody/>

⁶BENIAK, Juraj. *Systémy rapid prototyping*. 2014, s. 53. ISBN 978-80-227-4287-0.

Tabulka 3 - Parametry tiskáren SLS

| | | |
|--|---------------------|-----------------|
| Model tiskárny | ProX 500 | sPro 230 |
| Výkon laseru [W] | 100 | 200 |
| Tloušťka vrstvy [mm] | 0,08-0,15 | 0,08-0,15 |
| Rychlost skenování [m/s] | 12,7 výplň, 5 obrys | 15 |
| Rychlost stavby modelu [l/h] | 2 | 5 |
| Max. tisknutelné rozměry (x, y, z) [mm] | 381 x 330 x 457 | 550 x 550 x 750 |

Zdroj: BENIAK, Juraj. Systémy rapid prototyping. 2014, s. 56. ISBN 978-80-227-4287-0.

Používané materiály u tiskáren 3D Systems

Nejčastěji se používají několika složkové prášky. Při použití jednosložkových zůstává jádro pevné a natavují se jen prachové částice. Nejčastější použité druhy materiály jsou polymery a kovy.

CastForm

Jedná se o plast na bázi styrénu. Nejčastěji se používá pro výrobu modelů pro slévárství. Slouží při odlévání materiálů s nízkou teplotou tavení jako je zinek, hliník.

DuraForm

Trvanlivý termoplast sloužící k výrobě odolných prototypů a součástek pro přímé použití v praxi. Jsou z něho vyráběny díly pro motorový a letecký průmysl.

DuraForm HST Composite

Tento materiál má vysokou pevnost a výbornou odolnost vůči teple. Využívá se v leteckém průmyslu a při výrobě sportovních potřeb. Jeho pevnost v tahu dosahuje v horizontálním směru až 51 MPa a ohybový modul ve stejném směru až 4550 MPa. [1; 8]

Výhody SLS:

- Velký výběr materiálů

- Není potřeba podpůrných konstrukcí- bez potřeby návrhu a následného odstranění podpůrné konstrukce klesá potřebný čas k výrobě modelu.
- Není zapotřebí dodatečného vytvrzování modelu- slinutý materiál pomocí laseru je dost pevný a nepotřebuje další vytvrzení.

Nevýhody SLS:

- Vysoká spotřeba energie- z důvodu velkého výkonu laseru, který je nutný ke spečení částic kovového materiálu.
- Horší kvalita povrchu modelů- stává se to v důsledku používání kovových prášků s větším rozměrem jejich zrn.
- Velká velikost 3D tiskárny- tiskárna vyžaduje velký prostor pro její uložení, a také je potřeba v blízkosti tiskárny umístit zásobníky s inertním plynem, které jsou nutné při každém tisku modelu touto metodou. [4]

5.2.2 DMLS (Direct Metal Laser Sintering)

Poprvé se objevila na trhu v roce 1995. Technologie velice podobná jako SLS. Model je tvořen postupným vrstvením kovového prášku, který je pomocí laseru taven a spojován. Neroztavený prášek, který zůstane na platformě, plní roli podpůrné konstrukce a po zhotovení modelu může být znovu použit při dalším tisku. Takto můžeme opakovaně využít až 98% prášku. Díky tomu je DMLS ekonomické a zároveň šetrné k přírodě. Po dokončení 3D tisku následuje vyjmutí hotového modelu a odstranění podpůrných konstrukcí. Po očištění hotové součástky navazují další operace jako broušení, leštění, nebo tryskání. [1; 14]

Používané materiály

- **Slitina hliníku:** Označuje se $AlSi_{10}Mg$. Vyznačuje se dobrými tepelnými vlastnostmi. Využívá se na velmi zatěžované součástky. Tloušťka používané vrstvy je 0,03- 0,1 mm.
- **Slitina titanu:** Označuje se $TiAl_6V_4$. V současné době je nejpoužívanějším materiálem u této metody 3D tisku. Díky dobrým mechanickým vlastnostem je využíván při testování a výrobě letadel. Tloušťka používané vrstvy 0,03- 0,06 mm.

- **Nerezová ocel:** Označuje se 316L. Vysoká odolnost proti podléhání korozi. Využívá se ve zlatnictví a potravinářství. Tloušťka používané vrstvy 0,03- 0,1 mm. [15; 1]

Obrázek 7- Výrobek pomocí DMLS



Zdroj: <https://www.konstrukter.cz/2015/03/09/jak-funguje-3d-tisk-metodou-direct-metal-laser-sintering/>

Využití DMLS

Hlavní výhodou této technologie je možnost tvořit tvarově složité modely. DMLS se využívá k výrobě prototypů, ale také součástek pro konečné využití. Čím je tvar tištěné součástky složitější, tím je tento proces ekonomičtější. Pomocí této metody je možné vytvářet složité modely v jednom kuse, i když u ostatních technologií se takový výrobek musí tisknout na několik dílů. Tento fakt s sebou přináší snížení nákladů na výrobu a zkrácení doby tisku. Tato metoda není vhodná pro velkovýrobu, ale dají se pomocí ní vytvářet přesné modely podle požadavků zákazníka. [14]

Tabulka 4 - Parametry tiskárny EOSINT M280

| | |
|--------------------------|----------------|
| Pracovní prostor [mm] | 250 x 250 x325 |
| Typ laseru [-] | vláknový |
| Rychlost skenování [m/s] | 7 |
| Hmotnost tiskárny [kg] | 1,25 |
| Výkon laseru [W] | 200-400 |

Zdroj: BENIAK, Juraj. *Systémy rapid prototyping*. Bratislava: STU, 2014, s. 60. ISBN 978-80-227-4287

5.2.3 EBM (Electron Beam Melting)

Poprvé se na trhu objevila v roce 1997 zásluhou firmy Arcam. Liší se od předchozích technologií SLS a DMLS způsobem tavení materiálu. U EBM je použit elektronový paprsek, ale u SLS (DMLS) laserový paprsek. Využívá se k vytváření prototypů i součástek pro konečné využití. Elektronový paprsek je velmi výkonný a celkově je tato technologie považována za jednu z lacinějších na dnešním trhu. [1]

Výhody:

- Vysoká pevnost vzniklých modelů
- Rychlá výstavba modelů
- Nízké odchylky od požadovaných rozměrů modelu
- Vysoce kvalitní povrchová úprava

Nevýhody:

- Vysoká spotřeba energie
- Během tisku vyzařuje gama paprsky
- Potřeba stále udržovat vakuum při tisku

Materiály používané pro EBM

- **Slitina titanu (TiAl₆V₄)** : Stejný materiál, který se používá u technologie DMLS a již byly popsány jeho vlastnosti.
- **Slitina kobaltu (F75 CoCr)** : Zajišťuje vysoce kvalitní povrch vyrobeného modelu. Vyniká hlavně svojí tvrdostí a také nepodléhá korozi. [1; 4]

5.2.4 LENS (Laser Engineered Net Shaping)

„Proces výroby modelu začíná nasměrováním laserového paprsku na kovový prášek, nacházející se na pohybující stavební platformě, kde dochází k roztavení tohoto kovového materiálu. Poté je další kovový prášek pomocí inertního plynu, kterým je nejčastěji argon, směřován do tohoto místa pomocí dýz, kde působením laseru vzniká roztavený materiál.“⁷ Po opuštění místa, které bylo taveno laserem, materiál tuhne. Opakováním tohoto popsaného procesu vzniká požadovaný model.

Tato metoda je vhodná k opravě poškozených výrobků. Hlavní výhodou opravy je o poznání nižší cena, než kdyby byl potřeba koupit zcela nový produkt. [1]

Tabulka 5 - Technické parametry tiskárny LENS MR-7

| | |
|--------------------------|---------------------------------|
| Pracovní prostor [mm] | 300 x 300 x 300 |
| Výkon laseru [W] | 500 – možnost vylepšení na 1000 |
| Ovládání [-] | 3 osy |
| Ukládání materiálu [g/h] | 100 |
| Rychlost pohybu [mm/s] | 60 |
| Přesnost polohy [mm] | 0,25 |

Zdroj: <https://www.aniwaa.com/product/3d-printers/optomec-lens-mr-7/>

Tato tiskárna se v současnosti prodává za \$250.000.

Materiály pro LENS

Mohou se využívat všechny druhy kovových prášků. Firma Optomec vyrábí materiály přímo vyvinuté pro tuto metodu.

⁷ BENIAK, Juraj. *Systémy rapid prototyping*. 2014, s. 69. ISBN 978-80-227-4287-0.

Tabulka 6 - Porovnání materiálů vyrobených pro LENS a vyrobených klasicky

| Druh Materiálu | Mez pevnosti v tahu [MPa] | Mez kluzu [MPa] | Poměrné prodloužení [%] |
|----------------------------------|---------------------------|-----------------|-------------------------|
| LENS 316 nerezová ocel | 799 | 500 | 50 |
| 316 SS žíhaná | 591 | 243 | 50 |
| LENS Inconel 625 | 938 | 584 | 38 |
| IN 625 žíhaná | 841 | 403 | 30 |
| LENS Ti-6Al-4V | 1077 | 973 | 11 |
| Ti-6Al-4V | 973 | 834 | 10 |

Zdroj: <https://www.optomec.com/3d-printed-metals/lens-materials/>

Výhody

- Používání směsí materiálů- je možné smíchat několik druhů práškových materiálů k dosažení požadovaných vlastností modelu.
- Nízká cena používaných kovových prášků
- Vysoká rychlost nanášení materiálu (až 1 kg/hod)

Nevýhody

- Nízká rozměrová přesnost- kvůli většímu laserem tavenému prostoru než u ostatních metod 3D tisku.
- Geometrická složitost modelů- v porovnání s ostatními práškovými metodami nelze vyrábět tak složité tvary modelů [4]

5.2.5 SLM (Selective Laser Melting)

Tato technologie slouží k výrobě prototypů i modelů pro konečné využití. Výroba modelu probíhá v ochranné atmosféře. Práškový materiál je postupně nanášen a taven laserovým paprskem, který je řízen pomocí optických čoček. [16]

Výhody

- Rozměrově přesné modely- pracuje s vysokým rozlišením, laser produkuje nízké teplo a nedochází ke zkroucení modelů.
- Možnost tisku tvarově složitých modelů.
- Velký výběr použitelných materiálů- při této technologii se používá ocel, titan, hliník, kobalt-chrom, různé neželezné kovy a zlato.

Nevýhody

- Vysoká spotřeba energie- z důvodu velkého výkonu laseru potřebného ke slinutí kovových prášků.
- Velké rozměry tiskárny- nutný velký prostor pro uložení tiskárny.
- Relativně pomalý proces 3D tisku- v porovnání s ostatními metodami dosahuje nanášení materiálu jen 70 cm³/h. [4]

Tiskárna SLM 280HL

Tuto tiskárnu vlastní VUT Liberec.

Tabulka 7 - Parametry SLM 280HL

| | |
|---|--------------------|
| Pracovní prostor [mm] | 280 x 280 x 365 |
| Rychlost výroby modelu [cm ³ /h] | 88 |
| Tloušťka nanášené vrstvy [μm] | 20-75 |
| Maximální rychlost skenování [m/s] | 10 |
| Spotřeba inertního plynu při tisku [l/min] | 2,5 (argon) |
| Rozměry tiskárny [mm] | 2600 x 1200 x 2700 |

Zdroj: <https://slm-solutions.com/products/machines/selective-laser-melting-machine-slmr280-20>

Materiály používané v tiskárně SLM 280 HL :

- Slitiny hliníku: AlSi₁₂, AlSi₇Mg
- Nerezové oceli: 1.4404, 1.4540
- Oceli nástrojové: 1.2344

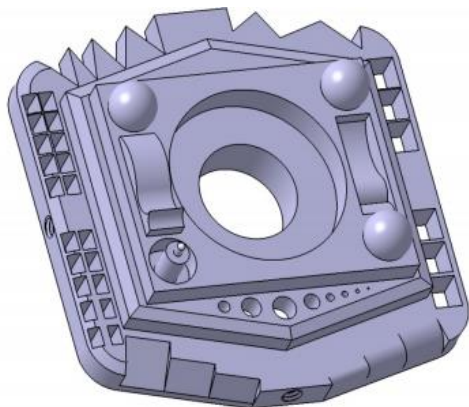
- Titanové slitiny: TiAl₆V₄, Ti₆Al₇Nb
- Kobalt-Chrom
- Materiály na bázi niklu: Inconel 718, Inconel 625, Inconel 939

Všechny tyto materiály se používají v práškové formě.

Model z 3D tiskárny 280 HL

Tento model byl vytvořen na VUT v Liberci pomocí technologie SLM. [17]

Obrázek 8 - Model a skutečný testovací díl



Zdroj: https://www.slideshare.net/technologyfuture/petr-keller-tuv-3d-tisk-z-kovovch-materil-technologyfuture-2016?from_action=save

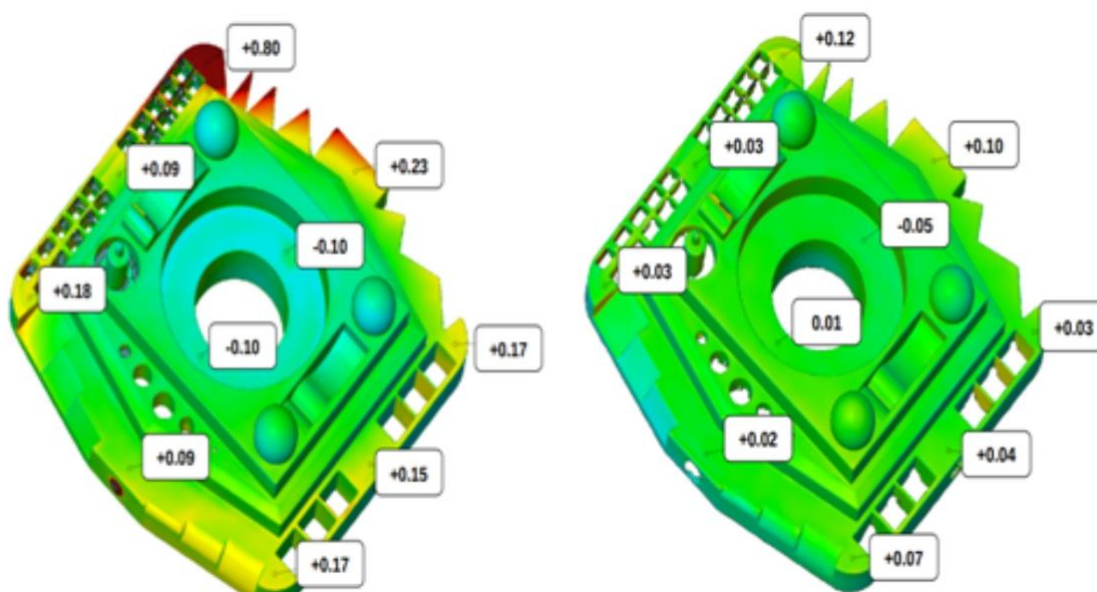
Tabulka 8 - Parametry vytisknutého modelu

| | |
|---------------------------------------|----------------|
| Rozměry modelu [mm] | 100 x 100 x 28 |
| Materiál [-] | AlSi12 |
| Hmotnost dílu [g] | Přibližně 200 |
| Spotřeba materiálu včetně podpor [g] | Přibližně 280 |
| Doba stavby [h] | Přibližně 8,5 |
| Cena použitého materiálu [Kč bez DPH] | 560 |
| Celkové náklady na tisk [Kč bez DPH] | 11 200 |

Zdroj: https://www.slideshare.net/technologyfuture/petr-keller-tuv-3d-tisk-z-kovovch-materil-technologyfuture-2016?from_action=save

Po dokončení tisku byl model vyjmut z 3D tiskárny. Jeho povrch byl očištěn od zbytků prášku a dalších nečistot. Poté byl přeměřen s přesností na setiny milimetru. Pro zpřesnění rozměrů modelu se využilo žihání, které probíhalo po dobu zhruba 10 h, a následně byl znovu přeměřen. Zjistilo se, že došlo ke zvýšení přesnosti testovacího dílu a maximální rozměrová odchylka je nyní +0,12 mm. [17]

Obrázek 9 - Přesnost testovacího dílu před a po žihání



Zdroj: https://www.slideshare.net/technologyfuture/petr-keller-tuv-3d-tisk-z-kovovch-materil-technologyfuture-2016?from_action=save

5.3 Hybridní technologie

Jedná se o metody, u kterých je při jednom procesu využíváno více technologií. Využívá se obrábění společně s 3D tiskem.

5.3.1 MLSHM (Metal Laser Sintering Hybrid Milling)

Na trhu se objevuje hybridní 3D tiskárna s názvem Lumex Advance od firmy Matsuura. Uvnitř pracuje 3D tisk technologií MLS (Metal Laser Sintering) a také vysokorychlostní obrábění HSM. Firma vyrábí 2 modely tiskárny, které se od sebe liší prostorem pro tisk. Prvním je Lumex Advance25 s prostorem 256 x 256 x 185 mm a druhým Lumex Advance 60 s tisknutelnými rozměry 600 x 600 x 500 mm. Tisk probíhá v ochranné atmosféře.

Parametry 3D tisku

Metoda 3D tisku MLS již byla popsána výše. V hybridních tiskárnách se volí tloušťka nanášené vrstvy nejčastěji 0,05 mm. Volbou této tloušťky můžeme ovlivňovat rychlost tisku, strukturu materiálu a další jeho vlastnosti. Důležitým faktorem MLS je laserový paprsek. U hybridních technologií se používá vláknový.

Parametry vysokorychlostního obrábění

Stroj je vybaven vřetenem, které se může otáčet rychlostí až 4500 ot/min^{-1} . Dalším vybavením je upínání, zásobník nástrojů až s 20 pozicemi, nástrojová sonda, pracovní pohony a posuvy. Stroj je ovládán pomocí speciálního softwaru od firmy Maturaa, který dovoluje kombinovat 3D tisk a obrábění v jednom stroji. Díky tomu vyrobené modely dosahují přesnosti až 0,025 mm a mají kvalitu povrchu minimálně Rz 10. [18]

Materiály pro MLSHM

- Uhlíkové slitiny
- Titanové slitiny
- Nerezové oceli
- Niklové slitiny
- Hliníkové slitiny

Využití MLSHM

Nejčastěji se tato hybridní technologie využívá k výrobě forem. U takového návrhu má konstruktér velký počet možností umístění chladících kanálků. Výhodou je, že se formy nemusí dělit na mnoho dílů. Při takovéto výrobě na jednom stroji dochází k úspoře materiálu i času. [18]

5.4 Programy pro výrobu 3D modelů

V současnosti je na trhu nepřehledné množství programů pro výrobu modelů ve 3D.

2 principy činnosti programů pro výrobu 3D modelů:

- Polygonální navrhování – jedná se o navrhování, u kterého je definovaný jen plášť tělesa. Ten je složen z trojúhelníků. Nejčastěji používaným formátem je STL.
- Parametrické navrhování – u tohoto typu navrhování volíme požadované vlastnosti modelu pomocí parametrů. [11]

5.5 Základní programy pro výrobu 3D modelu

Pro přestavení jsou zde čtyři programy:

- Tinkercad – pro začátečníky
- Meshmixer – pro středně pokročilé
- 123D- pro začátečníky
- Fusion 360 – pro pokročilé

5.5.1 Tinkercad

Jedná se o jeden z nejjednodušších programů pro začátečníky. Je produktem firmy Autodesk. Velkou výhodou je, že je zdarma. Pro její používání stačí mít založený účet. Práce s tímto programem probíhá online v internetovém prohlížeči bez nutnosti stažení. Po přihlášení již můžeme začít vytvářet návrh 3D modelu. Po dokončení stačí zvolit možnost export a stáhnout si soubor ve formátu STL. [11]

5.5.2 Meshmixer

Jedná se o další produkt od firmy Autodesk. Stejně jako již zmíněný Tinkercad je bezplatný. Nevýhodou je nutnost stažení do počítače. V současné době již vyšly 3 generace tohoto programu. Nejnovější verze Meshmixer 3 dokáže tvořit modely složené z několika materiálů. Nově je možné model exportovat i ve formátu SVG. V tomto programu lze také navrhovat podpůrné konstrukce a obsahuje přes 80 dostupných nástrojů. Výhodou je schopnost programu pracovat s povrchem modelu složeným z trojúhelníků. Ten se objevuje nejčastěji u formátu STL. [19; 11]

5.5.3 123D

Tento název označuje sadu aplikací od firmy Autodesk. Využívána je především malými konstruktéry. Jednotlivé aplikace jsou dostupné pro počítače, ale i pro mobilní telefony. Pro všechny jsou zcela bezplatné. V posledních letech je 123D nahrazován programy Fusion 360, TinkerCad, ReCap photo, ale stále má řadu uživatelů, kteří na tento balíček aplikací nedají dopustit.

Do této sady patří:

- 123D Make- program pomocí kterého dochází k rozdělení modelu na jednotlivé vrstvy využívané při 3D tisku.
- 123D Catch- aplikace pro tvorbu 3D modelů pomocí série fotografií nafocených z různých úhlů.
- Dále do ní patří- 123D Scuplt+, 123d Creature, 123D Circuits, 123D Design [20]

5.5.4 Fusion 360

Jedná se již o složitější program od společnosti Autodesk. Dokáže vytvářet tvarově složité modely. Pro studenty je zcela zdarma. Poplatkům za používání tohoto softwaru podléhají jen firmy s ročním obratem přesahujícím 100,000 USD/rok. Existují dva druhy Fusion 360. Standart je v ČR za poplatek 6300 Kč/rok a Ultimate za 35000 Kč/rok. U verze Ultimate je navíc k dispozici funkce pro pokročilé simulace, a také pro pokročilou výrobu. Pomocí těchto funkcí je možné provádět simulace nelineárního zatížení, vzpěru a analýzu šroubového spoje. V současné době je díky příznivé ceně jedním z nejpoužívanějších. Program Fusion 360 dokáže provádět návrh modelu polygonálně i parametricky. U polygonálního návrhu využívá formát STL a u parametrického STEP a IGES. [11; 21; 22]

5.6 Formát STL (Standart Transform Language)

V současnosti se jedná o nejpoužívanější formát pro tisk pomocí metod 3D tisku. Téměř všechny programy jsou schopné exportovat vymodelovaný objekt v tomto formátu. Takovýto soubor poté obsahuje informace pouze o povrchu modelu. Ten je vytvořen pomocí trojúhelníků, kde každý z nich má své souřadnice.

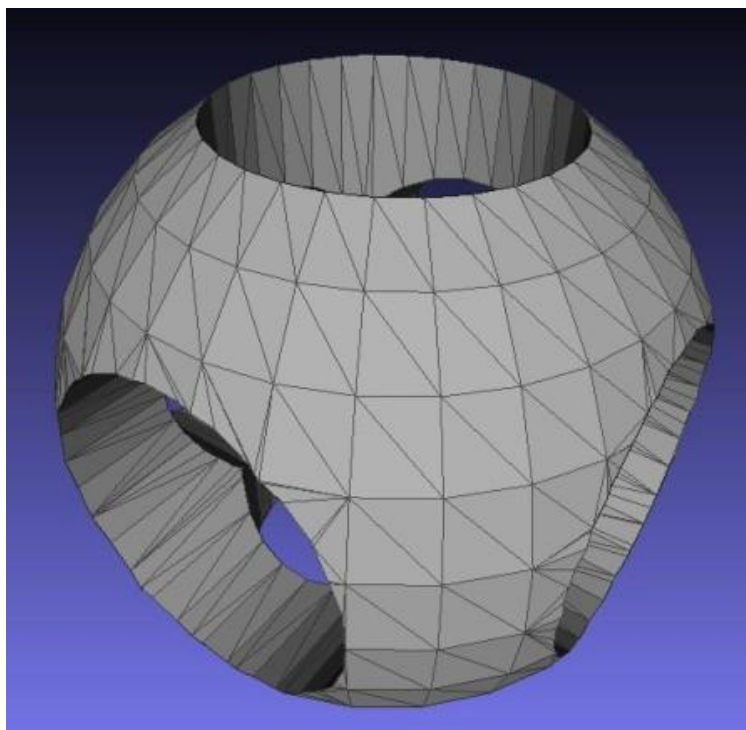
Další možností jak získat tuto trojúhelníkovou síť je naskenovat skutečný objekt. Počet trojúhelníků volíme podle požadavku na výslednou přesnost vyráběné součásti. Nevýhodou tvarově složitého a přesného modelu je rychle narůstající velikost STL souboru. Rozlišujeme dva druhy STL souborů. Jednodušší je binární soubor, který je využíván častěji a druhou variantou je soubor ASCII. [1; 34]

5.7 Další formáty pro 3D tisk

V praxi existuje kromě nejpoužívanějšího STL formátu celá řada jiných.

- OBJ – datový formát
- VRML (Virtual Reality Modeling Language) – grafický formát
- PLY (Polygon File Format) – počítačový formát
- FBX – má binární i ASCII verzi a tím se podobá STL [1]

Obrázek 10- STL formát



Zdroj: <http://www.freethoughtdesigns.com/editing-stl-files-with-cad-software-is-difficult/>

6 Využití 3D tisku

Při současné velké popularitě 3D tisku se objevují projekty v mnoha odvětvích.

- Gastronomie
- Stavba budov
- 3D tisk zbraní
- Zdravotnictví
- Strojírenství
- Automobilový průmysl

6.1 3D tisk v gastronomii

V dnešní době se začíná objevovat využití 3D tiskáren i v gastronomii. Lidé si tím ulehčují práci. Velmi dobře se dá využít k tvorbě různých modelů z čokolády, kdy je materiál nanášen pomocí trysek.

V loňském roce se uskutečnil v Londýně týdenní projekt, kdy velmi známí šéfkuchaři Joel Castanye a Mateu Blanch otevřeli restauraci, kde se jídlo tvořilo pomocí 3D tisku. A nejen to v restauraci byl vytištěný i nábytek a nádobí, na kterém se servírovalo jídlo. 3D tisk obstarala tiskárna od firmy Flow, která dokáže vytisknout jakýkoliv pokrm z pasty. Otevřeno bylo jen jeden týden s denní kapacitou 10 zákazníků. Servírovalo se menu složené z 9 chodů, které vyšlo na 6 tisíc korun. [1; 23]

Obrázek 11 - využití 3D tisku v gastronomii



Zdroj: <https://www.novinky.cz/muzi/410110-3d-tiskarny-se-uz-dostaly-i-do-gastronomie-a-vypadato-bozsky.html>

6.2 3D stavba budov

3D tisk se rozvíjí vysokou rychlostí v různých odvětvích a stejně tomu je i ve stavitelství. Již samozřejmostí je, že architekt vytvoří v počítačovém programu model navrhovaného domu a ten poté pomocí 3D tiskárny vytiskne. Výhodou takto vytvořeného modelu je možnost rychlých úprav jeho vzhledu. Při stavbě budov se využívají tiskárny pracující technologií FDM. Nejznámější firmou zabývající se 3D tiskem budov je šanghajská firma WinSun. Ve svých počátcích se zabývala výrobou nábytku pomocí 3D tiskáren. Pro obrovský zájem pokračuje ve vývoji tisku pro celé budovy. Na jejich stavbu využívá směs cementu, oceli, skelných vláken a nejvíce stavební suti. V současnosti tato firma již vyrobila řadu budov. Všechny hotové stavby se nacházejí v prostorách firmy, kde si je může každý prohlédnout. Největším dílem společnosti je zatím pětipodlažní činžovní dům. Nejpropracovanější je vila, která vznikla podle skutečného francouzského sídla. Její stavba pomocí 3D tisku vyšla zhruba na čtyři miliony korun. Domy jsou tištěné vcelku, ale jen jako skořepiny nosných stěn. Dále se musí vyztužit a dokončit pomocí klasických metod. Stavba budov pomocí 3D technologie je oproti stávajícím postupům šetrnější k přírodě. Také pro firmy má výhody v podobě úspory financí o 20-25 %, materiálu o 25-30 % a v ceně práce 45-55 %. [24; 1]

6.2.1 Contour Crafting

Jedná se o projekt vedený profesorem Knoshnevisem. Jeho cílem je sestavit obrovskou 3D tiskárnu, která by dokázala vytisknout celý dům i s rozvody v jednom kuse. Použitím této technologie by bylo možné vytisknout až 2000 m² obrysových konstrukcí za jeden den. Vysokou rychlostí stavby objektu by se rapidně snížily náklady na stavební projekt, který v současnosti může trvat i více jak 6 měsíců. Pro stavbu by nebylo potřeba vysoké manuální síly a stavby by se mohli účastnit ženy i starší lidé. Myšlenkou tohoto projektu také je, že by se takto postavených domů mohlo využít pro lidi, kteří o svůj dům přijdou při přírodních katastrofách. Díky vysoké výrobní rychlosti by pro ně byli připravené v krátkém čase. Další výhodou je, že při 3D tisku domu nevzniká žádný odpad. [25]

Obrázek 12 - Projekt Contour Crafting



Zdroj: <http://contourcrafting.com/building-construction/>

6.3 3D tisk zbraní

Pomocí 3D tisku je již dnes možné tisknout zbraně. První funkční zbraň byla vytvořená v roce 2013. Vyrobila jí nezisková společnost Defense Distributed. Tento model byl nazvaný Liberator (osvoboditel). Skládá se z 16 dílů. Všechny její části jsou vyrobeny metodou 3D tisku. Jedinou výjimku tvoří úderník této zbraně a používané náboje. Její první úspěšné testy proběhly v blízkosti města Austin. Jedním z omezení je nutnost použití slabších kalibrů nábojů. Pro silné střelivo zatím není hlaveň dostatečně pevná a hrozí její roztržení. Firma Defense Distributed vlastní povolení na výrobu zbraní. Její povinností je do každého modelu zabudovat kovovou část, aby nedocházelo k jejímu zneužívání. Bez tohoto opatření by detektor kovu nebyl schopen ji nalézt. Cena takto vyrobené zbraně se pohybuje okolo 150 tisíc CZK, proto je stále výhodnější si pořídit klasickou zbraň. Problémem tisku této zbraně je, že její model je volně k dostání na internetu, kde ho může kdokoli zneužít a vytvořit si funkční zbraň. [26]

6.3.1 3D granátomet

Americká armáda představila tento granátomet jako variantu využití 3D technologií pro vojenské účely. Jedná se o napodobeninu modelu M203. Projekt jeho výroby je označován R.A.M.B.O. (Rapid Additively Manufactured Ballistics Ordnance). Jeho tisk probíhá pomocí metody FDM.

Na výrobu spouště a úderníku je použita ocel typu 4340 a k výrobě granátů hliníkový prášek. Slabinou tisku této zbraně je prozatím dlouhá doba výroby. Pro vytvoření jednoho modelu je potřeba 70 hodin tisku a dalších 5 hodin dodatečných úprav. [27]

6.4 3D tisk ve zdravotnictví

V současné době 3D tisk proniká i do tohoto odvětví. Nejvíce se zkouší tisk nejrůznějších protéz. Velice zajímavý případ se stal v roce 2013, kdy se Angličanovi Paulu McCarthymu narodil postižený syn. Paulovi se podařilo vyrobit jen s internetovým návodem protézu, která synovi velmi ulehčila život. Jeho dítěti chyběly od narození prsty u jedné ruky. Velmi často vyráběnou pomůckou je naslouchadlo. Aktuálně by pomocí 3D tisku mělo být vyrobeno 10 milionů kusů. Z ekonomického hlediska je velice pozitivní 3D tisk očních protéz. Při stejné výrobní kvalitě je dosahováno zhruba 60x nižší ceny než u ruční výroby. Dalším využitím ve zdravotnictví je výroba náhrad kostí po úrazech. Velkou výhodou zde je, že je možné vyrobit náhradu s vysokou přesností a z různých materiálů, aby pacientovi vyhovovala. Největší zdravotní zákrok v této oblasti se stal v roce 2013, kdy se podařilo pacientovi pomocí 3D technologie nahradit 75% lebky. Navíc byl použit materiál, který podporoval růst tkání a pacientovi velice pomohl. Dalším úspěšným zákrokem bylo nahrazení pánve za protézu vyrobenou pomocí 3D tisku pacientovi, který o tu svou přišel kvůli rakovině. V budoucnosti by mělo být možné nahradit kůži po popálení, ale zatím je to jen ve fázi testování. [28]

6.5 Strojírenství

V tomto oboru se 3D tisk šíří závratným tempem. Už není využíván jen pro výrobu prototypů, ale i na díly pro konečné použití.

Výhody 3D tisku ve strojírenství

- Urychlení procesu výroby
- Modely o nižší hmotnosti
- Snadná úprava parametrů modelu pomocí PC [29]

6.5.1 Výroba jeřábového háku

První jeřábový hák byl vyroben v české pobočce nizozemské firmy Huisman. Je určen pro námořní průmysl. Vyhověl zátěžovým testům na 80 t. Využitím technologie 3D tisku se výrazně zkrátila doba jeho výroby a tím klesly i náklady oproti dosavadní výrobě pomocí výkovků, nebo odléváním. Byl zkonstruován podle výrobní technologie WAAM(Wire & Arc Additive Manufacturing). Hmotnost vyrobeného háku je 9 kg, rozměry 70 x 50x 10 cm. Celková doba výroby byla 2 měsíce. Svařování probíhalo 23 hodin a 4 minuty, byla využita metoda MAG (Metal Active Gas). Slabinou této výrobní metody je kvalita povrchu a certifikace WAAM. [30]

Obrázek 13 - První hák vyrobený pomocí 3D technologie



Zdroj:https://www.cad.cz/index.php?option=com_content&task=view&id=8657&Itemid=156

6.5.2 Výroba lopatek do plynových turbín

Jedná se o výrobek společnosti Siemens. Celý tento projekt od návrhu až po samotnou realizaci trval jen 18 měsíců, což je o 3 měsíce méně než u původní výroby lopatek. Jedná se o lopatku s konformním chlazením. Ve stěnách modelu jsou kanálky. Při testech v Anglii byly lopatky použity s turbínou SGT400 s výkonem 13 MW. K výrobě byla využita metoda SLM. Lopatky dokáží čelit vysokým teplotám a odstředivému tlaku. Váží jen 180g, oproti tomu rotor turbíny má 11 t a jeho maximální otáčky jsou 13600 ot/min. Díky aditivní výrobě se podařilo firmě Siemens snížit dobu výroby modelů o 90 %. [31]

6.6 Automobilový průmysl

3D tisk již zde není využíván jen pro prototypovou výrobu. V budoucnu by se pomocí 3D tisku mohly vyrábět náhradní díly na automobily, které se nedají normálně sehnat, nebo už se nevyrábějí. Výhodou výroby náhradních dílů pomocí 3D tisku je, že se zpracuje přesně určené množství materiálu bez vzniklého odpadu. [32]

6.6.1 Montážní přípravky v automobilce Opel

Jedná se o přípravky, pomocí kterých jsou na výrobní lince osazovány jednotlivé díly automobilu. Jako první se využívali u modelu Adam Rocks a bylo jich zhruba 40. Vyrábějí se metodou FDM s tloušťkou vrstvy 0,25 mm. Oproti přípravkům používaným dříve jsou levnější a lehčí. V současnosti se používají na modelech Insignia a Cascada. [33]

7 Závěr

V bakalářské práci je představena problematika 3D tisku. Jedná se o velmi zajímavou alternativu k výrobě prototypů, nebo dílů pro konečné použití. Nemá za sebou dlouhou historii, ale o to více se nyní dostává do popředí. V dnešní době je velmi populární a využívá jí mnoho firem. Oproti konvenčním metodám má několik výhod, díky kterým lze ušetřit peníze. Jsou zde také přestaveny hlavní metody 3D tisku a jejich rozdělení do skupin. U jednotlivých metod jsou popsány jejich výhody, nevýhody, oblasti využití, používané materiály a u některých jsou představeny i technické parametry 3D tiskárny.

Speciální kapitola je věnována 3D tisku z kovových materiálů. Jsou zde popsány technologie výroby z kovu a oblast využití. Tímto druhem výroby se zabývá Technická univerzita v Liberci. Součástí jejího kampusu je Ústav pro nanomateriály a pokročilé technologie. Jednou z jeho částí je i laboratoř pro 3D tisk. Zde využívají tiskárnu SLM 280 HL. Pro přiblížení řešené problematiky je v příslušné kapitole také ukázka modelu z této liberecké laboratoře. Další variantou pro výrobu modelů z kovu je využití hybridních technologií, které používají kromě již zmíněných metod i obrábění. Velmi důležitý je pracovní postup výroby modelů. Jeho rozdělení do jednotlivých fází je v této práci také přiblíženo.

Jednou z nejzásadnějších fází 3D tisku je výroba virtuálního modelu, která probíhá pomocí CAD softwaru. Vybrané programy jsou v této bakalářské práci blíže představeny. Představen je také výstupní formát STL, který je v současné době nejpoužívanějším. Existuje i řada dalších, ale většina 3D tiskáren je kompatibilní právě se soubory STL. V poslední kapitole jsou ukázky z nejrychleji rozvíjených odvětví, ve kterých figuruje 3D tisk. Firmy investují vysoké částky k vývoji technologií, které mohou nahradit některé stávající. Vysoký nárůst používání těchto metod je v automobilovém průmyslu, zdravotnictví, strojírenství, gastronomii a také ve stavitelství. Vypadá to, že v budoucnosti bude běžnou záležitostí tisk celých rodinných domů, nebo automobilů. Již dnes je ale jisté, že se ještě v oblasti využívání 3D tisku dočkáme velkých pokroků.

Přínosem této bakalářské práce je vytvoření uceleného přehledu využití, výhod a dostupných metod 3D tisku. V seznamu použité literatury jsou zaznamenány odkazy zabývající se touto problematikou a výrobou modelů podrobněji.

8 Citovaná literatura

- [1] BENIAK, Juraj. *Systémy Rapid Prototyping*. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2014. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 978-80-227-4287-0.
- [2] 3D tisk na zakázku. *Historie a současnost 3D tisku* [online]. 2018 [cit. 2018-03-29]. Dostupné z: <http://www.3dtisknazakazku.cz/9-clanky/15-historie-a-soucasnost-3d-tisku.htm>
- [3] GIBSON, I., D. W. ROSEN a B. STUCKER. *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping and direct digital manufacturing*. Second edition. London: Springer, 2015. ISBN 978-1-4939-2112-6
- [4] CHUA, Chee Kai., Kah Fai. LEONG a B. STUCKER. *3D printing and additive manufacturing: principles and applications*. Fourth edition of Rapid prototyping. Hackensack, New Jersey: World Scientific, 2015. ISBN 978-9814571418.
- [5] Materiál pro 3D. *PLA* [online]. [cit. 2018-03-29]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/pla/>
- [6] Na 3D. *Dostupné materiály* [online]. [cit. 2018-03-29]. Dostupné z: <https://www.na3d.cz/blog/prehled-dostupnych-materialu>
- [7] 3D-tisk. *Stereolitografie* [online]. [cit. 2018-03-15]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/stereolitografie/>
- [8] 3DP materiály. *Materiály pro 3D tiskárny 3D Systems* [online]. [cit. 2018-03-29]. Dostupné z: <http://www.protocom.cz/3dp-materialy>
- [9] 3D Systems. *VisiJet M3 Crystal (MJP)* [online]. [cit. 2018-03-29]. Dostupné z: <https://www.3dsystems.com/materials/visijet-m3-crystal>
- [10] 3D systems printers. *VisiJet C4 Spectrum* [online]. [cit. 2018-03-29]. Dostupné z: <https://www.3dsystemsprinters.com/materials/visijet-c4-spectrum/>
- [11] KLOSKI, Liza Wallach a Nick KLOSKI. *Začínáme s 3D tiskem*. Brno: Computer Press, 2017. ISBN 978-80-251-4876-1.
- [12] ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. *Mmspektrum. Nekonvenční technologie obrábění 9. díl* [online]. Praha ČVUT, 2008 [cit. 2018-03-29]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonzvencni-metody-obrabeni-9-dil.html>
- [13] Lascam. *Technologie 3D tisku kovů* [online]. 2016 [cit. 2018-03-29]. Dostupné z: <http://www.lascam.cz/technologie-3d-tisku-kovu-2/>

- [14] LOUCKÝ, Milan a Luboš ROZKOŠNÝ. Konstrukter. *Jak funguje 3D tisk metodou Direct Metal Laser Sintering* [online]. 2015 [cit. 2018-03-29]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/2015/03/09/jak-funguje-3d-tisk-metodou-direct-metal-laser-sintering/>
- [15] Materialise. *3D tisk kovů* [online]. [cit. 2018-03-29]. Dostupné z: <http://www.materialise.com/cs/manufacturing/technologie-materialy-a-dokoncovaci-upravy/3d-tisk-kovu>
- [16] 3D laboratory. *3D tisk SLM* [online]. [cit. 2018-03-29]. Dostupné z: <http://3dlaboratory.cz/rapid-prototyping/>
- [17] KELLER, Petr. *Ujme se nová technologie- 3D tisk z kovových materiálů*. Liberec, 2016. Prezentace. VUT Liberec.
- [18] Cnckonstrukce. *Hybridní 3D tisk - tisk a obrábění na jednom stroji* [online]. 2017 [cit. 2018-03-29]. Dostupné z: <http://www.cnckonstrukce.cz/clanek-118/hybridni-3d-tisk-tisk-a-obrabeni-na-jednom-stroji.html>
- [19] 3D- tisk. *Meshmixer* [online]. [cit. 2018-03-15]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/treti-verze-meshmixeru-prinasi-nove-moznosti-prace-s-modely-pro-3d-tisk/>
- [20] Cadstudio. *Autodesk 123D* [online]. [cit. 2018-03-29]. Dostupné z: <https://www.cadstudio.cz/123d>
- [21] 3D-tisk. *Fusion 360* [online]. [cit. 2018-03-15]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/v-cem-modelovat-vlastni-objekty-pro-3d-tisk-pokracovani/>
- [22] Cad studio. *Autodesk Fusion 360* [online]. [cit. 2018-03-15]. Dostupné z: <https://www.cadstudio.cz/fusion360>
- [23] Novinky. *3D tiskárny se už dostaly i do gastronomie* [online]. 2016 [cit. 2018-03-29]. Dostupné z: <https://www.novinky.cz/muzi/410110-3d-tiskarny-se-uz-dostaly-i-do-gastronomie-a-vypada-to-bozsky.html>
- [24] VRANÁ, Marcela. Bydlení. *V Číně postavili z 3D tiskárny luxusní vilu a už i pětipodlažní dům* [online]. 2015 [cit. 2018-03-29]. Dostupné z: https://bydleni.idnes.cz/dum-z-3d-tiskarny-0kj-/architektura.aspx?c=A150310_133511_architektura_web
- [25] Countourcrafting. *Stavební automatizovaná výroba* [online]. [cit. 2018-03-29]. Dostupné z: <http://countourcrafting.com/building-construction/>

- [26] LÁZŇOVSKÝ, Matouš. Technet. *Vytiskni a vystřel* [online]. 2013 [cit. 2018-03-29]. Dostupné z: https://technet.idnes.cz/prvni-zbran-z-3d-tiskarny-0x9-/tec_technika.aspx?c=A130506_174659_tec_technika_mla
- [27] VOŘÍŠEK, Lukáš. Insmart. *Granátomet vyrobený na 3D tiskárně strílí pravé granáty* [online]. 2017 [cit. 2018-03-29]. Dostupné z: <https://insmart.cz/r-m-b-granatomet-vyrobeny-3d-tiskarne-doopravdy-strili-granaty/>
- [28] Scienceworld. *3D tisk v medicíně* [online]. 2014 [cit. 2018-03-29]. Dostupné z: <http://www.scienceworld.cz/aktuality/3d-tisk-v%C2%A0medicine-dnesni-realita-a-budoucnost/>
- [29] 3Dwiser. *Výhody 3D tisku ve strojírenství* [online]. [cit. 2018-03-29]. Dostupné z: <https://3dwiser.com/vyuziti-v-praxi/strojirenstvi/>
- [30] Cad. *Jeřábový hák vyrobený 3D tiskem* [online]. 2018 [cit. 2018-03-29]. Dostupné z: https://www.cad.cz/index.php?option=com_content&task=view&id=8657&Itemid=156
- [31] PAGÁČ, Marek. Konstrukter. *Siemens vyrábí 3D tiskem lopatky do plynových turbín* [online]. 2017 [cit. 2018-03-29]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/2017/07/10/siemens-vyrabi-3d-tiskem-lopatky-do-plynovych-turbin-video/>
- [32] BUREŠ, David. Auto. *3D tisk náhradních dílů automobilů* [online]. 2017 [cit. 2018-03-29]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/jak-ziskat-nahradni-dily-unikatni-auta-resenim-3d-tisk-109994>
- [33] 3D-tisk. *Montážní přípravky* [online]. [cit. 2018-03-29]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/opel-pouziva-3d-tisk-pro-vyrobu-montaznich-pripravku/>
- [34] BIEHLER, John a Bill FANE. *3D printing with Autodesk 123D: create and print 3D objects with 123D, Autocad, and Inventor*. Indianapolis, Indiana: Que, 2014. ISBN 978-0-7897-5328-1.