

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: Konstruování strojů a technických zařízení
Studijní specializace: Konstruování vozidel a manipulačních zařízení

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Využití 3D tisku v sériové výrobě automobilových sedaček

Autor: Bc. Vojtěch Holub
Vedoucí práce: Doc. Ing. Ladislav Němec, CSc.

Akademický rok 2022/2023

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta strojní
Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Vojtěch HOLUB**
Osobní číslo: **S21N0054P**
Studijní program: **N0715A270017 Konstruování strojů a technických zařízení**
Specializace: **Konstruování vozidel a manipulačních zařízení**
Téma práce: **Využití 3D tisku v sériové výrobě automobilových sedaček**
Zadávací katedra: **Katedra konstruování strojů**

Zásady pro vypracování

Základní požadavky:

Zpracujte problematiku z hledisek: Rešerše k tématu + náklady. Možnosti využití pro konkrétní komponenty. Závěr + doporučení

Základní technické údaje:

Technické parametry jsou uvedeny v příloze zadání

Osnova práce

1. *Rešerše současného stavu*
2. *Specifikace požadavků a návrh variant*
3. *Rozpracování vybrané varianty řešení*
4. *Zhodnocení práce, závěr*

Konzultant: Ing. Ondřej Bureš, Lear Corporation Engineering Czech Republic, s.r.o.

Rozsah diplomové práce: **40-60 stran**
Rozsah grafických prací: **podle potřeby**
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

[1] HOSNEDL, Stanislav, KRÁTKÝ, Jaroslav. *Příručka strojního inženýra: obecné strojní části*. Praha: Computer Press, 1999. ISBN 80-7226-055-3
Podkladové materiály, výkresy, prospekty, katalogy apod. poskytnuté zadavatelem úkolu.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Ladislav Němec, CSc.**
Katedra konstruování strojů

Datum zadání diplomové práce: **30. listopadu 2022**
Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2023**

L.S.

Doc. Ing. Vladimír Duchek, Ph.D.
děkan

Prof. Ing. Václava Lašová, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 30. listopadu 2022

Prohlášení o autorství

Akademický rok: 2022/2023
Jméno a příjmení studenta: Vojtěch Holub
Název diplomové práce: Využití 3D tisku v sériové výrobě automobilových
sedaček

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci na téma „Využití 3D tisku v sériové výrobě automobilových sedaček“ vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí diplomové práce.

V Plzni dne:

.....
Holub Vojtěch

Poděkování

Rád bych poděkoval za cenné rady a připomínky vedoucímu mé diplomové práce Doc. Ing. Ladislavu Němcovi, CSc. Velké poděkování také patří hlavně mému konzultantovi Ing. Ondřeji Burešovi za značnou trpělivost při mých dotazech a osobních konzultacích.

Dále bych rád poděkoval Ing. Romanu Čermákovi, Ph.D. a Ing. Františku Sedláčkovi, Ph.D. za ochotu a poskytnutí možnosti 3D tisku v prostorách univerzity.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Holub	Jméno Vojtěch	
STUDIJNÍ OBOR	N0715A270017 Konstruování strojů a technických zařízení		
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Doc. Ing. Němec, CSc.	Jméno Ladislav	
PRACOVIŠTĚ	ZČU-FST-KKS		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Využití 3D tisku v sériové výrobě automobilových sedaček		

FAKULTA	Strojní	KATEDRA	KKS	ROK ODEVZD.	2023
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	83	TEXTOVÁ ČÁST	83	GRAFICKÁ ČÁST	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Diplomová práce se zabývá vlastnostmi jednotlivých technologií 3D tisku z plastů a jejich využití v oblasti automotive. Následuje zhotovení i pevnostní zkouška vybraných dílu za účelem jejich ověření v celkové sestavě autosedačky.
KLÍČOVÁ SLOVA	3D tisk, autosedačka, rukojeť, kryt, prototypování

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Holub	Name Vojtěch	
FIELD OF STUDY	N0715A270017 Design engineering of machines and technical devices		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Doc. Ing. Němec, CSc.	Name Ladislav	
INSTITUTION	ZČU-FST-KKS		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	The use of 3D printing in the mass production of automobile seats		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KKS	SUBMITTED IN	2023
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	83	TEXT PART	83	GRAPHICAL PART	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The diploma thesis deals with the properties of individual technologies of 3D printing from plastics and their use in the automotive field. This is followed by the manufacture and strength test of selected parts in order to verify them in the overall assembly of the car seat.
KEY WORDS	3D printing, car seat, handle, cover, prototyping

Obsah

Přehled použitých zkratk a symbolů.....	3
Seznam obrázků.....	4
Seznam tabulek.....	6
1 Úvod.....	7
2 Představení firmy Lear.....	9
3 Úvod do technologie 3D tisku	10
3.1 Historie	10
3.2 Rapidní prototypování	12
4 Proces 3D tisku	13
5 Základní technologie (principy) 3D tisku	14
5.1 Binder Jetting.....	15
5.2 Material Jetting	17
5.3 Material Extrusion	19
5.4 Vat Polymerization	22
5.5 Powder Bed Fusion.....	24
5.6 Direct Energy Deposition	27
5.7 Sheet Lamination	28
6 Výběr optimální metody	30
7 Praktická část	33
7.1 Platforma MB	35
7.2 S(C)LA handle (Rukojeť pro nastavování délky sedáku)	36
7.3 PLP plastic cover (kryt předepínače pásu)	37
7.4 Materiál.....	38
7.5 Ověření metodou konečných prvků.....	39
7.5.1 S(C)LA handle.....	40
7.5.2 PLP plastic cover	43
7.6 Zkušební tisk.....	44
7.7 Výroba vzorků	48
7.7.1 Metoda FFF	48
7.7.2 Metoda SLA.....	52
7.7.3 Metoda MJF.....	54
7.7.4 Ověření rozměrů výtisků	57

8	Testování.....	58
8.1	Test krytu PLP plastic cover.....	59
8.1.1	Materiál PLA	59
8.1.2	Materiál PETG.....	61
8.1.3	Materiál PA 12.....	62
8.2	Test rukojeti S(C)LA handle	64
8.2.1	Test síly pro odjištění mechanismu sedáku	65
8.2.2	Materiál PLA	65
8.2.3	Materiál PETG.....	66
8.2.4	Materiál ABS	67
8.2.5	Materiál Tough 1500 resin.....	68
8.2.6	Materiál PA 12.....	70
8.3	Shrnutí měření	71
9	Závěr	73
	Seznam použitých zdrojů	75

Přehled použitých zkratk a symbolů

CAD	Computer Aided Design (Počítačem podporovaný design)
RP	Rapid Prototyping (Rapidní prototypování)
STL/SLA	Stereolitografie
ASTM	American Society for Testing and Materials (Americká společnost pro testování a materiály)
BJ	Binder Jetting (Tryskání pojiva)
MJF	Multi Jet Fusion
MJ	Material Jetting (Tryskání materiálu)
FFF/FDM	Fused Filament Fabrication/ Fused Deposition Modeling
SCARA	Selective Compliance Assembly Robotic Arm
DLP	Digital Light Processing
MEMS	Micro Electro Mechanical Systems (Mikro elektro mechanický systém)
LCD/MSLA	Liquid Crystal Display (Displej z tekutých krystalů)
SLM	Selective Laser Melting (Selektivní laserové tavení)
SLS	Selective Laser Sintering (Selektivní laserové spékání)
DMLS	Direct Metal Laser Sintering (Přímé kovové laserové spékání)
EBM	Electron Beam Melting (Tavení elektronovým paprskem)
DED	Direct Energy Deposition (Řízená energetická depozice)
LOM	Laminated object manufacturing (Výroba laminovaných předmětů)
UAM	Ultrasonic Additive Manufacturing (Aditivní výroba ultrazvukem)
TR	Test Request (Žádost o zkoušku)
FEM/MKP	Finite Element Method (Metoda konečných prvků)
S(C)LA	Seat Length (Cushion) Adjuster (Nastavovač délky sedáku)
PLP	Pyrotechnic Lap Pretensioner (Pyrotechnický předepínač pásů)

Seznam obrázků

Obrázek 1: Vývojové centrum Lear Corporation v Plzni	10
Obrázek 2: Proces 3D tisku v jednotlivých krocích [10]	14
Obrázek 3: Rozdělení technologií 3D tisku [3].....	15
Obrázek 4. Princip technologie Binder Jetting [11].....	16
Obrázek 5: Sestava tiskárny HP MJF 4200 (nalevo) a post-processing stanice (napravo) [14]	17
Obrázek 6: Princip technologie Material Jetting (MJ) [12]	18
Obrázek 7: Princip technologie Fused Filament Fabrication (FFF) [13]	19
Obrázek 8: Princip technologie Stereolithography [8].....	22
Obrázek 9: Princip technologie Digital Light Processing [8]	23
Obrázek 10: Tiskárna Prusa SL1 pracující na principu MSLA [16].....	24
Obrázek 11: Princip technologie Selective Laser Sintering (SLS) [11].....	25
Obrázek 12: Princip technologie Direct Energy Deposition [17]	27
Obrázek 13. Princip technologie Sheet Lamination (LOM) [18].....	28
Obrázek 14: Tiskárny Prusa i3 MK3 v technologickém centru Lear v Plzni.....	32
Obrázek 15: Rozložení komponent v sedačce srovnatelné platformy MB (Zdroj: Lear Corporation)	34
Obrázek 16: Umístění S(C)LA handle (1) [24].....	36
Obrázek 17: Rukojeť S(C)LA handle (žlutě)	36
Obrázek 18: Kryt PLP plastic cover (modře)	37
Obrázek 19: Sestava rukojeti S(C)LA handle (bíle) a protikusů (šedě).....	40
Obrázek 20: 1. případ – Ukázka sítě, zatížení a vazeb rukojeti	41
Obrázek 21: 1. případ – Výsledné napětí pouze v rukojeti	41
Obrázek 22: 2. případ – Ukázka sítě, zatížení a vazeb rukojeti	42
Obrázek 23: 2. případ – Výsledné napětí pouze v rukojeti	42
Obrázek 24: Sestava PLP plastic cover (modře) a protikusů (šedě)	43
Obrázek 25: Ukázka sítě, zatížení a vazeb krytu	43
Obrázek 26: Výsledné napětí pouze v krytu	44
Obrázek 27: Umístění vzorků S(C)LA handle na tiskové ploše	46
Obrázek 28: Zkušební výtisk S(C)LA handle	46
Obrázek 29: Zkušební výtisk S(C)LA handle bez podpor	47
Obrázek 30: Umístění PLP plastic cover ve sliceru	47
Obrázek 31: Vytisknutý PLP plastic cover	48
Obrázek 32: Očištěný kryt PLP	48
Obrázek 33: Vytisknuté vzorky S(C)LA handle z materiálu PETG	49
Obrázek 34: Očištěné vzorky S(C)LA handle.....	50
Obrázek 35: Vytisknutý (nalevo) a očištěný (napravo) kryt PLP z materiálu PETG	50
Obrázek 36: Výtisk rukojeti S(C)LA handle z materiálu ABS	51
Obrázek 37: Očištěný výtisk S(C)LA handle.....	51
Obrázek 38: S(C)LA handle ve sliceru pro SLA tisk.....	52
Obrázek 39: Vytisklá rukojeť (nalevo) a očištěná (napravo) S(C)LA handle z pryskyřice Tough 1500	53

Obrázek 40: Pozice dílů ve sliceru pro MJF tiskárnu	55
Obrázek 41: Vytisknutá a očištěná S(C)LA handle z tiskárny HP MJF	56
Obrázek 42: Vytisknutý a očištěný PLP cover z tiskárny HP MJF.....	56
Obrázek 43: Měřená šířka otvoru rukojeti	57
Obrázek 44: Měřená výška otvoru rukojeti.....	57
Obrázek 45: Použitý siloměr včetně příslušenství	58
Obrázek 46: Umístění předepínače bezpečnostních pásů	59
Obrázek 47: Upevněný kryt PLP plastic cover z materiálu PLA.....	59
Obrázek 48: Měření max. síly pro uvolnění krytu z PLA	60
Obrázek 49: Detail poškození krytu z PLA	60
Obrázek 50: Upevněný kryt PLP plastic cover z materiálu PETG	61
Obrázek 51: Měření max. síly pro uvolnění krytu z PETG.....	61
Obrázek 52: Detail poškození krytu z PETG	62
Obrázek 53: Upevněný kryt PLP cover z materiálu PA 12.....	62
Obrázek 54: Měření max. síly pro uvolnění krytu z PA 12	63
Obrázek 55: Detail poškození krytu z PA 12	63
Obrázek 56: Porovnání dolní a horní strany sériového (černě) a vytištěného (bíle) dílu.....	64
Obrázek 57: Vyzkoušení funkčnosti vytištěné rukojeti (Materiál PETG)	64
Obrázek 58: Způsob tlačením siloměru pro odjištění mechanismu	65
Obrázek 59: Detail poškození vzorku a) z PLA.....	66
Obrázek 60: Měření max. síly pro uvolnění vzorku rukojeti a) z PLA.....	66
Obrázek 61: Detail uchycení rukojeti z PETG	67
Obrázek 62: Měření max. síly pro uvolnění vzorku rukojeti z PETG	67
Obrázek 63: Detail uchycení rukojeti z ABS	68
Obrázek 64: Měření max. síly pro uvolnění vzorku rukojeti z ABS.....	68
Obrázek 65: Detail uchycení rukojeti z Though 1500 resin.....	69
Obrázek 66: Měření max. síly pro uvolnění vzorku rukojeti z Though 1500 resin	69
Obrázek 67: Detail uchycení rukojeti z PA 12.....	70
Obrázek 68: Měření max. síly pro uvolnění vzorku rukojeti z PA 12	70

Seznam tabulek

Tabulka 1: Nejvýznamnější materiály používané v technologii FFF a jejich vlastnosti [15]..	21
Tabulka 2: Parametry materiálu Bayblend FR3021 R30 udávané výrobcem [21]	38
Tabulka 3: Parametry materiálu POM-GF30 udávané výrobcem [22]	39
Tabulka 4: Parametry filamentu PLA dané výrobcem	45
Tabulka 5: Parametry zkušebnímu tisku	45
Tabulka 6: Parametry filamentu PETG dané výrobcem	49
Tabulka 7: Parametry zkušebnímu tisku	49
Tabulka 8: Parametry filamentu ABS dané výrobcem.....	51
Tabulka 9: Parametry resinu Tough 1500 dané výrobcem	52
Tabulka 10: Parametry zkušebnímu tisku	52
Tabulka 11: Parametry materiálu PA 12 dané výrobcem	54
Tabulka 12: Parametry zkušebnímu tisku MJF	54
Tabulka 13: Hlavní rozměry otvoru rukojeti S(C)LA handle	57
Tabulka 14: Výsledky měření krytu PLP plastic cover z PLA	60
Tabulka 15: Výsledky měření krytu PLP plastic cover z PETG.....	61
Tabulka 16: Výsledky měření krytu PLP plastic cover z PETG.....	62
Tabulka 17: Výsledky měření odjištění mechanismu sedáku	65
Tabulka 18: Výsledky měření rukojeti S(C)LA handle z PLA	66
Tabulka 19: Výsledky měření rukojeti S(C)LA handle z PETG	67
Tabulka 20: Výsledky měření rukojeti S(C)LA handle z ABS.....	68
Tabulka 21: Výsledky měření rukojeti S(C)LA handle z Tough 1500	69
Tabulka 22: Výsledky měření rukojeti S(C)LA handle z PA 12	70

1 Úvod

V oblasti automobilového průmyslu dochází nepřetržitě ke zvyšování požadavků na vlastnosti používaných materiálů i na rychlost dodání. Například může jít o jejich fyzikální stránku ovlivňující mimo jiné i funkčnost, vliv na živé organismy, či prostý design výsledného dílu. Kvůli tomuto tlaku jednotlivých států, unií a zákazníků na výrobce je potřeba řešit vývoj designu s využitím pokročilých technologií a nových materiálů.

I když je vždy důležité vyhovět požadavkům koncových uživatelů, neboť na těch záleží finanční zisk výrobce, v první řadě vždy přichází realizace samotné výroby. Výroba automobilů a jejich součástí probíhá již od počátku 20. let 20. století výhradně sériově díky vysoké produkci a nízké ceně jednotlivých výrobků. Samotné zhotovení dílů pak může v procesu výroby probíhat oddělováním materiálu, formováním nebo odléváním. Kromě těchto způsobů, které se v mnoha ohledech odlišují z hlediska možností jejich aplikací i dosaženého výsledku existuje další a poměrně nová metoda zvaná „aditivní výroba“.

Pod pojmem aditivní výroba neboli „3D tisk“, je zahrnuto značné množství technologií, které se neustále vyvíjí. Všechny jsou ale založené na principu vytváření výsledného produktu z jednotlivých vrstev materiálu. Toho se nejčastěji dosáhne buď reverzním inženýrstvím již existujícího produktu, nebo pomocí počítačem podporovaného designu určeného k vytvoření, úpravě, analýze či optimalizace návrhu produktu. Tato technika je jinak známá jako CAD (Computer Aided Design).

3D tisk v dnešní době umožňuje vytvářet širokou škálu zakázkových dílů se složitou geometrií, poměrně malým množstvím odpadu a bez nutnosti vnějšího zásahu v procesu výroby. Narozdíl od běžných výrobních technik spočívajících v substrakci materiálu, jako je například třískové obrábění, dokáže tato metoda díky absenci většího množství odpadního materiálu snadno najít uplatnění v rozsáhlém spektru aplikací. Její pozitivní stránky jsou vyjma hromadné výroby také vidět při srovnání s konsolidačními procesy, jako je odlévání nebo lisování. Tyto procesy využívají k vytváření materiálu do požadovaného tvaru nástroje navržené na míru a odlišují se tak od aditivních procesů které nevyžadují vlastní nástroje ani nutnost plánování jejich pohybu. Místo toho je díl zkonstruován přímo z digitálního trojrozměrného modelu vytvořeného pomocí CAD softwaru.

V dnešní době se díky jejím vlastnostem aditivní výroba začíná používat kromě jiných, i v oboru automotive (automobilového průmyslu), a to nejen pro výrobu plastových, ale i kovových dílů určených pro nejrůznější části vozu. Nicméně její hlavní příspěvek ve většině případů v současné době nespočívá ve výrobě finálních funkčních dílů. Postupně se totiž dostává do čím dál většího využití v technice tzv. „*rapidního prototypování*“ (Rapid prototyping). Tato skupina technik již podle jména umožňuje rychlé vytvoření funkčních prototypů z dat CAD modelů za pomoci aditivní výroby během několika hodin namísto běžných několika dní.

Právě s přispěním této techniky výroby budou v práci zhotoveny vybrané díly sedačky elektrifikované platformy MB.EA vyvíjené společností Mercedes-Benz Group AG. Tím se

umožní rychlé vytvoření prototypu pro vizuální a funkční vyhodnocení daných dílů nebo některých individuálních prvků těchto součástí. Kromě toho lze podrobněji zvážit dosud používané i jiné existující technologie a materiály 3D tisku za účelem prototypování. Případně doporučit jiné alternativy které by lépe vyhovovaly požadavkům spjatým se sériovou výrobou.

Vývojové centrum společnosti Lear Corporation v Plzni může pak tyto technologie využít kromě prototypování také k vytváření přípravků a specifických výrobků pro potřeby testování. I když se i zde 3D tisk už delší dobou používá, jde pouze o jednu z jeho forem. Práce si klade za cíl porovnat a zhodnotit množství zvolených přístupů k prototypové výrobě vybraných součástí autosedačky pro vozy značky Mercedes-Benz.

2 Představení firmy Lear

Společnost Lear Corporation je jedním z předních světových dodavatelů automobilových sedadlových systémů (divize Seating) a elektrických distribučních systémů (divize E-systems). Firma byla založena roku 1917 pod názvem American Metal Products v Detroitu, Michigan a v současné době má hlavní sídlo v Southfieldu, Michigan. V době svého vzniku se zabývala hlavně výrobou svařovaných trubkových sestav pro letecký a automobilový průmysl, který byl v té době v Detroitu na vzestupu. Zasloužili se o to tehdejší průkopníci automobilového průmyslu, jako byl např. Walter Chrysler, bratři Dodgeové a také založení společnosti Ford Motor Company Henry Fordem v roce 1903.

V dnešní době má Lear přes 160 000 zaměstnanců ve 38 zemích po celém světě a působí prostřednictvím dvou již zmíněných obchodních segmentů (divizí): Seating a E-systems. Divize Seating jak je patrné z názvu navrhuje, vyrábí, montuje a dodává sedací systémy pro osobní a nákladní automobily, které zahrnují rámy sedadel, sklápěcí mechanismy, kolejnice sedadel, potahy sedadel, opěrky hlavy a pěnové výplně sedadel. Divize E-systems zabývající se elektronickými systémy vozidel (Electrical Power Management Systems) stejně jako divize Seatings sestává z návrhu, výroby i finální montáže přístrojů. Segment E-systems dodává elektrické distribuční systémy a komponenty pro hybridní, elektrická vozidla i pro nejrůznější hnací ústrojí. Mezi tyto produkty konkrétně patří sestavy kabelových svazků, svorky, konektory, řídicí i osvětlovací moduly, audio komponenty atd.

Společnost se roku 2019 umístila na 147. místě v žebříčku *Fortune 500* sestavovaného a vydávaného každoročně americkým ekonomickým časopisem Fortune. Tento žebříček amerických korporací zahrnuje společnosti s veřejně známým ročním hrubým obratem a podle jeho výše je pak seřazuje. Figurují v něm tedy společnosti s nejvyššími zisky a v roce 2022 na jeho vrcholu stanul obchodní řetězec Walmart, internetový obchod Amazon.com i firma Apple.

Vývojové centrum Learu v Plzni vzniklo v roce 2011 a dnes zaměstnává téměř 200 zaměstnanců. Hlavním prvkem je zde organizace Seating která se zabývá kompletním vývojem automobilových sedaček ve všech etapách – od prvotního náčrtu, přes CAD modely až po konečnou výrobu prototypů. Probíhá tady nejen testování a kontrola zde navrhnutých prototypů, ale i individuální zakázkové zkoušení sedaček luxusních zákazníků jako je Lamborghini, Ferrari, Jaguar, Land Rover atd. V oblasti výroby prototypů se zde významně uplatňuje rapidní prototypování a pro tento účel je ve vývojovém centru dostupných několik 3D tiskáren značky Prusa Research, které budou v této práci zmíněny a využívány jako příklad v praktické části této práce.



Obrázek 1: Vývojové centrum Lear Corporation v Plzni

3 Úvod do technologie 3D tisku

3.1 Historie

Existuje řada zmínek o existenci určité formy aditivní výroby již v minulém století, a tak určení skutečného počátku tohoto trendu není lehké. Nicméně z nejjednodušší definice pojmu aditivní výroba lze vyvodit, že celý proces začíná bez jakéhokoliv polotovaru prakticky s ničím a staví objekty pokládáním materiálu na určitou stavební platformu. Prostým příkladem může být tradiční zeď z cihel, kdy se skládají jednotlivé cihly na sebe vrstvu po vrstvě s přidáváním malty a na základně architektem předem připraveného plánu. Přidáním prvků robotického ovládání k tomuto jednoduchému postupu vlastně získáme 3D tiskárnu jak ji známe dnes.

Vývoj aditivní výroby probíhá již od 60. let minulého století, kdy se vědci z Battelle Memorial institutu pokoušeli o polymerizaci pryskyřice křížením dvou laserových paprsků různých vlnových délek. Později v 70. letech byla vyvinuta technologie spočívající v řezání desek materiálu pomocí laserů či fréz. Po následném sestavení všech částí dohromady na sebe vznikl objekt s rozměry a tvarem odpovídajícím počítačovému modelu. První významný patent skutečného 3D tisku podal v roce 1980 japonský Dr. Hideo Kodama který svůj vynález nazval *“rapid prototyping device”* (zařízení pro rychlé prototypování). Jeho funkce se zakládala na vytváření fotonopolymerního materiálu samostatným laserovým paprskem. Jeho patent bohužel později expiroval pro nedostatek prostředků. [1] [9]

Teprve v 90. letech i díky Charlesu Hullovi který vynalezl a patentoval proces stereolitografie přišel větší rozvoj 3D tisku. Od té doby se obecně tyto technologie staly postupně komerčně dostupnými. Díky tomuto vynálezu se rozšířila technologie později zvaná jako SLA (StereoLithography Apparatus) spočívající ve výrobě trojrozměrných modelů za pomoci zdroje UV světla. Její princip lze popsat jako vytváření tenkých vrstev světlocitlivé pryskyřice usměrňováním UV paprsků a vytváření požadovaných tvarů. Hull následně založil vlastní společnost 3D Systems v roce 1986 aby mohl tuto novou technologii dále vyvíjet a

zlepšovat. V roce 1988 pak vydal i první komerčně dostupnou 3D tiskárnu SLA-1. Tento objev vlastností fotopolymeru, kdy je polymerizace vyvolána UV světlem se dá obecně považovat za počátek dnes známé aditivní výroby. K této převratné technologii se v té době přidala ještě metoda SLS (Selective Laser Sintering) jejíž koncept vycházel ze sinistrování (spékání) jemného prášku pomocí laserového paprsku. [1; 9]

V přibližně stejném období probíhal ovšem zároveň i vývoj dalších technologií 3D tisku usilující o nová inovativní řešení v této oblasti. Z pohledu této práce se za jeden z nejvýznamnějších přínosů k aditivní technologii výroby dá považovat patent, který roku 1989 podali S. Scott a Lisa Crump. Tento patent se týkal metody výroby zvané „*Fused Deposition Modeling*“ (FDM) jinak známé také jako „*Fused Filament Fabrication*“ (FFF). Ta spočívá v přivádění vlákna (neboli filamentu) určeného druhu termoplastu ze zásobníku obvykle ve formě odvíjející se cívky do vyhřívané tiskové hlavy. Tato hlava se pohybuje pomocí krokových motorů a počítačového řízení přesnými pohyby nad stavební platformou. Zároveň tryska v hlavě vytlačuje roztavený filament v jednotlivých vrstvách postupně na sebe čímž se vytváří trojrozměrný objekt. [1; 9]

V 80. letech znamenalo ale stále vlastnictví 3D tiskárny investici v řádu statisíců dolarů, a tudíž byla taková možnost pro většinu uživatelů nepřijatelná. Nepřetržitý výzkum v této oblasti i tak přinášel nové způsoby a technologie a v roce 1998 společnost Optomec uvedla na trh první systém tisku z kovového prášku. Byl označen jako LENS (Laser Engineered Net Shaping) a s jeho pomocí bylo možné vytvářet hutné kovové části přiváděním prášku do tavné lázně. O rok později Fockele & Schwarze kteří jsou zakladatelé stejnojmenné německé firmy představili další systém schopný vyrábět kovové předměty známý i dnes jako SLM (Selective Laser-Melting). Tato technologie má řadu rysů společných s metodou SLS ale i tak se oba přístupy odlišují jak v použitém materiálu, tak v samotném procesu. V případě SLS CO2 laser zahřívá práškový polymer na teplotu stále pod jeho bodem tání, zatímco u přímého 3D tisku z kovu metodou SLM je prášek zahříván nad teplotu tání. Výsledkem je, že takto tištěné kovové díly mají velmi podobné fyzikální a mechanické vlastnosti jako běžné kovové výrobky. [1] [9]

S postupem času kolem roku 2005 došlo k přirozené expiraci klíčových patentů týkajících se technologií FDM i SLA což umožnilo jejich rozšíření mezi celosvětovou DIY („Udělej si sám“) komunitou. Zasloužil se o to hlavně inženýr Adrian Bowyer přednášející v té době na univerzitě Bath v Anglii, kterého napadlo založit mezinárodní komunitní projekt RepRap. Tento projekt umožňoval pomocí principu Open-Source Hardware (OSH) přístup všech uživatelů k datům a informacím o designu publikovaným Bowyerem na internetu. To mělo za účel jejich zdokonalování což sám Bowyer aktivně podporoval. Cílem bylo vytvořit 3D tiskárnu schopnou sebepublikování jejíž plastové části by se jednoduše daly vytisknout na jiné 3D tiskárně a ostatní kovové díly by v ideálním případě byly dostupné v jakémkoliv železářství. I když byly první tiskárny nelehké z hlediska sestavení všech součástí dohromady a nefungovaly vždy spolehlivě, díky nadšení celosvětové komunity, která se neustále rozrůstala pokračoval vývoj stále kupředu. Svědčí o tom například společnost MakerBot, která uvedla v roce 2009 na trh stavebnici „Cupcake CNC“ a následně „Thing-O-Matic“. V roce 2010 uvedl na trh první 3D tiskárnu zvanou Prusa Mendel a postavenou na základě vlastního designu také Josef Průša z České republiky. [1; 7; 9]

3.2 Rapidní prototypování

Rané systémy počítačem podporovaného designu a výroby (CAD/CAM) byly používány výhradně na subtraktivních technologiích výroby. Počítačem podporovaná výroba (CAM – Computer-Aided Manufacturing) byla vyvinuta v 50. letech 20. století, kdy se počítače používaly k vytváření G-kódu (programovému popsání dráhy nástroje). Vše probíhalo v prostoru kartézských souřadnic a kód se následně převáděl na děrné štítky, s jejichž pomocí bylo možné ovládat obráběcí stroje. Děrné štítky se později zdokonalily v pásy, které se vyráběly pomocí počítačového řízení, což vedlo ke zvýšení rychlosti tvorby instrukcí i výroby jako takové. Současně s CAM byla vyvíjena i technologie počítačem podporovaného designu CAD (computer-aided design). CAD software je technologie pro projektovou a technickou dokumentaci, která nahrazuje ruční kreslení automatizovaným procesem. Je využívána designéry, architekty i inženýry elektronických souborů pro obrábění, slévání a další výrobní operace. Technologie CAD/CAM jsou už z principu nedílně spojené s číslicovým řízením (CNC) výrobního stroje jimiž byly a současně i jsou převážně obráběcí stroje (soustruhy a frézky založené na principu subtraktivní technologie).

Nicméně s popularizací a rozšířením aditivních výrobních technologií se čím dál více využívá technologie CAD ve spojení s metodou rapidního prototypování (RP) při použití 3D tisku díky přínosu v mnoha ohledech. Termín "rapidní" se používá proto, že aditivní procesy 3D tiskem probíhají mnohem rychleji než konvenční výrobní procesy. Vývoj a výroba jednoho dílu pomocí této aditivní metody může trvat několik dní nebo pouze několik hodin v závislosti na velikosti součásti a procesu. I když mají konvenční technologie výroby široké množství dobře známých výhod jako je např. rozměrová přesnost, dobrá drsnost povrchu a pevnost hotových výrobků. Nelze opomíjet i jejich značné nevýhody týkající se ceny, delšího času procesu a nutnosti seřízení stroje před každou výrobou, což vyžaduje kvalifikovanou obsluhu.

Společnosti včetně Lear Corporation mají neustálou potřebu vyvíjet a představovat nové produkty rychleji aby si tak udržely krok s konkurencí, uspokojily cílového zákazníka a tím byly úspěšné na trhu. Přesně tyto požadavky lze splnit pomocí RP díky kterému může výrobce získat lepší obraz o tom, jak bude produkt vypadat nebo fungovat už v rané fázi procesu návrhu a výroby. Tímto způsobem se umožní implementace změn nebo i vylepšení parametrů dříve, než tomu bylo možné doposud. I když je RP relativně nový pojem a některé firmy tímto označením nahrazují konkrétní metody 3D tisku, jedná se o pojem zastřešující celou řadu aditivních technologií. Nízká pořizovací cena a velké rozšíření 3D tiskáren ve firmách mají za následek, že se z pojmů rapid prototyping a 3D tisk stávají téměř synonyma.

4 Proces 3D tisku

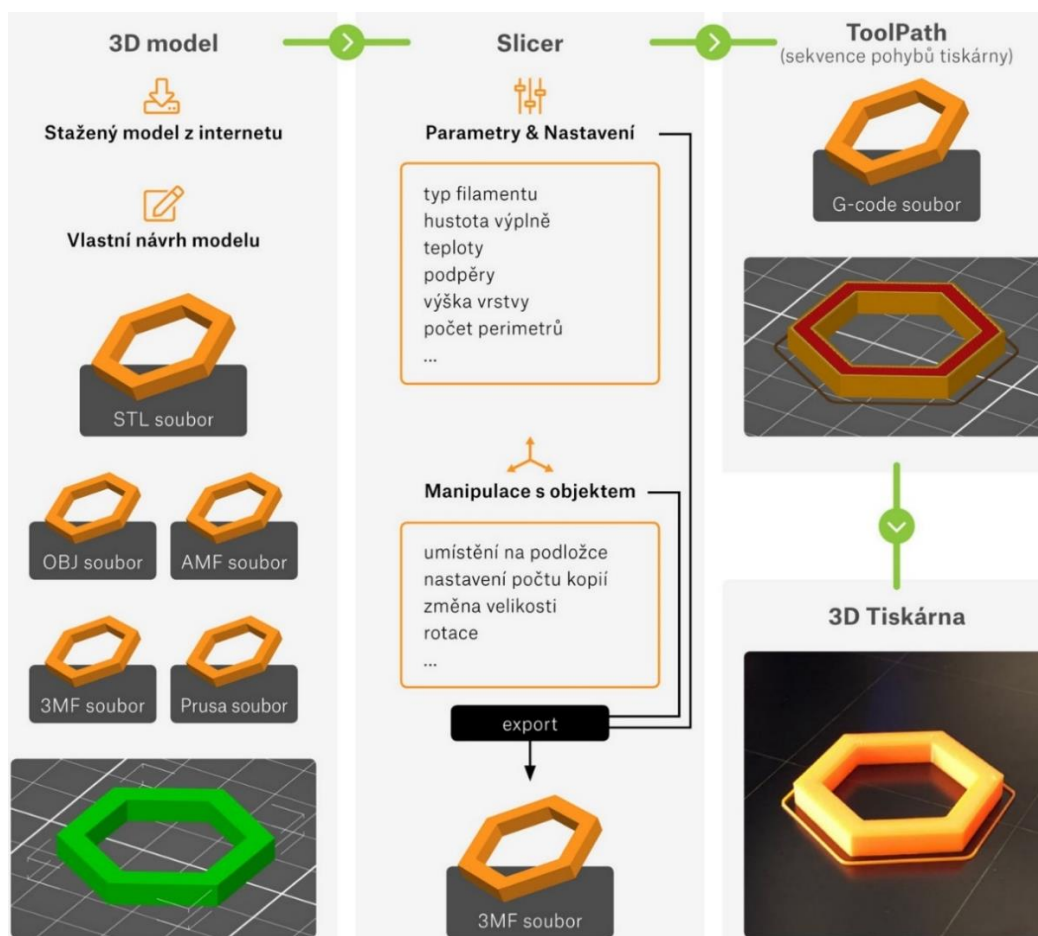
Aditivní výrobu metodou 3D tisku lze obecně označit jako technologie, prostřednictvím kterých se na základě geometrického zobrazení vytvářejí fyzické objekty postupným přidáváním materiálu. Stejně tak jako v ostatních novodobých výrobních procesech, i při 3D tisku začínáme se základním návrhem součásti, který vytvoříme v jakémkoliv programu podporujícím CAD/CAM design. Tento první krok je nepřekvapivě stejný u všech probíraných technik aditivní výroby. Kromě této možnosti se dá digitální forma objektu vytvořit i pomocí 3D skeneru (nebo obyčejného foťáku) jehož pomocí naskenujeme reálný objekt ze všech stran. Následnou rekonstrukcí jeho tvarů ve specializovaném počítačovém programu (fotogrammetrií) dostaneme digitální soubor ve formátu STL (zkratka pojmu stereolitografie) se kterým můžeme dále pracovat. STL formát se v současnosti stal standartním formátem všech souborů v aditivních procesech. Povrch tisknutého objektu je v něm reprezentován normálovými vektory a sadou propojených trojúhelníků, lépe řečeno souřadnicemi jejich vrcholů, které popisují čistě pouze geometrii povrchu. [2]

Ať už zvolíme jakoukoliv metodu pro získání počítačového (CAD) modelu který následně musíme konvertovat na soubor o formátu STL, dalším postupem před samotným tiskem je tzv. „slicování“. Jedná se o úpravu 3D modelu ve specializovaném softwaru zvaného „slicer“ ve kterém si uživatel nejdříve zvolí orientaci a umístění dílu/ů na tiskové (stavební) desce. Díky této funkci lze dosáhnout neoptimalnějšího času výroby, dobré pevnosti části i přesnosti tisku. Následně program díl „nařeže“ na tenké vrstvy v závislosti na požadované tloušťce, které jsou na sebe naskládány ve směru osy **Z** (kolmé na tiskovou podložku). V průběhu dělení části ve sliceru dochází k mírnému zhoršení přesnosti modelu což lze ale většinou zanedbat. [5] Programy pro tento účel jsou na internetu volně dostupné a jako příklad lze uvést hojně používaný Prusaslicer, Ultimaker Cura, Simplify3D atd. Jednotlivé části celého procesu seřazené za sebou jsou viditelné na Obrázku 2. [2; 7]

S dalším krokem je přenesení takto nařezaného modelu do tiskárny pomocí SD karty, bezdrátového připojení nebo klasického USB kabelu. Po ručním zavedení filamentu do tiskové hlavy 3D tiskárny a ověření funkčnosti přichází konečně samotný tisk části. Jeho konkrétní podoba i použitý stavební materiál se výrazně liší na použité technologii tisku (viz Kapitola 5.1) ale obecně lze říct, že se jedná o prosté nanášení vrstev na sebe podle vygenerované dráhy tiskové hlavy/zdroje energie.

Jak se trh 3D tisku posouvá od pouhého prototypování k čím dál běžnější výrobě různých nástrojů a konečných dílů, stávají se mechanické i chemické vlastnosti konečných výrobků stále důležitější. Nejen z toho důvodu se jako poslední krok (který není obecně v každém případě nutný) v celém procesu uplatňuje tzv. *post-processing*. Ve zkratce post-processing znamená jakákoliv činnost nebo proces, který je nutné uskutečnit následně po vytisknutí součásti. Nejčastější forma post-processingu při tisku nastává, když musíme nejdříve oddělit výrobek od tiskové podložky a následně odstranit jakékoliv podpurné struktury. I části vyrobené z fotocitlivého polymeru jsou po vytisknutí pouze v surovém stavu a k dosažení požadovaných vlastností je nutné jejich dobré očištění a podrobení dalšímu vytvrzení. Všechny tyto činnosti a

jejich délka se odlišuje v závislosti na každé technologii aditivní výroby a požadované kvalitě dílu. Vesměs jsou ale všechny prováděny nejčastěji manuálně což dále prodražuje výrobu. [7]



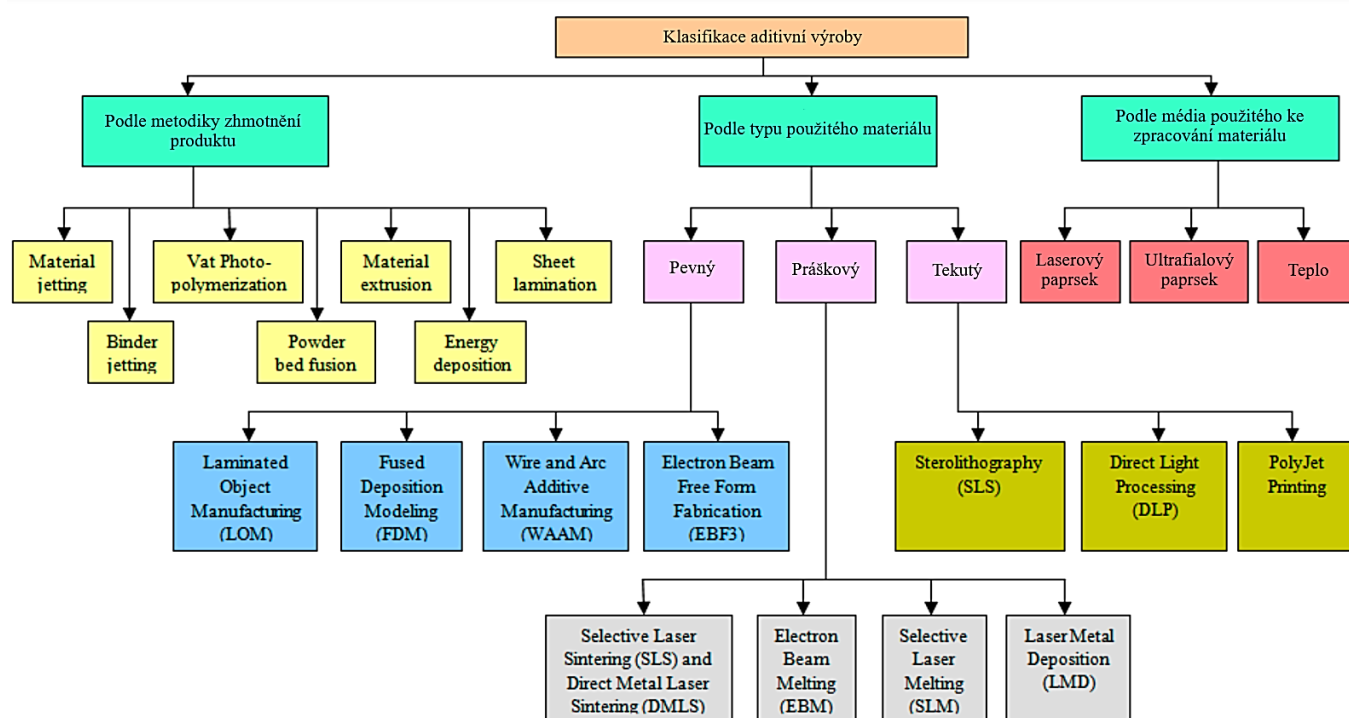
Obrázek 2: Proces 3D tisku v jednotlivých krocích [10]

5 Základní technologie (principy) 3D tisku

Ve světě kolem každého z nás lze vidět, že vývoj aditivní technologie od minulého století výrazně pokročil. Nejen že jsme dokázali výrazně zefektivnit a zpřesnit celý proces pomocí odlišných přístupů ale navíc je stále zdokonalujeme. Také omezené množství termoplastů, ze kterých bylo možné tisknout v minulosti se rozšířilo o další materiály jako například kovy, keramiku, kompozity i různé biokompatibilní materiály. Dříve by bylo nemyslitelné zkusit tisknout jakékoliv předměty tímto způsobem, a proto bylo použití tohoto konceptu omezeno pouze na plasty, které ale svými fyzickými vlastnostmi nevyhovovaly pro významnější použití v průmyslových odvětvích. Kromě nových materiálů k výrobě se také prosadily prakticky všechny jejich fyzické formy, a to jak pevné, kapalné, viskoelastické i dokonce gelové.

Ovšem jak již bylo zmíněno, tak dochází k neustálému zlepšování a rozšiřování množství technologií aditivní výroby ve kterém není často snadné se orientovat. Samotné procesy můžeme hodnotit např. podle ceny, rychlosti výroby, kvality výrobku a jeho povrchu, i rychlosti výroby. Během vývoje technologie aditivní výroby se používalo mnoho různých termínů a definic, často s odkazem na specifické oblasti použití a ochranné známky jejich prvních

výrobci. To bývá ale často nejednoznačné a matoucí, což brání komunikaci a širšímu uplatnění této metody. K udržení přehledu a informovanosti lze aditivní výrobu dělit dle několika způsobů. Americká společnost pro testování a materiály ASTM (American Society for Testing and Materials) uvádí ve své vydané normě ASTM F2792-12a že aktuálně existuje více než 50 různých forem aditivní výroby rozlišitelných na základě výše zmíněných parametrů. Z toho důvodu ASTM navrhla sadu standardů (norma ISO/ASTM 52900:2015) které kategorizují aditivní výrobní procesy do několika skupin (Obrázek 3). Pravděpodobně nejvýznamnější z nich je rozlišování na základě metodiky tvorby výsledných dílů. Právě takto rozlišené typy 3D tisku budou předmětem dalších kapitol sloužících k představení a zvážení jejich výhod a nevýhod pro účely prototypování. [3; 7]



Obrázek 3: Rozdělení technologií 3D tisku [3]

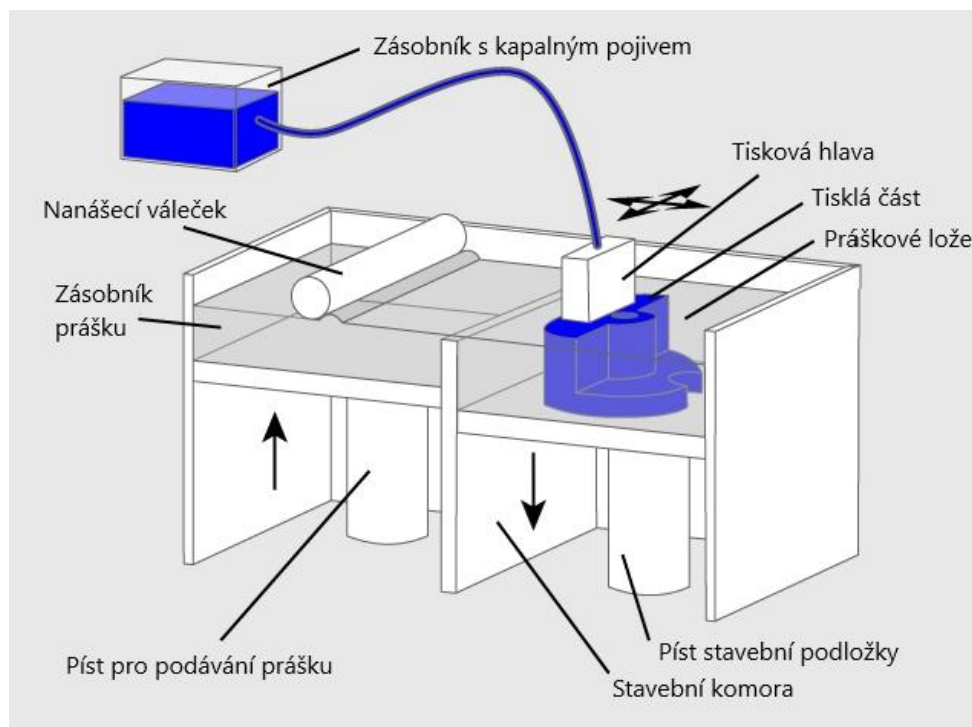
5.1 Binder Jetting

Binder Jetting (BJ) neboli „*Tryskání pojiva*“ (vazebné tryskání) je aditivní výrobní proces, ve kterém je tekuté pojivo selektivně nanášeno pro spojení práškových nebo granulových materiálů. Tato metoda se podobá 3D tisku technologií spékání práškové vrstvy (Powder Bed Fusion). Postup 3D tisku při tryskání pojiva spočívá nejdříve v rozprostření tenké vrstvy práškového materiálu rovnoměrně po konstrukční ploše pomocí nanášecí čepele nebo válečku. Následně se tisková hlava s tryskami podobná těm, které se používají při klasickém 2D tisku pohybuje předem určenou dráhou po prostoru stavební plochy. Při tom selektivně nanáší kapičky kapalného pojiva na práškový materiál v požadovaných místech. Vazivo následně spojí práškový materiál dohromady a vytvoří tak pevnou vrstvu, přičemž použitý prášek tvoří většinu celkové hmoty vyrobeného předmětu. Princip metody BJ je zjednodušeně ukázán na Obrázku 4. Kromě tryskání pojiva se při případném barevném tisku současně mohou nanášet i barevné inkousty. Po nanesení výrobní základna poklesne o stanovenou hodnotu (dle

tloušťky vrstvy) a na předchozí úroveň se přidá další vrstva práškového materiálu připravená ke spojení. Tento proces se opakuje, dokud není postupně vyroben celý objekt. [2; 3]

Po dokončení tisku je výrobek ponechán obklopen okolním práškem určitou dobu z důvodu vytvrzení a usnadnění další manipulace. Čistě vytisklému dílu bez dalšího zpracování se říká tzv. „zelený díl“ (green part) který je pórovitý a křehký. Po vytvrnutí je proto stejně i jako u dalších 3D technologií obvykle potřeba dalšího zpracování (post-processingu). Ten probíhá ve formě slinování, žíhání či jiné úpravy výrobku pro zvýšení hustoty a tím zlepšení jeho mechanických vlastností. [2]

Jednou z výhod tryskání pojiva je, že jej lze použít k tisku objektů z mnoha různých materiálů, včetně kovů, keramiky i polymerů. To z něj činí univerzální proces 3D tisku, který lze použít pro řadu aplikací od výroby prototypů a malosériové výroby až po vytváření zakázkových objektů pro umělecké nebo architektonické účely. Další výhodou tryskání pojivem je, že je tento způsob obecně rychlejší a levnější, než jiné procesy 3D tisku jako je selektivní laserové spékání (SLS) nebo stereolitografie (SLA). Také při této metodě není potřeba používat další podpěry pro podporu tvarově složitých součástí jako je tomu u extrudování materiálu (metoda FFF). Vychází to ze samotné podstaty procesu, kdy je celá součást obklopena částicemi prášku zajišťujícími stabilitu. [2; 7]



Obrázek 4. Princip technologie Binder Jetting [11]

Jako další inovativní přístup k technologii tryskání pojiva lze považovat technologii Multi Jet Fusion (MJF) vyvinutou společností HP a uvedenou na trh v roce 2016. Celé výrobní zařízení od firmy HP je ukázáno na Obrázku 5. Jde však o mírně odlišný postup ve srovnání s klasickým BJ, a proto se často uvádí jako samostatná kategorie metod aditivní výroby nebo jako obdoba metody Powder Bed Fusion. 3D tiskárna s touto technologií je určena k výrobě dílů z termoplastů dodávaných přímo od společnosti HP jako jsou PA11, PA12 nebo TPU

(termoplastický polyuretan). Tato technologie využívá inkoustovou hlavu k nanesení inkoustu na povrch práškového lože v místech, kde má dojít ke splynutí. Inkoust (spojovací činidlo) je okamžitě po nanesení vystaven elektromagnetickým vlnám ze série přítomných zdrojů infračerveného záření (IR). Tím tak dochází k jeho vytvrzení v každé vrstvě zvlášť a zároveň i ke spečení vrstev vzájemně k sobě. [6; 14]



Obrázek 5: Sestava tiskárny HP MJF 4200 (nalevo) a post-processing stanice (napravo) [14]

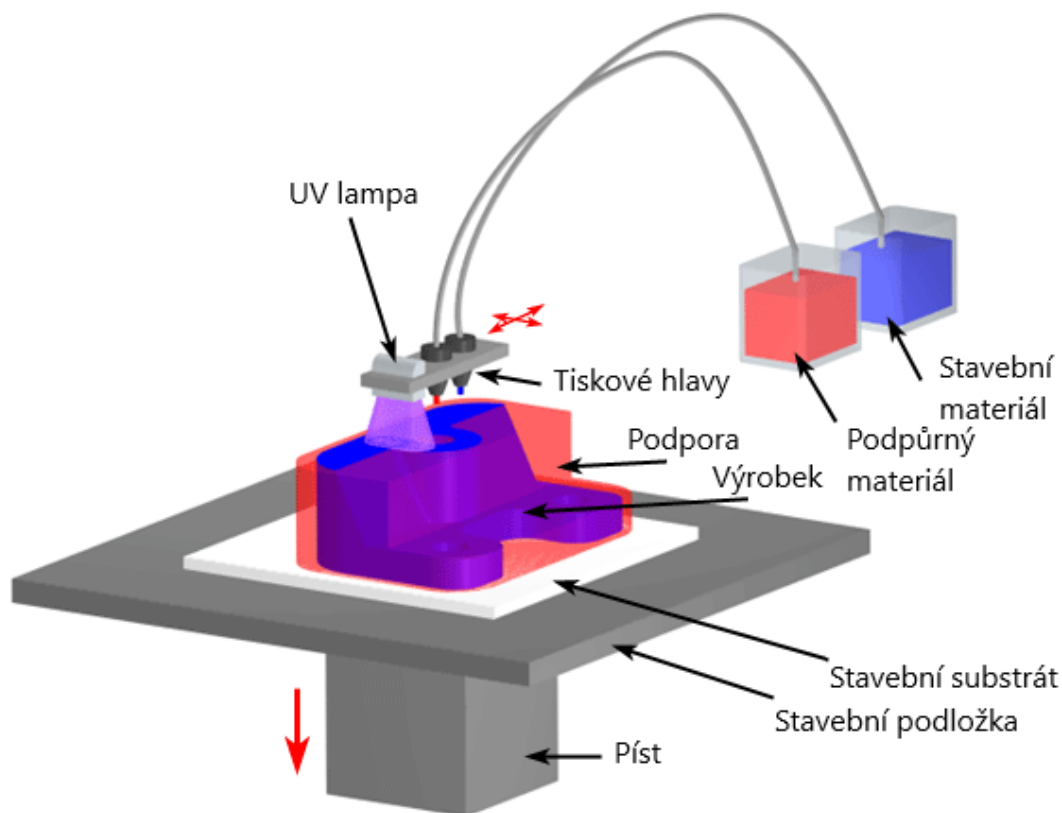
Kvůli aktuálním patentům není technologie MJF od výrobce HP přístupná i jiným výrobcům 3D tiskáren a proto je množství dostupných materiálů značně omezené. [6] V dnešní době je technologie Binder Jetting stále rozšiřujícím se procesem 3D tisku, který nabízí širokou škálu výhod. Lze jej primárně použít k výrobě objektů z množství materiálů včetně kovů s dobrými mechanickými vlastnostmi. Jedná se o všestranný a nákladově efektivní způsob, jak rychle vytvářet vysoce kvalitní objekty. I u této technologie lze však nalézt i negativní stránky, mezi které patří výrazně vyšší cena a obtížně dosažitelná přesnost způsobená možným smršťováním součásti při post-processingu. Při vystavení dílu vysokým teplotám spojeným se slinováním i žíháním existuje také riziko deformace výrobku svojí vlastní vahou.

5.2 Material Jetting

V tomto procesu jinak nazývaném „*nanášení tryskáním*“ nebo „*tryskání materiálu*“ jsou selektivně nanášeny kapičky stavebního materiálu (termoplastu, kovové slitiny) na určená místa. Při tryskání materiálu se tisková hlava pohybuje po prázdném pracovním prostoru a nanáší na výrobní desku kapalně fotopolymerní kapičky stavební a podpůrné látky. Kapky se poté vytvrzují pomocí ultrafialového světla, tepla nebo jinou metodou v závislosti na konkrétním použitém materiálu. Jakmile jsou kapičky vytvrzeny, zformují tak pevnou vrstvu tištěného objektu. Poté se konstrukční platforma o malý krok sníží a na předchozí vrstvu se nanese další vrstva tekutého materiálu. Zmíněný proces, který je znázorněn na Obrázku 6. se opakuje, dokud není sestaven celý objekt. [7]

Nanášení tryskáním umožňuje vysoké rozlišení a přesnost procesu tisku, protože jsou kapičky materiálu nanášeny ve velmi tenkých vrstvách s tloušťkou až 14 μm . Díky tomu lze pomocí materiálového tryskání vytvářet objekty s extrémně jemnými detaily a přesnými povrchy. Tento způsob se tedy jeví jako vhodná volba pro tisk objektů s komplexními vzory,

ale zároveň je nepraktický při tisku uzavřených dutin, kde může podpůrný materiál uvíznout. Ze samotného principu rozprostírání materiálu tryskáním je možné obvykle úspěšně tisknout pouze viskózní materiály. I těch ale z hlediska vhodnosti pro tento typ 3D tisku lze použít spíše omezené množství. Mezi tyto materiály se řadí pryskyřice, vosky, a také polymerní materiály zahrnující plasty (v tekuté formě) jako např. PC, ABS, HIPS atd. Výhodou metody MJ je ale například možnost tisku z více barev zároveň. [7]



Obrázek 6: Princip technologie Material Jetting (MJ) [12]

V dnešní době někteří výrobci jako je firma Stratasys, HP nebo i 3D Systems nabízejí tisk technologií MJ pod obchodními jmény jako je např. Polyjet. Tito výrobci jsou jedni z nejznámějších specialistů pro nanášení materiálu tryskáním na trhu a nabízejí řadu foto-vytvrditelných plastů a kompozitů. Ve zmíněných technologiích jsou jejich tiskárny schopné selektivně nanášet více foto-vytvrditelných polymerních pryskyřic současně za účelem výroby dílů z více materiálů. Současně s tiskem dílu z požadovaného materiálu jsou v případě potřeby vytvářeny dočasné podpory z odlišných materiálů pro podepření převislých struktur.

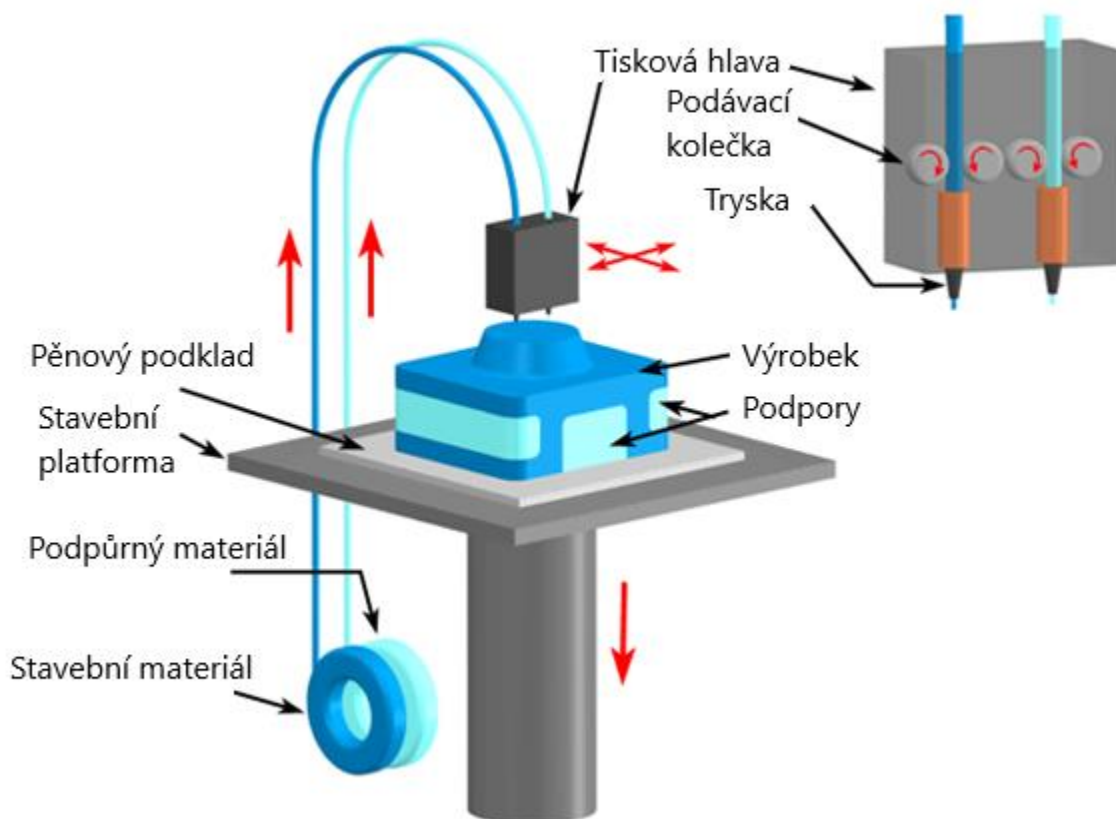
Aktuálně probíhá řada výzkumů s cílem rozšířit škálu materiálů, které lze pro nanášení tryskáním použít, a na trh již začaly vstupovat kovy a keramika. Kupříkladu Izraelská společnost XJet vyvinula svojí vlastní technologii MJ s názvem „NanoParticle Jetting“(NJP). Její podstatou je tryskání suspenze (heterogenní směsi pevných částic v kapalině) vybraných stavebních a nosných materiálů na stavební desku tiskárny. Nanočástice kovu nebo keramiky rozpuštěné v kapalině jsou vystřikovány ve formě velmi tenké vrstvy na vybraná místa stavební podložky, kde se následně kapalina odpaří. K tomu dochází z důvodu vysoké teploty (až 300

°C) uvnitř komory, kde tisk probíhá. [25] Na stavební ploše tak zůstanou pouze keramické nebo kovové nanočástice tvořící mechanicky pevnou část. V této fázi se vyrobený objekt stejně jako u technologie Binder Jetting nazývá „green part“ jelikož nedosahuje požadovaných konečných vlastností. Tento díl je následně zpevněn metodou sintrování pro zlepšení mechanických vlastností finálního dílu, čímž je dokončen výrobní proces. [7]

5.3 Material Extrusion

3D tisk metodou extruze materiálu také známou jako *FFF/FDM* (Fused Filament Fabrication/ Fused Deposition Modeling) je nejběžnější a nejrozšířenější způsob 3D tisku díky jeho relativní jednoduchosti. Jeho principem je poměrně jednoduchý postup, při kterém je materiál selektivně dávkován tryskou nebo otvorem na tvrdou podložku. Zkratka FDM a termín „Fused Deposition Modelling“ je ochranná známka společnosti Stratasys. Z toho důvodu budou v práci používány pouze pojmy „FFF“ a „Fused Filament Fabrication“. [2]

Tento typ tisku si lze zjednodušeně představit podobně jako lepení tavnou pistolí. Při práci s ní nejdříve zahřejeme vloženou tavnou tyčinku lepidla, která se v tavicí komoře vyhřívá elektrickým topným tělesem (120 až 200 °C) roztaví a následně ji stiskem spouště vytlačujeme přes trysku ven. Podobný postup extruze materiálu je i při tisku metodou FFF, který probíhá v závislosti na použitém stavebního materiálu za teploty kolem 200 °C. Tenká vlákna roztaveného plastu jsou při něm pokládána nejdříve na stavební podložku a následně pak na předchozí vrstvy. Celý proces je schematicky naznačen na Obrázku 7. [2; 7]



Obrázek 7: Princip technologie Fused Filament Fabrication (FFF) [13]

Jako u každého procesu 3D tisku začíná výroba designem a vytvořením 3D modelu pomocí CAD softwaru. Následně je model „rozřezán“ ve sliceru na jednotlivé úrovně jejichž tloušťka se v tomto případě pohybuje mezi 0.05 mm and 0.4 mm. Stavebním materiálem je v tomto případě tisková struna (filament). Tato struna je namotaná na otočných cívkách připevněných poblíž tiskárny. Délka strun se pohybuje ve stovkách metrů což umožňuje delší prodlevu mezi jednotlivými výměnami a větší produktivitu. Tryska se pohybuje po předem počítačem stanovené dráze, ve které je každá vrstva vyobrazena jako jednoduchý dvourozměrný obrazec. Tímto se zhotovuje požadovaný tvar z roztaveného materiálu vrstvu po vrstvě. Výsledkem tohoto postupu je získání solidního výrobku s vlastnostmi tiskového materiálu. 3D tiskárny s technologií FFF se dále dělí podle mnoha dalších kritérií. Jde například o rozdělení podle způsobu extruze filamentu, který může probíhat pomocí přímého nebo bovdenového extrudéru. Nejvýznamnějším rozdílem mezi jednotlivými tiskárnami je však způsob konstrukce. [2] [7] Podle toho se dělí se na:

- Kartézské tiskárny – pravouhlý souřadnicový systém
- Delta tiskárny – pohyblivá ramena na více sloupech
- Polární tiskárny – polární souřadnicový systém
- SCARA tiskárny – robot s tiskovou hlavou

Aditivní výroba technologií FFF/FDM využívá primárně navíjené polymery, které jsou buď vytlačovány, nebo taženy vyhřívanou tryskou v hlavě stroje. Tryska umístěná v hlavě se může pohybovat díky rameni a pojezdům na nichž je rameno umístěno napříč celým výrobním prostorem 3D tiskárny. Nejběžnější je použití pouze jednoho materiálu, který je určen jako konstrukční, i jako podpůrný při tisku tvarů vyžadujících podpory pro zajištění stability. Lze se ale také setkat s případy kdy jsou v tiskové hlavě stroje umístěny dvě trysky a zavedeny dva různé filameny. V tom případě jeden filament slouží jako konstrukční pro výrobu samotného dílu, a druhý má za účel tvořit dočasné podpory které se v následném procesu post-processingu částečně rozpustí v rozpouštědle. [7]

Nabídka materiálů pro technologii FFF na trhu se neustále rozšiřuje, a i komerčně dostupné tiskárny už mají široké spektrum možností výroby z různých materiálů. Ty se mohou lišit podle barvy, ceny, šetrnosti k životnímu prostředí i podle fyzikálních vlastností. Jejich množství tak představuje jednu z největších výhod této technologie. Nejvýznamnější materiály jsou zmíněné v Tabulce 1. Nejčastěji používané materiály v hobby i profi oblastech jsou termoplasty typu PLA, ABS nebo PETG. Materiál PLA (Polylactic acid) je z nich nejběžnější také díky své šetrnosti k životnímu prostředí, jelikož je vyráběn z přírodních produktů jako je bramborový nebo kukuřičný škrob. [15]

Pro získání konečného výrobku, který bude mít jako celek dobré fyzické vlastnosti je však potřeba zajistit, aby k sobě každý pár vrstev spolehlivě přilnul. To jde zabezpečit kontrolou teploty spočívající správným nastavením tiskové podložky nebo tiskem v kontrolovaném (uzavřeném) prostředí.

Tabulka 1: Nejvýznamnější materiály používané v technologii FFF a jejich vlastnosti [15]

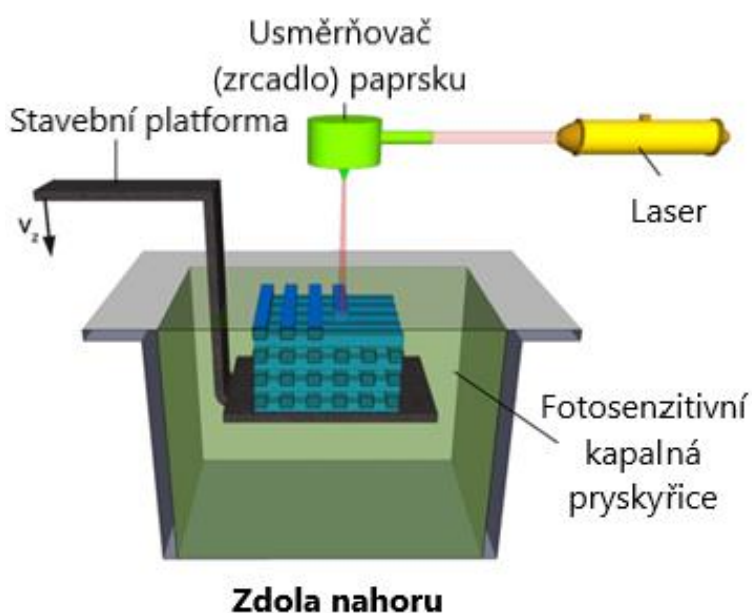
	Název	Teplota extrudéru	Max. teplota použitelnosti	Koeficient t. roztažnosti	Hustota	Pevnost v tahu
	ABS	220–250 °C	98 °C	90 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{°C}$	1,04 g/cm^3	$\approx 30\text{--}40$ MPa
	PETG	230–250 °C	73 °C	60 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{°C}$	1,23 g/cm^3	≈ 53 Mpa
	PLA	190–220 °C	52 °C	68 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{°C}$	1,24 g/cm^3	≈ 65 MPa
	ASA	235–255 °C	95 °C	98 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{°C}$	1,07 g/cm^3	≈ 55 MPa
	Flex	225–245 °C	60-74 °C	157 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{°C}$	1,19 – 1,23 g/cm^3	$\approx 26\text{--}43$ MPa
	Nylon	220–270 °C	80-95 °C	95 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{°C}$	1,6 -1,14 g/cm^3	$\approx 40\text{--}85$ MPa
	PP	220–250 °C	100 °C	150 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{°C}$	0,9 g/cm^3	≈ 32 MPa
	PC	260–310 °C	121 °C	69 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{°C}$	1,2 g/cm^3	$\approx 50\text{--}72$ MPa

5.4 Vat Polymerization

Metoda Vat Polymerization je také známá jako „*polymerizace v kádi*“ (nádrži) či „*kád'ová polymerizace*“. Tato technologie spočívá ve formování tekutého stavebního materiálu pomocí laseru. Kapalný fotopolymer (pryskyřice) umístěný v kádi je selektivně vytvrzován světlem aktivovanou polymerací do pevné formy. [7] Tvar jednotlivých vrstev je opět získán ze sliceru kde lze nastavit přímo o jakou konkrétní technologii tisku se jedná. Do této kategorie metod 3D tisku spadá několik technik, které se mohou lišit druhem použitého světelného zdroje k vytvrzování a také způsobem ozařování jednotlivých vrstev v průběhu tisku. [2; 3] Ty jsou známé jako:

1. Stereolithography (SLA)

Jedná se o nejvýznamnější formu polymerizace v kádi a 3D tiskárny pracující na jejím principu jsou na trhu obecně snadno dostupné. Jak je již v předchozích kapitolách zmíněno, metoda stereolitografie se řadí mezi nejstarší a nejpřesnější technologie 3D tisku. Při výrobě touto metodou se do kádě naplněné tekutou pryskyřicí nejdříve spustí stavební základna. Zdroj světla ve formě ultrafialového laserového paprsku, postupně vytvrzuje pryskyřici vrstvu po vrstvě podle vstupního modelu tištěného objektu (viz Obrázek 8). Tvar těchto vrstev vždy opět odpovídá daným průřezům STL modelu získaného ze sliceru. Po vytvrzení každé vrstvy se základní deska posune ve vertikálním směru dolů a na předchozí vrstvu se tak dostane nová vrstva nevytvrzené pryskyřice. [2; 8]



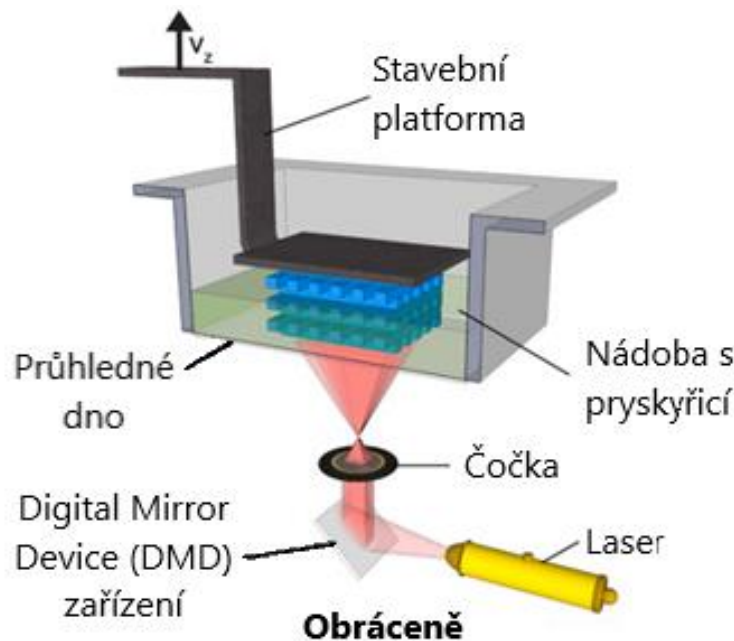
Obrázek 8: Princip technologie Stereolithography [8]

Kromě klasického postupu tisku je ale také možné tisknout daný objekt v opačném směru při použití průhledného dna kádě. Laser v tomto případě vytvrzuje tekutou pryskyřici z opačného směru. Průběh spočívá nejdříve v umístění stavební platformy na dno vaničky naplněné pryskyřicí a s každou vytisknutou vrstvou se posouvá nahoru. Tento pohyb umožní další přísun tekuté pryskyřice na stavební plochu a proces vytvrzování se opakuje. Výhodou tohoto přístupu je, že lze vytisknout mnohem větší objekt nezávisle na hloubce

kádě a jediné omezení je nutnost dostatečné zásoby tekutého fotopolymery. V tomto případě je ovšem důležité brát v úvahu opotřebení vrstvy polydimethylsiloxanu (PDMS) pokrývající průhledné dno kádě s pryskyřicí. Ta přispívá celému procesu nejen umožněním čistého průchodu světla skrz dno ale i absorpcí kyslíku čímž zabraňuje přilnutí vytvrzeného fotopolymery ke dnu kádě. [2; 10]

2. Digital Light Processing (DLP)

Funkce technologie Digital Light Processing je založena na MEMS (Mikro elektro mechanický systém) zařízení zvaném „*Digital Micromirror Device™*“ vyvinutém americkou společností Texas Instruments. Tato firma je známá hlavně díky vynálezu integrovaného obvodu. V tiskárně s technologií DLP je fotopolymer vystaven světlu ze speciálního projektoru nebo digitálního mikrozrcadlového zařízení (DMD). Tyto přístroje usměrňují UV záření do kádě tekuté pryskyřice podobně jako u technologie SLA. Díky svému principu staví tiskárna jednotlivé vrstvy rychleji než u jiných technologií, protože dokáže osvětlit celou plochu najednou místo toho, aby ji osvětlovala postupně (viz Obrázek 9). [3; 8]



Obrázek 9: Princip technologie Digital Light Processing [8]

3. Liquid Crystal Display (LCD/MSLA)

LCD je opět stejně jako DLP variace SLA která používá displej z tekutých krystalů jako „masku“. Ta propouští UV světlo z projektoru pouze v požadovaných místech, na kterých chceme vytvářet tekutý fotopolymer. Po vytváření vrstvy se stejně jako u ostatních procesů fotopolymerizace stavební podložka posune vertikálně o tloušťku vrstvy (v tomto případě nahoru) a proces se opakuje. Samotné dno vaničky je pokryté vyměnitelnou „FEP“ fólií která je odolná vůči vysokým teplotám i chemikáliím. Na principu MSLA dnes funguje většina 3D tiskáren na bázi fotopolymerizace tekutého resinu včetně tiskáren od výrobce Prusa Research (viz Obrázek 10), které jsou pro zjednodušení označovány místo „MSLA“ pouze „SLA“.



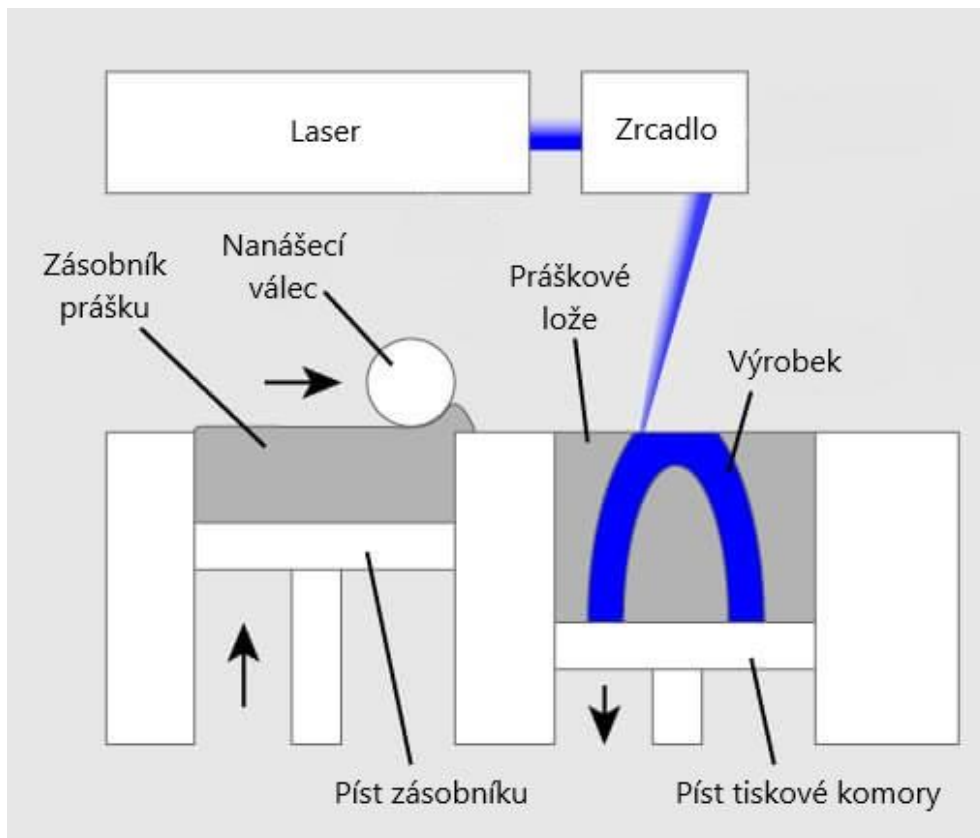
Obrázek 10: Tiskárna Prusa SL1 pracující na principu MSLA [16]

I když je metoda fotopolymerizace v kádích nejstarší metodou 3D tisku, jednou z jejích hlavních výhod je schopnost tvorby objektů s vysokým rozlišením a detaily. Vzhledem k tomu, že zdroj světla dokáže vytvářet pryskyřici s vysokou přesností, můžeme pomocí fotopolymerizace vytvářet objekty s velmi jemnými rysy a hladkými povrchy. To z ní činí dobrou volbu pro tisk dílů se složitými i komplexními vzory, jelikož se tloušťka vrstev pohybuje v řádek stovek až desítek mikronů.

Mezi použitelné materiály při tisku touto metodou se řadí různé fotopolymery, pryskyřice a další tekuté látky. To z ní činí univerzální proces 3D tisku, který lze použít pro výrobu prototypů, malosériovou výrobu i pro vytváření zakázkových objektů pro umělecké nebo architektonické účely. Jedná se o vysoce univerzální proces 3D tisku který nabízí potenciál pro oblast automotive a lze jej použít k výrobě objektů z poměrně obsáhlého výběru materiálů. Nicméně jeho negativní vlastností je také vyšší cena tekutých pryskyřic v porovnání s technologií FFF.

5.5 Powder Bed Fusion

Powder Bed Fusion také známá jako „*fúze práškového lůžka*“ je jedna z nejpokročilejších metod 3D tisku a s její pomocí lze tvořit z plastových, kovových i keramických materiálů. Tato technologie se svým principem podobá principu Binder Jetting (BJ) metody. Při obou z nich má hlavní roli práškový materiál v pracovním prostoru, který je určitým způsobem spojován dohromady. Nicméně zde je postup spojování odlišný, jelikož se při tomto procesu k vytváření trojrozměrného objektu jednotlivými vrstvami využívá buď laserový, nebo elektronový paprsek. Vybraný paprsek pracuje jako zdroj tepelné energie pro ozařování, tavení a slinování práškových částic. Tloušťka jednotlivých vrstev se pohybuje okolo 0,1 mm v závislosti na materiálu. Další odlišností je samotné prostředí stavební komory, které v tomto případě často tvoří inertní atmosféra v podobě argonu, dusíku nebo helia z důvodu stínění roztaveného kovu. Princip technologie SLS je patrný na Obrázku 11. [2; 3; 6]



Obrázek 11: Princip technologie Selective Laser Sintering (SLS) [11]

Při výrobě se zdroj tepelné energie soustředí na malou plochu tenké vrstvy prášku, přičemž dochází k natavení jednotlivých zrn a jejich spečení v místech aktuálního průřezu opět získaného ze sliceru. Následně se tisková deska umístěná na pístu posune o úroveň dolů ve vertikální ose a píst zásobníku prášku se posune nahoru. Díky tomu může roztrávicí váleček („recoater“) nebo stěrka nanést ze zásobníku přídavného prášku na tiskovou plochu další vrstvu a celý proces se může opakovat. [11] Pojem spékání práškové vrstvy zahrnuje technologie:

a) Selective Laser Melting (SLM)

Tato metoda používá jako stavební materiál prášek z čistého kovu. Zdroj energie tvoří laserový paprsek usměřovaný zrcadly a čočkou na stavební platformu pokrytou kovovým práškem. Prášek je při osvětlení laserem následně zcela roztaven, jak je patrné z názvu. Po jeho zatuhnutí se nanese další vrstva prášku na předchozí, aby se proces mohl opakovat čímž se postupně zhotoví výsledný objekt. Díky kompletnímu roztavení práškových částic lze dosáhnout lepší homogenity výsledného materiálu výrobku, než je tomu u následující metody SLS. Celý proces výroby probíhá v atmosféře inertního plynu (argon, dusík). K tisku výrobků metodou SLM se používají různé oceli, měď, titan, wolfram a další kovy. [6]

b) Selective Laser Sintering (SLS)

Metoda SLS (selektivní laserové spékání) označovaná často pouze jako „sintrování“ používá jeden nebo více vysoce výkonných laserů ke slinování malých částic práškové vrstvy nanesené na stavební podložce. Na rozdíl od metody SLM zde

nedochází k úplnému roztavení prášku a pouze jeho zahřátí na vysokou teplotu což zapříčiní spojení práškových částic. Prášek se při procesu tisku udržuje při zvýšené teplotě, která je stále těsně pod teplotou tání. Výsledkem je zajištění jeho snadného spečení (sintrování) při působení paprsku laseru. SLS se používá hlavně k tisku z plastů a oproti FDM se vyznačuje lepší homogenitou výtisků a jejich srovnatelnými mechanickými vlastnostmi. Po dokončení tisku se musí nádoba společně s práškem nechat kompletně vychladnout, než lze vyrobený díl vyjmout což může zabrat i několik hodin. Mezi používané materiály patří polymery jako je nylon, který může být vyztužen sklem nebo uhlíkovými vlákny. [2; 6]

c) **Direct Metal Laser Sintering (DMLS)**

DMLS (přímé kovové laserové spékání) funguje na principu tavení jemného kovového prášku po jednotlivých vrstvách opět za použití paprsku laseru usměrněného zrcadly na stavební platformu. Částice prášku mají průměr cca 0,02 mm (v závislosti na použitém materiálu) a neobsahují žádná pojiva. Proto není nutné následné očišťování a vypalování hotového výrobku za účelem vytvrzení. Stavebními materiály jsou v tomto případě oceli, titan anebo hliníkové slitiny. [7]

d) **Electron Beam Melting (EBM)**

Pro funkci této technologie aditivní výroby je potřeba před zahájením tisku vytvořit vakuum ve stavební komoře za účelem zabránění rozptylu elektronového paprsku. Následně se do komory přivede malé množství helia k regulaci tlaku a k vytvoření vodivé oblasti u stavební podložky. Elektronový paprsek zde slouží kromě samotného tisku, při kterém selektivně taví každou práškovou vrstvu i k předehřátí základny. Tímto způsobem je dosaženo požadované přilnutí první vrstvy k podložce. Proud elektronů paprsku je zde usměrňován elektromagneticky, a proto se dokáže pohybovat po stavební ploše rychleji než laser. [6]

Na rozdíl od technologií SLA, FDM atd. nejsou při aditivních metodách výroby založených na spékání práškové vrstvy nutné speciální podpurné struktury stejně jako je tomu u BJ technologie. Přebytečný prášek v každé vrstvě přirozeně působí jako podpora pro vyráběnou součást. S neustálým zlepšováním přesnosti a rozlišení těchto metod se zároveň často eliminuje i nutnost následného zpracování obráběním a finišováním.

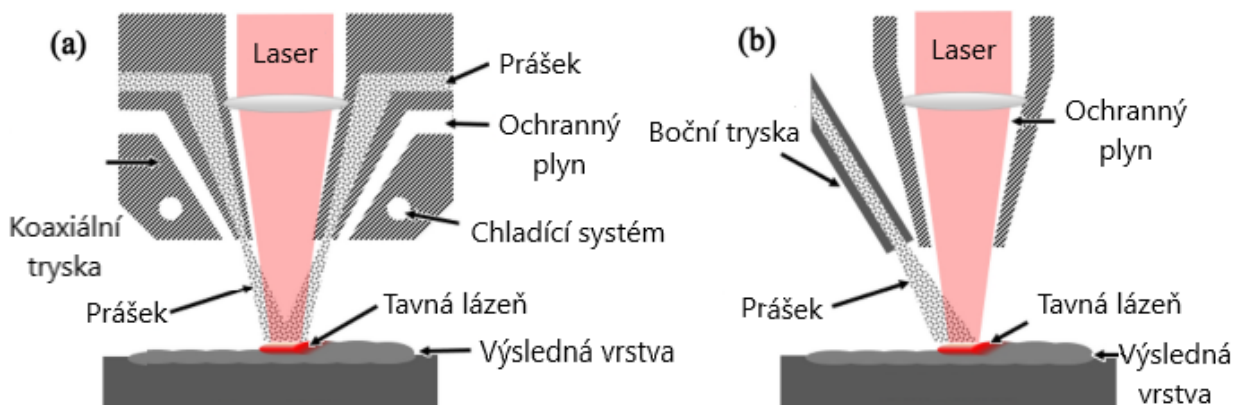
Obecně lze v technologii fúze práškového lůžka nalézt mezi používanými materiály hlavně polymerové prášky jako je nylon (PA12), který může být obohacený sklem, hliníkem nebo uhlíkovými vlákny. Nechybí ale také ani kovy jako hliník a titan. Tento počet tisknutelných materiálů je však v metodě fúze práškového lůžka omezen ve srovnání s technikou extruze materiálu. Hlavní příčinou je delší čas potřebný na důkladné vyčištění jak zásobníku, tak i stavení plochy tiskárny při změně materiálu. Z toho důvodu firmy zabývající se 3D tiskem často používají jediný materiál pro individuální tiskárnu. Nicméně v dnešní době existují společnosti a výzkumné programy snažící se vyvinout efektivní multimateriální proces SLS který dokáže v jedné vrstvě nanést a tisknout více materiálů najednou. Příkladem může být belgická společnost Aerosint SA jejíž nízkoodpadová SLS tiskárna využívá tzv. „recoater“ složený s několika bubny, z nichž každý obsahuje jiný materiál. [6]

5.6 Direct Energy Deposition

Proces *Direct Energy Deposition* (DED) také známý jako *Laser metal deposition* (LMD) neboli laserové práškové nanášení je jeden z komplexnějších přístupů k výrobě 3D objektů. V této metodě se soustředěná tepelná energie používá k tavení materiálů přímo při jejich kladení. Tento technologický proces je také běžně označován jako přímá energetická depozice kovu nebo přímé energetické nanášení. Už z tohoto lze vyvodit, že se DED používá hlavně v kovovýrobě, a to často i při opravách nebo přidávání materiálu na již existující součásti. Tisková hlava obsahuje dodávaný materiál, zdroj energie a může obsahovat i přívod inertního plynu k ochraně tavné lázně proti atmosférickému kyslíku. K přesné dopravě prachových částic skrze tiskovou hlavu na opracovávaný povrch je zároveň nutný vysoký tlak. Jako zdroj se používá laser, elektronový paprsek nebo plazma. Po přivedení přídatného prášku nebo drátu jedním z možných způsobů (viz Obrázek 12.) dochází k jeho téměř okamžitému natavení na povrch a spojení společně s předchozí vrstvou. [2; 4; 17]

Celé zařízení pro 3D tisk bývá složeno z trysky přivádějící stavební materiál ve formě drátu nebo prášku která je společně se zdrojem energie připevněna na víceosém robotickém rameni. Díky tomu lze nanášet materiál v libovolném úhlu, jelikož jediným omezením je počet os robota (obvykle 4 nebo 5) s pomocí kterého probíhá tisk. [4]

Mezi výhody tohoto procesu patří možnost vytvářet i větší strojní součásti s vysokou přesností a možnost kombinace s konvenčním CNC obráběním. Rizika výroby částí touto technologií jsou naopak například potenciální deformace v procesu výroby z důvodu neustálého tepelného ovlivňování materiálu. K řešení těchto výzev se výzkumníci zabývají novými přístupy k DED, jako jsou hybridní laserové a obloukové svařování a vylepšováním techniky sledování celého procesu. [2; 3; 4]

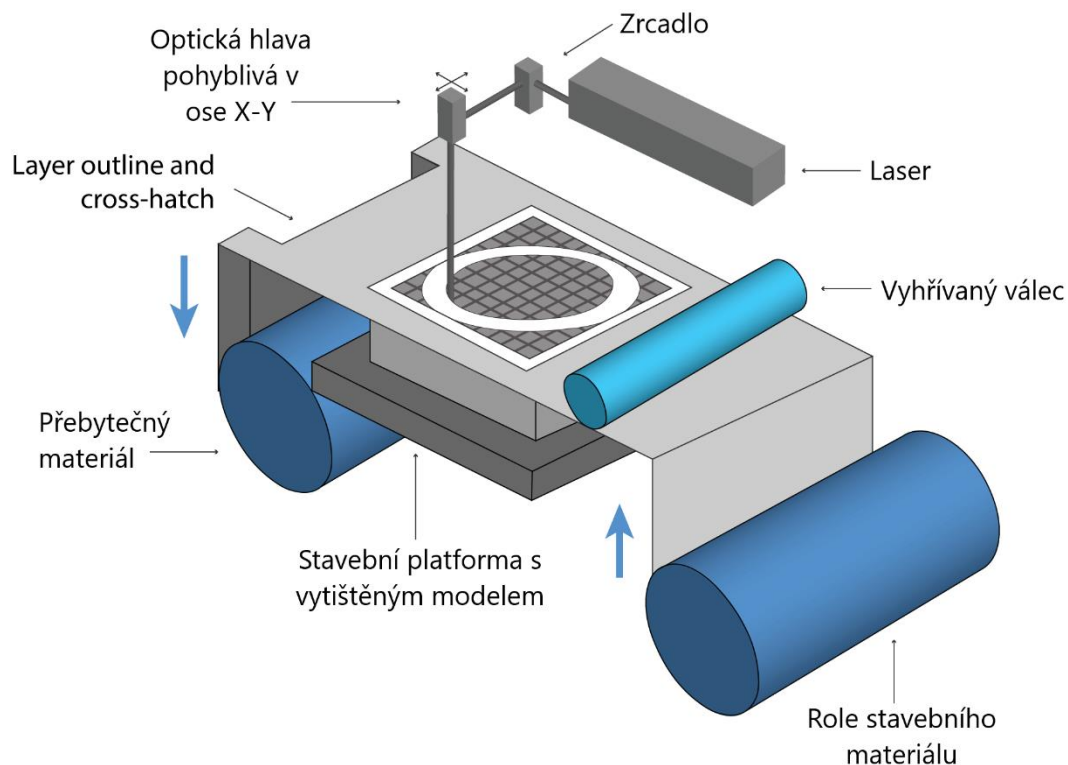


Obrázek 12: Princip technologie Direct Energy Deposition [17]

5.7 Sheet Lamination

Poslední zástupce aditivní výroby se nazývá Laminace plátů a tento pojem zahrnuje technologii „LOM“ (Laminated object manufacturing) a technologii UAM (The Ultrasonic Additive Manufacturing) vyvinutou společností Fabrisonic. Obecně lze říci, že princip metody Sheet Lamination spočívá ve spojování listů materiálu tak, aby společně vytvořily součást. Jak již název napovídá, laminace plátů je technika, při které se na sebe naskládávají extrémně tenké plechy. Ty se řezou do různých tvarů podle aktuálního průřezu získaného z CAD modelu, aby společně vytvořily požadovaný 3D objekt. [2]

V procesu výroby technikou LOM dochází ke spojování tenkých vrstev materiálu (papíru, folií nebo plechu) pokrytého adhezivem. Nejdříve je materiál umístěn nad pohyblivou stavební podložku pomocí zásobníku ve formě svitku. Na druhé straně je pak navinuta role přebytečného (odpadního) materiálu. Následně se jednotlivé vrstvy vyřezou v jednotlivých krocích do určeného tvaru pomocí CO2 laseru (viz Obrázek 13) nebo pouhého nože. Po dokončení každé vrstvy sjede stavební podložka směrem dolů, a mezitím se nad ni navine další vrstva. Poté vyjede podložka i s předchozí vrstvou na ní zpět nahoru kde ji společně s novou nevyřízlou vrstvou přejede vyhřívaný válec. Tím se aktivuje lepidlo mezi nimi a obě vrstvy jsou společně spojeny za použití tlaku i tepla. [2; 18]



Obrázek 13. Princip technologie Sheet Lamination (LOM) [18]

Jako materiál se mohou používat kovové, plastové i papírové lamináty. Jedná se o jednu z méně přesných aditivních technologií výroby, která v sobě kombinuje vlastnosti subtraktivní a aditivní techniky. Dokáže být nicméně užitečná pro vytváření velkoobjemových objektů pro architektonické, umělecké nebo v omezené míře i průmyslové účely. Nicméně cena strojů

pracujícím na tomto principu často převyšuje i několik stovek tisíc což dále omezuje její využití. Jedním z výrobců je například společnost MCAE Systems jejíž tiskárna pracuje s klasickým papírem jako stavebním materiálem, který je probarvován běžnou technologií inkoustového tisku.

Kladnými vlastnostmi této technologie je její schopnost výroby poměrně složitých geometrických dílů při vynaložení nižších provozních a výrobních nákladů, než je tomu např. u SLA či SLS. Jde také o poměrně rychlý výrobní proces bez nutnosti vysoce specializovaných nástrojů, jelikož se jedná o jednoduché řezání a následné slepování vrstev materiálu k sobě. Rozlišení a kvalita detailů je v tomto případě však spíše na horší úrovni. To se týká i kvality výsledného povrchu a pevnosti hotového dílu, ve srovnání s ostatními aditivními výrobními procesy. [18]

6 Výběr optimální metody

Z předchozích kapitol je patrné že aditivní výrobu 3D tiskem lze využít k prototypování prakticky všech druhů dílů. Myslí se tím prosté díly v každodenním životě, méně namáhané strojní nebo automobilové součásti i „high-end“ prototypy leteckého a kosmického průmyslu. Všechny metody mají své silné i slabé stránky a také svoje specifické materiály. V každém případě jsou však více výhodné pro techniku rapidního prototypování než klasický způsob výroby plastových dílů.

Díly se složitými tvary není vždy možné nebo se finančně nevyplatí prototypově vyrábět pomocí subtraktivních technologií jako je například frézování nebo soustružení na počítačem řízených strojích CNC (Computer Numerical Control). Tyto stroje vyžadují kromě zručné obsluhy i specializované nástroje a jsou omezeny počtem os (nejčastěji 3 nebo 4) ve kterých se mohou pohybovat. Nelze opomenout i velké množství odpadního materiálu, které přirozeně v procesu strojního obrábění vzniká. I za použití správných postupů a řezných podmínek nelze nikdy dosáhnout flexibility 3D tiskárny která si hravě poradí i se složitými vnitřními tvary výrobků.

K docílení potřebné kvality i tvarů se z těchto důvodů při práci s termoplasty používají v dnešní době hlavně vstřikovací lisy (vstřikolisy) sloužící ke zpracování polymerních materiálů. Ve vstřikolisech se plast ve formě granulátu nejdříve nasype do vstřikovací (plastifikační) jednotky, kde je zahříván na určitou teplotu a přeměněn v taveninu. Následně je zbaven bublinek vzduchu a prostřednictvím nejčastěji pohybu šneku vytlačen do uzavřené vstřikovací formy pod vysokým tlakem. Tím dojde k odvzdušnění formy a vyplnění všech dutin termoplastem po čemž dochází k vychladnutí dílu i formy. V konečné fázi se forma otevře a vypadne hotový díl. Tyto stroje lze použít jak pro výrobu přesných technických dílů, tak pro pohledové díly. Jejich hlavní omezení je ale ve vysoké ceně, což hraje nejdůležitější roli při rozhodování firmy mezi různými technologiemi výroby. Nesmíme také zapomínat, že vstřikolisy vyžaduje ke své funkci základní součásti, které jsou:

- a) Plastikační jednotka
- b) Uzavírací jednotka
- c) Forma
- d) Komunikační rozhraní

Tyto komponenty vyžadují výrazné počáteční investice, které se vyplatí pouze v případě hromadné výroby. V současnosti lze jednotlivé díly stroje skládat jako stavebnici a snadno tak vyměnit v případě potřeby formu za jinou. I navzdory tomu zůstávají náklady značné, jelikož musí každá forma projít vývojem a zdlouhavou výrobou. Není tedy možné vyrobit pro účely prototypu nákladnou a složitou formu, protože by okamžitě odpadla flexibilita a možnost jakýchkoliv úprav modelu ve fázi vývoje samotného dílu.

Díky příchodu aditivní výroby mohla tak konečně vzniknout nová a rychlejší forma vývoje součástí nejen v automobilovém, leteckém ale i kosmickém průmyslu. S ohledem na všechny zmíněné metody 3D tisku v předchozích kapitolách je patrné, že jejich neustálý vývoj vede k rozšíření téměř všech druhů těchto metod nejen mezi firmami, ale také mezi jednotlivci.

Ze všech uvedených metod aditivní výroby je však v současné době největší poptávka po metodách FFF a SLA, když přijde na plastové výrobky. Tyto metody jsou na trhu dobře dostupné stejně tak jako i jejich příslušné materiály. Tiskáren FFF se v prototypování komponentů autosedaček ve firmě Lear používá nejvíce, jelikož z pohledu základního ověření konceptu rychlosti výroby a pevnosti většinou vyhovují kvalitou i cenou. Následující porovnání kladných a záporných vlastností jednotlivých metod 3D tisku bude tedy brát v potaz pouze na technologie s potenciálem pro vývojové centrum společnosti Lear Corporation v Plzni.

Metoda SLA může sloužit k prototypování pohledových i funkčních dílů, kde více záleží na přesnosti i kvalitě povrchu. Stejně jako u všech metod 3D tisku je ale nutné tisknout v dobře odvětrávané místnosti kvůli toxicitě pryskyřice. FFF se také hodí pro obě aplikace, nicméně není tak přesná jako SLA. Při standartním průměru trysky tiskárny na principu FFF, který činí obvykle 0,4mm se tloušťka nanášené vrstvy pohybuje mezi 0,05 a 0,3mm. Nakonec lze tedy vlastnosti FFF tiskáren shrnout takto:

Výhody:

- Velké množství tisknutelných polymerů ve formě termoplastů
- Jednoduchost tiskárny a jejích dílů
- Dostupnost na trhu a nižší cena
- Snadná úprava parametrů tisku a designu

Nevýhody

- Horší rozlišení tisku způsobující hrubou strukturu výrobku (viditelné vrstvy)
- Nutnost odstraňování podpůrného materiálu (např pomocí 50 % roztoku NaOH)
- Mech. vlastnosti vytisknutého materiálu nejsou stejné ve všech směrech (Anizotropie)
- Nutné rovnoměrné chlazení k zamezení deformace (tzv. „warping“)

Podobně jako FFF, i SLA vyžaduje u všech výrobků přídatnou podporu. Oproti např. technologii fúze práškového lůžka, kde výrobek stabilizuje okolní materiál neposkytuje u SLA tekutý resin v kádi žádnou oporu. Vlastnosti technologie SLA tedy jsou následující:

Výhody

- Výborná kvalita tisku a výsledný povrch výrobku
- Rychlejší proces výroby
- Velká přesnost závisající pouze na vlastnostech tekutého resinu (pryskyřice)
- Možnost tisku i průhledných výrobků

Nevýhody

- Vyšší pořizovací náklady tiskárny i materiálu
- Omezený tiskový prostor
- Menší výběr materiálů než u FDM tiskáren
- Obtížná likvidace fotopolymerového resinu, který se řadí mezi nebezpečný odpad

Poslední zvažovanou metodou ze všech druhů technologií 3D tisku je výroba dílů pomocí tiskárny HP Multi Jet Fusion 4200. Tiskárna pracující na principu MJF má i svůj vlastní software pro přípravu tisku kde se zvolí nejvýhodnější rozmístění dílů ve stavební jednotce.

V tomto případě se jedná o kombinaci technologií tryskání pojiva a fúze práškového lůžka. Klady a zápory této technologie jsou:

Výhody

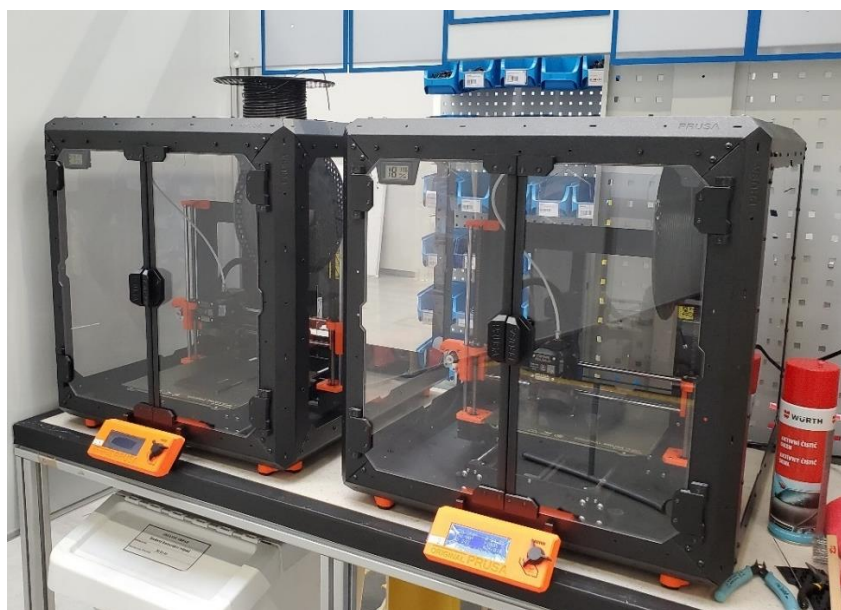
- Rychlá výroba díky výměnné stavební jednotce
- Vysoká udávaná přesnost a tenké vrstvy (0,08 mm)
- Dobrá ekologičnost s minimálním odpadem
- Snížené náklady na kus při prototypování i větších sériích

Nevýhody

- Velmi vysoká pořizovací cena
- Použité materiály pouze přímo od výrobce HP
- Vysoká komplexnost celého systému
- Drahý servis

Po posouzení všech technologií z předchozích kapitol a požadavků společnosti Lear Corporation bylo rozhodnuto vyrábět zvolené díly prostřednictvím tiskáren s technologií FFF, SLA a MJF.

Zmíněné technologie jako je SLM a DMLS k prototypování a 3D tisku kovových dílů společnost v minulosti také zvažovala hlavně díky dobrým mechanickým vlastnostem výtisků. Nicméně kvůli příliš velkým pořizovacím nákladům se tiskárny s touto technologií jako je např. EOS M290 nebo Prox 320 nevyplatí pouze za účelem prototypování ale spíše hromadné výroby. Jejich cena se aktuálně na trhu běžně pohybuje v řádech stovek tisíc korun. Pouze pro účel vývoje se tedy SLM a DMLS z ekonomického hlediska nevyplatí. I navzdory tomu se ve společnosti Lear Corporation 3D tisku z kovu stále k prototypování využívá. Výroba je však zajištěna u externího dodavatele Materialise sídlícího v Belgii. Pro všechny ostatní potřeby zakoupilo vývojové centrum v Plzni několik FFF tiskáren výrobce Prusa Research typu i3 MK3, které se v budoucnu mohou rozšířit o další stroje (viz Obrázek 14).



Obrázek 14: Tiskárny Prusa i3 MK3 v technologickém centru Lear v Plzni

7 Praktická část

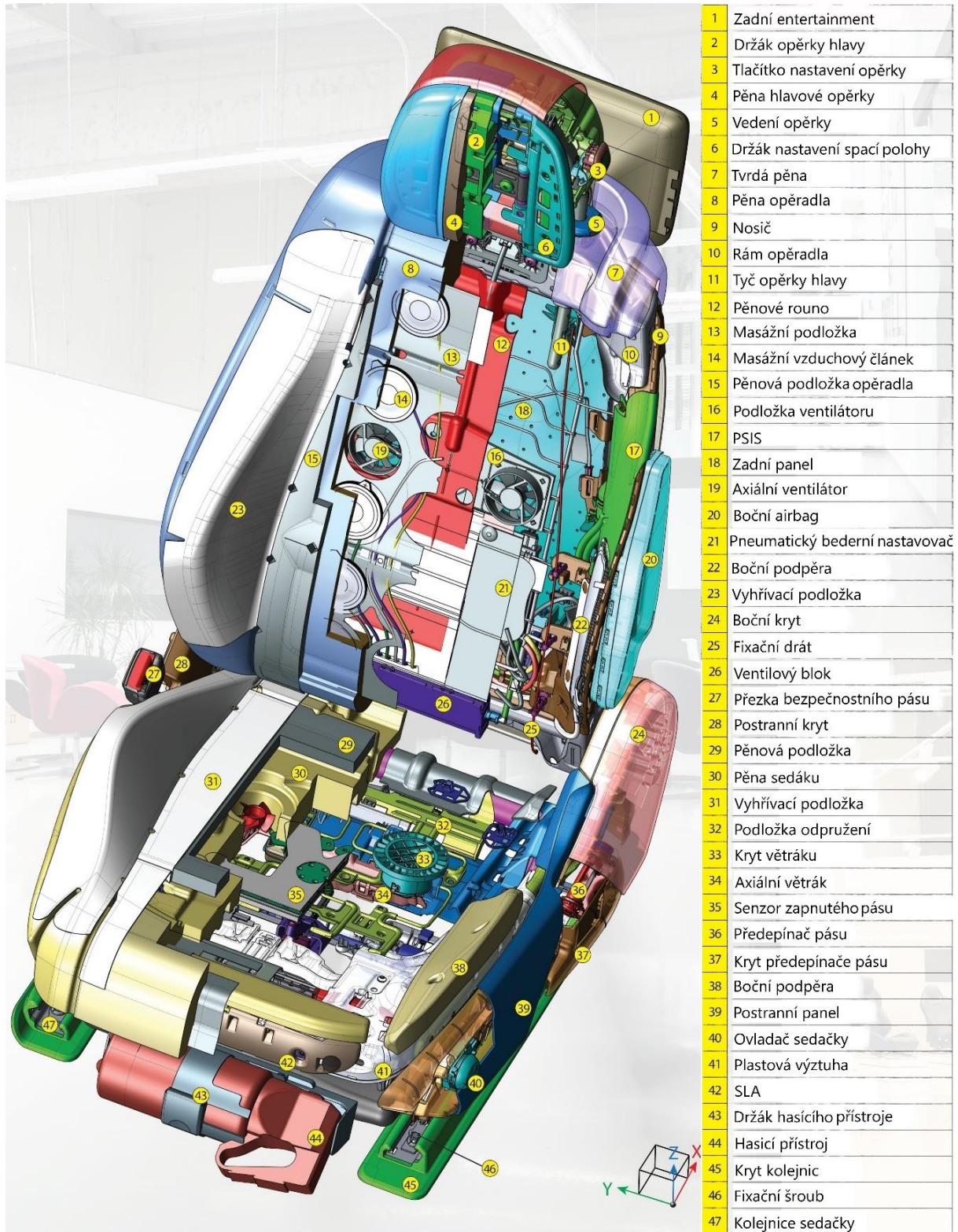
Jedním z hlavních zákazníků firmy Lear je dlouhodobě automobilka Mercedes-Benz spadající pod společnost Daimler-Benz AG (od roku 2022 již Mercedes-Benz Group AG) jejíž produkty společnost Lear nejen testuje, ale často i designuje. Právě součásti aktuálně vyvíjené autosedačky pro tuto společnost byly vybrány jako téma praktické části této diplomové práce. Lze tedy využít přítomných 3D tiskáren značky Prusa Research s technologií FDM v kombinaci s tiskárnami dostupnými na Západočeské univerzitě což umožňuje získat lepší přehled o větším počtu možných způsobů prototypování za pomoci 3D tisku. V budoucnu by tak společnost Lear mohla potenciálně zvolit k účelům prototypování novou technologii i materiály zlepšující efektivitu celého procesu.

Skutečnost, že jde o projekt zatím nedostupný veřejnosti má nevýhodu v přísném dodržování obchodního tajemství společnosti Mercedes-Benz což znemožňuje vyobrazení většiny dílů a sestav zkoušených komponent. Na druhou stranu kvůli probíhajícímu výzkumu a testování této nové autosedačky přímo na pobočce v Plzni lze přispět do projektu teprve vyvíjeného produktu.

V minulosti byly autosedačky poměrně jednoduchým prvkem automobilu postrádajícího jakýkoliv bezpečnostní význam. V průběhu času se stávaly stále významnějšími jak z hlediska pohodlí cestujících, tak i jejich bezpečnosti. Za tímto účelem se nedílnou součástí autosedaček stala např. nastavitelná hlavová opěrka nebo celkově polohovatelná konstrukce sedačky. Díky možnosti uživatele přizpůsobit si polohu sedu se zvýšila i aktivní bezpečnost. Je to hlavně kvůli lepší viditelnosti z vozidla a zajištění optimálního dosahu na všechny ovládací prvky vozu.

Dalším aspektem je samozřejmě komfort cestujících. Tato složka se projevovala nejprve pouze ve změně pěnové výplně sedadla a čalounění. Následně se rozrostla i o již zmíněné polohovací prvky sedadla. V dnešní době se autosedačky dají přirovnat už spíše pohodlným křeslům přeplněných technikou. Základ sedaček stále dohromady tvoří kovový rám, čalounění a pěnová výplň. Celkově se mohou skládat až ze stovky dílů s nejrůznějšími funkcemi. Nechybí zde airbagy, elektrické ovládání, vyhřívání, odvětrávání a ve vyšších třídách vozů ani masážní funkce. Všechny přidané anebo nadstandardní prvky se samozřejmě promítají i ve výsledné váze. 3D tisk dokáže i v tomto ohledu přispět k lepším výsledkům prostřednictvím rapidního prototypování umožňujícího rychlejší nalezení optimálního tvaru dílu při zachování nízké hmotnosti. Jedním z dalších důležitých kritérií ohledně výroby autosedaček je v dnešní době nedílně také použití trvale udržitelných materiálů. I v tomto ohledu lze technologii 3D tisku využít ke tvorbě dílů z ekologických materiálů jako kyselina polylactonová (PLA) nebo termoplastický polyuretan (TPU) na biologické bázi. [19]

Na Obrázku 15 je jako příklad komplexnosti dnešních autosedaček zobrazena kompletní sestava sériově vyráběné autosedačky vozů Mercedes-Benz. Konkrétně jde o modely řad SUV automobilů GLC a GLS. Můžeme si povšimnout displeje zadního infotainmentu (1) nebo prvků odvětrávání sedaček (19) a (34).



Obrázek 15: Rozložení komponent v sedačce srovnatelné platformy MB (Zdroj: Lear Corporation)

7.1 Platforma MB

Zkoumané díly autosedačky dohromady jako celek patří do nové celoelektrické platformy Mercedes MB.EA, která je jednou ze tří svého druhu. Společnost Mercedes-Benz (MB) do bateriových elektrických vozidel (BEV) v letech 2022 až 2030 hodlá investovat výrazné množství financí. Je to kvůli tomu, aby zajistila zákazníkům možnost volby klasického nebo elektrifikovaného vozu v prakticky každém nabízeném segmentu. To platí od malých automobilů třídy A, přes střední třídu C až po velké SUV spadající do třídy E. [20]

Momentálně automobilka Mercedes-Benz používá u většiny modelů platformu MRA (Modular Rear-wheel-drive Architecture) představenou v roce 2013 a platformu MFA (Modular Front Architecture) které tvoří například automobily třídy C, S, GLA, GLB i GLC. Platformy se vyznačují vysokým využitím hliníkových komponent a snížené váze oproti předchozím modelům. Jejich výhodou je také možnost použití tradičních spalovacích motorů (ICE – Internal combustion engine), hybridních plug-in pohonů i novějších celoelektrických verzí. [20]

V roce 2021 byla uvedena na trh celoelektrická platforma pro velké vozy a SUV zvaná EVA (Electric Vehicle Architecture). K této platformě se má v roce 2024 přidat ještě architektura MMA (Mercedes-Benz Modular Architecture) určená hlavně pro střední a kompaktní modely. Je to nicméně zřejmě poslední platforma, která umožní kompatibilitu se spalovacími motory a dále automobilka Mercedes plánuje věnovat pozornost v první řadě na plně elektrické modely. Tři nově připravované celoelektrické architektury jsou:

1. **MB.EA** – osobní automobily
2. **AMG.EA** – sportovní vozy
3. **VAN.EA** – dodávky a lehké užitkové vozy

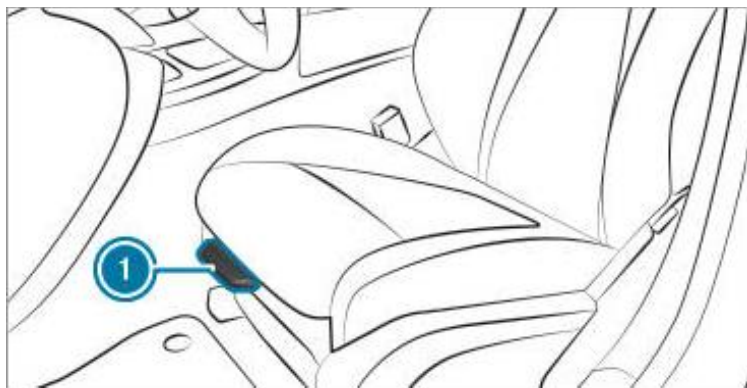
Společnost Mercedes-Benz Group AG dala v posledních letech najevo vizi svojí budoucnosti v podobě elektrifikovaných vozů nabitých technologiemi. Z hlediska významu práce jde tedy o potenciální přínos do probíhajícího vývoje jedné z předních světových automobilek.

Pro ověření využití 3D tisku v sériové výrobě autosedaček byly vybrány dva plastové díly sedačky z nové platformy MB EAM. Tato platforma se v budoucnosti objeví v řadě vozidel a velké množství jejích komponent včetně autosedaček je vyvíjeno kompletně od začátku. Některé díly pochází z předchozích platforem kvůli svojí ověřené spolehlivosti a kompatibilitě. Původní části jdou ale zároveň ruku v ruce s novými výrobky. [20]

Jeden z dílů spadajících do kategorie nových a pozměněných částí je tzv. „CLA (cushion length adjuster) handle“ jinak řečeno „*rukojeť pro nastavení délky sedáku*“. Další vybraný díl je pak označen jako „PLP plastic cover“ a jedná se o kryt a ochranu komory pyrotechnické nálože po boku autosedačky, která má za funkci plně napnout pás v případě nárazu ve vyšší rychlosti. Označován bude jako „*kryt předepínače bezpečnostních pásů*“. Obě popsané součásti byly zkoumány z hlediska pevnosti a vhodnosti pro prototypování 3D tiskem.

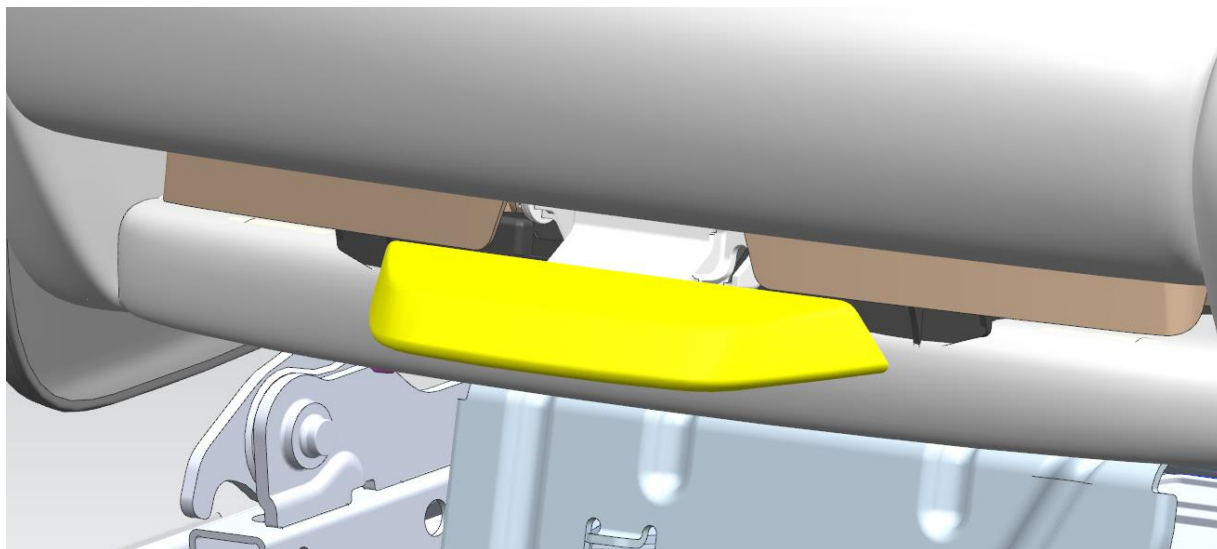
7.2 S(C)LA handle (Rukojeť pro nastavování délky sedáku)

Jako první probíraný díl autosedačky byl vybrán „Cushion (Seat) length adjuster“ neboli rukojeť pro nastavování délky sedáku předního sedadla. Její konkrétní umístění se liší v každém typu autosedačky a obecně lze tuto rukojeť najít pod předním sedadlem v jeho dolní části. Zjednodušeně můžeme přibližné umístění (1) vidět na Obrázku 16.



Obrázek 16: Umístění S(C)LA handle (1) [24]

Tento díl byl vybrán hlavně kvůli svým malým rozměrům, které umožňují jeho tisk na široké škále 3D tiskáren i s rozdílnými technologiemi. Dalším důvodem byla také estetická stránka. Ta se řeší sice u většiny dílů zmíněné autosedačky, ale ne u každého z nich byly známy jeho konečné rozměry. Jde stále pouze o prototyp ve fázi vývoje. Funkce rukojeti S(C)LA handle (Obrázek 17) spočívá v jednoduchém vyklopení směrem nahoru. Tím se uvolní mechanismus sedáku a uživatel tak ručně reguluje jeho délku. Po uvolnění rukojeti se mechanismus opět zablokuje na aktuální pozici.



Obrázek 17: Rukojeť S(C)LA handle (žlutě)

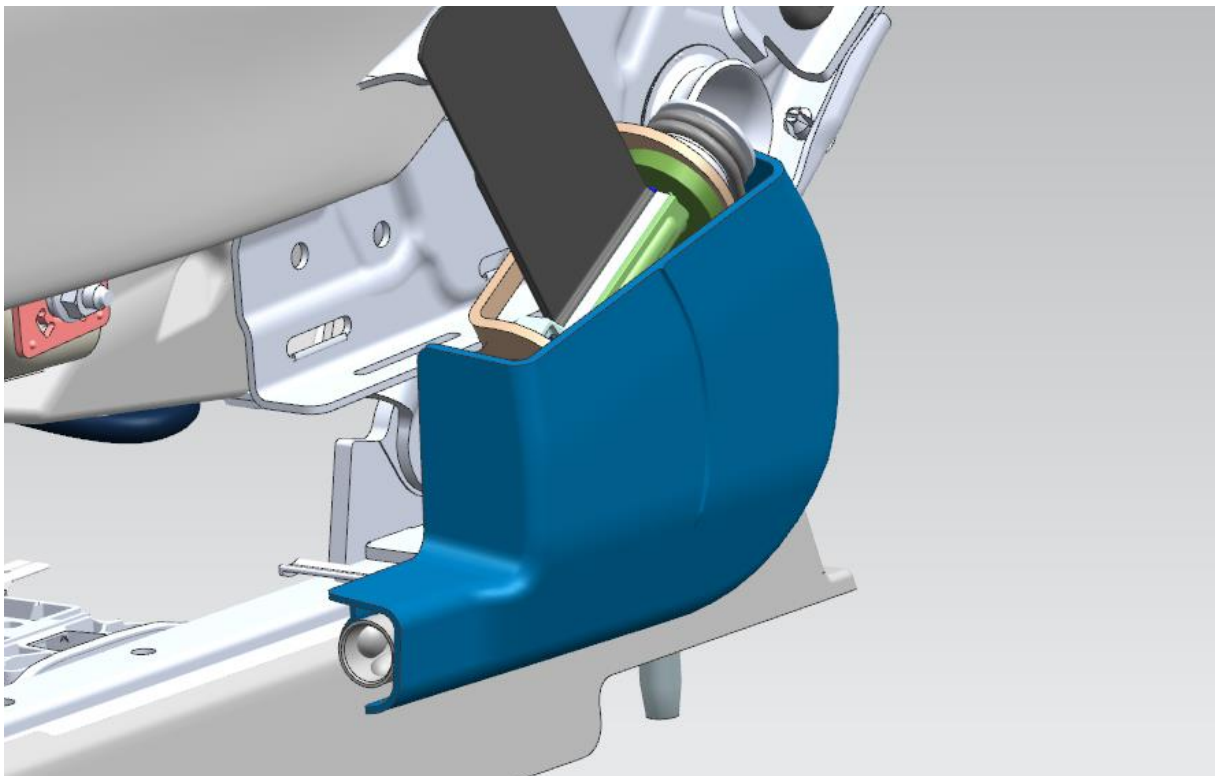
U jiných výrobců i u odlišných typů vozů značky Mercedes-Benz se můžeme někdy setkat i s multifunkčním ovladačem. Ovladač bývá umístěn po boku sedačky a lze jím ovládat všechny mechanismy, jimiž je sedačka vybavena. Z důvodu zákazníka vyžadujícího vyšší komfort nebo i přístup k nastavení více parametrů z jednoho digitálního informačního panelu

je často však nutné přistoupit k více revolučním řešením. Existují tedy i verze zmíněné autosedačky postavené s velkým podílem původních komponent včetně S(C)LA handle nahrazených sensory a elektromotory. Ty je potom možné ovládat přímo z palubního systému. Probíraná sedačka elektronicky ovládaným nastavením ovšem nedisponuje.

7.3 PLP plastic cover (kryt předepínače pásu)

Druhý zvolený díl pro potřeby experimentu představuje plastový kryt předepínače bezpečnostních pásů („PLP plastic cover“). Kryt nebyl zvolen primárně z hlediska ověření pohledové stránky, ale hlavně kvůli kontrole funkčnosti většího výtisku 3D tiskárny. Je zde brán ohled na již existující komponenty, do kterých má kryt spolehlivě zapadat a pevně držet na svém místě. Nicméně se i zde na vzhled a estetiku musí být brát patřičný ohled.

V tomto konkrétním případě je přední autosedačka opatřena tříbodovými pásy jako nedílnou součástí pasivních ochrany cestujících. Tuto funkci tvoří mnoho částí dnešních vozidel, např. jsou deformační zóny, airbagy, systém E-call atd. Je však všeobecně známé že jakékoliv bezpečnostní prvky vozidla postrádají z velké části smysl, pokud není posádka zafixována k autosedačkám. Kvůli tomu jsou v sedačce umístěny senzory napojené na palubní systém vozu, který řidiče k upoutání pásy upozorní. Součástí zádržného systému vozu jsou také předepínač bezpečnostních pásů. Kryt předepínače pásů testovaný v této práci je tmavě modrou barvou zvýrazněn na Obrázku 18.



Obrázek 18: Kryt Plp plastic cover (modře)

Kromě přesnosti prvků z vnitřní strany jako jsou úchyty a opěrné plochy o další komponenty musí splňovat tento kryt i požadavky na vnější stranu. S tím nejvýznamnějším souvisí i žebro na povrchu krytu které společně se zaoblenými hranami dílu umožňuje plynulý

pohyb ostatních plastových komponent při zvedání a snižování sedadla. Nejsou povoleny žádné viditelné stopy toku materiálu, vstřikování nebo selhání při oddělování formy na viditelném povrchu. Všechny poloměry a zakřivené plochy by měly také plynule splývat. Na výkresech to vyplývá z mezinárodní normy DIN ISO 20457 a z interní normy MBN 31030.

Díly používané ve finální výrobě autosedaček musí splňovat nejen mezinárodní technické normy ale i interní normy společnosti Mercedes-Benz jimiž se firma Lear Corporation musí řídit. To bylo nutné zohlednit při výběru materiálů určených pro finální tisk. Celou konstrukci automobilu včetně požadavků, které se jí týkají, definuje řada standardů vydávaných přímo zákazníkem MB, které stanovují vlastnosti materiálů, výrobků i postupů s nimi spojenými.

7.4 Materiál

Materiál komponent a požadavky na něj určují interní normy s označením „DBL“ publikované organizací MB. Rukojeť S(C)LA handle sloužící pro nastavování délky sedáku má být ve své finální podobě vyrobena z termoplastu označeným jako POM-GF30 a specifikovaným interní normou DBL 5420.51 (viz Tabulka 3). Kryt předepínače pásů PLP plastic cover je oproti tomu vyroben z materiálu PC+ABS R30 jehož vlastnosti jsou udávány interní normou DBL 5404.85 (viz Tabulka 2).

PLP plastic cover je v sériové výrobě tvořen směsí ABS a polykarbonátu která je více náročná pro tisk než jen běžný ABS. Tento materiál má poměrně vysokou tendenci k deformaci při chladnutí a je doporučeno jej tisknout v uzavřeném prostoru a vždy s rovnoměrně vyhřívanou podložkou. Jedním z obchodních označení pro tento konkrétní materiál je *Bayblend FR3021 R30*. Polymer PC+ABS je vhodný pro aplikace v automobilovém průmyslu (např. přístrojové panely, odkládací schránky atd.) i v elektronice (rámy LCD obrazovek, klávesnice, adaptéry atd.).

Tabulka 2: Parametry materiálu Bayblend FR3021 R30 udávané výrobcem [21]

Označení	PC+ABS R30
Hustota	1310 kg/m ³
Teplota tání	230-270 °C
Modul pružnosti v tahu	4700 MPa
Mez kluzu	63 Mpa
Mez pevnosti	40 Mpa
Relativní prodloužení	8,6 %
Poissonova konstanta	0,34 – 0,38

S(C)LA handle je na rozdíl od krytu pásu vyrobena z polyoxymethylenu (POM) což je jeden ze základních technických plastů. Je vhodný pro tuto aplikaci zejména díky své odolnosti proti otěru a teplotní stabilitě. Tento konkrétní typ je vyztužen skelnými vlákny ze 30 % čímž je docílena vyšší pevnost kompozitu i lepší tepelná odolnost.

Tabulka 3: Parametry materiálu POM-GF30 udávané výrobcem [22]

Označení	POM-GF30
Hustota	1600 kg/m ³
Teplota tání	165 °C
Modul pružnosti v tahu	9200 Mpa
Mez kluzu	71 Mpa
Mez pevnosti	125 Mpa
Relativní prodloužení (tažnost)	3 %
Poissonova konstanta	0,32

Dále je nutné dodat že i když se jedná o dlouhodobě používané materiály v automotive, ne vždy mají stejné vlastnosti. Jak u materiálů používaných při vstřikování plastu, tak i u filamentů určených ke 3D tisku udává každý výrobce odlišné hodnoty vlastností. Přesné složení filamentů není vždy řádně kontrolováno, proto je vhodné odebírat materiál pouze od ověřených výrobců.

7.5 Ověření metodou konečných prvků

Zkoumané prvky autosedačky byly nejprve podrobeny ověření metodou konečných prvků. Tato numerická metoda známá jako Finite Element Method (FEM) neboli Metoda Konečných Prvků (MKP) se používá pro řešení nejrůznějších úloh v oblastech mechaniky, pružnosti, proudění kapalin i plynů. Z jejích výsledků lze simulovat průběhy napětí a deformací v materiálech na základě počítačového modelu. Výpočet probíhal v programu Siemens NX jako úloha lineární statiky (SOL 101). Následující postup byl u všech případů shodný:

- Import 3D geometrie
- Definice sítě (vyplnění objemu množstvím elementů)
- Definice okrajových podmínek a zatížení

Samotné testy těchto komponent pak probíhají standardně v mnoha formách, které se mění dle požadavků automobilky. Jedna z forem může vypadat jako ověření v případě autonehody. V tom případě je nutné, aby všechny díly autosedačky zůstaly upevněné na svém místě. I sebemenší fragment nebo uvolněná součást může způsobit poranění posádky vozidla. V úvahu se musí brát velké množství faktorů jako je rozložení sil v celém vozidle, deformace kostry a efektivita bezpečnostních systémů.

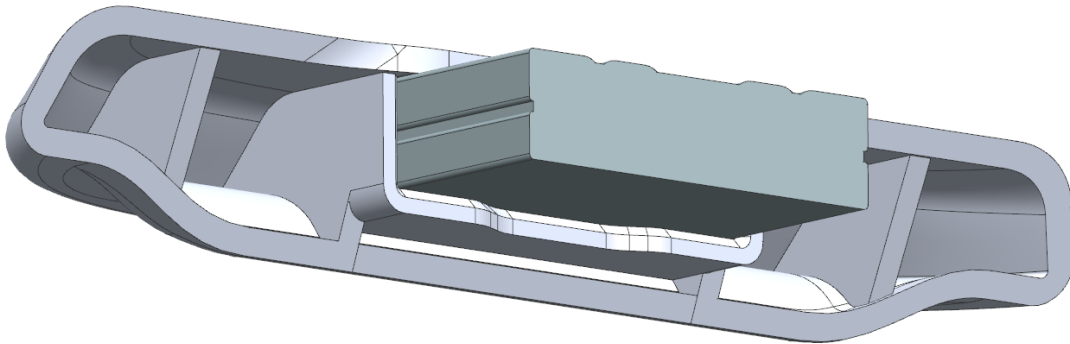
Často může také zákazník vyžádat specifický test k ověření určitého parametru který může být problémový. Konkrétně se obvykle jedná o ověření dílů z hlediska neopatrného zacházení (tzv. „misuse“). Pro účely této práce jde opět pouze o obecný případ, neboť dle interních norem zákazníka jsou stanovovány přesná místa a hodnoty sil pro každé součásti jinak. Záleží také na tom, zda se jedná o pohledový, funkční nebo skrytý díl.

Tato forma testů často probíhá přímo ve vývojovém centru Lear v Plzni, kde jsou pro tyto účely sestavovány speciální testovací stroje. Netestují se pouze části sedaček jako jsou sedadla či loketní a hlavové opěrky. V řadě případů jde i o testy na první pohled nepatrných plastových částí. Působící síla v těchto případech bývá automobilkou Mercedes-Benz stanovena o velikosti od 80 do 400 N v závislosti na rozměrech daného dílu. Zadní plastové kryty autosedaček se

obvykle testují na vytrhnutí silou 150 N v několika různých bodech. Každý vyžádaný test se souhrnně označuje pojmem „TR“ (Test Request) ve kterém je specifikována řada parametrů. Jeho výsledkem by mělo být ověření, že daný díl při zadané maximální síle nepraskne nebo se neoddělí od zbytku sedačky. Pro účely této práce bude v případě rukojeti uvažována působící síla 150 N a pro kryt předepínače pásů bude pak 80 N.

7.5.1 S(C)LA handle

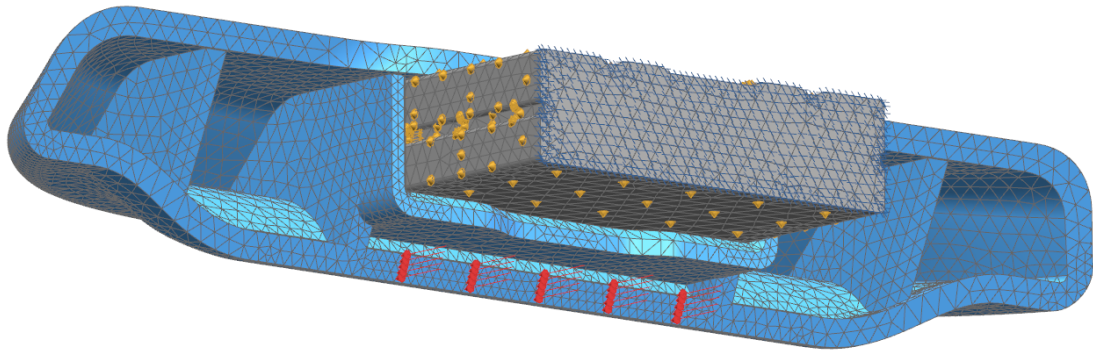
Pro úlohu s dílem S(C)LA handle byl vytvořen zjednodušený protikus (Obrázek 19) znázorňující upevnění rukojeti. Mezi tímto protikusem a rukojetí byly definovány kontaktní plochy a následně i zatížení.



Obrázek 19: Sestava rukojeti S(C)LA handle (bíle) a protikusu (šedě)

Protikus byl v prostoru upevněn na jeho konci pevnou vazbou. Nejdříve byla v programu Siemens NX definována síť s příslušným materiálem dílu a se všemi jeho vlastnostmi uvedenými v tabulkách 4 a 5. Jde o síť ze čtyřstěnů (tetraedrů) z nichž má každý velikost 2 mm. Síť je označena jako „CTETRA (10)“. Materiál byl uvažován vždy jako izotropní a homogenní v celém objemu.

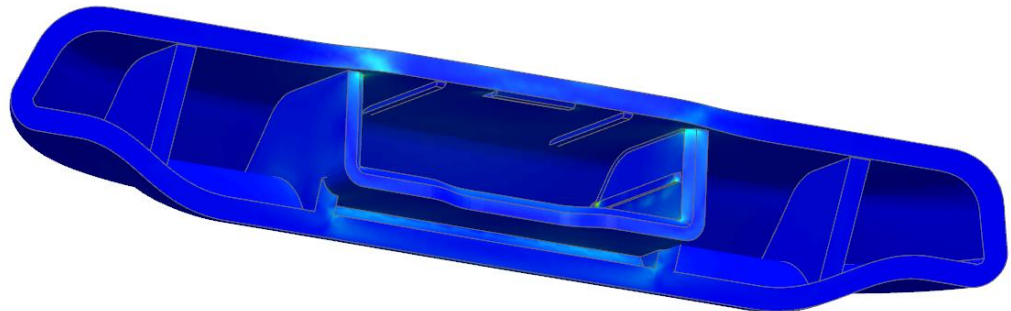
Následně byly nastaveny vazby a hodnota zrychlení působící na součást. Přesah rozměrů vnitřní kapsy v rukojeti vůči rozměrům protikusu nebyl brán v potaz kvůli jeho zákazníkem nedefinované hodnotě. Na Obrázku 20 je znázorněna použitá síť a okrajové podmínky úlohy v prvním případě řešení kdy posouvající síla působí na dolní část rukojeti. Následně si lze povšimnout (Obrázek 21) že při této úloze nebyla překročena maximální dovolená hodnota napětí na mezi kluzu R_e a díl tedy z pevnostního hlediska vydržel.



Obrázek 20: 1. případ – Ukázka sítě, zatížení a vazeb rukojeti

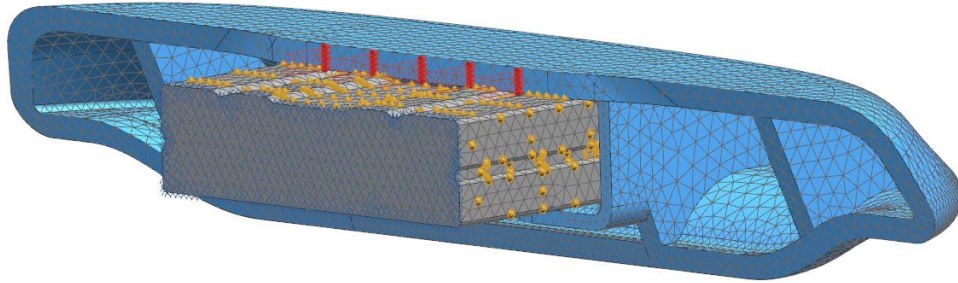
Materiál protikusů byl v případě úlohy s S(C)LA handle definován jako plast ABS, který nejvíce odpovídá realitě. Na Obrázku 20 ve vidět působící síla (červeně), kontaktní plochy typu plocha-plocha (žlutě) a vetknutí (modře).

Subcase - Static Loads 1, Statický krok 1
Napětí - Objekt-uzlový, Zprůměrovaný, Von-Mises
Min : 0.00, Max : 56.11, Jednotky = MPa
Deformace : Posunutí - Uzlový Hodnota



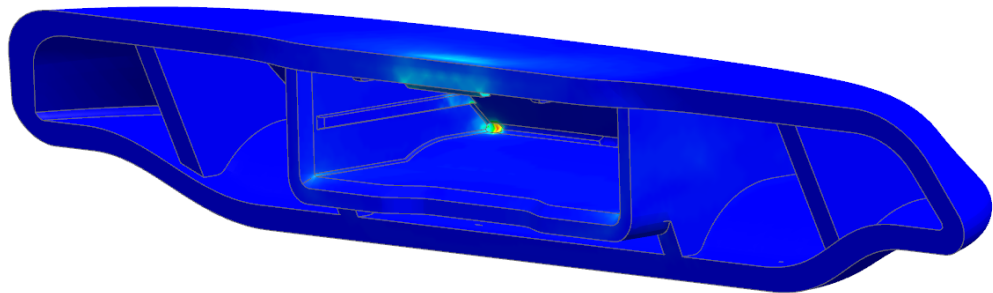
Obrázek 21: 1. případ – Výsledné napětí pouze v rukojeti

I při druhém případě zatěžování (viz Obrázek 22) nedošlo k překročení meze kluzu. V této úloze můžeme pozorovat výrazné zvýšení napětí v místě drážky (viz Obrázek 23).



Obrázek 22: 2. případ – Ukázka sítě, zatížení a vazeb rukojeti

Subcase - Static Loads 1, Statický krok 1
Napětí - Objekt-uzlový, Zprůměrovaný, Von-Mises
Min : 0.00, Max : 59.36, Jednotky = MPa
Deformace : Posunutí - Uzlový Hodnota

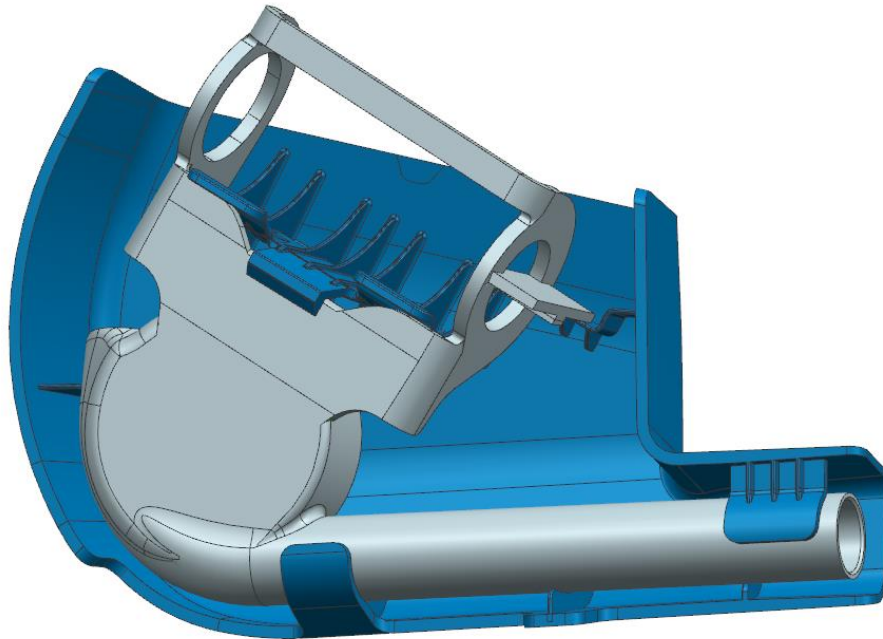


Obrázek 23: 2. případ – Výsledné napětí pouze v rukojeti

Výsledné napětí dle hypotézy HMM nabývalo největších hodnot v rozích a horní drážce pro zacvaknutí do protikusu což se dalo očekávat (viz Obrázek 23). I navzdory tomu byla jeho hodnota v rámci požadovaných mezí a díl tak z pevnostního hlediska opět vydržel.

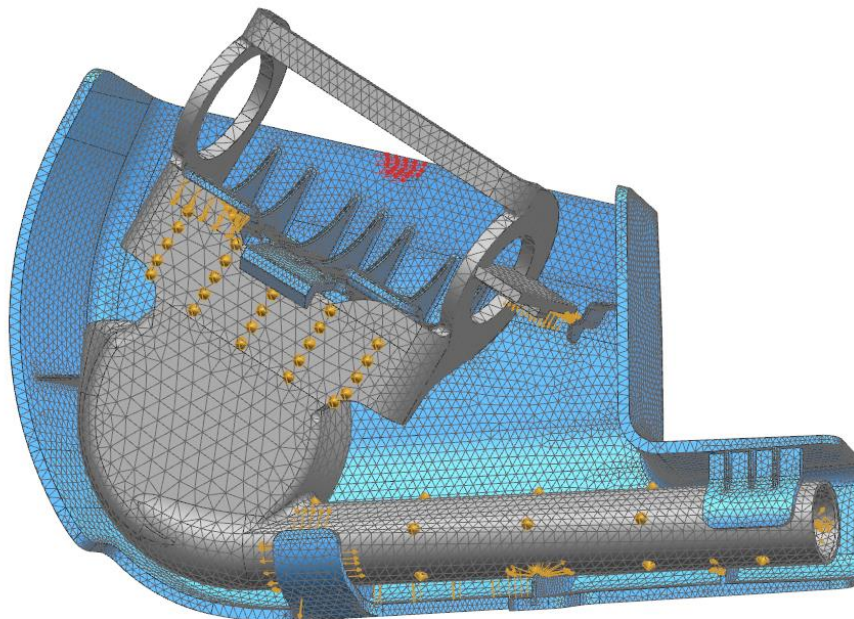
7.5.2 PLP plastic cover

Při řešení úlohy krytu PLP plastic cover bylo postupováno obdobně jako u předchozího případu s rukojetí. Nejdříve byl vytvořen zjednodušený protikus, na který je kryt namontován (viz Obrázek 24). Následně byly definovány materiály obou částí a okrajové podmínky.



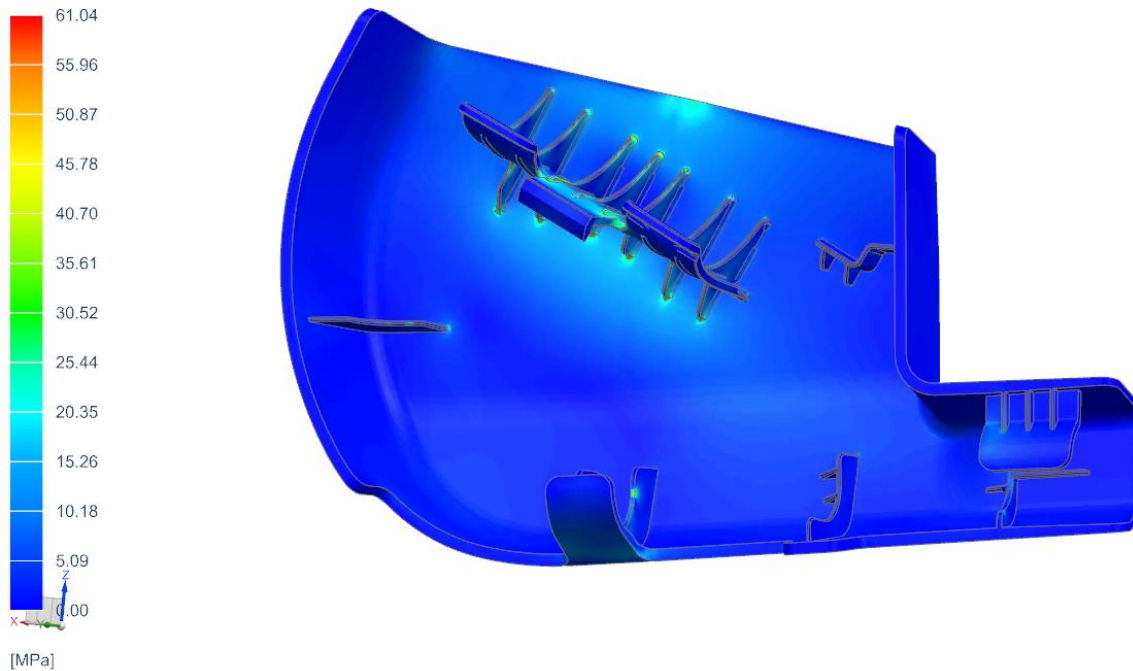
Obrázek 24: Sestava PLP plastic cover (modře) a protikusu (šedě)

Zatěžovací síla je opět zobrazena červeně a dotykové plochy žlutě. Protikus znázorněný šedou barvou je v tomto případě uvažován z oceli a pevnou vazbou uchycen v prostoru.



Obrázek 25: Ukázka sítě, zatížení a vazeb krytu

Výsledek Sestava krytu A1748605000_13_jt_stp_sim1 : Solution 10
Subcase - Static Loads 1, Statický krok 1
Napětí - Objekt-uzlový, Zprůměrovaný, Von-Mises
Min : 0.00, Max : 61.04, Jednotky = MPa
Deformace : Posunutí - Uzlový Hodnota



Obrázek 26: Výsledné napětí pouze v krytu

K výsledku lze konstatovat že ani zde nedošlo k překročení maximálních povolených hodnot. Koncentrátory napětí by v tomto případě šlo opět omezit několika způsoby (např. zvětšením hodnoty rádiusu v rozích a plynulejšími přechody mezi povrchy). Z důvodu zachování kompatibility s ostatními již vyrobenými díly sedačky zůstaly modely obou součástí použité při tisku beze změny. Případné odlišnosti od původních dílů by mohly narušit pozdější testování maximální únosné síly nebo i znemožnit upevnění kusu.

7.6 Zkušební tisk

Z důvodu častého pracovního vytížení všech 3D tiskáren ve společnosti Lear bylo potřeba volit náhradní výrobu flexibilně, a proto bude v této části zmíněno větší množství využitých 3D tiskáren. První výroba na FFF 3D tiskárně probíhala se záměrně nastavenými horšími parametry tiskárny. Ve volně dostupném programu PrusaSlicer verze 2.5.1 byly nastaveny hodnoty tloušťky vrstvy na maximum. Tuto hodnotu ovlivňuje hlavně průměr trysky (v tomto případě 0,4mm). Dále došlo k nastavení teploty tiskové podložky a tiskové hlavy podle parametrů použitého materiálu.

V obou případech byl použit méně kvalitní a levnější PLA filament bílé barvy značky Aurapol s průměrem 1,75mm. Tisk tímto způsobem byl zvolen pro nalezení neoptimálnější polohy dané součásti a kvůli své jednoduchosti i pro ověření tiskárny. I když je materiál ABS v porovnání s PLA více pevný, pružný a obecně odolnější, tak má několik nevýhod. Vyznačuje se výrazným zápachem v procesu tisku a potřebou vyšší teploty tisku.

Materiál PETG je zase obecně známý kvůli větší náchylnosti na tiskové chyby než PLA a je také mírně dražší. Díky nižší ceně než v případě PETG, lepší schopnosti přilnutí k podložce a menšímu smršťování, než u ABS se tedy PLA jevil jako lepší volba pro první tisk. Jeho parametry jsou uvedené v Tabulce 4.

Tabulka 4: Parametry filamentu PLA dané výrobcem

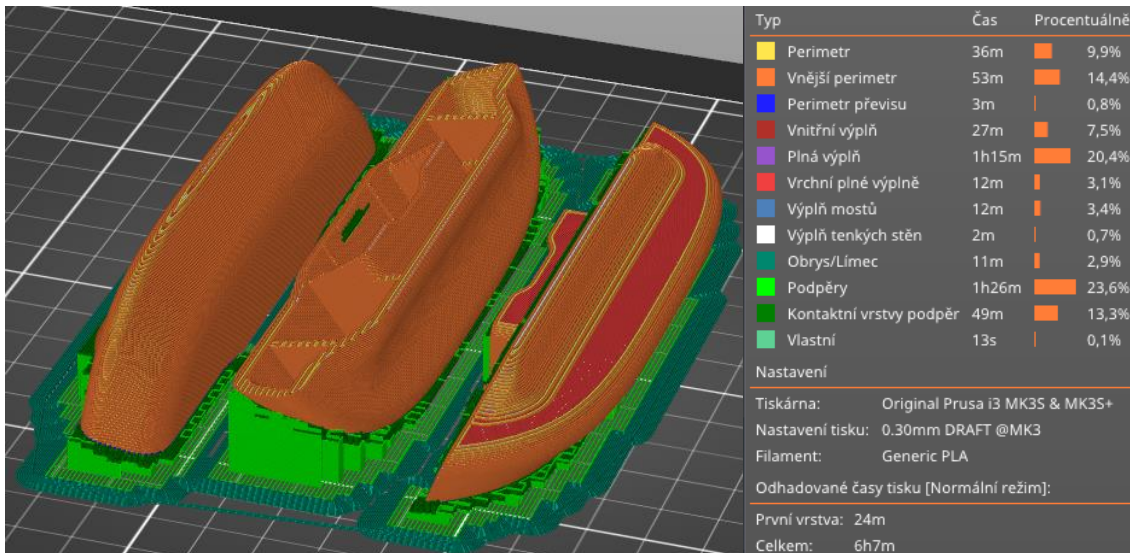
Výrobce	AURAPOL
Materiál	PLA
Průměr	1,75 ± 0,02 mm
Doporučená teplota tisku	210-230 °C
Doporučená teplota podložky	40-60 °C
Barva	Bílá

Rukojeť nastavování délky sedáku (SLA handle) byla tisknuta ve třech různých polohách, jelikož nebylo zprvu jasné, jaká je nevýhodnější orientace. V každé poloze byly nutné podpěry, které byly nastaveny na mřížkový vzor, stejně jako vzor výplně (infill) výtisku. Kryt PLP plastic cover byl kvůli časové náročnosti tisknut pouze v jedné orientaci, která se následně prokázala být zároveň i správná.

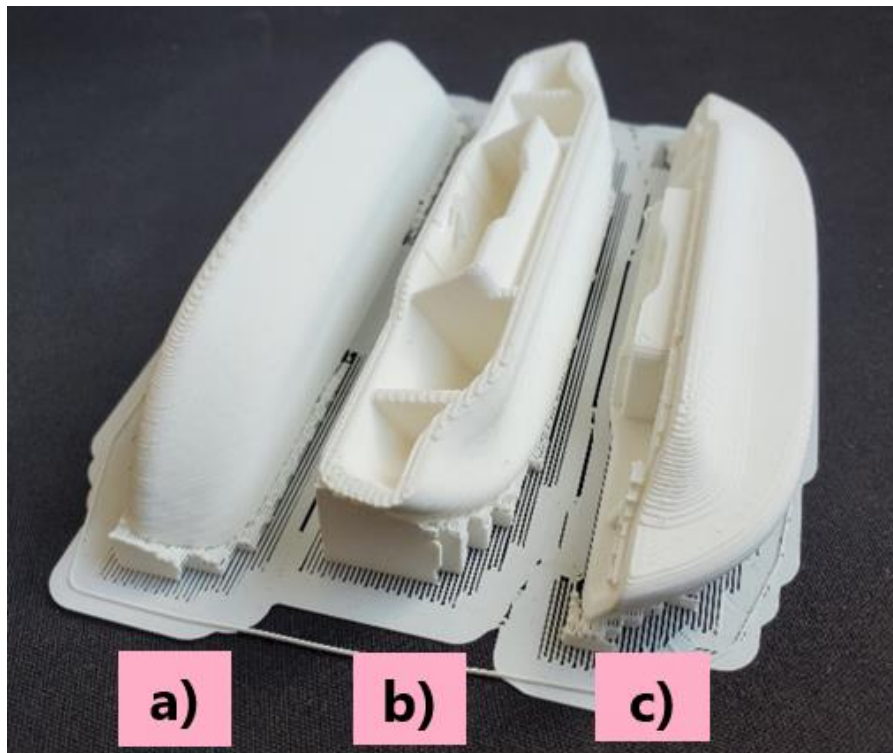
Tabulka 5: Parametry zkušebního tisku

Tiskárna	Prusa i3 MK3	
Technologie	FDM/FFF	
Průměr trysky	0,4 mm	
Tloušťka vrstvy	0,3 mm	
Teplota trysky	210-215 °C	
Teplota podložky	60 °C	
Výplň	20 %	
Rychlost	Perimetry	50 mm/s
	Výplň	85 mm/s
	Podpěry	45 mm/s
Podpěry	Přímočará mřížka	
Mezera pod podpěrami v ose Z	0,1 mm	

Na Obrázku 27 lze vidět všechny polohy rukojeti SLA handle ve sliceru. Jejich barevné zobrazení v několika barvách symbolizuje typ jednotlivých částí modelu jako jsou např. podpory nebo výplň. V legendě (viz Obrázek 27 - napravo) je pak vidět odhadnutý čas tisku díky čemuž lze dobře plánovat harmonogram práce. Hodnota výplně byla zvolena podle předchozích zkušeností pouze 20 % z důvodu omezení spotřeby materiálu a potenciálních chyb tisku. Tisk dílů s vysokým procentem výplně by trval zbytečně dlouho a mohlo by docházet k deformacím z důvodu smrštění.

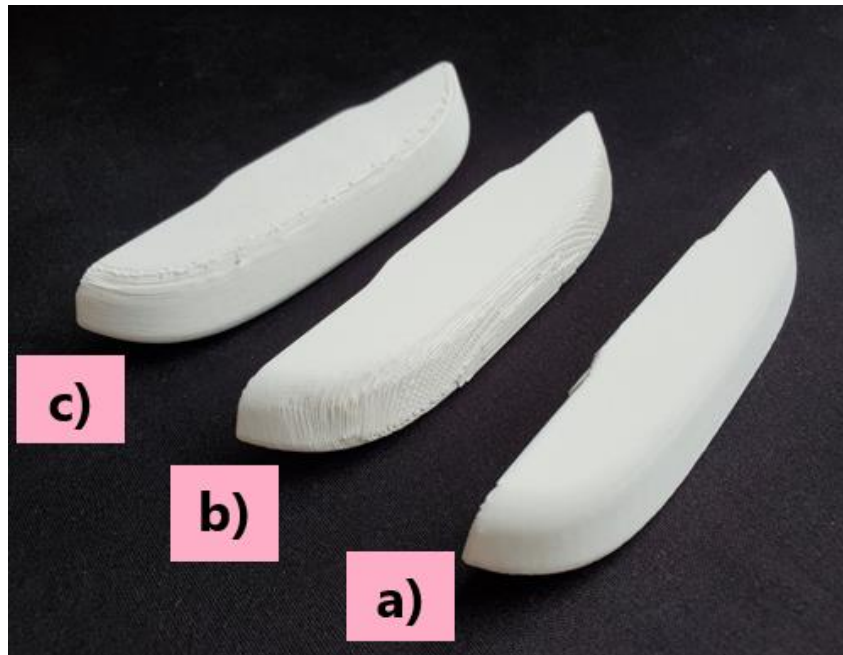


Obrázek 27: Umístění vzorků S(C)LA handle na tiskové ploše

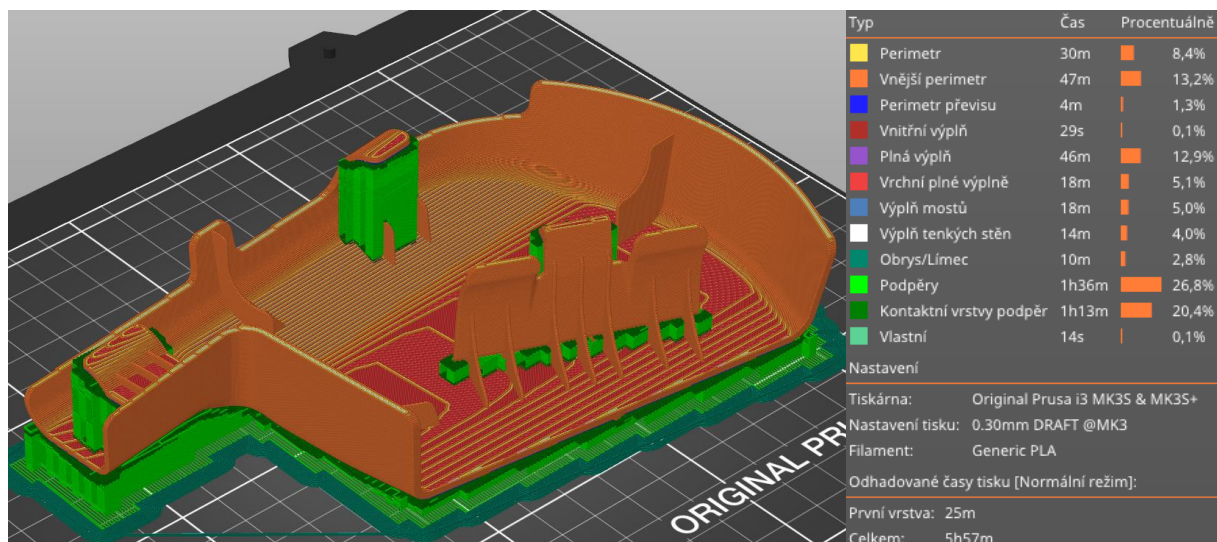


Obrázek 28: Zkušební výtisk S(C)LA handle

Výše zobrazený první výtisk rukojetí S(C)LA handle (viz Obrázek 28) vyžadoval podle očekávání rozsáhlé odstranění podpor. Nejsnadnější postprocessing byl u vzorku **a)** neboť k němu podpěry nepřilnuly na tak velké ploše jako v ostatních případech. Z toho důvodu je také povrch vzorku **a)** kvalitnější. Obecně to je výhoda použitého materiálu i technologie FFF, jelikož postprocessing zde často sestává pouze z ručního očištění s pomocí nože či štípacích kleští.

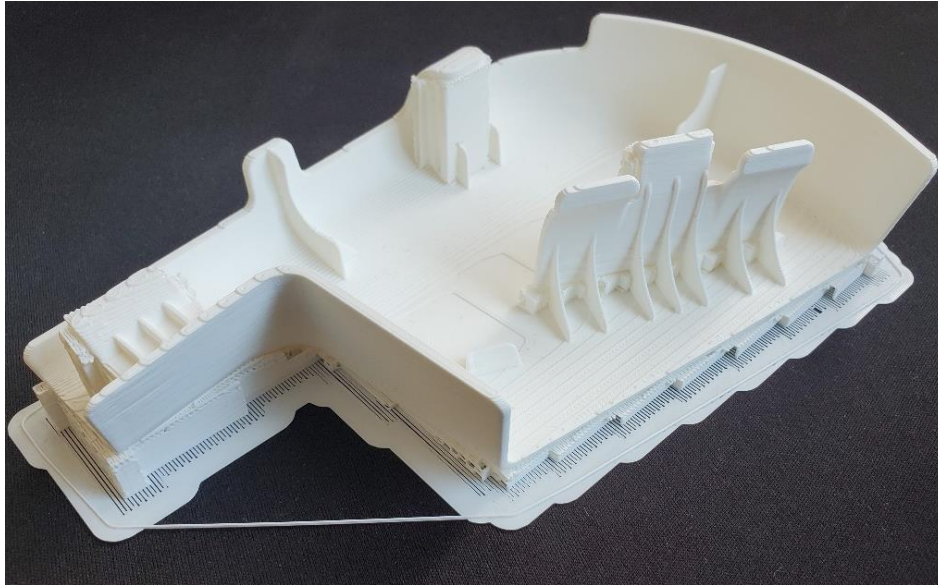


Obrázek 29: Zkušební výtisk S(C)LA handle bez podpor



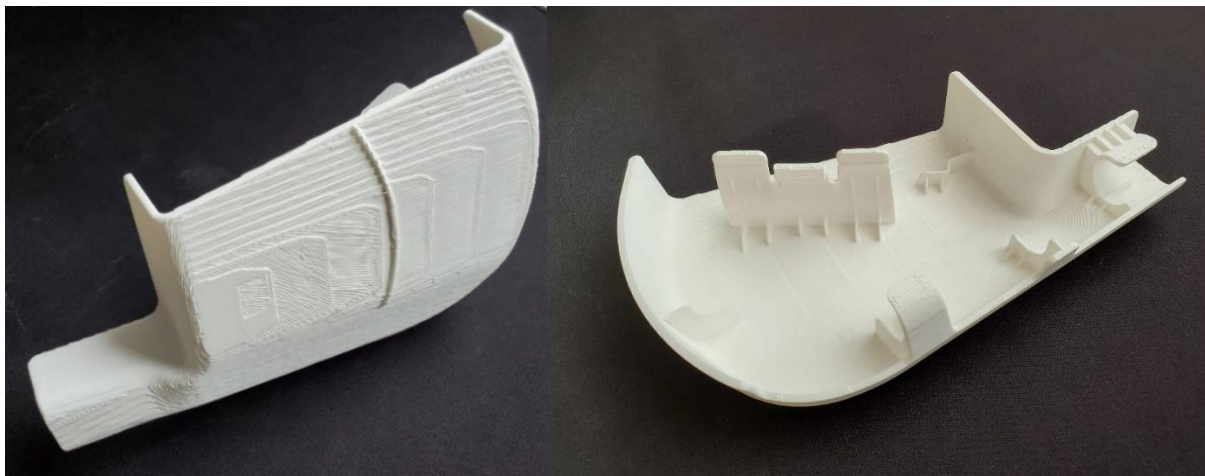
Obrázek 30: Umístění PLP plastic cover ve sliceru

Očištěné zkušební výtisky rukojetí jsou zobrazené na Obrázku 29. Jako další následoval tisk krytu PLP plastic cover (viz Obrázek 30) s podobným časovým intervalem.



Obrázek 31: Vytisknutý PLP plastic cover

Při prvním tisku krytu předepínače pásu byly důležité hlavně háčky a stykové plochy. Bylo potřeba se ujistit, že i tenké prvky se složitými tvary jdou vytisknout s dobrým přilnutím vrstev na sebe (viz Obrázek 32). Také se můžeme setkat s případy, kdy se příliš komplexní tvary a převisy dílu mohou během tisku ohnout a kolidovat s tryskou.



Obrázek 32: Očištěný kryt PLP

7.7 Výroba vzorků

7.7.1 Metoda FFF

Vzorky ve finální podobě určené k testování byly nejprve tisknuty metodou FFF na tiskárně Prusa i3 MK3. Jako materiál byl zvolen termoplastický polyester PETG (PET-G) opět od výrobce Aurapol a následně ABS od výrobce UltiMaker. PETG (polyethylentereftalát-glykol) je v podstatě velmi podobný dobře známému materiálu PET (Polyethylentereftalát) používaného pro výrobu lahví. Doplnující písmeno „G“ ve zkratce označuje navíc přidání glykolu, který snižuje teplotu tání PETG, snižuje křehkost a usnadňuje 3D tisk. Oproti PLA má ale tendenci k tzv. „stringování“ což znamená že tryska při přejezdu nad tisknutou součástí

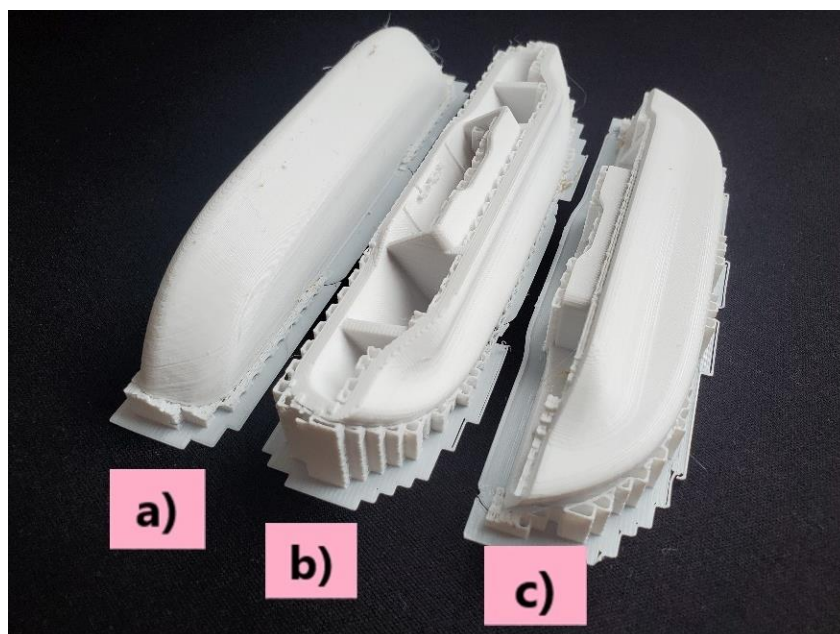
může zanechávat tenká vlákna roztaveného plastu. To je viditelné i na Obrázku 35 a 36 kde jsou zobrazeny výsledky tisku obou dílů z tohoto materiálu. Parametry materiálu a tisku jsou uvedené níže (viz Tabulka 6 a 7)

Tabulka 6: Parametry filamentu PETG dané výrobcem

Výrobce	AURAPOL
Materiál	PETG
Průměr	1,75 ± 0,02 mm
Doporučená teplota tisku	245-255 °C
Doporučená teplota podložky	85-95 °C
Barva	Bílá

Tabulka 7: Parametry zkušebního tisku

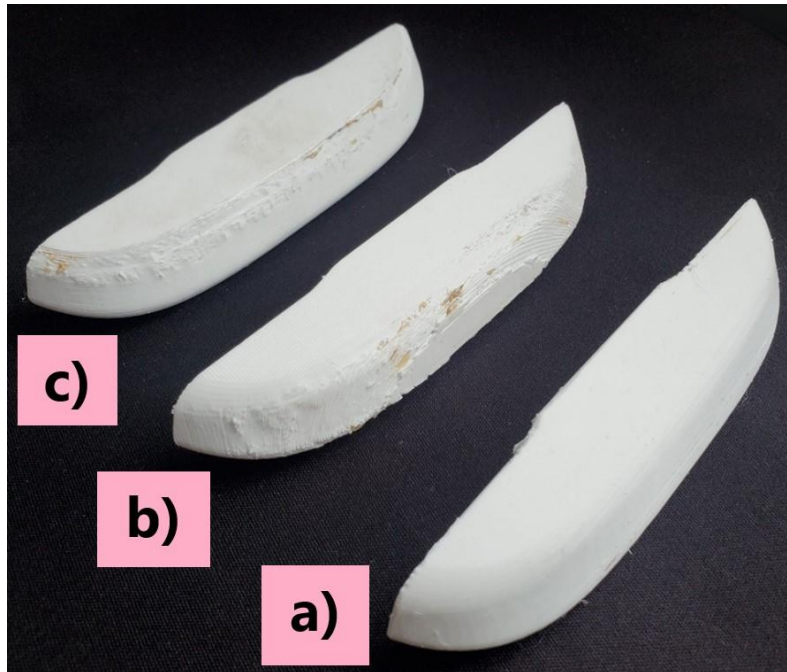
Tiskárna	Prusa i3 Mk3	
Technologie	FDM/FFF	
Průměr trysky	0,4 mm	
Tloušťka vrstvy	0,15mm	
Teplota trysky	250 °C	
Teplota podložky	80-90 °C	
Výplň	100 %	
Rychlost	Perimetry	45 mm/s
	Výplň	80 mm/s
	Podpěry	50 mm/s
Podpěry	Přímočará mřížka	
Mezera pod podpěrami v ose Z	0,1 mm	



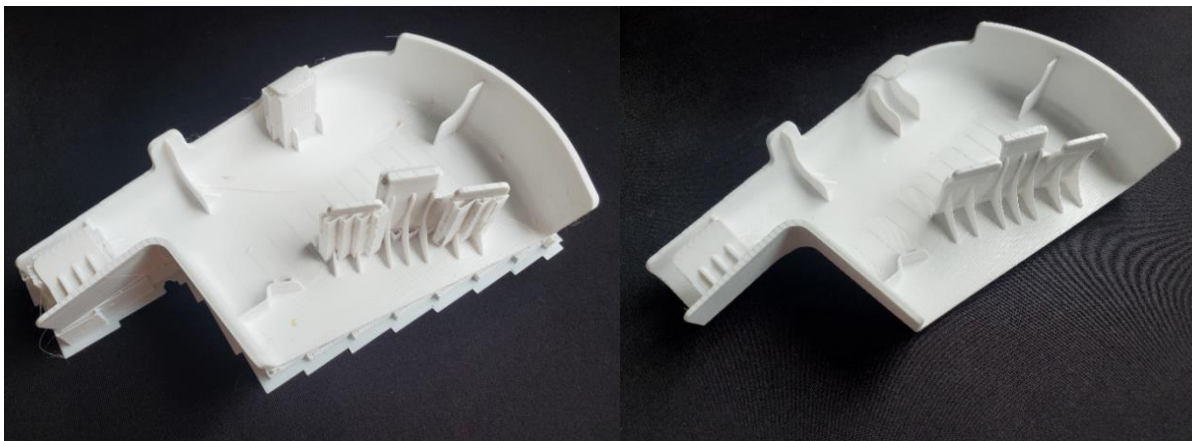
Obrázek 33: Vytisknuté vzorky S(C)LA handle z materiálu PETG

Kvůli menší tloušťce vrstvy za účelem dosažení lepší přesnosti povrchu trval tisk více než 2x déle než u zkušebních výtisků. Vliv na to měla také hustota výplně, která tentokrát byla 100 %. Pro vykompenzování ztráty času byly mírně zvýšeny rychlosti pohybů tiskárny.

Odstranění podpor bylo i v tomto případě nejnárodnější u vzorku **a**). Na některých místech je ale vidět změna barvy materiálu (viz Obrázek 36) způsobená pravděpodobně natavením materiálu na trysku v procesu výroby. Tyto části bylo možné většinou obrousit a nijak nebrání funkčnosti dílu jako celku.



Obrázek 34: Očištěné vzorky S(C)LA handle



Obrázek 35: Vytisknutý (nalevo) a očištěný (napravo) kryt PLP z materiálu PETG

Po tisku z materiálu PETG následoval znovu tisk pouze rukojeti S(C)LA handle za pomoci metody FFF. Tentokrát se jednalo o materiál ABS (Akrylonitrilbutadienstyren). Z důvodu omezeného času nebyl společně s S(C)LA handle tisknut i kryt PLP plastic cover neboť u rozměrnějších výtisků z tohoto materiálu také platí větší náchylnost k chybám tisku.

ABS je velmi pevný a všestranný materiál který vyniká tepelnou i mechanickou odolností. Je vhodný jak pro vnitřní, tak i pro venkovní aplikace. Z tohoto materiálu se běžně vytváří množství nejrůznějších dílů a je používán také pro výrobu celosvětově známých stavebnicových produktů LEGO. Proto je potřeba zdůraznit že se jedná o materiál zdravotně

nezávadný, pokud není vystaven teple jako například při 3D tisku. V takové situaci se z něj mohou uvolňovat toxické výpary charakteristické svým zápachem. Oproti PLA se ABS taví za vyšších teplot což má za následek právě zmíněnou dobrou tepelnou odolnost až do teploty cca 98-100 °C. Důvodem pro odolnost ABS proti nárazům a opotřebení je přítomnost malých částic syntetického kaučuku v tomto termoplastu které mohou mít velikost od 1 do 10 μm.

Jednou z dobře využitelných vlastností ABS i z hlediska prototypování v automobilovém průmyslu je jeho rozpustnost v acetonu. To lze s výhodou použít při vyhlazování povrchu výtisků v postprocessingu. Úprava výrobků probíhá nejčastěji za pomoci acetonových výparů a má za výsledek lesklý a jednotný povrch. Dosažená kvalita výrobku byla sama o sobě přijatelná, a proto nebylo další vyhlazování nutné. Parametry tisku byly mírně upraveny pro materiál ABS dle pokynů výrobce, nicméně z většiny zůstaly stejné jako u předchozího případu (viz Tabulka 8). Odstranění podpor proběhlo bez větších problémů.

Tabulka 8: Parametry filamentu ABS dané výrobcem

Výrobce	UltiMaker
Materiál	ABS
Průměr	1,75 mm
Doporučená teplota tisku	225–260 °C
Doporučená teplota podložky	80 °C
Barva	Černá



Obrázek 36: Výtisk rukojeti S(C)LA handle z materiálu ABS



Obrázek 37: Očištěný výtisk S(C)LA handle

7.7.2 Metoda SLA

Kvůli výhodám technologie SLA (viz Kapitola 6.) bylo přistoupeno k tisku i tímto způsobem. Opět šlo pouze o tisk dílu S(C)LA handle hlavně kvůli ověření potenciálu přesnosti metody při prototypování pohledových dílů. PLP plastic cover není často viditelný za běžného používání autosedačky, neboť bývá skrytý za dalším plastovým dílem z boku sedadla. Kromě zmíněného důvodu je kryt PLP se svou maximální délkou 180 mm poměrně velký na tisk v klasické 3D SLA tiskárně. Parametry materiálů a tisku jsou uvedeny v Tabulkách 9 a 10.

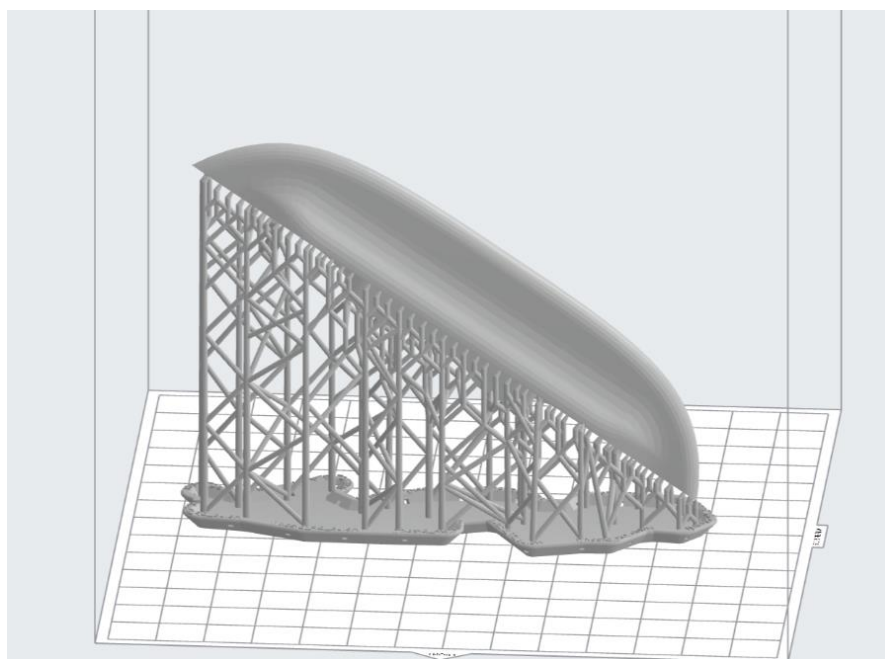
Tabulka 9: Parametry resinu Tough 1500 dané výrobcem

Výrobce	Formlabs
Materiál	Tough 1500 Resin
Spotřebované množství pryskyřice	27,12 mL
Doporučená teplota pryskyřice	35 °C
Barva	Šedá

Tabulka 10: Parametry zkušebního tisku

Tiskárna	Formlabs Form2
Technologie	Stereolitografie
Tloušťka vrstvy	0,1 mm
Výplň	100 %
Vrstvy	854

Tekutý resin Tough 1500 je jeden z nejpružnějších materiálů řady Tough & Durable pryskyřic od výrobce Formlabs. Je vhodný pro tuhé ale zároveň tvárné díly, které je třeba vícekrát ohýbat. Po deformaci má schopnost vracet se do původního tvaru což lze s výhodou využít při prototypování množství dílů v automotive průmyslu.



Obrázek 38: S(C)LA handle ve sliceru pro SLA tisk

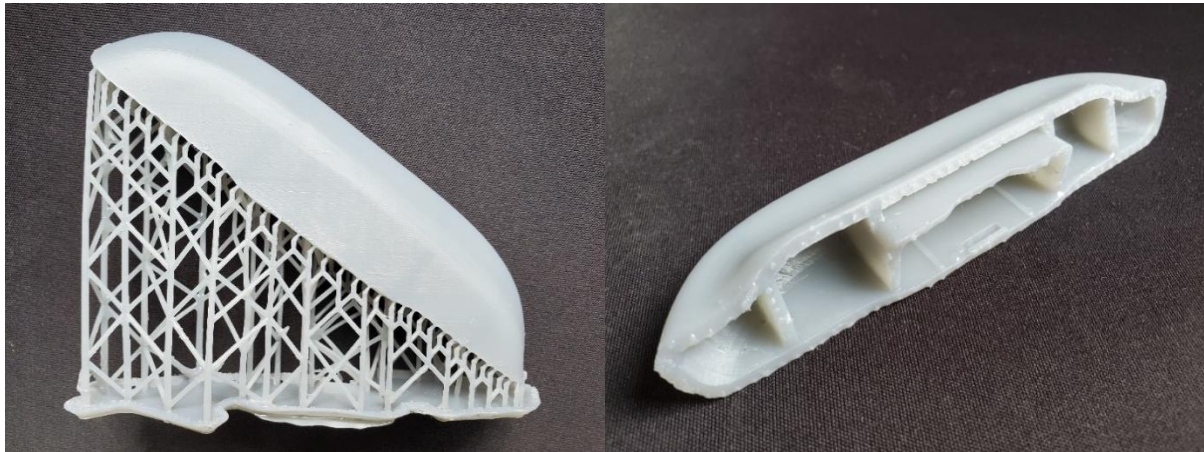
Dle normy ISO 10993-1 je tato pryskyřice schválena pro styk s pokožkou. Není dráždivá ani toxická z hlediska styku s živočišnými organismy, a proto je vhodná pro výrobu jak ochranných pomůcek, tak i jiných nositelných předmětů

Na Obrázku 40. je zobrazeno umístění rukojeti SLA handle ve sliceru na stavební ploše i s automaticky generovanými podporami.

Zhotovený díl i s podporami je vidět na Obrázku 41. Tisk při této technologii probíhal s opačnou orientací, než je zvykem u FDM tiskáren. Kvůli této skutečnosti se může stát, že při nedostatečném umístění podpor uprostřed tisku výrobek vlastní vahou spadne a nedojde tím k jeho dokončení. Zároveň je celý kus tisknut pod úhlem 45° aby bylo zajištěno snadnější odlepení od FEP folie na dně vaničky s pryskyřicí.

Po samotném vytisknutí bylo následně potřeba součást omýt v isopropylalkoholu (IPA) po dobu přibližně 10 minut. Tím došlo k odstranění veškeré povrchové mastnoty a následoval proces vytvrzování. Ten probíhal ve vytvrzovací stanici Form Cure vystavením výrobku UV světlu po dobu 60 minut. Zároveň probíhalo i kontrolované zahřívání výtisku kdy byla uvnitř stanice po celou dobu udržována teplota 70°C.

Hotový výrobek bez podpor je zobrazen na Obrázku 41. Na místech dotyku podpěr se součástí jsou vidět výstupky které bylo třeba k dosažení lepšího výsledku ještě ručně přebrousit. Funkčnost dílu ale není v tomto případě ovlivněna, a tak bylo přistoupeno pouze k odstranění největších nerovností.



Obrázek 39: Vytisklá rukojeť (nalevo) a očištěná (napravo) S(C)LA handle z pryskyřice Tough 1500

7.7.3 Metoda MJF

Poslední forma tisku probíhala na stroji HP Jet Fusion 4200 technologií MJF patentovanou firmou HP. Tento stroj má výhodu, že dokáže tisknout kontinuálně díky vyměnitelné stavební jednotce a odděleném procesním zařízení. Je tedy velmi vhodný pro prototypovou a pro malosériovou výrobu plastových dílů nebo i v případech kdy není možné čekat na výrobu formy vstřikolisu.

Vyráběné díly jsou v procesu obklopeny ze všech stran stavebním materiálem (práškem) a proto mohou být uspořádány tak, aby s ostatními výtisky zaplnily co nejefektivněji prostor stavební jednotky (viz Obrázek 43).

Tabulka 11: Parametry materiálu PA 12 dané výrobcem

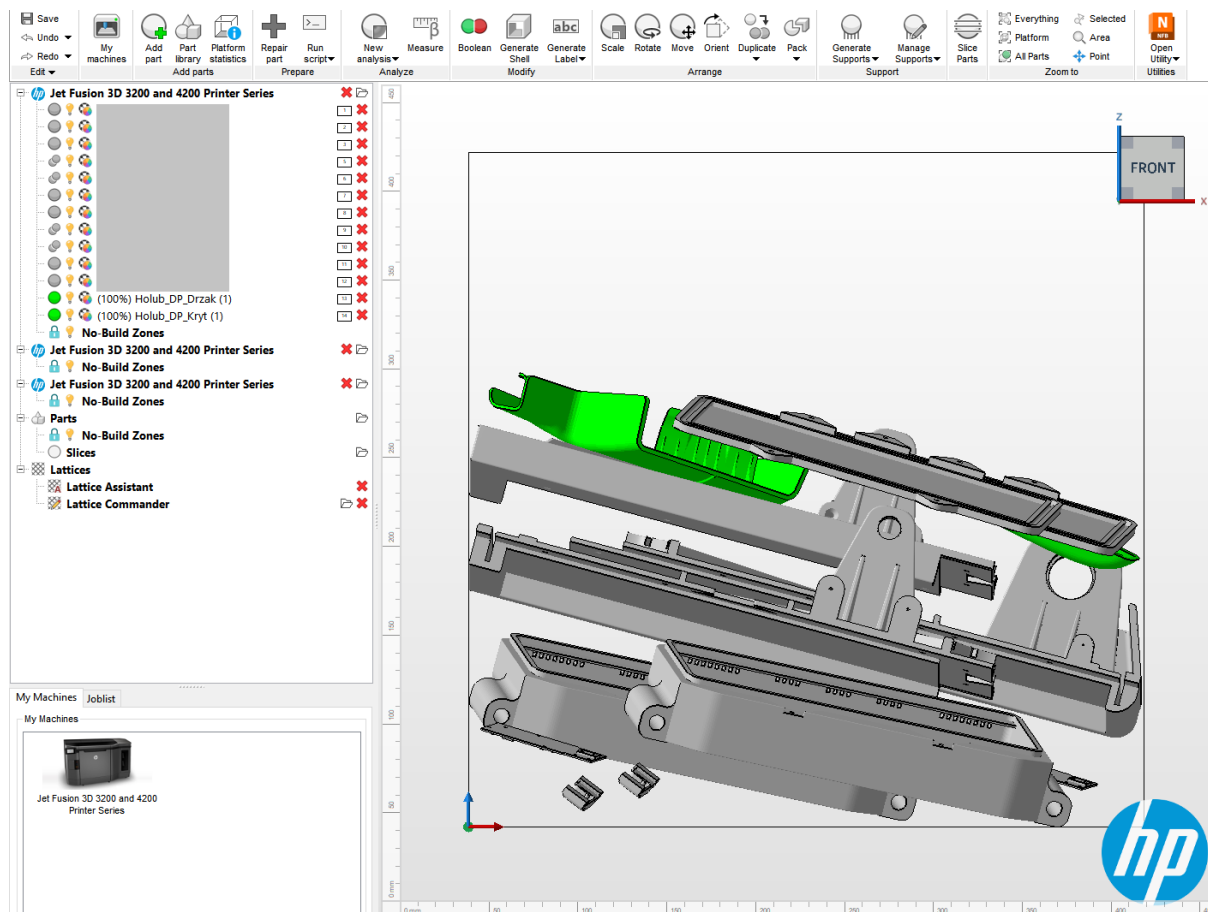
Výrobce	HP
Materiál	HP 3D High Reusability PA 12 Glass Beads
Velikost částic	58 μm
Teplota tání práškového materiálu	186 $^{\circ}\text{C}$
Objemová hmotnost práškového materiálu	480 kg/m^3
Hustota	1300 kg/m^3

Tabulka 12: Parametry zkušebního tisku MJF

Tiskárna	HP Jet Fusion 4200
Technologie	HP Multi Jet Fusion
Tloušťka vrstvy	0,08 mm
Rozlišení tisku (X,Y)	1200 dpi (dots per inch)
Výplň	100 %
Rychlost	4115 cm^3/hod

Použitý software na byl v tomto případě Autodesk Netfabb Premium 2023. Jako součást služby Fusion 360 je v tomto programu možné upravovat velké množství parametrů. Lze do něj importovat již předem vytvořené modely z různých CAD aplikací včetně těch ve formátu STL. Svými schopnostmi i jednoduchostí se vzdáleně podobá už zmíněnému programu PrusaSlicer. Jednotlivé díly je možné zbavit případných chyb v modelu a uspořádat společně s ostatními ve stavební jednotce.

Vygenerované uspořádání zkoumaných dílů (zeleně) s ostatními díly (šedě) v prostoru tiskárny je vidět na Obrázku 43. V případě malosériové nebo sériové výroby se tedy jedná o jednu z mála metod aditivní výroby která je schopna nákladově konkurovat konvenčním technologiím jako je např. vstřikování plastu. Zároveň je ale i vhodná pro prototypování složitých kusů.



Obrázek 40: Pozice dílů ve sliceru pro MJF tiskárnu

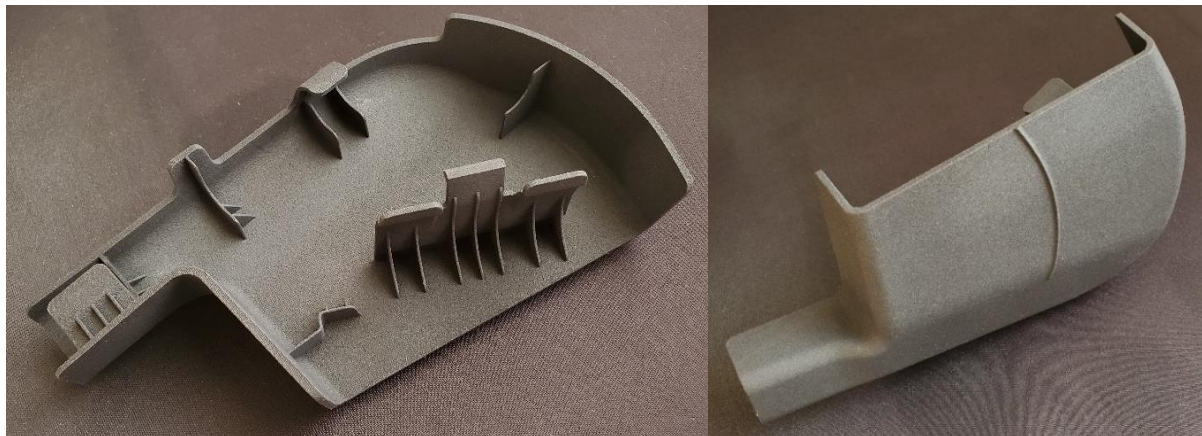
Než můžeme vytisknuté díly považovat za hotové, je třeba stejně jako u mnoha dalších metod provést následný postprocessing. I když je postprocessing (dodatečné opracování dílů) v technologii Multi Jet Fusion poměrně nenáročný, stejně se musí provádět pečlivě pro dosažení požadovaného výsledku. Podobně jako je tomu u jiných metod zahrnujících prášek, i zde bylo třeba vytištěné díly ručně očistit vysavačem. Přebytečný vysátý prášek se poté znovu použije na další tisk. Jeho poměr s novým práškem se může lišit, nicméně v tomto případě je míchán v poměru 70% recyklovaný a 30% nový.

Většina plastových dílů interiéru vozu nemívá dokonale hladký povrch ale tzv „graining“ (zrnitost). Jeho účel je mimo jiné působit prémiově jak pohledem, tak i hmatovým dojmem. To platí obvykle pro prvky interiéru, kde je důležité i zabránit prokluzům. Z toho důvodu díly vytištěné pomocí MJF v tomto případě není třeba pískovat, kuličkovat nebo vaporizovat. V případě procesu vaporizace dochází po očištění k naleptání a vyhlazení povrchu plastového výtisku. V probíraných procesech v oblasti automotive se i tato technika může ukázat jako výhodná a dále tak podporuje možnost využití 3D tisku pro sériovou výrobu. Matný a mírně drsný povrch vytisknutých dílů je ovšem z tohoto hlediska plně dostačující, a tak nebyl dále upravován.



Obrázek 41: Vytisknutá a očištěná S(C)LA handle z tiskárny HP MJF

Rukojeť S(C)LA handle vytisknutá pomocí MJF je zobrazena na Obrázku 44. Kvůli tvarové složitosti a slepým otvorům bylo potřeba dostat za pomoci stlačeného vzduchu a vysavače přebytečný prášek ven což je jedna z nevýhod samotného principu této technologie na bázi práškového lože.

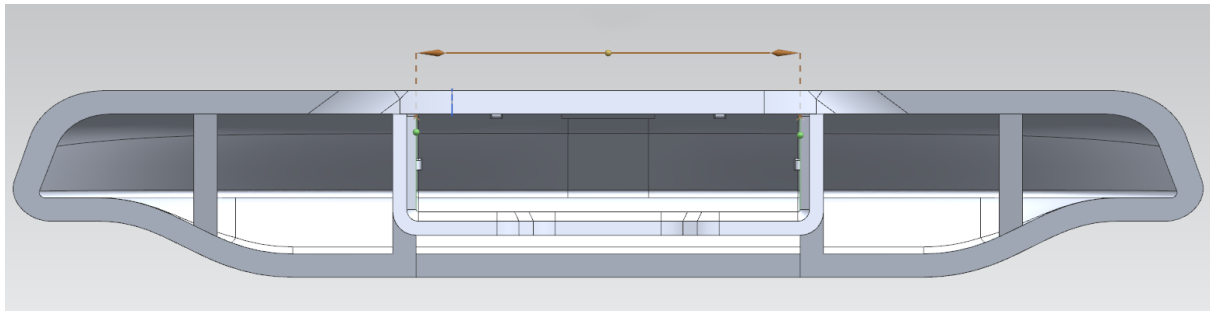


Obrázek 42. Vytisknutý a očištěný PLP cover z tiskárny HP MJF

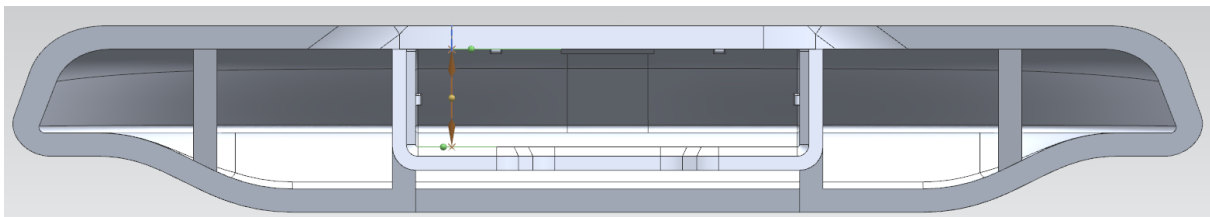
V druhém případě bylo vyčištění o poznání snazší a vytisklý kryt předepínače pásu PLP plastic cover můžeme vidět na Obrázku 45. V porovnání s tiskem metodou FFF šlo při čištění v podstatě jen o pár vteřin dlouhou činnost bez nutnosti použití nožů nebo kleští. Také ve srovnání s SLA technologií se jedná o výrazný pokrok, neboť k vytvrzování dochází už při samotném tisku a zároveň se zde nemusí řešit orientace ani množství případných podpor.

7.7.4 Ověření rozměrů výtisků

Pro základní přehled v rozměrech vytisknutých i sériově vyrobených rukojetí byly změřeny fyzické velikosti jejich hlavního otvoru pomocí digitálního posuvného měřítka. Naměřené hodnoty jsou uvedené v Tabulce 16 a mohou dále posloužit pro zhodnocení výsledků jednotlivých testů. Z naměřených hodnot si lze povšimnout výtisku z materiálu PA 12 který má výrazně větší rozměry oproti vzorovému dílu. Tato skutečnost může ve fázi testování potenciálně způsobit problémy.



Obrázek 43: Měřená šířka otvoru rukojeti



Obrázek 44: Měřená výška otvoru rukojeti

Tabulka 13: Hlavní rozměry otvoru rukojeti S(C)LA handle

Parametry/materiál	Šířka [mm]	Výška [mm]
Originální díl	40,77	10,50
PLA	41,17	10,48
PETG	41,15	10,50
ABS	41,01	10,43
Tough 1500	41,24	10,59
PA 12	41,62	10,80

8 Testování

Za účelem ověření vyrobených dílů bylo v této kapitole přistoupeno k finálnímu testování. Před výrobou konečného dílu nepostradatelně figuruje rapidní prototypování zahrnující testy vzorků. Tím lze už od stádia návrhu až po zkoušení vytisknutého dílu průběžně měnit a zlepšovat jeho vlastnosti. Stejně tomu bylo i při sestavování probírané autosedačky v technickém centru Lear Corporation v Plzni, kdy bylo nutné ověřit funkčnost modelů převedených z digitální do fyzické podoby.

Testování se obvykle skládá z ověření obecných geometrických rozměrů v závislosti na zbytku sestavy autosedačky a následně ze zkoušky pevnosti vytisknutých dílů. V této kapitole budou z důvodu omezeného množství zhotovených dílů vyšetřovány nejprve rozměry fyzických součástí a jejich kompatibilita v sestavě. Po upevnění krytu PLP plastic cover ke zbytku autosedačky došlo nejdříve k jeho zhodnocení a následně k zátěžové zkoušce tahem ve směru od sedačky. Vyzkoušení rukojeti S(C)LA handle z hlediska ověření základních funkcí mechanismu pro nastavování délky sedáku proběhlo společně se zátěžovými testy jejichž výsledky jsou uvedeny jako první. V případě dosažení mezních hodnot pro jejich neopatrné používání stanovených zákazníkem bude přistoupeno také k destruktivním testům obou součástí.

Na Obrázku 48 je zobrazen siloměr PHYSIMETER od výrobce Erichsen který byl použitý k testování vytisknutých dílů a je také pravidelně používán při různých testech ve vývojovém centru Learu v Plzni.



Obrázek 45: Použitý siloměr včetně příslušenství

Tento typ dokáže měřit při teplotě od +5 °C do +35 °C maximální sílu o hodnotě až 1 kN (1000 N) a s udávanou přesností 0.2 %. Před měřením bylo třeba tento přístroj nejdříve

zkalibrovat po připevnění příslušného přípravku. To probíhá prostým umístěním siloměru do vertikální polohy a vynulování hodnoty na displeji. Následně se zvolí režim, ve kterém siloměrem chceme měřit (tahání nebo tlačení) a přístroj je připraven k použití. Měření u všech kusů se vždy třikrát opakovala pro omezení chyb a získání souvislých výsledků. [23]

8.1 Test krytu PLP plastic cover

8.1.1 Materiál PLA

Z důvodu omezeného časového prostoru na testování nebylo přistoupeno k detailnějšímu tisku krytu předepínače pásů z materiálu PLA, ale byl použit přímo první zkušební vzorek. Autosedačka ve fázi stavby byla umístěna na otočný stůl ocelové konstrukce, který usnadňuje její manipulaci pracovníkům pověřeným sestavením z dílů dodaných externí firmou. Zároveň se jedná o praktické umístění pro provádění testů.



Obrázek 46: Umístění předepínače bezpečnostních pásů

Po očištění stykových ploch byl k celku namontován vytisknutý kus z materiálu PLA (viz Obrázek 50). Následovala vizuální kontrola a ověření usazení všech částí krytu na svá místa.



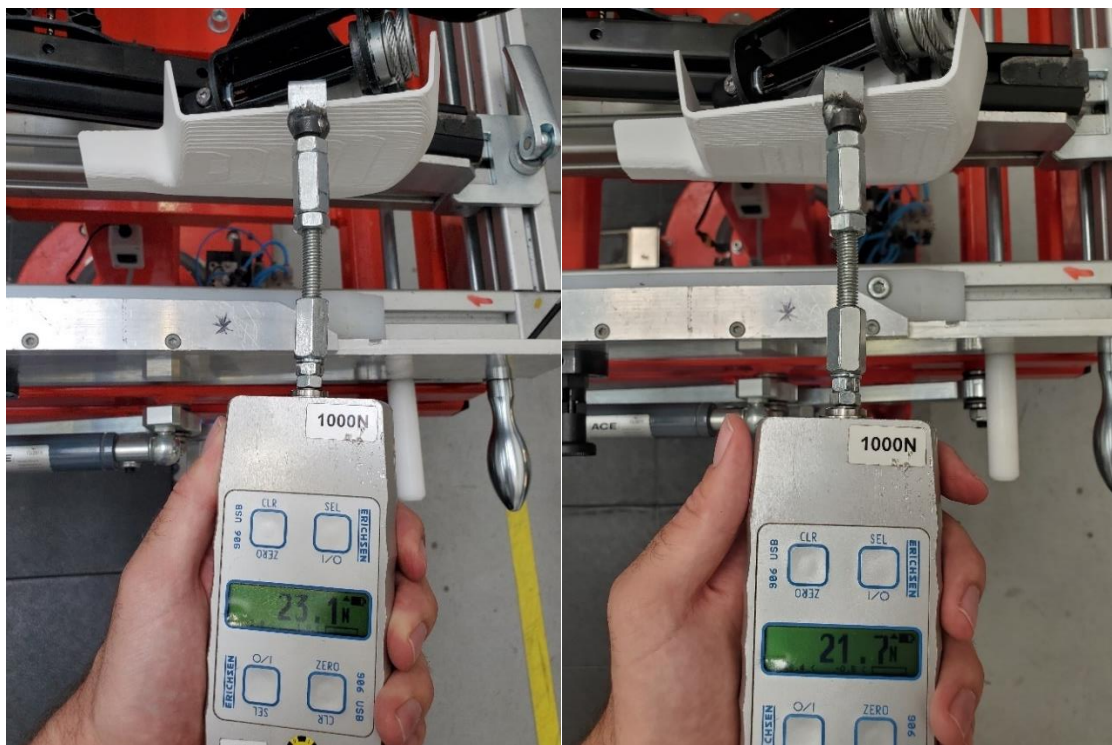
Obrázek 47: Upevněný kryt PLP plastic cover z materiálu PLA

V další fázi byla testována pevnost kusu umístěním háku siloměru na horní vnitřní stranu a tahání směrem ven (viz Obrázek 51). Požadované zatížení při neopatrném zacházení, které činí 80 N v tomto případě kus nevydržel.

Navíc došlo téměř k ulomení dolního úchytu a značnému poškození západky viditelnému na Obrázku 46. Toto poškození se zřejmě postupně zhoršovalo v průběhu testu což dokazují zobrazené hodnoty z každého měření, které jsou uvedené v Tabulce 13.

Tabulka 14: Výsledky měření krytu PLP plastic cover z PLA

Měření	Max. zatížení [N]	Výsledek
1.	23,1	OK
2.	21,7	OK
3.	21,5	Poškození dílu



Obrázek 48: Měření max. síly pro uvolnění krytu z PLA



Obrázek 49: Detail poškození krytu z PLA

8.1.2 Materiál PETG

V tomto případě probíhal postup identicky jako v předchozím testu. Kus z materiálu PETG byl upevněn na určené místo a znovu ověřen siloměrem. Ani zde se však hodnoty nepřiblížily požadovanému snesitelnému zatížení daného automobilkou.



Obrázek 50: Upevněný kryt PLP plastic cover z materiálu PETG

Tabulka 15: Výsledky měření krytu PLP plastic cover z PETG

Měření	Max. zatížení [N]	Výsledek
1.	25,7	OK
2.	27,6	OK
3.	30,5	Poškození dílu



Obrázek 51: Měření max. síly pro uvolnění krytu z PETG

Navíc i tentokrát došlo k ulomení spodního úchyty a značnému opotřebení západky („zobáčku“) což je patrné níže na Obrázku 55. Jedná se o křehký lom na rozdíl ot krytu z PLA, kde došlo pouze k částečnému odlomení.



Obrázek 52: Detail poškození krytu z PETG

8.1.3 Materiál PA 12

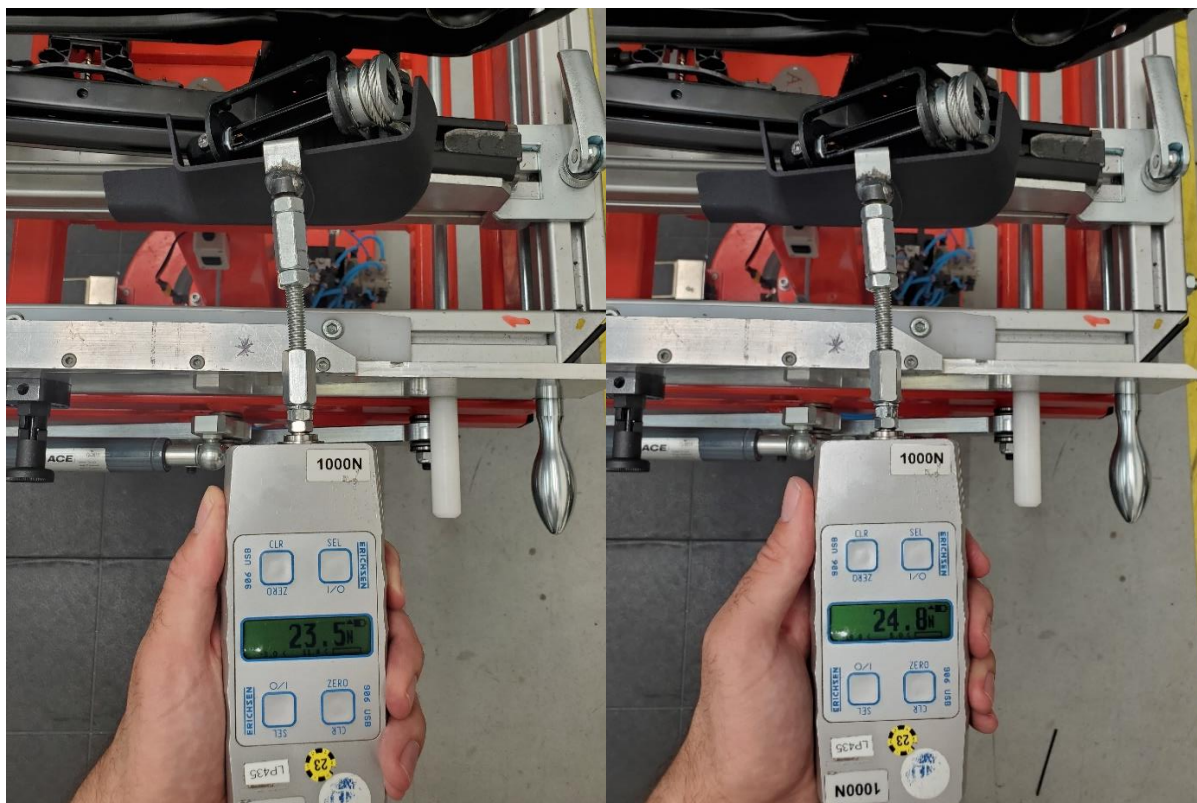
Poslední test kryt krytu probíhal standartně usazením krytu vyrobeného z materiálu PA 12 na rám sedačky (viz Obrázek 56). Ani v tomto případě však výtisk nesplnil očekávání a síla potřebná pro jeho vytrhnutí byla dokonce menší než u předchozího krytu vyrobeného z PETG (viz Tabulka 15). Nicméně je nutné podotknout že pouze v tomto případě nedošlo ani po opakovaných zátěžových zkouškách k porušení nebo rozlomení krytu. To demonstruje jeho kvalitu a případnou použitelnost v těchto aplikacích.



Obrázek 53: Upevněný kryt PLP cover z materiálu PA 12

Tabulka 16: Výsledky měření krytu PLP plastic cover z PETG

Měření	Max. zatížení [N]	Výsledek
1.	23,5	OK
2.	24,8	OK
3.	24	OK



Obrázek 54: Měření max. síly pro uvolnění krytu z PA 12

V oblasti stykových ploch s rámem došlo pouze ke vzhledovému zhoršení, které nijak neovlivňovalo funkčnost a integrita dílu tedy zůstala neporušena.



Obrázek 55: Detail poškození krytu z PA 12

8.2 Test rukojeti S(C)LA handle

Zkouška této součástky je opět rozdělena podle testovaných materiálů do jednotlivých kapitol. V každé z nich je namontovaná rukojeť S(C)LA handle zkoušena z hlediska neopatrného zacházení dvěma způsoby:

- Max. síla vytrhnutí působící na horní okraj
- Max. síla vytrhnutí působící na dolní okraj

Zároveň bylo možné porovnat její povrch a celkovou kvalitu se sériově vyráběným dílem (viz Obrázek 59). I z tohoto pohledu se nakonec vybrané výtisky z ergonomického hlediska prokázaly jako přijatelné.



Obrázek 56: Porovnání dolní a horní strany sériového (černě) a vytištěného (bíle) dílu

Umístění téměř všech výtisků bylo bezproblémové a funkce mechanismu sedáku nebyla nijak ovlivněna (viz Obrázek 55). Jedinou výjimku tvoří vybraná varianta **a**) dílu z PLA která se při nasazení rozlomila v místě kapsy pro zajištění (viz Obrázek 62). Z toho důvodu bylo při zkoušení vzorků z PLA přistoupeno k variantě **b**).



Obrázek 57: Vyzkoušení funkčnosti vytištěné rukojeti (Materiál PETG)

8.2.1 Test síly pro odjištění mechanismu sedáku

Jako základní ověření bylo v první řadě přistoupeno ke zjištění velikosti síly potřebné pro odjištění celého mechanismu sedadla. Zákazníkem je v tomto případě požadovaná síla k uvolnění mechanismu o max. velikosti 20 N. Testování bylo třikrát opakováno k získání relevantních výsledků a eliminaci chyby měření. Siloměr byl nejprve nastaven na měření tlačící síly a automaticky zaznamenal do paměti maximální dosaženou hodnotu (Tabulka 17).



Obrázek 58: Způsob tlačení siloměru pro odjištění mechanismu

Tabulka 17: Výsledky měření odjištění mechanismu sedáku

Měření	Max. zatížení [N]	Výsledek
1.	35,3	Nevyhověl
2.	36,5	
3.	36,7	

Z výsledků je patrné že celkově mechanismus v tomto ohledu nevyhovuje požadavkům zákazníka. Nejedná se ovšem o chybu vytisknuté rukojeti nýbrž o problém předepínací pružiny celého ústrojí. Rukojeť použitá při testu (viz Obrázek 61) je vyrobena z materiálu PETG.

8.2.2 Materiál PLA

Zmíněný neúspěch varianty **a)** z materiálu PLA poukazuje na důležitost správné volby orientace i materiálu při tisku metodou FFF. Tiskové vady a větší náchylnost PLA k deformacím můžou mít za následek nedostatečné přilnutí jednotlivých vrstev a následnou delaminaci. Obecně není vhodné výtisky zatěžovat ve směru stavby objektu (odlepování vrstev od sebe) což se přesně zde projevilo.



Obrázek 59: Detail poškození vzorku a) z PLA



Obrázek 60: Měření max. síly pro uvolnění vzorku rukojeti a) z PLA

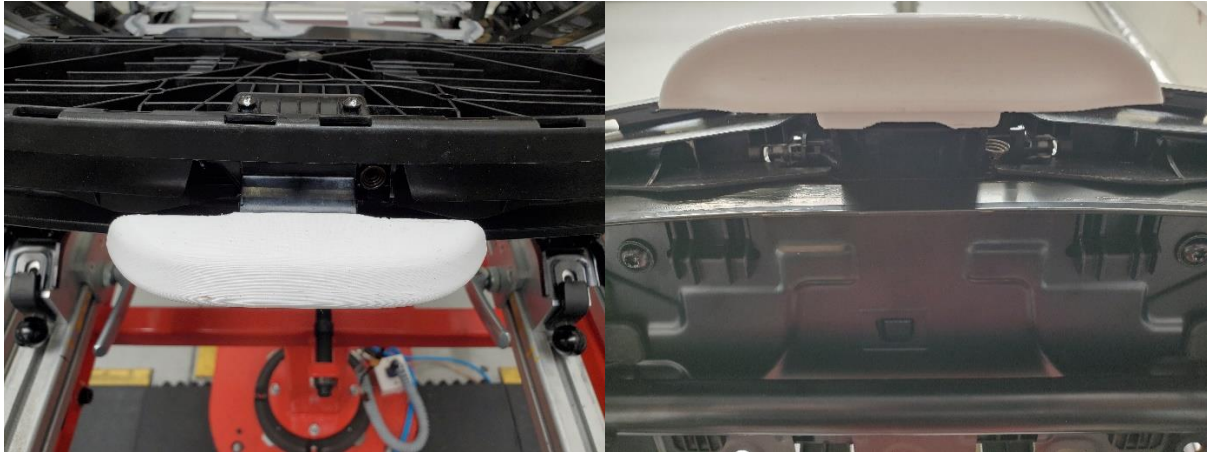
Při měření maximální konstantní síly na dolní hraně došlo i v tomto případě opět k vylomení v místě prohlubně (drážky) rukojeti. Výstupek na protikusů zůstal však nepoškozen a mohl být použit pro další testování. Materiál PLA se tedy ukázal být jako příliš křehký pro tuto aplikaci i když je na druhou stranu zároveň také nejlevnější (viz Tabulka 18).

Tabulka 18: Výsledky měření rukojeti S(C)LA handle z PLA

Měření na hraně	Max. zatížení [N]	Výsledek
Horní	145,1	OK
Dolní	113,2	Poškození dílu

8.2.3 Materiál PETG

Vzorek vyrobený z tohoto materiálu se ukázal být výrazně pevnější. Díl vytisklý prakticky ve stejné orientaci jako v díl z předchozího testu vykazoval mnohem větší pevnost a odolnost vůči působícímu zatížení bez jakýchkoliv počátečních změn zkoušky. Ani po silové zkoušce nedošlo k porušení rukojeti ale pouze k otlačení. Rukojeť bylo i nadále možné upevnit a používat se zbytkem sestavy.



Obrázek 61: Detail uchycení rukojeti z PETG



Obrázek 62: Měření max. síly pro uvolnění vzorku rukojeti z PETG

Tabulka 19: Výsledky měření rukojeti S(C)LA handle z PETG

Měření na hraně	Max. zatížení [N]	Výsledek
Horní	171,4	OK
Dolní	186,1	Otlačení dílu

8.2.4 Materiál ABS

Díly z ABS i jeho směsí se v oblasti automotive dlouhodobě s oblibou používají kvůli své houževnatosti a teplotní stálosti. Jeho otestování v rámci 3D tisku se tedy jeví jako logický krok této práce. Kompatibilita s protikusem byla ověřena, jak je patrné z Obrázku 66. I když byl ale tisknut mírně odlišným způsobem než rukojeti z PLA, tak stále jeví podobné

nedostatky. Už při prvním testu došlo k jeho poškození v místě vnitřní drážky a v podobě delaminace vrstev. Z časových důvodů nebyl tisk náhrady uskutečněn.



Obrázek 63: Detail uchycení rukojeti z ABS



Obrázek 64: Měření max. síly pro uvolnění vzorku rukojeti z ABS

Tabulka 20: Výsledky měření rukojeti S(C)LA handle z ABS

Měření na hraně	Max. zatížení [N]	Výsledek
Horní	110,7	Otlačení dílu
Dolní	38,3	Delaminace vrstev

8.2.5 Materiál Tough 1500 resin

Smysl využití technologie SLA pro prototypování rukojeti S(C)LA handle spočíval primárně v dosažení dobré přesnosti povrchu (viz Kapitola 7.8.2). Ze získaných výsledků pak

Ize případně zvážit větší uplatnění prskyřic v tomto oboru. Výtisk z prskyřice Tough 1500 se při nasazení rovněž ukázal být rozměrově i kvalitativně vyhovující (viz Obrázek 68).



Obrázek 65: Detail uchycení rukojeti z Tough 1500 resin



Obrázek 66: Měření max. síly pro uvolnění vzorku rukojeti z Tough 1500 resin

Ačkoli se jedná o poměrně netradiční metodu z hlediska 3D tisku ve vývojovém centru Learu v Plzni. Ukázal se tento materiál jako odolný při testování spojů se zaklapnutím a v průběhu testu došlo pouze k jeho mírnému otláčení v místě drážky pro protikus. Nicméně požadovaná zatížení ani tak nebylo dosaženo.

Tabulka 21: Výsledky měření rukojeti S(C)LA handle z Tough 1500

Měření na hraně	Max. zatížení [N]	Výsledek
Horní	116,7	OK
Dolní	141,6	Otláčení dílu

8.2.6 Materiál PA 12

Posledním zátěžovým testem bylo vyzkoušení rukojeti vyrobené technologií Multi Jet Fusion a z materiálu PA 12. Zpočátku byly znatelné odlišné rozměry vnitřního otvoru, které se lišily od ostatních vzorků téměř o 0,5 mm. To je pravděpodobně i důvod proč rukojeť z pevnostního hlediska obstála pouze ve druhém případě který zároveň vedl i k destrukci části. Křehký lom vznikl opět v drážce sloužící pro zajištění dílu na svém místě.



Obrázek 67: Detail uchycení rukojeti z PA 12



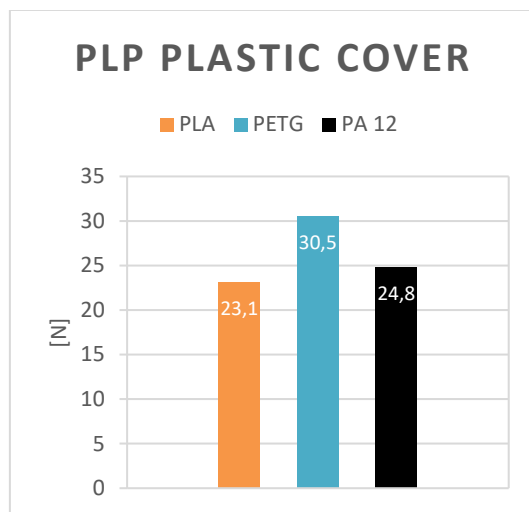
Obrázek 68: Měření max. síly pro uvolnění vzorku rukojeti z PA 12

Tabulka 22: Výsledky měření rukojeti S(C)LA handle z PA 12

Měření na hraně	Max. zatížení [N]	Výsledek
Horní	114,3	Otlačení dílu
Dolní	158,9	Odlomení

8.3 Shrnutí měření

V první části testování byly na rozestavěnou autosedačku připevněny a testovány jednotlivé kryty předepínače pásů vyrobené pomocí 3D tisku. Nejdříve došlo k ověření kompatibility se stávajícími součástmi sedačky a k posouzení všeobecných vlastností plastového krytu. Všechny vzorky šlo snadno upevnit na své místo bez potřeby dalších nástrojů. Kvalita povrchu dosahovala nejlepších hodnot u výtisku z PA 12 oproti výrobkům z tiskárny FFF/FDM. Pouze v tomto případě byl také zaručen plynulý pohyb dalších plastových dílů jezdících po vnější straně krytu PLP při nastavování polohy sedačky.



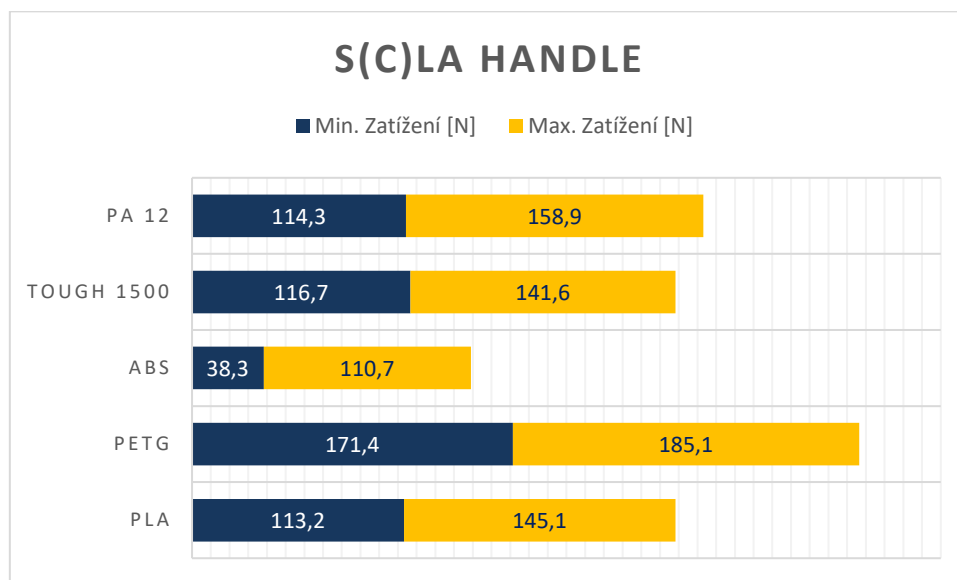
Graf 1: Hodnoty max. zátěžných sil jednotlivých materiálů PLP plastic cover

Samotné testování krytu PLP plastic cover neproběhlo s očekávanými výsledky, neboť žádný výtisk nesplnil kladené nároky. Maximální síla o velikosti 80 N nebyla ani při opakovaném měření dosažena a skutečné hodnoty jsou shrnuty v Grafu 1. U výtisků z materiálů PLA a PETG došlo dokonce k úplnému zničení již po třech testech. Po podrobnějším zkoumání byl zjištěn problém v nedostatečném upevnění prostředního háčku krytu vůči protějším plechu. To v průběhu zátěžového testu způsobovalo uvolnění a sklouznutí háčku po povrchu. Tím došlo k nadměrnému zatížení spodního úchyty a nevyhnutelně i k porušení materiálu.

Další na řadě bylo testování rukojeti S(C)LA handle z hlediska funkčnosti i ergonomiky. Jelikož se jedná pohledový díl, vzhled hrál v tomto testu důležitou roli. Jako nejlepší se v tomto ohledu jevíly výtisky z materiálu PA 12 a Tough 1500 následované variantami z FFF tiskárny které se tiskly způsobem a) (viz Kapitola 7.7 a 7.8). Z funkčního hlediska byl celý mechanismus včetně vybraného výtisku rukojeti nejprve otestován pro zjištění velikosti uvolňovací síly. Pomocí speciálního nástavce siloměru byla rukojeť odtlačována zezdola nahoru, než došlo k uvolnění zařízení. Udávanou doporučenou hodnotu síly (20 N) potřebné pro tento úkon se opět ani v jednom z měření nepodařilo splnit. Ke spuštění bylo potřeba výrazně větších sil, při kterých ale výtisk i tak bez problémů vydržel neporušen.

Poslední část měření byla věnována testování kusů zatíženími, která mohou vzniknout při neopatrném používání. Vytisknuté rukojeti určené pro testování byly ověřeny vytrhnutím ve směru od sedačky působením síly na horní a následně spodní hranu. Neplatí zde žádné běžné

hodnoty zatížení, které by měla rukojeť vydržet, a proto byly vzorky zatěžovány až do jejich destrukce. V Grafu 2 jsou znázorněny vždy krajní hodnoty pro výtisk z daného materiálu. Vzhledem k tomu že šlo o díly často tisknuté z materiálů s možnými odchylkami v kvalitě (PLA, PETG, ABS) ale zároveň s přijatelnou cenou lze při pohledu na zmíněný graf konstatovat jistá zjištění. Materiál PA 12 byl bezesporu nejdražším prvkem celého procesu, a i tak se neumístil na první pozici v pevnosti. Požadovanou maximální hodnotu působící síly (150 N) kterou musí daný díl při testu misuse snést bez deformace celkově nesplnily 3 z 5 zkoušených materiálů.



Graf 2: Hodnoty max. a min. zátěžných sil jednotlivých materiálů S(C)LA handle

Jako nejlepší volba se zde tedy jeví levnější materiál PETG společně s dražším PA 12. Přičemž je nutné podotknout že rukojeť vyrobenou z PETG bylo možné i po zátěžovém testu znovu nasadit na sedačku a používat, zatímco u výtisku z PA 12 došlo k vytvoření křehkého lomu a odlomení v oblasti drážky. Negativní vliv na výsledek zkoušení byl také fakt, že naměřené rozměry dílu vyrobeného technologií MJF byly nejvíce vzdálené rozměrům sériově vyráběné součásti. To mohlo způsobit nekvalitní dosednutí ploch testovacího vzorku a protikusu čímž došlo k nerovnoměrnému rozložení sil v průběhu testu.

9 Závěr

Tato práce s kladla za cíl zhodnotit a porovnat stávající metody aditivní výroby a jejich vhodnost k využití v sériové výrobě automobilových sedaček. Dále pak zhodnocení těchto metod z hlediska využití ve společnosti Lear Corporation která se zabývá kromě produkce elektronických komponent i výrobou a testováním autosedaček. Pro účely práce byly vybrány dva komponenty ze sedačky vyvíjené pro novou elektrickou platformu vozů značky Mercedes-Benz. Jedná se o rukojeť pro nastavování délky sedáku S(C)LA handle a kryt předepínače bezpečnostních pásů PLP plastic cover. Tyto součásti byly podrobeny nejprve počítačové simulaci pro zjištění napětí a následně výrobě několika různými formami 3D tisku což umožnilo i zhodnocení fyzických kusů zhotovených na základě CAD modelů.

Z rešerše současných technologií aditivní výroby bylo zjištěno že pro výrobu plastových dílů pomocí 3D tisku se hodí pouze určité množství technologií, které je dále omezeno jejich cenou a dostupnými materiály. Technologie jako jsou Sheet Lamination, Direct Energy Deposition a Powder Bed Fusion sice mohou v budoucnu posloužit při výrobě z kovových materiálů, ale pro potřeby vývoje autosedaček se v zásadě nehodí. Dále bylo zjištěno že největší uplatnění 3D tisku v souvislosti s výrobou autosedaček je v procesu prototypování, kdy jde spíše o kusovou výrobu. I když jsou tiskárny s technologií FFF v technologickém centru firmy Lear v plzni už déle přítomné, nelze s postupujícím vývojem opomínat i jiné alternativy. Právě proto byly pro výrobu a testování vybrány kromě FFF i metody SLA a MJF. Metoda MJF (Multi Jet Fusion) se také prokázala jako jediná reálná alternativa pro sériovou výrobu, jelikož je její produkce srovnatelná s již běžně používanými vstřikolisy.

Ze simulací provedených metodou MKP byla ověřena strukturální integrita obou vybraných komponent při zatěžování nadměrnými silami jejichž hodnota byla specifikována zákazníkem. Maximální hodnoty napětí se očekávaně vyskytovaly v rozích a drážkách součástí. Jejich tvarovou optimalizaci bohužel nebylo možné provést, neboť by se tak ohrozila kompatibilita se zbytkem dílů sedačky a tím i reálné testování.

Tisk vzorků probíhal na tiskárnách typu Prusa i3 MK3 nejdříve pro zkušební účely a následně pak i pro výrobu vzorků. Další použité tiskárny byly Formlabs Form2 a HP Jet Fusion 4200. Na každém stroji byly komponenty tisknuty na základě stejného CAD modelu, a i přesto se jejich reálné rozměry značně lišily (viz Kapitola 7.8.4). Nečekaně tomu bylo tak i u technologie MJF která se podle parametrů udávaných výrobcem jeví jako jedna z nejpřesnějších zde uvedených metod. V případě tiskáren na bázi FFF i SLA byl celý proces výroby prodloužen o následný postprocessing. Účelem postprocessingu je vyčištění a v případě SLA i vytvrzení dílů tak, aby bylo dosaženo co nejlepších vlastností. Šlo hlavně o odstranění podpěr, které je hlavní nevýhodou těchto technologií a závisí primárně na počáteční orientaci tisknutého kusu na stavební podložce tiskárny. U výtisků z materiálu PLA a ABS filamentů šlo o poměrně nenáročný proces jak časově, tak i z hlediska množství vykonané práce. Naopak u filamentu z PETG a pryskyřice Tough 1500 bylo odstranění podpěr složitější a vyžadovalo použití nástrojů (kombinované a štípací kleště). Nicméně tisk všech vzorků proběhl úspěšně s požadovanou kvalitou a mohlo být postoupeno k následujícím krokům.

Finální fáze celé práce spočívala v umístění vytisknutých dílů na příslušná místa konstrukce sedačky a jejich otestování. Jak vytisknuté rukojeti, tak i kryty byly z hlediska kvality a funkčnosti bezproblémové. V obou případech šlo výtisky snadno nasadit na svá místa a svou ergonomií plně vyhovovaly kladeným nárokům stejně jako sériově vyráběné díly. Nebyly zpozorovány žádné ostré hrany, které by mohly ohrozit montážního pracovníka nebo i koncového uživatele. Výjimku tvořila rukojeť typu a) vyrobená z materiálu PLA u které došlo při prostém nasazení k delaminaci a zničení. Rukojeť vyrobená z PA 12 rovněž vykazovala horší vlastnosti způsobené vůlí mezi výtiskem a protikusem sedačky.

Z naměřených hodnot maximálních zátěžných sil pro vytrhnutí rukojeti lze označit výtisky z materiálu PETG jako nejvhodnější pro prototypování, neboť dokázaly bez problémů snést požadované zatížení 150 N. Neúspěch výtisků z ABS lze přisuzovat špatné orientaci tisku a do budoucna by bylo vhodné provést opakované měření s více kusy pro získání více relevantních hodnot. I když je materiál PETG podstatně levnější než PA 12, nelze opomenout fakt že technologii MJF lze využít zároveň i přímo k sériové výrobě, a proto je dobré zvážit její budoucí uplatnění i v tomto oboru. Rukojetě z resinu Tough 1500 jsou sice pohledově lepší kvality, nicméně jejich použití je vhodné pouze v méně náročných aplikacích. Změřené hodnoty pro sil pro uvolnění mechanismu sedáku jsou brány pouze jako orientační, jelikož jeho funkce nijak nesouvisí s předmětem této práce. Testování krytu PLP plastic cover nepřineslo žádné výsledky z důvodu jeho nedostatečného upevnění. Z toho důvodu je doporučeno buď upravení jeho tvaru nebo snížení požadavků zákazníka na díl který je většinu času v reálném provozu skrytý.

Závěrem lze říci že došlo k naplnění stanovených požadavků práce z hlediska teoretické i praktické části. Využití 3D tisku ve výrobě autosedaček lze zvláště doporučit pro prototypování s tím že je dobré postupem času zvažovat zavedení dalších technologií a nezůstávat pouze u tiskáren na principu FFF.

Seznam použitých zdrojů

- [1] SU, Amanda a Subhi J. AL'AREF. History of 3D printing. 3D Printing Applications in Cardiovascular Medicine [online]. 2018, s. 1–10. Dostupné z: doi:10.1016/b978-0-12-803917-5.00001-8
- [2] JANDYAL, Anketa, Ikshita CHATURVEDI, Ishika WAZIR, Ankush RAINA a Mir Irfan UL HAQ. 3D printing – a review of processes, materials and applications in industry 4.0. Sustainable Operations and Computers [online]. 2022, roč. 3, s. 33–42. Dostupné z: doi:10.1016/j.susoc.2021.09.004
- [3] ALGHAMDI, Saad; SABU, John et al. Additive Manufacturing of Polymer Materials: Progress, Promise and Challenges. 2022. Polymers. 13. Dostupné z: doi:10.3390/polym13050753
- [4] CHENG, Jian; XING, Yunhao; Enjie DONG et al. An Overview of Laser Metal Deposition for Cladding: Defect Formation Mechanisms, Defect Suppression Methods and Performance Improvements of Laser-Cladded Layers. 2022. Materials [online]. 15(16), 5522. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi.org/10.3390/ma15165522
- [5] MSALLEM, Bilal, Neha SHARMA, Shuaishuai CAO, Florian S. HALBEISEN, Hans-Florian ZEILHOFER et al. Evaluation of the dimensional accuracy of 3D-printed anatomical mandibular models using FFF, SLA, SLS, MJ, and BJ Printing Technology. Journal of Clinical Medicine [online]. 2020, roč. 9, č. 3, s. 817. Dostupné z: doi:10.3390/jcm9030817
- [6] MEHRPOUYA, Mehrshad, Daniel TUMA, Tom VANEKER, Mohamadreza AFRASIABI, Markus BAMBACH a Ian GIBSON. Multimaterial powder bed fusion techniques. Rapid Prototyping Journal [online]. 2022, roč. 28, č. 11, s. 1–19. Dostupné z: doi:10.1108/rpj-01-2022-0014
- [7] GIBSON, Ian; ROSEN, David; STUCKER, Brent et al. Additive manufacturing technologies. Rapid prototyping to direct digital manufacturing. 2010. Springer, New York Dostupné z: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-56127-7>
- [8] BILLIET, Thomas; VANDENHAUTE, Mieke; SCHELFHOUT, Jorg et al. A review of trends and limitations in hydrogel-rapid prototyping for tissue engineering. 2012. Biomaterials vol. 33,26: 6020-41. Dostupné z: doi:10.1016/j.biomaterials.2012.04.050
- [9] HORVATH, Joan. A Brief History of 3D Printing. In: Mastering 3D Printing. 2014. Apress, Berkeley, CA. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-1-4842-0025-4_1
- [10] FANTA, Michal. Základy 3D TISKU. EARCH.cz [online]. 18. květen 2020 [cit. 5. březen 2023]. Dostupné z: <https://www.earch.cz/technologie/clanek/zaklady-3d-tisku>
- [11] What is 3D printing? how does a 3D printer work? learn 3D printing. 3D Printing [online]. 26. leden 2023 [cit. 29. květen 2023]. Dostupné z: <https://3dprinting.com/what-is-3d-printing/>
- [12] Jetted Photopolymer. Custompart.net [online]. [cit. 5. březen 2023]. Dostupné z: <https://www.custompartnet.com/wu/jetted-photopolymer>
- [13] Fused Deposition Modeling. Custompart.net [online]. [cit. 17. květen 2023]. Dostupné z: <https://www.custompartnet.com/wu/jetted-photopolymer>

- [14] HP 3D jet fusion 4200 - kommerzieller & amp; industrieller 3D-drucker: Offizielle HP® webseite. Deutschland [online]. [cit. 2. květen 2023]. Dostupné z: <https://www.hp.com/de-de/printers/3d-printers/products/multi-jet-fusion-4200.html>
- [15] Materials guide. Simplify3D Software [online]. 21. červen 2019 [cit. 2. květen 2023]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/resources/materials-guide/>
- [16] Original Prusa SL1S speed 3D tiskárna + CW1S. Prusa3D by Josef Prusa [online]. [cit. 2. květen 2023]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/cs/produkt/original-prusa-sl1s-speed-3d-tiskarna-cw1s/>
- [17] AHN, Dong-Gyu. Directed energy deposition (DED) process: State of the art. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology. 2021. Vol. 8, no. 2, p. 703–742. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s40684-020-00302-7>
- [18] Additive manufacturing: Revolutionizing industries around the world. Fabheads [online]. 19. červenec 2021 [cit. 12. duben 2023]. Dostupné z: <https://fabheads.com/blogs/additive-manufacturing-revolutionizing-industries/>
- [19] SHIN, Eun Joo, Yang Sook JUNG, Chi Ho PARK a Sunhee LEE. Eco-friendly TPU/PLA blends for application as shape-memory 3D printing filaments. Journal of Polymers and the Environment [online]. 2023. Dostupné z: [doi:10.1007/s10924-023-02799-w](https://doi.org/10.1007/s10924-023-02799-w)
- [20] LYE, Gerard. Mercedes-Benz to launch three dedicated all-electric platforms. Paul Tan's Automotive News [online]. 8. září 2021 [cit. 21. duben 2023]. Dostupné z: <https://paultan.org/2021/07/23/mercedes-benz-to-launch-three-dedicated-all-electric-platforms-from-2025-mb-ea-amg-ea-and-van-ea/>
- [21] COVESTRO. Bayblend® FR3021 R30. Covestro AG [online]. [cit. 10. duben 2023]. Dostupné z: https://solutions.covestro.com/en/products/bayblend/bayblend-fr3021-r30_00021320-05125661?SelectedCountry=US
- [22] SOVA, Miloš. Polyacetál (polyoxymethylén) - POM. Techport [online]. 6. únor 2015 [cit. 29. květen 2023]. Dostupné z: <https://www.techportal.cz/33/polyacetal-polyoxymethylen-pom-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4EqQUkSFod1GxHNRpFn129vs/>
- [23] PHYSIMETER® 906 USB. ERICHSEN [online]. [cit. 25. květen 2023]. Dostupné z: <https://www.erichsen.de/en-gb/products/materials-testing/mobile-measuring-systems/physimeter-r/physimeter-r/physimeter-r-906-usb-6>
- [24] Mercedes-Benz C-Class (W205) 2015 - 2021 owners manual: Adjusting the front seat mechanically and electrically. Mercedes-Benz C-Class Manuals [online]. [cit. 25. květen 2023]. Dostupné z: https://www.mersec.net/52/adjusting_the_front_seat_mechanically_and_electrically.html
- [25] Nanoparticle jetting (NPJ). Voxelmatters [online]. 11. březen 2019 [cit. 15. květen 2023]. Dostupné z: <https://www.voxelmatters.com/additive-manufacturing/am-technologies/what-is-nanoparticle-jetting/>