



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

**VYUŽITÍ METOD 3D TISKU V AUTOMOBILOVÉM
PRŮMYSLU**

3D PRINTING METHODS IN AUTOMOTIVE INDUSTRY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vojtěch Juhász

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Fojtášek, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	Vojtěch Juhász
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Jan Fojtásek, Ph.D.
Akademický rok:	2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Využití metod 3D tisku v automobilovém průmyslu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

S rozšiřováním možností 3D tisku na další materiály kromě plastu získává tato technologie uplatnění nejenom při rychlé výrobě prototypů, ale také v sériové výrobě komponentů, které jsou běžnými metodami obtížně vyrobitelné vzhledem ke svému tvaru. Uplatnění technologie 3D tisku tedy získává uplatnění při výrobě turbodmychadel či komplikovaných nosných částí karoserie vozidel.

Cíle bakalářské práce:

Práce se bude zabývat využitím technologie 3D tisku při sériové výrobě v automobilovém průmyslu.

Práce bude obsahovat:

- rešerši základních typů 3D tisku,
- popis jednotlivých druhů tiskáren,
- přehled využití metod 3D tisku při výrobě komponent pro automobily,
- zhodnocení hlavních výhod a nevýhod této technologie.

Seznam doporučené literatury:

REDWOOD, B., SCHÖFFER, F., GARRET, B. The 3D printing handbook: technologies, design and applications. Amsterdam: 3D Hubs, 2017. ISBN 978-908-2748-505.

KUMAR, L. J., PANDEY, P. M., WIMPENNY D. I. 3d printing and additive manufacturing technologies. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2018. ISBN 978-981-13-0304-3.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá využitím 3D tisku v automobilovém průmyslu. Úvodní kapitola popisuje historii a výrobní proces. Další kapitola se zabývá nejpoužívanějšími technologiemi 3D tisku a následným popisem procesu tisku a základních materiálů. Poslední kapitola se zaměřuje na využití sériové a kusové výroby v automobilovém průmyslu.

KLÍČOVÁ SLOVA

3D tisk, Technologie 3D tisku, Automobil, Sériová výroba, Kusová výroba.

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with the 3D printing methods in automotive industry. The introductory chapter describes the history and manufacturing process. Next chapter deals with the most used 3D printing technologies and following description of the printing and also most used basic materials. Last chapter is focused on mass and piece production in automotive industry.

KEYWORDS

3D print, Technology of the 3D printing, Car, Mass production, Piece production.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JUHÁSZ, Vojtěch. *Využití metod 3D tisku v automobilovém průmyslu*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124437>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství, 37s. Vedoucí práce Jan Fojtášek.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Jana Fojtáška, Ph.D. a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 26. května 2020

.....

Vojtěch Juhász

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval mému vedoucímu práce Ing. Janu Fojtáškovi, Ph.D. za vstřícný přístup a trpělivost při vedení této bakalářské práce. Dále bych chtěl ještě poděkovat mé rodině a blízkým za podporu během studia.

OBSAH

Úvod	10
1 3D Tisk	11
1.1 Historie.....	11
1.2 Výrobní proces.....	13
2 Technologie 3D tisku	14
2.1 FDM – Fused Deposition Modeling	14
2.1.1 Popis FDM tiskárny	16
2.1.2 Materiály pro FDM technologii.....	16
2.2 SLA – Stereolithography	17
2.2.1 Popis SLA tiskárny	18
2.2.2 Materiály pro SLA technologii.....	18
2.3 SLS - Selective Laser Sintering	19
2.3.1 Popis SLS tiskárny	20
2.3.2 Materiály pro SLS technologii	20
2.4 LOM - Laminated Object Manufacturing.....	21
2.4.1 Popis LOM tiskárny	22
3 Využití 3D tisku v automobilovém průmyslu	23
3.1 Sériová výroba	24
3.1.1 Montážní přípravky	25
3.1.2 Automobily	27
3.2 Kusová výroba	28
3.2.1 Náhradní díly	28
3.2.2 Formule.....	29
Závěr	31
Seznam použitých zkratk a symbolů	37

ÚVOD

V současné době se ve všech průmyslech snaží společnosti při výrobě klást důraz na snižování nákladů, dopadu na životní prostředí a rychlosti výroby. Stejně tak je tomu i u automobilového průmyslu, u kterého se ale na druhé straně nesmí zapomínat ani na kvalitu a bezpečnost.

Proto se čím dál více automobilový průmysl zaměřuje na aditivní výrobu neboli 3D tisk, která s těmito problémy může pomoci. Jedná se o technologii založenou na vrstvení materiálu. Modely potřebných dílů se navrhují v CAD softwarech a ty se hned po navržnutí můžou poslat do zařízení pro 3D tisk na vytištění prototypu a při případném zjištění problému provést úpravu modelu. Oproti ostatním konvenčním metodám je tento postup mnohem rychlejší a levnější. Postupem času se zlepšujícími vlastnostmi materiálu a jednotlivými technologiemi začala aditivní výroba zařazovat i do výroby samotných dílů automobilu. U těchto dílů se ve většině případů nesmí zapomenout na dokončovací povrchové úpravy pro zlepšení kvality.

Práce se proto bude zabývat jak popisem těch nejzákladnějších 3D tisků a pro ně určených materiálů, tak i aktuální situací výroby v automobilkách za použití právě těchto technologií. A to v sériové i kusové výrobě.

1 3D TISK

Jedná se o aditivní výrobu, u které je základní princip pokládání jednotlivých tenkých vrstev materiálu na sebe, které se spojují tavením nebo lepením, na rozdíl od konvenčních metod, kde se materiál z polotovaru postupně odebírá. Výsledkem je trojrozměrný předmět, u kterého lze dosáhnout velmi dobré kvality a to i u složitějších tvarů. Pro tento proces se používá zařízení zvané 3D tiskárna, do které se nahrají data ve formátu STL (stereolithography), vyexportovaného z 3D modelu v CAD (computer-aided design) softwaru. 3D tisk se v dnešní době využívá hlavně pro kusovou výrobu a ve výrobě prototypů, kde výrazně snižuje cenu [1].

1.1 HISTORIE

Jako prvního člověka s myšlenkou 3D tisku můžeme považovat Ross F. Housholdera, který v roce 1979 podal patent na proces výroby trojrozměrných objektů ve vrstvách. O rok později v Japonsku přišel Dr. Hideo Kodama s patentovou přihláškou pro technologii Rapid Prototyping. Ta mu nebyla nikdy schválena, kvůli roční lhůtě pro podrobnější specifikace, které nedokázal dodat, v důsledku nedostatku financí [2] [3].

V roce 1983 se na scéně objevuje Charles Hull, což je člověk, který na rozdíl od dvou předchozích dokázal projekt dotáhnout do zdárného konce a dá se tak považovat za hlavní osobnost, co se vynálezu technologie 3D tisku týče. V daném roce zjišťuje, že pomocí UV záření lze vytvrdit tekuté polymery, po třech letech zkoumání v roce 1986 se stává držitelem patentu na technologii stereolitografie a zakládá společnost 3D Systems, ve které se jim podaří o rok později vytvořit první komerční 3D tiskárnu SLA-1 [3].



Obr. 1 První 3D tiskárna SLA-1; 1987

Od tohoto okamžiku se na trhu začínají objevovat nové metody jako je SLS (Selective Laser Sintering) a FDM (Fused Deposition Modeling). Metoda SLS vznikla roku 1988, díky Dr. Carlu Deckardovi. Základním principem této metody je spékání prášku pomocí laseru. Na metodu FDM si Scott Crump podal patent o rok později současně s vytvořením druhé velké společnosti, která se zabývá 3D tiskem a to Stratasys. U této metody jde o nanášení tenkých vrstev roztaveného materiálu na sebe. Po třech letech mu byl patent úspěšně udělen [5].

Po dobu dalších 10 let se na trhu objevilo spoustu nových, ne až tak v dnešní době populárních, technologií. Jako například LOM (Laminated Object Manufacturing) nebo BPM (Ballistic Particle Manufacturing), stejně s nimi přišly i různé adaptace na již zavedené technologie, v roce 2000 to bylo SLM (Selective Laser Melting), společností MCP Technologies. Roku 2007 se prosadila i společnost Sciaky Inc, která přišla s EBM (Electron-beam melting). Vzhledem k čím dál větší paletě technologií, založených na postupném vytváření těles za pomoci vrstev, se zavedl termín AM (Additive manufacturing), který všechny tyto technologie zastupuje. Narůstající počet společností vyrábějící různé 3D tiskárny, zapříčinil pád cen pod hranici 10 000 dolarů. Ovšem největší skok způsobil projekt open-source 3D tiskáren zvaný RepRap, zaštiťoval tiskárny, které byly až ze 70 % tvořené tištěnými díly. Za touto myšlenkou stál Dr. Adrian Bowyer. Na začátku roku 2009 se na trhu objevila první 3D tiskárna na základě konceptu RepRap, BfB RapMan 3D, která nastavila cenu 3D tiskáren kolem 1000 dolarů a to jak pro domácí, tak i průmyslové využití. Od této doby se začalo objevovat spousty nových vývojářů těchto tiskáren. Jako například tiskárny od Josefa Průši, které jsou v dnešní době známé jak v České republice, tak i ve světě [3] [6].



Obr. 2 Original Prusa i3 MK3S [6]

1.2 VÝROBNÍ PROCES

Princip výrobního procesu je u všech technologií 3D tisku stejný. Skládá se z 8 kroků, které si níže rozepíšeme.

1. CAD model – Prvním krokem je vytvoření 3D modelu požadovaného dílu za pomoci jednoho z CAD softwarů (Catia, SolidWorks, Autodesk Inventor, Creo, Blender atd.). Pro díly, u kterých již existuje fyzická podoba, lze využít 3D skener.

2. STL konverze – Po získání 3D modelu požadovaného dílu je zapotřebí převést data do STL formátu. Tento krok se stejně jako model dělá v CAD softwaru. STL formát popisuje pouze geometrii povrchu. V nynější době se používá u všech metod 3D tisku. Je zde už od roku 1987 a za tu dobu vznikly další formáty fungující na podobném principu jako STL. Těmi jsou AMF a 3MF. I přesto, že jsou u těchto dvou formátů určité výhody, které šetří čas, tak je mezi lidmi stále populárnější formát STL [7].

3. Nastavení parametrů – Se STL souborem se dále pokračuje do takzvaného sliceru. Jedná se o open-source software, který zvládne načíst STL soubor a následně nastavit parametry tisku pro danou tiskárnu jako je výška vrstvy, teplota trysky, teplota podložky, rychlost tisku, podpory, výplně a mnoho dalšího. Nejpoužívanější slicery jsou Cura, PrusaSlicer nebo Skeinforge.

4. Vytvoření G-codu – G-code se vygeneruje přímo ve sliceru. Je to soubor se souřadnicemi dráhy trysky a nastavením tiskárny.

5. Přesun dat do 3D tiskárny – Data v podobě G-codu se dále již mohou přesunout do 3D tiskárny. K tomu lze použít flash-disk, paměťovou kartu nebo WiFi síť, dle nabídky samotné tiskárny.

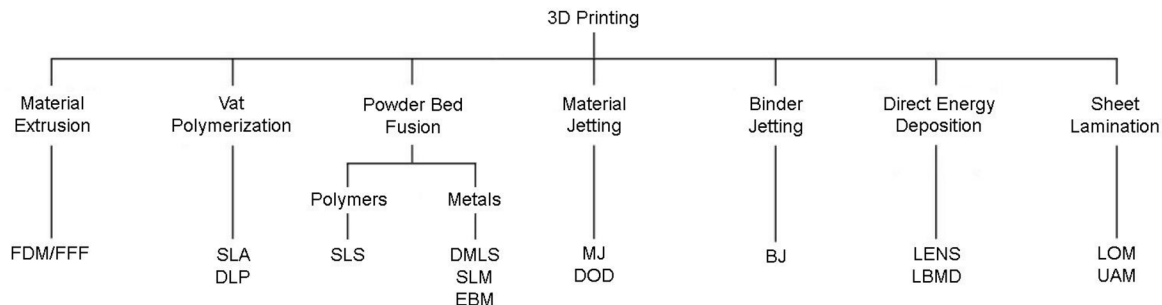
6. Tisk – Před samotným tiskem je dobré provést kalibraci tiskárny, a pokud to použítá technologie vyžaduje, nanést na pracovní platformu vrstvu materiálu s přílnými účinky. Po té pustíme program s námi vybraným modelem a čekáme na dokončení tisku. V případě výskytu problému, lze některé parametry tiskárny měnit přímo za chodu tiskárny.

7. Post-procesing – Podle použité technologie je zapotřebí vytištěný díl upravit. Nejčastěji se jedná o odstranění přebytečného materiálu nebo případné dotvrzování.

8. Použití – Po těchto 7 krocích je díl připraven pro následné použití.

2 TECHNOLOGIE 3D TISKU

V této kapitole lze nalézt nejpoužívanější technologie v oblasti aditivní výroby. Technologie se rozdělují podle způsobu nanášení materiálu, typu materiálu a zdroje tepla.

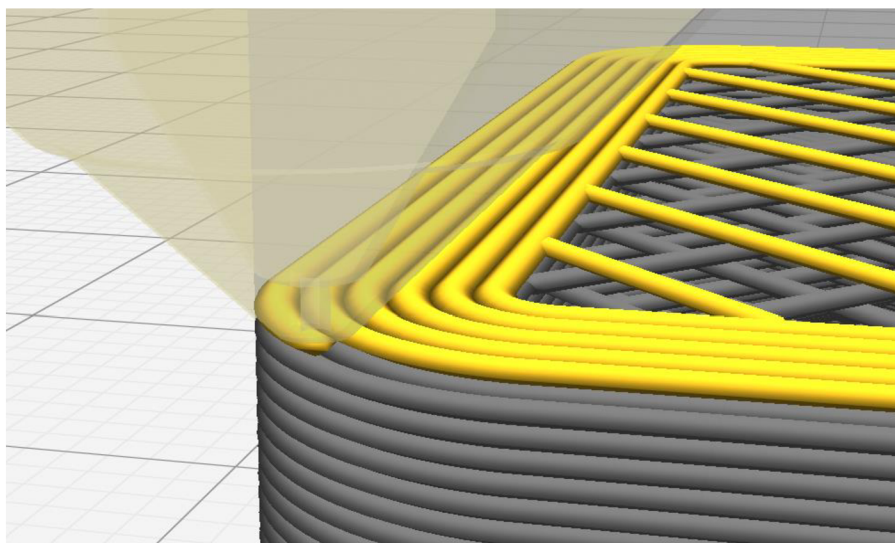


Obr. 3 Základní metody aditivní výroby [8]

2.1 FDM – FUSED DEPOSITION MODELING

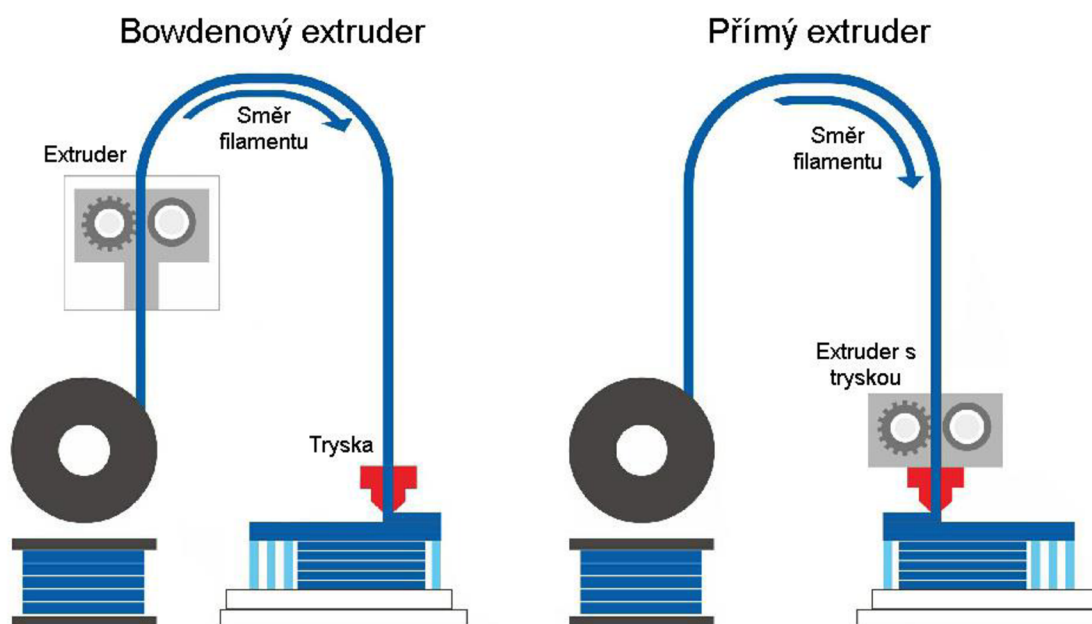
Jedná se o metodu 3D tisku, která se na trhu objevila mezi prvními a v dnešní době je velmi populární hlavně v domácím prostředí. Na metodu FDM (Fused Deposition Modeling) můžeme narazit i pod jiným názvem a to FFF (Fused Filament Fabrication), díky ochranné značce na technologii FDM, kterou si registrovala firma Stratasys. Označení FFF je využíváno u ostatních výrobců 3D tiskáren.

Technologie spočívá na tavení plastové struny a následném nanášení vrstev plastu. Velikost vrstev se pohybuje od 0,05 mm po 0,3 mm, tryskou o průměru 0,25 - 0,8 mm. První vrstva přijde na podložku, která je ve většině případů vyhřívána na určitý počet stupňů, dle použitého materiálu. Tím se zabrání deformaci, popřípadě odloupení spodních vrstev vlivem rychlého ochlazení materiálu. Další vrstvy se nanášejí na již ztuhlý materiál. Po celou dobu je na výrobek hnán vzduch za pomoci bočních větráčků. Tiskárna by měla být po celou dobu tisku v uzavřeném prostředí, ve kterém se eliminují nežádoucí vnější působení, jako je průvan a nekonstantní teplota. U dražších tiskáren tohoto typu, je tento problém vyřešen vlastní vyhřívanou komorou, kde kromě teploty podložky, můžeme nastavit i teplotu okolí [6] [9].



Obr. 4 Princip FDM tisku

Další věcí je způsob vedení filamentu, díky kterému můžeme rozdělit tiskárny na dva typy - vedení přímým nebo bowdenovým extruderem. Největším rozdílem mezi těmito typy je velikost retrakce. Retrakce je krátkodobé vytažení filamentu z trysky při ukončení jednoho tiskového procesu a následném přejezdu na následující místo tisku. Tento parametr je důležitý u složitějších výtisků, kde rozdíl retrakce o několik milimetrů, může znamenat navýšení doby tisku o několik hodin. U přímého vedení jsou hnací ozubená kolečka přímo u tiskové hlavy, což snižuje dobu tisku, díky menším retrakcím, které se pohybují kolem 1 mm. Na druhou stranu to znamená, že tisková hlava nese větší hmotnost a tím nepatrně snižuje životnost tiskárny. V případě bowdenu jsou hnací ozubená kolečka mimo tiskovou hlavu a filament je přes bowden veden do tiskové hlavy, kde je zapotřebí nastavit retrakci v rozmezí 3-5 mm. Další negativní vlastností toho způsobu je špatné vedené gumového filamentu [10].

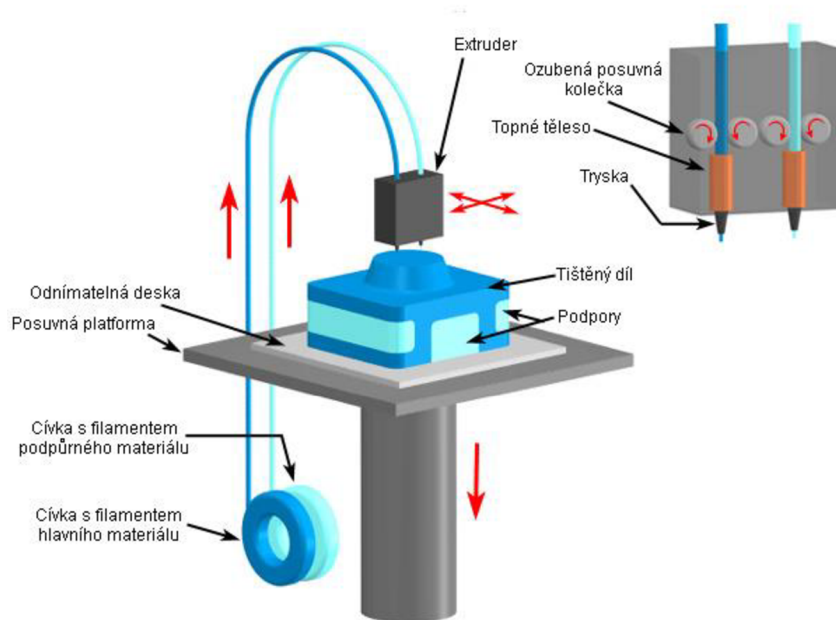


Obr. 5 Typy extruze u FDM technologie [11]

Největší nevýhoda této technologie spočívá v tisku, kde pod tištěným místem není žádný materiál a tak tiskárna bude tisknout do vzduchu, což způsobí v lepším případě nekvalitní povrch, v tom horším až celkové pokažení modelu. Pro předejití tohoto problému se využívají takzvané podpory, které se tisknou současně s modelem pod problémovými místy. Po dotisknutí se podpory odstraní a případné menší nedostatky, které se v důsledku podpor vyskytly, odstraní. K ještě lepšímu vyřešení tohoto problému se používají tiskárny s dvěma tiskovými hlavami, kde do jedné z těchto hlav je veden filament materiálu, z kterého chceme tištěnou věc a do druhé materiál, který je možný rozpustit ve vodě nebo jiné tekutině. Tím docílíme nejlepší možné kvality. Druhý extruder se může využít i k dvoubarevnému tisku. U tohoto typu tiskárny je velmi důležitá přesná kalibrace obou trysek od podložky, kde záleží na každé setině milimetru [12].

2.1.1 POPIS FDM TISKÁRNY

Na obr. 6 se nachází popis FDM tiskárny s přímým extruderem s dvěma tryskami pro tisk dvou materiálů najednou. Tiskárna využívá kartézský souřadnicový systém, používaný většinou FDM/FFF tiskáren. Lze narazit i na méně běžné systémy a to CoreXY, Delta, Polar nebo Scara [10].



Obr. 6 Schéma FDM tiskárny [13]

2.1.2 MATERIÁLY PRO FDM TECHNOLOGII

Velkou výhodou FDM technologie je rozsah použitelných materiálů za přijatelnou cenu a právě proto jsou v domácnostech tak hojně využívány. Pod nejznámější materiály můžeme zařadit PLA, ABS a PET/PETG, které jsou relativně levné s jednoduchými podmínkami pro tisk.

Pro následující materiály jsou zapotřebí 3D tiskárny vyšších cenových kategorií, kde je zapotřebí vysokých teplot, které se pohybují nad 300 °C. Levné tiskárny nemají šanci této teploty dosáhnout. Jedná se o materiály využívané především v průmyslovém odvětví a to právě i v automobilovém. Jsou to PC a PEI/ULTEM, kde se cena pohybuje na 2 - 10 násobku cen předchozích materiálů [10].

Tab. 1 Vlastnosti vybraných FDM materiálů [14] [15]

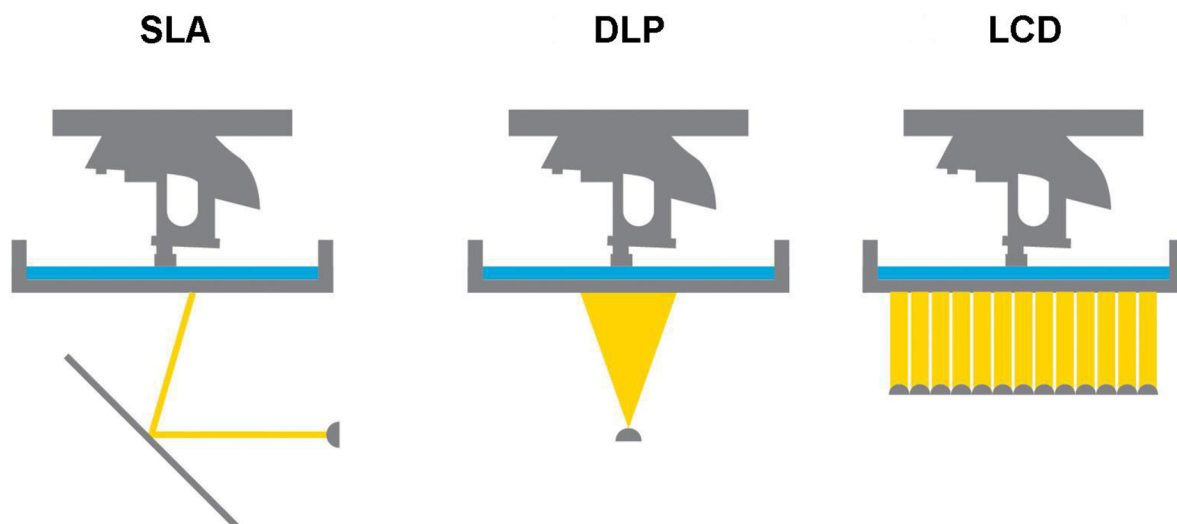
Materiál	PLA	PET/PETG	ABS	PC	PEI/ULTEM 9085
Teplota trysky [°C]	205-220	230-250	245-260	275-310	375-385
Teplota podložky [°C]	45-60	80-100	100-110	100-120	140-160
Pevnost v tahu [MPa]	50	55	33-40	55-60	70-80
Pracovní teplota [°C]	52	73	98	121	153

2.2 SLA – STEREO LITHOGRAPHY

SLA (Stereolitografie) je nejstarší technologie, na kterou ve 3D tisku můžeme narazit. I přesto je to dnes velmi přesná a využívaná metoda. Princip spočívá na postupném vytvrzování tekutého fotopolymery (pryskyřice) působením ultrafialového záření.

Nad nádobou s průhlednou fólií naplněnou fotopolymery se ve výšce vrstvy nad dnem nachází platforma, na kterou se tiskne požadovaný díl. Vzdálenost od platformy po dno nádoby určuje výšku tisku, která se pohybuje od 0,025 do 0,1 mm, to způsobuje velmi kvalitní povrch. Laser svítící přes dno nádoby vytvrzuje postupně první vrstvu. Po dokončení se platforma zvedne nepatrně výše než je druhá vrstva z důvodu odlepení materiálu z blány a po tomto kroku se vrátí zpět na hodnotu výšky druhé vrstvy a vytvrzování pokračuje. Stejně jako u metody FDM jsou zapotřebí podpory. Po dokončení tisku se výrobek vytáhne z fotopolymery a přesune se do kádinky s izopropylalkoholem, kde se omyje od zbývajících fotopolymery. Pro zlepšení mechanických vlastností se výrobek může po opláchnutí dále vytvrzovat UV zářením. Místnost, ve které se tiskárna nachází, musí být dobře větraná kvůli výparům z použitého materiálu [16].

Na stejném principu jako je stereolitografie jsou založeny další 2 metody a to DLP (Digital Light Processing) a LCD (Liquid Crystal Display). Stejně jako u SLA je vytvrzovaným materiálem tekutý fotopolymer, změna nastává jen ve způsobu vytvrzování, kde se nevyužívá laser, ale u DLP se používá projektor a u LCD obrazovka, díky tomu se najednou tvoří celá jedna vrstva výrobku. Rozdíl v použitých zdrojích světla je větší přesnost výtisku u projektoru než u obrazovky. Ovšem s použitím projektoru stoupá i cena tiskárny [17].



Obr. 7 Princip SLA/DLP/LCD technologie [18]

2.2.1 POPIS SLA TISKÁRNY

Obr. 8 popisuje hlavní části SLA tiskárny s laserem, který vytvrzuje materiál přes dno nádoby. Lze narazit i na tiskárnu, která vytvrzuje polymer z vrchu s velmi podobným principem.



Obr. 8 Schéma SLA tiskárny [19]

2.2.2 MATERIÁLY PRO SLA TECHNOLOGII

Materiály pro tisk SLA technologií, lze rozdělit na 4 základní skupiny - standardní, konstrukční, keramické a dentální. Veřejností nejvíce používaný je standard, lze s ním dosáhnout hladký, velmi detailní povrch, jakékoliv barvy, který se hlavně používá pro modely a prototypy. Pro strojírenské odvětví je nejvíce zajímavá konstrukční skupina, v té lze najít spoustu materiálů s různými mechanickými vlastnostmi, od velké pevnosti, pružnosti až po odolnosti tepla. Co se týče keramické pryskyřice, ta po dodatečném vypálení získává odolnost vůči teplu a tisk s tímto materiálem je určen pro pokročilejší uživatele. Dentální pryskyřice mají oproti zbytku dvojnásobnou cenu. Hlavními vlastnostmi je biokompatibilita a dosažitelnost velmi detailních tvarů, což se využívá při modelování korunek a můstků až po retenční rovnátka [20].

Tab. 2 Vlastnosti vybraných SLA materiálů [21]

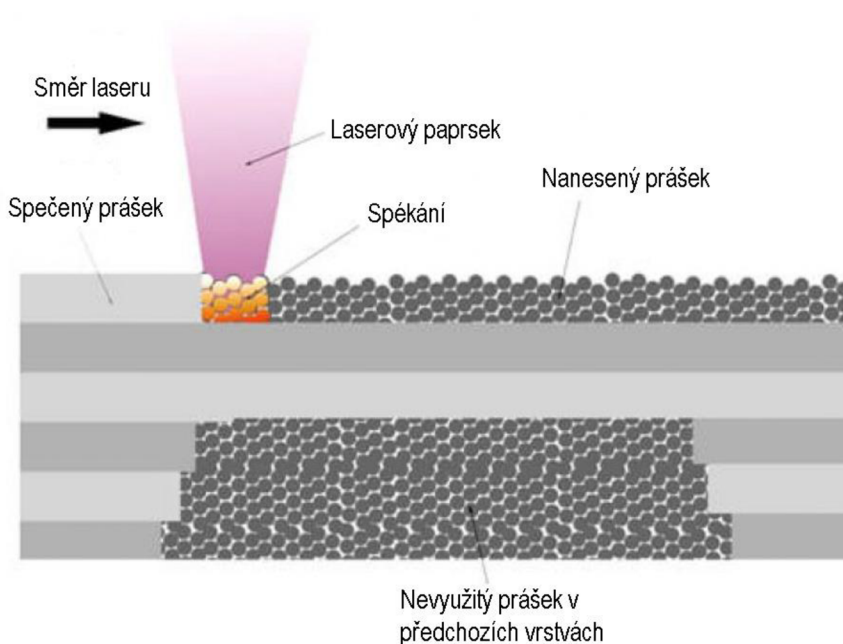
Materiál	Standard	Durable	Tough 2000	High Temp	Dental model
Pevnost v tahu [MPa]	65	31,8	46	48,7	61
Modul pružnosti v tahu [GPa]	2,8	1,26	2,2	2,8	2,7
Prodloužení [%]	6	49	48	2,3	5
Pracovní teplota [°C]	73	30	63	238	48,5

2.3 SLS - SELECTIVE LASER SINTERING

SLS (Selective Laser Sintering) je metoda, velmi podobná stereolitografii. Hlavními rozdíly mezi těmito metodami jsou použité materiály, zatímco u SLA se používá materiál tekutý, tak u SLS to je materiál, v podobě plastového prášku, s možností smíchání s jiným, vlastnosti vylepšujícím, materiálem. Druhým zásadním rozdílem je absence tisknutí podpor, které nahrazuje neroztavený materiál.

Tiskárny se většinou prodávají se dvěma zásobníky prášku, každý na opačné straně pracovní plochy. Podle velikosti zásobníků, pracovní plochy a nastavené výšky vrstvy, se ze zásobníků podávacím pístem vysunu určité množství materiálu, které se válcem rovnoměrně roznese na pracovní plochu. Následně CO₂ laser bodově speče první vrstvu a pracovní plocha se snese dolů na úroveň další vrstvy, kde válec z druhé strany nanese další materiál. Tímto postupem se pokračuje až do dokončení výtisku. Po celou dobu procesu se pracovní prostor nachází v uzavřené vyhřívané inertní atmosféře. Díky absenci podpor nevzniká u tisku žádný odpadní materiál. Největší nevýhodou je vysoká cena tiskárny. Další věcí, na kterou se při konstrukci musí myslet, jsou uzavřené dutiny uvnitř tištěného dílu, kde kvůli způsobu tisku, zůstává materiál v podobě prášku [22].

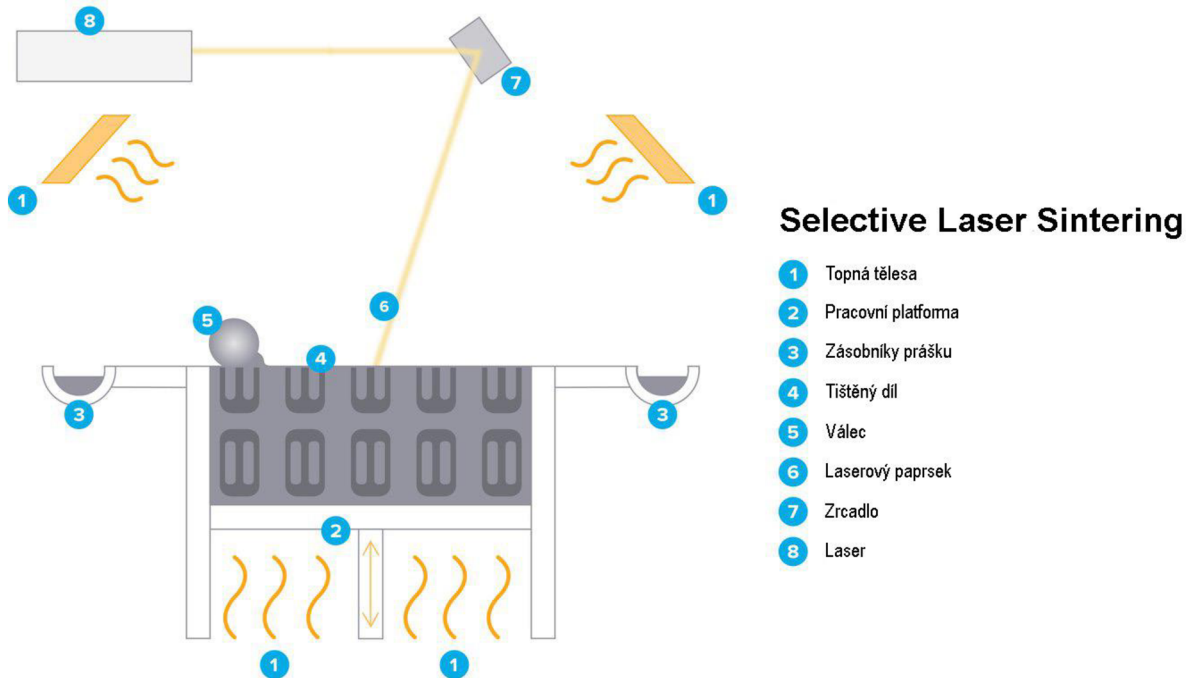
Od základní SLS metody se odvíjí další 2 velmi podobné technologie a to SLM (selective laser melting) a DMLS (Direct Metal Laser Sintering). Liší se především v použitých materiálech, pro metodu SLS se používají hlavně plastové materiály s různými příměsi. Pro kovové slitiny jsou vhodnější 2 zbylé metody, které dokážou pracovat s větší teplotou, kdy SLS spojuje materiál jen na molekulární úrovni, zatímco SLM s DMLS dokáže kompletně roztavit prášek a vytvořit homogenní díl [23].



Obr. 9 Princip SLS technologie [24]

2.3.1 POPIS SLS TISKÁRNY

Na obr. 10 se nachází popis SLS tiskárny. Všechny části jsou přítomny uvnitř vyhřáté komory s inertní atmosférou, k dosažení správných podmínek pro tisk.



Obr. 10 Schéma SLS tiskárny [25]

2.3.2 MATERIÁLY PRO SLS TECHNOLOGII

Používaný materiál je v podobě jemného prášku o velikosti 20-100 μm . Lze je rozdělit na 2 skupiny a to plastové materiály, využívané v SLS technologii a kovové materiály používány hlavně v technologii SLM/DMLS [26].

U plastových prášků lze použít stejné materiály jako u FDM, jen v podobě prášku. Nejpoužívanějším materiálem je nylon, využívaný pro jeho dobré mechanické vlastnosti srovnatelné s konvenčními metodami, jako je například vstřikování. Pevnost v tahu se pohybuje kolem 50 MPa a tepelná odolnost je 150 $^{\circ}\text{C}$. Pro ještě lepší vlastnosti lze přimíchat do nylonového prášku složky uhlíku, skla nebo hliníku. U tiskáren, které disponují větším rozsahem tepla, lze spékat i pokročilejší materiály jako je termoplast PEEK, u kterého se tepelná odolnost dostane až na 250 $^{\circ}\text{C}$ [27].

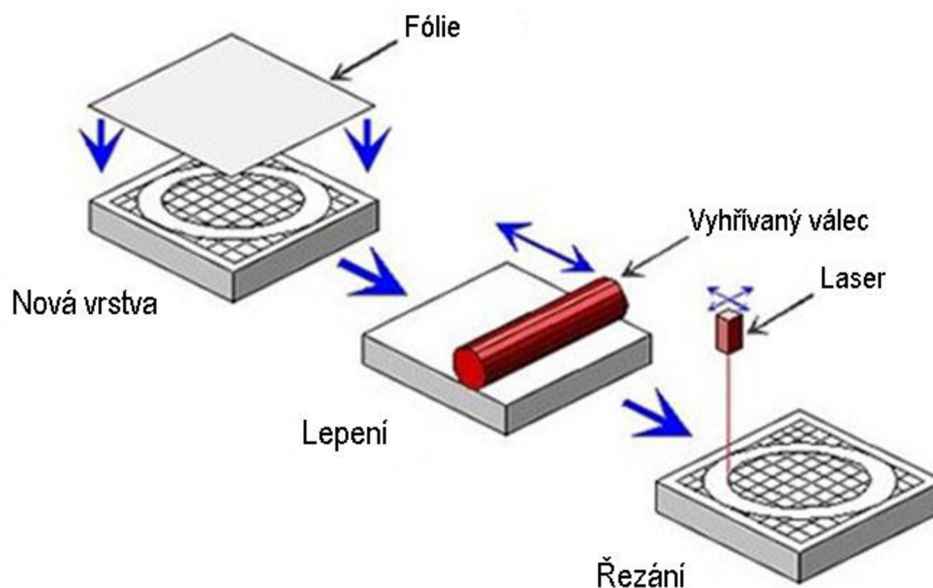
Tisk z kovových prášků se používá ve většině pracovních odvětví jako je automobilový, letecký, chemický nebo lékařský průmysl. Využívá se velká škála slitin na bázi železa, hliníku (AlSi10Mg), titanu (TiAl6V4), kobaltu (CoCr28Mo6) nebo mědi (CuNi2SiCr). Výsledkem jsou velmi kvalitní výrobky s dobrými mechanickými vlastnostmi [28].

2.4 LOM - LAMINATED OBJECT MANUFACTURING

Technologie LOM (Laminated Object Manufacturing) se začala komerčně využívat společností Helisys až po třech předešlých metodách. Stejně jako u ostatních metod se využívá principu vrstvení materiálu, ovšem v tomto případě již ne postupným přidáváním materiálu, ale stejně jak je tomu u DLP a LCD tvořením celé jedné vrstvy najednou [29].

Materiál používaný u této metody je ve většině případů plast a papír, na kterém je nanášena vrstva polyethylenu. Použitelný je i kov v podobě tenkostěnného plechu, ale ten je využíván jen výjimečně. Velikost vrstvy se pohybuje od 0,05 do 0,5 mm [30] [31].

Tiskárna je tvořena platformou, která se pohybuje vertikálním směrem a vedle ní je role používaného materiálu, která vede přes platformu do role s přebytečným materiálem. Po vyřezání první vrstvy nožem nebo CO₂ laserem, se platforma posune s první vrstvou dolů o výšku vrstvy materiálu. Dalším krokem je posun již vyřezané vrstvy pryč z místa platformy, kde jí zároveň nahradí materiál na další vrstvu. Následuje váleček, který je vyhříván na 60-80 °C, s přítlakem 10-37 MPa, tím dojde ke spojení dvou vrstev. Tento proces se opakuje až do konce tisku. Vytisknutý díl si vezmeme a ručně odstraníme přebytečný materiál, který se při procesu tisku pro snadnější odejmutí rozřezává na čtverce [32].

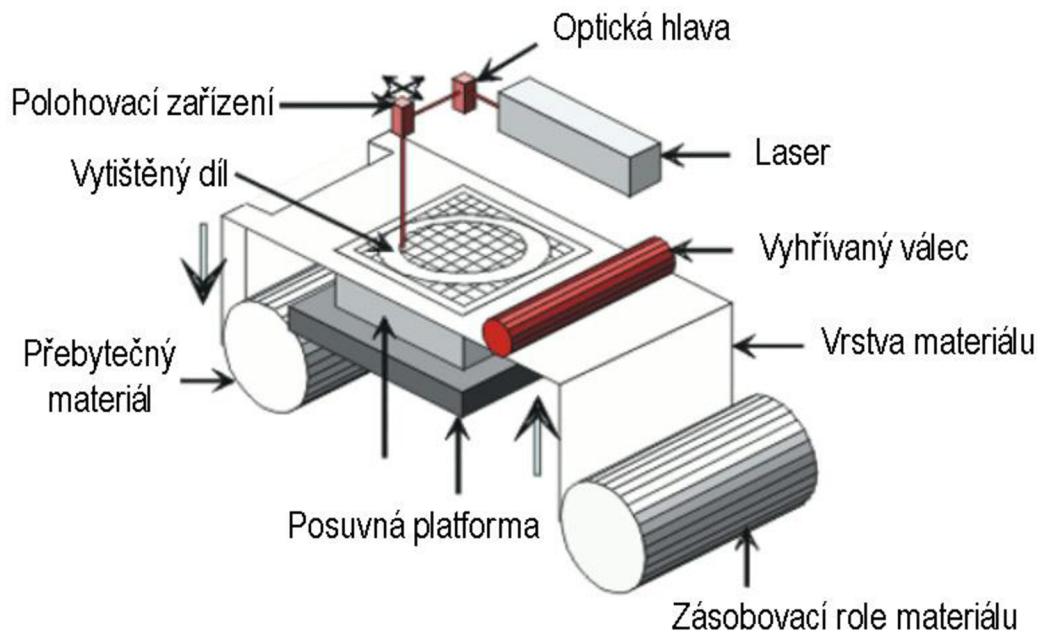


Obr. 11 Princip LOM technologie [33]

Podobně jako u SLS, zde nemusíme řešit žádné přídavné podpory. Samotné podpory nahrazuje přebytečný materiál. Na druhou stranu, tato skutečnost má i svoje nevýhody, v podobě nemožnosti tisku složitých a dutých součástí. Další nevýhodou je velké množství odpadního materiálu a špatné mechanické vlastnosti. Tato metoda je vhodná především pro vizuální účely větších výrobků [27].

2.4.1 POPIS LOM TISKÁRNY

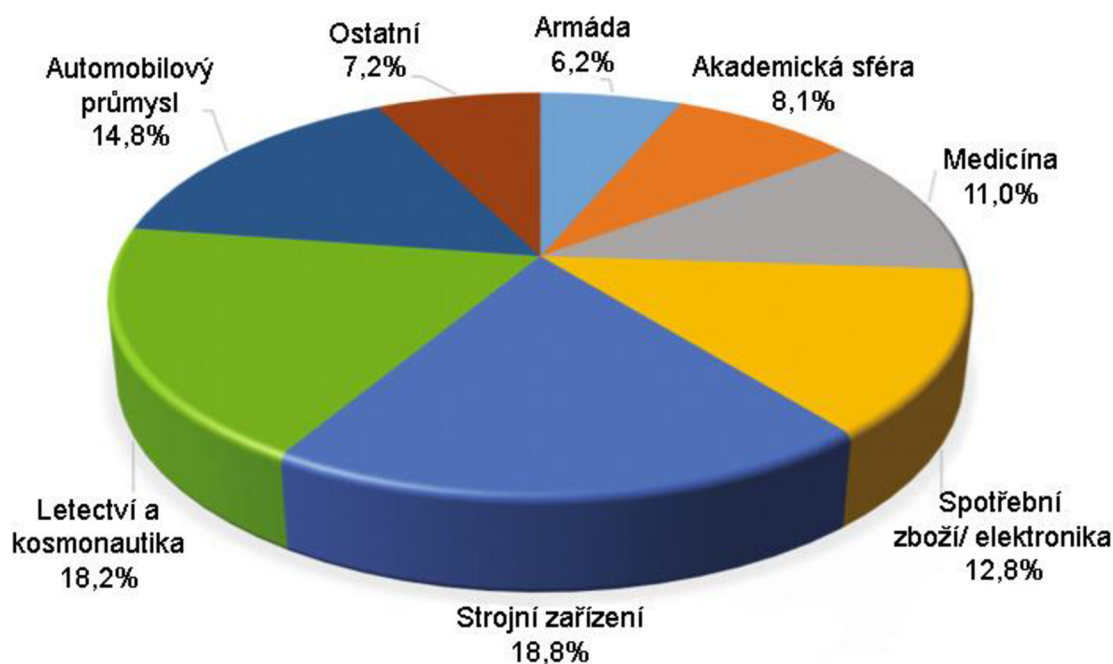
Obr. 12 popisuje schéma typické LOM tiskárny řezající pomocí laseru s dvěma rolemi materiálu. Jednou se zásobami a druhou s přebytečným materiálem.



Obr. 12 Schéma LOM tiskárny [33]

3 VYUŽITÍ 3D TISKU V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU

V dnešní době se technologie 3D tisku objevuje už u většiny průmyslových odvětví. Mezi ty nejvíce průlomové patří letecký a automobilový průmysl. V roce 2017 automobilový průmysl tvořil 14,8 % z celkového využití aditivní výroby na světě.



Obr. 13 Využití aditivní výroby v průmyslu; 2017 [34]

Použití je prozatím spíše pro malosériové využití, které se ovšem těší velmi dobrým výsledkům a úspěšně doplňuje konvenční postupy jako je obrábění na CNC strojích nebo vstříkování do forem.

Velmi důležitým faktorem v začínajícím používání 3D tiskáren je i fakt, že samotné společnosti vynalézající tyto technologie vidí automobilový průmysl, jako odvětví s velkým potenciálem, který lze dále velmi dobře rozvíjet. A tak se tyto společnosti snaží co nejrychleji vylepšovat své technologie a materiály pro potřeby automobilových závodů.

V současnosti se aditivní technologie používají jak pro sériovou, tak pro kusovou výrobu. U sériové výroby se tisknou různé funkční díly automobilu, přes montážní přípravky, až po výrobu celých karosérií. Kusová výroba se zaměřuje na prototypování, tisk náhradních dílů a ve vývoji formulí.

3.1 SÉRIOVÁ VÝROBA

Sériová výroba se prozatím plně neujala z důvodu vyšších cen materiálů a době tisku, která přesahuje dosavadní zavedené způsoby výroby. To se ovšem s větší vybaveností závodů touto technologií začíná postupně měnit a spousta společností má již určité plány na budoucí roky, které zahrnují použití aditivní technologie, právě ve zmiňované sériové výrobě. I přesto se již u některých automobilů tištěné díly objevily. Ovšem zatím se jedná o luxusnější auta, které se vyrábějí v menším počtu.

Největší průlom v této technologii jsou připisovány společnosti BMW, která se na tuto technologii zaměřuje už od roku 1991, kdy otevřela své Rapid Technologies Center, kde využívala především SLA technologii na tvorbu prototypů. Roku 2010 poprvé BMW využilo technologii pro malosériovou výrobu oběžných kol vodního čerpadla do svých závodních automobilů pro German Touring Car Masters. Použitý materiál pro oběžné kolo je slitina hliníku spečená za pomoci SLM tiskárny. Po 5 letech překročily hranici 500 vytištěných dílů. Výroba oběžných kol touto technologií pokračuje i dnes [35].



Obr. 14 Oběžné kolo vodního čerpadla [37]

V roce 2012 začaly technologii využívat i u luxusního automobilu Rolls-Royce Phantom, kde se již jednalo o větší série aditivně vyráběných dílů. Jde o některé plastové díly uvnitř vozidla. K roku 2016 společnost BMW oznámila 10 000 vytištěných dílů a pokračování využívání aditivní výroby u Rolls-Royce Dawn, pro který se tiskly montážní držáky na kabely. Celkově u této značky můžeme najít 10 tištěných dílů [36].

Prozatím největším zapojením do sériové výroby můžeme pozorovat u BMW i8 Roaster. Zde lze nalézt dva tištěné díly, jeden ve dveřích sloužící jako vodící lišta okna a druhý díl v systému stažitelnosti střechy. Oba díly jsou tištěny za pomoci SLM technologie s poměrně složitou geometrií. V roce 2018 bylo společností BMW oznámeno, že během deseti let bylo vytvořeno více než jeden milion kusů dílů, právě aditivní technologií [37].

Společnost Bugatti v roce 2016 pro sportovní automobil Bugatti Chiron navrhla několik funkčních dílů, vyrobené SLM technologií a to rovnou ze slitiny titanu (Ti_6Al_4). Kromě držáku spoileru a motoru s integrovanými chladícími kanálky, u kterých pevnost tahu dosahuje 1250 MPa a zároveň snížení hmotnosti o 53 %, se pustily i do brzdového třmenu. Ten musel vydržet teplotu brzdových kotoučů, která se může při rychlosti 375 km/h s brzdou sílou 1,35g pohybovat až kolem 1100 °C [38].



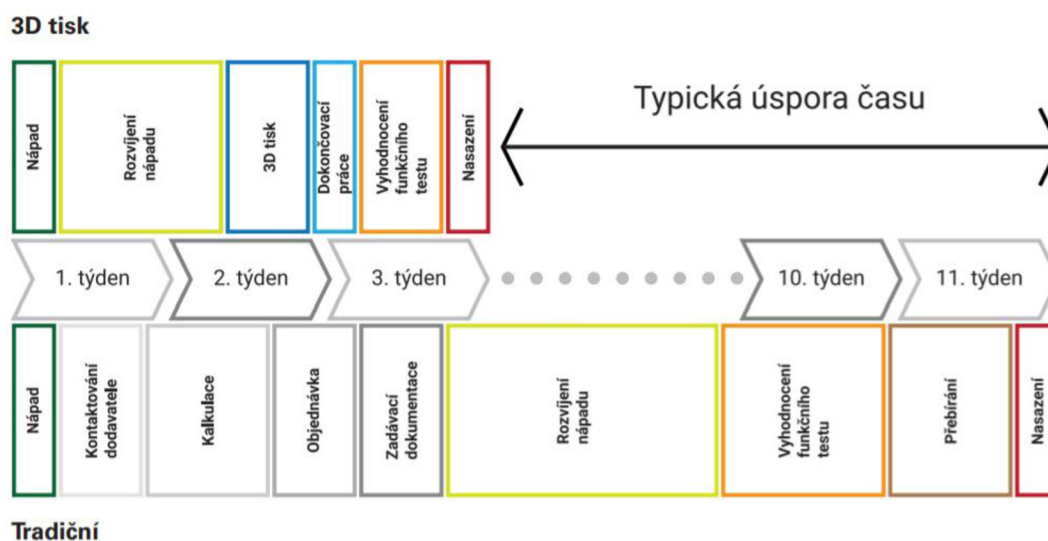
Obr. 15 Brzdový třmen při zatěžkávajících zkouškách [38]

Mezi poslední automobil, který obsahuje více jak 12 dílů vytvořených pomocí aditivní technologie, patří Jaguar XE SV Project 8 společnosti Jaguar Land Rover. Stejně jako u Bugatti Chiron se jedná o malosériovou výrobu. Vznikl v omezeném počtu a to 300 kusů [39].

3.1.1 MONTÁŽNÍ PŘÍPRAVKY

Prozatím nejvyužívanější a zároveň nejvýhodnější se ukázal sektor montážních přípravků, kde se 3D tisk začíná využívat ve většině automobilových závodů a mezi ty nejznámější patří Volkswagen, Ford a Opel. Všechny automobilky při zavedení do sériové výroby se shodují na pozitivních dopadech, které se projevují v kratší době výroby přípravku, poklesu cen a možnosti změn přípravku přímo ve výrobě.

Detailní zprávu o přechodu na aditivní výrobu lze nalézt u společnosti Volkswagen Autoeuropa, která v roce 2014 začala využívat 3D tiskárny Ultimaker. Největší výhoda spočívá v absenci jednání s externími dodavateli, což v průměru zkrátí nasazení přípravku do výroby o 8 týdnů [40].



Obr. 16 Porovnání času mezi tradiční výrobou a 3D tiskem [40]

Dalším dobrým důvodem pro přechod k 3D tisku je, že v případě nalezení chyby nebo určitého vylepšení už zavedeného přípravku do výroby, stačí provést jednoduchou úpravu CAD modelu a následný tisk, který díky umístění 3D tiskáren přímo v závodu u montážních linek, lze konzultovat s pracovníky a aplikovat jejich případné připomínky [40].

V závislosti na době a místě výroby se rapidně snížila i cena a to až na desetinu ceny původní. Společnost Volkswagen uvádí, že v roce 2016 díky využití aditivní technologie u 93% ze všech přípravků, ušetřila 160 000 eur. Mezi ně patří například ochrana kol, měřidlo trojúhelníkového okénka nebo polohovadlo značek. U ochrany kol externímu dodavateli trval projekt 56 dní s cenou 800 eur za díl. Po nasazení 3D tiskáren do závodu se doba projektu tohoto přípravku snížila na 10 dnů s propadem ceny na 21 eur za díl. Podobné zlepšení lze sledovat u všech přípravků, se kterými přešly na aditivní výrobu [40].



Obr. 17 Ochrana kol proti poškrábání [40]

Stejně jako ve společnosti Volkswagen, tak i ve Fordu se těší velmi dobrými výsledky. Společnost v sériové výrobě používá více než 50 těchto přípravků. V německém závodě mají specializovaný tým na výrobu pomocí aditivní technologie FFF. Ten následně po navržnutí přípravku pošle elektronicky řešení do závodů po Evropě, které vlastní 3D tiskárnu a další den po vytisknutí ho lze hned použít [41].

I přes veškeré výhody, které aditivní výroba přípravků má, se designový tým v Německu rozhodl pro další krok ke zlevnění a ušetření času. Až 50% z nákladů na výrobu přípravku je způsobeno tvorbou 3D modelů. Návrh přípravku, tak aby přesně lícovал s karosérií, se pohybuje mezi 2 – 4 hodinami. Proto začal Ford spolupracovat se společností Trinckle, která se zaměřuje na automatizovaný proces navrhování v oblasti aditivní technologie. Přímou pro společnost Ford vyvinuly software, který dokáže automaticky generovat přípravky jen za pomocí modelu karosérie s budoucími značkami. Dále se již přidávají jen předefinované úchyty, texty, atd. a přípravek je připraven k tisku. Nasazení tohoto softwaru snížilo čas návrhu z 2 - 4 hodin na 10 minut a tak i celková cena přípravku velmi klesla [42].

3.1.2 AUTOMOBILY

Dalším nápadem využití 3D tisku v automobilovém průmyslu je tisk skoro celého auta. Prozatím se o to pokoušejí jen menší firmy. Pár z nich již má hotové prototypy a plánují je zařadit ve velmi blízké budoucnosti do sériové výroby. Jedna z nepochybných výhod, představuje hmotnost auta, kdy se lze dostat až na polovinu hmotnosti klasického automobilu.

Mezi prvními vyrobenými prototypy automobilu pomocí 3D tisku je Blade Supercar společnosti Divergent Microfactories, vyrobeno v roce 2015. Automobil je kromě motoru, pneumatik a oken, vyroben jen za pomoci aditivní technologie a to i šasí, které je vyrobeno z hliníku a karbonu. Hlavním cílem bylo ukázat možnost výroby automobilů s velmi malým dopadem na životní prostředí. V roce 2017 se společnost Diverget 3D stala parterem automobilového výrobce PSA Group s cílem použití jejich technologie pro větší projekty [43] [44].

Momentálně nejbliže k sériové výrobě má Italská společnost E Electric Vehicle, která spolupracuje s Čínskou společností Polymaker. První zmínky o tomto projektu (LSEV) jsou z roku 2018. LSEV váží pouhých 450 kg a skládá se z pouhých 57 dílů. U ekvivalentního auta vyrobeného konvenčními metodami je hmotnost dvojnásobná a počet dílů dosahuje hranice 2 000 ks. Jediné části, které nejsou vytištěné 3D tiskárnou je část elektromotoru, šasí, skla a pneumatiky. Automobil je se skoro nulovou stopou na životním prostředí a rychlostí 70 km/h vhodný do městského prostředí [45].



Obr. 18 Automobil vyroben aditivní výrobou – LSEV [45]

První automobil se měl na ulicích měst ukázat již během roku 2019. Vzhledem k nedostatku financí se tak nestalo. Na konci roku 2019 se společnost obrátila na server Kickstarter, kde chtěla vybrat 500 000 EUR s příslibem výroby automobilu do konce tohoto roku. Jeho konečný název je XEV YoYo s cenou od 7 500 do 10 000 EUR. V únoru po 3 měsících od začátku kampaně se podařilo vybrat pouhých 20% z požadované částky a tak není jisté, zda se jim tento rok podaří zprovoznit sériovou výrobu [46].

3.2 KUSOVÁ VÝROBA

Hlavními díly kusové výroby jsou prototypy aut a jejich částí, které se v případě potřeby používají ve větrných tunelech pro zjištění nejideálnější aerodynamiky. Od tohoto postupu se v dnešní době postupně ustupuje díky softwarům, které zvládnou nasimulovat obtékání vzduchu s následným vyhodnocením.



Obr. 19 Větrný tunel společnosti Seat [47]

Mezi prvními, kteří si pořídili 3D tiskárnu byly týmy Formule 1 a to už v devadesátých letech. Od té doby ušla aditivní výroba dlouhý kus cesty, bez které by si již týmy v dnešní době nedokázali vývoj nových formulí představit. Dalším využitím, které se postupně dostává mezi lidi, je výroba náhradních dílů pro automobily, u kterých je sehnání náhradního dílu skoro nemožné.

3.2.1 NÁHRADNÍ DÍLY

Aditivní výroba v automobilovém průmyslu našla v posledních letech uplatnění i ve výrobě náhradních dílů. Především se jedná o díly pro veterány a jiné vzácné automobily. Pro většinu těchto automobilů se náhradní díly shánějí velice obtížně. Z tohoto důvodu se pár firem rozhodlo pro možnost výroby na jejich 3D zařízeních. Může se jednat o plastové, ale i kovové díly. U plastových, ne moc namáhaných dílů, lze tisk provést kdekoli, kde vlastní 3D tiskárnu a to i u někoho doma. Pro díl lepší kvality, lze oslovit jednu z firem, které se na výrobu náhradních dílů pro veterány zabývají.

Z důvodu požadavků na určitou kvalitu dílů, které jsou z kovu, je zapotřebí použití technologie SLM. Vzhledem k tomu, že pořizovací cena zařízení založeného na SLM technologii se pohybuje v řádech milionů korun a daný díl je kusovou záležitostí, tak i samotná cena vytištěného dílu je v desítkách tisíc korun v závislosti na velikosti a použitém materiálu. Na druhou stranu je touto technologií možné vyrobit jakýkoliv náhradní díl z kvalitnějšího materiálu, než byl ten původní. Jediná věc, která se pro uskutečnění tisku musí dodat je digitální model dílu [48].

Například jednoho z veteránů Ruston & Hornsby B2, kterého bylo mezi lety 1919 a 1924 celkově vyrobeno pouze 1 500 kusů, se pokoušejí opravit od šedesátých let. Z důvodu chybějících výkresů se ovšem tak nestalo a automobil zůstal v jejich továrně v Lincolnu. Roku 2016 se automobil dostal do rukou společnosti Siemens, pod kterou spadá i firma Material Solutions zaměřující se na 3D tisk. Těm se povedlo zhotovit pomocí aditivní výroby skříň řízení a další spíše estetické díly [49].



Obr. 20 Porovnání skříně řízení pro Ruston & Hornsby B2 [49]

Tisk náhradních dílů už zavádí i samotné automobilky, které tisknou nejžádanější díly pro své vzácnější automobily. Mezi ty největší patří Audi, BMW, Mercedes-Benz Trucks, Volkswagen nebo Porsche Classic. Porsche zavádí digitální knihovnu dílů, které budou tisknout jen na vyžádání. Prozatím se počet náhradních dílů pohybuje kolem 30 a to například pro Porsche 959. V budoucnu by mohlo přijít rozšíření knihovny až na 5% ze všech náhradních dílů [50].

3.2.2 FORMULE

To, že se díky aditivní výrobě, dá zvládnout vyrobit kvalitní díl s dobrou pevností, se ukazuje i u formulí. Používá se od studentských formulí až po formule F1, pro zlepšení výsledků na trati. Všechny 10 týmů F1 v sezóně 2019 využívalo aditivní výrobu k výrobě dílu nebo prototypů [51].

Aditivní výroba se začala využívat pro rychlé prototypování a k zlepšení aerodynamiky, kdy se prototyp vytiskne a následně se jde testovat do větrného tunelu. Podle výsledků je buďto pozměněn a podroben dalšímu testu nebo vyroben ve finální podobě. Příkladem může být tým formule 1 Williams, který dokáže za jeden měsíc vytisknout více jak 2000 dílů [52].

Mnoho formulí již obsahuje i tištěné díly využívané přímo v závodu. Přesnější informace o samotných dílech nejsou ve většině případů dostupné. Před třemi lety v roce 2017 McLaren oznámil minimálně 4 díly formule MCL32, vyrobené 3D tiskárnami Stratasys. K celkovému zlepšení dílu používají takzvanou topologickou optimalizaci. Ta dokáže vygenerovat optimální tvar dílu, při zachování velikosti a pevnosti dílu. Zároveň dokáže snížit hmotnost o desítky procent původního návrhu [53].

U F1 můžeme pozorovat i určité plány do budoucna vzhledem k uzavřeným spolupracím mezi týmy F1 a společnostmi zaměřenými na aditivní výrobu. Jmenovitě tým McLaren se Stratasys, Renault s 3D Systems a Williams s EOS [51].

ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce je zhodnocení vývoje technologií 3D tisku v automobilovém průmyslu a to hlavně z hlediska zapojení do sériové výroby. Práce je rozdělena na dvě části, jednou je základní seznámení s 3D tiskem a druhou následné zapojení do automobilového průmyslu.

Pro lepší pochopení problematiky jsem se na začátku věnoval samotným technologiím aditivní výroby a to těmi nejdůležitějšími. Patří mezi ně FDM, SLA, SLS a další, u kterých se od těch základních princip tisku odvíjí. Zde jsem relativně detailně popsal principy jednotlivých technologií a vypsals základní vlastnosti používaných materiálů. Při ohlédnutí zpět můžeme říct, že v automobilovém průmyslu lze uplatnit kteroukoliv z těchto technologií. Ovšem dominují 2 z těchto metod a to FDM, díky rychlosti a ceně tisku, používaný hlavně na prototypování a SLM pro možnost tisku velmi kvalitních dílů z kovu. Díly vytištěné touto metodou dosahují podobných vlastností jako díly vyrobené konvenčními metodami. S tím rozdílem, že díky možnosti tisku složitější geometrie, kterou SLM dokáže, lze výrazně zredukovat hmotnost, což je u automobilů velmi důležitý faktor, který následně zasahuje do rychlosti, spotřeby a jízdních vlastností automobilu.

V druhé části práce jsem se zabýval konkrétními případy využití v automobilovém průmyslu. A společně se sériovou výrobou jsem se podíval i na kusovou. Sériová výroba se prozatím drží dražších modelů automobilů, které patří spíše do malosériové kategorie. Ovšem o to zajímavější díly to jsou. Jako například Bugatti Chiron s tištěným brzdovým třmenem, který ukazuje jak kvalitní a spolehlivé díly lze s 3D tiskárnou vyrobit. Dalším velkým průlomem by mohl být tištěný automobil od společnosti XEV. Ty se blíží ke zdárnému konci a pokud se jim projekt podaří dokončit, věřím, že dopad na budoucí využití této technologie v automobilovém průmyslu bude veliký. Kusová výroba se využívá hlavně na výrobu prototypů a náhradních dílů. Hlavně myšlenka náhradních dílů je velmi zajímavá, kdy lze díky této metodě zachránit nádherné a unikátní automobily, u kterých je to se sháněním potřebných dílů velmi složité ne-li nemožné.

Na závěr bych napsal, že aditivní výroba v automobilovém průmyslu je takřka na začátku a je jen otázka času, kdy bude využívána v dost podobném měřítku jako ostatní konvenční metody a to i u automobilů za přijatelnou cenu.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] 3D tisk v kostce. *Materialpro3D* [online]. c2020 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/3d-tisk-v-kostce/>
- [2] HOUSHOLDER, Ross F. *Molding process*. United States. US4247508A. Uděleno January 27, 1981.
- [3] KOVAČÍK, Miroslav. 3D tisk v kostce. *3dfactory.cz* [online]. 27. 10. 2017 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://3dfactory.cz/2017/10/27/historie/>
- [4] Our Story. *3D Systems* [online]. c2020, 27. 10. 2017 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.3dsystems.com/our-story>
- [5] GREGURIĆ, Leo. History of 3D printing: When Was 3D Printing Invented? *All3DP* [online]. December 10, 2018 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/history-of-3d-printing-when-was-3d-printing-invented/>
- [6] STRÁTESKÝ, Ondřej, Josef PRŮŠA a Josef BACH. *Základy 3D tisku od Josefa Průši* [online]. Praha: Prusa Research, 2019 [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/kniha-zaklady-3d-tisku-josefa-prusi/>
- [7] KOČÍ, Jakub. Co je formát 3MF a proč by vás měl zajímat? *Prusa Printers Blog* [online]. 01. listopadu 2019 [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: https://blog.prusaprinters.org/cs/format-3mf-a-vse-kolem-nej_32140/
- [8] REDWOOD, B., SCHÖFFER, F., GARRET, B. *The 3D printing handbook: technologies, design and applications*. Amsterdam: 3D Hubs, 2017. ISBN 978-908-2748-505.
- [9] FFF/FDM technologie. *Materialpro3D* [online]. c2020 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/fff-fdm-technologie/>
- [10] 3D tisk: jak funguje FDM/FFF tiskárna? *Svět hardware* [online]. 21.02.2019 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.svethardware.cz/3d-tisk-jak-funguje-fdm-fff-tiskarna/48457-2>
- [11] Everything that You can Get about the 3D Printer Extruder. *Creality* [online]. b.r. [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://creality.com/info/everything-that-you-can-get-about-the-3d-printer-extruder-i00126i1.html>
- [12] 3D tiskárny Stratasys - FDM technologie. *Objet* [online]. c2018 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.objet.cz/3D-tiskarny/Stratasys-FDM>
- [13] Fused Deposition Modeling (FDM). *CustomPartNet* [online]. c2008 [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>
- [14] Filament Properties Table. *Simplify3D* [online]. c2020 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/properties-table/>
- [15] Ultem 9085. *Stratasys* [online]. c2020 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.stratasys.com/materials/search/ultem9085>

- [16] PRŮŠA, Josef. Představujeme Original Prusa SL1 – novou open-source SLA 3D tiskárnu. *Prusa Printers Blog* [online]. 25. září 2018 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: https://blog.prusaprinters.org/cs/original-prusa-sl1-nova-sla-3d-tiskarna_33979/
- [17] DLP a LCD 3D tisk. *Cotu* [online]. b.r. [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.cotu.cz/blog/148/dlp-a-lcd-3d-tisk>
- [18] WYSS, Johann. Masked Stereolithography 3D Printing. *DIYODE Magazine* [online]. 29, December 2019 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: https://diyodemag.com/education/exploring_3d_masked_stereolithography_3d_printing
- [19] Guide to Stereolithography (SLA) 3D Printing in 2020. *Formlabs* [online]. c2020 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: https://formlabs.com/blog/ultimate-guide-to-stereolithography-sla-3d-printing/?utm_source=twitter&utm_medium=social
- [20] 3D TISK: Materiály pro SLA tisk a její vlastnosti. *PB COM* [online]. c2017 [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: <https://www.pb-com.cz/3d-tisk.html>
- [21] Materials Data Sheet: Photopolymer Resin for Form 1+ and Form 2. *Formlabs* [online]. 22. 1. 2019 [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://formlabs-media.formlabs.com/datasheets/XL-DataSheet-June2019update.pdf>
- [22] P., Alexandra. The Complete Guide to Selective Laser Sintering (SLS) in 3D Printing. *3Dnatives* [online]. March,19 2019 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/selective-laser-sintering100420174/>
- [23] NOE, Rain. Production Methods: What's the Difference Between Selective Laser Sintering, Direct Metal Laser Sintering, Laser Melting and LaserCusing? *Core77* [online]. February,18 2014 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.core77.com/posts/26457/Production-Methods-Whats-the-Difference-Between-Selective-Laser-Sintering-Direct-Metal-Laser-Sintering-Laser-Melting-and-LaserCusing>
- [24] Selective laser melting. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Selective_laser_melting
- [25] Guide to Selective Laser Sintering (SLS) 3D Printing. *Formlabs* [online]. c2020 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://formlabs.com/blog/what-is-selective-laser-sintering/>
- [26] FANG, Liang, Yan WANG a Yang XU. *Preparation of SLS Polypropylene Powder by Solvent Method* [online]. June, 25 2018 [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: <https://www.preprints.org/manuscript/201806.0400/v1/download>
- [27] HODEK, Josef. *Aditivní technologie: Zpráva o stavu 3D tisku pro Českou technologickou platformu STROJÍTENSTVÍ, o.s.* [online]. 21.06.2013 [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/18792004-Aditivni-technologie-zprava-o-stavu-3d-tisku-pro-ceskou-technologickou-platformu-strojitenstvi-o-s-josef-hodek.html>

- [28] SLM® METAL POWDER. *SLM Solutions* [online]. c2018-2019 [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://www.slm-solutions.com/en/products/accessories-consumables/slmr-metal-powder/>
- [29] PALERMO, Elizabeth. What is Laminated Object Manufacturing? *Live Science* [online]. October, 9 2013 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.livescience.com/40310-laminated-object-manufacturing.html>
- [30] Laminated Object Manufacturing (LOM). *CustomPartNet* [online]. c2020 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.custompartnet.com/wu/laminated-object-manufacturing>
- [31] Nekonvenční metody obrábění 10. díl: Laminated Object Manufacture (LOM). *MM Průmyslové spektrum*. 17. 12. 2008n. 1., 2008(12), 38. ISSN 1212-2572.
- [32] HAGEDORN, Yves. 6 - Laser additive manufacturing of ceramic components: Materials, processes, and mechanisms. *Laser Additive Manufacturing: Materials, Design, Technologies, and Applications*. Woodhead Publishing, 2017, s. 163-180. ISBN 978-0-08-100433-3.
- [33] The LOM has a feed spindle and a take up spindle for the build material. *SlidePlayer* [online]. c2015 [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <http://slideplayer.com/slide/2431256/>
- [34] WOHLERS, T., CAMPBELL, I. *Wohlers report 2017: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry : Annual Worldwide Progress Report*. Fort Collins (Colorado): Wohlers Associates, 2017. ISBN 978-0-9913332-3-3.
- [35] BMW 3D Prints Water Pump Wheels for the German Touring Car Masters (DTM) Race Cars. *3DPrint.com* [online]. April 29, 2015 [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: <https://3dprint.com/61597/bmw-3d-printed-water-pump/>
- [36] SHER, Davide. Automotive 3D printing gets real as Rolls Royce Phantom integrates over 10,000 AM parts. *3D Printing Media Network* [online]. July 18, 2016 [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: <https://www.3dprintingmedia.network/bmw-groups/>
- [37] SHER, Davide. How major automakers use AM for production today, part 5: BMW additive manufacturing. *3D Printing Media Network* [online]. January 16, 2020 [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: <https://www.3dprintingmedia.network/bmw-additive-manufacturing/>
- [38] BOISSONNEAULT, Tess. How Bugatti uses SLM Solutions 3D printing for functional car parts. *3D Printing Media Network* [online]. March 12, 2019 [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: <https://www.3dprintingmedia.network/bugatti-slm-solutions-3d-printing/>
- [39] MISTRY, Hemal. JAGUAR XE SV PROJECT 8 RACES AHEAD WITH UNIQUE 3D PRINTED PARTS. *JLR TeamTalk* [online]. 2. 10. 2019 [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: <https://teamtalk.jaguarlandrover.com/news/jaguar-xe-sv-project-8-races-ahead-with-unique-3d-printed-parts>
- [40] Ultimaker, VW. Zvyšujeme efektivitu výroby. *3D wiser* [online]. 2. 10. 2019 [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: https://3dwiser.com/wp-content/uploads/2017/08/Volkswagen_Ultimaker_CZ.pdf

- [41] STAAK, Steven. Ford: Reinventing efficient manufacturing using 3D printing. *Ultimaker* [online]. 6 December 2018 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://ultimaker.com/learn/ford-reinventing-efficient-manufacturing-using-3d-printing>
- [42] SHER, Davide. Ford and trinckle further automate the design process for additively manufactured tools. *3D Printing Media Network* [online]. 9 November 2018 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.3dprintingmedia.network/ford-and-trinckle-further-automate-the-design-process-for-additively-manufactured-tools/>
- [43] BEDNÁŘ, Marek. DM Blade: supersport z 3D tiskárny. *Autoforum.cz* [online]. 29.6.2015 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.autoforum.cz/predstaveni/dm-blade-supersport-z-3d-tiskarny-udela-stovku-za-2-2-s/>
- [44] SCOTT, Clare. Blade and Dagger: Divergent 3D Makes Saving the Planet Look Sexy with 3D Printed Vehicles at CES 2017. *3DPrint.com* [online]. 10 January 2017 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://3dprint.com/161264/divergent-3d-blade-dagger-ces/>
- [45] TYSON, Matt. 3D PRINTER NEWS - 3D PRINTING SOLUTIONS: POLYMAKER & XEV LAUNCH FIRST MASS PRODUCED 3D PRINTED ELECTRIC CAR. *3D Printing Solutions* [online]. 20 March 2018 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.3dprintingsolutions.com.au/News/polymaker-xev-launch-mass-produced-3d-printed-electric-car>
- [46] XEV YOYO: 3D Printed Electric Car. *Kickstarter* [online]. 8 December 2019 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.kickstarter.com/projects/xev-auto/xev-yoyo-3d-printed-electric-car/description>
- [47] BARTON, Christopher. SEAT racing division Cupra uses 3D printed car parts to reduce vehicle fuel consumption. *WheelsJoint.com* [online]. 30 March 2020 [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://www.wheelsjoint.com/seat-racing-division-cupra-uses-3d-printed-car-parts-to-reduce-vehicle-fuel-consumption/>
- [48] BUREŠ, David. Jak získat náhradní díly na unikátní auta? Řešením je 3D tisk. *Auto.cz* [online]. 20. 9. 2017 [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/jak-ziskat-nahradni-dily-na-unikatni-auta-resenim-je-3d-tisk-109994>
- [49] PAROUBEK, Jiří. Veteránu byl navrácen život za pomoci 3D tisku. *fDrive.cz* [online]. 14. 1. 2019 [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://fdrive.cz/clanky/veteranu-byl-navracen-zivot-za-pomoci-3d-tisku-3234>
- [50] JAMIE D. Porsche to 3D Print Spare Parts for their Luxury Cars. *3Dnatives* [online]. 26 February 2018 [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/porsche-3d-printing-200220184/>
- [51] VOULPIOTIS, Filippos. Veteránu byl navrácen život za pomoci 3D tisku. *3Dnatives* [online]. 28 October 2019 [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/formula-1-turning-to-3d-printing-281020194/>
- [52] 3D Printing and Formula One: 5 Trends in Motorsports. *AMFG* [online]. 21 November 2018 [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://amfg.ai/2018/11/21/3d-printing-formula-one-5-trends-in-motorsports/>

- [53] SAUNDERS, Sarah. Stratasys at the Grand Prix: McLaren Formula 1 Races Ahead with 3D Printed Parts and Trackside 3D Printing. *3DPrint.com* [online]. 7 April 2017 [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://3dprint.com/170454/mclaren-stratasys-grand-prix/>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

<i>3MF</i>	3D Manufacturing Format
<i>ABS</i>	Acrylonitrile Butadiene Styrene
<i>AM</i>	Additive Manufacturing
<i>AMF</i>	Additive manufacturing file
<i>BJ</i>	Binder Jetting
<i>CAD</i>	Computer-Aided Design
<i>DLP</i>	Direct Light Processing
<i>DMLS</i>	Direct Metal Laser Sintering
<i>DOD</i>	Drop On Demand
<i>EMB</i>	Electron Beam Melting
<i>FDM</i>	Fused Deposition Modelling
<i>FFF</i>	Fused Filament Fabrication
<i>LBMD</i>	Laser-Based Metal Deposition
<i>LCD</i>	Liquid Crystal Display
<i>LENS</i>	Laser Engineering Net Shaping
<i>LOM</i>	Laminated Object Manufacturing
<i>MJ</i>	Material Jetting
<i>PC</i>	Polycarbonate
<i>PEI</i>	Polyetherimid
<i>PET</i>	Polyethylene Terephthalate
<i>PLA</i>	Polylactic Acid
<i>SLA</i>	Stereolitography
<i>SLM</i>	Selective Laser Melting
<i>SLS</i>	Selective Laser Sintering
<i>STL</i>	Stereolithography
<i>UAM</i>	Ultrasonic Additive Manufacturing