

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N0715A270012
Studijní zaměření: Průmyslové inženýrství a management

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Ekonomická analýza rozdílu použití konvenční a aditivní výroby

Autor: **Bc. Lucie SÝKOROVÁ**
Vedoucí práce: **Ing. Pavel RAŠKA, Ph.D.**

Akademický rok 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projekt, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Lucie SÝKOROVÁ**
Osobní číslo: **S20N0021K**
Studijní program: **N0715A270012 Průmyslové inženýrství a management**
Téma práce: **Ekonomická analýza rozdílu použití konvenční a aditivní výroby**
Zadávající katedra: **Katedra průmyslového inženýrství a managementu**

Zásady pro vypracování

1. Úvod do řešené problematiky
2. Analýza současného stavu
3. Návrh řešení
4. Testování řešení a analýza výsledků
5. Závěr

Rozsah diplomové práce: **50 – 70 stran**
Rozsah grafických prací: **0**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

1. DIEGEL, Olaf, NORDIN, Axel a MOTTE, Damien. *Practical Guide to Design for Additive Manufacturing*. Singapore: Springer Verlag, 2020. ISBN 978-981-13-8280-2.
2. YANG, Li, HSU, Keng, BAUGHMAN, Brian, GODFREY, Donald, MEDINA, Francisco, WIENER, Soeren, MENON, Mamballykalathil. *Additive Manufacturing of Metals: The Technology, Materials, Design and Production*. Wiener: Springer, 2017. ISBN 978-3-319-55127-2.
3. BIAN, Linkan, SHAMSAEI, Nima a USHER, John M. *Laser-based additive manufacturing of metal parts: modeling, optimization, and control of mechanical properties*. CRC Press, 2018. ISBN 978-1-4987-3998-6.
4. GEBHARDT, Andreas a HÖTTER, Jan-Steffen. *Additive manufacturing: 3D printing for prototyping and manufacturing*. Hanser Publishers, 2016. ISBN 978-1-56990-582-1.
5. GIBSON, Ian, ROSEN, David, STUCKER, Brent. *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing*. Springer, 2015. ISBN 978-1-4939-2112-6.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Pavel Raška, Ph.D.**
Katedra průmyslového inženýrství a managementu

Konzultant diplomové práce: **Ing. Martin Nozar, Ph.D.**
Regionální technologický institut

Datum zadání diplomové práce: **20. září 2021**
Termín odevzdání diplomové práce: **29. července 2022**

L.S.

Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan

Doc. Ing. Michal Šimon, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Touto cestou bych ráda poděkovala mému vedoucímu diplomové práce Ing. Pavlovi Raškovi, Ph.D., za jeho rady a skvělé vedení, které mi poskytoval po celou dobu zpracování práce.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Bc. Sýkorová	Jméno Lucie	
STUDIJNÍ OBOR	N0715A270012 „Průmyslové inženýrství a management“		
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Raška, Ph.D.	Jméno Pavel	
PRACOVNÍŠTĚ	ZČU - FST - KPV		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Ekonomická analýza rozdílu použití konvenční a aditivní výroby		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KPV	ROK ODEVZD.	2022
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	68	TEXTOVÁ ČÁST	68	GRAFICKÁ ČÁST	–
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Diplomová práce se zaměřuje na tvorbu ekonomické analýzy rozdílu použití konvenční a aditivní výroby. Použité SW programy zahrnovaly SolidWorks a PrusaSlicer.
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	Aditivní výroba, plastový 3D tisk, kovový 3D tisk, kalkulace nákladů, materiálové náklady, zpracovací náklady, vlastní náklady výroby, návratnost investice

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Bc. Sýkorová		Name Lucie	
FIELD OF STUDY	N0715A270012 “Industrial Engineering and Management“			
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Raška, Ph.D.		Name Pavel	
INSTITUTION	ZČU - FST - KPV			
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable	
TITLE OF THE WORK	The differences between conventional and additive manufacturing from an economic perspective			

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Industrial Engineering and Management	SUBMITTED IN	2022
----------------	------------------------	-------------------	---------------------------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	68	TEXT PART	68	GRAPHICAL PART	–
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The diploma thesis focuses on the creation of economic analysis the difference between the use of conventional and additive production. The software programs used included SolidWorks and PrusaSlicer.
KEY WORDS	Additive production, plastic 3D printing, metal 3D printing, cost calculation, material costs, production costs, own production costs, return on investment

Obsah

Úvod.....	13
1. Aditivní výroba	14
2. Techniky aditivní výroby, rozdělení a charakteristika.....	18
3. Materiály používané pro aditivní výrobu.....	24
4. Praktické využití aditivní výroby v průmyslových odvětvích	27
5. Cenové a parametrové porovnání dle druhů aditivní výroby.....	30
5.1. Cenové porovnání dle druhů aditivní výroby	30
5.2. Parametrové porovnání dle druhů aditivní výroby	31
6. Optimalizace a simulace aditivních výrobních procesů.....	32
7. Popis firmy Christ Car Wash	35
8. Plastový 3D tisk vybraných součástí	37
8.1. Součást PA70301.....	38
8.2. Součást PA54423.....	44
8.3. Součást PA70679.....	44
8.4. Součást PA69459.....	45
8.5. Součást PA3541709.....	46
8.6. Součást 00055107.....	46
8.7. Součást PA4209925.....	47
8.8. Součást PA3500588.....	47
9. Paretův diagram	48
10. Použitý software	49
11. Kalkulace nákladů plastového 3D tisku	50
11.1. Kalkulace součásti PA70301	51
11.2. Kalkulace součásti PA54423	52
Hodnoty konvenční výroby	52

11.3.	Kalkulace součásti PA70679	54
11.4.	Kalkulace součásti PA69459	55
11.5.	Kalkulace součásti PA3541709	56
11.6.	Kalkulace součásti 00055107	58
11.7.	Kalkulace součásti PA4209925	59
11.8.	Kalkulace součásti PA3500588	60
12.	Testování řešení a analýza výsledků	62
	Závěr.....	65
	Seznam použité literatury	66

Seznam obrázků

Obr. 1 Aditivní výroba	14
Obr. 2 Eliminace materiálového odpadu.....	16
Obr. 3 Aditivní výroba – realizace dílu.....	17
Obr. 4 Rozdělení aditivní výroby dle normy ISO/ASTM 52900:2015.....	18
Obr. 5 Schéma SLA	20
Obr. 6 Schéma FDM	21
Obr. 7 MJ - Vytváření trojrozměrného objektu.....	21
Obr. 8 Schéma SLS	22
Obr. 9 Schéma LOM	23
Obr. 10 Přehled materiálů a využití u jednotlivých metod aditivní výroby.....	24
Obr. 11 Energetické průmysl	27
Obr. 12 Letecký průmysl – prototyp dílu	28
Obr. 13 Endoprotéza kyčelního kloubu.....	29
Obr. 14 Průběh realizace endoprotézy kyčelního kloubu	29
Obr. 15 Topologický optimalizovaný proces návrhu.....	32
Obr. 16 Christ Car Wash – model myčky	35
Obr. 17 Samoobslužná mycí linka	36
Obr. 18 Systém pro úpravu vody	36
Obr. 19 Součást PA70301 - držák.....	38
Obr. 20 Nastavení filamentu	39
Obr. 21 Nastavení chlazení	39
Obr. 22 Nastavení výplně.....	40
Obr. 23 Nastavení rychlosti.....	40
Obr. 24 Nastavení G-code	43
Obr. 25 Tisk součásti PA70301.....	43
Obr. 26 Součást PA54423 - podstavec	44
Obr. 27 Součást PA70679 – přechodová trubice	45
Obr. 28 Součást PA69459 – držák s drážkami.....	45
Obr. 29 Součást PA3541709 – distanční podložka	46
Obr. 30 Součást 00055107 – objímka pro optický senzor	46
Obr. 31 Součást PA4209925 – distanční podložka	47
Obr. 32 Součást PA3500588 – krytka pro vysokotlaký pohyblivý ostřík.....	47

Obr. 33 Pareto diagram	48
Obr. 34 SW PrusaSlicer	49

Seznam tabulek

Tab. 1 Cenové porovnání dle druhů aditivní výroby	30
Tab. 2 Cenové porovnání dle druhů aditivní výroby	31
Tab. 3 Technické parametry tiskárny Ender 3	37
Tab. 4 Shrnutí tisknutých součástí	62
Tab. 5 Celkové roční úspory – plastová aditivní výroba.....	63
Tab. 6 Celková časová náročnost aditivní výroby	63

Úvod

Hlavním cílem diplomové práce je ekonomická analýza rozdílu použití konvenční a aditivní výroby.

Práce je rozdělena na dvě hlavní části a to teoretickou a praktickou část.

V první části práce jsou zmíněny a rozebrány pojmy aditivní výroba, výhody a nevýhody této výroby, praktické využití v průmyslových odvětvích, popis jednotlivých materiálů využívající se k aditivní výrobě a materiálové vlastnosti. Následně pokračuje popis cenového a parametrického porovnání dle druhů aditivní výroby, optimalizace a aktuální trendy.

Druhá část práce zahrnuje představení firmy Christ Car Wash s.r.o., ve které se vytvářela analýza aditivní výroby. Prvotní krok bylo definování potenciálních dílů, u kterých byly vysoké předpoklady k převedení z konvenční výroby na aditivní. Po vybrání jednotlivých dílů došlo k vytvoření modelů v SW SolidWorks. Tyto modely byly důležité kvůli následujícímu SW PrusaSlicer, který je potřebný k vytvoření čitelného kódu jednotlivých dílů pro 3D tiskárnu. Následně byly rozepsány jednotlivé součásti a technologický postup prostřednictvím aditivní výroby.

V rámci praktické části došlo ke kalkulačním identifikacím ke každé vybrané součásti. Určily se materiálové a zpracovací náklady pro konvenční a aditivní výrobu. Následně se mohl určit cenový rozdíl na 1 součást. Další krok ekonomické analýzy zahrnoval zhodnocení návratnosti investice.

Očekávaným přínosem této práce je snížení nákladů a časově efektivnější způsob výroby testovaných součástí.

1. Aditivní výroba

Aditivní výroba byla v posledních letech zavedena v mnoha oblastech. Pomocí 3D tisku se předměty z kovu, plastů, keramiky, skla, písku nebo jiných materiálů skládají ve vrstvách, dokud nedosáhnou svého konečného tvaru. Aditivní výroba je velmi inovativní trh, který podtrhuje množství různých výrobních postupů. Mnoho z těchto procesů vyžaduje následné tepelné zpracování vyráběných součástí. Požadavky na pec pro tepelné zpracování závisí na materiálu součásti, pracovní teplotě, atmosféře v peci a samozřejmě na postupu výroby aditiv. Průmyslovým výrobcům nabízí 3D tisk nové způsoby, jak zlepšit výrobní procesy, vyvíjet nové obchodní modely a podporovat inovace. [1], [8]

Od roku 1993 je zavedena řada terminologií popisujících proces používání tiskárny a SW CAD k růstu objektů „vrstvu pro vrstvě“ jako například: aditivní výroba, výroba ve volné formě, rychlé prototypování, vrstvená výroba a přímá digitální výroba atd. [22]

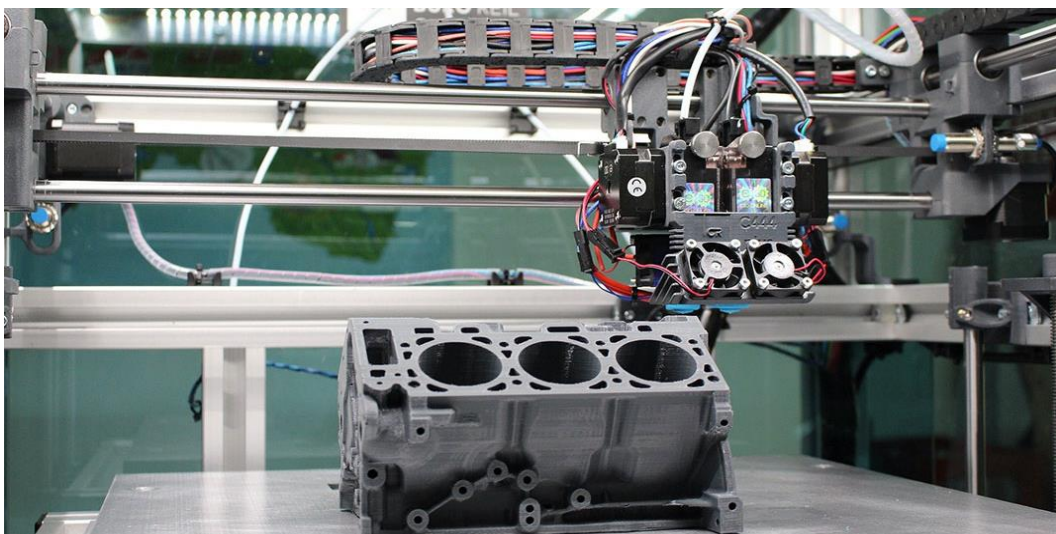
Všechny pojmy jsou v podstatě zaměnitelné, existuje však jedna výjimka, který rozlišuje dva hlavní a zásadní rozdíly při aditivní výrobě:

1. **Rapid Prototyping (RP)** – znamená vyrobít prototyp nové součásti
2. **Additive Manufacturing (AM)** – poskytuje možnost vyrobít jak prototypy, tak konečné komponenty

Tento rozdíl je zásadní, jelikož rychlé prototypování znamená, že součást je vyrobena jako kopie něčeho, co bude v závěru zpracováno tradičně, s využitím subtraktivní výroby.

Při této formě výroby lze použít různé materiály. Nejběžnějším typem materiálu jsou polymery a kovy. Tyto materiály jsou zvláště účinné pro malosériovou výrobu a pro minimalizaci odpadu. Další možné materiály vhodné pro tuto formu výroby jsou například lékařské a biochemické materiály nebo dokonce i čokoláda.

Při aditivní výrobě se rozlišuje tisk s pojivem a bez něj. V závislosti na výrobním postupu se pro následné tepelné zpracování používají různé typy pecí, a to systém bez pojiva a systém s pořadačem.



Obr. 1 Aditivní výroba

Systém Bez Pojiva

Při výrobě aditiv bez pojiv jsou součásti ve většině případů vyráběny laserovým tavením na práškové bázi na tiskové platformě. Mezitím se na trhu etablovaly také další výrobní postupy, které rovněž vyžadují odpovídající tepelné zpracování po výrobním procesu.

Systém s Pořadačem

Při 3D tisku se na stavbu dílu používají organická pojiva, která se odpařují při tepelném zpracování. Vytisknuté části mohou být vyrobeny z keramiky, plastu, kovu, skla nebo písku. V závislosti na odpařovacím objemu se používají pece s odstupňovanými bezpečnostními systémy pro odstraňování pojiva a slinování.

Aditivní výroba nabízí řadu výhod, ale zároveň obnáší i určité nevýhody. 3D výroba dokáže vyrobit kompletní součást bez potřeby nástrojů, snižuje závislost na upínacích přípravcích a zkracuje dobu výroby. Kromě toho je snížena potřeba ručního zásahu během výrobního procesu, protože většina procesu je automatizována. To vede ke snížení mzdových nákladů a umožňuje použití méně kvalifikovaných operátorů.

Aditivní výroba umožňuje okamžité změny v návrhu výrobku nebo výrobním postupu. U jiných výrobních metod vede vada výrobku často k zásadním úpravám ve výrobním procesu, aby se vada odstranila. Protože aditivní výroba obvykle používá jednu surovinu a lze ji digitálně ovládat, zjednodušují se změny, což opět usnadňuje optimalizaci produktu. [1]

Aditivní výroba zároveň umožňuje získávání výrobků či náhradních dílů dle potřeby či odhadu dalšího vývoje.

Přestože aditivní výroba nabízí řadu výhod, má také určité nevýhody, které ztěžují průmyslovým odvětvím a společnostem snadné přijetí 3D výroby. Výroba součásti může být pomalá, protože stroje pokládají jednu vrstvu najednou.

Mezi další nevýhody aditivní výroby patří celosvětový nedostatek odborných znalostí o technologii, velké počáteční investiční náklady a náklady na údržbu a nedostatek digitální infrastruktury potřebné k tomu, aby aditivní výroba mohla předvést všechny své schopnosti.

Mezi další nevýhodou lze zařadit nedostatek dobře vyškolených a kvalifikovaných techniků a inženýrů.

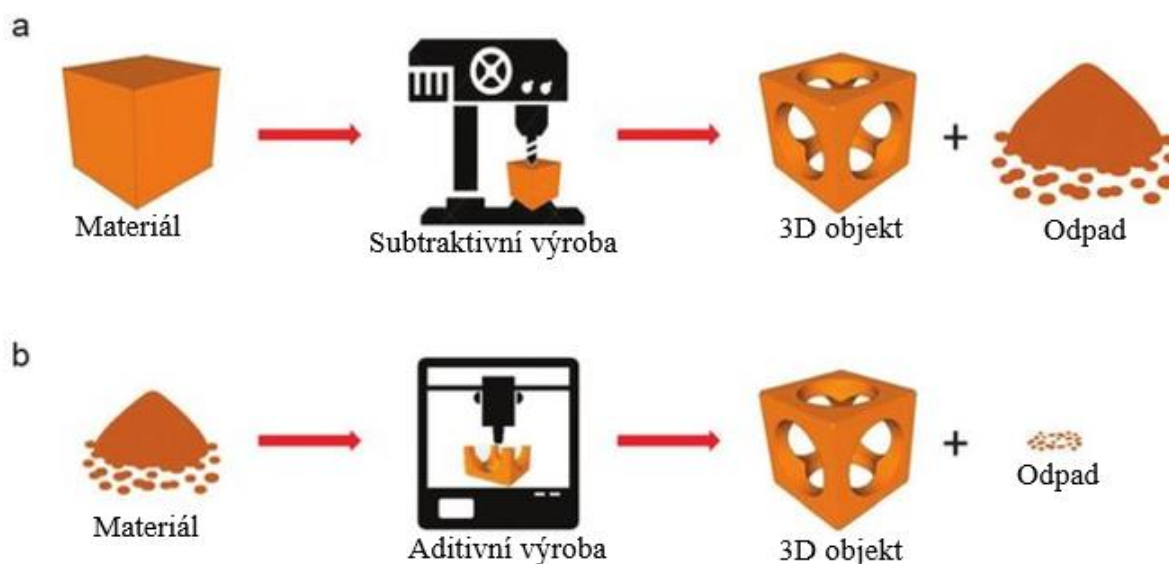
Tyto nevýhody je však možné řešit, jelikož systém aditivní výroby začíná čím dál tím více růst. [9], [11]

Technologický postup aditivní výroby

Definují se 2 základní výrobní technologické postupy, a to subtraktivní (konvenční) výroba a aditivní výroba.

U subtraktivní výroby se jedná o proces postupného odebírání materiálu. Materiál se odebírá tak dlouho, dokud nevznikne finální výrobek. Naopak u aditivní výroby se materiál postupně přidává. Rozdíl mezi subtraktivní a aditivní výrobou je především v tom, že dokážeme značně eliminovat plýtvání ve formě odpadu odebíraného materiálu. Například při obráběném kusu vznikne mnohem více třískového odpadu než při aditivním procesu ve formě 3D tisku. [8], [35]

Mezi základní výhody konvenční výroby patří především to, že se jedná o historicky ověřenou výrobu. Existuje tedy velké množství specializovaných osob v rámci konvenční výroby. Zároveň tato výroba disponuje velkou základnou podkladů a informací. Z ekonomického hlediska je výhodnější při velkosériové výrobě využívat standardní konvenční výrobu oproti aditivní. Mezi další výhodou patří například dobré mechanické vlastnosti, neboť finální produkt je vyroben z uceleného materiálu.

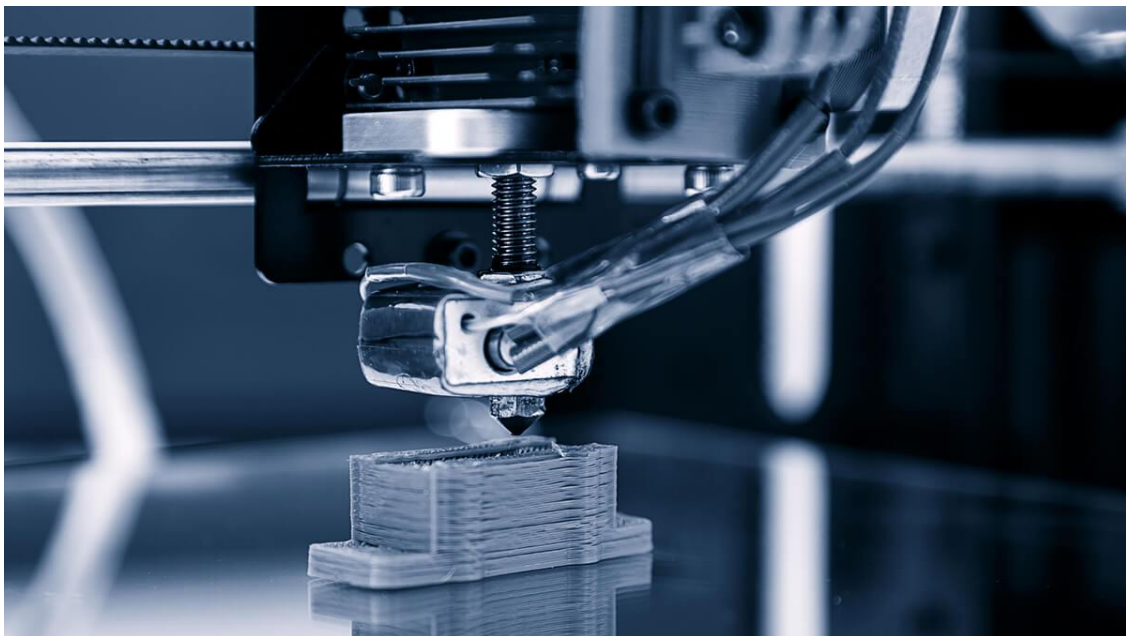


Obr. 2 Eliminace materiálového odpadu

Klíčové výhody aditivní výroby

- 1) **Svoboda designu:** Aditivní výroba používá materiály, které lze vytisknout na požadovaný design, čímž se odstraní omezení tuhých a nepoddajných materiálů. To umožňuje širší škálu designů. Navíc díly, které dříve vyžadovaly svařování nebo pájení natvrdo, lze nyní navrhovat a vyrábět jako jeden kus.
- 2) **Udržitelnost:** Na rozdíl od obrábění a jiných subtraktivních výrobních procesů používá AM pouze materiál potřebný k výrobě součásti, což výrazně snižuje plýtvání. A protože není k dispozici žádný přebytečný materiál k likvidaci, snižuje se spotřeba energie.
- 3) **Přesnost a účinnost:** Vysoká úroveň automatizace, volnosti návrhu a ovládání, kterou SW 3D tisku nabízí, poskytuje vysokou úroveň přesnosti, která by u mnoha jiných technologií nebyla možná.

- 4) **Rychlejší výrobní cykly:** Vzhledem k tomu, že celý proces aditivní výroby je řízen efektivním softwarem, je při přenosu informací vysoká úspora času. To umožňuje rychlejší prototypování, a tedy i rychlejší testování návrhů.
- 5) **Úspora za materiálový odpad a energii:** Základní definice 3D tisku je přidávání materiálu, dokud není požadovaný díl vytvořen. Začíná položením základní vrstvy materiálu a přidáním dalších vrstev. Celkový odpad je minimální, většinou se jedná o odpad v podobě otřepů či podpěr, které se musí po dokončení tisku odstranit. Konsolidace dílů pro výrobu může také ušetřit náklady na energii.
- 6) **Levné prototypování:** Rychlé prototypování je nyní díky aditivním opatřením ještě jednodušší. Náklady na nastavení CNC frézování jsou značné a jeho subtraktivní proces hromadí náklady za materiál. Náklady na prototypování prostřednictvím AM je poměrně levnější. Úspory se sčítají při testování iterací pomocí aditivní výroby. V podstatě se jedná o provedení návrhu či potřebných úprav, vytisknutí nového dílu a je možná okamžitá kontrola, zda aktualizovaný návrh splňuje požadavky či ne.
- 7) **Není potřeba vysokých skladových zásob:** Tradiční výroba má tendenci držet vysoké skladové zásoby, ze kterých firma může čerpat požadované díly. V případě, kdy se například změní design výrobku, může dojít ke znehodnocení zásob a díly se změní na šrot. Dochází tak ke ztrátám na zásobách. Aditivní výroba umožňuje mít virtuální inventář. Informace o dílu se uchovávají v cloudu po celou dobu životního cyklu produktu a tisknou se na vyžádání. To odstraňuje potřebu skladových prostor, personálu a velké množství zastaralých dílů.
- 8) **Konsolidace sestavy do jedné části:** Tradiční, složité díly vyžadují více výrobních kroků s vyššími náklady na materiál a práci. Čas na jejich vytvoření a sestavení je delší a zvyšuje zásoby. S aditivní výrobou je možné tisknout sestavu jako jeden kus, což šetří peníze a čas od začátku do konce. [8], [9], [16], [22]



Obr. 3 Aditivní výroba – realizace dílu

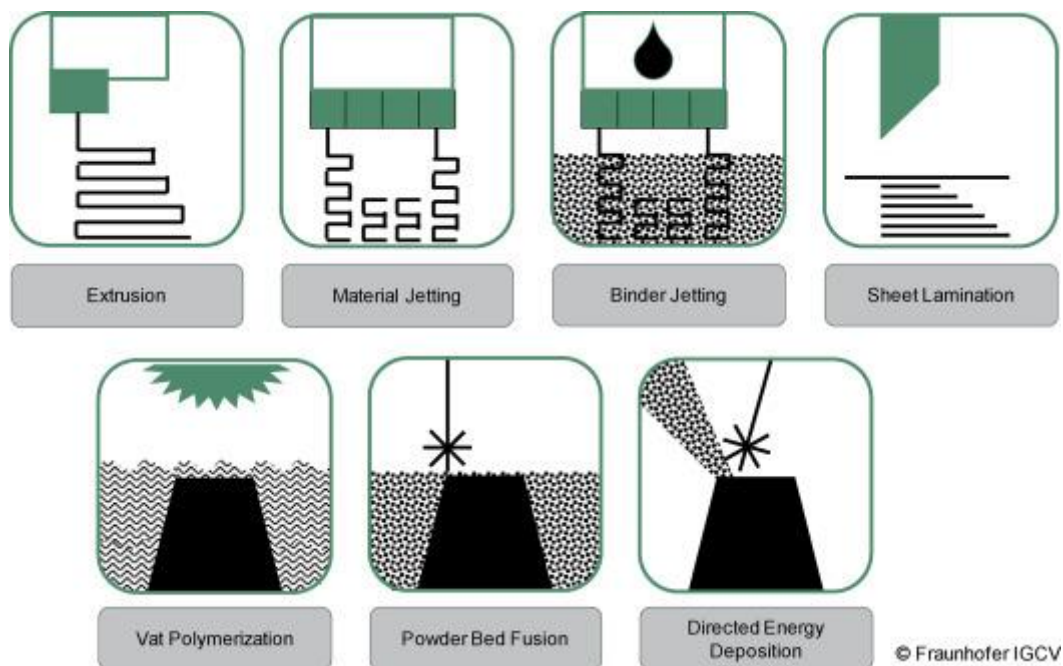
2. Techniky aditivní výroby, rozdělení a charakteristika

Techniky aditivní výroby je možné rozdělit různými způsoby. Základní rozdělení je podle zpracování materiálu a to na kov, keramiku a polymer (případně kombinace).

Další rozdělení je podle povahy materiálu. Toto rozdělení je na bázi práškových a tuhých materiálů a dále na bázi fotopolymerů.

Dále existuje rozdělování dle normy ISO/ASTM 52900:2015 viz Obr. 4. Toto rozdělení zahrnuje [31], [32], [33]:

- kádřová fotopolymerizace
- řízená energetická depozice
- slinování prášků
- tryskání materiálu
- tryskání pojiva
- listová laminace
- vytlačování materiálu



Obr. 4 Rozdělení aditivní výroby dle normy ISO/ASTM 52900:2015

Kovová aditivní výroba nebo kovový 3D tisk je typ aditivní výroby, která používá zdroj tepla. Zdrojem tepla může být laserový nebo elektronový paprsek k ohřevu kovu ve formě prášku nebo drátu tak, aby se konsolidoval a vytvořil objekt.

Tento výrobní proces nabízí zatím nepřekonatelnou svobodu designu a schopnost vyrábět díly z různých materiálů na bázi kovů a má řadu výhod.

Aditivní výroba kovů je důležitou součástí růstu zpracovatelského průmyslu. Pomáhá výrobcům zvýšit efektivitu, snížit množství odpadu, snížit emise a zvýšit rychlost uvádění silnějších a lehčích dílů na trh.

Stroj sestavuje objekt vrstvu po vrstvě. Nejprve se surovina v práškové formě rozloží v tenké vrstvě, kde má být díl postaven, a ten je pak ošetřen tak, aby vytvořil pevný tvar. Následující vrstvy jsou pak vytvářeny stejným způsobem, dokud není dokončen celý objekt. [16]

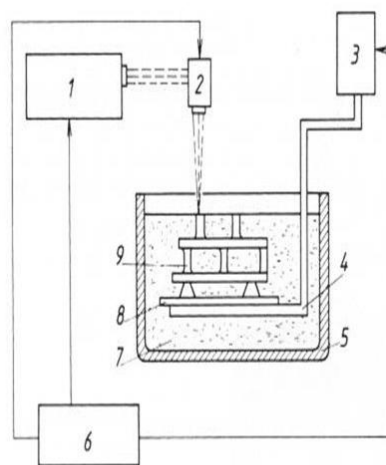
Existují tři primární metody, které vedou trend aditivní výroby kovů:

- **Metody práškového lože** rozprostírají tenkou vrstvu prášku na povrch práškového lože. Jakmile je tato vrstva rozšířena, vysoce výkonná tepelná energie v podobě laserového nebo elektronového paprsku se používá k selektivnímu splynutí a někdy k roztavení prášku.
- **Směřovaná depozice energie** je místo, kde je surovina uložena pomocí trysky současně s roztavením zdrojem tepla. Tento proces se provádí v několika vrstvách, aby se vytvořil pevný objekt.
- **Tryskání kovových pojiv** je nejběžnější metodou používanou pro velkoobjemové aplikace. Tekuté pojivo se otiskne na tenké vrstvy prášku a objekt se vytvoří vrstvu po vrstvě v podstatě lepením částic dohromady. Předmět je pak ošetřen buď slinutím, nebo infiltrováním, aby se zpevnil. [18], [34]

Technologie fotopolymerizace (Vat Photopolymerization) – Jedná se o jednu z nejstarších aditivních technologií. Princip této technologie je založený na fotosenzitivní pryskyřici vystavované světlu při určité vlnové délce. Tímto procesem dochází k chemické reakci a dochází k postupnému zpevňování. Tato technologie se využívá pro výrobu dílů, kde jsou zapotřebí jemný detail a hladký povrch. [37], [38]

Členění metod technologie Vat Photopolymerization:

- SLA (Stereolithography)
- DLP (Digital Light Processing)
- CDLP (Continuous Digital Light Processing)

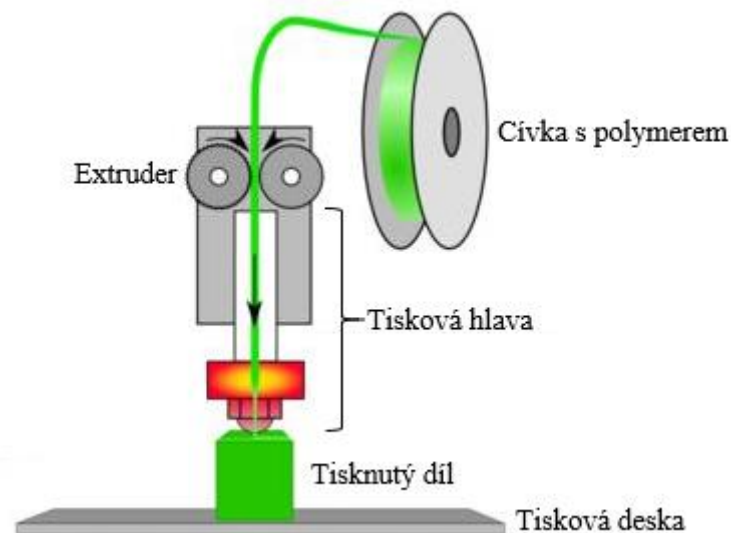


- 1 – laser
- 2 - pracovní hlava laseru
- 3 - systém pro posuv nosné desky
- 4 - nosná deska
- 5 - pracovní vana
- 6 - CNC řídicí systém
- 7 – fotopolymer
- 8 – podložka
- 9 - vyráběná součást

Obr. 5 Schéma SLA

Technologie tryskání materiálu (Material Extrusion) – Technologie, která je založena na vytlačování materiálu prostřednictvím trysky na tiskovou podložku. Jedná se o nanášení materiálu vrstvu po vrstvě a dochází tak k postupnému chladnutí materiálu. [39]

Představitel: FDM (Fused Deposition Modeling) - Obvykle se jedná o postup zahřívání vlákna do roztaveného stavu a následně se vytlačuje tryskou stroje (3D tiskárna). Hlava trysky má možnost využívání tří stupňů volnosti a postupně nanáší vytlačovaný polymer. Polymer se nanáší na tiskovou desku podle kódových pokynů. Vlákno je kontinuálně vedeno extruderem a tryskou stroje prostřednictvím dvou válečků otáčejících se v opačném směru. Materiál se postupně nanáší na tiskovou desku (vrstva po vrstvě), dokud se nedosáhne výsledného tvaru dílu. Během tisku dochází k průběžnému pohybu trysky tam a zpět dle prostorových souřadnic nasimulovaného modelu v SW CAD. [39]

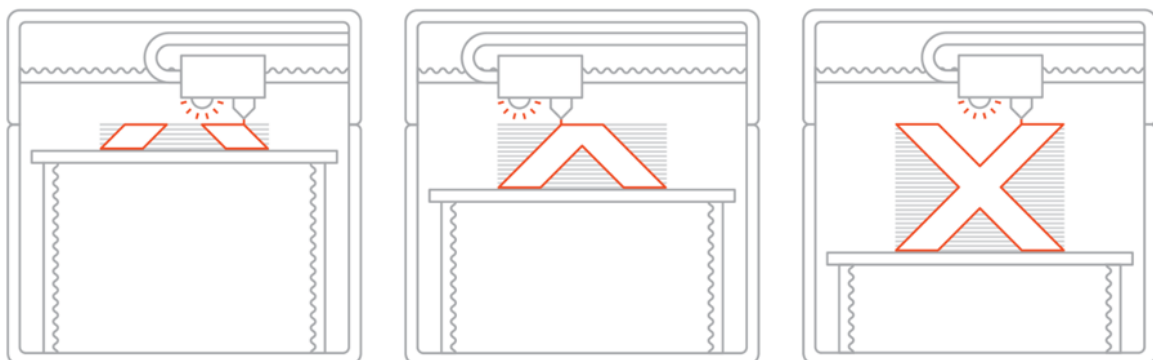


Obr. 6 Schéma FDM

Technologie tryskání materiálu (Material Jetting) – Jedná se o technologii vytvrzování fotopolymerů, kovů nebo vosků. V rámci procesů je možné tisknutí více materiálů najednou. Tato technika je velmi obdobná běžným inkoustovým tiskárnám. Kapičky materiálu jsou selektivně nanášeny tryskáním vrstvu po vrstvě a tím dochází k vytvoření trojrozměrného objektu. Při dokončení finální vrstvy dochází k vytvrzování ultrafialovým světlem v případě fotocitlivého materiálu nebo tepelným vytvrzením u kovu či keramiky. [36]

Členění metod technologie tryskání materiálu:

- MJ (Material Jetting)
- NPJ (NanoParticle Jetting)
- DOD (Drop On Demand)



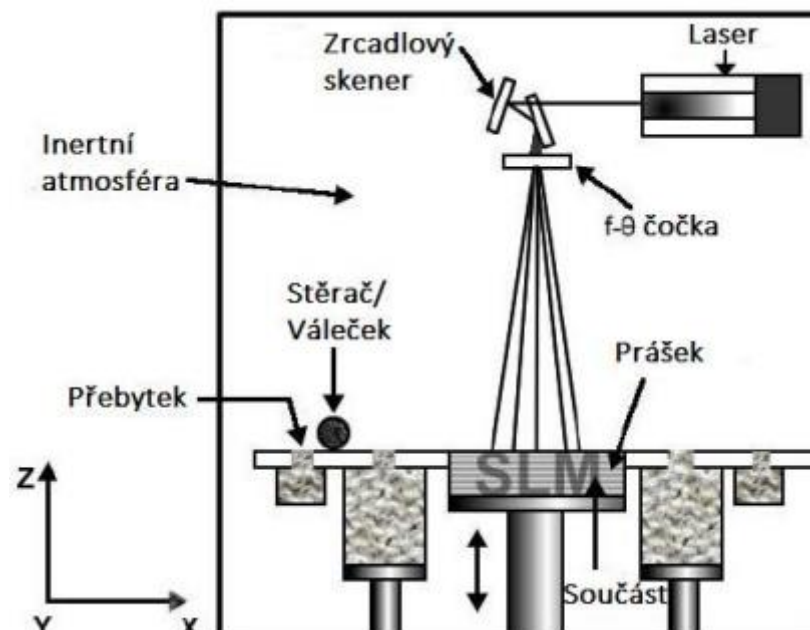
Obr. 7 MJ - Vytváření trojrozměrného objektu

Technologie tryskání pojiva (Binder Jetting) – Jedná se o proces, při kterém dochází k selektivnímu nanášení kapalného pojiva prostřednictvím tiskové hlavy. U některých výrobků jsou nutné po fázi tisku další dokončovací operace jako například vytvrzování. U jiných výrobků se jedná o finální produkt bez dokončovacích operací. Tato technologie využívá jednu nebo dvě inkoustové tiskové hlavy. [40]

Technologie slinování prášků (Powder Bed Fusion) – Princip technologie je podobný, jako u tryskání pojivem. Rozdíl je však v tom, že jednotlivé vrstvy se spojují zdrojem tepla. Jedná se o jednu ze základních technik spojených s aditivní výrobou. Dodržuje se základní princip výroby dílů vrstvu po vrstvě. Jako topný nástroj se využívá zdroj jako laserový paprsek, elektronový paprsek a infračervený paprsek. Zahřívací proces umožňuje prášku získat požadovaný tvar. [41]

Členění metod technologie slinování prášků:

- SLS (Selective Laser Sintering)
- MJF (Multi Jet Fusion)
- DMLS / SLM (Direct Metal Laser Sintering / Selective Laser Melting)
- EBM (Electron Beam Melting)



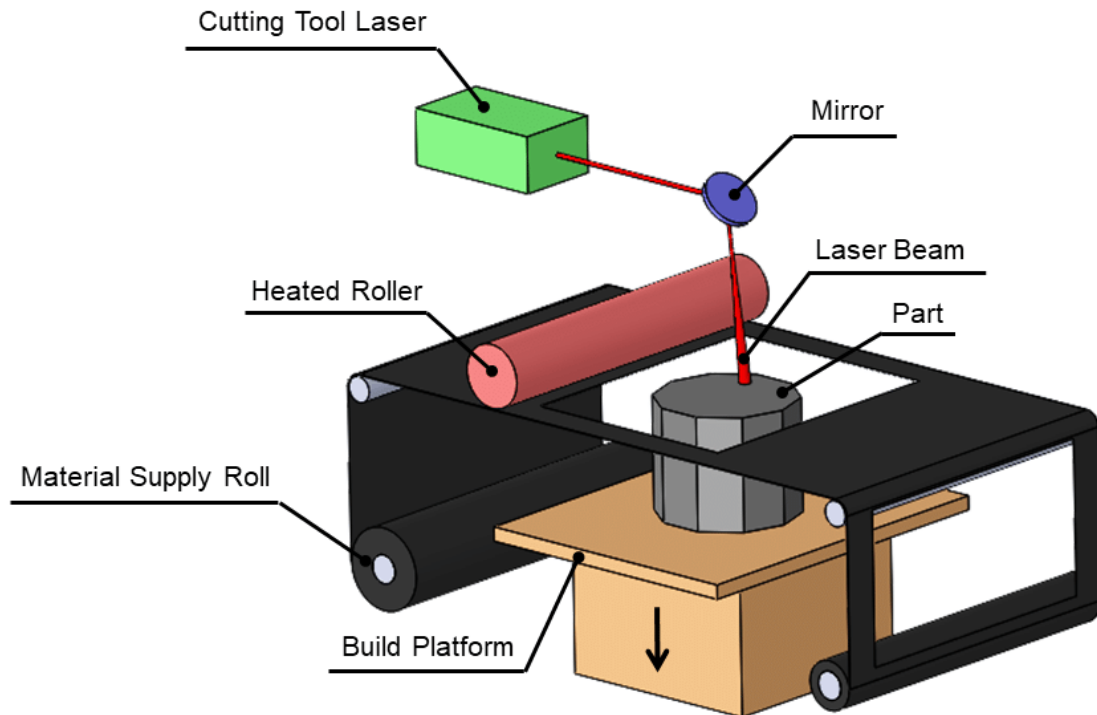
Obr. 8 Schéma SLS

Technologie přímé energetické depozice (Direct energy deposition) – Tato technologie vytváří díly prostřednictvím roztavení prášku nebo drátu při jeho pokládání. Tento proces se také nazývá depozice kovu (Metal Deposition). [42]

Členění metod technologie přímé energetické depozice:

- LENS (Laser Engineering Net Shape)
- EBAM (Electron Beam Additive Manufacturing)

Technologie laminace – LOM (Laminated Object Manufacturing) – Technologie LOM využívá jako médium pro 3D tisk papír, plast nebo kovové lamináty, které jsou potaženy lepidlem. Tyto pláty materiálu jsou slepeny k sobě vrstvu po vrstvě a řezány do tvaru nožem nebo se využívá řezání laserem. Objekty, které se zhotovují prostřednictvím LOM, lze následně dále upravovat obráběním nebo vrtáním. Jedná se o velmi rychlý a levný proces, který se nejčastěji využívá pro prototypování. [43]



Obr. 9 Schéma LOM

3. Materiály používané pro aditivní výrobu

Pro aditivní výrobu je možné využít například materiály plastové, kovové či keramiku. Druh materiálu se volí na základě použité technologie v rámci aditivní výroby a podle vlastností, které po finálním produktu očekáváme. Obrázek 9 zahrnuje ucelený přehled nejvíce využívaných materiálů a využití u jednotlivých metod aditivní výroby. [34]

	Amorphous	Semi-crystalline	Thermoset	Material extrusion	Vat polymerization	Material jetting	Powder bed fusion	Binder jetting	Sheet lamination	Directed energy deposition
ABS [Acrylonitrile Butadiene Styrene]	X			X						
Polycarbonate	X			X						
PC/ABS Blend	X			X						
PLA [Polylactic Acid]	X			X						
Polyetherimide (PEI)	X			X						
Acrylics			X		X	X				
Acrylates			X		X	X				
Epoxies			X		X	X				
Polyamide (Nylon) 11 and 12		X					X			
Neat		X					X			
Glass filled		X					X			
Carbon filled		X					X			
Metal (Al) filled		X					X			
Polymer bound	X	X		X						
Polystyrene	X						X			
Polypropylene		X					X			
Polyester ("Flex")							X			
Polyetheretherketone (PEEK)		X		X			X			
Thermoplastic polyurethane (Elastomer)				X			X			
Chocolate		X		X						
Paper									X	
Aluminum alloys							X	X	X	X
Co-Cr alloys							X	X		X
Gold							X			
Nickel alloys							X	X		X
Silver							X			
Stainless steel							X	X	X	X
Titanium, commercial purity							X	X	X	X
Ti-6Al-4V							X	X	X	X
Tool steel							X	X		X

Obr. 10 Přehled materiálů a využití u jednotlivých metod aditivní výroby

Následující text bude popisovat různé typy materiálů, které se nejčastěji využívají v plastové aditivní výrobě. Zároveň jsou popsány specifikace jejich základních fyzikálních vlastností, použitelnosti a výčtu výhod při jejich použití. Tento výběr materiálů je pro práci dostačující, jelikož se práce zaměřuje na plastovou aditivní výrobu.

ABS

Akrylonitril-butadien-styren je plast, který je velmi houževnatý, měkký a poddajný. Při tání se snadno tvaruje a stává se poddajným při cca 220 [°C]. K dosažení této teploty je zapotřebí velký ohřivač. Nejčastěji je potřeba tiskárna s vyhřívaným tiskovým ložem, jinak se materiál přilepí. ABS je odolný vůči vodě a chemikáliím a při zahřívání se vytváří nepříjemný zápach. Kvůli chemikáliím, které se uvolňují v páře, je potřeba dobré větrání. Materiál ABS se rozkládá ultrafialovým zářením, ztrácí barvu a křehne, takže není vhodný pro delší venkovní použití. ABS je dobrý pro tvorbu koncepčních a funkčních modelů a pro výrobu, jako je například výroba ozubených kol nebo spojovacích částí. [3], [19]

Výhody:

- Relativně nízké náklady
- Široká řada aplikací
- Houževnatost
- Odolnost proti oděru
- Tvrdost
- Nízká hmotnost

- Vysoký poměr pevnosti k hustotě
- Odolnost proti korozi

PLA

Polylactic Acid je polymerní plast vyrobený z biologických materiálů, jako je kukuřičný škrob nebo cukrová třtina. Teplota tání je mezi 180-200 [°C]. Jedná se o velmi houževnatý a odolný materiál, má však menší teplotní odolnost než materiál ABS. Deformace PLA začíná při teplotách vyšších než 60 [°C]. PLA nedisponuje odolností vůči vodě či chemikáliím. Při zahřátí vzniká lehký zápach, nejedná se však o toxický pach nebo páry. Jedná se o preferovaný výběr materiálu pro levnější 3D tiskárny, protože tisk PLA je snazší než tisk ABS. Materiál PLA má při normálních podmínkách dlouhou životnost. Jedná se o biologický materiál, který se v zemi rozkládá. [3]

Výhody:

- Relativně nízké náklady
- Hladký povrch
- Široká řada aplikací
- Snadná tvarovatelnost
- Přátelský k životnímu prostředí
- Biologicky rozložitelný

PET

Polyethylentereftalát je podobný polyesteru, je také známý jako t-glase. Teplota tání je přibližně při 230 [°C] a ochlazuje se na tuhou pevnou látku připomínající sklo. PET lze použít k výrobě nástrojů jako silnější a tužší alternativu k ABS. PET může být vhodným materiálem pro elektronické aplikace vyžadující dobrou tepelnou odolnost, rozměrovou stabilitu, pevnost a/nebo chemickou odolnost. [3], [9]

Výhody:

- Dobrá tepelná vodivost
- Pevnost
- Chemická odolnost

PETG

PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol) je plast, který je pevný a odolný jako ABS, ale je neškodný pro lidské zdraví. Jedná se o variantu PET, která je kombinována s glykolem. Díky tomu je PETG mnohem tvrdší, tužší a snadněji se aplikuje při 3D tisku a obrábění než PET. Upravený plast nekystalizuje a je nerozbitný. Materiál PETG disponuje vysokou průhledností a lze jej tisknout při nižších teplotách se zvýšenou rychlostí toku, což umožňuje rychlejší tisk. PETG je možné použít místo materiálu PC (polykarbonát) pro CNC obrábění, jelikož může vytvořit čirý plastový materiál se zachováním v podstatě stejné houževnatosti jako má PC, ale je mnohonásobně nákladově efektivnější. PETG lze také využít například pro ohýbání a svařování za tepla. [3], [8], [30]

Výhody:

- Houževnatost
- Vysoký poměr pevnosti k hustotě
- Snadná tvarovatelnost
- Snížené smrštění

Korozivzdorná ocel GP1

Jedná se o korozivzdornou ocel ve formě jemného prášku. Tato ocel disponuje velmi dobrými mechanickými vlastnostmi a odolností proti korozi. Využívá se pro kovové 3D tiskárny typu EOS. Využívá se především pro aplikaci malých sérií součástí, náhradních dílů a prototypů. [15], [19]

Slitina MP1

Tato slitina prášku se vyznačuje skvělými mechanickými vlastnosti jako například pevnost, tvrdost apod. Zároveň je velmi odolná proti korozi a vysokým teplotám. Typické využití této slitiny je například pro biomedicinské implantáty, turbíny, součásti motorů apod. [15], [19]

Hliníková slitina AlSi10Mg

Slitina jemného hliníkového prášku se vyznačuje především vysokou teplotní odolností s nízkou hmotností. Jedná se zároveň o slitinu s dobrými dynamickými vlastnostmi, proto se využívá především u součástí, které jsou vystaveny vysokým zátěžím. [15], [19], [30]

4. Praktické využití aditivní výroby v průmyslových odvětvích

Tato kapitola definuje průmyslové příklady využití aditivní výroby v energetickém, dopravním, leteckém a lékařském průmyslu.

Energetický průmysl

Úspěch aditivní výroby v energetickém průmyslu je založený na schopnosti rychle vyvinout přizpůsobené, kritické součásti, které vydrží extrémní podmínky.

Pokrok aditivní výroby zahrnuje produkci efektivních lehkých komponent na zakázku a využití materiálů, které jsou velmi šetrné k životnímu prostředí.

Některé klíčové aplikace se objevily v plynárenském, ropném a energetickém průmyslu, jako jsou rotory, statory, trysky turbíny, části průtokoměru, manometry, řídicí součásti ventilů a potrubí, čerpadla atd. [3] [16]



Obr. 11 Energetický průmysl

Dopravní průmysl

Specifické vlastnosti dopravního průmyslu zahrnují především odolnost vůči extrémní rychlosti či nepříznivé počasí (vysoká vlhkost či horko). Proto je důležité, aby díly byly z odolných vysokoteplotních materiálů.

Jednou z nejzajímavějších aplikací aditivní výroby pro dopravní průmysl, která se dnes realizuje, je příležitost reprodukovat náhradní díly pro renovace klasických automobilů.

Letecký průmysl

Letecké společnosti byly jedny z prvních, které zavedly aditivní výrobu. Tato průmyslová oblast zahrnuje jedny z nejpřísnějších průmyslových výkonnostních norem. Tyto normy vyžadují, aby součásti vydržely i v nepříznivých a drsných podmínkách. Inženýři, kteří navrhují a vyrábějí, pro letecký průmysl, potřebují vyrobené komponenty z vysoce výkonných materiálů.

3D tisk přináší komplexní konsolidované díly s vysokou pevností. Při dosažení menšího objemu materiálu a konsolidovaného provedení je dosaženo celkového snížení hmotnosti, což je jeden z nejvíce důležitých faktorů ve výrobě pro letecký průmysl.

Mezi obvyklé aplikace patří vlastní interiérové komponenty letadel, součásti raketových motorů, vložky spalovacích komor, nástroje pro kompozity, nádrže na olej a palivo atd. [8], [9], [20], [21]

Výhody 3D tisku pro letectví

Maloobjemová výroba: Pro letecký průmysl, kde se vyrábějí velmi složité díly v malých objemech, je 3D tisk ideální. Prostřednictvím této technologie lze vytvořit náročné geometrie, bez nutnosti investování do drahého nástrojového vybavení. To nabízí dosažení nákladově efektivní výroby.

Redukce hmotnosti: Vedle aerodynamiky a výkonu motoru je hmotnost jedním z nejdůležitějších faktorů, které je potřeba při konstrukci letadel zohlednit a dodržet. Proto je 3D technologie ideálním řešením pro vytváření odlehčených dílů, což má za výsledek značné uspoření paliva. Ve spojení s nástroji pro optimalizaci návrhu, jako je například generativní návrhový SW, je vysoký potenciál pro zvýšení složitosti součástí téměř neomezený.

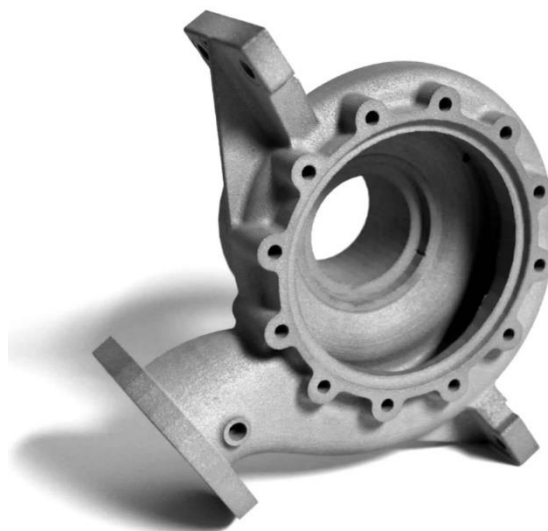
Generativní návrhový SW = Využívá algoritmy k prozkoumání a generování tisíců návrhových možností. V této fázi může software také pomocí algoritmů analyzovat každý návrh a stanovit nejefektivnější návrhy.

Materiálová účinnost: Protože proces 3D tisku funguje tak, že se díly vyrábějí vrstvu po vrstvě, materiál se z velké části používá pouze tam, kde je to potřeba. Výsledkem je, že produkuje méně odpadu než tradiční subtraktivní metody.

Výběr dostupných 3D tisknutelných materiálů pro letecký průmysl sahá od termoplastů technické úrovně (např. vyztužený nylon) až po kovové prášky (vysoce výkonné slitiny, titan, hliník, nerezová ocel). Nabídka dostupných materiálů pro 3D tisk se neustále rozšiřuje a otevírá dveře pro použití v pokročilých leteckých aplikacích.

Konsolidace dílů: Jednou z klíčových výhod 3D tisku je konsolidace dílů, což je schopnost integrovat více dílů do jedné součásti. Snížení počtu potřebných dílů může výrazně zjednodušit proces montáže a údržby zkrácením doby potřebné k montáži. Daný proces tedy vede k eliminaci plýtvání.

Údržba a opravy: Průměrná životnost letadla se může pohybovat mezi 20 a 30 lety, takže údržba, opravy a generální opravy jsou důležitou a zároveň nezbytnou funkcí v tomto odvětví. Technologie 3D tisku se běžně používají k opravě leteckého a vojenského vybavení. Turbínové lopatky a další vybavení lze také obnovit a opravit přidáním materiálu na opotřebované povrchy. [3], [20], [21]



Obr. 12 Letecký průmysl – prototyp dílu

Lékařský průmysl

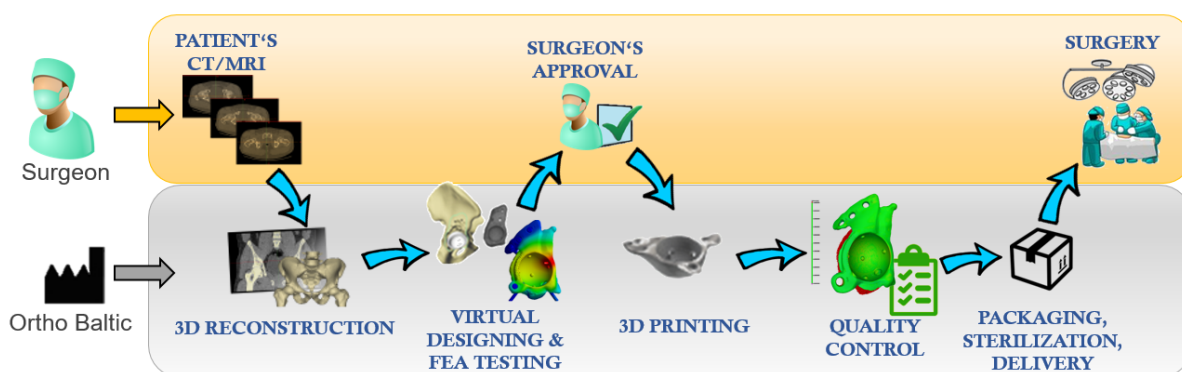
Rychle se inovující lékařský průmysl využívá řešení aditivní výroby k poskytování průlomů lékařům, pacientům a výzkumným institucím. Lékařští výrobci využívají pro 3D tisk širokou škálu vysokopevnostních a biokompatibilních materiálů.

Aditivní výroba otevírá dveře vysoké škále využití 3D tisku v život zachraňujících zařízeních, a to od funkčních prototypů a věrných anatomických modelů až po chirurgické komponenty. 3D tisk je ideální technologií pro vytváření nebo optimalizaci návrhů zdravotnických prostředků. Díky levnému rychlému prototypování mají výrobci zdravotnických prostředků větší volnost při navrhování nových produktů, což pomáhá uvádět nové zdravotnické prostředky na trh mnohem rychleji.

Mezi typické aplikace aditivní výroby patří například ortopedická implantační zařízení, předoperační modely z CT skenerů, zubní zařízení, anatomické modely a vlastní chirurgické nástroje atd. [3], [8], [9], [17]



Obr. 13 Endoprotéza kyčelního kloubu



Obr. 14 Průběh realizace endoprotézy kyčelního kloubu

5. Cenové a parametrové porovnání dle druhů aditivní výroby

Různé druhy 3D tisku z plastu a kovu mají jedinečné vlastnosti, prostřednictvím těchto vlastností jsou vhodné pro různé aplikace. V následujících kapitolách jsou definovány cenová a parametrová porovnání závislé na druhy 3D aditivní výroby. [18], [19]

5.1. Cenové porovnání dle druhů aditivní výroby

Následující tabulka zahrnuje cenové rozpětí investice vynaložené na pořízení, náklady, na materiál a pracovní potřeby pro různé typy metod aditivní výroby – viz Tab. 1.

Tab. 1 Cenové porovnání dle druhů aditivní výroby

	MODELOVÁNÍ TAVENÉ DEPOZICE (FDM)	STEREOLITOGRAFIE (SLA)	SELEKTIVNÍ LASEROVÉ SLINOVÁNÍ (SLS)	KOVOVÝ FDM	SELEKTIVNÍ LASEROVÉ TAVENÍ (SLM) A PŘÍMÉ KOVOVÉ LASEROVÉ SLINOVÁNÍ (DMLS)
Cenové rozpětí	Sady 3D tiskáren pro kutily začínají zhruba na 4 400 Kč, amatérské tiskárny se pohybují od 11 000 do 33 000 Kč. Profesionální 3D tiskárny FDM začínají kolem 55 000 Kč a velkoformátové profesionální FDM tiskárny začínají kolem 88 000 Kč.	Profesionální stolní tiskárny začínají na 77 000 Kč, velkoformátové stolní tiskárny nabízejí větší objem sestavení za 242 000 Kč.	Stolní průmyslové systémy SLS začínají na částce 408 000 Kč a tradiční průmyslové tiskárny jsou k dispozici od 2 206 000 Kč.	Kovové tiskárny FDM začínají od 2 206 000 Kč, ale úplně řešení, které zahrnuje pec, jde mnohem dál.	Řešení DMLS/SLM začínají kolem 4 412 000 Kč. Tyto tiskárny také přicházejí s přísnými požadavky na zařízení, což může dále zvýšit náklady.
Náklady na materiál	300 – 3 300 Kč/kg za většinu standardních a technických vláken a 2 200–4 400 Kč/kg za podpůrné materiály.	3 280–4 400 Kč/L za většinu standardních a technických pryskyřic.	2 200 Kč/kg za nylon. SLS nevyžaduje žádné podpůrné struktury a nefúzovaný prášek lze znovu použít, což snižuje náklady na materiál.	Záleží na materiálu a technologii. Výrazně vyšší než plasty.	Záleží na materiálu a technologii. Výrazně vyšší než plasty.
Pracovní potřeby	Ruční odebrání podpory (v některých případech lze zjednodušit pomocí rozpustných podpor). Pro vysoce kvalitní povrchovou úpravu je nutné zdlouhavé následné zpracování.	Praní a následné vytvrzování (obojí lze většinou automatizovat). Jednoduché následné zpracování k odstranění podpůrných značek.	Jednoduché čištění k odstranění přebytečného prášku.	Mytí a slinování (obojí lze většinou automatizovat)	Odlehčení napětí, odstranění podpory, tepelné zpracování, obrábění a další povrchové úpravy.

5.2. Parametrové porovnání dle druhů aditivní výroby

Následující tabulka ukazuje porovnání parametrů jednotlivých typů aditivní výroby.

Tab. 2 Cenové porovnání dle druhů aditivní výroby

	MODELOVÁNÍ TAVENÉ DEPOZICE (FDM)	STEREOLITOGRAFIE (SLA)	SELEKTIVNÍ LASEROVÉ SLINOVÁNÍ (SLS)	KOVOVÝ FDM	SELEKTIVNÍ LASEROVÉ TAVENÍ (SLM) A PŘÍMÉ KOVOVÉ LASEROVÉ SLINOVÁNÍ (DMLS)
Řešení	▲▲ △△△	▲▲▲▲▲	▲▲▲▲△	▲▲ △△△	▲▲▲▲△
Přesnost	▲▲▲▲△	▲▲▲▲▲	▲▲▲▲▲	▲▲▲△△	▲▲▲▲▲
Povrchová úprava	▲▲ △△△	▲▲▲▲▲	▲▲▲▲△	▲▲ △△△	▲▲▲▲△
Propustnost	▲▲▲▲△	▲▲▲▲△	▲▲▲▲▲	▲▲▲△△	▲▲▲▲△
Komplexní návrhy	▲▲▲△△	▲▲▲▲△	▲▲▲▲▲	▲▲▲△△	▲▲▲▲▲
Snadnost použití	▲▲▲▲▲	▲▲▲▲▲	▲▲▲▲△	▲▲▲▲△	▲ △△△△
Velikost	Až 300 x 300 x 600 mm (stolní 3D tiskárny)	Až 300 x 335 x 200 mm (stolní 3D tiskárny)	Až 165 x 165 x 300 mm (stolní průmyslové 3D tiskárny)	Až 300 x 200 x 200 mm	Až 400 x 400 x 400 mm
Materiály	Standardní termoplasty, jako je ABS, PLA, a jejich různé směsi.	Odrůdy pryskyřice (termosetové plasty). Standardní, strojírenské (podobné ABS, PP, silikonové, flexibilní, žáruvzdorné, tuhé), slévatelné, zubní a lékařské (biokompatibilní).	Technické termoplasty, typicky nylon a jeho kompozity (nylon 12 je biokompatibilní + kompatibilní se sterilizací).	Nerezová ocel, nástrojová ocel, inconel, měď, titan.	Nerezová ocel, nástrojová ocel, titan, kobaltový chrom, měď, hliník, slitiny niklu.
Ideální aplikace	Základní modely proof-of-concept, nízkonákladové prototypování jednoduchých dílů.	Vysoce detailní prototypy vyžadující těsné tolerance a hladké povrchy, formy, nástroje, vzory, lékařské modely a funkční díly.	Složitá geometrie, funkční prototypy, krátkodobá nebo mostní výroba.	Silné a trvanlivé díly, nástroje a výrobní pomůcky.	Silné, trvanlivé díly se složitou geometrií; ideální pro letecký, automobilový a lékařský průmysl.

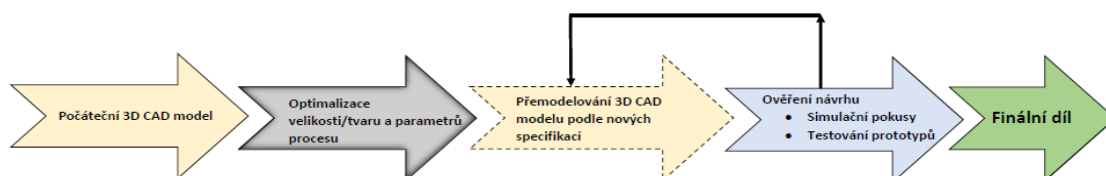
6. Optimalizace a simulace aditivních výrobních procesů

Optimalizace je proces nebo technika zapojená do systému, návrhu nebo rozhodování za účelem co nejvyšší funkčnosti a efektivnosti. Častá problematika optimalizace bývá matematická formulace, v níž je potřeba identifikovat nebo určit konstrukční parametry či proměnné, aby bylo dosaženo nejlepší měřitelné výkonnosti nebo nejlepší hodnoty objektivní funkce s ohledem na daná omezení. Inženýrské optimalizační aplikace zahrnují návrh, plánování, řízení a výrobu. V návrhu je optimalizace dosažena prostřednictvím stanovení optimálních parametrů, které vedou k co nejlepšímu výkonu. Optimalizační aplikace ve výrobě, plánování a řízení mají za cíl minimalizovat výrobní náklady a dosáhnout kvalitních výrobků.

Pomocí simulace jsou prováděny počítačové experimenty s modelem a je předpovídáno skutečné chování. Jedná se tak o efektivní nástroj pro úsporu času a minimalizaci nákladného zkušebního procesu a chyb. Simulační SW kopíruje provoz reálného výrobního systému prostřednictvím animovaných modelů. Simulace tak společně pomáhá vizualizovat produktivitu jejich výrobních procesů a bezpečně testovat technologie s cílem zvýšení výkonnosti a ziskovosti. [9]

Optimalizace topologie v aditivní výrobě

V dnešním konkurenčním světě poskytuje aditivní výroba vhodnou příležitost pro návrh funkčních dílů a výroby. Návrhový SW včetně optimalizace topologie, je však nezbytný k úplnému využití náročnosti daných technologií. Konvenční výrobní metody jsou častokrát omezeny v typech návrhů, které mohou být vyrobeny. Naopak návrh pro aditivní výrobu vyžaduje jiný přístup, a to především kvůli složitosti návrhu. Topologická optimalizace je technika, která k dosažení optimalizace geometrie objektu využívá matematické výpočty. Konstrukteři mohou zároveň optimalizovat distribuci materiálu. Obrázek níže demonstuje kroky v optimalizovaném procesu návrhu – viz Obr. 15. V prvním kroku je prvotní 3D model vytvořen v SW CAD, poté je původní návrh strukturálně vyhodnocen se zadanými hraničními podmínkami pro sledování rozložení napětí a posunutí. Poté na základě výsledků topologická optimalizace eliminuje materiál z oblastí, které příliš nepřispívají k aplikovanému zatížení. Třetí krok zahrnuje přestavení komponenty v SW CAD na základě výsledků topologické optimalizace. V dalším kroku je upravený CAD model validován analýzou pomocí metody konečných prvků za účelem přenášení zatížení a splnění konstrukčních specifikací. Model při splnění daných požadavků je testován pomocí některých prototypovacích metod. Jinak se přestavení provádí znovu, dokud není provedeno ověření. Konečný stav zahrnuje dosažení finálního návrhu pro aditivní výrobu. [4], [8], [10], [23].



Obr. 15 Topologický optimalizovaný proces návrhu

Výhody topologické optimalizace:

- Svoboda designu
- Vysoká efektivita a flexibilita
- Generování mnoho návrhových variant pro různé aplikace
- Objektivní definice: např. tuhost, hmotnost, materiál
- Výrobní omezení by měla být zohledněna během optimalizace
- Integrace funkcí

Aplikace topologické optimalizace:

- Letecký průmysl – největší osvojitel designů topologické optimalizace, především díky výhodám jako je výroba lehkých hmotnostních složek a zachování pevnosti vyráběných dílů
- Lékařský průmysl – například nové příležitosti pro vytváření bionických implantátů
- Organizace družicových a kosmických vozidel – využívání aditivní výroby s topologickou optimalizací kvůli nákladové úspoře a efektivitě výroby

Simulace aditivní výroby

Aditivní výroba se rychle rozšiřuje do výroby kromě prototypování. K dosažení kvalitních 3D tištěných dílů vyžaduje pochopení procesů, které jsou spojeny s návrhem a rozvojem. Proto jsou plánovací a optimalizační techniky pro procesy simulace pro systémy aditivní výroby zásadní. Poskytují určitou spolehlivost vůči specifickým fyzikálním vlastnostem, jako je velikost a přesnost tvaru a teploty. Optimalizační simulací je možné označovat proces, který najde nejlepší hodnoty vstupních proměnných mezi všemi dostupnými možnostmi. Cílem optimalizační simulace je snížení zdrojů a zároveň optimalizování znalosti získané pomocí iterací v simulaci. Simulace v aditivní výrobě pokrývá všechny aspekty procesu 3D tisku, od tání částic ve vstupní surovině na konečnou cestu nástroje, potřebné k realizaci požadovaného dílu. [8], [11]

Aplikace simulačních nástrojů je důležitým aspektem pro nákladově efektivní aditivní výrobu. Cílem simulace aditivní výroby je zabývání se všemi aspekty procesů aditivní výroby. Mezi aspekty patří:

- **Funkční design:** Prvotní cíl je vytvoření přijatelného designu, který bude splňovat požadované specifikace a poté zlepšit návrh prostřednictvím využití optimalizačních technik.
- **Generování mřížkové struktury:** Produkty, které se vyrábějí prostřednictvím aditivní výroby, mají obecně spíše mřížkovou strukturu než kompletní systém. Jedním z cílů simulace je vytvoření a dosažení optimalizace mřížky prostřednictvím optimalizace velikosti stran a tvaru.
- **Kalibrace materiálu:** Další cíl zahrnuje sledování procesu fázových transformací za pomoci vícestupňového modelování materiálů.
- **Optimalizace cyklu aditivní výroby:** Cyklus aditivní výroby může způsobit nežádoucí zbytková napětí a deformace. K dosažení minimální mezery mezi navrženým a vyrobeným dílem, je velmi důležité, aby se dostatečně přesně zachytily fyzické změny.
- **Představení:** Jedná se o zhodnocení toho, jak daná součást, která se vyrobí, může fungovat s ohledem na tuhost, únavu apod. v reálných podmínkách. Simulace aditivní

výroby například zahrnuje do zhodnocení počet vrstev, vlastnosti materiálu, tepelné a konstrukční mezní podmínky. Všechny tyto informace se mohou použít k předpovědi zbytkového napětí, zkreslení a selhání zlomenin.[9], [10]

Výhody simulačního SW AM:

- Vyšší pravděpodobnost úspěchu díky užití simulace
- Simulace je velmi užitečná při určení návrhu a kvality komponentů
- Simulační program pomáhá zabránit selhání tisku dílu
- Hlubší pochopení procesů aditivní výroby - simulace procesu 3D tisku pomáhá pochopit celkový proces a vliv na životnost dílu
- Virtuální simulace snižuje výrobní náklady a množství použitého materiálu
- Vysoká úspora strojních časů
- Snížení odpadu na zmetkovitosti při finální výrobě

7. Popis firmy Christ Car Wash

Společnost Christ Car Wash vznikla v roce 1996 jako dceřiná firma společnosti Otto Christ AG, který se nachází v Memmingenu. Obchodní zastoupení společnosti existuje ve více než 40 zemích na celém světě. Mezi hlavní představitele patří například Česká republika, Rakousko, Švýcarsko, Nizozemí, Francie, Španělsko, Maďarsko, Slovensko, ...

Skupinu Christ tvoří několik společností, které se zaměřují na výrobu a následný prodej. Výrobní škála produktů je rozsáhlá: výroba mycích linek, samoobslužných mycích parků, tunelových mycích linek, tramvajových a vlakových mycích linek, mycích linek pro nákladní automobily a autobusy. Firma Christ se dále zaměřuje na výrobu mobilních kartáčů a čištění odpadních vod.

Hlavní společnost Otto Christ AG se nachází na trhu od roku 1963 a zastává vedoucí pozici na trhu s mycími linkami v Evropě. Firma je držitelem několika patentů kvůli svému know-how.

Další výrobní zaměření společnosti je kompletní příslušenství, např. vysavače, vysokotlaké čističe, čtečky magnetických karet, chytré panely, chemikálie, atd.

Skupinu Christ tvoří tyto společnosti:

- **Otto Christ AG** – mateřská společnost
- **Christ Car Wash** – výroba mycích linek, čištění odpadních bod, vysavačů apod.
- **Christ Elektronik** – výroba ovládacích zařízení, chytré dotykové obrazovky, měřicí přístroje
- **Christ Packing System** – balící systémy pro strojírenský, vojenský, zemědělský průmysl, ...
- **SVG Super Wash** – specializace na mycí linky nákladních a kolejových automobilů
- **Auto Jet** – provoz mycích linek a samoobslužných mycích parků
- **Otto Christ Service** – servis a montáž mycích linek



Obr. 16 Christ Car Wash – model myčky

Česká pobočka Christ Car Wash

Česká pobočka Christ Car Wash se zabývá několika zaměřenými výrobami. Mezi hlavní představitele patří například výroba samoobslužných mycích linek pro osobní automobily, klasické mycí linky pro osobní, vlakové či nákladní automobily. Dále se tato pobočka zaměřuje na výrobu centrálních vysavačů a systémů pro úpravu vody.

Samoobslužné mycí linky – jedná se o variabilní ocelovou konstrukci s pracovním rozsahem o šířce mycích boxů 5100 mm a průjezdovou výškou 3200 mm (volitelně 3550 mm). Samoobslužné mycí linky disponují buď plochou střechou s trapézovým plechem či transparentní oblou střechou. Využívá se opláštění vnějších vertikálních podpěr a zakrytí pro odtokové trubky dešťových okapů. Atika linky je vyráběná ve třech provedení, a to bez osvětlení, s osvětlením „Colour“ a osvětlením „White“. [26]



Obr. 17 Samoobslužná mycí linka

Vlaková a tramvajová mycí linka – jedná se o mycí linky, které se provádějí v různých konceptech. Buď jako průjezdové myčky, polostacionární nebo prostřednictvím pojezdového mytí. Toto mytí je se sběračem proudu nebo bez sběrače. Rámová konstrukce je standardně vyráběná v sedém hliníku, práškovaná. Jsou vybaveny výkyvnými, dělenými či průběžnými mycími válci, aby docházelo k optimálnímu čištění čelní a zadní plochy. [28] [29]

Systémy pro úpravu vody – čistá pitná voda je velice nákladná pro mytí vozidel, a proto se využívá cirkulační proces pro znovupoužití mycí vody. Ve firmě CCW se proto vyrábí zařízení, která se využívají u mycích linek a cirkulují mycí vodu. Spojují kompletní techniku včetně zásobníku nádrže mycí vody, křemenného filtru a čerpadla na zvýšení tlaku. [27]



Obr. 18 Systém pro úpravu vody

8. Plastový 3D tisk vybraných součástí

V této kapitole je podrobně rozepsán technologický postup výroby potenciální součásti po sobě jdoucími výrobními kroky aditivní výroby. Pro danou součást byla zvolena plastová aditivní výroba. Pro tisk se využila 3D tiskárna Ender 3 o velikosti tiskové platformy o 235x235mm. Za vhodný alternativní materiál byl zvolen plast PETG. Zároveň nedošlo k žádným úpravám ve výkrese, je tedy totožný jako při klasické strojní výrobě.

3D plastová tiskárna Ender 3

Ender 3 je inovativní FDM tiskárna s mnoha funkcemi. Na této tiskárně lze tisknout materiály jako ABS, PLA, PETG apod. Ender 3 disponuje dobrým poměrem ceny, výkonu a kvality tisku. Kvalita tisku je na vysoké úrovni a to díky hliníkovému rámu. Jednou z nevýhod základního modelu Ender 3 je, že neobsahuje automatickou kalibraci podložky. Toto vylepšení bylo na konkrétní tiskárnu dodáno pomocí senzoru BLTouch. Zároveň je tiskárna v základní verzi trochu hlučnější. Tento nedostatek byl však odstraněn vylepšením ve formě nové základní desky s ovladačem krokových motorů. [14]

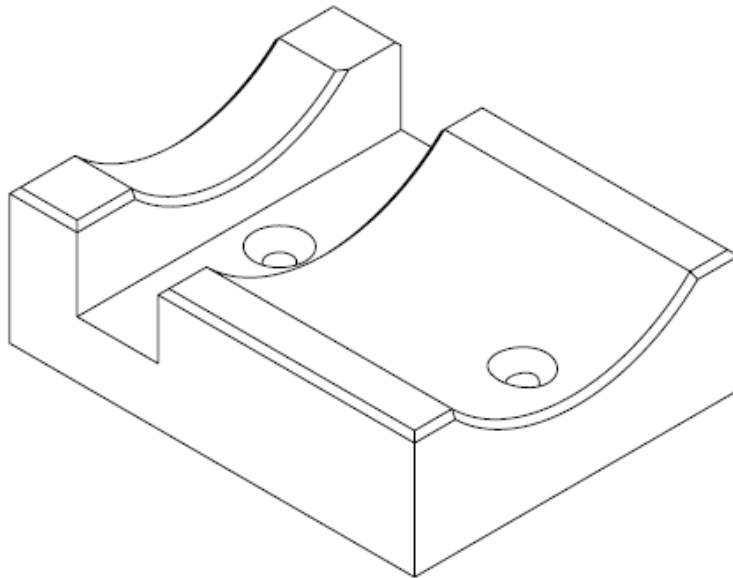
Technické parametry:

Tab. 3 Technické parametry tiskárny Ender 3

Rozměr tiskárny	440 x 410 x 465 mm
Rozměry podložky	235 x 235 mm
Technologie 3D tisku	FDM
Tiskový materiál	ABS, ASA, FLEX, Nylon, PETG, PLA, PVA, TUP, Wood
Průměr filamentu	1,75 mm
Hmotnost	8,6 kg
Počet hlav	1
Displej	Informační/segmentový
Možnost tisku	PC přes USB 2.0, SD karta
Doporučená rychlost	180 mm/s
Min. tloušťka vrstvy	0,1 mm
Max. tloušťka vrstvy	0,4 mm

8.1. Součást PA70301

První tištěnou součástí je držák PA70301, který se uplatňuje jako příslušenství k myčce. Tato součást slouží jako stojan pro motorový skelet. Celý tento motor váží přibližně 23 kg. Zamezí mu pohyb a umožní snadnou montáž motorových komponentů. V rámci konvenční výroby této součásti se využívá plast POM a váha dílu je přibližně 1 kg. Rozměrové parametry součásti jsou 120x150x50 mm.



Obr. 19 Součást PA70301 - držák

Prvotní krok zahrnuje vytvoření modelu dané součásti v CAD systému. Pro tvorbu byl zvolen software SolidWorks. Model se vytvářel dle parametrické předlohy a nedošlo k žádné záměně či úpravě jednotlivých rozměrů. Vytvoření modelu v CAD systému je důležité kvůli převedení do formátu *.stl, který je potřebný k tisku.

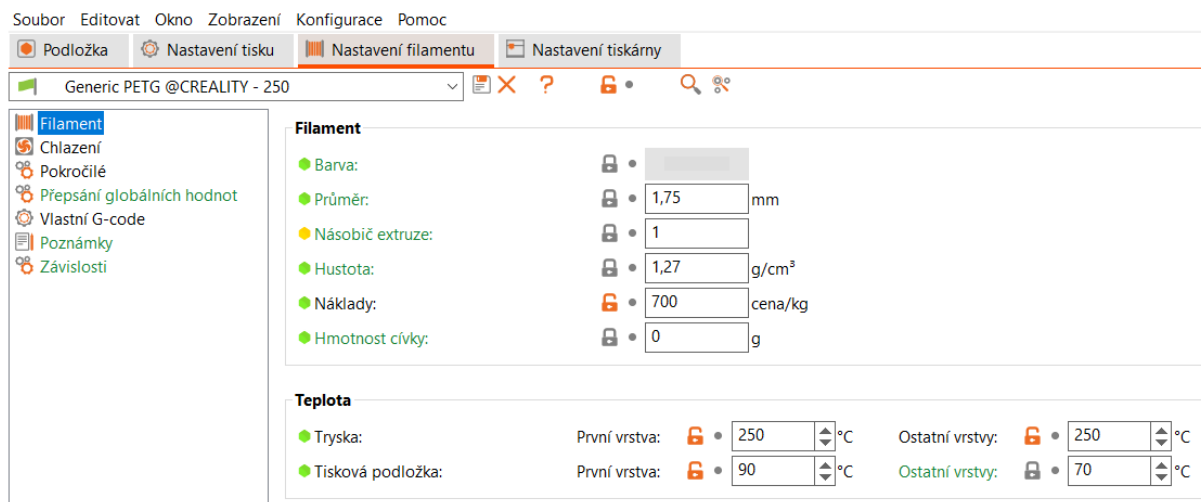
Následně co dojde k exportu *.stl formátu je prověřena celistvost vygenerovaného objektu. V modelu držáku nebyly nalezeny žádné vady či chyby, v tu chvíli může dojít k 3D tisku aniž by došlo k vadám kvůli nedostatkům v modelu.

Pro vygenerování souboru potřebného pro 3D tiskárnu byl zvolen software PrusaSlicer, který je kompatibilní se zvolenou 3D tiskárnou Ender 3. Program umožňuje základní možnosti jako je rozvržení součásti na tiskové podložce, nastavení teploty tiskové podložky a trysky. Dle zvoleného materiálu pro tisk byly nastaveny v programu PrusaSlicer konkrétní parametry.

Pro různé materiály se používají odlišné teploty. V tomto konkrétním případě, kdy byl využit materiál PETG (filament od firmy Prusament) byly zvoleny teploty, které doporučuje výrobce. Teplota trysky byla nastavena na 250°C. Teplota podložky první vrstvy byla nastavena na 90°C a pro tisk ostatních vrstev na 70°C. Pro tento tisk nebylo nutné použít pomocné podpěry k tisku.

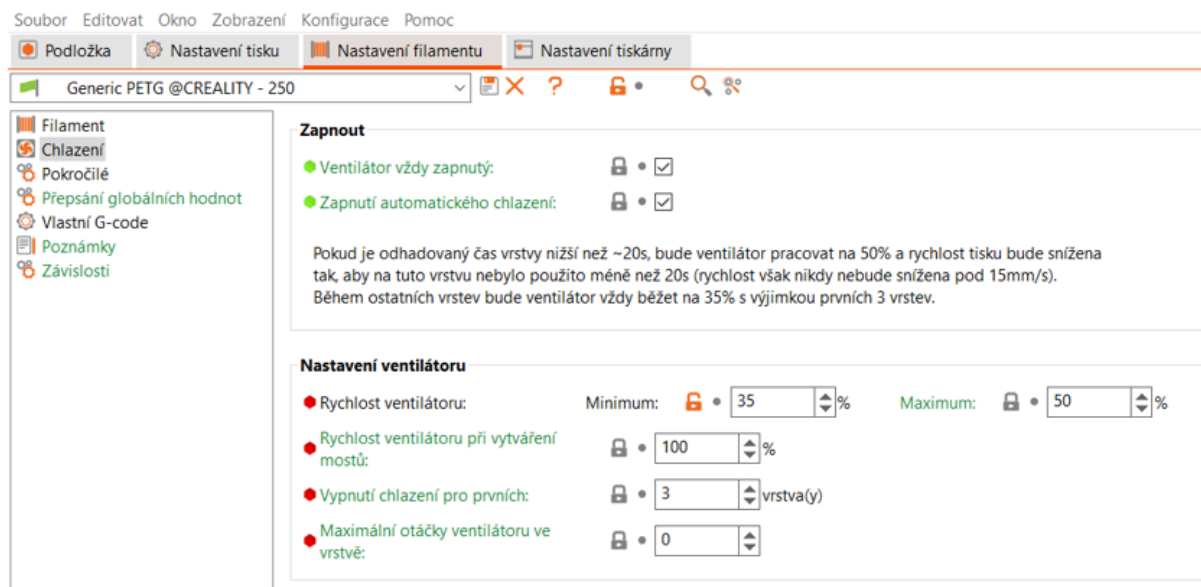
V nastavení parametrů filamentu je také možné měnit násobič extruze. Tímto parametrem se ovlivňují kroky extruderu, který dodává filament do trysky. V tomto případě byl zvolen násobič

hodnoty 1. Kroky extruderu byly nastaveny přímo na tiskárně, protože toto nastavení společně s materiálem PETG slouží jako výchozí nastavení použité tiskárny.



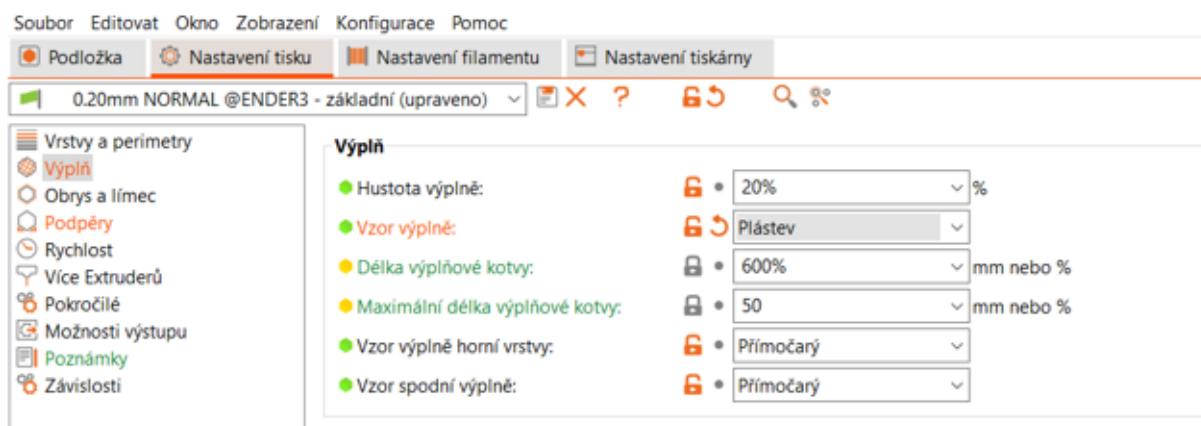
Obr. 20 Nastavení filamentu

Rychlost ventilátoru se odvíjí od tisknutého materiálu, jelikož každý materiál má odlišné vlastnosti. V tomto konkrétním případě byla zvolena rychlost ventilátoru 35% až 50%. Pouze při tisku mostů je rychlost ventilátoru na 100%. Toto nastavení se využívá kvůli tomu, aby nedošlo k deformaci modelu.



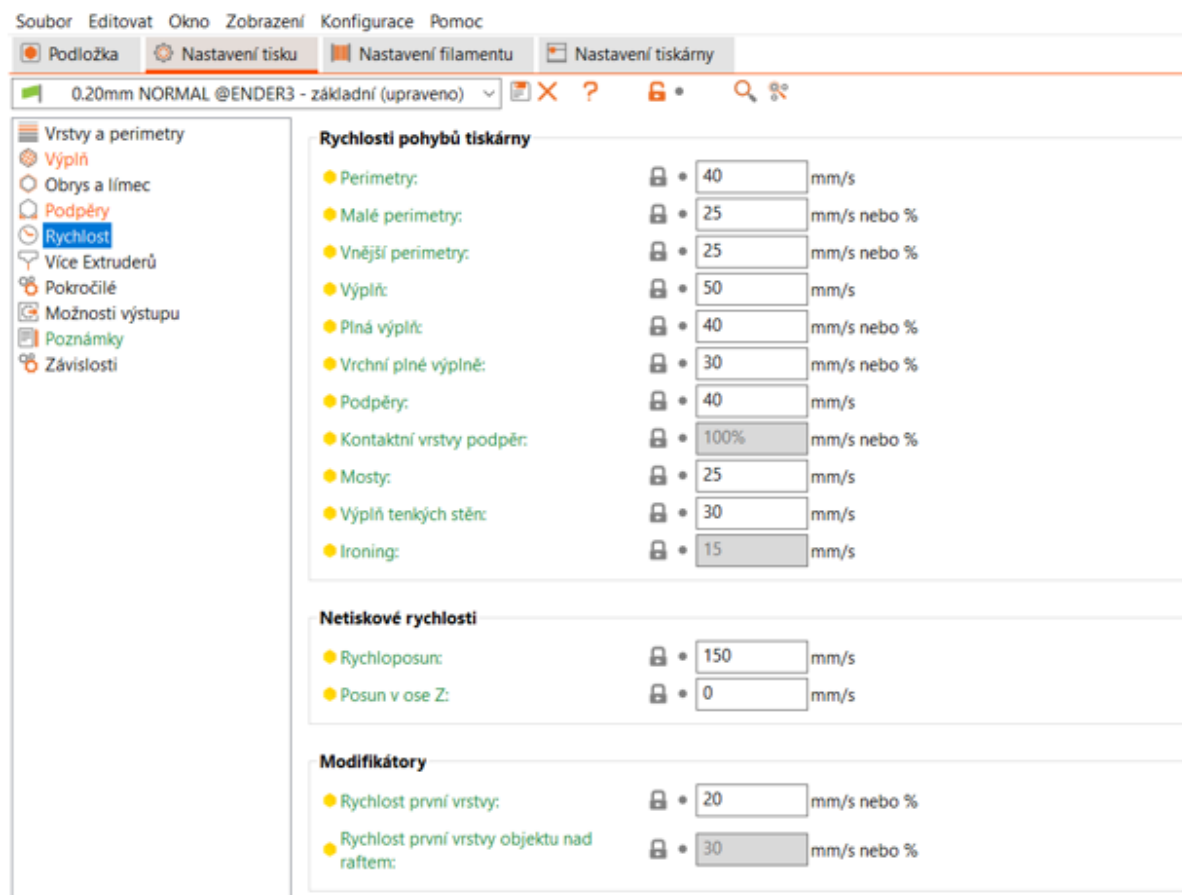
Obr. 21 Nastavení chlazení

Jelikož se nejedná o velmi namáhanou součást, u které by bylo vysoké riziko prasknutí, tak byla výplň součásti nastavena na 20%. Z hlediska pevnosti v tahu byla zvolena plástvová výplň.



Obr. 22 Nastavení výplně

Rychlosti pohybů tisku byly nastaveny dle doporučených hodnot a zároveň na základě zkušeností vedoucího střediska obrábění, který se zabývá 3D tiskem. Tyto rychlosti je možné následně upravovat pro zvýšení rychlosti výroby. Musí se však stále myslet na kvalitu výrobku.



Obr. 23 Nastavení rychlosti

Software PrusaSlicer umožňuje přidávat vlastní instrukce před i za G-code každého tisku. V začátku G-code jde, ve shrnutí, o přípravu tiskárny před tiskem. Konkrétně v tomto případě se nastaví teplota trysky společně s teplotou podložky na definovanou mez a poté se provede pomocí senzorů BLTouch -> *bed leveling*. Jedná se o zjištění nerovností tiskové podložky. Po

celé ploše podložky je definováno 9 bodů, na kterých se zjišťuje výška pomocí senzoru. Na základě těchto informací dokáže firmware tyto nerovnosti vyrovnávat. Prostřednictvím funkce *bed leveling* snadněji dosáhneme lepší první vrstvy tisku bez nutnosti složité kalibrace před každým tiskem.

Po dokončení tisku jsou přidány instrukce pro přesun tiskové hlavy do předem nastavených souřadnic. Dochází také k vypnutí chlazení a vypnutí vyhřívání trysky s tiskovou podložkou.

Vlastní G-code je také možné vkládat například při změně vrstvy nebo při změně filamentu.

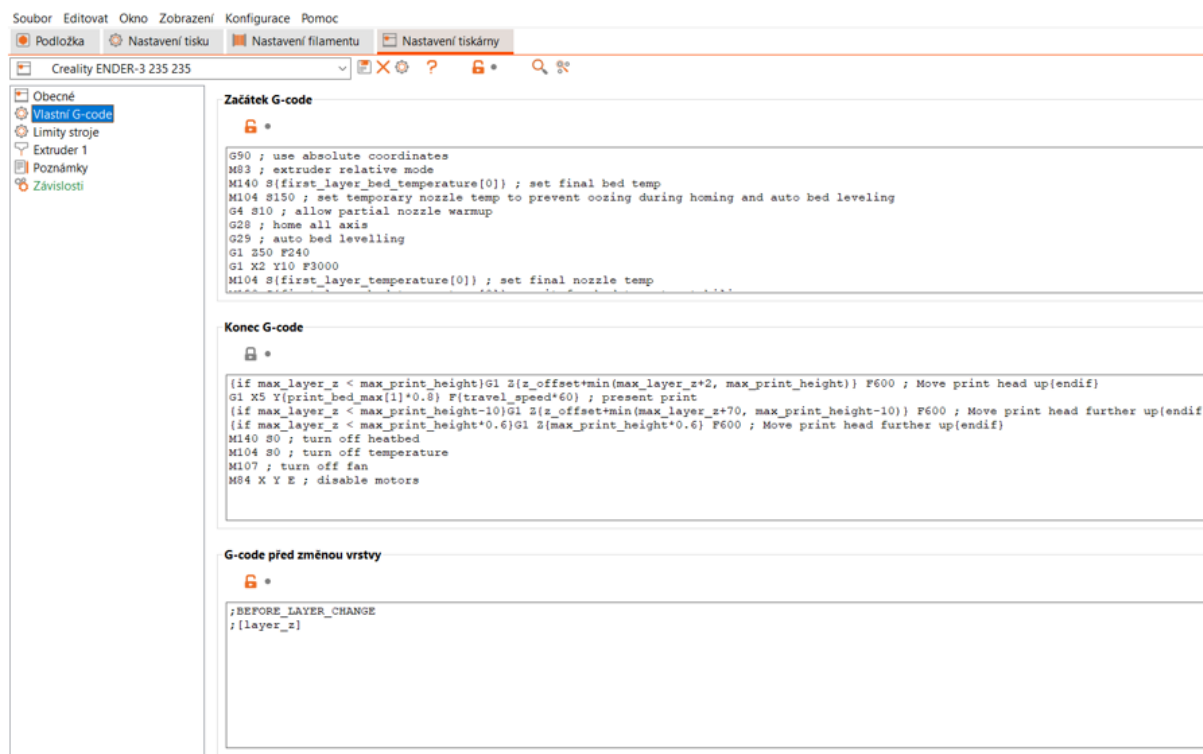
Pro zvolenou tiskárnu Ender 3 byly přidány před a za G-code vlastního tisku následující instrukce.

Začátek G-code:

```
G90 ; use absolute coordinates
M83 ; extruder relative mode
M140 S{first_layer_bed_temperature[0]} ; set final bed temp
M104 S150 ; set temporary nozzle temp to prevent oozing during homing and auto bed
leveling
G4 S10 ; allow partial nozzle warmup
G28 ; home all axis
G29 ; auto bed levelling
G1 Z50 F240
G1 X2 Y10 F3000
M104 S{first_layer_temperature[0]} ; set final nozzle temp
M190 S{first_layer_bed_temperature[0]} ; wait for bed temp to stabilize
M109 S{first_layer_temperature[0]} ; wait for nozzle temp to stabilize
G1 Z0.28 F240
G92 E0
G1 Y140 E10 F1500 ; prime the nozzle
G1 X2.3 F5000
G92 E0
G1 Y10 E10 F1200 ; prime the nozzle
G92 E0
```

Konec G-code:

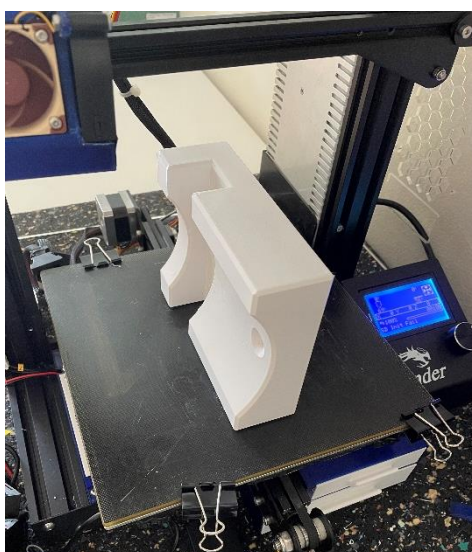
```
{if max_layer_z < max_print_height}G1 Z{z_offset+min(max_layer_z+2, max_print_height)}
F600 ; Move print head up{endif}
G1 X5 Y{print_bed_max[1]*0.8} F{travel_speed*60} ; present print
{if max_layer_z < max_print_height-10}G1 Z{z_offset+min(max_layer_z+70,
max_print_height-10)} F600 ; Move print head further up{endif}
{if max_layer_z < max_print_height*0.6}G1 Z{max_print_height*0.6} F600 ; Move print
head further up{endif}
M140 S0 ; turn off heatbed
M104 S0 ; turn off temperature
M107 ; turn off fan
M84 X Y E ; disable motors
```



Obr. 24 Nastavení G-code

Před finálním tisknutím dané součásti je důležité připravit povrch tiskové podložky. Tato příprava zahrnuje zbavení se nečistot a odmaštění. Pro lepší přilnavost povrchu byl využit fixační lak značky 3DLack. Docílíme tak lepší fixace filamentu k tiskové podložce.

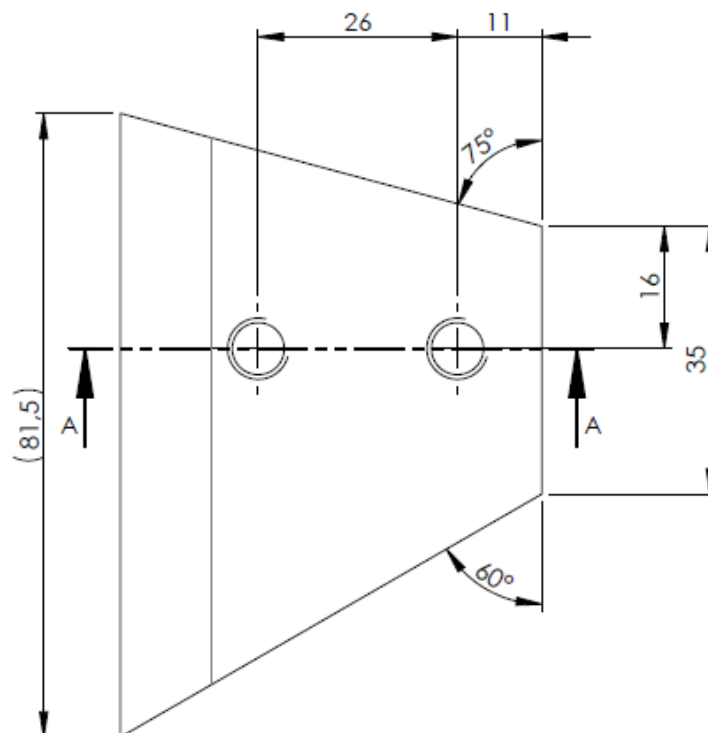
Po těchto krocích byla vložena SD karta s vygenerovaným G-code do tiskárny a inicializován tisk. Při tisku byla hlídána přilnavost a kvalita první vrstvy. V průběhu tisku docházelo k vizuální kontrole výrobku. Po dokončení tisku bylo vyčkáno na vychladnutí tiskové podložky, a to z důvodu snadného odejmutí finálního výrobku.



Obr. 25 Tisk součásti PA70301

8.2. Součást PA54423

Další vhodná součást PA54423 zahrnuje stejné kroky pracovního postupu jako součást PA70301. Nedošlo k žádným výkresovým úpravám. Pro tisk byl zvolen materiál PETG, který odpovídá mechanickým potřebám součásti. Teplota trysky byla nastavena na 250°C, tisková podložka první vrstvy byla nastavena na 90°C a ostatní vrstvy na 70°C. Tento tisk stejně jako předchozí, mohl být tisknut bez nutnosti využití podpěry. Při konvenční výrobě této součásti se využívá plast PE 300 a váha dílu je přibližně 1 kg. Součást má rozměry 82x55x35 mm.

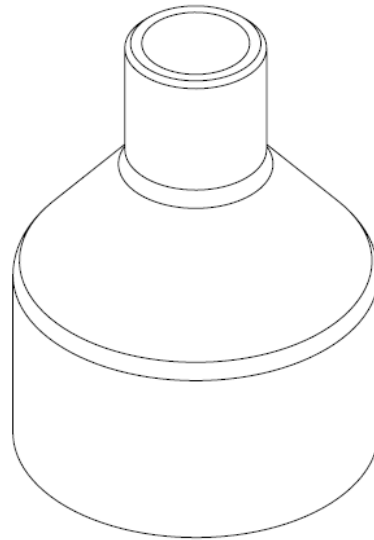


Obr. 26 Součást PA54423 - podstavec

8.3. Součást PA70679

Mezi další testované součásti patří PA70679. Jedná se o přechodovou trubicí na sací trubku od vysavače. Tento jednoduchý díl slouží na svařovně, kde usnadňuje odsávání nečistot svářečovi při odklizení nečistot. Při konvenční výrobě se obrábí materiál plast POM o přibližné váze 0,85 kg.

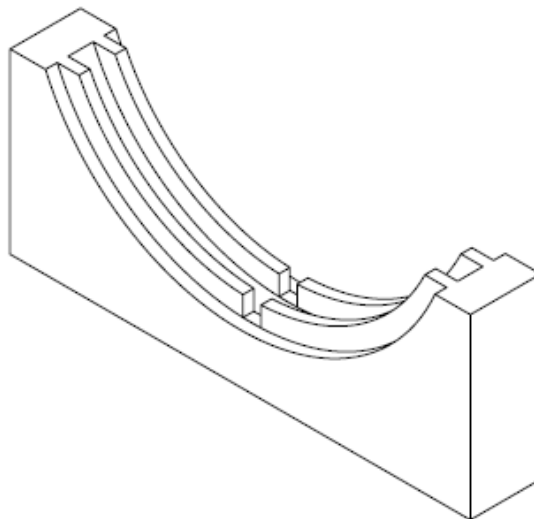
Touto trubicí lze odsávat z hůře dostupných míst svařených konstrukcí, kde se například nedostaneme smetáčkem. Jelikož se tímto dílem zabírá strojní kapacita, byl zvolen vedoucím obrobny jako vhodný díl pro aditivní výrobu kvůli uvolnění stroje. Opět nedošlo k žádným výkresovým modifikacím, aby se vytvořil reálný model součásti a byla tak zaručena funkčnost daného dílu. Součást se vyrábí v rozměrech 118x170x51 mm.



Obr. 27 Součást PA70679 – přechodová trubice

8.4. Součást PA69459

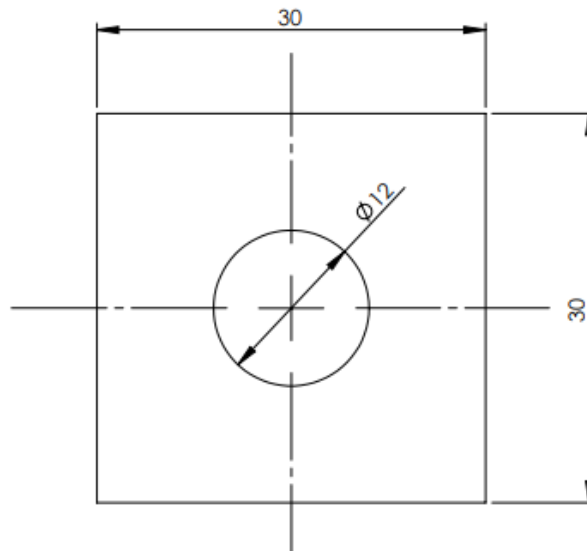
Další součást zahrnuje držák s drážkami PA69459. Jedná se o montážní přípravek, který slouží k zajištění skeletu motoru a následně montáži komponentů motoru. Tento motor váží přibližně 15 kg. V rámci konvenční výroby této součásti se využívá plast POM a váha dílu je zhruba 5 kg. Slabým místem přípravku jsou jeho žebra. V tomto zeslabeném místě vzniká větší tlak. Na zeslabené místo má vliv jak tlak při montáži od pracovníka, tak váha motoru. Díl byl vytisknut ze základního materiálu PETG a tiskovým nastavením bylo dosaženo vysoké pevnosti a odolnosti. Pro bezpečnostní zkoušku byl díl zatížen trojnásobkem váhy motoru a bez problémů touto zátěžovou zkouškou prošel bez poškození. Rozměrové parametry součásti jsou 255x99x39 mm.



Obr. 28 Součást PA69459 – držák s drážkami

8.5. Součást PA3541709

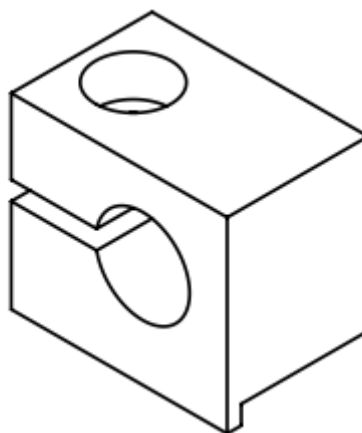
Jedná se o distanční podložku, která slouží pouze k vymezení vzdálenosti ochranného krytu čidla. Díl se nasazuje na kruhovou tyč o průměru 14mm s osazením o průměru 11,5mm. Při konvenční výrobě této součásti se využívá plast POM a váha dílu je přibližně 0,009 kg. Součást má rozměry 30x30x8 mm. Vzhledem k tomu, že díl nenese žádnou konstrukční váhu, byl zvolen jako nahrazující materiál PETG.



Obr. 29 Součást PA3541709 – distanční podložka

8.6. Součást 00055107

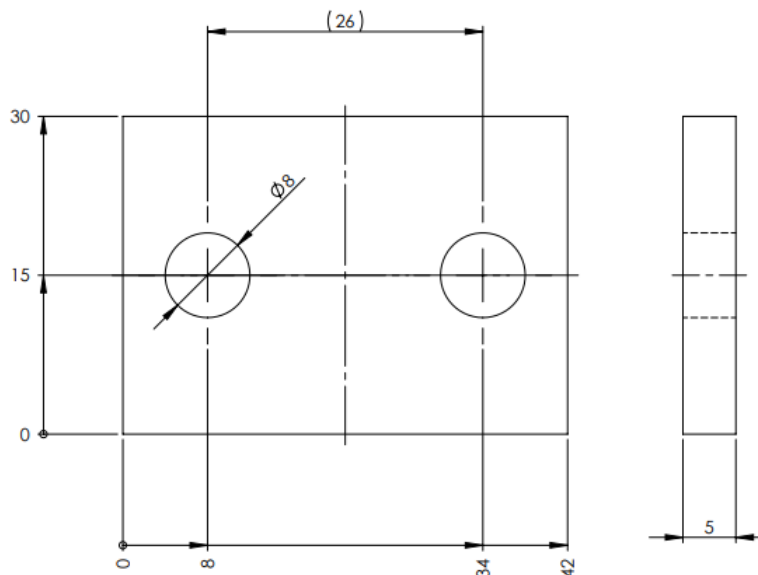
Jedná se o objímku pro optický senzor. V otvoru o průměru 10mm je umístěn optický senzor, který dodává signál do řídicí jednotky s informací o narušení bezpečnostní zóny. V rámci konvenční výroby této součásti se využívá plast POM a váha dílu je zhruba 0,006 kg. Součást se vyrábí v rozměrech 20x20x15 mm. Díl byl vytištěn z materiálu PETG a to z důvodu, že tento materiál disponuje požadovanou houževnatostí pro funkci objímky.



Obr. 30 Součást 00055107 – objímka pro optický senzor

8.7. Součást PA4209925

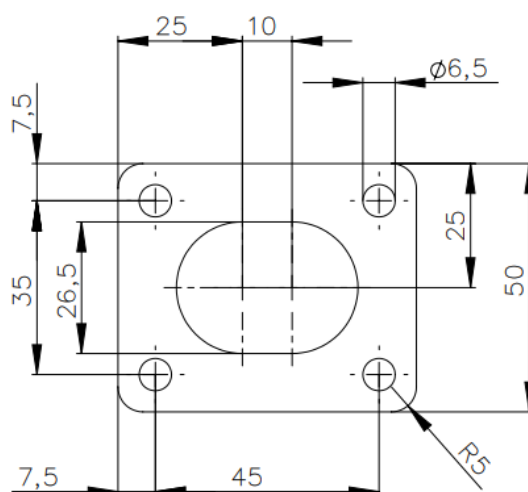
Distanční podložka, jejíž funkce je umístit elektrickou svorku do správné polohy. V rámci konvenční výroby této součásti se využívá plast PS a váha dílu je zhruba 0,006 kg. Svorka je poté posunuta o požadovaných 5mm. Součást má rozměry 42x30x5 mm. Předepsaný materiál PS lze nahradit materiálem PETG.



Obr. 31 Součást PA4209925 – distanční podložka

8.8. Součást PA3500588

Tato součást slouží jako krytka na vyústění vysokotlakého pohyblivého ostříku. Drážkou ve středu tryska vykonává pravidelný oscilační pohyb. Díl je pohledový (nasmíčený proud vody přitahuje pozornost očí), tudíž je nutné dodržení předepsané černé barvy, aby vše esteticky ladilo. V rámci konvenční výroby této součásti se využívá plast PE a váha dílu je zhruba 0,022 kg. Tento díl byl tisknut z materiálu PETG, jelikož je jeho mechanická a chemická odolnost pro tento díl dostačující. Rozměrové parametry součásti jsou 60x50x10 mm.



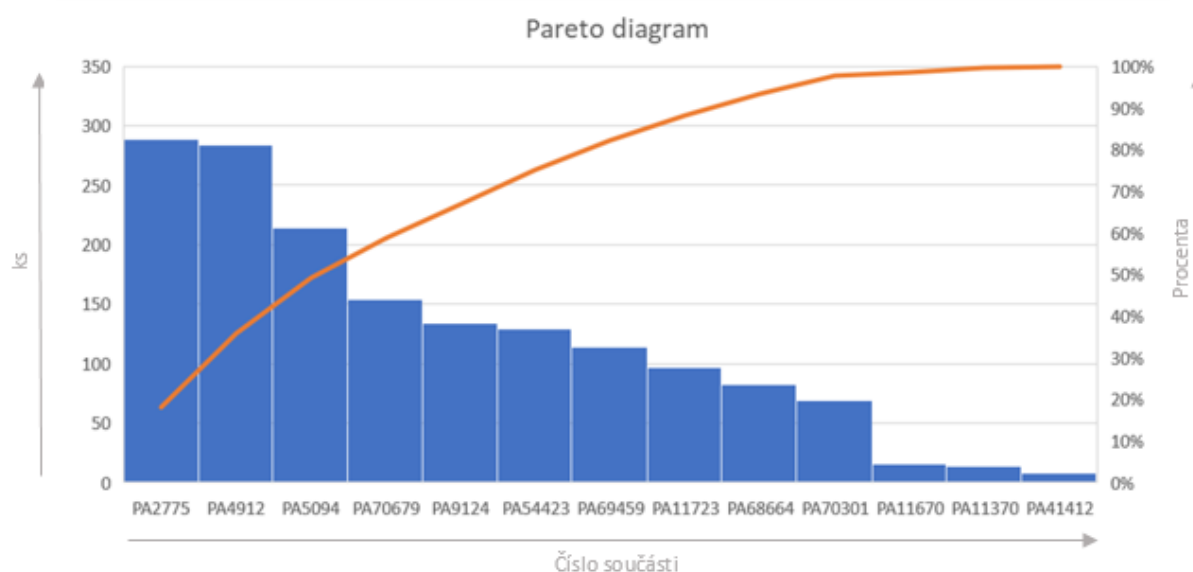
Obr. 32 Součást PA3500588 – krytka pro vysokotlaký pohyblivý ostřík

9. Paretův diagram

Na základě Paretova diagramu byly zhodnoceny součásti, které mají nejčtenější výrobní nedostatky, jako jsou například vady zaviněné nečistotou či špatnými nástroji. Za nedostatečné nástroje se považují především opotřebené frézy, které již nesplňují potřebné parametry k dosažení přesných parametrů součástí. Mezi další nedostatky patří chyby obsluhy a zatížení strojních kapacit.

Vhodnou analýzou pro zvolení vhodných součástí, které se budou vyrábět prostřednictvím aditivní výroby, byl Pareto diagram. Tento diagram je založený na principu 80:20. Poukazuje na fakt, že 80% problémů spojené s kvalitou způsobuje 20% příčin. [12]

Zároveň se všechny výsledky konzultovaly s vedoucím obráběcího střediska a byly vybrány díly, které mají vysoké předpoklady pro aditivní výrobu. Zohledňoval se především typ součástí, druh vady a druh kořenové příčiny. Nebylo možné se orientovat pouze výsledkem Paretova diagramu. Tím je myšleno, že se netestovaly součásti, které byly na prvních místech. Dle konzultací vyšlo, že nejvyšší přínos prostřednictvím plastové aditivní výroby bude u součástí PA70301 (držák), PA54423 (podstavec), PA70679 (přechodová trubice), PA69459 (držák s drážkami), PA3541709 (distanční podložka), 00055107 (objímka pro optický snímač), PA4209925 (distanční podložka), PA3500588 (krytka pro vysokotlaký pohybový ostřík).



Obr. 33 Pareto diagram

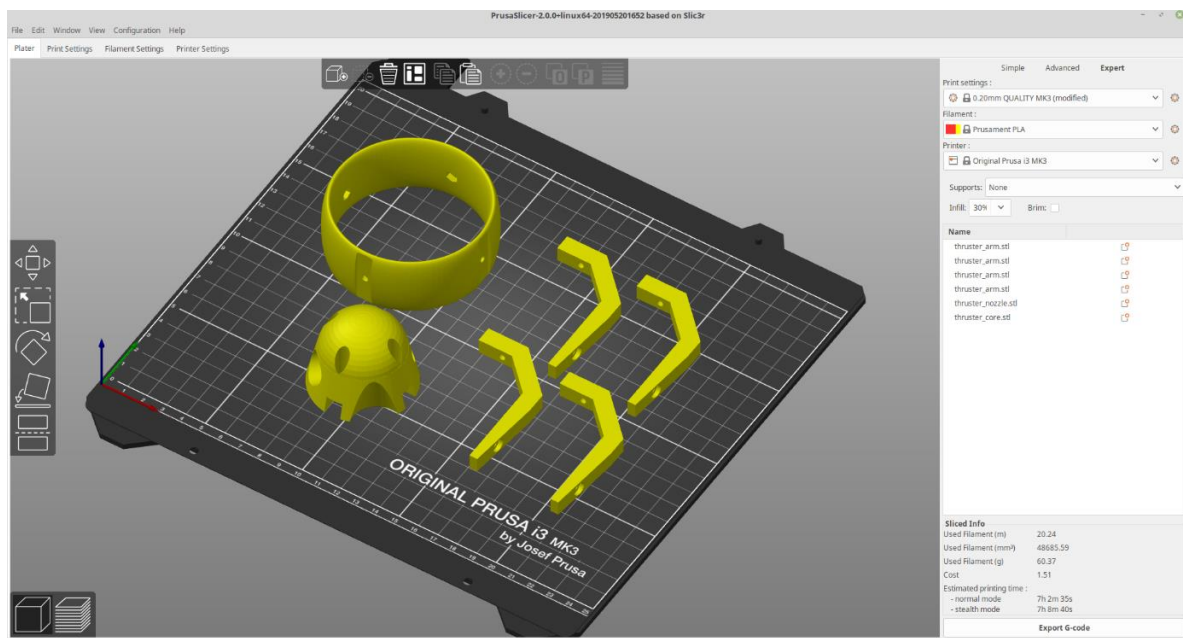
10. Použitý software

Pro optimalizaci prostřednictvím redukce modelů v koncepčním návrhu výrobního procesu pro aditivní výrobu bylo vybráno několik součástí s vysokým potenciálem přínosu. Tyto součásti byly navrženy v SW CAD a následně došlo k převedení 3D modelu na strojový kód - G-code. K tomuto převodu je využit SW nazývaný Slicer. Vstupem programu je nejen 3D model vytvořený v SW CAD, ale také další řada nastavení. Dané modely se dají ve většině případů modifikovat dle potřeby, ať už se jedná o zmenšení či zvětšení jednotlivých rozměrů, otáčení souřadnicového systému XYZ, vytváření řezů či jednotlivé rozdělení na samostatné objekty. Všechny tyto aspekty mají vliv na kvalitu, pevnost a dobu tisku. Slicer a jeho správné nastavení součástí je též důležité jako samotná kvalita a mechanické zpracování. [4], [5]

Pro následující součásti byl využit konkrétně SW program SolidWorks a PrusaSlicer.

SW SolidWorks se používá k vývoji mechatronických systémů od začátku do konce. V počáteční fázi se software používá pro plánování, vizuální nápady, modelování, posouzení proveditelnosti, prototypování a řízení projektů. Software se dále používá pro návrh a budování mechanických, elektrických a softwarových prvků. Software lze použít pro správu, včetně správy zařízení, analýzy, automatizace dat a cloudových služeb. [6] SolidWorks je jedním z nejpoužívanějších CAD programů v profesionálním prostředí po celém světě. Zároveň je i nadále široce používanou a oblíbenou CAD možností, kterou mnozí považují za standardní technickou pomoc. [7]

SW PrusaSlicer jedná se o program, který dokáže převést 3D model, jenž byl vytvořen v SW CAD (.stl, .obj) na strojově čitelný kód, který je potřebný pro 3D tiskárnu (.gcode). [5]



Obr. 34 SW PrusaSlicer

11. Kalkulace nákladů plastového 3D tisku

Vychází se z kalkulace nákladů u konvenční a aditivní výroby. V rámci výpočtu se volí základní kalkulační vzorec, na bázi úplných nákladů, která je pro potřeby tohoto porovnání dostatečná. Tato kalkulační vzorec vychází z typového kalkulačního vzorce, který obsahuje následující položky [24], [25]:

přímý materiál
+ přímé mzdy
+ ostatní přímé náklady
+ výrobní režie

= vlastní náklady výroby
+ správní režie

= vlastní náklady výkonu
+ odbytová režie

= úplné vlastní náklady

Ekonomická analýza této práce se soustředí na porovnání stejných produktů, a to zejména jejich výroby, proto se vlastní kalkulační vzorec zaměřuje na porovnání do vlastních nákladů výroby, které se vlastní výroby týkají, to je důvodem zanedbání správní a odbytová režie. Pro potřeby této práce a naplnění zadání je to irelevantní.

Na základě konkrétních podnikových podmínek byly pro výpočet vlastních nákladů výroby vyčleněny dvě hlavní položky nákladů, materiálové náklady a zpracovací náklady. Materiálové náklady zahrnují materiál a v rámci zpracovacích nákladů se berou v potaz náklady týkající se stroje a náklady týkající se pracovníků. Ve zpracovacích nákladech jsou tedy zahrnuté jak přímé mzdy, tak i náklady týkající se vlastních strojů. Pro tento konkrétní případ jsou vlastní náklady výroby vyhodnoceny sečtením materiálových a zpracovacích nákladů a to $VNV = MN + ZN$.

Pro vyhodnocení kalkulačních nákladů pro plastový 3D tisk se použily následující vzorce.

Materiálové náklady: $\sum_{i=1}^n (N_s * C_j) i$ [Kč]

N_s = norma spotřeby materiálu [m]

C_j = cena za jednotku [Kč/m]

n = počet typů materiálu

Zpracovací náklady: $\sum_{i=1}^n (N_{\xi} * SZN) i$ [Kč]

N_{ξ} = norma času [min]

$ZN = \text{mzdové náklady} + \text{strojní náklady}$

$SZN = \text{sazba mzdových nákladů} + \text{strojní sazba [Kč/min]}$

$n = \text{počet pracovišť}$

Nyní bude provedena kalkulace vlastních nákladů výroby pro jednotlivé řešené součásti. U jednotlivých součástí bude nejprve uvedena kalkulace konvenční výroby a následovat ji bude kalkulace aditivní výroby. Vyhodnocení výsledných hodnot bude uvedeno v následující kapitole.

11.1. Kalkulace součásti PA70301

Hodnoty konvenční výroby:

Materiálové náklady:

Materiál: plast POM (plochá tyč)

Norma spotřeby materiálu (N_s): 0,150 m

Cena za jednotku (C_j): 1 768,94 Kč/m

$$MN = (N_s * C_j) = 0,150 * 1\,768,94 = \underline{265,341 \text{ Kč}}$$

Zpracovací náklady:

Jedná se o výrobu na 2 strojích.

SZN 1: 486 Kč/h => 8,1 Kč/min

SZN 2: 957 Kč/h => 15,95 Kč/min

Norma času 1 (strojní pila): $N_{\varepsilon 1} = 16$ minut

Norma času 2 (frézka): $N_{\varepsilon 2} = 77$ minut

$$ZN = (SZN_1 * N_{\varepsilon 1}) + (SZN_2 * N_{\varepsilon 2}) = (8,1 * 16) + (15,95 * 77) = \underline{1\,357,75 \text{ Kč}}$$

Vlastní náklady výroby: $MN + ZN = 265,341 + 1\,357,75 = \underline{\underline{1\,623,091 \text{ Kč}}}$

Hodnoty plastové aditivní výroby

Materiálové náklady:

Materiál: PETG

Norma spotřeby materiálu (N_s): 0,21562 kg

Cena za jednotku (C_j): 700 Kč/kg

$$MN = (N_s * C_j) = 0,21562 * 700 = \underline{150,934 \text{ Kč}}$$

Zpracovací náklady:

SZN: 80 Kč/h = 1,33 Kč/min

Důvodem takto nízké sazby zpracovacích nákladů je jednak více strojová obsluha, kdy pracovník obsluhuje současně 4 stroje, tak i nízká pořizovací cena 3D tiskárny (10 889 Kč).

Norma času: $N_{\xi} = 989$ minut

$$ZN = (SZN * N_{\xi}) = 1,33 * 989 = \underline{1315,37 \text{ Kč}}$$

$$\underline{\text{Vlastní náklady výroby: } MN + ZN = 150,934 + 1315,37 = \underline{1\,466,304 \text{ Kč}}}$$

Cenový rozdíl nákladů na 1 součást:

$$\text{konvenční výroba – aditivní výroba: } 1\,623,091 - 1\,466,304 = \underline{156,787 \text{ Kč}}$$

11.2. Kalkulace součásti PA54423

Hodnoty konvenční výroby

Materiálové náklady:

Materiál: plast PE 300 (plochá tyč)

Norma spotřeby materiálu (N_s): 0,085 m

Cena za jednotku (C_j): 203,88 Kč/m

$$MN = (N_s * C_j) = 0,085 * 203,88 = \underline{17,33 \text{ Kč}}$$

Zpracovací náklady:

Jedná se o výrobu na 3 strojích.

SZN 1: 486 Kč/h => 8,1 Kč/min

SZN 2: 957 Kč/h => 15,95 Kč/min

SZN 3: 957 Kč/h => 15,95 Kč/min

Tato součást se vyrábí v dávce 4 kusů.

Norma času 1 (strojní pila): $N_{\xi 1} = 4,75$ minut

Norma času 2 (frézka): $N_{\xi 2} = 22,23$ minut

Norma času 3 (frézka): $N_{\xi 2} = 14$ minut

$$ZN = (SZN_1 * N_{\xi 1}) + (SZN_2 * N_{\xi 2}) + (SZN_3 * N_{\xi 3}) = (8,1 * 4,75) + (15,95 * 22,23) + (15,95 * 14) = 616,344 \text{ Kč}$$

Vlastní náklady výroby: $MN + ZN = 17,33 + 616,344 = \underline{633,674 \text{ Kč}}$

Hodnoty plastové aditivní výroby

Materiálové náklady:

Materiál: PETG

Norma spotřeby materiálu (N_s): 0,0362 kg

Cena za jednotku (C_j): 700 Kč/kg

$$MN = (N_s * C_j) = 0,0362 * 700 = \underline{25,34 \text{ Kč}}$$

Zpracovací náklady:

SZN: 80 Kč/h = 1,33 Kč/min

Norma času: $N_{\xi} = 201$ minut

$$ZN = (SZN * N_{\xi}) = 1,33 * 201 = \underline{267,33 \text{ Kč}}$$

Vlastní náklady výroby: $MN + ZN = 25,34 + 267,33 = \underline{292,67 \text{ Kč}}$

Cenový rozdíl nákladů na 1 součást:

konvenční výroba – aditivní výroba: $633,674 - 292,67 = \underline{341,004 \text{ Kč}}$

11.3. Kalkulace součásti PA70679

Hodnoty konvenční výroby

Materiálové náklady:

Materiál: plast POM (tyčovina Ø 120)

Norma spotřeby materiálu (N_s): 0,17 m

Cena za jednotku (C_j): 2.917,31 Kč/m

$$MN = (N_s * C_j) = 0,17 * 2.917,31 = \underline{495,94 \text{ Kč}}$$

Zpracovací náklady:

Jedná se o výrobu na 2 strojích.

SZN 1: 486 Kč/h => 8,1 Kč/min

SZN 2: 957 Kč/h => 15,95 Kč/min

Tato součást se vyrábí v dávce 6 kusů.

Norma času 1 (strojní pila): $N_{\varepsilon 1} = 2,67$ minut

Norma času 2 (frézka): $N_{\varepsilon 2} = 20,67$ minut

$$ZN = (SZN_1 * N_{\varepsilon 1}) + (SZN_2 * N_{\varepsilon 2}) = (8,1 * 2,67) + (15,95 * 20,67) = \underline{351,314 \text{ Kč}}$$

$$\underline{\text{Vlastní náklady výroby: } MN + ZN = 495,94 + 351,314 = \underline{\underline{847,254 \text{ Kč}}}}$$

Hodnoty plastové aditivní výroby

Materiálové náklady:

Materiál: PETG

Norma spotřeby materiálu (N_s): 0,19274 kg

Cena za jednotku (C_j): 700 Kč/kg

$$Mn = (N_s * C_j) = 0,19274 * 700 = \underline{134,92 \text{ Kč}}$$

Zpracovací náklady:

SZN: 80 Kč/h = 1,33 Kč/min

Norma času: $N_\xi = 417$ minut

$$ZN = (SZN * N_\xi) = 1,33 * 417 = \underline{554,61 \text{ Kč}}$$

$$\underline{\text{Vlastní náklady výroby: } MN + ZN = 134,92 + 554,61 = \underline{689,53 \text{ Kč}}}$$

Cenový rozdíl nákladů na 1 součást:

$$\text{konvenční výroba – aditivní výroba: } 847,254 - 689,53 = \underline{157,724 \text{ Kč}}$$

11.4. Kalkulace součásti PA69459

Hodnoty konvenční výroby

Materiálové náklady:

Materiál: plast POM (plochá tyč)

Norma spotřeby materiálu (N_s): 0,26 m

Cena za jednotku (C_j): 1.401,32 Kč/m

$$MN = (N_s * C_j) = 0,26 * 1.401,32 = \underline{364,34 \text{ Kč}}$$

Zpracovací náklady:

Jedná se o výrobu na 2 strojích.

SZN 1: 486 Kč/h => 8,1 Kč/min

SZN 2: 957 Kč/h => 15,95 Kč/min

Tato součást se vyrábí v dávce 2 kusů.

Norma času 1 (strojní pila): $N_{\xi 1} = 9,5$ minut

Norma času 2 (frézka): $N_{\xi 2} = 43$ minut

$$ZN = (SZN_1 * N_{\xi 1}) + (SZN_2 * N_{\xi 2}) = (8,1 * 9,5) + (15,95 * 43) = \underline{762,8 \text{ Kč}}$$

$$\underline{\text{Vlastní náklady výroby: } MN + ZN = 364,34 + 762,8 = \underline{1\,127,14 \text{ Kč}}}$$

Hodnoty plastové aditivní výroby

Materiálové náklady:

Materiál: PETG

Norma spotřeby materiálu (N_s): 0,22059 kg

Cena za jednotku (C_j): 700 Kč/kg

$$MN = (N_s * C_j) = 0,22059 * 700 = \underline{154,42 \text{ Kč}}$$

Zpracovací náklady:

SZN: 80 Kč/h = 1,33 Kč/min

Norma času: $N_{\xi} = 489$ minut

$$ZN = (SZN * N_{\xi}) = 1,33 * 489 = \underline{650,37 \text{ Kč}}$$

$$\underline{\text{Vlastní náklady výroby: } MN + ZN = 154,42 + 650,37 = \underline{804,79 \text{ Kč}}}$$

Cenový rozdíl nákladů na 1 součást:

$$\text{konvenční výroba} - \text{aditivní výroba: } 1\,127,14 - 804,79 = \underline{322,35 \text{ Kč}}$$

11.5. Kalkulace součásti PA3541709

Hodnoty konvenční výroby

Materiálové náklady:

Materiál: plast POM (plochá tyč)

Norma spotřeby materiálu (N_s): 0,032 m

Cena za jednotku (C_j): 306,74 Kč/m

$$MN = (N_s * C_j) = 0,032 * 306,74 = \underline{9,82 \text{ Kč}}$$

Zpracovací náklady:

Jedná se o výrobu na 2 strojích.

SZN 1: 486 Kč/h => 8,1 Kč/min

SZN 2: 957 Kč/h => 15,95 Kč/min

Tato součást se vyrábí v dávce 33 kusů.

Norma času 1 (strojní pila): $N_{\epsilon 1} = 1,30$ minut

Norma času 2 (frézka): $N_{\epsilon 2} = 3,05$ minut

$$ZN = (SZN_1 * N_{\epsilon 1}) + (SZN_2 * N_{\epsilon 2}) = (8,1 * 1,30) + (15,95 * 3,05) = \underline{59,178 \text{ Kč}}$$

$$\underline{\text{Vlastní náklady výroby: } MN + ZN = 9,82 + 59,178 = \underline{68,998 \text{ Kč}}}$$

Hodnoty plastové aditivní výroby

Materiálové náklady:

Materiál: PETG

Norma spotřeby materiálu (N_s): 0,00416 kg

Cena za jednotku (C_j): 700 Kč/kg

$$MN = (N_s * C_j) = 0,00416 * 700 = \underline{2,91 \text{ Kč}}$$

Zpracovací náklady:

SZN: 80 Kč/h = 1,33 Kč/min

Norma času: $N_{\epsilon} = 27$ minut

$$ZN = (SZN * N_{\epsilon}) = 1,33 * 27 = \underline{35,91 \text{ Kč}}$$

$$\underline{\text{Vlastní náklady výroby: } MN + ZN = 2,91 + 35,91 = \underline{38,82 \text{ Kč}}}$$

Cenový rozdíl nákladů na 1 součást:

$$\text{konvenční výroba – aditivní výroba: } 68,998 - 38,82 = \underline{30,178 \text{ Kč}}$$

11.6. Kalkulace součásti 00055107

Hodnoty konvenční výroby

Materiálové náklady:

Materiál: plast POM (plochá tyč)

Norma spotřeby materiálu (N_s): 0,025 m

Cena za jednotku (C_j): 831,14 Kč/m

$$MN = (N_s * C_j) = 0,025 * 831,14 = \underline{20,78 \text{ Kč}}$$

Zpracovací náklady:

Jedná se o výrobu na 2 strojích.

SZN 1: 486 Kč/h => 8,1 Kč/min

SZN 2: 957 Kč/h => 15,95 Kč/min

Tato součást se vyrábí v dávce 50 kusů.

Norma času 1 (strojní pila): $N_{\varepsilon 1} = 3,20$ minut

Norma času 2 (frézka): $N_{\varepsilon 2} = 3,90$ minut

$$ZN = (SZN_1 * N_{\varepsilon 1}) + (SZN_2 * N_{\varepsilon 2}) = (8,1 * 3,20) + (15,95 * 3,90) = \underline{88,125 \text{ Kč}}$$

$$\underline{\text{Vlastní náklady výroby: } MN + ZN = 20,78 + 88,125 = \underline{108,905 \text{ Kč}}}$$

Hodnoty plastové aditivní výroby

Materiálové náklady:

Materiál: PETG

Norma spotřeby materiálu (N_s): 0,00399 kg

Cena za jednotku (C_j): 700 Kč/kg

$$MN = (N_s * C_j) = 0,00399 * 700 = \underline{2,79 \text{ Kč}}$$

Zpracovací náklady:

SZN: 80 Kč/h = 1,33 Kč/min

Norma času: $N_{\varepsilon} = 45$ minut

$$ZN = (SZN * N_{\epsilon}) = 1,33 * 45 = \underline{59,85 \text{ Kč}}$$

$$\underline{\text{Vlastní náklady výroby: } MN + ZN = 2,79 + 59,85 = \underline{62,64 \text{ Kč}}}$$

Cenový rozdíl nákladů na 1 součást:

$$\text{konvenční výroba – aditivní výroba: } 108,905 - 62,64 = \underline{46,265 \text{ Kč}}$$

11.7. Kalkulace součásti PA4209925

Hodnoty konvenční výroby

Materiálové náklady:

Materiál: plast PS (deska)

Norma spotřeby materiálu (N_s): 0,00126 m

Cena za jednotku (C_j): 330,60 Kč/m

$$MN = (N_s * C_j) = 0,00126 * 330,60 = \underline{0,42 \text{ Kč}}$$

Zpracovací náklady:

Jedná se o výrobu na 2 strojích.

SZN 1: 486 Kč/h => 8,1 Kč/min

SZN 2: 957 Kč/h => 15,95 Kč/min

Tato součást se vyrábí v dávce 100 kusů.

Norma času 1 (strojní pila): $N_{\epsilon 1} = 2,15$ minut

Norma času 2 (frézka): $N_{\epsilon 2} = 3,60$ minut

$$ZN = (SZN_1 * N_{\epsilon 1}) + (SZN_2 * N_{\epsilon 2}) = (8,1 * 2,15) + (15,95 * 3,60) = \underline{74,835 \text{ Kč}}$$

$$\underline{\text{Vlastní náklady výroby: } MN + ZN = 0,42 + 74,835 = \underline{75,255 \text{ Kč}}}$$

Hodnoty plastové aditivní výroby

Materiálové náklady:

Materiál: PETG

Norma spotřeby materiálu (N_s): 0,00438 kg

Cena za jednotku (C_j): 700 Kč/kg

$$MN = (N_s * C_j) = 0,00438 * 700 = \underline{3,07 \text{ Kč}}$$

Zpracovací náklady:

SZN: 80 Kč/h = 1,33 Kč/min

Norma času: $N_{\xi} = 28$ minut

$$ZN = (SZN * N_{\xi}) = 1,33 * 28 = \underline{37,24 \text{ Kč}}$$

Vlastní náklady výroby: $MN + ZN = 3,07 + 37,24 = \underline{40,31 \text{ Kč}}$

Cenový rozdíl nákladů na 1 součást:

konvenční výroba – aditivní výroba: $75,255 - 40,31 = \underline{34,945 \text{ Kč}}$

11.8. Kalkulace součásti PA3500588

Hodnoty konvenční výroby

Materiálové náklady:

Materiál: plast PE (deska)

Norma spotřeby materiálu (N_s): 1 m

Cena za jednotku (C_j): 19,662 Kč/m

$$MN = (N_s * C_j) = 1 * 19,662 = \underline{19,662 \text{ Kč}}$$

Zpracovací náklady:

Jedná se o výrobu na 1 stroji.

SZN 1: 957 Kč/h => 15,95 Kč/min

Tato součást se vyrábí v dávce 16 kusů.

Norma času (frézka): $N_{\xi 2} = 5,875$ minut

$$ZN = (SZN_1 * N_{\xi 1}) = (15,95 * 5,875) = \underline{93,707 \text{ Kč}}$$

Vlastní náklady výroby: $MN + ZN = 19,662 + 93,707 = \underline{113,369 \text{ Kč}}$

Hodnoty plastové aditivní výroby

Materiálové náklady:

Materiál: PETG

Norma spotřeby materiálu (N_s): 0,01245 kg

Cena za jednotku (C_j): 700 Kč/kg

$$MN = (N_s * C_j) = 0,01245 * 700 = \underline{8,71 \text{ Kč}}$$

Zpracovací náklady:

SZN: 80 Kč/h = 1,33 Kč/min

Norma času: $N_\epsilon = 59$ minut

$$ZN = (SZN * N_\epsilon) = 1,33 * 59 = \underline{78,47 \text{ Kč}}$$

Vlastní náklady výroby: $MN + ZN = 8,71 + 78,47 = \underline{87,18 \text{ Kč}}$

Cenový rozdíl nákladů na 1 součást:

konvenční výroba – aditivní výroba: $113,369 - 87,18 = \underline{26,189 \text{ Kč}}$

12. Testování řešení a analýza výsledků

Všechny vybrané součásti musely být podrobeny testování. Toto testování bylo potřeba především kvůli funkcionalitě, efektivitě, deformacím a bezpečnosti dílů. Součástí, které byly vyrobeny v rámci aditivní výroby, byly zatěžované přibližně 2-3 násobnou váhou, než je skutečné zatížení u součástí vyrobených prostřednictvím konvenční výroby.

Nyní následuje tabulka č. 4 shrnující výsledné hodnoty získané z kalkulací nákladů jednotlivých součástí, a to jak za konvenční, tak aditivní výrobu. Je zde uveden i rozdíl nákladů na jeden kus vypočtený jako náklady aditivní výroby odečtené od nákladů konvenční výroby jednoho kusu příslušného výrobku.

Z výsledných hodnot je patrné, že plastová aditivní výroba má vysoký potenciál pro nahrazení konvenční výroby. Všechny vybrané součásti vyšly s kladným výsledkem v rámci úspory na 1 kus.

Tab. 4 Shrnutí tisknutých součástí

Číslo součásti	Aditivní výroba: plast	Náklady: konvenční výroba [Kč/ks]	Náklady: aditivní výroba [Kč/ks]	Rozdíl nákladů [Kč/ks]
PA70301	X	1 623,091	1 466,304	156,787
PA54423	X	633,674	292,67	341,004
PA70679	X	847,254	689,53	157,724
PA69459	X	1 127,14	804,79	322,35
PA3541709	X	68,998	38,82	30,178
00055107	X	108,905	62,64	46,265
PA4209925	X	75,255	40,31	34,945
PA3500588	X	113,369	87,18	26,189

V následující tabulce byly zohledněny počty kusů součástí, které je možné ročně vyrábět prostřednictvím plastové aditivní výroby. Počty kusů byly stanoveny na základě predikce budoucí výroby vyplývající z předběžných objednávek zákazníků, které byly získány na základě informací od vedoucího střediska. Výsledný průměrný počet kusů byl zaokrouhlen směrem nahoru k nejbližšímu násobku dávky. Celková úspora je vypočtena jako násobek průměrného počtu kusů za rok a rozdílu nákladů na jeden kus.

Tab. 5 Celkové roční úspory – plastová aditivní výroba

Číslo součásti	Ø počet kusů/rok	Rozdíl nákladů na 1 ks [Kč/ks]	Celková úspora [Kč]
PA70301	30	156,787	4 703,61
PA54423	40	341,004	13 640,16
PA70679	18	157,724	2 839,032
PA69459	20	322,35	6 447
PA3541709	330	30,178	9 958,74
00055107	220	46,265	10 178,3
PA4209925	1000	34,945	34 945
PA3500588	64	26,189	1 676,096
Celkem Kč:			84 387,94

Pro vybrané součásti byla provedena časová analýza, aby došlo k ověření kapability tiskárny. V níže uvedené tabulce je znázorněna časová náročnost jednotlivých dílů. Čas výroby je vypočtený jako násobek průměrné roční výroby a doby výroby jednoho kusu.

Tab. 6 Celková časová náročnost aditivní výroby

Číslo součásti	Ø počet kusů/rok	Čas výroby na 1 ks [min/ks]	Čas výroby [min]
PA70301	30	989	29670
PA54423	40	201	8040
PA70679	18	1235	22230
PA69459	20	1120	22400
PA3541709	330	27	8910
00055107	220	45	9900
PA4209925	1000	28	28000
PA3500588	64	79	5056
Čas celkem [min]			134206
Čas celkem [hod]			2236,767

Pro stanovení kapability bylo bráno 250 pracovních dnů a 24 hodin denně (3 směnný provoz) => 6000 pracovních hodin.

Při úvaze využití tohoto pracovního času na 60% je časová možnost tisku 3 600 hodin. Z toho vyplývá, že pro pokrytí tisku vybraných součástí by bylo dostatečné pořídit jednu 3D tiskárnu. Avšak muselo se zohlednit případné riziko jako je defekt tiskárny a zabezpečení výroby.

Z tohoto důvodu a zároveň z důvodu možnosti dalšího rozšíření sortimentu pro změnu z konvenční výroby na plastovou aditivní výrobu je vhodné pořídit alespoň dvě 3D tiskárny. V rámci budoucího stavu by bylo dobré uvažovat o tzv. farmě tiskáren, aby aditivní výroba byla co nejvíce efektivní.

Byla definována návratnost investice, pro jejíž výpočet se zohledňovala cena 3D tiskárny Ender 3, jelikož součásti byly tisknuty na této konkrétní 3D tiskárně. Tato tiskárna byla zvolena kvůli určitým parametrům, které jsou pro výrobu nejdůležitější. Mezi tyto parametry patří především dodržení kvality tisknutých dílů a rychlost tisku.

Ender 3: 6.900 Kč + 2.890 Kč ochranný box + 1.099 Kč vylepšená základní deska s ovladačem krokových motorů = 10.889 Kč

Při výpočtu návratnosti investice vycházíme z výpočtového vztahu [24], [25]:

$$DA = \frac{\text{pořizovací náklady}}{\text{výnosy} - (\text{běžné náklady} + \text{daň ze zisku})}$$

Pro potřeby této práce je uvažováno zjednodušení, kdy ve jmenovateli je uvažována celková roční úspora vyplývající z použití aditivní technologie oproti technologii konvenční. Konkrétní výpočet je tedy následující:

$$DA = \frac{\text{pořizovací náklady}}{\text{celková roční úspora}} = \frac{2 * 10\,889}{84\,387,94} = 0,258 \text{ let}$$

Na základě porovnání materiálových a zpracovacích nákladů je zřejmé, že aditivní výroba má velký potenciál pro nahrazení konvenční výroby pro výše zmíněné součásti. Z hlediska technických vlastností vyrobených a otestovaných součástí nebyl shledán žádný zásadní nedostatek v rámci aditivní výroby. Nevýhodou je delší časové zpracování při aditivní výrobě oproti konvenční, proto je důležité přizpůsobit zásobu daných součástí pro průběžnou dobu výroby na základě průměrné spotřeby. Rozšíření výroby o aditivní výrobu může přinést pozitiva konvenční výrobě, u které je nutné dlouhé přeseřžení a odjetí prvního kusu při kusové výrobě. Z hlediska návratnosti investice je doporučené pořídit dvě 3D tiskárny z důvodu možného výpadku jedné z tiskáren a zároveň k možnému rozšíření vyráběného sortimentu pro aditivní výrobu.

Závěr

Cílem diplomové práce bylo získání dostatečných teoretických podkladů z oblasti aditivní výroby, informace v rámci využití v průmyslových odvětvích v praxi, včetně popisu využívajících materiálů k této výrobě. Následovalo parametrické porovnání podle druhů aditivní výroby.

V praktické části byla provedena ekonomická analýza rozdílu použití konvenční a aditivní výroby ve firmě Christ Car Wash s.r.o. Nejdříve došlo k selekci jednotlivých dílů s vysokým potenciálem pro přesun z klasické výroby na aditivní. V programu SolidWorks byly vytvořeny jednotlivé modely nutné pro realizaci simulací v programu PrusaSlicer, které byly nadále potřebné pro ekonomickou analýzu.

Do ekonomické analýzy bylo celkově vybráno 8 součástí, u kterých se porovnávaly materiálové a zpracovací náklady. Těchto 8 součástí bylo definováno pro plastovou aditivní výrobu. Provedená analýza a její výsledky tvoří dostatečné podklady pro zhodnocení výhodnosti plastové aditivní výroby. Analýza byla provedena pro tiskárnu Ender 3. Z vyhodnocení vyplynulo, že pro plastovou aditivní výrobu je návratnost investice do hranice 1 roku, a to i v případě pořízení dvou kusů jedné z těchto tiskáren.

Získaná data a výsledky mohou posloužit k lepšímu rozhodování o investičních záměrech firmy.

Seznam použité literatury

- [1] BADIRU A. B., VALENCIA V. a LIU D., ed. *Additive manufacturing handbook: product development for the defense industry*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, [2017]. System innovation series. ISBN 9781482264081.
- [2] MANJIAH M., RAGHAVENDRA K., BALASHANMUGAM N., PAULO D. J., ed. *Additive Manufacturing: a tool for industrial revolution 4.0*, Woodhead: Elsevier Science, [2021]. ISBN 9780128220566
- [3] JING Z., ed. *Additive manufacturing: Materials, Processes, Quantifications and Applications*, Butterworth Heinemann, [2018]. ISBN (EAN) 9780128121559
- [4] KUMAR K., ZINDANI D., & DAVIM JP., *Additive Manufacturing: Technologies from an optimization perspective*, IGI Global, [2019]. ISBN 9781522591689.
- [5] PRŮŠA J. a BACH M., *Základy 3D tisku*. Místo neznámé: 2019 Prusa Research s.r.o. 2019
- [6] SW SolidWorks [online]. [cit. 2021-11-10]. Dostupné z: <https://www.capttechu.edu/blog/solidworks-mechatronics-design-and-engineering-program>
- [7] SW SolidWorks [online]. [cit. 2021-11-10]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/what-is-solidworks-simply-explained/>
- [8] GIBSON I., ROSEN D., STUCKER B., *Additive manufacturing technologies : 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing*. Springer, [2015]. ISBN 978-1-4939-2112-6
- [9] GEBHARDT A, HÖTTER J. S., *Additive manufacturing : 3D printing for prototyping and manufacturing*. Hanser Publishers, [2016]. ISBN 978-1-56990-582-1
- [10] BIAN L., SHAMSAEI N, USHER J. M., *Laser-based additive manufacturing of metal parts: modeling, optimization, and control of mechanical properties*. CRC Press, [2018]. ISBN 978-1-4987-3998-6.
- [11] DIEGEL O., NORDIN A., MOTTE D., *Practical Guide to Design for Additive Manufacturing*. Singapore: Springer Verlag, [2020]. ISBN 978-981-13-8280-2.
- [12] Pareto analýza [online]. [cit. 2022-02-12]. Dostupné z: <https://www.vlastnicesta.cz/metody/pareto-analyza/>
- [13] 3D kovová tiskárna EOS M 290 [online]. [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: <https://www.eos.info/en/additive-manufacturing/3d-printing-metal/eos-metal-systems/eos-m-290>
- [14] 3D plastová tiskárna Ender 3 [online]. [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: <https://www.creality3dofficial.com/products/ender-3-v2-3d-printer>
- [15] Kovové prášky pro aditivní výrobu [online]. [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=41552
- [16] LIPTON, Jeffrey I., Meredith CUTLER, Franz NIGL, Dan COHEN a Hod LIPSON. Additive manufacturing for the food industry. Trends in Food Science & Technology 2015, s. 114-123. In: . [cit. 2022-04-15]
- [17] YAN, Qian, Hanhua DONG, Jin SU, Jianhua HAN, Bo SONG, Qingsong WEI a Yusheng SHI. A Review of 3D Printing Technology for Medical Applications. Engineering [online]. Volume 4, Issue 5. 2018, s. 729-742. In: . [cit. 2022-04-15]
- [18] NOE, Rain. Production Methods: What's the Difference Between Selective Laser Sintering, Direct Metal Laser Sintering, Laser Melting and LaserCusing? [online]. In: . 2014. [cit. 2022-03-05] Dostupné z: <http://www.core77.com/posts/26457/Production->

[Methods-Whats-theDifferenceBetween-Selective-Laser-Sintering-Direct-Metal-Laser-Sintering-LaserMelting-andLaserCusing](#)

- [19] SHAHRUBUDIN, N., T.C. LEE a R. RAMLAN. An Overview on 3D Printing Technology: *Technological, Materials, and Applications. Procedia Manufacturing*. 2019, , 1286-1296. In: . [cit. 2022-03-16]
- [20] JOSHI, Sunil C. a Abdullah A. SHEIKH. *3D printing in aerospace and its long-term sustainability. Virtual and Physical Prototyping*. 2015, s. 175-185. In: . [cit. 2021- 10-18]
- [21] Optimising Engine Design With Metal Additive Manufacturing. In: Industry Europe [online]. 2019. Dostupné z: <https://industryeurope.com/optimising-enginedesign-with-metal-additive-manufacturing/> In: . [cit. 2021-10-19]
- [22] SUN, Q., Gulzar RIZVI, C.T. BELLEHUMEUR a Peihua GU. *Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments*. In: Rapid Prototyping Journal. DOI: 10.1108/13552540810862028. In: . [cit. 2021-12-13]
- [23] SRIDHARAN, Aravind K. a Sanjay JOSHI. *An octree-based algorithm for the optimization of extraneous material removal in laminated object manufacturing (LOM)*. In: Journal of Manufacturing Systems [online]. Volume 19, Issue 6. s. 355- 364. DOI: 10.1016/S0278-6125(01)80007-8. In: . [cit. 2021-12-15].
- [24] KLEINOVÁ, Jana. *Ekonomické hodnocení výrobních procesů* . [cit. 2022-06-16].
- [25] KLEINOVÁ, Jana. *Inženýrská ekonomika* . [cit. 2022-06-16].
- [26] Christ Car Wash – samoobslužné mycí linky [online]. [cit. 2022-06-17]. Dostupné z: <https://www.christ-ag.com/cs/vyrobky/system-samoobsluznych-mycich-boxu-od-christ-wash-systems/system-mycich-boxu-skyline>
- [27] Christ Car Wash – recyklace vody [online]. [cit. 2022-06-17]. Dostupné z: <https://www.christ-ag.com/cs/vyrobky/recyklace-vody/fontis-m/-/1/-/x/>
- [28] Christ Car Wash – vlaková mycí linka [online]. [cit. 2022-06-17]. Dostupné z: <https://www.christ-ag.com/cs/vyrobky/vlakova-myci-linka/c5400-soa>
- [29] Christ Car Wash – vlaková mycí linka [online]. [cit. 2022-06-17]. Dostupné z: <https://www.christ-ag.com/cs/vyrobky/vlakova-myci-linka>
- [30] Smart Materials and Structures [online], 2014. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/09641726/23/i=9/a=094007?key=crossref.b77e5da2653ac838509a57efc6aad68>
- [31] LIGON, Samuel Clark et al., 2017. *Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing. Chemical Reviews*. 10212-10290. DOI: 10.1021/acs.chemrev.7b00074. ISSN 0009-2665. [cit. 2022-06-17]
- [32] ZADPOOR, Amir A. a Jos MALDA, 2017. *Additive Manufacturing of Biomaterials, Tissues, and Organs. Annals of Biomedical Engineering*. DOI: 10.1007/s10439-016-1719-y. ISSN 0090-6964. [cit. 2022-06-17]
- [33] CALIGNANO, Flaviana et al., 2017. *Additive Manufacturing of Biomaterials, Tissues, and Organs. Proceedings of the IEEE*. DOI: 10.1109/JPROC.2016.2625098. ISSN 0018-9219. [cit. 2022-06-17]
- [34] BOURELL, David et al., 2017. *Materials for additive manufacturing: A Review and Future Perspectives. CIRP Annals*. 659-681. DOI: 10.1016/j.cirp.2017.05.009. ISSN 00078506. [cit. 2022-06-17]
- [35] Konvenční výrobní systém [online]. [cit. 2022-06-17]. Dostupné z: <https://www.ipsmaterialhandling.com/blogs/blog/16863600-the-conventional-production-system>
- [36] Material jetting technology [online]. [cit. 2022-06-23]. Dostupné z: <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/material-jetting/>

- [37] REDWOOD, Ben. Additive Manufacturing Technologies: An Overview. In: <https://www.3dhubs.com> [online]. In: . [cit. 2022-06-23] Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/>
- [38] GAO, Wei, ZHANG, Yunbo, RAMANUJAN, Devarajan, et al. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. Computer-Aided Design Volume 69 [online]. Volume 69. 2015, s. 65-89. DOI: 10.1016/j.cad.2015.04.001. In: . [cit. 2022-06-24]
- [39] LIGON, SC, R LISKA, J STAMPFL, M GURR a R MÜLHAUPT. Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing. [online]. In: . 2017. DOI: 10.1021/acs.chemrev.7b00074. In: . [cit. 2022-06-24]
- [40] Binder jetting technology [online]. [cit. 2022-06-24]. Dostupné z: <https://www.exone.com/en-US/Resources/case-studies/what-is-binder-jetting>
- [41] Powder Bed Fusion technology [online]. [cit. 2022-06-24]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320313900>
- [42] REDWOOD, Ben. Additive Manufacturing Technologies: An Overview. In: <https://www.3dhubs.com> [online]. In: . [cit. 2022-06-25] Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/>
- [43] Laminated Object Manufacturing [online]. [cit. 2022-06-25]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-laminated-object-manufacturing-lom>