

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Technická fakulta**

**Katedra materiálu a strojírenské technologie**



**Bakalářská práce**

**Výroba kovových prototypů v automobilovém průmyslu**

**Škácha Ondřej**

© 2019 ČZU v Praze

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Ondřej Škácha

Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

**Výroba kovových prototypů v automobilovém průmyslu**

Název anglicky

**Production of metal prototypes in car industry**

---

### Cíle práce

- shromáždit informace o klasických a moderních metodách výroby prototypů v automobilovém průmyslu se zaměřením na kovové díly,
- 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 automobilů; prototyp; obrábění; kovové díly; 3D tisk

---

**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**

2018/19 LS – TF

**Vedoucí práce**

prof. Ing. Milan Brožek, CSc.

**Garantující pracoviště**

Katedra materiálu a strojírenské technologie

---

Elektronicky schváleno dne 8. 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 28. 03. 2019

### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Výroba kovových prototypů v automobilovém průmyslu" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 30.3.2019

---

## **Poděkování**

Rád bych touto cestou poděkoval prof. Ing. Milanu Brožkovi, CSc za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích a vypracování bakalářské práce.

# Výroba kovových prototypů v automobilovém průmyslu

## Abstrakt

První část práce se věnuje představení konceptu Aditivních technologií a 3D tisku. Jsou představeny hlavní výhody a nevýhody Aditivních technologií a jejich současné nejrozšířenější využití. Jsou představeny a vysvětleny hlavní a nejrozšířenější metody výroby modelů, rozdíly v procesech, vhodné materiály a využití metod v praxi.

Další část práce je věnována kovovým materiálům a způsobům zpracování. Jsou představeny hlavní metody výroby prototypů z kovových materiálů. Dále jsou předneseny problémy spojené se zpracováním a manipulací s těmito kovovými materiály. Jsou uvedeny praktické příklady využití kovových součástí vytvořených Aditivními technologiemi.

Poslední část práce se věnuje ostatním materiálům a dalším procesům výroby, užívaných v metodách Aditivních technologií. Jsou popsány materiály a jejich vlastnosti, dále pak technologie nutné pro zpracování těchto materiálů a jejich typické výhody či nevýhody. Na závěr je uvedeno shrnutí a odhad budoucího vývoje Aditivních technologií.

**Klíčová slova:** Aditivní technologie, 3D tisk, Prototypování, Metody Aditivních technologií, Materiály Aditivních technologií, Výhody a Nevýhody Aditivních technologií, Procesy Aditivních technologií

# Production of metal prototypes in car industry

## **Abstract**

The first part of the work is focused on the introduction of the concepts of Additive technologies and 3D printing. The main advantages and disadvantages of Additive technologies and their most widespread use are presented. The main and most used methods of model making, rapid prototyping, differences in the processes, suitable materials and the use of methods in practice are presented and explained.

The next part is devoted to metal materials and the methods of processing them. The main methods of production of prototypes from metallic materials are presented. At the same time, the main advantages and problems of processing and handling these metallic materials are presented. In context there are given practical examples of metal parts manufactured by Additive Technologies.

The last part of the thesis deals with other materials and other production processes used in the Additive technologies. Materials and their properties are described, as well as technologies necessary for processing these materials and their typical advantages and disadvantages. Further, there is a summary and an estimate of future development of Additive Technologies.

**Keywords:** Additive Technologies, 3D Printing, Rapid Prototyping, Methods of Additive Technologies, Additive Technology Materials, Advantages and Disadvantages of Additive Technologies, Processes of Additive Technologies

## Obsah:

1. Úvod 3D Tisk.....	9
2. Příprava tisku a prototypování .....	10
3. Technologie vytváření modelů.....	11
4. Typické metody výroby .....	11
4.1. Fused deposition modeling (FDM).....	12
4.2. Stereolithografie (SLA) .....	13
4.3. Selective Laser Sintering (SLS) .....	14
4.4. Direct metal laser sintering (DMLS) .....	14
4.5. Solidscape .....	15
5. Materiály využívané aditivními technologiemi .....	15
5.1. Kovy .....	15
5.1.1. Metoda FFF s kovovým materiálem .....	16
5.1.2. Výroba BMG (bulk metallic glasses).....	17
5.1.3. Metoda SLM (selective laser melting).....	18
5.1.4. Přímé laserové slinování (DMLS) .....	21
5.1.5. Elektronové tavení (EBM) .....	22
5.1.6. Praktické příklady využití práškové metalurgie.....	23
Systémy pístních tlumičů .....	24
Kladky a převody motoru.....	24
Diferenciály .....	27
Součásti spojky.....	28
Komponenty ventilové soustavy a vačkového hřídele .....	28
Těžká technika.....	29
5.2. Plasty .....	30
5.2.1. Akrylonitrilbutadienstyren (ABS) .....	31
5.2.2. Kyselina polymléčná.....	33
5.2.3. Polykarbonáty .....	34
5.2.4. PET .....	35
5.3. Keramika .....	35
Kašové či polotekuté až tekuté náplně .....	36
5.4. Kompozitní struktury.....	37
5.5. Biotisk.....	38



5.5.1. Mikroextruze.....	39
5.5.2. Inkjet biotisk .....	40
5.5.3. Stereolitografický biotisk.....	40
6. Závěr .....	41
ZDROJE.....	42

## 1. Úvod 3D Tisk

Aditivní technologie výroby jsou stále více využívány ve stále větším množství odvětví průmyslu. Neustálý výzkum využití materiálů a inovace postupů výroby stále rozšiřují možnosti využití aditivních technologií.

Aditivní technologie se vyznačují, jak název napovídá, přidáváním materiálu na výrobek po vrstvách nebo kontinuálním tažením. Výroba se vyznačuje nízkou náročností na materiál, vysokou přesností, možností výběru materiálu s potřebnými vlastnostmi pro dané použití.

Nevýhodou této technologie je nesériovost, nákladné výrobní zařízení, problémy s povrchovou přilnavostí různých materiálů. Výhody však značně převyšují nevýhody, a tak se výroba aditivními technologiemi neustále rozšiřuje zejména v oblastech automobilového průmyslu, stavebnictví, medicíny, letectví a kosmonautiky, kde je klíčová přesná geometrie a výběr dokonalých nebo speciálních materiálů kde je zároveň nutnost tímto materiálem šetřit.

V automobilovém průmyslu se využívá zejména výroby speciálních prototypů a personalizovaných částí pro testování funkčnosti nových návrhů, ergonomiky a snižování hmotnosti nutné např. u závodních strojů.

Kosmonautika využívá schopností dosažení přesných geometrických tvarů s velmi malou odchylkou a tolerancí. Ve stavebnictví byly aditivní technologie využity také k produkci experimentálních bytových či domovních jednotek.

Letectví využívá vysoké přesnosti výroby spojené s úsporou materiálu a snižováním hmotnosti a vysoké pevnosti speciálních materiálů.

Lékařství experimentuje s biologickými materiály jako celulózové buňky pro stavbu komplexních kostních náhrad, se speciálními materiály, vhodnými pro zubní náhrady nebo s vysoce přesnými funkčními implantáty podporující, či dokonce nahrazující funkce celých orgánů nebo jejich částí.

## **2. Příprava tisku a prototypování**

Z valné většiny se produkce využívající aditivních technologií zaměřují na výrobu velmi specifických výrobků, většinou naprosto unikátních. Takové je nejdříve třeba navrhnout ve 3D CAD programech a dále převést do specifického software tiskárny. Poté, co je součást navržena v programu a parametricky zadána pro výrobu, si ji software „rozseká“ po plochách na nejmenší možné vrstvy, které vytvoří základ pro tahem konstruovanou linii materiálu. Poté co je jedna vrstva tahem dokončena, materiál je nanesen v jedné vrstvě, pokračuje program dalším tahem a další vrstvou. Tato metoda zaručuje vysokou přesnost výroby, program se řídí přesnými parametry jednotlivých vrstev, nevzniká problém se ztrátou materiálu, ten se dostane pouze na potřebná místa. Díky tomu lze vytvářet i velmi komplexní vnitřní tvary a struktury objektů, kterých by nebylo možno dosáhnout běžnými metodami strojírenských technologií. Tato metoda má své specifické nevýhody, například, že objekt vytvořený tímto „vrstvením“ materiálu má jiné vlastnosti v rovině pokládání vrstev než v rovině kolmé na pokládané vrstvy. Každému je jasné, že v rovině kolmé na pokládané vrstvy bude součást mnohem méně odolná díky možným nedokonalostem či ztenčení ve spojích jednotlivých vrstev. Tomuto problému se zcela vyhnul Joseph DeSimone, který představil na konferenci TEDx v roce 2015 způsob monolitického 3D tisku, který aplikuje se studenty z The University of North Carolina při experimentální výrobě nanočipů. Takové součásti jsou kontinuálně taženy z rozpuštěného materiálu a mají po celém povrchu i v celém průřezu ve všech směrech homogenní vlastnosti s dokonalostmi v řádech nanometrů.

### 3. Technologie vytváření modelů

Aditivní výrobu popisuje norma ČSN EN ISO/ASTM 52900(011822) a norma ISO/ASTM 52900:2015 (Aditivní výroba – Obecné zásady - Terminologie), rozděluje procesy do 7 kategorií:

Vytlačování materiálu (Material Extrusion) – materiál je selektivně vytlačován přes trysku nebo distribučním otvorem; metoda se používá převážně pro tisk termoplastů.

Nanášení tryskáním (Material Jetting) – kapičky materiálu jsou selektivně ukládány; tisknout lze polymery a vosky.

Tryskání pojiva (Binder Jetting) – tekuté pojivo je vrstvu po vrstvě nanášeno za účelem spojení práškových materiálů; tisknout lze kovy, písek nebo keramiku.

Laminace plátů (Sheet Lamination) – pláty materiálu jsou spojovány a jako celek vytvářejí model.

Fotopolymerace (Vat Photo-polymerization) – fotopolymerní kapalina v nádobě je vrstvu po vrstvě vytvrzována polymeračním světlem; zdrojovým materiálem pro vytvrzování je pryskyřice.

Spékání práškové vrstvy (Powder Bed Fusion) – přivedená tepelná energie (laserový nebo elektronový paprsek) spéká práškový kov vrstvu po vrstvě; tavit lze oceli, hliníkové a titanové slitiny, kobalt-chromové slitiny, exotické materiály atd.

Přímé energetické nanášení (Directed Energy Deposition) – materiál je nataven soustředěnou tepelnou energií i při změně polohy.

### 4. Typické metody výroby

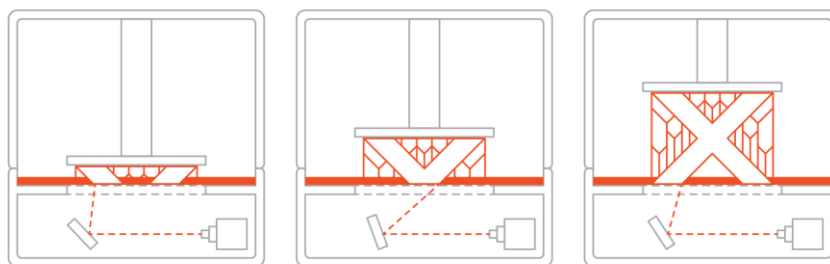
V této sekci budou popsány jednotlivé metody výroby součástí, zejména pro pochopení odlišností v procesech a jejich možných přednostech či nevýhod. Existuje celá řada procesů se stejnými principy lišící se v detailech či názvech jednotlivých kroků (velmi často patenty různých firem). Zde jsou rozebrány postupy nejčastěji používané v praxi pro celou škálu vhodných materiálů.

#### **4.1. Fused deposition modeling (FDM)**

Tato technologie byla vynalezena firmou Stratasys. (Dobiáš 2018) Metoda spočívá v pokládání nataveného materiálu ve vrstvách. Pro svou jednoduchost a ekonomickou nenáročnost je dnes jedním z nevíce využívaných typů této technologie. Tato metoda vytváří výrobek na základě 3D modelu softwaru CAD jako jsou Inventor, Solidworks, Catia a další. Poté je možné soubor upravit dle specifických softwarových požadavků každé tiskárny, záleží na interpretačním softwaru, který je využit pro převod jednotlivých parametrů modelu. Tento software poté nastříhá model na co nejtenčí vrstvy, skládající se z jednotlivých linií jenž jsou poté sledovány s velkou přesností výrobní hlavou tiskárny. Technologie využívá plastových vláken (filamentů), která jsou rozežhátá na bod tání, procházejí tiskovou hlavou a jsou rovnoměrně nanášeny do vrstev odpovídající vrstvám modelu CAD. Filamenty jsou protlačovány rozžhavenou tiskovou hlavou, která je ovládána softwarem CAM a pohybuje se horizontálně dvěma směry. Poté co je celá jedna vrstva položena, posune se modelovací stůl vertikálně směrem dolů o tloušťku jedné vrstvy materiálu. Vrstva chladne a tuhne vytvářející tak prostorový 3D model. Výhodou technologie FDM je rychlost tisku a především cena, která je v porovnání s ostatními technologiemi nižší. (Průša a Průša 2014),(Albu 2018)

Technologií FDM lze tisknout téměř všechny druhy termoplastů. Pro 3D tiskárny se používá termoplast ve formě struny, který je navinut na cívce. Vyrábí se pomocí vytlačování na vytlačovacím stroji a obvykle se dodává ve standardních průměrech 1,75 mm a 2,9 mm. Při výrobě struny je důležité co nejpřesněji dodržet průměr struny. (Dobiáš 2018)

## 4.2. Stereolithografie (SLA)



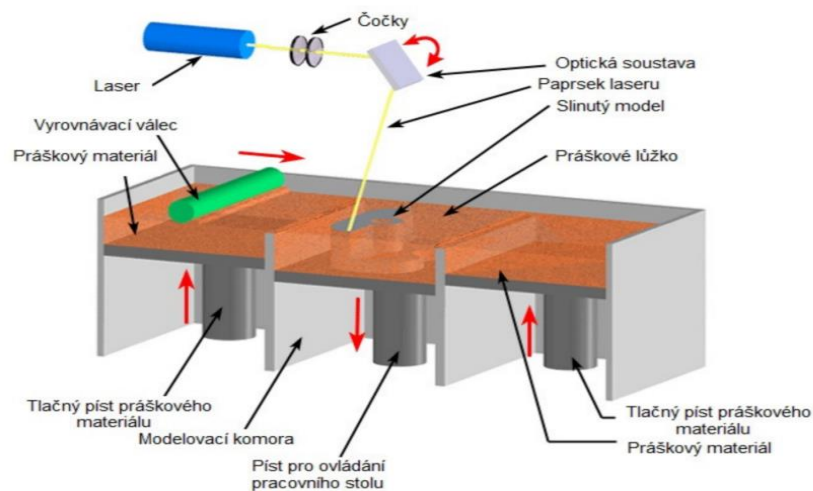
Obrázek 1 Schéma výroby metodou SLA

(<https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/3dhubs-knowledgebase/introduction-sla-3d-printing/8-sla-steps.png>)

Metoda využívající speciálních materiálů a světelného paprsku pro vytváření velmi přesných modelů kde je navíc potřeba složitých vnitřních struktur a podpor. Model začíná jako vždy ve formě modelu v 3D programu (AutoCAD aj.), který je poté upraven pro potřeby CAM programu tiskárny většinou do formátu SLS. Ten model rozdělí na jednotlivé vrstvy. Tloušťka vrstvy je nastavitelná od 0,025 mm až do 0,1 mm (Vít 2016), což téměř odstraňuje, pro technologie jako FDM, charakteristické linie pokládání vrstev a výrobek je zdánlivě téměř homogenní. Materiál je tekutý fotopolymer, jenž je citlivý na světlo a který se nachází v rezervoáru s posuvným modelovacím stolem. Nad zásobníkem materiálu je umístěn vysoce výkonný laser generující potřebné záření. Poté co má program vloženy parametry, je materiál po vrstvách vytvrzován postupným prosvícením podložky do nádrže s materiálem a vytvrzením přesné vrstvy stanovené tloušťky, vytvářející tak 3D model po jednotlivých plochách. Tekutý fotopolymer ztvrdne při kontaktu laserového paprsku s povrchem. Jakmile je vytvořena jedna vrstva, posune se stůl o tloušťku jedné vrstvy níže a další vrstva může následovat (Prochazka nedatováno). Pro modelované části je nutné vytvářet dostatečné množství podpor, které slouží jako stabilizační struktury pro nepříliš pevné tvary modelu. Po dokončení modelu je ho třeba mechanicky separovat od tiskové podložky, stejně tak je nutné mechanicky odstranit přebytečné podpory. Dále je pro životnost modelu nezbytná povrchová úprava, u velmi přesných aplikací se mohou nerovnosti odstraňovat ultrazvukem, po povrchové úpravě je model ponořen do nádržky s IPA (isopropyl-alkoholem) k očištění. Celý proces

může být zakončen vytvrzováním UV zářením, které zajistí ještě delší životnost materiálu.

#### **4.3. Selective Laser Sintering (SLS)**



*Obrázek 2 Schéma výroby metodou SLS*

(Štokman 2011)

Tento postup používá bodového laserového světla ke stmelování materiálu nacházejícího se na tiskové podložce. Metoda užitá zejména v lehkém strojírenství využívá opět 3D CAD modelů převáděných na formát SLS, a rozděluje model do vrstev. Pro samotné budování je využíváno zejména plastových prášků jako je například nylon, rozprostřených v tenké, přesně vysoké vrstvě po tiskové podložce. Programem ovládaný laserový paprsek pak postupně sleduje s velkou přesností jednotlivé linie vrstev, zahřívající tak rozprostřený prášek na teplotu těsně pod bodem či přesně na bodu tání materiálu, čímž se částice spojí do pevného jednodlitého celku. Poté co je jedna vrstva úspěšně vytvrzena, posune se modelovací stůl níž, válečkový stěrač nanese novou vrstvu práškového materiálu a proces pokračuje novou vrstvou. (Hussain et al. 2019)

#### **4.4. Direct metal laser sintering (DMLS)**

Technologie umožňující vytvářet kovové komponenty přímo díky počítačem vytvořeným souborům. Je to komplexní proces při kterém se materiál nanáší vrstvu po vrstvě pomocí soustředěného tavení plynem atomizovaného kovového prachu silným, koncentrovaným laserovým paprskem. (Konečná et al. 2017)

#### 4.5. Solidscape



Obrázek 3 Výroba přesných modelů pro odlitky metodou Solidscape

(<https://3dprintingindustry.com/wp-content/uploads/2013/08/Solidscape-Max-3Z-3D-Printing.jpg>)

Firma zabývající se výrobou vysoce přesných 3D tiskáren pro aplikace v klenotnictví a dalších odvětvích precizního strojírenství. Byla zde vyvinuta inovativní forma 3D tisku, která se zaměřuje na výrobu voskových modelů a nosných struktur, jenž jsou poté využívány pro výrobu licích forem (RTV), přímé vytlačování do keramiky či pro odlévání jemných kovových struktur. (Romanoff Corp. 2018)

### 5. Materiály využívané aditivními technologiemi

Tato sekce se věnuje materiálům a jejich specifickým výrobním postupům, nejhojněji užívaných v metodách aditivních technologií. Plastové materiály jsou hlavní součástí převážné většiny výroby 3D tiskem, avšak vědecké kapacity se nyní zaměřují na použití kovových materiálů, keramiky, ale také biomateriálů pro stále širší spektrum možností uplatnění.

#### 5.1. Kovy

Nejrozšířenější přístup aditivních technologií ke kovovým materiálům jsou procesy využívající tzv. „prášková lože“ založené na fúzi vysoce lokalizovaným ohřevem a poté vytvrzením kovových prášků vykonaných laserem nebo elektronovým paprskem. Přestože jsou použitelné, jsou metody práškových loží finančně náročné a velmi komplexní v implementaci díky vysokým nárokům na silné energetické zdroje, kontrolovanou atmosféru procesu a přísné požadavky na kvalitu a vlastnosti práškového materiálu jako je velikost zrn, morfologie, sypkost a čistota.

K tomu navíc bodové tavení, bleskové tuhnutí a opakované ohřevy vytvářejí komplexní termomechanická namáhání uvnitř vyráběné části. Tyto stresy obvykle požadují zavedení pevných podpůrných struktur, které zabraňují průvodným deformacím a následné mechanické úpravě výrobků pro dosažení přesných rozměrů.

Kvůli výše uvedeným problémům jsou vyvíjeny alternativní techniky přípravy kovových materiálů s vhodnými vlastnostmi pro technologie využívající extruzi. Jedna ze zkoumaných možností je založena na extruzi polotuhého kovu, kdy je proces prováděn při takové teplotě, při níž se vytvoří stabilní suspenze pevných a tekutých fází s požadovanou viskozitou. Tento typ extruze závisí zejména na přesné kontrole teplotních podmínek uvnitř tiskové hlavy a tedy množství pevných fází v suspenzi. Takový přístup je funkční, pokud je rozdíl teplot pro přechod mezi pevnou a kapalnou fází různých prvků dané slitiny dostatečně velký, což splňuje pouze malá část slitin.

Jiná strategie dosažení vhodné viskozity spočívá ve využití termoplastů jako nosného a pojivého média pro kovový materiál v práškové formě. Tento přístup využívá dobré viskozity termoplastů naplněných až ze 60% kovovým aditivem (Gibson et al. 2018). Zřejmá nevýhoda tohoto procesu je, že je navíc potřeba odstranění polymerů a solventů s následným spékáním kovového prachu pro dosažení potřebné hustoty kovových částic a zajištění pevnosti výrobku.

Ačkoliv se věda velmi zajímá o rozvoj aditivních technologií, nejsou zatím k dispozici potřebné nástroje, aby byly procesy využívající extruzi vhodné pro rutinní tisk kovových součástí.

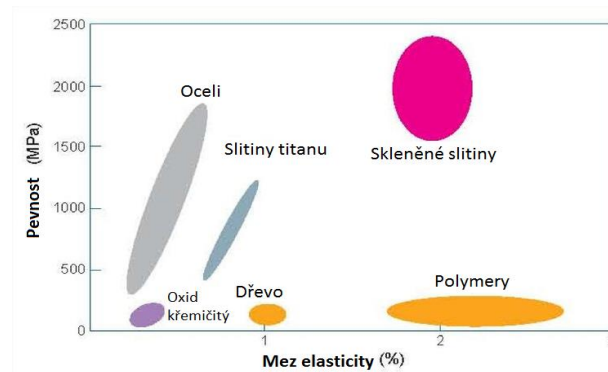
### **5.1.1. Metoda FFF s kovovým materiálem**

Metoda používaná nejběžněji pro tisk plastových materiálů a vytváření komplexních geometrických struktur. Kovy jsou materiálem v podstatě nevhodným pro tento typ zpracování, jelikož metoda spočívá v postupném rozechřívání termoplastů až do chvíle, kdy jsou plně tvárné, a protože právě kovové materiály je problém udržet při dostatečné viskozitě na praktických časových úsecích vhodných pro extruzi, zpracování a formování materiálu.

S nástupem kovových skel však přišla v úvahu i tato možnost zpracování, neboť se při zahřívání chovají podobně jako termoplasty. Kovová skla jsou slitiny jejichž zástupci jsou



např.  $\text{Au}_{75}\text{Si}_{25}$ , Pd-Cu-Ni-P, Y-Sc-Al-Co nebo Zr-Ti-Cu-Ni-Be a jsou připravovány velmi rychlým podchlazením taveniny ( $>100000 \text{ }^\circ\text{C/s}$ ) (Materiálová věda 2011) například na chlazených měděných blocích, čímž se získávají pásy kovových skel.



Obrázek 4 Porovnání vlastností kovových skel v mezi elasticity a pevnosti proti ostatním materiálům

(<https://docplayer.cz/14885329-Moderni-materialy-s-aplikacnim-potencialem-7-5-amorfni-kovy-kompozity-fgm-ferrofluidy-molekularni-magnety.html>)

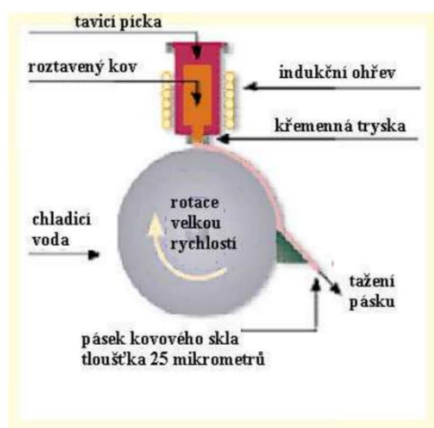
Kovová skla mají velmi specifické mechanické vlastnosti, které závisí na kvalitě zpracování a jakékoliv nepřesnosti ve výrobě, při kterých dojde k vytvoření „bublin“ či trhlin, je citelně zhoršují. (Materiálová věda 2011) Jednou ze specifických vlastností tohoto materiálu je jejich mez pružnosti, která se pohybuje velmi blízko maximálním teoretickým hodnotám, zároveň u nich nedochází při deformaci za studena ke zvyšování meze elasticity, nýbrž naopak k jejímu snížení.

Kovová skla se tedy využívají, pro jejich širokou škálu složení, v mnoha situacích jako např. katalyzátory reakcí, pro mikroelektronické mechanické systémy, pro přesná měření tlaku či průtoku, jako biokompatibilní součásti implantátů a samozřejmě jako speciální filamenty pro „tiskové“ procesy. (Gibson et al. 2018)

### 5.1.2. Výroba BMG (bulk metallic glasses)

Slitiny jsou tvořeny z elementů o čistotě lepší než 99,9 % (zvažovány jsou pouze kovové nečistoty) pomocí elektrického oblouku v argonem chráněné atmosféře. Pro zajištění homogenity je materiálem otáčeno. Po tomto kroku je slitina krystalická. Následně se opětovně rozehřívá v křemenových trubkách ve vakuu. (Dařourek 2008)

Křemenné trubky mají tavicí část o vnitřním průměru 12 mm a vnějším průměru 14 mm a po tavení, které zde probíhá 3 min při 900 °C, je tekutá tavenina vytlačena argonem pod tlakem  $\sim 10^5$  Pa do části pro odlévání kde zůstává po dobu 30 s při pracovní teplotě 900 °C. Pak je ponořena do vody a po ochlazení na pokojovou teplotu je vytvořeno plně amorfní „kusové“ kovové sklo. (Gibson et al. 2018)



Obrázek 5 Zjednodušené schéma výroby kovových skel

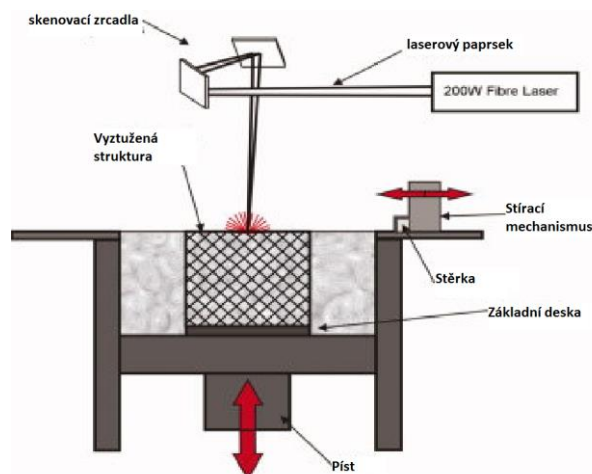
(Dařourek 2008)

### 5.1.3. Metoda SLM (selective laser melting)

Je jednou z populárních technologií rychlého prototypování kovových součástí. Kovový prach, rovnoměrně nanesený na modelovací desce, se taví pomocí vysoce výkonného laseru (např. plynového laseru CO<sub>2</sub>) nebo elektronového paprsku o velikosti okolo 70 mikrometrů. Tloušťka vrstvy se volí v rozmezí od 20 do 100 mikrometrů v závislosti na používaném materiálu. (Konstrukter.cz nedatováno)

Tavicí proces probíhá v pracovní komoře s regulovanou atmosférou. Před zahájením procesu je třeba prostor dokonale zbavit vzduchu a vlhkosti. Poté je vyplněn inertním plynem, nejčastěji dusíkem či argonem, který je těžší a účinnější. Takto dochází k vytlačení zbytkového vzduchu a koncentrace O<sub>2</sub> běžně klesá pod 0,1% (titan a jiné reaktivní materiály je třeba zpracovávat v atmosféře o koncentraci O<sub>2</sub> pod 0,01%).

Po kalibraci je na pracovní desku nasypán prášek, jenž je rovnoměrně nanášen po celé pracovní ploše silikonovou lištou. Další část procesu je zajišťována laserem, který podle programu taví vrstvy práškového kovu.



Obrázek 6 Proces metody SLM

([https://www.researchgate.net/figure/A-schematic-of-the-SLM-process-as-used-in-the-MCP-Realizer-system-Color-figure-can-be\\_fig3\\_26877026](https://www.researchgate.net/figure/A-schematic-of-the-SLM-process-as-used-in-the-MCP-Realizer-system-Color-figure-can-be_fig3_26877026))

Výška jednotlivých vrstev záleží na použitém kovu, např. pro korozivzdornou ocel se standardně uvádí výška vrstvy 50 mikrometrů. (Konstrukter.cz nedatováno) Vysokofrekvenční zrcátkový snímač řídí laserový paprsek v osách X a Y, v ose Z se posouvá celá pracovní plocha vždy po dokončení jedné vrstvy přesně o její výšku.

Po dokončení modelu je přebytečný materiál odstraněn a po filtraci a prosévání je připraven k dalšímu použití, pokud se nejedná o speciální použití jako v letectví, kosmonautice či lékařství, kde je zapotřebí extrémních čistot a přesností. V takových případech je potřeba použít pouze nového materiálu jenž neprošel výrobní komorou.

Z pracovní podložky je poté výsledný výrobek odstraněn pomocí pásové pily nebo jiných metod (elektroerozivní obrábění drátem atd.) a plocha podložky je frézována a broušena pro úplné odstranění zbytků modelu a podpor.

Přesné obrábění je často velmi důležitým prvkem v procesu aditivní výroby. Funkčně optimalizované součásti aditivní výroby nemusí být příliš tuhé a často potřebují složité finální úpravy. Komplexní tvary způsobují zkroucení a vychýlení, které má dopad na konečnou přesnost. Jednou z možností, jak zlepšit tuhost konstrukce je provést drobnou změnu v návrhu součásti přidáním úchyťů či nosných nebo chladicích podpor, zajišťující dostatečné mechanické upevnění při obrábění.

Pokud nelze jednoduše změnit návrh konstrukce součásti, aniž bychom ztratili výhody, které aditivní technologie přináší, musíme se podívat na jiné způsoby upínání. Je potřeba najít způsob, jak vytvořit podporu k minimalizování vibrací a vychýlení. Dále nesmí docházet k poškození součásti při pevném sevření. 3D vytištěná pouzdra (čelisti), vytvořená aditivními technologiemi, mohou poskytovat v tomto případě dobré řešení pro dosažení požadované přesnosti a tvaru součásti. (Saunders 2018)

Většina kovových modelů a dílů s použitelnými parametry samostatně neodpovídá požadavkům výroby a nejsou vhodné pro výrobu 3D tiskem. Proto dochází k přidávání podpůrných nosných a pomocných konstrukcí (z angličtiny *supports*). Tyto podpory zpomalují výrobní proces a prodražují výrobu, neboť se, navíc ke zvýšené spotřebě materiálu, mohou velmi obtížně odstraňovat. Nehledě na to, že po odstranění je třeba dosáhnout potřebné kvality povrchu, což může být ve výsledku velmi nákladné.



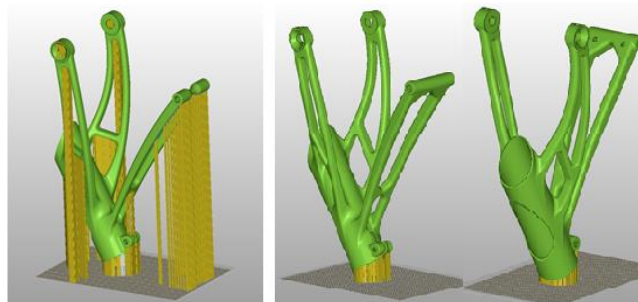
Obrázek 7 Příklad využití strukturálních podpor

(<https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/3dhubs-knowledgebase/introduction-metal-3d-printing/slm-supports.png>)

Podpory pro 3D tisk (viz. Obr.7) mají často ve skutečnosti také chladicí a upevňovací význam, hlavně v procesech využívající „práškovou lože“. Upevňovací význam spočívá v zajištění modelu proti působení tahových pnutí, způsobené zbytkovým namáháním, která odtrhávají části modelu směrem od substrátu. Chladicí funkce má význam u tepelně izolovaných částí, které by se samostatně ochlazovaly příliš pomalu. (Konstrukter.cz nedatováno) Geometrické řešení podpor je různorodé, nejčastěji navrhováno softwarem

v nejvíce kritických místech součástí. Mohou mít tvary sloupků, opěrných či stromových struktur.

Problému přebytečných struktur a podpor se snažil předejít Marc Saunders (*Global Solutions Centres*), který navrhl úpravy designu modelů topologicky tak, aby byly samonosné a bylo možno je tisknout bez podpor. Jako podpory jsou použity samotné části výrobku, nebo byla upravena geometrie předmětu např. úprava převisů a orientace součástí. Úpravy neubírají modelům na funkčnosti, mají pouze kosmetický rozměr. Nejvíce problémové byly shledány kruhové otvory, jenž standardně podpory potřebují. Tento problém byl vyřešen změnou kruhových otvorů na otvory čtvercové, které jsou samonosné, pokud strany tohoto čtverce svírají se substrátem úhel  $45^\circ$ . Výsledkem byla součást, která po odstranění z podložky nepotřebovala dramatické povrchové úpravy ani obrábění, a tudíž splňuje i původní účel technologie 3D tisku jako je šetření materiálem, snižování nákladů na výrobu a dosažení naprosto přesných povrchových úprav a rozměrů. (Konstrukter.cz nedatováno)



*Obr. 8 Příklad omezení potřeby strukturálních podpor upravením orientace a geometrických detailů*

*(<https://www.konstrukter.cz/wp-content/uploads/2017/08/4-Renishaw-podpurne-prvky-optimalizace-pri-tisku.png>)*

#### **5.1.4. Přímé laserové slinování (DMLS)**

Jednou z nejefektivnějších metod v průmyslu aditivních technologií je metoda Direct Metal Laser Sintering zkráceně DMLS. Tato metoda na rozdíl od jiných, které vyžadují velmi specifickou slitinu (např. kovová skla) nebo materiály na bázi polymeru, umožňuje vystavět objekty téměř z jakékoliv kovové slitiny.

Metoda spočívá v rozložení velmi tenké vrstvy kovového prášku na ploše, na které bude prováděn tisk. Vrstva prášku je postupně slinována laserovým paprskem, který je pomalu a přesně veden po tiskové ploše. Slinování má za následek spojení částic práškového kovu i přesto, že nebylo dosaženo dostatečně vysoké teploty pro úplné roztavení kovu. Po dokončení jedné vrstvy následuje znovu distribuce další vrstvy prášku a poté se proces slinování opakuje. Takto je model „tisknut“ po jednotlivých velmi tenkých vrstvách, jejichž výška závisí na materiálu, hrubosti zrn, intenzitě laserového paprsku, kvalitě ochranné atmosféry atd.(Castells 2019)

Poté co je budování objektu metodou DLMS dokončeno, je model ponechán ke zchlazení za pokojové teploty. Zbývající neslitutý kovový materiál je vyňat z pracovní komory a filtrovacími a očišťovacími procesy připraven k dalšímu použití, dovoluje-li následné určení výrobku použití recyklovaného materiálu.

Velká výhoda výrobního procesu DMLS je, že výrobky takto vyrobené nejsou zatíženy zbytkovými vnitřními termomechanickými stresy a jinými nežádoucími defekty, jenž běžně vznikají při běžných metodách výroby kovových výrobků jenž potřebují speciální tepelnou úpravu po dokončení výroby pro uvolnění vnitřních napětí, které by mohla způsobit selhání součásti.(Castells 2019) Tato skutečnost je velmi důležitá zejména pro výrobky jenž jsou určeny k funkci pod velkým silovým namáháním jako v automobilovém či leteckém průmyslu.

Hlavní nevýhoda procesu DMLS spočívá v jeho ekonomické náročnosti, což způsobuje jeho použití výhradně pro aplikace na velmi vysoké technologické úrovni jako vytváření kovových prototypů v leteckém průmyslu. Komerční zařízení pro 3D tisk kovů stojí dnes okolo půl milionu dolarů, na což běžné výrobní závody nejsou schopné dosáhnout. Na dostupném, mnohem levnějším zařízení je usilovně pracováno na Technické Univerzitě v Michiganu, které má stavební cenu pouze okolo 1500 dolarů.(Castells 2019)

#### **5.1.5. Elektronové tavení (EBM)**

Tavení elektronovým paprskem (electron beam melting) je proces ze skupiny aditivních technologií velmi podobný metodě SLM (selective laser melting). Stejně jako u metody SLM je výsledný materiál velmi hutný. Rozdíl spočívá v použitém tepelném přenosovém

médiu, potřebném k roztavení kovu, kde na rozdíl od SLM, jenž používá laserový paprsek, je tento v metodě EBM nahrazen paprskem elektronovým.

Tato metoda je omezená pro použití u velmi specifických druhů kovu. Běžně jsou pro tento proces používány slitiny titanu, ale použity mohou být také kobalt a chrom. Tato metoda je nejčastěji používána ve výrobě částí pro letecký průmysl.

#### **5.1.6. Praktické příklady využití práškové metalurgie**

Prášková metalurgie splňuje funkční požadavky pro širokou škálu aplikací pro karoserii a podvozky dopravních prostředků. Spektrum výrobků vhodných pro tyto aplikace se pohybuje od bezpečnostních opatření pro cestující jako prvky bezpečnostních pásů a airbagů, od komponentů z nerezové oceli pro výfukové systémy až po systémy s elektrickým posilovačem řízení (EPAS - Electric Power Assisted Steering). Celkové praktické využití se však v dnešní době omezuje pouze na velmi úzce specializované komponenty, kde je nutná naprostá geometrická přesnost a vysoké nároky na kontrolu a čistotu procesu. Technologie tisku kovů mohou tyto požadavky zaručit, avšak za cenu, jenž není praktická pro většinu komerčních či velkokapacitních aplikací. Tento ekonomický aspekt omezuje využití kovových součástí, vyrobených aditivními technologiemi, z většiny na letecký průmysl a kosmonautiku, kde jsou obrovské bezpečnostní nároky normou. S neustálým rozvojem těchto technologií (např. METAL JET „tiskárna“ od firmy HP je pokrokový zařízení s již dostupnější cenou kolem 400 000\$ za základní model) však našli i výrobci automobilů její uplatnění, ať už pro specializované závodní stroje, či nahrazování vysoce namáhaných součástí běžných převodovek a diferenciálů.

## **Systémy pístních tlumičů**



*Obrázek 9 Pístní tlumič*

*(<https://www.gknpm.com/globalassets/global-images/divisions/powder-metallurgy-product-tool-780x780/5.1-automotive-body-chasis-shock-absorber-piston-780x780-min.jpg>)*

V oblasti pístů tlumičů nárazů se zaměřuje na poskytování efektivních konstrukčních řešení a vysoce spolehlivou výrobu. Dobrá rozměrová přesnost a povrchová úprava, stejně jako výběr materiálu přizpůsobený požadavkům na výkon, jsou jen některé z výhod slinutých pístů tlumiče. (GKN Sinter Metals nedatováno)

## **Kladky a převody motoru**

Jednou z klíčových oblastí použití práškové metalurgie v lehkých vozidlech jsou prvky motoru, jako jsou komponenty ventilů, komponenty VVT (Variable Valve Timing - Variabilní časování ventilů), kladky, řetězová kola nebo převody motoru.



*Obrázek 10 Ozubené kolo statoru*

*(<https://www.gknpm.com/globalassets/global-images/divisions/powder-metallurgy-product-tool-780x780/5.1-automotive-engine-vvt-stator-sprocket-780x780-min.jpg>)*



Tradiční hydraulicky podporované systémy automobilů jsou dnes postupně nahrazovány systémy elektrického asistovaného řízení (EPAS). Hlavním komponentem systému EPAS je typicky pár kladek, které pracují ve shodě se speciálním ozubeným řemenem. (GKN Sinter Metals nedatováno)



*Obrázek 11 Řemenice*

*(<https://www.gknpm.com/globalassets/global-images/divisions/powder-metallurgy-product-tool-780x780/5.1-automotive-body-chasis-electric-steering-motor-pulley-780x780-min.jpg>)*

Prášková metalurgie nabízí různé možnosti zpracování součástí se speciálně navrženými kovovými prášky, které splňují rostoucí požadavky různých aplikací hnacího ústrojí. Nabízí nové možnosti v geometrii, jako jsou podřezy nebo šroubovicová ozubená kola pro inovaci designu převodovky. (GKN Sinter Metals nedatováno)



*Obrázek 12 Převodové kolo*

*(<https://www.gknpm.com/globalassets/global-images/divisions/powder-metallurgy-product-tool-780x780/5.1-automotive-drivetrain-edrive-gear-780x780-min.jpg>)*

EDrive Gear (Obr.12) kombinuje extrémní tvarování s technologií povrchového zhuštění a nabízí výkon převodovky srovnatelný s tradičně kovanými ozubenými koly s dalšími výhodami snížení NVH (Noise, Vibration, Harshness – hlukové a vibrační charakteristiky vozidla) a nízkou hmotností.

Budoucí elektrifikované hnací ústrojí se ukázala jako výzva pro technologii převodovek. Velmi vysoké otáčky v elektrických pohonech představují pouze jeden z problémů, zároveň je zapotřebí také vyšší točivý moment, aby se zmenšil užitý prostor a hmotnost ústrojí. (GKN Sinter Metals nedatováno)



*Obrázek 13 Soustava Raveneaux Carrier od firem Ford a GKN*

*(<https://www.gknpm.com/globalassets/global-images/powder-met/780-carrier.png>)*

K dosažení vysokého točivého momentu pro převodovku F-250 Super Duty 6R140 se společnost GKN Sinter Metals spojila s firmou Ford a navrhla Raveneaux Carrier (Obr. 13), pětidílnou sestavu, představující multifunkční komponent nosiče, jednosměrné spojky a náboje spojky v jedné konstrukční součásti s finální montážní hmotností pouze 9 kg. (GKN Sinter Metals nedatováno)

Ozubená kola jsou jednou z hlavních součástí planetového soukolí v motoru startéru a jsou obvykle vyrobená z plastu. V rámci stále více se uplatňující technologie start-stop musí být ozubená kola silnější a odolnější, aby vydržela častější namáhání. Vytvoření prstencových ozubených kol z práškového kovu poskytuje lehké, vysoce výkonné řešení, které je odolnější vůči opotřebení a může dosáhnout těsnějších tolerancí (Obr. 14).



*Obrázek 14 Planetový převod startéru*

*(<https://www.gknpm.com/globalassets/global-images/divisions/powder-metallurgy-product-tool-780x780/5.1-automotive-drivetrain-actuation-systems-780x780-min.jpg>)*

### **Diferenciály**

Základem diferenciálu je sada čtyř diferenciálních ozubených kol, známých také jako kuželová kola: Dvě boční ozubená kola, která se připojují k levé a pravé nápravě a dva pastorky, které přenášejí moment mezi bočními ozubenými koly. Využitím práškové metalurgie lze dosáhnout velmi výkonných a trvanlivých součástí přenášející často velké množství mechanické energie. (GKN Sinter Metals nedatováno)



*Obrázek 15 Ozubená kola diferenciálu*

*(<https://www.gknpm.com/globalassets/global-images/divisions/powder-metallurgy-product-tool-780x780/5.1-automotive-drivetrain-differential-gears-780x780-min.jpg>)*

### **Součásti spojky**

One Way Clutch (OWC) je další z komponentů, jehož konstrukční řešení je používáno výrobci automobilů globálně. Prášková metoda může zaručit nejen vysokou přesnost, ale díky výběru správných materiálů i vysokou a velmi žádoucí odolnost.



*Obrázek 16 Kotouč spojky*

*(<https://www.gknpm.com/globalassets/global-images/divisions/powder-metallurgy-product-tool-780x780/race-1-780-780.png>)*

### **Komponenty ventilové soustavy a vačkového hřídele**

Stejně jako u většiny vačkových hřídelí je jeho primární funkcí uchycení vačkového hřídele k hlavě válce pro konstrukční podporu. Tato konstrukce víčka má vyvýšený prvek, označovaný jako „náhrobek“ (z aj. Tombstone) - používá se jako montážní a těsnící součást pro vakuové čerpadlo, které se připojuje ke konci vačkového hřídele. Součástí výrobku je také víko ventilu umístěné přímo na vrchu víčka na řízeném profilu těsnící plochy. (GKN Sinter Metals nedatováno)



*Obrázek 17 Součást vačkového hřídele*

*(<https://www.gknpm.com/globalassets/global-images/divisions/powder-metallurgy-product-tool-780x780/tombstone-cam-cap-780-x-780.png>)*

Regulace čistého tvaru otvorů pro šrouby, protilehlých otvorů, čelních profilů a poloměrů vaček omezuje potřebu drahých a nevhodných operací sekundárního obrábění, dříve vyžadovaných pro tyto aplikace. (GKN Sinter Metals nedatováno)

Systemy, optimalizující časování vačkového hřídele nebo ventilu, mají stále větší význam pro spotřebu paliva a emise CO. Válečkový sledovač prstů se používá u ventilové soustavy osobních automobilů jako součást vačkového sledovacího systému.



*Obrázek 18 Sledovací prst ventilu*

*(<https://www.gknpm.com/globalassets/global-images/divisions/powder-metallurgy-product-tool-780x780/5.1-automotive-engine-valve-train-roller-finger-follower-780x780-min.jpg>)*

### **Těžká technika**

Zcela jiné praktické použití našla firma Huisman, která vyrobila první jeřábový hák na světě vyrobený technikou 3D tisku, jenž úspěšně prošel zátěžovými testy na 80 tun a souvisejícími kontrolami v souladu s bezpečnostními kritérii. Z hlediska nákladů je kování v malých sériích drahá technologie. Každý složitější tvar se ková ve speciální formě a předpokládá časově náročnou přípravu výroby. (CAD.cz 2018)



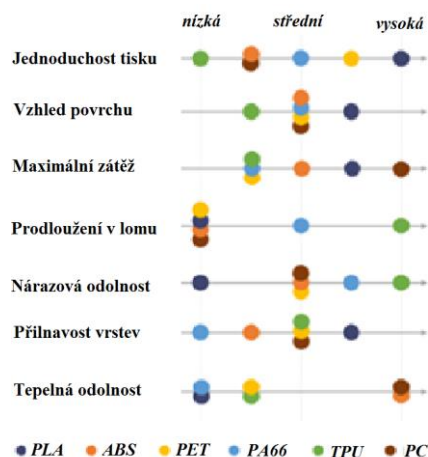
*Obrázek 19 Jeřábová hák*

*(<https://www.cad.cz/images/stories/aktuality/2018/03/Prvni-jerabovy-hak-3D-tisk-Huisman-1810.jpg>)*

První a zatím jediný vytištěný vzorek jeřábového háku o rozměrech  $70 \times 50 \times 10$  cm a hmotnosti 90 kg vznikl v českém závodě v průběhu dvou měsíců. Na tisk byl využit svařovací robot Panasonic a navařování MAG (metal activ gas) metodou trvalo 23 hodin a 4 minuty čistého času. (CAD.cz 2018)

## **5.2. Plasty**

Na Obrázku 20 je stručný přehled pro porovnání jednotlivých plastových materiálů, jejichž použití v metodách aditivních technologií je velmi rozšířené a na rozdíl od ostatních tisknutelných materiálů, ekonomicky dostupné. Používají se nejčastěji ve formě filamentů ať už kompozitních či čistých. Materiály byly zařazeny dle následujících kritérií na stupnici 1 (nízká) až 5 (vysoká). Jedná se o relativní stupně pro proces FDM. Použitím údajů od společnosti Optimatter byly polymery seřazeny dle různých kritérií.



Obrázek 20 Porovnání plastových materiálů dle vlastností

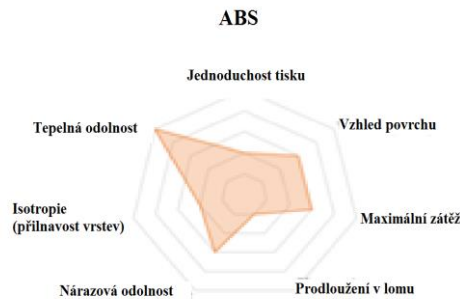
(<https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/3dhubs-knowledgebase/Which-FDM-3D-printing-plastics-is-best-for-my-application/chemistry-comparison.png>)

Z přehledu vyplývá, že PLA je pro tisk nejsnadnější. Výsledný model má dobrou kvalitu povrchu. Je velmi pevný a ve poměrně tvrdý, ale na druhou stranu poměrně křehký. ABS má oproti PLA vyšší houževnatost i tepelnou odolností, nicméně se z něho během tisku vylučuje více potenciálně nebezpečných látek. PET znám například z potravinářských obalů, se ukazuje být zajímavou volbou pro specifická využití – třeba s ohledem na odolnost vůči chemikáliím. Nylon má velmi dobré mechanické vlastnosti, zejména výbornou odolnost vůči nárazu. Problém může být s přilnavostí mezi vrstvami. TPU je flexibilní materiál a PC je nejsilnější materiál ze všech, který může být zajímavou alternativou k ABS, protože vlastnosti jsou velmi podobné.

### 5.2.1. Akrylonitrilbutadienstyren (ABS)

ABS je polymer akrylonitrilu, butadienu a styrenu. Obvykle se skládá z přibližně poloviny styrenu a druhé poloviny tvořené stejným dílem butadienu a akrylonitrilu. Akrylonitril a styren zajišťují chemickou odolnost, tvrdost a odolnost vůči teplu, butadien zajišťuje odolnost proti nárazu. Má vysokou pevnost v tahu, rozměrovou stálost, tvrdost povrchu a tuhost v širokém rozsahu teplot. Určité druhy vykazují dobrou rázovou pevnost

při nízkých teplotách od  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Je flexibilní, chemicky odolný, má lesklý povrch a relativně nízké výrobní náklady.



Obrázek 21 Vlastnosti ABS

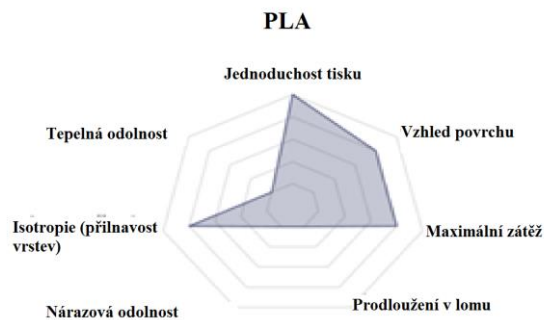
(<https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/3dhubs-knowledgebase/Which-FDM-3D-printing-plastics-is-best-for-my-application/abs.png>)

Vzhledem ke schopnosti přizpůsobení ABS požadavkům jako je tepelná odolnost, elektrická izolace, pevnost v tahu, rozměrová stálost, tvrdost povrchu, samozhášecí schopnost a odolnost vůči povětrnostním vlivům, je ABS používán ve značně velkých výrobních odvětvích. Mezi nejdůležitější patří automobilový a letecký průmysl. Komponenty pro interiéry i exteriéry automobilů, lodní trupy, interiéry letadel a velké díly pro obytná rekreační vozidla, to jsou jen některé z mnoha možností využití pro ABS plasty.(plasticsystems.cz 2019a)

Doporučená teplota vytlačování je  $190\text{-}250^{\circ}\text{C}$ . (Mirón et al. 2017),(Dobiáš 2018)



## 5.2.2. Kyselina polyléčná



Obrázek 22 Vlastnosti PLA

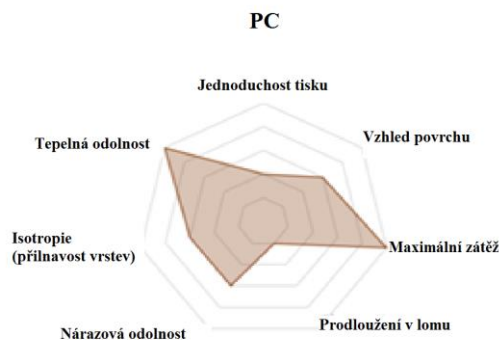
(<https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/3dhubs-knowledgebase/Which-FDM-3D-printing-plastics-is-best-for-my-application/pla.png>)

Základní surovinou pro výrobu je rostlinná biomasa např. kukuřice, obilniny, brambory, cukrová řepa, cukrová třtina, sója, tabák a přírodní suroviny jako např. celulóza a lignit. Bioplast je vyráběn ze škrobu těchto rostlin. Aby se škrob přeměnil na látku vlastnostmi odpovídající plastům z ropy, je nutné jej vystavit vysokým teplotám a pomocí izolace z něj získat glukózu. Kvašením je z glukózy získána kyselina mléčná a později kyselina polyléčná (Polylactid acid) tzv. „PLA“. (eko-plasty.cz 2018)

Optimální teplota pro vytlačování PLA se pohybuje od 175-230°C. (Mirón et al. 2017), (Dobiáš 2018)

Z PLA plastu lze poté vyrobit obalový materiál jakéhokoli druhu. PLA plasty jsou, ve srovnání s konvenčními plasty, šetrnější vůči životnímu prostředí, neboť je biologickými procesy rozložitelný, jejich výroba je až o 65% energeticky méně náročná a nevyužívá se u ní ropa ani přídatné chemické směsi, změkčovače či jiná syntetická činidla. (eko-plasty.cz 2018)

### 5.2.3. Polykarbonáty



Obrázek 23 Vlastnosti PC

(<https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/3dhubs-knowledgebase/Which-FDM-3D-printing-plastics-is-best-for-my-application/pc.png>)

Polykarbonáty představují specifickou skupinu termoplastických polymerů, které lze snadno opracovávat, formovat a tepelně tvarovat. Díky těmto vlastnostem mají široké využití. (plasticsystems.cz 2019b)

Polykarbonát spojuje řadu velmi dobrých vlastností, kterých nebylo dosud souhrnně dosaženo u žádného dalšího typu termoplastů. Ačkoliv má polykarbonát vysokou odolnost proti nárazu, má nízkou odolnost vůči poškrábání a tak je například na polykarbonátová brýlová skla či vnější polykarbonátové součásti automobilů aplikována speciální ochranná vrstva. Vlastnosti polykarbonátu jsou dosti blízké vlastnostem polymethylmetakrylátu (PMMA, akryl), ale polykarbonát je pevnější a použitelný v širším rozsahu teplot, je ale také dražší. Tento polymer je vysoce transparentní pro viditelné světlo, disponuje lepší propustností světla než spousta druhů skla. Během zpracování je poněkud méně toxický než polyvinylchlorid (PVC), nicméně ve fázi jeho výroby jsou toxické chemikálie používány. Přesto je recyklovatelný a pro mnohá využití ekologičtější, než jiné materiály, včetně PVC. (plasticsystems.cz 2019b)

#### 5.2.4. PET



Obrázek 24 Vlastnosti PET

(<https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/3dhubs-knowledgebase/Which-FDM-3D-printing-plastics-is-best-for-my-application/pet.png>)

PET je poměrně měkký polymer s celkově výhodnými vlastnostmi jako nezávadnost pro potraviny, vysoká odolnost proti poškrábání, chemickým sloučeninám. Je také odolný proti vlhkosti, je recyklovatelný, ale je mnohem těžší než např. ABS nebo PLA.

Další příklady hojně využívaných plastových materiálů jsou např. polyfenylsulfon (PPSU), polyeterimid (PEI), polyvinylalkohol (PVA).

#### 5.3. Keramika

Materiál hojně užívaný v široké škále odvětví jako chemický průmysl, strojnictví, elektronika, letectví a biomedicínské inženýrství. Specifické vlastnosti jako velmi vysoká mechanická pevnost, dobrá tepelná a chemická stabilita a použitelnost v magnetických, optických, elektrických a tepelných podmínkách, z něj dělají velmi všestranně použitelný materiál. (Chen et al. 2018) Běžně jsou keramické komponenty vytvářeny ze směsi prachu s pojivou (či bez ní) a dalšími aditivami za použití konvenčních technologií jako lití do forem, vytlačování atd.

Tyto metody mají své specifické limitace zejména v časové náročnosti a nákladech na výrobu. Konvenční metody nedokáží vytvořit komplexní vnitřní tvary a struktury propojenými dutinami, jelikož je většinou zapotřebí odlévání do forem. Na druhou stranu je velmi nepraktické vytvořené komponenty mechanicky opracovávat, jelikož kvůli vysoké tvrdosti dochází k silnému opotřebení nástrojů a výrobek je díky křehkosti

náchylný k tvorbě prasklin či trhlin, nehledě na prakticky nemožné dosažení adekvátní povrchové úpravy a přesných požadovaných rozměrů.(Chen et al. 2018)

Tyto problémy značně ulehčila metoda Aditivních technologií, která z 3D CAD souboru, digitálně upraveného na 2D řezy či vrstvy, umožňující urychlení výroby, snížení nákladů nebo vytvoření více modelů naráz bez nutnosti následné složité povrchové úpravy. S rozvojem aditivních technologií se vyvinuly specifické metody pro zpracování keramiky. Dle předem připraveného plnidla ze kterého je model vyroben se mohou tyto metody dělit na práškové, kašové a velko-objemové.(Chen et al. 2018)



*Obrázek 25 Příklad geometricky náročné aplikace 3D tisku keramiky*

*([https://www.cad.cz/images/stories/aktuality/2013/10/tisk\\_keramiky-1351.jpg](https://www.cad.cz/images/stories/aktuality/2013/10/tisk_keramiky-1351.jpg))*

### **Kašové či polotekuté až tekuté náplně**

Tyto materiály většinou zahrnují tekuté či polotekuté systémy využívané spolu s jemnými keramickými částicemi jako inkoust nebo pasta. Kašovitá vrstva může být pak vytištěna pomocí fotopolymerizace, inkoustovým tiskem či protlačováním. Existuje také možnost tepelné transformace keramických polymerů. Nejběžněji použité metody jsou Stereolitografie (SL), zpracování digitálním světlem (DLP), dvoj-fotonová polymerizace (TPP) spolu s inkoustovým tiskem (IJP) aj.(Chen et al. 2018)

Jak již bylo zmíněno ve výčtu metod, stereolitografie je proces, při kterém je využito světelného zdroje o specifické vlnové délce (většinou ultrafialového spektra) k selektivní úpravě povrchu tekutiny obsahující z většiny fotocitlivý monomer spolu s dalšími aditivami ve velmi malých dávkách (konkrétně foto-iniciátory). Světelně aktivovaný polymerizační proces obvykle pokračuje v posloupnosti bod-linie, linie-vrstva, poté vrstva za vrstvou. Model je po vytvoření jedné vrstvy posunut o výšku jedné vrstvy, uvolňující tak místo

pro vytvoření následující vrstvy. Stereolitografie má možnost vytvářet části s velmi kvalitním povrchem až na mikrometrové detaily.(Chen et al. 2018)

Mezi další procesy využívající plněné tekuté či polotekuté směsi patří např. DLP (Digital light processing), TPP (Two-photon polymerisation) nebo IJP (Inkjet Printing)

Dále se jako základní stavební materiál pro keramické objekty využívají práškové materiály. Technologie s nimi pracující jsou 3DP (three-dimensional printing), SLS (Selective laser sintering) nebo SLM (Selective laser melting) Dále jsou pak využívány metody velkoobjemové jako LOM (laminated object manufacturing) a FDM (fused deposition modelling) pro speciální aplikace.

#### **5.4. Kompozitní struktury**

3D tisk má u kompozitních struktur širokou škálu využití. Pomocí 3D tisku je možné tisknout například formy pro výrobu kompozitních dílů nebo jádra pro duté kompozitní díly. (Dobiáš 2018)

Pro kompozitní struktury existuje mnoho výrobních technologií, které lze pro výrobu použít. Výrobní technologií lze ovlivnit výsledné vlastnosti struktur. Jedná se především o vlastnosti jako jsou tuhost, pevnost, houževnatost a tepelná odolnost. Tyto vlastnosti ovlivňují zejména použité materiály, jejich obsah a rozmístění ve výztuži struktury. Volba výrobní technologie, také ovlivňuje náklady na výrobu a cenu finálního produktu. Proto je zvolení vhodné technologie výroby velmi důležitým krokem.(Dobiáš 2018) Formy vyrobené technologií 3D tisku jsou zhotoveny v automatizovaném procesu přímo z CAD souboru, což znamená, že je dosaženo velmi vysoké přesnosti a není nutné formu dodatečně ručně upravovat. Takto vyrobené formy jsou vhodné pro malé počty vyráběných kusů daného dílu. Pro výrobu forem se používají materiály odolné proti pryskyřicím, a teplotám do 200 °C.(Dobiáš 2018)

Jádra mohou být vytištěna z materiálů, které zůstanou po vytvrzení pryskyřice pevnou součástí výsledné struktury, nebo mohou být vytištěna z materiálů, které se po vytvrzení odstraní. Způsob odstranění jádra je závislý na materiálu jádra. K uložení výztuže na jádro lze použít například technologii ručního kladení nebo navíjení. Vytvrzení se provádí v peci s vakuem, nebo v autoklávu.(Dobiáš 2018)

Zahrnutí výroby jader do procesu výroby kompozitních dílů je relativně snadné a nepředstavuje žádné technologické komplikace. Před vytvrzením pryskyřice a odstraněním jádra jsou potřebné minimální úpravy standardně využívaného procesu. Vytvrzovací cyklus je nutno volit s ohledem na využití jádrové materiálu. Teplotní rozsah při vytvrzování je tedy hlavním rozdílem při využití technologie 3D tisku a je nutné jej respektovat tak, aby nedošlo k deformaci nosného jádra a tím znehodnocení celé struktury součástí. Jedním z možných rozdílů v procesu výroby je možnost odstranění jádra po vytvrzení předimpregnovaných či jiných materiálů tvořících pevnou a trvalou strukturu jádra, případně hotové součásti. (Dobiáš 2018)

Jádro může být navrženo dvěma různými způsoby. Jedním ze způsobů je vytvoření 3D modelu, poté je v softwaru 3D tiskárny automaticky vytvořena vnitřní struktura, která minimalizuje objem použitého jádrového materiálu, využitím například voštinových struktur vně jádra. Druhou možností je použít způsob, při kterém je vytvořen model s vnitřní strukturou, která například formou žeber zajišťuje stabilitu, a tedy tuhost jádra. Jádrový materiál musí být schopen odolávat teplotám a tlakům používaných při vytvrzování. Při návrhu jádra je důležité optimalizovat spotřebu jádrového materiálu s ohledem na tuhost jádra, čas tisku a také čas potřebný k odstranění jádra. (Dobiáš 2018) U hotového dílu se po odstranění jádra provádí začištění hran a případných přetoků pryskyřice. Nadále je možná finální povrchová úprava leštěním či lakováním.

## **5.5. Biotisk**

Orgánové transplantace, náhrady nebo vyspravení jsou pro pacienty s poškozenými orgány jedinými možnostmi řešení. Všude na světě je nespočetně žadatelů o transplantace a jejich seznamy se zvětšují. Jelikož dárčovství probíhá pouze v omezené míře a nedostatek darovaných orgánů vzrůstá, probíhá snaha o nalezení alternativ. Tak vznikla první bio-pletivová lešení, která podávají statickou podporu pro nově vznikající tkáňové struktury. Tato lešení mohou též fungovat jako dopravní prostředky pro zavedení nezbytných růstových faktorů pro kontrolu a podporu tkáňového růstu. Sestávají většinou z buněk a biomateriálů, které vytvářejí podmínky pro 3D biotisk, jenž je aktivně studovaná metoda tkáňového inženýrství. (Derakhshanfar et al. 2018)

Technologie 3D tisku umožňuje tvorbu funkčních tkání s komplexní architekturou z biomateriálů s již enkapsulovanými buňkami. Biomateriály v 3D biotisku slouží jednak

jako stavební materiál pro tištěné struktury, ale také jako podpora pro buňky. Musí tedy splňovat jak fyzikální, tak biologická kritéria. Znalost fyzikálních, chemických a biologických vlastností biomateriálů je proto nezbytná pro jejich optimální použití ve 3D biotisku.(Lavický 2017) Rozlišení tohoto typu tisku je 10–10000  $\mu\text{m}$ , což je velmi flexibilní rozsah umožňující celou řadu aplikací.(Derakhshanfar et al. 2018)

Ačkoliv se biotisk rozvíjí poměrně rychle, současné technologie neumožňují vytvářet celé funkční orgány. Ve 3D biotisku se používají biomateriály (nejčastěji hydrogely), které zpravidla obsahují enkapsulované živé buňky. Cílem 3D biotisku je dopravit tyto biomateriály s buňkami na přesně definovaná místa za účelem tvorby funkčních, trojrozměrných tkání. Samotný proces 3D tisku musí tedy být co nejšetrnější pro zachování viability buněk. Existuje několik technologií, které jsou k 3D tisku buněk používány. Mezi nejčastěji používané patří inkjet, stereolitografie a mikroextruze.(Lavický 2017)

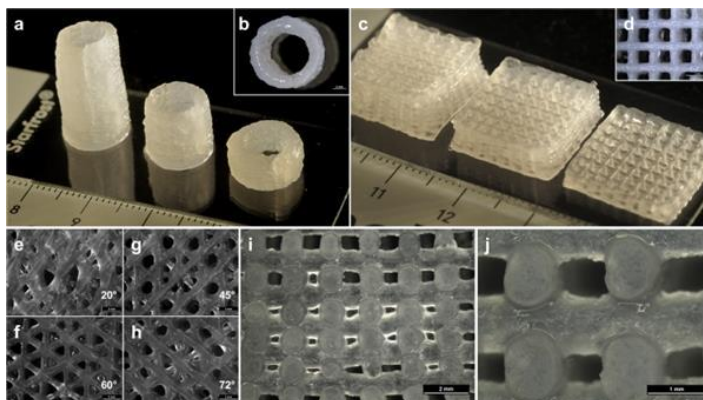
### **5.5.1. Mikroextruze**

Metoda mikroextruze je založena na vytlačování tekutých materiálů z kartuše s jehlou/tryskou, která je polohována v definovaných souřadnicích. Struktury jsou utvářeny po vrstvách a vytlačovaným materiálem jsou obvykle hydrogely, které tuhnou po extruzi z trysky. Hlavní výhodou této metody je relativně vysoká rychlost tisku a také možnost tisknout biomateriály s vysokými koncentracemi buněk. Její nevýhodou je nižší rozlišení a také možné snížení viability tištěných buněk kvůli smykovému napětí, ke kterému při tisku dochází (Ozolat a Hospodiuk 2016). Vzhledem k tomu, že se v současnosti jedná o nejrozšířenější přístup k 3D organizaci buněk, sumarizuje tato práce biomateriály používané a vhodné pro mikroextruzi. (Lavický 2017)

Biologické inkousty jsou pro tuto metodu použitelné díky jejich viskozitě pohybující se v rozmezí  $30 - 6 \times 10^7$  mPa/s. Největší výhodou této metody spočívá v její jednoduchosti, různorodosti a předvídatelnosti. V porovnání s metodou Inkjet nabízí tato metoda větší hustotu buněk, ale pomalejší rychlost výroby a horší využitelné rozlišení tisku. Mezi další výhody patří také větší výběr materiálů a ekonomická nenáročnost vybavení. Existují však problémy provázející tento typ výroby. Jsou jím například nevhodnost určitých esenciálních biomateriálů pro tisk jako takový. Tisknutelné biomateriály zase nemusí splňovat správné vlastnosti pro širokou škálu výrobních parametrů. Tyto parametry jako

rychlost a teplota silně ovlivňují přežití buněk a celkovou tisknutelnost.(Derakhshanfar et al. 2018)

Ke smykovému napětí během extruze dochází při průchodu materiálu tryskou kartuše (stříkačky). Působí nejsilněji kolem stěn trysky a jeho intenzita klesá směrem do středu. Vlivem smykového napětí dochází k deformaci buněk, která může způsobit buněčnou smrt nebo vnitřní změny. Vliv smykového napětí lze snížit použitím roztoků materiálů, které při tisku vykazují nízkou viskozitu, použitím trysek s větším průměrem, nízké rychlosti průtoku materiálu (nízkého tlaku) a kónických trysek (Lavický 2017).



Obrázek 26 Pletivová lešení z biokompatibilních materiálů

(<https://www.3ders.org/images2017/clay-based-laponite-bioink-3d-bioprinting-scaffolds-optimal-drug-deliver-1.jpg>)

### 5.5.2. Inkjet biotisk

Tato technologie umožňuje tisk kapek s objemem v řádech pikolitrů (1 až 300 pl). Princip vypuzování kapek z tiskové hlavy je založen buď na tepelném článku nebo piezoelektrickém krystalu. Tiskem těchto kapek je vytvářena 3D struktura. Výhodou tohoto přístupu je efektivní a přesné vytváření malých vzorků. Zásadní nevýhodou je pak schopnost tisknout pouze roztoky o velice nízké viskozitě a koncentraci buněk. (Lavický 2017)

### 5.5.3. Stereolitografický biotisk

Ve stereolitografii se používají polymery, které po ozáření UV tuhnou. Rezervoár s tímto polymerem je řízeně ozářen – na hladinu je světelným paprskem vykreslen tvar



řezu strukturou. Polymer ztuhne, podložka se ponoří hlouběji do rezervoáru a proces se opakuje do vytvoření 3D struktury z mnoha vrstev. Použití laseru je zásadní výhodou stereolitografie (vysoká přesnost tištěných struktur). Nevýhodou je nízká rychlost tisku a nutnost využívat materiály síťovatelné pomocí UV záření, které navíc u buněk způsobuje poškození DNA. Tato technologie také neumožňuje kombinovat více materiálů, respektive buněk. Metoda se proto využívá v tkáňovém inženýrství pro tvorbu nosičů. (Lavický 2017)

## 6. Závěr

Snaha o experimenty s novými materiály, které by přinesly další možnosti využití a výhody stávající průmyslové výrobě neustále roste. 3D tisk nalézá uplatnění ve stále širším spektru průmyslových odvětví díky velkému množství vhodných materiálů od plastových filamentů, přes kovy, kompozitní materiály až po keramiku a biomateriály. Díky rychlosti výroby, pak budou schopny vyrábět kvalitní výrobky za nižší ceny. Výrobu také není nutné centralizovat, čehož firmy mohou využít při výrobě produktů blíž zákazníkům.

Čím dál více firem se začíná zaměřovat na digitalizaci, zjednodušování a zkracování výrobních procesů. Nejen kovové prototypy se tak již dají vytvářet v řádech dnů, nikoliv týdnů a nové výrobky je možné uvádět na trh v kratších intervalech. Rychlosti výrobního procesu a zároveň snižování hmotnosti spolu s konstantním zlepšováním jejich výkonnosti je dnes již často využíváno v letectví a kosmonautice, například u letadlových komponentů a raketových motorů nebo turbín, kde je žádoucí maximální přesnost a čistota výroby. S možností výběru nejjemnějších hrubostí kovových prášků včetně precizní kontroly ochranné atmosféry, zajišťující homogenitu a pevnost materiálu je prášková metalurgie schopna dosáhnout těch nejvyšších kvalit a přesností.

V současné době však technologie tisknutí kovů není příliš komerčně rozvinuta na rozdíl například od tisku plastových a kompozitních součástí. Hlavním důvodem je její vysoká ekonomická náročnost. Nejen, že samotné výrobní stroje vyžadují obrovskou investici, také materiály na výrobu jsou prozatím velmi drahé, ceny dosahující až stovek amerických dolarů za kg. Dále je obtížné, díky specifickým vlastnostem kovových materiálů, jako vysoké teploty tavení, použít jiných metod, než těch využívající prášková

lože jako DMLS, SLM atd. Díky tomu je výroba kovových součástí prozatím omezena na specializované produkty. S narůstajícím zájmem výrobních závodů však našlo svůj prostor i malé množství automobilových komponentů, vyráběné metodami práškových loží, které budou postupem času nahrazovat nejvíce namáhané součásti motorů nebo převodů. Typickým příkladem mohou být diferenciály, spojky, řemenice nebo planetové převody startérů, které se stále častějším použitím systémů start-stop musí být odolnější a výkonnější.

Další obrovský vývoj je očekáván ve zdravotnictví kde, spolu s biotiskem obsahujícím kmenové buňky, budou běžné personalizované protetické náhrady a orgánové transplantace, což je dnes vzhledem k nedostatku dárců velmi žádané.

Metody aditivních technologií jsou neustále ve vývoji. Tyto technologie jsou však poměrně nové a nejsou zdaleka prozkoumány jejich plné možnosti. V nejbližší době je očekáván prudký vývoj ve všech oblastech. Očekává se, že s rozvojem 3D tisku přijde nová průmyslová revoluce. Komponenty budou levnější a dostupnější, než kdy předtím, bude převládat zakázková a personalizovaná výroba. Zároveň se zrychlí výrobní procesy, zmenší se skladovací prostory, sníží se náklady na materiály, čekací doby a plýtvání materiálem, neboť výrobky budou vyrobeny přesně, bez nutnosti náročného obrábění při dokončování výroby. Plný přechod na výrobu aditivními technologiemi je pouze další logické pokrokové stádium evoluce výroby a průmyslu. Do budoucna, jak se dnes již do značné míry ukazuje, přinesou aditivní technologie velké výhody a nové možnosti, kterých prozatímními klasickými metodami výroby není možné dosáhnout.

## **ZDROJE:**

ALBU, Sorin Cristian, 2018. Development on the production of a new type of extruder used in additive manufacturing, FDM technology. *Procedia Manufacturing* [online]. B.m.: Elsevier, **22**, 141–146 [vid. 2019-03-01]. ISSN 2351-9789. Dostupné z: doi:10.1016/J.PROMFG.2018.03.022

CAD.CZ, 2018. *Jeřábový hák vyrobený 3D tiskem* [online] [vid. 2019-03-24]. Dostupné z: <https://www.cad.cz/aktuality/77-aktuality/8657-jerabovy-hak-vyrobeny-3d-tiskem-otestoval-huisman.html>

CASTELLS, Ryan, 2019. *DMLS vs SLM 3D Printing for Metal Manufacturing* [online] [vid. 2019-03-13]. Dostupné z: <https://www.element.com/nucleus/2016/06/29/dmls-vs-slm-3d-printing-for-metal-manufacturing>

CHEN, Zhangwei, Ziyong LI, Junjie LI, Chengbo LIU, Changshi LAO, Yuelong FU, Changyong LIU, Yang LI, Pei WANG a Yi HE, 2018. 3D printing of ceramics: A review. *Journal of the European Ceramic Society* [online]. B.m.: Elsevier [vid. 2018-12-25]. ISSN 0955-2219. Dostupné z: doi:10.1016/J.JEURCERAMSOC.2018.11.013

DAĐOUREK, Karel, 2008. *Kovová skla* [online]. [vid. 2019-03-02]. Dostupné z: [http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady\\_kmt\\_magistri/NEkM/NEkM Dad/3kovskla.pdf](http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/NEkM/NEkM Dad/3kovskla.pdf)

DERAKHSHANFAR, Soroosh, Rene MBELECK, Kaige XU, Xingying ZHANG, Wen ZHONG a Malcolm XING, 2018. 3D bioprinting for biomedical devices and tissue engineering: A review of recent trends and advances. *Bioactive Materials* [online]. B.m.: Elsevier, 3(2), 144–156 [vid. 2019-02-02]. Dostupné z: doi:10.1016/J.BIOACTMAT.2017.11.008

DOBIÁŠ, Bc Jan, 2018. *3D tisk jako podpora kompozitních struktur* [online]. [vid. 2019-01-07]. Dostupné z: [https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/42319/dobiáš\\_2018\\_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/42319/dobiáš_2018_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

EKO-PLASTY.CZ, 2018. *Informace o bioplastu PLA* [online] [vid. 2019-01-07]. Dostupné z: <https://www.eko-plasty.cz/bioplasty-pla/>

GIBSON, Michael A., Nicholas M. MYKULOWYCZ, Joseph SHIM, Richard FONTANA, Peter SCHMITT, Andrew ROBERTS, Jittisa KETKAEW, Ling SHAO, Wen CHEN, Punnathat BORDEENITHIKASEM, Jonah S. MYERBERG, Ric FULOP, Matthew D. VERMINSKI, Emanuel M. SACHS, Yet-Ming CHIANG, Christopher A. SCHUH, A. JOHN HART a Jan SCHROERS, 2018. 3D printing metals like thermoplastics: Fused filament fabrication of metallic glasses. *Materials Today* [online]. B.m.: Elsevier, 21(7), 697–702 [vid. 2019-03-13]. ISSN 1369-7021. Dostupné z: doi:10.1016/J.MATTOD.2018.07.001

GKN SINTER METALS, nedatováno. *Automotive Applications of Metal Prototyping* [online] [vid. 2019-03-01]. Dostupné z: <https://www.gknpm.com/en/trends/market/automotive/>

HUSSAIN, G., Wasim A. KHAN, H. Anas ASHRAF, H. AHMAD, Hamza AHMED, Ali IMRAN, I. AHMAD, K. REHMAN a G. ABBAS, 2019. Design and development of a lightweight SLS 3D printer with a controlled heating mechanism: Part A. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture* [online]. B.m.: Elsevier [vid. 2019-03-01]. ISSN 2588-8404. Dostupné z: doi:10.1016/J.IJLMM.2019.01.005

KONEČNÁ, R., G. NICOLETTO, S. FINTOVÁ a M. FRKÁŇ, 2017. As-built surface layer characterization and fatigue behavior of DMLS Ti6Al4V. *Procedia Structural Integrity* [online]. B.m.: Elsevier, 7, 92–100 [vid. 2019-03-01]. ISSN 2452-3216. Dostupné z: doi:10.1016/J.PROSTR.2017.11.065

KONSTRUKTER.CZ, nedatováno. *3D tisk kovů: Jak omezit 3D tisk podpůrného materiálu* [online] [vid. 2019a-02-01]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/3d-tisk-kovu-jak-omezit-3d-tisk-podpurneho-materialu/>

KONSTRUKTER.CZ, nedatováno. *Začínáme s 3D tiskem kovů #2: Technologie 3D tisku kovů (SLM)* [online] [vid. 2019b-02-01]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/zaciname-s-3d-tiskem-kovu-2->

technologie-3d-tisku-kovu-slm/

LAVICKÝ, Josef, 2017. *Biomateriály pro 3D tisk kmenových buněk* [online]. B.m. [vid. 2019-02-05]. MASARYKOVA UNIVERZITA. Dostupné z: [https://is.muni.cz/th/iawgh/Biomaterialy\\_BP\\_01\\_bmxfhdpf.pdf](https://is.muni.cz/th/iawgh/Biomaterialy_BP_01_bmxfhdpf.pdf)

MATERIÁLOVÁ VĚDA, 2011. *Kovová skla* [online] [vid. 2019-03-13]. Dostupné z: <http://materialovaveda.blogspot.com/2011/06/kovova-skla.html>

MIRÓN, V., S. FERRÁNDIZ, D. JUÁREZ a A. MENGUAL, 2017. Manufacturing and characterization of 3D printer filament using tailoring materials. *Procedia Manufacturing* [online]. B.m.: Elsevier, **13**, 888–894 [vid. 2019-03-02]. ISSN 2351-9789. Dostupné z: doi:10.1016/J.PROMFG.2017.09.151

OZBOLAT, Ibrahim T. a Monika HOSPODIUK, 2016. Current advances and future perspectives in extrusion-based bioprinting. *Biomaterials* [online]. **76**, 321–343 [vid. 2019-02-05]. Dostupné z: doi:10.1016/j.biomaterials.2015.10.076

PLASTICSYSTEMS.CZ, 2019a. *Tváření plastů ABS* [online] [vid. 2019-01-07]. Dostupné z: <http://tiefziehen.com/cz/ABS/>

PLASTICSYSTEMS.CZ, 2019b. *Tváření plastů PC* [online] [vid. 2019-01-07]. Dostupné z: <http://tiefziehen.com/cz/PC/>

PROCHAZKA, nedatováno. *SLA-Stereolitografie SPŠ na Proseku Bc. Lukáš Procházka iPro 9000 XL iPro 8000 MP 3D modely vyrobené technologií SLA 3D modely vyrobené technologií SLA* [online]. [vid. 2019-03-01]. Dostupné z: <http://www.sps-prosek.cz/soubory/S/CAX/SLA.pdf>

PRŮŠA, Josef a Michal PRŮŠA, 2014. *Základy 3D Tisku* [online]. [vid. 2019-03-01]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/wp-content/uploads/zaklady-3d-tisku.pdf>

ROMANOFF CORP., 2018. *Solidscape 3D Printers* [online] [vid. 2019-03-01]. Dostupné z: <https://www.romanoff.com/3d-printers/solidscape.html>

SAUNDERS, Marc, 2018. *You can build it, but can you finish it?* [online]. 2018. [vid. 2019-02-05]. Dostupné z: <https://www.linkedin.com/pulse/you-can-build-finish-marc-saunders>

ŠTOKMAN, Michal, 2011. *SOUČASNÉ TRENDY VE VÝROBĚ TRVALÝCH MODELŮ Z PROGRESIVNÍCH MATERIÁLŮ* [online]. Brno [vid. 2019-03-20]. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30292460.pdf>

VÍT, Tomáš, 2016. *Za stereolitografii přístupnější (recenze stolní 3D tiskárny)* [online] [vid. 2019-03-01]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/form-2-za-stereolitografii-pristupnejsi-recenze-3d-tiskarny/>