



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

**ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ,
PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE**

**Aplikace inovativních způsobů výroby při reverzním
inženýrství**

Diplomová práce

Autor: Bc. Petr Machač

Vedoucí práce: Ing. Jan Šimota

Studijní obor: Výrobní inženýrství

Praha 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Machač** Jméno: **Petr** Osobní číslo: **460009**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výrobní inženýrství**
Specializace: **Bez specializace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Aplikace inovativních způsobů výroby při reverzním inženýrství

Název diplomové práce anglicky:

Application of innovative production methods in reverse engineering

Pokyny pro vypracování:

Definice a problematika základních pojmů RE
Způsoby získávání mraku bodů a práce s daty
Nové možnosti v aditivních technologiích
Realizace typového příkladu pro využití ve výrobním prostředí

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jan Šimota, ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **30.04.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **29.07.2021**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Jan Šimota
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně a uvedl jsem všechny použité zdroje a literaturu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon). Souhlasím také s případnou publikací výsledků bakalářské práce nebo její podstatné části, pokud budu uveden jako její spoluautor. V Praze dne 29.7. 2021

V Praze dne

.....

Bc. Petr Machač

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu mé diplomové práce Ing. Janovi Šimotovi za jeho vedení, rady a zajištění technologií při tvorbě mé diplomové práce. Rád bych také poděkoval Jakubovi Syrovátkovi, za jeho rady.

Abstrakt

Práce se zaměřuje na technologie využitelné při reverzním inženýrství. Skládá se z rešersní a praktické části. Teoretická část se zaměřuje na způsoby získávání dat a jak tato data upravovat. Práce se také věnuje aditivním technologiím a jejich využití. Praktická část je zaměřena na aplikaci moderních technologií reverzního inženýrství na reálně využitelné součásti.

Abstract

This diploma thesis deals with technologies usable in reverse engineering. The work consists of theoretical research and practical part. The theoretical part focuses on ways of obtaining data and how to modify the data. The work also deals with additive technologies and their use. The practical part is focused on the application of modern reverse engineering technologies to realistically usable components.

Obsah

Seznam použitých zkratk	8
1 Úvod	9
2 Reverzní inženýrství	10
2.1 Procesy reverzního inženýrství a způsoby získávání dat	10
3 Snímací systémy	12
3.1 Souřadnicové měřicí stroje.....	12
3.2 Mostové souřadnicové měřicí stroje	14
3.3 Portálové souřadnicové měřicí stroje	15
3.4 Stojanové souřadnicové měřicí stroje	15
3.5 Měřicí ramena	15
3.6 Laser scanner.....	16
3.7 Počítačová tomografie.....	17
3.8 Optické snímání	18
4 Aditivní výroba	20
4.1 Přehled technologií 3D tisku.....	22
4.1.1 SLS - Selective Laser Sintering	22
4.1.2 DMLS – Direct Metal Laser Sintering.....	23
4.1.3 SHS – Selective Heat Sintering.....	23
4.1.4 BJ – Binder Jetting	24
4.1.5 MJP – Multijet-printing.....	24
4.1.6 FMD – Fused Deposition Modeling.....	24
4.1.7 SLA – Stereolithography.....	26
4.1.8 DLP – Digital Light Processing	26
4.1.9 LOM – Laminated Object Manufacturing	27
4.1.10 Shrnutí technologií.....	28
4.2 Běžné materiály pro 3D tisk.....	29
4.2.1 PLA	30
4.2.2 PET/PETG	30



4.2.3	ABS	31
4.2.4	ASA	31
4.3	Základní kompozitní materiály pro 3D tisk	32
4.3.1	Uhlíková vlákna	33
4.3.2	Skelná vlákna	34
4.3.3	Aramidová vlákna	34
4.3.4	Hybridní tkaniny	35
4.3.5	Porovnání vyztužujících vláken	36
4.4	Mechanické vlastnosti kompozitních materiálů	37
4.4.1	Anizotropie	37
4.4.2	Fázové rozhraní vlákno a matrice	37
4.4.3	Závislost modulu pružnosti v tahu na úhlu vlákna	38
4.4.4	Delaminace	39
5	Aplikace reverzního inženýrství	40
5.1	Získání 3D dat – skenování	41
5.1.1	Příprava dílu před skenováním	41
5.2	Zpracování a úprava naskenovaných dat	45
5.3	Převod na objemové těleso	49
5.4	Úprava dílu v CAD programu	50
5.5	Zkušební tisk	52
5.6	Výběr materiálu	53
5.7	Finální tisk a jeho příprava	56
5.8	Postprocessing	60
6	Závěr	62
7	Zdroje	64
	Seznam obrázků	68
	Seznam tabulek	69

Seznam použitých zkratk

2D	Dvoudimenzionální
3D	Trojdimenzionální
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
ASA	Akrylonitril-styren-akrylát
BJ	Binder Jetting
CAD	Computer-aided design
CAM	Computer aided manufacturing
CT	Computed Tomography
DLP	Direct Metal Laser Sintering
DMLS	Digital Light Processing
FMD	Fused Deposition Modeling
HSHT	High-strength high-temperature
IGES	Initial Graphics Exchange Specification
LOM	Laminated Object Manufacturing
MJP	Multijet-printing
PET	Polyethylentereftalát
PETG	Polyethylentereftalát glycol
PLA	Polylaktid
SHS	Selective Heat Sintering
SLA	Stereolithography
SLS	Selective Laser Sintering
SMS	Souřadnicové měřící stroje
STL	Standard Triangle Language
STP/STEP	Standard for the Exchange of Product Data
UV	Ultraviolet

1 Úvod

Reverzní inženýrství je obor, který se v závislosti na používaných technologiích stále vyvíjí. Nové technologie přinášejí do oboru větší možnosti a lepší kvalitu získávání dat z objektů, jejich následné zpracování a případně i výrobu dílů. Reverzní inženýrství je také závislé na inovaci softwarů, které jsou při procesu zapotřebí. V dnešní době je reverzní inženýrství založené na digitalizaci dat objektu a jejich zpracování. K tomu se používají různé druhy snímacích přístrojů a softwarů.

Práce se zabývá reverzním inženýrstvím a moderními technologiemi, které v tomto procesu lze využít. Teoretická část se skládá z přehledu technologií, které se používají na získávání 3D dat z původních dílů a přehledu aditivních technologií. V práci je uveden přehled běžných i kompozitních materiálů, které se používají pro aditivní technologie. V souvislosti s materiály je v teoretické části kapitola, která se věnuje mechanickým vlastnostem kompozitních materiálů používaných pro 3D tisk.

Cíl práce je aplikovat postup reverzního inženýrství a moderní technologie na výrobou dílu, který by byl využitelný ve výrobě. Jako díl pro tuto práci byl zvolen manipulátor, který je široce využíván ve výrobních závodech automobilek. Takto vyrobený díl by nahradil stávající manipulátor. To přispěje k výraznému snížení pořizovacích nákladů. Vtvořený model nového manipulátoru bude k dispozici konstruktérům a bude možnost ho upravovat tak, aby bylo možné ho použít i tam, kde by jinak manipulátor nebylo možné použít. Manipulátor vyrobený z moderních kompozitních materiálů by měl být výrazně lehčí oproti původnímu dílu. Další výhodou je, že v případě poškození jedné z částí manipulátoru se nebude muset objednávat celý nový manipulátor, ale bude stačit pouze vytisknout poškozenou část a tím se výrazně sníží náklady na opravu, respektive pořízení nového dílu.

2 Reverzní inženýrství

Reverzní inženýrství znamená obrácený proces oproti procesu inženýrskému. Jedná se tedy o zpětnou analýzu výrobku. Objekt je navrhován z již hotového dílu, nikoliv z předem daných vstupních požadavků. Z hotového výrobku, který má být vyroben tímto procesem, je tedy zapotřebí získat co největší možný počet informací, které budou dále sloužit k jeho výrobě. Jako zkoumaný objekt si lze představit téměř vše, co je zapotřebí vyrobit znovu – strojní součástky, díly automobilu nebo letadel, součástky do výpočetní techniky, softwaru atd. Důležité informace o výrobku tak jsou například: jeho funkce, vlastnosti, materiál, postup výroby a další. [1]

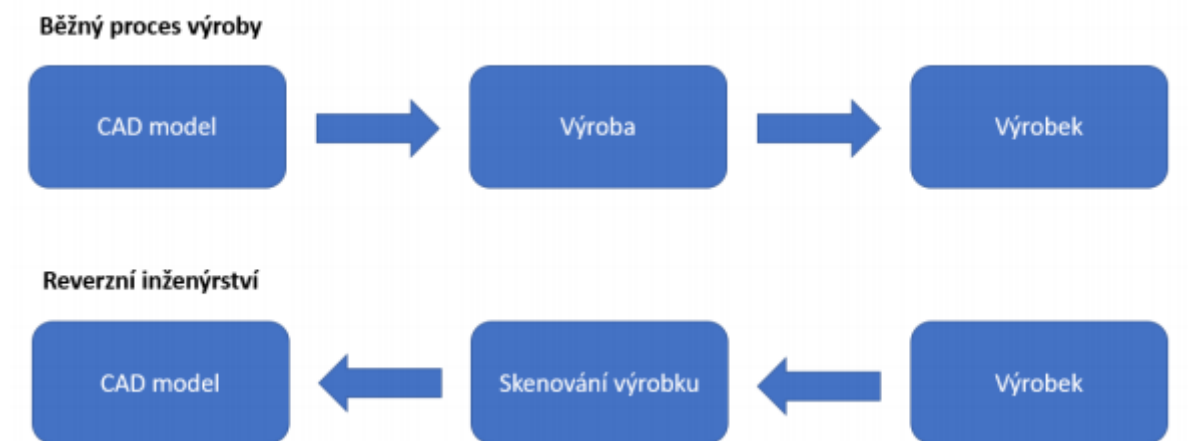
Procesem zpětného inženýrství procházejí například díly, ke kterým neexistuje výkresová dokumentace a je zapotřebí jejich výroba. Reverzní inženýrství se také aplikuje na díly, které je zapotřebí inovovat, ale nejsou k nim k dispozici žádná data. Dalším z možných odvětví, kde je zapotřebí tohoto procesu, je biomedicína. Zde se proces využívá k výrobě lidských implantátů, jako jsou třeba kloubní náhrady. Ve stavebním průmyslu se používá pro rekonstrukci 3D modelů velkých staveb. V neposlední řadě je proces používán ve filmovém a herním průmyslu, který v této době prochází velkým vývojem. [2]

Na konci tohoto procesu by měl být návrh (případně přímo výrobek), který lze použít k výrobě daného předmětu a může vést k jeho případnému vylepšení nebo i k jednoduššímu/levnějšímu procesu výroby. Nemusí se tak vždy jednat přímo o kopii. [3]

Kvůli tomu, že z procesu vystupuje často velice podobný výrobek, je zde zapotřebí dodržovat právní systém. Při překročení těchto právních hranic by se mohlo jednat například o průmyslovou špionáž nebo porušení práv duševního vlastnictví. V českém právu upravuje reverzní inženýrství autorský zákon (121/200 Sb.). [3]

2.1 Procesy reverzního inženýrství a způsoby získávání dat

Při získávání dat pro výrobu způsobem reverzního inženýrství je důležitý proces získávání 3D dat. Data se získávají snímáním souřadnic objektu v prostoru vhodným zařízením. Souřadnice je velice často nutné poupravit a zpracovat k optimalizaci a přehlednosti. Tato data se pak pomocí softwarů převedou na plošný nebo objemový digitální model. Model pak může dále sloužit jako vstupní data pro další softwaru typu CAD/CAM. [4]



Obrázek 1 Proces reverzního inženýrství [5]

Kroky při získávání dat pro digitální model jsou:

- 1) Získávání souřadnic objektu (skenery) – výsledkem je tzv. mrak bodů. [4]
- 2) Úprava získaných dat ze skenování – provádí se filtrace chybně nasnímaných bodů, optimalizace polygonální sítě. Výsledkem jsou jemná data. [4]
- 3) Možnost použití dat pro:
 - a. 3D plošný nebo objemový model, [6]
 - b. porovnání naskenovaných dat s CAD daty nebo jiným skenem, [6]
 - c. tisk na 3D tiskárně. [6]

3 Snímací systémy

Při výběru skenovací metody je třeba brát v úvahu vlastnosti skenovaného dílu, jaká data chceme ze skenování získat a také to, jak kvalitní data potřebujeme. Například musíme brát v úvahu tvarovou složitost dílu, drsnost a emisivitu povrchu, stupeň detailu, a jestli potřebujeme informace o vnitřní struktuře dílu. Při nepříznivých vlastnostech povrchu pro bezkontaktní skenování lze povrch dílu například nastříkat křídou a tím zlepšit podmínky skenování. [4], [5]

Skenery, kterými získáme mrak bodů, lze rozdělit do dvou hlavních skupin – dotykové a bezdotykové. Další dělení je pak možné na základě toho, pomocí kterého přístroje měření probíhá. [4], [5]

- 1) Dotykové snímání – Sonda je v kontaktu s povrchem výrobku.
 - a. Digitální – Při snímání je kontakt sondy s povrchem výrobku přerušován a výsledné plochy jsou dopočítány softwarem.
 - b. Analogové – Při snímání je kontakt sondy s povrchem výrobku bez přerušení. [4]
- 2) Bezdotykové snímání
 - a. Laserové snímání – Funguje na principu odrazu laserového paprsku od výrobku. Záleží tak na odrazivosti (emisivitě) povrchu. S vyšší rychlostí snímání klesá kvalita skenování. [4]
 - b. Optické snímání – Součást je snímána z více úhlů a pomocí softwaru je následně vytvořena plocha. [4]
 - c. Ultrazvukové snímání – Skenování probíhá pomocí ultrazvukové sondy, která generuje ultrazvukový signál, který prochází dílem a je následně detekován a převeden do souřadnic. [4]
 - d. Rentgenové snímání (CT) – Funguje na principu rentgenového záření, které je vysíláno na výrobek. [4]

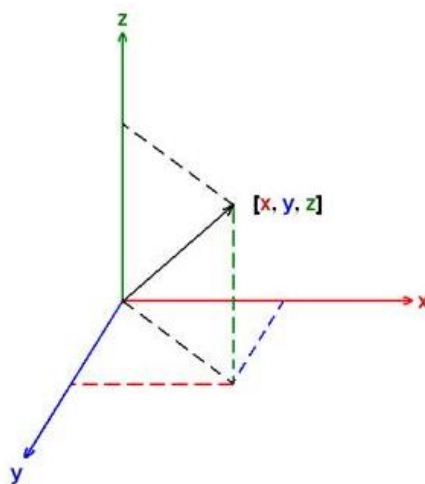
Technologii je nutné volit s ohledem na daný výrobek, protože každá metoda má jinou oblast využití a jiné výhody a nevýhody. [5]

3.1 Souřadnicové měřící stroje

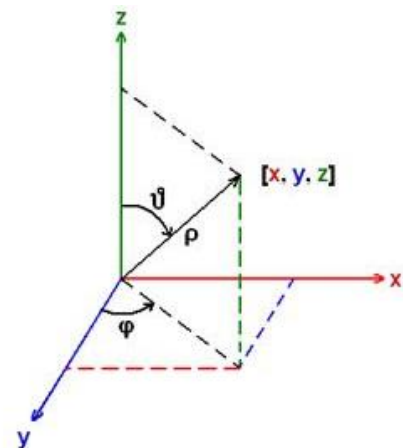
Mezi velmi rozšířené metody patří například měření souřadnicovými měřicími stroji (SMS), kterými lze měřit kontaktně i bezkontaktně. Je možné je využít na široké spektrum

výrobních. Těmito stroji lze také měřit i složitější tvarové plochy a například také souosost děr. Díky tomu, že stroje měří ve všech třech osách, dokážou změřit na jedno upnutí více požadovaných parametrů. Tím se dá předejít některým nepřesnostem v měření. [7]

Souřadnicové měřicí stroje, jak už název napovídá, využívají pro definici nasnímaných bodů v prostoru souřadnicový systém. Nejvíce používaný je kartézský souřadný systém, který používá tři délkové rozměry v osách x , y , z . S tímto systémem pracují například mostové, portálové a stojanové měřicí stroje. Měřicí ramena ale využívají sférický souřadný systém, který popisuje pozice bodů pomocí dvou úhlů a jednoho délkového rozměru. Často se využívá toho, že moderní SMS dokáží pracovat s CAD modely, což umožňuje rychlou kontrolu a porovnání naměřených bodů reálné části s CAD modelem. [7]



Obrázek 2 Kartézské souřadnice v prostoru [7]



Obrázek 3 Sférické souřadnice v prostoru [7]

3.2 Mostové souřadnicové měřicí stroje

Tento typ stroje patří mezi nejrozšířenější souřadnicové měřicí stroje. Jsou využívány také k laboratorním účelům, protože se jedná o velmi přesné stroje. Základ stroje je velká granitová deska, která slouží jako stabilní základ pro pracovní prostor měření. Pohyb ve všech třech osách je uskutečňován pohybem mostu po základně, pohybem pinoly po mostě a pohybem sondy na pinole. [8]



Obrázek 4 Mostový souřadnicový měřicí stroj Zeiss UC 850 [10]

Posuv může být automatický nebo manuální. Automatický posuv řídí program a manuální pohyb je řízen pomocí joysticku na ovládacím panelu stroje. Manuální posuv se používá především k ručnímu najetí k součástce nebo třeba ke kalibračnímu artefaktu. Jak již bylo řečeno, základem pro tento typ stroje je mostová konstrukce a mohutná granitová deska. To zajišťuje stroji velkou tuhost, a tudíž i vysoké přesnosti při měření. Přesnosti měření mohou být i méně než jeden mikrometr. Aby ale bylo možné těchto přesností dosáhnout, je zapotřebí dodržet další podmínky. Stroje jsou umístovány do oddělených měrových prostor, kde jsou usazené na speciální podloží, které musí tlumit okolní vibrace. Vlivem okolních vibrací by mohlo docházet k nepřesnostem při měření, což je nežádoucí. Dále je zapotřebí udržovat v místnosti, kde probíhá měření, stálou teplotu a vlhkost. Stroje dále musí být pravidelně kalibrovány a servisovány. [9]

3.3 Portálové souřadnicové měřicí stroje



Obrázek 5 Využití portálového SMS v leteckém průmyslu [11]

Konstrukce těchto měřicích strojů se velmi podobá mostovým měřicím strojům. Portálové souřadnicové měřicí stroje jsou vyznačovány tím, že mají velký pracovní prostor. Využívají se proto například pro měření karoserií, částí letadel, lodí nebo velkých dieselových motorů. [1]

3.4 Stojanové souřadnicové měřicí stroje

Stojanové souřadnicové měřicí stroje mají konstrukci, která je v podstatě polovina mostu mostového měřicího stroje. Výhoda toho je, že měřená součást je přístupná ze tří stran a měřicí stroj může být i méně prostorově náročný. Ovšem tento typ konstrukce má vliv na tuhost celého stroje. To se promítne do přesnosti, se kterou je stroj schopen měřit. Zatím co přesnosti u mostových měřicích strojů se pohybovaly i pod jedním mikrometrem, tak u stojanových SMS se může přesnost pohybovat i v řádu desítek mikrometrů. [12]



Obrázek 6 Stojanový SMS Zeiss Pro [12]

3.5 Měřicí ramena

Ramena jsou konstruována pro měření, kontrolu a digitalizaci v různých odvětvích průmyslu. Převádějí pohyb z rotačních snímačů na klasický výstup do souřadnic x, y, z. Jsou právě ten typ měřicích strojů, který pracuje ve sférických souřadnicích. Měřicí ramena jsou většinou malá a sestavená z ramen a kloubů. Počet kloubů je daný požadovaným stupněm volnosti, který bývá nejčastěji šest nebo sedm. Je-li měření prováděné sondou umístěnou na koci ramene, je postačující stupeň volnosti ramene šest. Použije-li se laser scanner, je zapotřebí sedmi stupňů volnosti. [1], [13]

Využití měřících ramen je hlavně tam, kde nelze měřenou součást z nějakého důvodu přenést. Proto jsou trubkové dílce ramen často vyrobeny z uhlíkových vláken, aby byla hmotnost celkové soustavy co nejmenší a díky tomu fyzická náročnost manipulace s ramenem menší. Každý kloubový spoj vnáší do měření nepřesnost a počet kloubů je tak přímo úměrný nepřesnosti měření. Celková chyba měření u měřících ramen



Obrázek 7 Použití měřícího ramena [14]

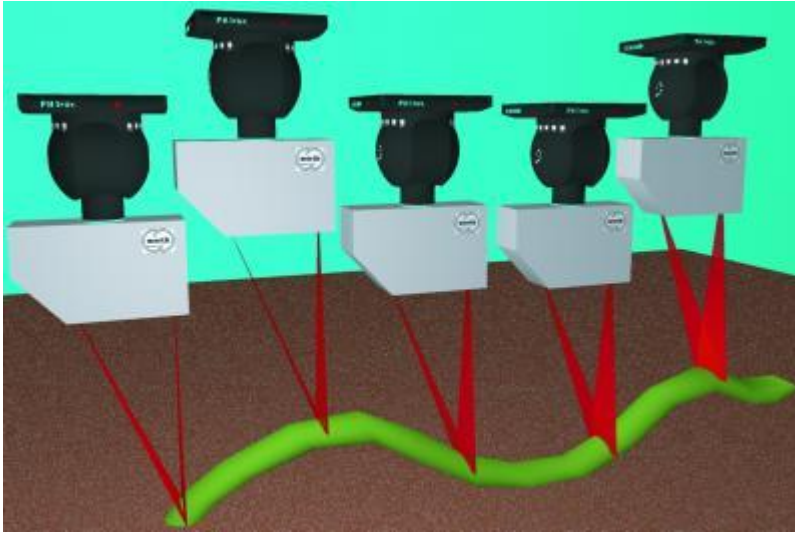
je větší než chyba u klasických souřadnicových měřících strojů. [1], [13]

3.6 Laser scanner

Laser scanner je možné namontovat na měřící ramena i na souřadnicový měřící stroj. Skenováním dochází k rekonstrukci 3D modelu skenovaného dílu. Skenery se rozšířily mimo automobilový průmysl, pro který byly původně vyvinuty, díky své rychlosti, nízkým nákladům a relativně dobré přesnosti. Rozsah přesností je přibližně v řádu jednotek až desítek mikrometrů. [1], [15]

Princip měření je založen na triangulační metodě získávání bodů. Základem této metody je zdroj záření, povrch měřeného tělesa a jeden snímač. Zdroj vysílá linii laserového paprsku, která dopadá na součást a kopíruje její tvar. Snímač pak vyhodnotí vzdálenost mezi zdrojem a objektem. Metoda pracuje s celou linií bodů, proto je měření rychlejší – dokáže naměřit několik bodů najednou. Problém proto nastává, když je povrch součásti lesklý. Při nevhodném povrchu pro skenování dochází k různým odrazům paprsků a vznikají tak chybové body. Problém může nastat také u skenované součásti, kde sken prochází přes povrch, který je ze dvou různých materiálů. Velký problém je skenování neupraveného skleněného povrchu, který paprsek zalomí. Využívá se křídového prášku, který se nanese na povrch skenovaného objektu a tím se zlepší vlastnosti měřeného povrchu. Musíme ale počítat s tím, že i tenká vrstva křídového

prášku vnese do měření určitou chybu, protože tato tenká vrstva může přidat řádově i několik mikrometrů navíc. [1], [15]



Obrázek 8 Skenování plochy-kopírování povrchu [15]

3.7 Počítačová tomografie

Pro tuto metodu se často používá zkratka, která je nám známa také z prostředí medicíny – CT (Computed Tomography). Jedná se o metodu, díky které za pomoci rentgenového záření je možné zkoumat vnější, ale hlavně vnitřní strukturu objektů. Ve vyrobených dílech mohou být přítomné defekty dílů, které se vyskytují uvnitř dílu. Počítačová tomografie umožňuje nedestruktivním způsobem zkoumat vnitřní defekty. [16], [17]



Principem je pořizování 2D snímků v 360° sledu. Obrázek 9 kontrola plastových dílů pomocí CT [17]

V podstatě jde o rekonstrukci 3D objektu, který se skládá z 2D rentgenových snímků, které jsou pořizovány v řezu jednotlivých částí dílu. Výhodou metody je, že nezáleží na složitosti dílu. Limitující je hlavně šířka materiálu v určitém směru. Maximální tloušťka pak závisí na materiálu prozařovaného dílu. Nevýhodou je také to, že je její použití omezeno velikostí součástí, protože metoda je velmi časově i energeticky náročná. Také pořizovací cena zařízení je vysoká a zároveň jsou kladeny vysoké požadavky na obsluhu. Počítačovou tomografií lze zařadit kromě laboratorního využití i do automatizované výroby. [16], [17]

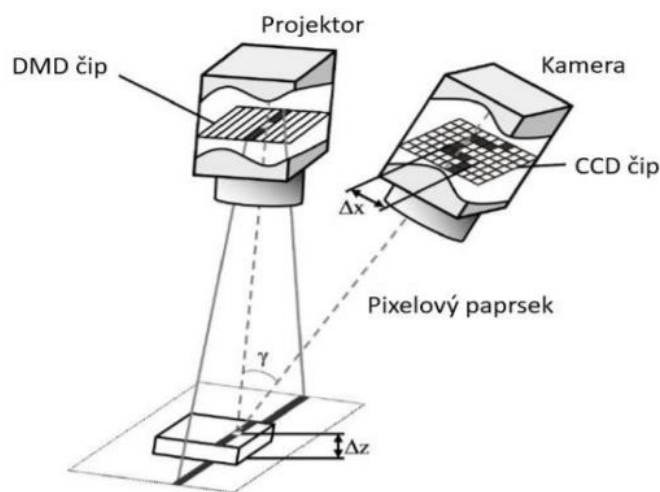
3.8 Optické snímání

Optické snímání se dělí na pasivní a aktivní podle toho, zda je použit zdroj osvětlení. U aktivních metod je zdrojem osvětlení laser, diody nebo projektory. Optické skenery, které patří do aktivních metod, se využívají například v průmyslovém odvětví. Tyto skenery jsou založeny na třech různých měřících principech a těmi jsou čas letu, fázový posun a aktivní triangulace. [18]

Nejvíce využívaná u běžných měřících přístrojů v průmyslovém odvětví je aktivní triangulace. Podle druhu osvětlovacího paprsku se dělí na:

- světelná paprsek (1D triangulace),
- světelný pruh (2D triangulace),
- strukturovaný světelný svazek (3d triangulace). [18]

V posledních letech se stala projekce strukturovaného světla jednou z nejpoužívanějších, a to díky tomu, že rychlost skenování je časově méně náročná. Uplatňuje se například při skenování částí člověka, v herním a uměleckém odvětví a ve strojním průmyslu. V průmyslu se používá k měření součástí a v reverzním inženýrství. Hlavní předností této metody je rychlost nasbírání dat z měřeného objektu a získání celoplošné rekonstrukce objektu. Takovýto měřicí přístroj se skládá z projektoru, jednotky pro získání záznamu obrazu (CCD kamery) a procesní a analyzační jednotky (PC). Metoda funguje na principu triangulace, která vychází ze známé vzdálenosti mezi dvěma body (kamerami) a úhlu od přímky mezi nimi. []



Obrázek 10 Proces získání informace pomocí strukturovaného světla [18]

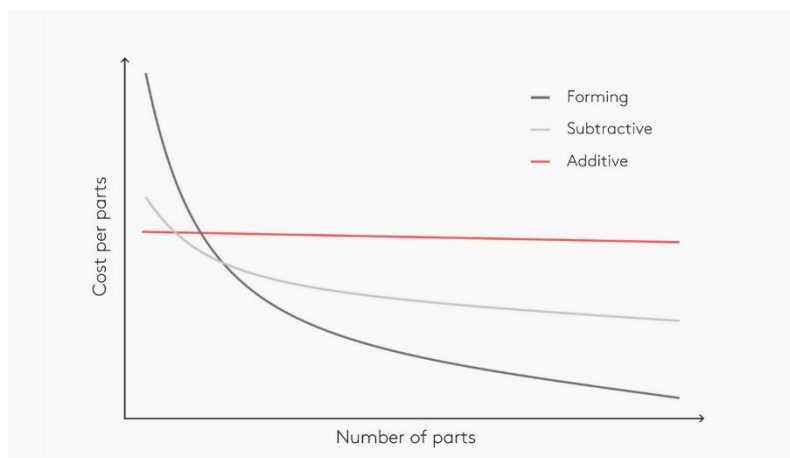
Proces sběru dat z měřeného objektu metodou pruhové projekce se uskutečňuje v následujících krocích:

- promítnutí vzoru strukturovaného světla na měřený objekt,
- zachycení kamerami zdeformovaný vzor,
- výpočet počítačem pomocí algoritmů k vyhodnocení zachycených informací a vytvoření mračna bodů,
- úprava a zpracování naměřených dat. [18]

4 Aditivní výroba

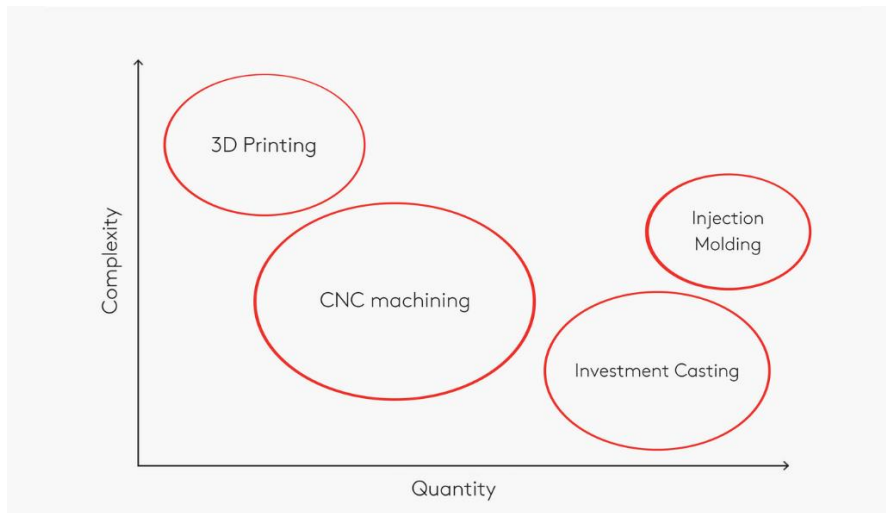
Aditivní výroba je opakem výrobního procesu obráběním. Zatímco u obrábění vzniká výrobek postupným odebráním materiálu z polotovaru, při aditivní výrobě vzniká výrobek přidáváním jednotlivých vrstev materiálu na sebe. Data pro výrobu jsou získávána ze 3D modelu dílu. Ten je počítačovým softwarem „rozřezán“ (tzv. slicerem) na jednotlivé vrstevné vrstvy, které pak budou na sebe postupně nanášeny. Stejně jako softwarů pro konstruování (CAD) je celá řada, tak i slicerů je široká škála. Velmi často každý výrobce má ke své technologii i svůj vlastní slicer, který může být buď ve formě klasického programu pro počítač nebo může být slicer součástí driveru, jako tomu je u Markforged. [19]

Výhodou aditivní výroby je možnost vyrábět díly s velkou tvarovou složitostí, které by konvenční metodou bylo velmi složité zhotovit nebo by to ani nebylo možné. Další velkou výhodou metody je rychlost procesu výroby. Odpadá zde nutnost technologického postupu pro samotnou fázi tisku. Tento druh technologie je tak často využíván k výrobě prototypů – rapid prototyping. Co se týká ekonomičnosti, jsou aditivní technologie výhodnější pro kusovou výrobu. S rostoucí sériovostí klesá ekonomičnost technologie. S touto technologií se může konstruktér do určité míry odpoutat od přizpůsobování tvaru výrobku v souvislosti s jeho vyrobiteľností. To má totiž často za následek, že konstruktér může být vyrobiteľností tak omezen, že to může mít v konečném důsledku vliv i na funkčnost dílu, který bude muset být upraven tak, aby byl vyrobiteľný. Může se například stát, že dojde k předimenzování pevnosti výrobku a tím se může zvýšit jeho hmotnost. [20]



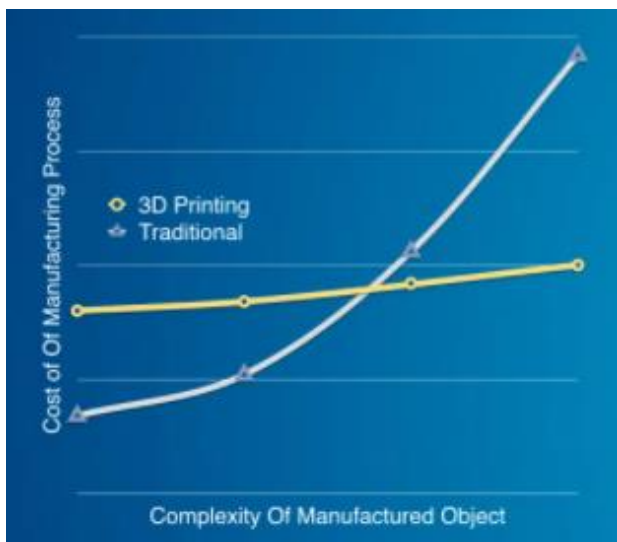
Obrázek 11 Ekonomičnost technologií [21]

Při použití 3D tištěného dílu musíme brát v úvahu anizotropii. To znamená, že takto vyrobený díl bude mít nerovnoměrné mechanické vlastnosti. Volíme-li, jaký druh technologie pro výrobu dílu použijeme, musíme počítat s počtem vyráběných kusů – bude výroba kusová, nebo sériová a také musíme brát v úvahu složitost výrobku. Jaké technologie jsou vhodné pro danou kombinaci složitosti a sériovosti, je znázorněno na obrázku 12. [22]



Obrázek 12 Vhodné technologie v závislosti na počtu dílů a jejich složitosti [21]

Podle tohoto obrázku lze vidět, že 3D tisk je vhodný pro malé množství výrobků, které mají složitý tvar. Pro výrobky složitějších tvarů s vyšší sériovostí je zase vhodná technologie vstřikování. [22]



Obrázek 13 Porovnání ekonomičnosti technologií [23]

4.1 Přehled technologií 3D tisku

V posledních letech se v technologii 3D tisku udělal velký pokrok. Jak již bylo zmíněno, tak technologie 3D tisku je aditivní metoda, která je schopná vytvořit požadovaný model skládáním vrstev materiálu na sebe. Vychází se z 3D dat, které jsou buď vytvořeny vymodelováním součásti, nebo její naskenováním. Model je převeden na formát souboru STL. Soubor v tomto formátu je dále vložen do sliceru, ve kterém je rozdělen na jednotlivé vrstvy tak, jak se budou postupně skládat na sebe. Výstupními daty ze sliceru je G-kód, podle kterého tiskárna bude tisknout. [24]

3D tisknout je možné několika různými způsoby. Každá technologie je vhodná pro jinou oblast použití. Liší se cenou, materiálem, formou vstupního materiálu, postupem vytváření vrstev atd. [24]

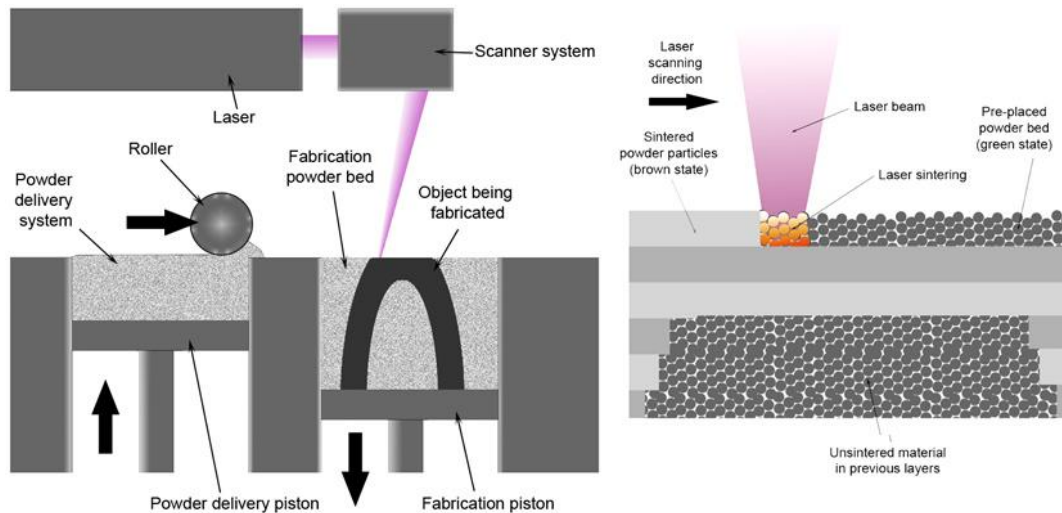
4.1.1 SLS - Selective Laser Sintering

Česky Selektivní laserové spékání. Jedná se o jednu z práškových metod. To znamená, že materiál, ze kterého bude požadovaný výrobek vznikat, je ve formě prášku. Prášek je pak zahříván laserovým paprskem, který vyvine dostatečně velkou energii na to, aby prášek roztavil a tím postupně vznikaly kontinuální na sebe navazující vrstvy. [23], [24]

Princip je takový, že na podložku nanese tenkou vrstvu prášku, která je laserem roztavená a tím vzniká jedna z mnoha vrstev. Minimální tloušťka vrstvy je cca 0,06 mm. Na hotovu vrstvu se pak nanese další tenká vrstva prášku a proces se opakuje.

Materiály: keramika, plasty (nylon, ABS, PET...) [24]

Výhodou technologie je nízká cena práškového materiálu a možnost nevyužitý prášek recyklovat. Naopak nevýhodou je vysoká pořizovací cena stroje (cca 5 milionů Kč) a nedokonalý povrch vytištěného výrobku. Další nevýhodou je skutečnost, že kvůli práškové formě materiálu, není možné vytvářet dutiny. Vždy by se měl nechat prostor (díra) pro vysypání přebytečného prášku z vnitřní části výtisku. [24], [25]



Obrázek 14 Technologie SLS [25]

4.1.2 DMLS – Direct Metal Laser Sintering

Princip metody DMLS je v podstatě stejný jako u SLS technologie. Je založen na tisku kovových materiálů, které lze dále obrábět a zpracovávat. Rozdíl je ve výkonu laseru, protože aby byl kovový prášek přetaven, je zapotřebí podstatně vyšší teploty než u plastů. Dalším rozdílem je použití ochranné atmosféry plynu argonu při tisku z kovového prášku. Minimální tloušťka vrstvy je cca 0,02 mm. [24]

Materiály, které se používají při této technologii, jsou kovy: nerezová ocel, titan, bronz, inconel. [24]

Výhodou je možnost tisknout složité tvary bez použití podpěr s kvalitním povrchem a vysokým rozlišením. Nevýhodou je, podobně jako u SLS, vysoká pořizovací cena stroje, která je cca 10 milionů Kč. [24]

4.1.3 SHS – Selective Heat Sintering

Tato technologie byla patentována v roce 2002 a vlastní ji firma BLUE PRINTER. SHS je další práškovou metodou, ale na rozdíl od předchozích metod je prášek spékán topným tělesem. Na tiskovou plochu se nanese tenká vrstva prášku. Tisková hlava s topným tělesem spéká prášek v místech, kde se má tvořit výrobek. Po vytvrzení vrstvy se tisková hlava posune o velikost vrstvy a proces se opakuje. Minimální tloušťka vrstvy je cca 0,1 mm. Materiály používané pro SHS jsou hlavně PLA, ABS, PET a nylon. [24], [25]

Tímto principem je možné tisknout tvarově složité součásti, u kterých není potřeba používat podpurný materiál. Nevyužitý prášek je 100% recyklovatelný a pořizovací cena stroje je o řád nižší, než u předchozích metod (cca 300 tisíc Kč). [24], [25]

4.1.4 BJ – Binder Jetting

Technologii patentovanou roku 1993 vlastní firma 3D Systems. Jde o práškovou technologii, která spojuje materiál chemickým způsobem pomocí pojiva. Princip je takový, že se na pracovní stůl nanese vrstva materiálu v práškové podobě a je spojováno pojivem, které je na tenké vrstvy prášku vstříkováno z tiskové hlavy. Díl je pak vytvořen slepováním jednotlivých částic prášku. Minimální velikost vrstvy je cca 0,09 mm. Používané materiály prášku je keramika, hliník, nerezová ocel a různé kompozitní materiály. [24], [25]

Velkou výhodou technologie je výše zmíněný široký výběr materiálu a rychlost tisku. Díly vytištěné touto metodou nelze dále povrchově upravovat za účelem vylepšení mechanických vlastností. Pořizovací cena tiskárny je cca 6 milionů Kč. [24], [25]

4.1.5 MJP – Multijet-printing

Jde o další patentovanou technologii, která je vlastnictvím firmy 3D Systems. Multijet-printing je technologie, která je schopná vytvořit vícebarevný model o několika různých tuhostech. Metoda je patentována od roku 1991. [24], [25]

Princip je založen na nanesení prášku na pracovní prostor a spojování prášku pojivem stejně jako u předchozí metody (BJ). Prášek s naneseným pojivem je okamžitě vytvrzován UV zářením. Na takto vytvrzenou vrstvu se nanese další vrstva materiálu a proces se opakuje do úplného vytištění součásti. Firma 3D Systems si vyvíjí materiály speciálně pro tuto technologii. Jedná se o tzv. VisiJet M3 nebo VisiJet M5. Minimální tloušťka vrstvy je cca 0,016 mm. [24], [25]

Tímto způsobem se tiskou výrobky rychle, mají kvalitní a přesný povrch a disponují dobrými mechanickými vlastnostmi. Pořizovací cena tiskárny je cca 1,5 milionu Kč. [24], [25]

4.1.6 FMD – Fused Deposition Modeling

V dnešní době se jedná o jednu z nejrozšířenějších technologií 3D tisku. Využívá se hlavně pro tvorbu prototypů a funkčních vzorků výrobků. O rozšíření této technologie se také postarala česká firma Průša, která nabízí finančně dostupné 3D tiskárny, které si může pořídit i domů téměř každý. [25]

Výtisk vzniká nanášením roztaveného materiálu tryskou na tiskovou podložku a následně na předchozí vrstvy. Materiálů, které jsou používány pro FMD tisk, je velké

množství. Například: PLA, ABS, PC, PC-ABS, PET, nylon atd. Materiál se ve formě filamentu, který se natahuje do tiskové hlavy, kde je roztaven a pokládán na požadované místo. Minimální tloušťka vrstvy je cca 0,1 mm. [24], [25]



Obrázek 15 3D tiskárna Průša [25]

Fused Deposition Modeling má minimální množství nevyužitého materiálu při tisku. Největší množství odpadu tvoří materiál využitý na podpěry, které je zapotřebí po vytištění odstranit. Struktura výtisku je pak v těchto místech hrubá. Při použití kompozitních vláken je možné touto metodou dosahovat vyšších mechanických vlastností. Materiál přídatných vkládaných vláken je často karbon, kevlar nebo skelná vlákna. Rozmezí pořizovacích cen tiskáren tohoto typu je velmi široké. Záleží na technických parametrech tiskárny. Základní tiskárny lze pořídit i pod 20 tisíc Kč. Lepší tiskárny, které jsou schopné

vkládat kontinuální vlákna přídatného materiálu, se pak mohou pohybovat i ve stovkách tisíců korun. [24], [25]

V dnešní době právě díky možnosti vkládání kontinuálních vláken se metoda FMD dá využívat nejen na tisk prototypů, ale i na výrobu funkčních dílů. Vložením kontinuálních vláken do výtisku se zlepšují jejich mechanické vlastnosti. Materiálů přídatných vláken je dnes k dispozici více, a proto je možné najít vždy ten nejvhodnější materiál a docílit tak co nejlepších vlastností pro konkrétní aplikaci dílu. Tuto technologii u svých tiskáren nabízí například americká firma Markforged. [24], [25]

4.1.7 SLA – Stereolithography

Nejstarší a nejpřesnější metoda 3D tisku. Využívá se od roku 1987. Dnes již také velmi



Obrázek 16 Tiskárna Průša SLA s vytvrzovacím zařízením [25]

rozšířená. Materiál, ze kterého se tiskne, je tekutý fotopolymer (fotopolymerická pryskyřice). Výběr materiálu je omezen na fotopolymery kvůli principu tisku. Model se po vytištění musí dále vytvrzovat UV světlem, aby bylo dosaženo požadovaných mechanických vlastností. Minimální výška vrstvy je cca 0,01 mm. Metoda je velmi přesná až v řádech mikrometrů. [24], [25]

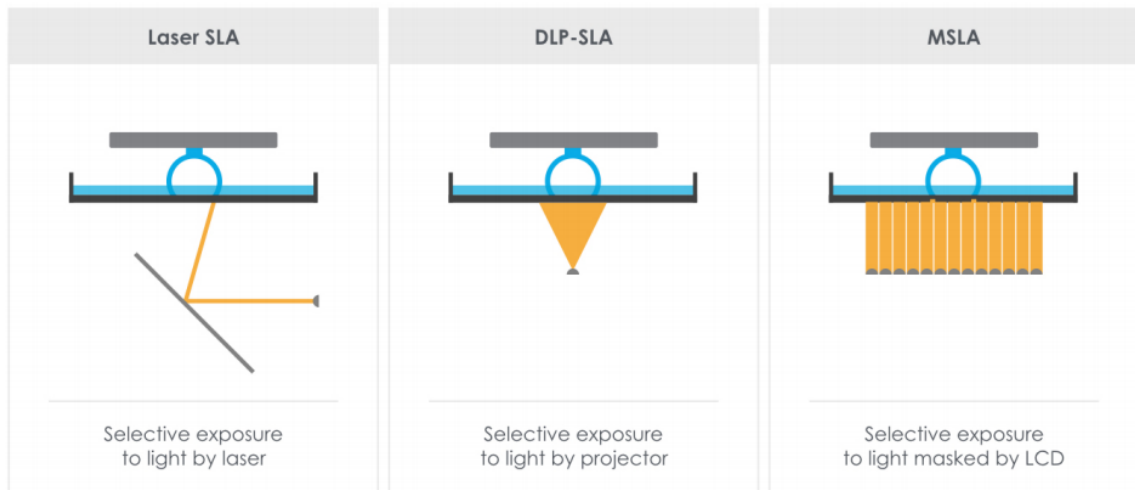
Technologie má dvě různé postupy, kterými tisk probíhá. [24]

1. Tisková plocha je na začátku tisku zcela ponořená do nádoby s tekutým fotopolymerem. Tato nádoba má průsvitné dno, kterým prosvítá UV světlo a vytvrzuje tak fotopolymer v požadovaných místech vrstvy. Po vytvrzení se tisková plocha vynoří o výšku vrstvy a proces se opakuje. [24]
2. Při druhém způsobu je tisková plocha naopak postupně ponořována do nádoby s fotopolymerem a paprsek působí shora. Paprsek vytvrdí materiál v požadovaných místech a pracovní plocha se s vytvrzenou částí ponoří o další výšku vrstvy do fotopolymeru. [24]

4.1.8 DLP – Digital Light Processing

Je alternativou předešlé technologie SLA, která také tiskne z tekuté pryskyřice. Patent byl prodán v roce 2012. Princip je podobný jako u SLA. Pryskyřice je vytvrzována UV světlem a vytváří vrstvu v požadovaném tvaru. Na rozdíl od SLA je osvětlená celá plocha jedné vrstvy speciálním projektorem. Tisk je rychlý a přesný. [24], [27]

Používá se pro tisk malých výrobků, kde je kladen důraz na detail. Minimální tloušťka vrstvy je cca 0,01 mm. Výroba je poměrně levná a pořizovací náklady na tiskárnu jsou přibližně 100 tisíc Kč. Po vytištění se výrobek musí dále dotvrdit kvůli dosažení požadovaných mechanických vlastností. Materiály použitelné pro tuto technologii jsou jako u SLA omezeny na fotopolymery. [24], [27]



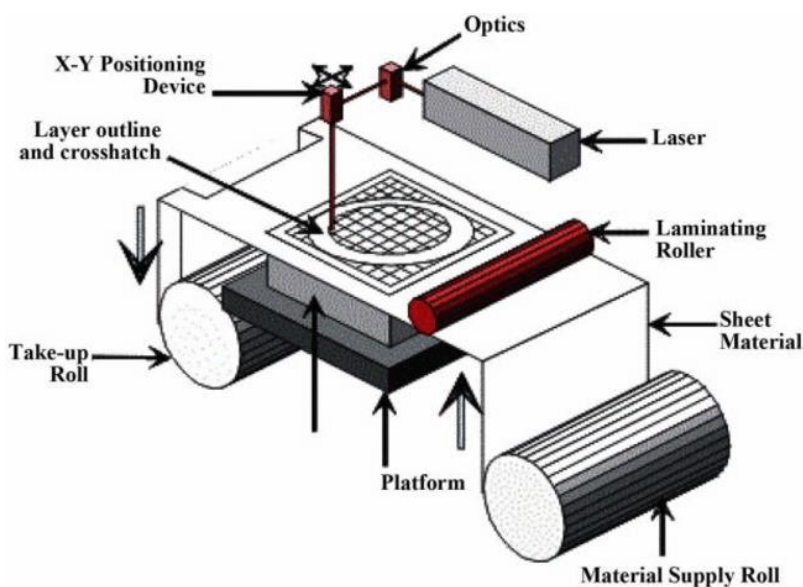
Obrázek 17 Princip tisku SLA, DLP a MSLA [28]

4.1.9 LOM – Laminated Object Manufacturing

Tato technologie pochází z Izraele. Patent na tuto technologii byl prodán v roce 1996. [24]

Vrstva je vyříznutá z fólie s materiálem, která je převíjena z jedné cívky na druhou přes pracovní plochu. Materiálem vrstvy je plast nebo papír. Vrstva je přilepena na předchozí vrstvu. Proces se opakuje do vytvoření požadovaného dílu. [24], [25]

Objevily se také zprávy o tiskárně, která pro tuto metodu tisku využívá v podstatě běžný kancelářský papír a lepidlo, kterým jsou vrstvy spojovány. To snižuje cenu výtisku. Ovšem předpokládaná cena stroje je kolem 750 tisíců Kč. [25]



Obrázek 18 Popis tiskárny s LOM technologií [29]

4.1.10 Shrnutí technologií

Jak je patrné z předchozích podkapitol, tak technologií 3D tisku je velká škála. Vhodnou technologii je potřeba vybrat na základě finanční dostupnosti, typu použití výtisků, požadované kvality výtisků a v neposlední řadě podle materiálu, který je tiskárna schopná používat. [30]

3D tisk se nepoužívá jen ve strojírenství. Dnes jsou na vzestupu tiskárny na „vytištění“ domů, které jsou tištěny z cementové směsi a dalších přísad (jako je například recyklovaná suť, ocel nebo skelná vlákna). Jedním z prvních experimentů proběhl v roce 2016 v Číně, kdy se povedlo vytisknout dům o rozloze přibližně 400 m² za 45 dní. Že se 3D tisk rychle vyvíjí, dokazuje i to, že v dnešní době se již podařilo vytisknout pětipodlažní bytový dům nebo set deseti domků, které se podařilo vytisknout za pouhý jeden den. [30]



Obrázek 19 Průběh 3D tisku domu [30]



Obrázek 20 Hotový 3D tištěný dům [30]

Obecně se 3D tisk vyvíjí tak, aby jeho použití nebylo cíleno jen na výrobu prototypů, ale aby výtisky byly i funkční díly. Proto se začíná pomalu rozšiřovat kovový 3D tisk. Cena tiskáren je ale vysoká (řádově statisíce dolarů) a zároveň se velmi rychle vyvíjí. Není tak zatím příliš rozšířený jako cenově dostupné tiskárny používající termoplasty. Mnoho firem odmítá vysokou investici do technologie, která bude za pár let zastaralá právě kvůli rychlému vývoji. Použití kovového tisku dává 3D tisku nové možnosti a širší oblast využití. Výrobci 3D tiskáren na kov jsou například americké firmy Markforged, Desktop metal a Hewlett-Packard. Například tiskárna od firmy Hewlett-Packard byla použita na výrobu titanových brzdových třmenů pro Bugatti Chiron. Řádově levnější alternativou pro výrobu funkčních dílů je 3D tisk kompozitních dílů a tiskárny, které tisknou díly z pryskyřice. [30]

4.2 Běžné materiály pro 3D tisk

Každý materiál je specifický svými fyzikálními a mechanickými vlastnostmi. Proto je důležité před tiskem materiál zvolit správně. Materiál musí splňovat požadavky na pro tisk a zároveň musíme vybrat takový typ materiálu, aby splnil všechna požadovaná kritéria. [31]

Důležité vlastnosti materiálu pro tisk jsou například teplota tisku, která musí být dostatečně vysoká tak, aby byl materiál ve stavu, kdy je ho tiskárna schopna nanášet v jednotlivých vrstvách a zároveň nebude materiál příliš téct a bude mít i po ztuhnutí potřebné vlastnosti. Nejčastěji se u plastových materiálů pohubujeme v rozmezí teplot 190-280 °C. Dalším důležitým parametrem, který se opět týká teploty, je teplota tiskové podložky. Při špatném nastavení teploty tiskové podložky může dojít například k odlepení od podložky nebo zdeformování výtisku. Pokud je nastavená teplota příliš malá, mohlo by se stát, že by filament chladl rychleji, než je zapotřebí a nemusel by se dobře přichytit k podložce, což by vedlo právě k tomu, že se výtisk odlepil od podložky. V případě, že by bylo odlepení tak velké, že by se výtisk posunul natolik, že by tisková hlava nenanášela materiál na přechodí vrstvu, dost pravděpodobně by místo požadovaného výtisku byl výsledek tzv. „špagetové monstrum“. Kdyby teplota podložky byla naopak příliš velká, tak by materiál nemusel chladnout dostatečně rychle na to, aby byl dostatečně ztuhlý a nastalo by tak zdeformování nebo zhroucení výtisku. Tyto deformace nastávají hlavně kvůli tepelné roztažnosti, kdy materiál s chladnutím nebo ochlazováním mění svůj tvar a objem. [31]

Materiály 3D vláken pro plastový 3D tisk jsou termoplasty, které v dnešní době mají převážně tloušťku 1,75 mm kvůli větší pružnosti. Dříve byla používána tloušťka 3 mm. [32]

Tabulka 1 Srovnání mechanických vlastností materiálů pro 3D tisk [33]

	ABS	PLA	PET	Polyamid	PC	ASA	UV resin
modul pružnosti v tahu [MPa]	1825	2521	1809	1015	2284	1306	2756
Pevnost v tahu [MPa]	29	45,3	42,3	30,4	29,3	23,9	51,7
Deformace na mezi pev. [%]	1,8	2,7	4,1	19	4,7	3,1	3,5
Napětí při porušení [MPa]	23,6	45	24,6	29,9	37,9	21,7	51,1
Deformace při porušení [%]	14,2	2,7	72,2	24,3	7	6,1	4

4.2.1 PLA

Celým názvem Polyactic acid (PLA) nebo česky kyselina polymléčná. Jedná se o nejčastěji používaný materiál pro domácí 3D tisk. Že je právě PLA nejrozšířenějším materiálem má hned několik důvodů. PLA má relativně malou tepelnou roztažnost, snadno se tiskne a výtisky jsou relativně tvrdé. Je vhodným materiálem i pro tisk větších rozměrů, protože PLA se na tiskové podložce nekrotí. Má také jednu velkou výhodu, která se v dnešní době masivního používání plastů velmi cení – PLA je biologicky odbouratelný. Vyrábí se totiž nejčastěji z kukuřičného škrobu a bramborového škrobu. Další výhodou PLA je, že je bez zápachu. To ocení hlavně uživatelé v domácím prostředí nebo lidé, kteří se nachází v kanceláři, kde tiskárna může tisknout. [34], [35]

Díky své zdravotní nezávadnosti se používá také na hračky nebo implantáty, které v těle vydrží jen pár let, než se rozpustí. Materiál je možné po zahřátí opět tvarovat. Po ztuhnutí je velmi tvrdý a zároveň křehký. Jeho nevýhodou je, že má větší sklony k pohlcování vlhkosti, což vede k jeho degradaci. Je tak vhodné materiál uchovávat v suchém prostředí. Výtisk z vlhkého materiálu může mít na povrchu bublinky. PLA rychle degraduje vlivem UV záření, proto není jeho použití vhodné do venkovního prostředí. [34], [35]

Pro tisk je doporučená teplota trysky 215 °C a teplota podložky 50-60 °C (hladká podložka). [34]

4.2.2 PET/PETG

Polyethylentereftalát (PET) je obecně nejrozšířenější materiál používaný v běžném životě. Nejvíce používaná pro 3D tisk je modifikace PETG, což je úprava klasického PET s příměsí modifikovaného glykolu. To snižuje jeho křehkost a tím zvyšuje odolnost proti nárazům. PETG je tak velmi houževnatý materiál s dobrou tepelnou odolností, proto je vhodný pro tisk mechanických částí. Na tiskové podložce se nekrotí a je tedy vhodný i pro větší výtisky. Například světově známý výrobce Prusa tiskne své tiskárny právě z PETG. Není tak náchylný na UV záření, jako je tomu u PLA, takže je vhodný jak pro vnitřní i vnější použití. [34], [35]

Pro tisk je doporučená teplota trysky 240 °C a teplota podložky 80-100 °C (hrubá podložka). [34]

4.2.3 ABS

Akrylonitrilbutadienstyren (ABS) je amorfní termoplastický kopolymer. Využívá se hlavně na díly, které musí odolávat vyšším teplotám (okolo 100 °C) a zároveň odolají mechanickému poškození. Je také odolný proti kyselinám, tukům, olejům a UV záření. Po vytisknutí se dá jeho povrch vyhladit acetonovými výparry, které povrch naleptají a tím se docílí lesklého a hladšího povrchu. Není ho vhodné acetonovým výparům vystavovat delší dobu, protože ABS je v acetonu rozpustný. Aceton také lze použít na spojení více výtisků dohromady. ABS je ropný produkt s obsahem příměsí syntetického kaučuku, což má za následek to, že při zahřívání se z něho uvolňují škodliviny. Proto je vhodné prostor, kde probíhá tisk, dobře odvětrávat. Není tak vhodný pro medicínské aplikace. Zároveň kvůli velkému smrštění při chladnutí není vhodný pro větší výtisky. Typickým produktem z PETG je LEGO. [35], [36]

Pro tisk je doporučená teplota trysky 255 °C a teplota podložky 100 °C. [35]

4.2.4 ASA

Jde o alternativu za ABS. Akrylonitril-styrén-akrylát (ASA) má výhodu, že odolává vyšším teplotám a je odolný proti UV záření. Zároveň nemá tak velkou tepelnou roztažnost jako má ABS. Je také mechanicky odolný a dobře tisknutelný. Kvalita tisku je také velmi dobrá a povrchová kvalita se dá zlepšit hlazením acetonem. [34], [35]

Pro tisk je doporučená teplota trysky 270-280 °C a teplota podložky 100-110 °C. [34]

4.3 Základní kompozitní materiály pro 3D tisk

Spolu s technologií 3D tisku se vyvíjejí i materiály, které jsou při tisku používány. Místo standardních vláken jako jsou PET, PLA, ABS se dnes využívají kompozitní vlákna. Kompozitní materiál jsou smíchané dva a více různých materiálů do jednoho tak, aby bylo docíleno požadovaných vlastností. Pro tisk kompozitních materiálů je vhodné používat kalenou trysku proto, že vyšší procento aditiva zdrsňuje vlákno a „měkkou“ trysku by tak mohlo poškodit. [36]

Druhů kompozitních materiálů pro 3D tisk je v dnešní době relativně mnoho. Je tak důležité dobře zvolit ten nejvhodnější pro danou aplikaci. Důležitým bodem při výběru materiálu je specifikace prostředí, ve kterém se bude díl nacházet. Do specifikace prostředí spadá například i druh namáhání. [36]

Vlákna na bázi uhlíku:

- Uhlíková vlákna:
 - mají vysokou pevnost a tuhost,
 - jsou odolná vůči rozpouštědlům,
 - jsou dobře tepelně a elektricky vodivá,
 - odolávají dlouhodobému dynamickému namáhání,
 - nejsou tažná,
 - jsou anizotropní, hydrofilní. [36]
- Skelná vlákna:
 - mají vysokou pevnost, nižší tuhost,
 - jsou stabilní při změně teploty,
 - odolávají nárazům, tření a opotřebení,
 - jsou izotropní. [36]
- Aramidová vlákna:
 - mají nízkou pevnost v tahu,
 - jsou nejlehčí vyztužující vlákno,
 - mají dobré tlumící vlastnosti,
 - anizotropní a silně hydrofilní. [36]
- Přírodní vlákna:
 - Jutová
 - Konopná

- Lněná [35]
- Čedičová vlákna:
 - jsou chemicky odolná a nehořlavá,
 - mají lepší fyzikální vlastnosti než sklolaminát,
 - jsou levnější než uhlíková vlákna. [37]
- Grafen:
 - má vysokou pevnost v tahu, která je až 125x větší než u oceli,
 - je dobře elektricky vodivý a vysoce tepelně vodivý (tepelná vodivost 10x větší než u mědi). [38]

Vlákna jsou výrobci dodávána navinutá na cívce (rovingu) nebo v podobě textilií. Nejběžnější druhy jsou: plátňová vazba, keprová vazba a atlasová vazba. [36]



Obrázek 21 Druhy tkanin [36]

4.3.1 Uhlíková vlákna

Jedná se o vlákna s vysokými mechanickými parametry, která se skládají z více než 90 % uhlíku. Uhlíková vlákna mají vysokou pevnost a tuhost. Vysoké pevnosti vlákna dosahují díky těsnému uložení kontinuální sítě silných vazeb. Vlákna také dosahují výborného poměru mezi pevností a hmotností díky nízké měrné hmotnosti materiálu. Proto se často používají jako výstužný materiál pro lehké konstrukce v automobilovém, leteckém nebo kosmickém průmyslu. Své uplatnění ale najdou i ve sportovních potřebách. Běžný průměr vlákna se pohybuje mezi 5-10 μm . [36], [38]

Dělení uhlíkových vláken podle modulu pružnosti:

- nízký modul pružnosti (<200 GPa),
- standardní modul pružnosti (230 GPa),
- střední modul pružnosti (300 GPa),

- vysoko-modulární uhlíková vlákna (>350 GPa). [39]

Protože jsou uhlíková vlákna za normálních podmínek velmi křehká, jsou povrchově upravována apretací. Epoxidová pryskyřice je tak jako ochrana při zpracování a zároveň slouží jako prostředek pro zlepšení vazby mezi vlákny a matricí. Jsou-li vlákna déle skladována, může dojít k vytvrzení apretační povrchové vrstvy a vlákna tím ztrácejí ohebnost [36], [39]

4.3.2 Skelná vlákna

Díky nízkým nákladům a dobrým mechanickým vlastnostem jsou skelná vlákna nejčastěji používaným typem vláken. Požadovaný průměr skloviny je 3,5-24 μm . Požadovaného průměru se docílí tažením roztavené skloviny. Materiál se skládá ze sloučenin na bázi oxidu křemičitého SiO_2 smíchaného s jinými oxidy. [36]

Označení skelných vláken:

- E-glass – běžné provedení,
- S-glass – vyšší pevnost,
- C-glass – odolnost proti korozi v kyselinách a vodě. [36]

Skelná vlákna mají výborné tepelné vlastnosti. Vydrží dlouhodobé tepelné namáhání při teplotě 250 $^{\circ}\text{C}$, aniž by došlo ke snížení mechanických vlastností. Tepelná vodivost je relativně dobrá, ale podstatně nižší než u kovů. [36]

Modul pružnosti v tahu E skelných vláken je srovnatelný s modulem pružnosti hliníku. Jedná se asi o jednu třetinu hodnoty oceli. Pevnost v tahu je podobná jako u uhlíkových vláken. Vzhledem k hustotě skla je hodnota měrné pevnosti vláken velmi vysoká. [36]

Existuje také modifikace skelného vlákna zvaná HSHT (high-strength high-temperature). Jedná se o relativně elastická vlákna s vysokou pevností a vysokou tepelnou odolností. Tato vlákna vykazují vysokou rázovou odolnost, která je asi 30x větší než u ABS a 100x větší než PLA. [36]

4.3.3 Aramidová vlákna

Pro veřejnost pravděpodobně známějším názvem pro aramidová vlákna je kevlar. Jde o jedno s nejlehčích vyztužujících vláken. Vlákno je tvořeno lineárními organickými polymery, které mají výjimečnou kombinaci vysoké pevnosti a tuhosti. Nevýhodou je

zatížení tlakem, které působí v podélném směru. Mez pevnosti v tlaku ve směru vláken je nižší než mez pevnosti v tahu. Pevnost spoje mezi matricí a vláknem může být narušena vlhkostí. Vystavíme-li materiál UV záření, dojde u materiálu k poklesu jeho pevnosti. Aramidová vlákna nejsou dobře odolná proti vysokým teplotám (ve formě kompozitu odolávají teplotě cca 300 °C). [36]

4.3.4 Hybridní tkaniny

Pro zpevnění kompozitu lze použít techniku hybridizace. Při hybridizaci jsou lamináty konstruovány ze dvou nebo více typů tkanin, kde kombinací vláken dochází k využití kladných vlastností rozdílných materiálů. Například tepelné vlastnosti kompozitů, které jsou vyztuženy vlákny kevlaru, zlepšíme tím, že použijeme kombinaci kevlarových a skelných vláken. [36]

Nejběžnější hybridní kombinace:

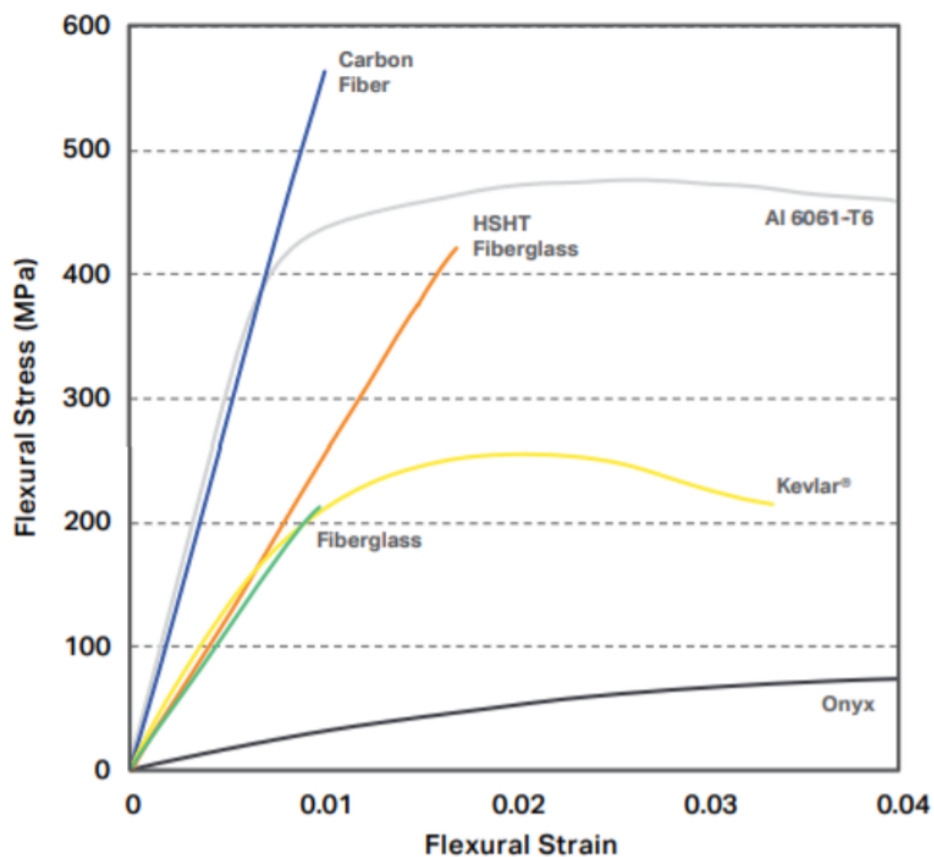
- uhlík/aramid,
- aramid/sklo,
- uhlík/sklo. [36]

4.3.5 Porovnání vyztužujících vláken

Přehledné charakteristiky a mechanické vlastnosti jsou demonstrovány níže uvedenou tabulkou. Dále je uveden obrázek 39, na kterém je znázorněná závislost napětí na poměrném prodloužení jednotlivých vláken v porovnání s onyxem a hliníkem (Al 6061-T6) [40]

Tabulka 2 Shrnutí vlastností vláken Markforged vhodné pro 3D tisk. [40]

	Karbon	Sklo	HSHT sklo	Kevlar
Tepelná odolnost	105 °C	105 °C	150 °C	105 °C
Pevnost v ohybu	540 MPa	200 MPa	420 MPa	240 MPa
Pevnost v tahu	800 Mpa	590 Mpa	600 Mpa	610 Mpa
Charakteristika	Vysoká pevnost a tuhost	Robustnost, houževnatost	Odolává vysokým teplotám, největší pružné deformace	Nárazuvzdornost, houževnatost, otěruvzdornost,
Způsob selhání	Tuhé do prasknutí	Ohýbá se do prasknutí	Ohýbá se do prasknutí	Ohýbá se do zdeformování
Ideální pro zatížení	Přerušované zatížení	Konstantní zatížení	Přerušované zatížení, Zatížení při zvýšených teplotách	Rázové zatížení



Obrázek 22 Deformační křivky kontinuálních vláken. [40]

4.4 Mechanické vlastnosti kompozitních materiálů

V porovnání s konvenčními materiály mají kompozitní materiály odlišné charakteristické rysy. Mezi jedny z nejdůležitějších mechanických vlastností patří anizotropie a delaminace materiálu, fázové rozhraní vlákno-matrice a v neposlední řadě závislost modulu pružnosti na úhlu vlákna vůči zatěžování. [36]

4.4.1 Anizotropie

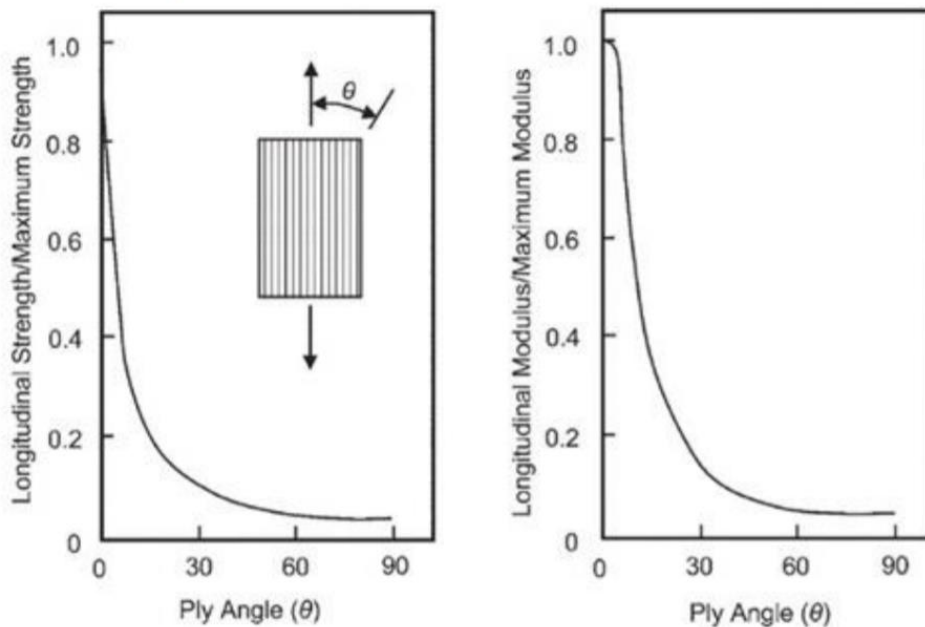
Materiály lze rozdělit na izotropní a anizotropní. Izotropní materiál má stejné vlastnosti ve všech směrech zatěžování. Mezi izotropní materiály lze zařadit kovy a polymery. Naopak u anizotropních materiálů jsou jeho fyzikální vlastnosti v různých směrech zatěžování odlišné. Je to způsobeno výskytem odlišných složek v kompozitním materiálu, které způsobují jeho nehomogenitu. Využitím anizotropie lze docílit snížení hmotnosti při zachování pevnosti konstrukčního materiálu v daném směru namáhání. [36], [41]

4.4.2 Fázové rozhraní vlákno a matrice

Zajištění adheze na fázovém rozhraní matrice-vlákno je zásadním hlediskem pro kvalitu kompozitu. Požadované přilnavosti docílíme snížením viskozity matrice během smáčení. Lepší fyzikální a chemické vazby mezi vláknem a matricí docílíme nanášením apretace vhodné pro určitý druh matrice. Speciální emulze zvýší adhezi, chemickou odolnost a zároveň chrání vlákno před oxidací. Důležité je všechna vlákna dokonale pokrýt pojivem, protože nedokonalá apretace způsobuje zhoršení mechanických vlastností kompozitů. [36], [41]

4.4.3 Závislost modulu pružnosti v tahu na úhlu vlákna

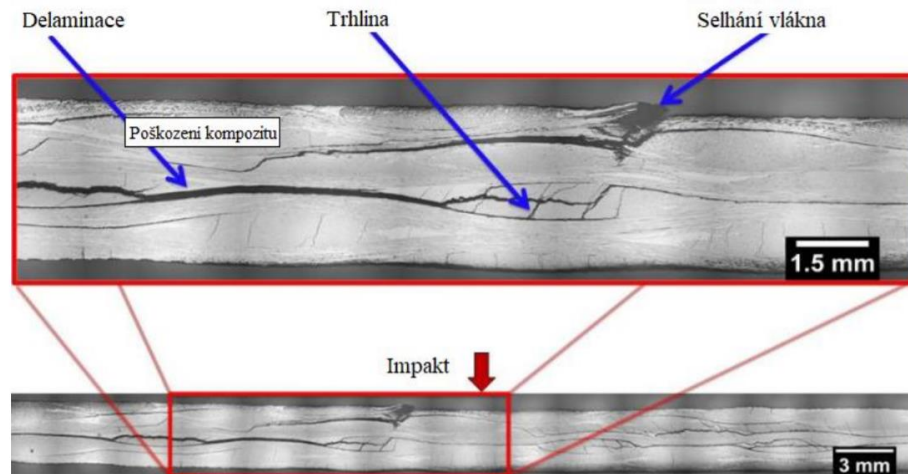
U kompozitních materiálů jsou mechanické vlastnosti závislé na orientaci vyztužujících vláken. Na obrázku 23 je závislost modulu pružnosti na úhlu vláken jednosměrně vyztuženého kompozitu. Je zde patrná výše zmíněná anizotropie. Vlákná kolmá na směr tahového zatížení vydrží zhruba třináctkrát menší tahové zatížení než vlákna rovnoběžná se směrem zatěžování. Podle obrázku i malá změna úhlu tahového zatěžování od rovnoběžného směru s vyztužujícími vlákny způsobí výrazný pokles tuhosti a pevnosti v tahu. Proto je konstrukční profily nutné navrhnout s ohledem na orientaci vláken tak, aby byl sběr zatížení shodný se směrem vláken. Jsou-li vlákna zatížena tlakově (tlaková síla by působila rovnoběžně s orientací vláken), mají vlákna sklon selhat na vzpěr. [41]



Obrázek 23 Závislost modulu pevnosti v tahu na úhlu zatížení. [41]

4.4.4 Delaminace

Delaminace je separace jednotlivých vrstev laminátu během výroby. Na povrchu se může delaminace jevit jako malé odsazení, ale může se šířit skrze lamináty a tím vytvářet komplexní síť delaminací a malých trhlin v matrici. Toto poškození je hlavní důvod únavového selhání materiálu. [36], [41]



Obrázek 24 Delaminace kompozitního materiálu [42]

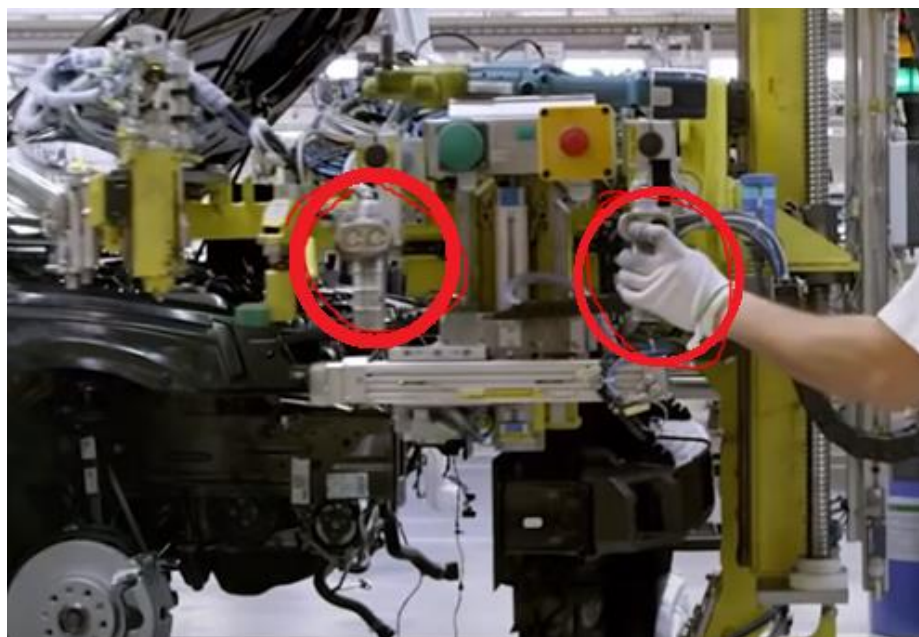
5 Aplikace reverzního inženýrství

Pro aplikaci reverzního inženýrství byl zvolen manipulátor, který je rozšířený po výrobě v automobilovém průmyslu.

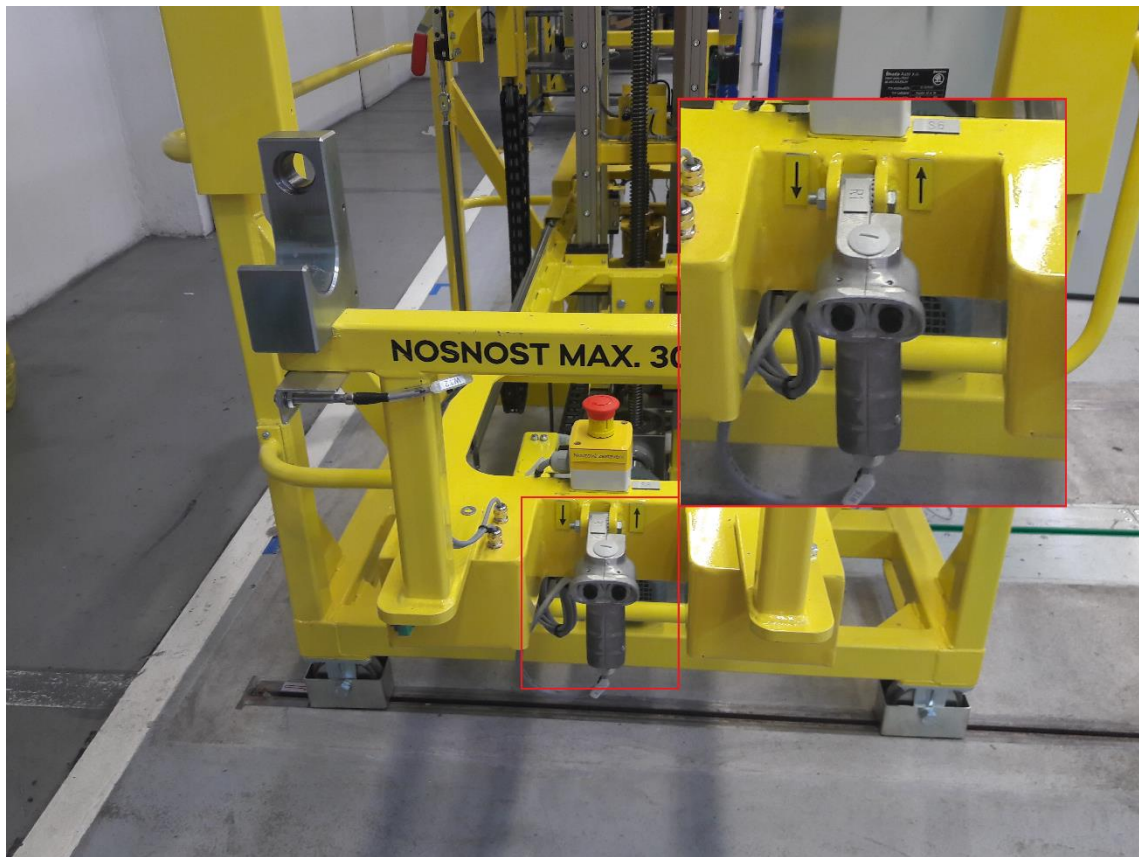


Obrázek 25 Foto originálního manipulátoru

Manipulátor má různé funkce a využití. Využívá se například při montáži kokpitu, ale i na dalších místech, kde je zapotřebí manipulovat se zařízením (nebo jeho částí) ručně a zároveň řídit jeho pohyb elektronicky. Jako konkrétní místo použití manipulátoru pro tuto práci byla zvolena montáž kokpitu, viz obrázek 26.



Obrázek 26 Příklad použití manipulátoru 1



Obrázek 27 Příklad použití manipulátoru

5.1 Získání 3D dat – skenování

Je-li součást příliš složitá na to, aby se dala rychle vymodelovat v CAD programu, používá se pro získání 3D dat součásti v reverzním inženýrství technologie skenování. Tento manipulátor je tvarově složitý díl a nejsou k dispozici žádné výkresy a modely, které by bylo možné pro výrobu použít. Proto bylo provedeno skenování manipulátoru.

5.1.1 Příprava dílu před skenováním

Tvar manipulátoru je pro práci v provozu vyhovující. Kdyby bylo zapotřebí tvar upravit ještě před skenováním, bylo by vhodné použít plastickou hmotu a tvar si vytvarovat, případně model vytvrdit a vymodelovanou část naskenovat. Díl se skládá ze dvou částí, které jsou k sobě připevněny pomocí dvou šroubů a závitových vložek. Před skenováním byl manipulátor rozebrán. Byly odebrány kabely, kabelové vývodky, ovládací prvky a vyndány všechny šrouby. V dílech byla ponechána jen závitová pouzdra, která byla zalisována a nešla by vyndat bez toho, aby byl díl poškozen.

Díly je možno skenovat s použitím křídového prášku, který může vylepšit emisivitu povrchu skenovaného objektu, ale použití prášku není vždy nutné. V tomto případě nebyl křídový prášek použit. Skenování tak proběhlo bez povrchové úpravy. To



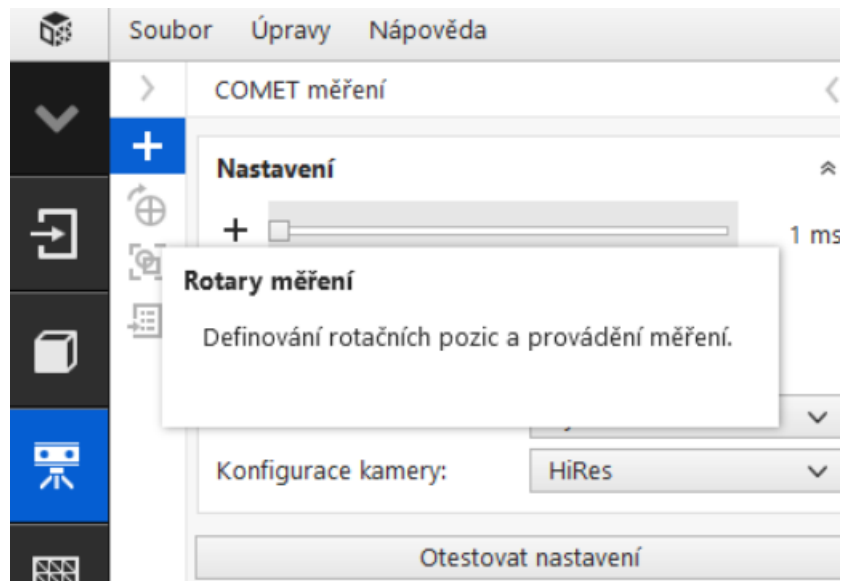
Obrázek 28 Průběh skenování
postupně průběhu práce.

se v dalších krocích promítlo do kvality skenování a projevilo se tím, že vznikl větší počet odlehlých naskenovaných bodů v prostoru, které bylo třeba v následujících krocích odstranit.

Rozebraný díl byl skenován po polovinách. Jako skener byl použit Zeiss Comet L3D. Jedná se o optický 3D skener, který je podporován softwarem Zeiss Colin3D. Software je redukován na podstatné funkce a menu je strukturované tak, aby odpovídalo

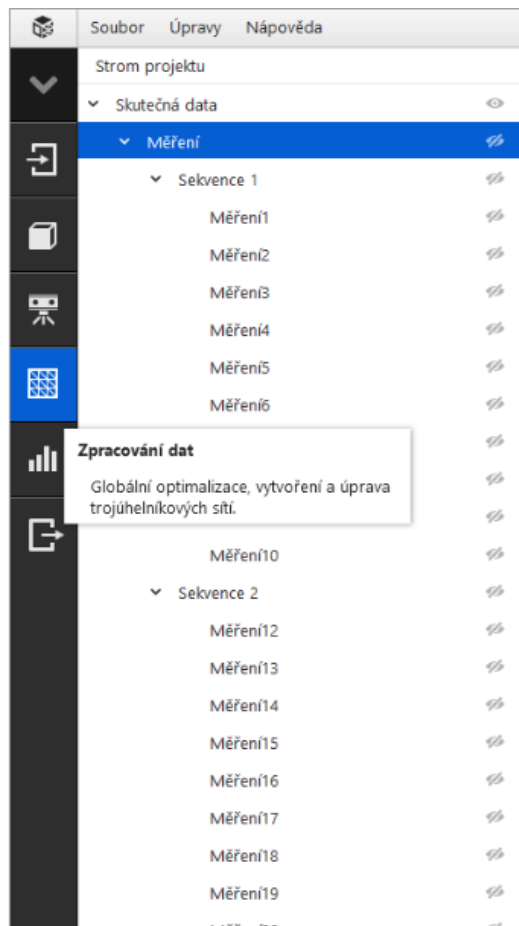
Před začátkem skenování je zapotřebí nechat skener zahřát na pracovní teplotu a provést kalibraci. Skenovanou část manipulátoru bylo nutné vhodně umístit na otočný stolek tak, aby byl celý v záběru skenovacího objektivu.

Následujícím krokem je vytvoření nového skenování a jeho nastavení. Nastavuje se také počet pozic, respektive úhlů, ze kterých bude součást snímána. Čím je součást složitější, tím více skenovacích pozic je zapotřebí pro kvalitní nasnímání součásti. Pro nasnímání manipulátoru bylo nastaveno deset skenovacích pozic během otočení o 360° pro každou polovinu.



Obrázek 29 Nastavení průběhu skenování

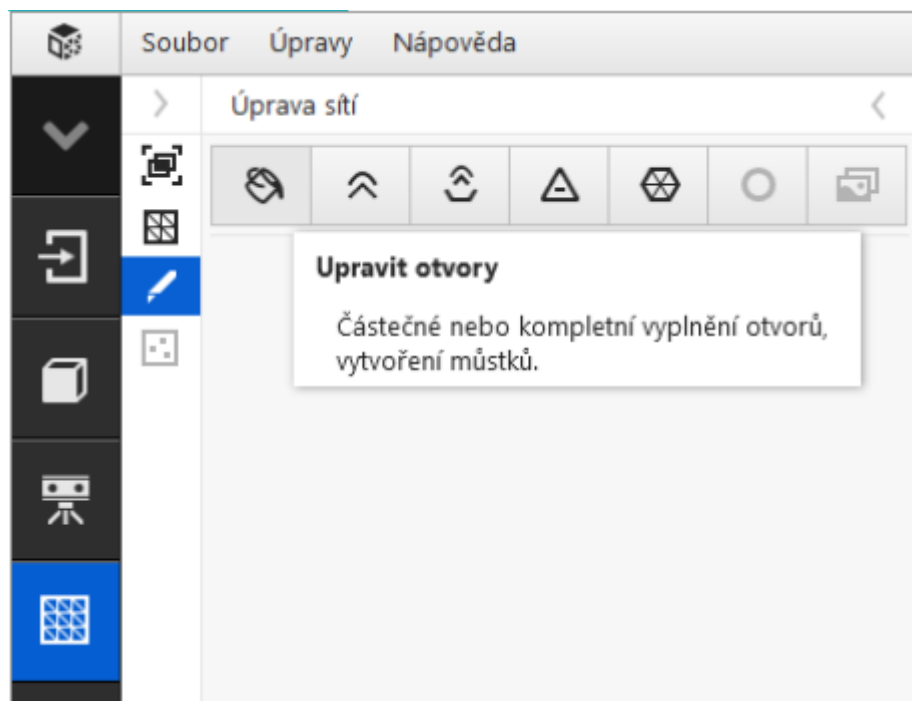
Po každé nasnímané pozici se program pokusí automaticky připasovat naskenovaný kus objektu na ten předchozí a tím skládá dohromady celkový model. Nepodaří-li se to softwaru automaticky, vyžádá program asistenci operátora. Je pak nutné programu určit, kde se nachází libovolný bod posledního naskenovaného kusu objektu na předchozím naskenovaném modelu. V praxi to pak vypadá tak, že se zobrazí dvě okna, kde v jednom okně je poslední naskenovaný model, který se nepodařilo automaticky připasovat a v tom druhém je naskenovaný kus modelu, na který se software pokouší poslední sken připasovat. Pak operátor určí, kde se nacházejí body jednoho modelu na tom druhém. Někdy stačí určit pouze jeden bod, ale někdy jich je zapotřebí více.



Obrázek 30 Zpracování dat

Po nasnímání dílu je možné naskenované body upravit. V záložce zpracování dat software nabízí funkci automatická nebo ruční globální optimalizace bodů. Dalším důležitým krokem v této části bylo vytvoření trojúhelníkové sítě z naměřených bodů. Tato síť se pak dá v programu dále upravovat funkcemi:

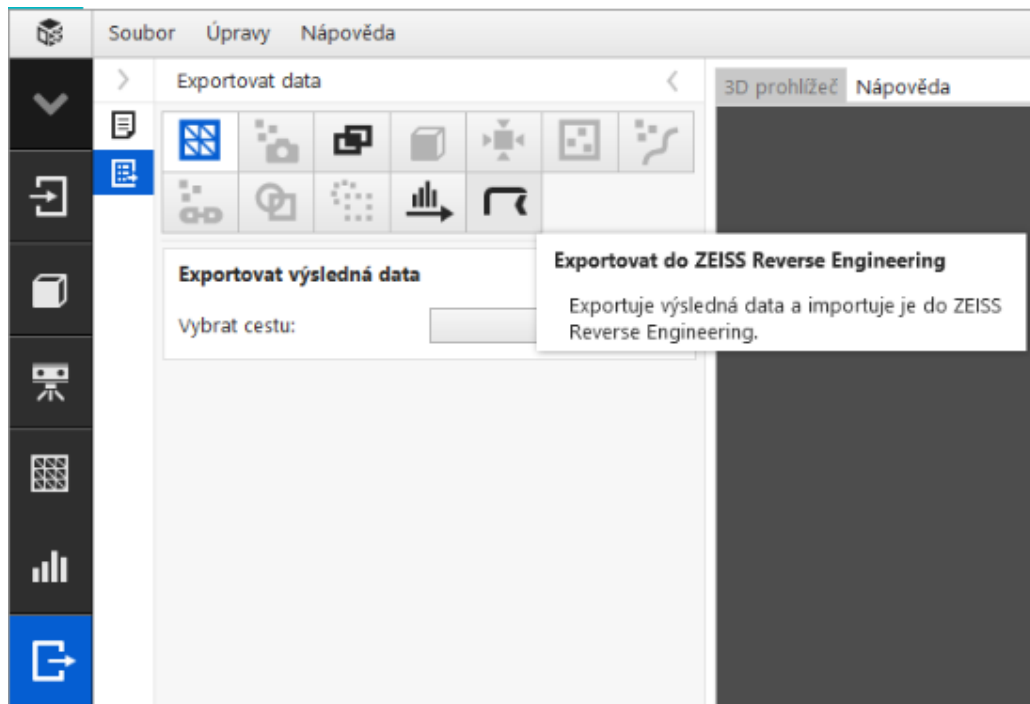
- upravit otvory (automaticky/ručně),
- vyhladit/zaostřit síť,
- redukovat síť,
- zpravidelnit síť,
- orazit/vyplnit značky,
- výpočet textury.



Obrázek 31 Funkce programu na zpracování dat

Program pak nabízí analýzu takto zpracovaných dat. Ta v případě skenování manipulátoru nebyla použita.

Posledním krokem v Colin3D je vyexportování vytvořených dat. V tomto případě byla data vyexportována ve formátu STL.



Obrázek 32 Export dat

5.2 Zpracování a úprava naskenovaných dat

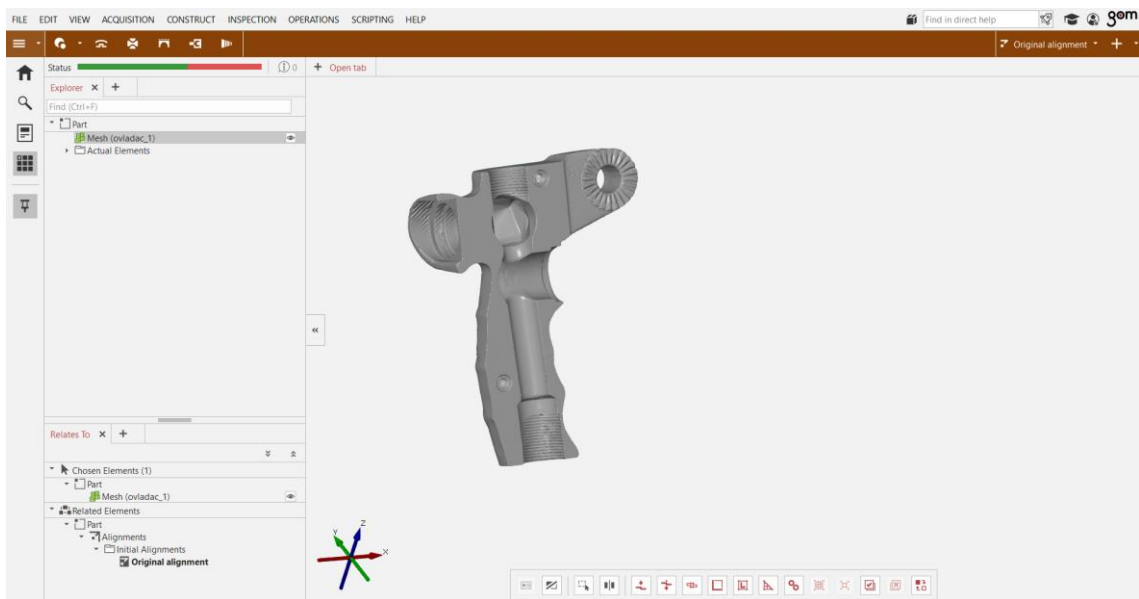
Zpracování získaných dat skenováním je v tomto procesu reverzního inženýrství nejsložitější a nejdůležitější proces. Jde o velice individuální operaci. Postup, složitost a časová náročnost závisí zejména na dostupných softwarech a zkušenostech. Obecně softwary jsou jednou z největších překážek v rozvíjejícím se reverzním inženýrství zahrnující proces zpracování naskenovaných dat. Je zapotřebí softwarové funkce, které se používají na:

- skenování,
- úpravu naskenovaných dat,
- převod ploch na objemové těleso (převod souboru z STL na formát STEP),
- případnou úpravu objemového tělesa (CAD programy),
- vygenerování dat pro 3D tiskárnu (slicery).

Softwary, které by uměly zastoupit komplexně všechny jednotlivé operace, nejsou jednoduše dostupné. Buď jsou velmi drahé, nebo nejsou známé a složitě se hledají. V neposlední řadě je také problém uživatelská přívětivost programů, respektive složitost jejich používání.

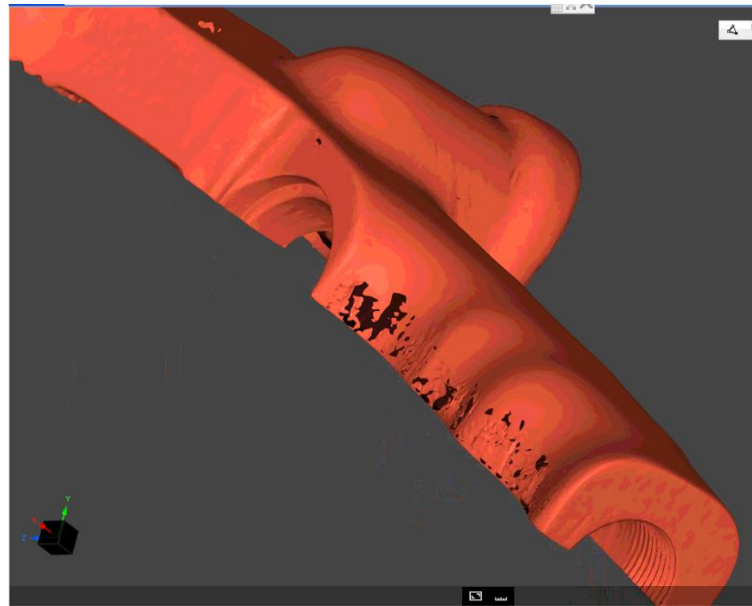
Při výběru programu pro úpravu dat je tak vhodné se soustředit na jeho dostupnost, přívětivost pracovního prostředí a funkce. V tomto případě byl vybrán program GOM Inspect, který slouží pro kontrolu a úpravu polygonálních sítí. Byl vybrán z toho důvodu, že disponuje funkcemi, které byly potřeba pro úpravu dat. Dalším z hlavních důvodů, proč byl GOM Inspect zvolen, je to, že program je zdarma a zároveň nabízí 30denní zkušební období PRO verze. Práce s tímto programem je sice relativně snadná, ale pro samouky jde stále o složitější program. Pro někoho by mohl být také problém, že program je v angličtině.

Prvním krokem při zpracování byl import vyexportovaného modelu ve formátu STL z programu Zeiss Colin3D (software skeneru) do programu GOM Inspect.



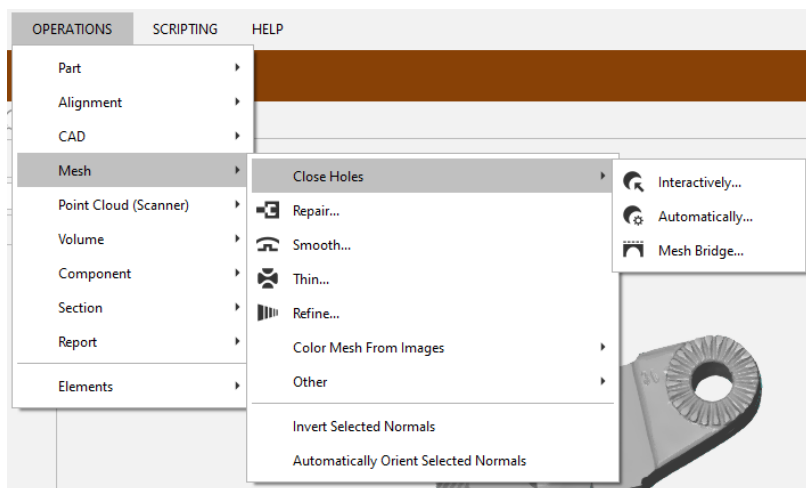
Obrázek 33 Naskenovaný díl po importu do programu GOM Inspect

Dalším krokem bylo odstranění zbytku nepotřebných bodů a šumu, které se nepovedlo odstranit v předchozím programu. Jak bylo již zmíněno, části manipulátoru byly skenovány bez povrchové úpravy, která by zlepšila emisivitu povrchu. To zapříčinilo větší šum. Po odstranění nepotřebných bodů zůstalo v první naskenované polovině manipulátoru 123 416 bodů a v druhé 166 534 bodů.



Obrázek 34 Díry v síti způsobené špatným nasnímáním dílu

Pro převedení z formátu STL na objemové těleso (formát STEP/STP, IGES...) je



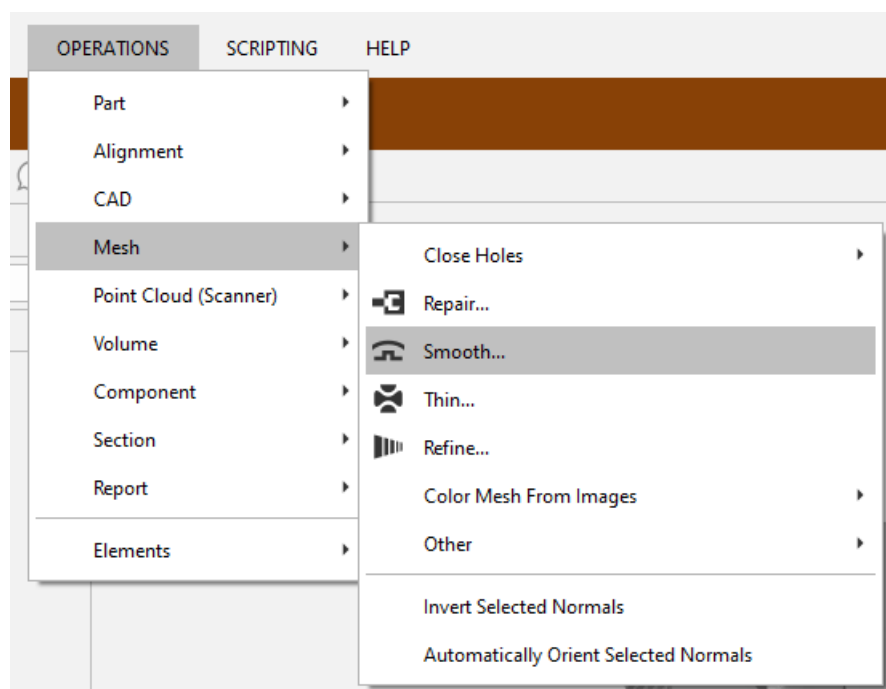
zapotřebí, aby plochy byly uzavřené – bez děr v síti. Proto je zapotřebí díry v síti uzavřít. Na tento krok existuje v GOM Inspect funkce, která umožňuje uzavřít díry v síti automaticky nebo ručně.

Obrázek 35 Funkce uzavírání děr v mesh síti

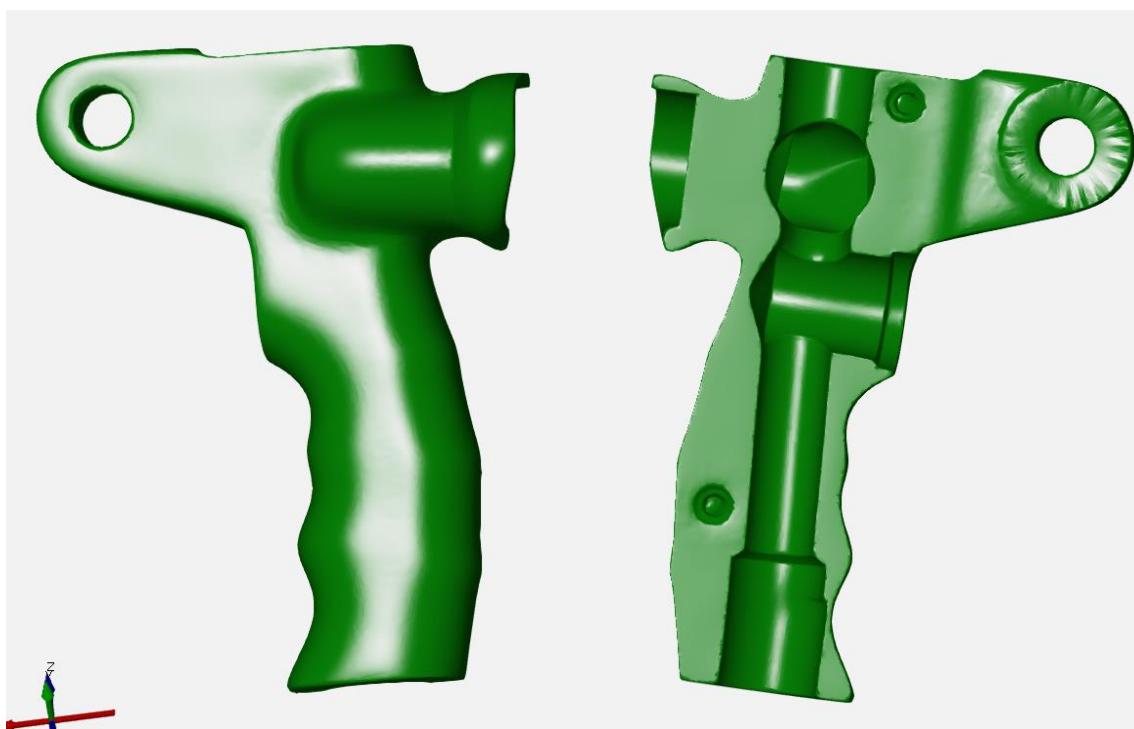
Pro odstranění děr stačí zadat maximální velikost díry a maximální počet hran.

Poslední použitá funkce v tomto programu bylo vyhlazení mesh sítě. Zadávají se 3 parametry: filter radius (rádius filtru), detail sharpness (ostrost detailů) a surface tolerance (tolerance povrchu). Filter radius a detail sharpness mají 4 stupně kvality.

V tomto případě byl zvolen druhý nejkvalitnější stupeň vyhlazení u obou parametrů.

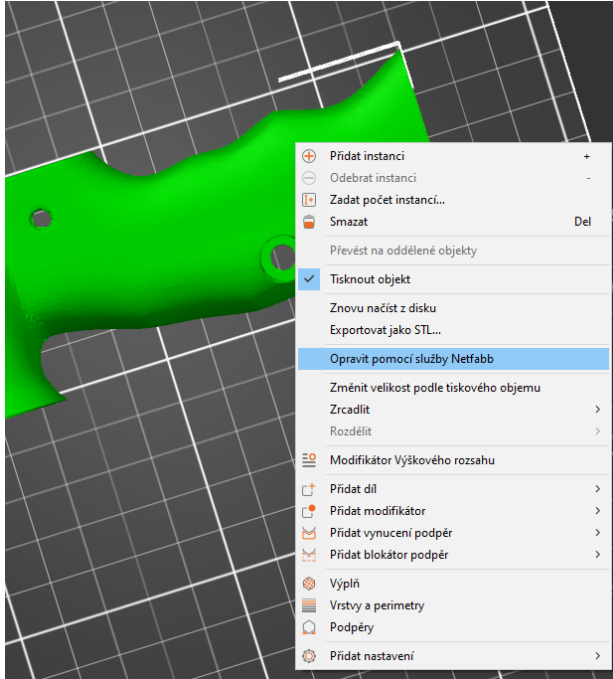


Obrázek 36 Funkce GOM Inspect vyhlazení mesh sítě



Obrázek 37 Vyhlazená síť pomocí GOM Inspect

Takto upravená síť byla vyexportována ve formátu STL. Pro kontrolu bylo STL vloženo do PrusaSliceru, který ukáže případné chyby souboru a nabízí i funkci, která soubor opraví. Funkce se nazývá Netfabb. Jde o online opravu modelů od firmy



Obrázek 38 Funkce Netfabb v PrusaSliceru

Microsoft. Model se nahraje s chybami na online server a uživatel si zpět stáhne opravený model. V PrusaSliceru ovšem stačí jen kliknout na „opravit pomocí služby Netfabb“, počkat na nahrání a následně kliknout na exportovat jako STL. V některých případech se může stát, že tato služba nebude dostačující na danou chybu v souboru a bude nutné přistoupit k ruční opravě. V tomto případě však byla služba Netfabb dostačující, proto nebylo potřeba STL dále opravovat v jiném softwaru.

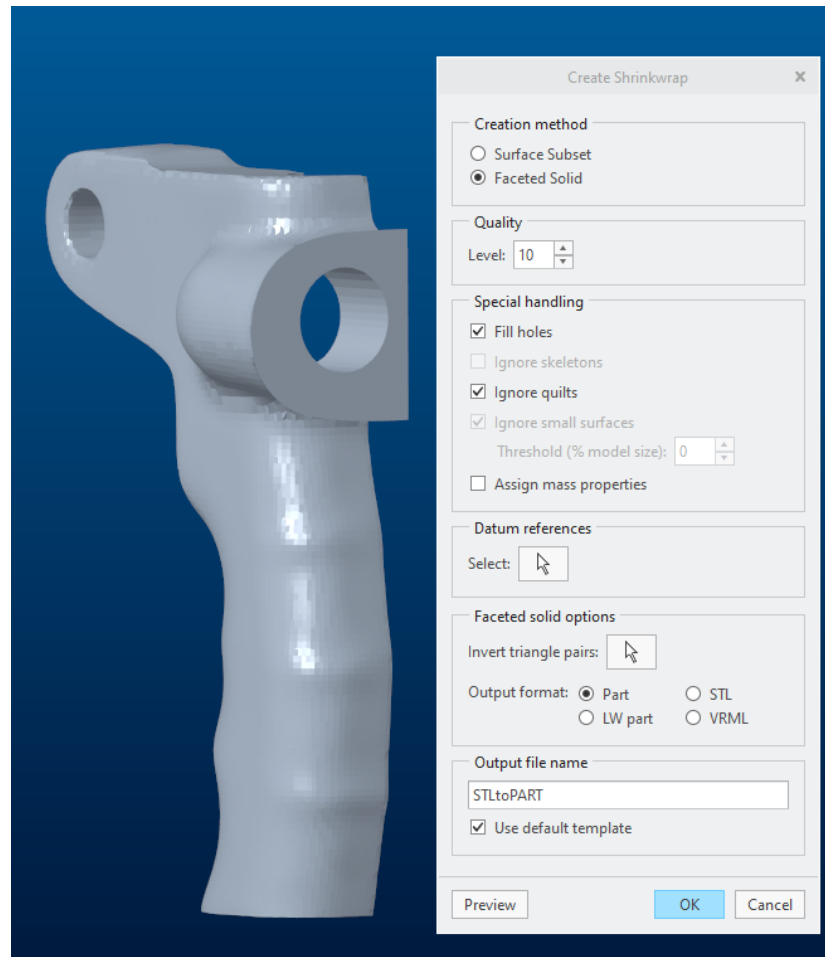
5.3 Převod na objemové těleso

Pro další úpravy v CAD programu je zapotřebí, aby byl soubor převeden z formátu STL na objemové těleso. Tedy na formát typu STEP (STP) nebo IGES. Největším problémem v tomto kroku bylo najít program, který funkci na převod nabízí v neplacené verzi.

Proto byl převod proveden v programu CREO, kde k přeformátování stačilo soubor dvakrát převést na jiný formát.

Pro převedení na objemové těleso je zapotřebí nejprve importovat model ve formátu STL do programu CREO. Tento model se pak uloží jako Shrinkwrap. Po vybrání tohoto formátu nabídne software tabulku, ve které je možné editovat parametry exportovaného souboru a zároveň nabízí náhled modelu. Pro převod na objemové těleso je důležité zvolit metodu Faceted Solid. Dalším důležitým parametrem, který ovlivňuje kvalitu a vyhlazení modelu, je úroveň kvality (quality level). Je možné zvolit úroveň 1-10, kde úroveň 10 je nejkvalitnější a úroveň 1 je nejméně kvalitní úroveň exportovaného modelu. Pro manipulátor byla zvolena nejvyšší kvalita. CREO pak nabízí v tabulce možnost výběru formátu, ve kterém chce uživatel soubor uložit. V tomto případě byl

zvolen formát Part (díl). V případě, že by byl takto vyexportovaný model upravován právě v programu CREO, takto převedený model na objemové těleso by stačil na to, aby bylo možné ho upravovat. Jako univerzální formát objemových těles je formát STP/STEP. Tento formát podporuje většina CAD a výpočetních softwarů. Abychom dostali formát STP z formátu Part, stačí soubor pouze znovu „uložit jako“ a zvolit formát STP/STEP.



Obrázek 39 Editování parametrů exportovaného modelu

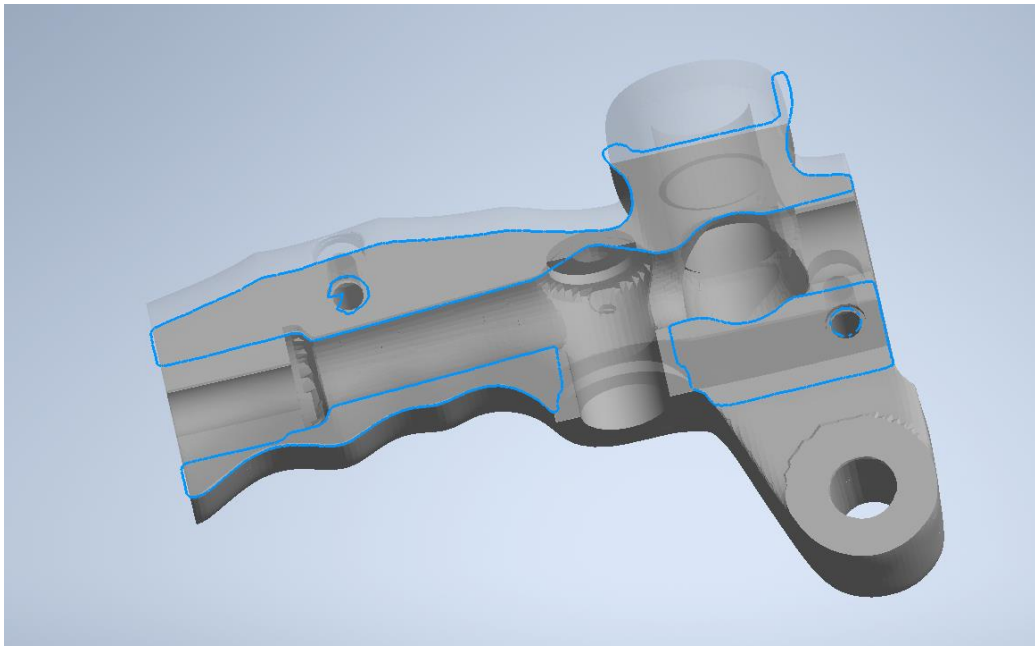
5.4 Úprava dílu v CAD programu

Model po úpravách v předchozích programech nebyl stále ideální, proto bylo zapotřebí jej upravit v CAD programu. Jako program pro úpravu byl zvolen Autodesk Inventor. Ten splňuje požadavky na funkce a zároveň je k dispozici studentská licence pro plnou verzi softwaru.

V prvním kroku byly naimportovány do Inventoru obě naskenované poloviny díly ve formátu STP. Následovalo vytvoření sestavy tak, aby na sebe obě části dílu nejlépe

pasovaly. Sestava byla vytvořena za tím účelem, aby na sebe dobře navazovaly díry pro spojení šrouby a vyhladily se vyčnívající okraje.

Bylo také zapotřebí vytvořit díry pro závitové vložky, aby bylo možné spojení obou částí dílů manipulátoru a upravit některé díry, protože při uzavírání mesh sítě předchozí programy vytvořily výstupky, které by zabraňovaly vložení spínačů nebo průchodu kabelů. Bylo také nutné přidat materiál do děr pro vyříznutí závitů. Závitů budou zapotřebí pro uchycení kabelových vývodek a snímačů.



Obrázek 40 Vytvoření plochy pro tisk na spodní části dílu

Podstatnou úpravou bylo vyhlazení plochy na obou spodních částech manipulátoru, aby první vrstva při tisku byla jednotná a model se netiskl pouze na „ostrůvcích“. Zároveň k sobě při montáži obě části lépe dosednou. Část pro vedení kabeláže byla ponechána.

Konečně upravené poloviny manipulátoru byly jednotlivě vyexportovány ve formátu STL.



Obrázek 41 Upravený model manipulátoru v Inventoru

5.5 Zkušební tisk

Finální tisk proběhl na tiskárně Mark Two od firmy Markforged. Materiál pro tuto tiskárnu je ale výrazně dražší v porovnání s materiály pro tiskárny Prusa. Proto kvůli případným chybám v modelu byl proveden zkušební tisk na tiskárně Prusa i3 MK3S. Jako materiál byl zvolen filament PLA.

Tiskové parametry byly nastaveny takto:

- výška vrstvy 0,2 mm (speed),
- filament PLA,
- 20% výplň,
- podpěry pouze na tiskové podložce.

Nejedná se o parametry, které by cílily na kvalitu tisku, protože se jednalo pouze o zkušební tisk. Výsledná délka tisku byla 9 hodin a 48 minut. Cena spotřebovaného materiálu na zkušební tisk byla přibližně 75 Kč.

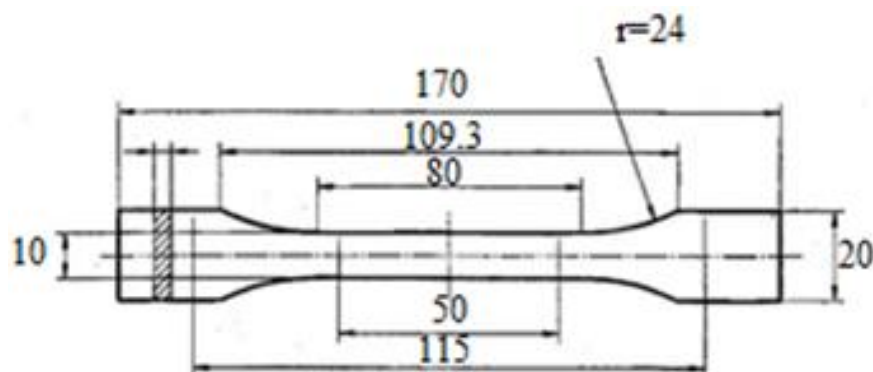


Obrázek 42 Výsledek zkušebního tisku

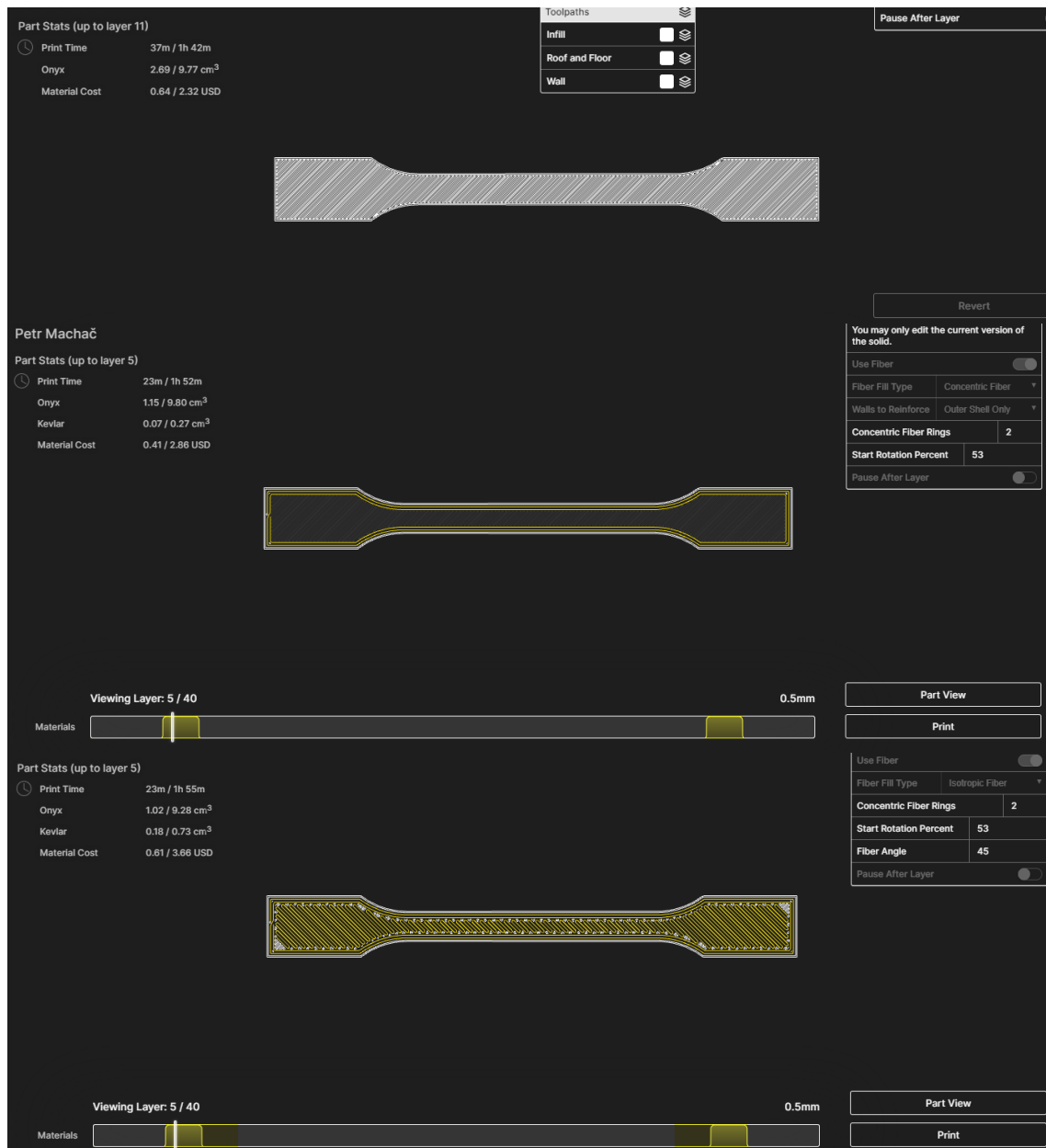
5.6 Výběr materiálu

Manipulátor bude vystavován silám, které by nemusel materiál PLA vydržet. V dnešní době jsou k dispozici další materiály, které mají lepší mechanické vlastnosti. Jedná se zejména o kompozitní materiály, které mají budoucnost v technickém používání. Proto byl pro manipulátor zvolen kompozitní materiál Onyx od firmy Markforged. Skládá se z Nylonu a nasekaných karbonových vláken. Díky tomu je Onyx pevnější materiál než PLA.

Tiskárna Mark Two umí pokládat do výtisku kompozitní vlákna, například vlákno kevlaru, které výrazně vylepší vlastnosti tištěného dílu, jsou-li vhodně zvoleny a použity. Pro demonstraci vlastností těchto materiálů byla provedena tahová zkouška na stroji LabTest Model 5.100SP1. Tahová zkouška byla provedena podle ČSN EN ISO 527-1, typ vzorku 1A.



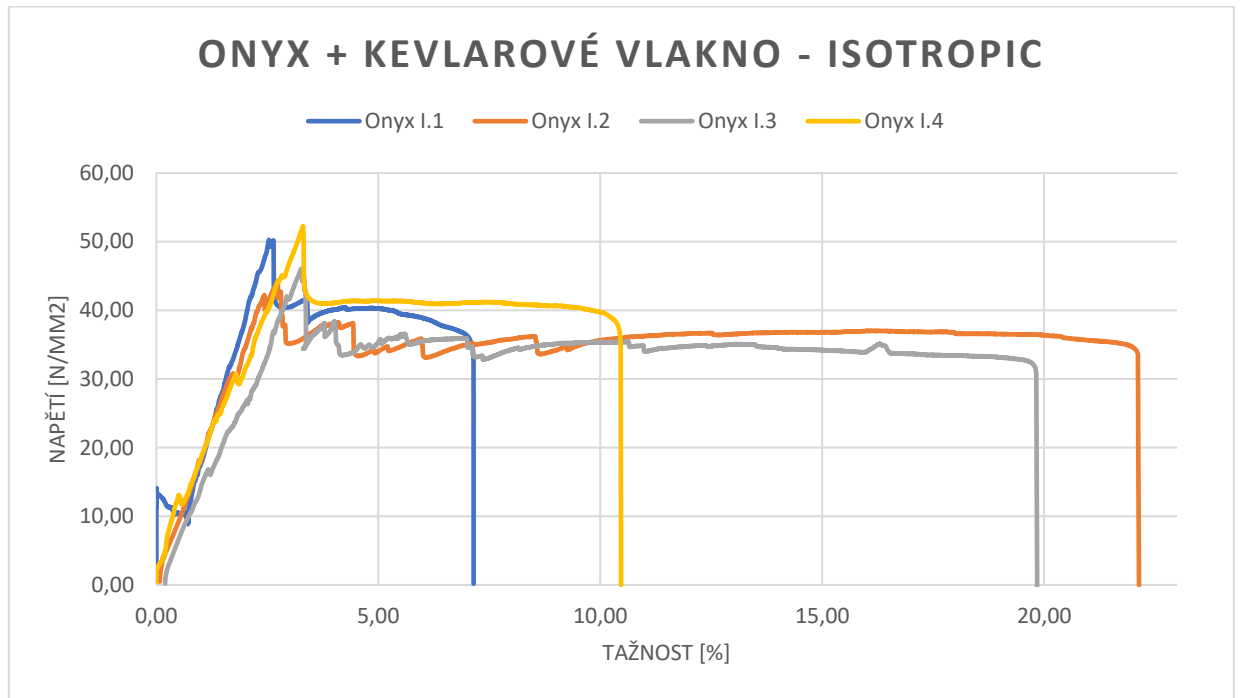
Obrázek 43 Rozměry zkušebních tělísek



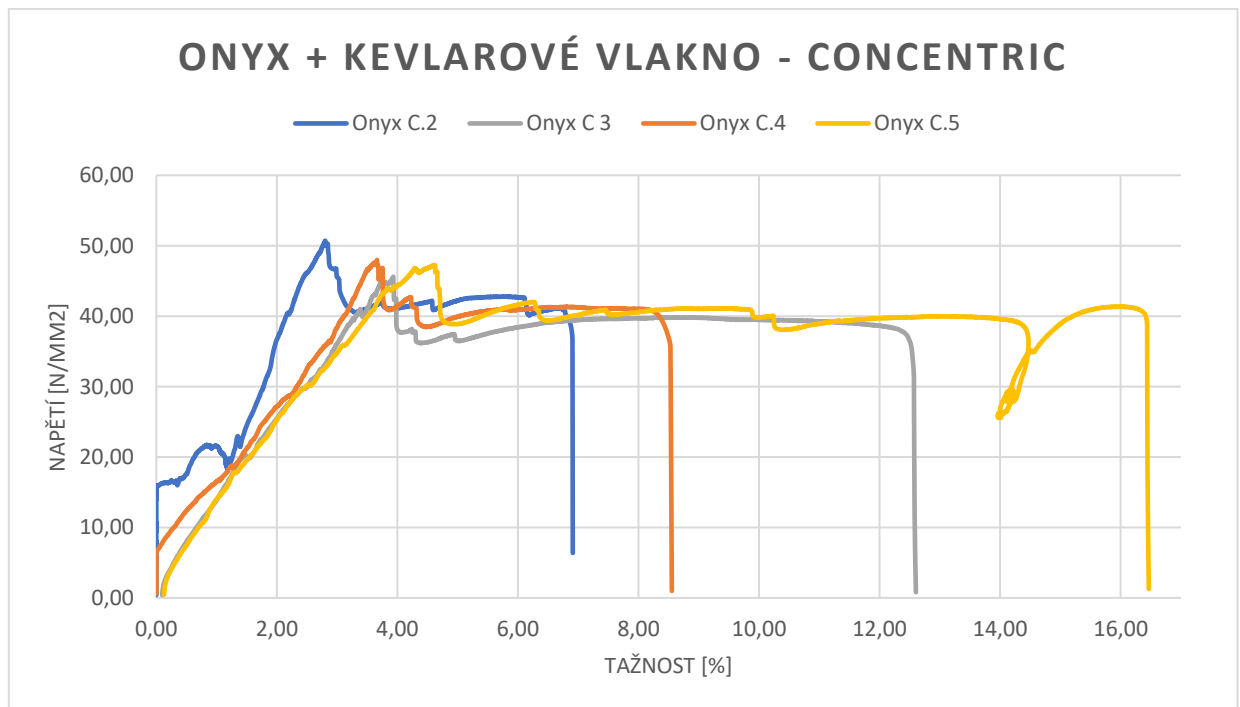
Obrázek 44 Typy použitých vzorků pro tahovou zkoušku

Zkušebních tělísek byly tři typy a od každého typu pět vzorků. Jeden typ byl vzorek vytištěn z Onyxu se stoprocentní výplní, kde jsou vlákna položena pod úhlem 45° vůči zatěžování, ale vlákna jsou po každé vrstvě pootočená o 90° vůči předchozí vrstvě. To znamená, že vlákna v sousední vrstvě jsou na sebe kolmá a každá vrstva má vlákna pod úhlem 45° vůči směru zatěžování.

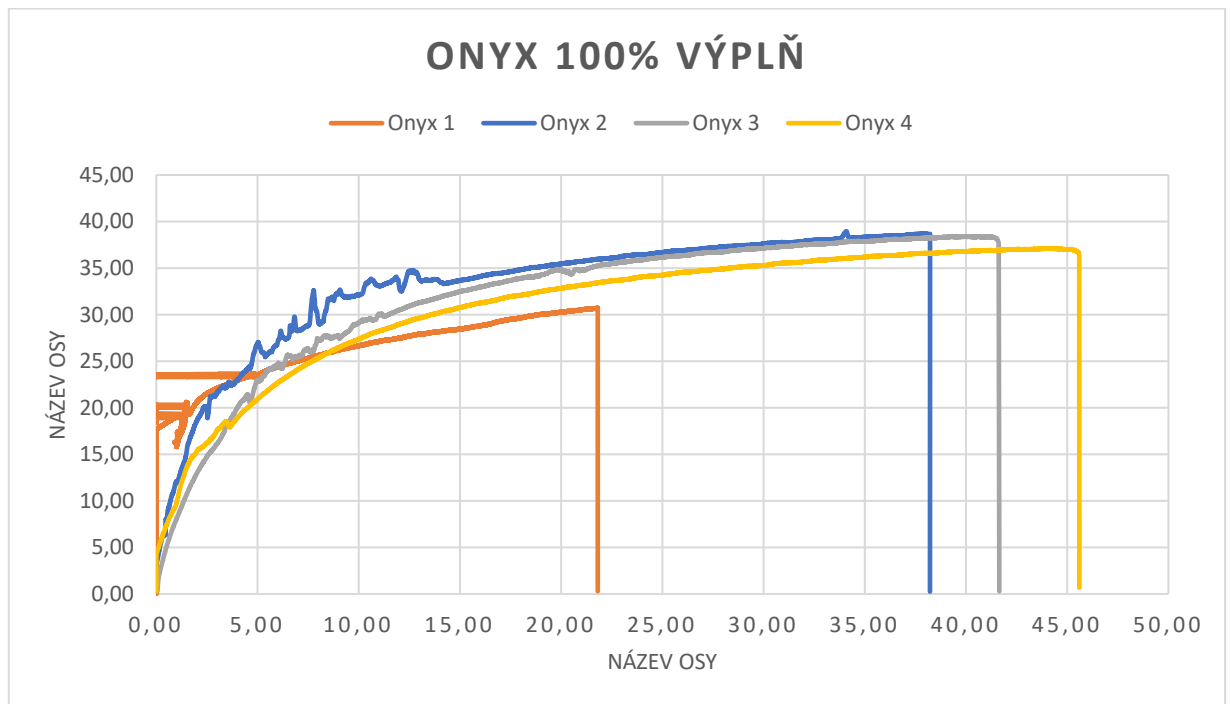
Výsledky tahové zkoušky byly vloženy do grafů. V případě, že vzorek byl přetrhnut mimo přípustnou oblast, nebyl v grafu uveden.



Obrázek 45 Zkouška tahem Onyx + kevlarové vlákno-isotropie



Obrázek 46 Zkouška tahem Onyx + kevlarové vlákno-concentric



Obrázek 47 Zkouška tahem Onyx 100% výplň

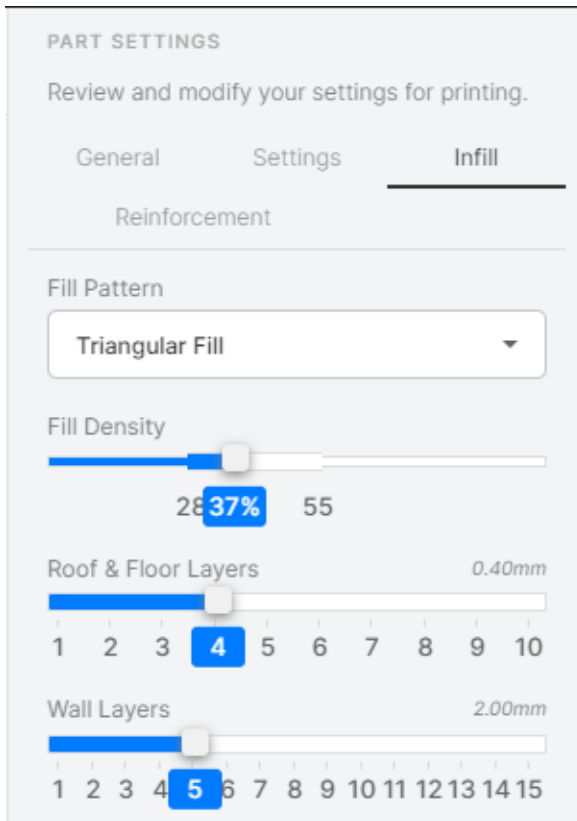
Z výsledků je patrné, že samotný Onyx vydrží menší zatížení než Onyx s vláknem kevlaru. Výrobce Markforged uvádí, že karbonová vlákna dobře absorbují nárazy a je tak vhodné ho použít u dílů, které jsou opakovaně zatěžovány. Manipulátor bude ve výrobě opakovanému zatěžování vystaven a měl by být odolný i proti případným nárazům nebo proti nešetrnému zacházení obsluhy. Proto jako materiál manipulátoru byl zvolen Onyx v kombinaci s vlákny kevlaru. [38]

5.7 Finální tisk a jeho příprava

Protože zkušební tisk proběhl úspěšně, nebylo zapotřebí dělat v modelu manipulátoru žádné úpravy.

Modely obou polovin manipulátorů byly naimportovány do sliceru od firmy Markforged. Nejedná se o klasický software, jako je tomu třeba v případě PrusaSliceru, ale slicer firmy Markforged funguje na principu internetového úložiště v prohlížeči Google Chrome. Výhodou je například odesílání tisků na tiskárnu přes internet, sdílení

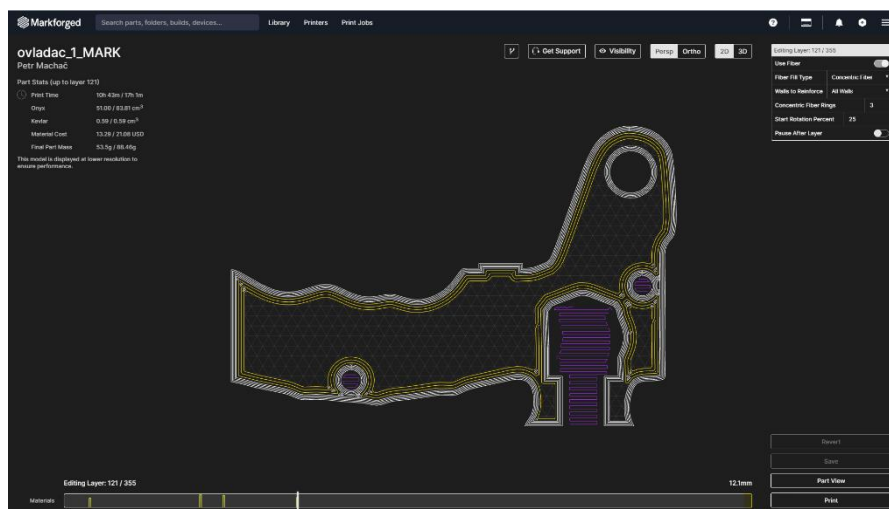
úložiště s dalšími uživateli atd. Tento slicer je intuitivní, ale nenabízí mnoho možností k editaci parametrů tisku, jako PrusaSlicer.



V prvním kroku byly nastaveny parametry tisku, viz obr. 48. Byl zvolen trojúhelníkový vzor výplně, protože vykazuje nejlepší poměr času tisku a pevnosti. Pro trojúhelníkový vzor slicer povoluje procento výplně v rozmezí 28-55. Procento výplně bylo nastaveno na 37. Počet perimetrů byl nastaven pět, kvůli zvětšení tuhosti dílu a zároveň kvůli vyřezávání závitů v postprocessingu. Díky tomuto počtu perimetrů nebude zapotřebí nastavovat stoprocentní výplň, aby bylo možné vyříznout kvalitní závit. Tím se docílí výrazné úspory materiálu, ceny a doby tisku.

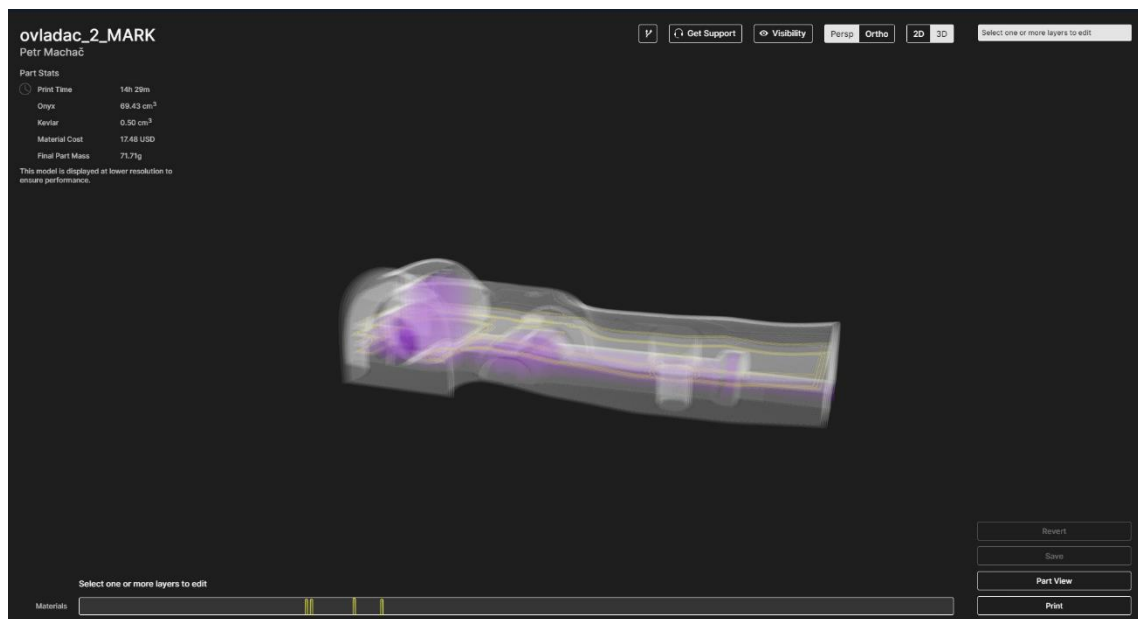
Obrázek 48 parametry výplně manipulátoru

Každá polovina manipulátoru byla vyztužena ve čtyřech vrstvách tisku vláknem kevlaru, viz obrázek 49. Kevlar dobře tlumí nárazy a zvyšuje celkovou tuhost dílu. Zároveň zpevní oblast okolo otvoru, na kterou bude působit tlak od šroubu a matice, kterou bude manipulátor upevněn k rameni na montáž kokpitů.

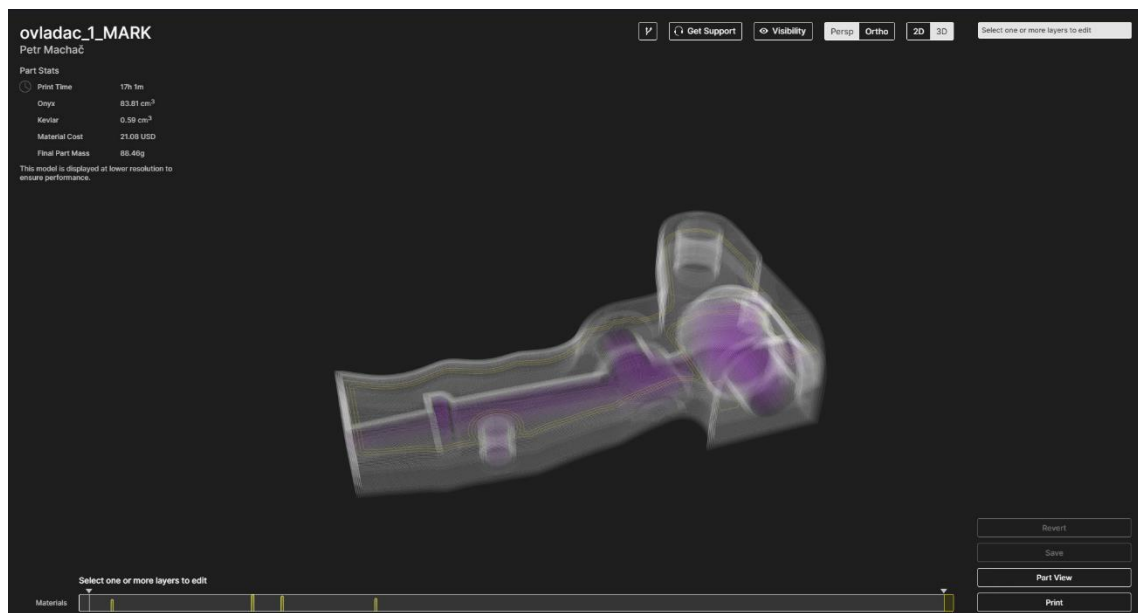


Obrázek 49 Vyztužení vláknem kevlaru

Slicer nabízí vizualizaci nastavených parametrů tisku. Z obrázků 50 a 51 je možné vidět vrstvy, ve kterých je použité vlákno kevlaru. Byl zvolen typ výplně vláknem kevlaru concentric a počet perimetrů tři. Toto nastavení bylo stejné pro každou vrstvu, ve které bylo vlákno kevlaru použito. Celkem bylo na tisk použito $1,08 \text{ cm}^3$ vláken kevlaru a $152,15 \text{ cm}^3$ Onyxu. Celková cena materiálu na tisk byla 38,30 USD (cca 830 Kč.). Doba tisku byla 31 hodin.

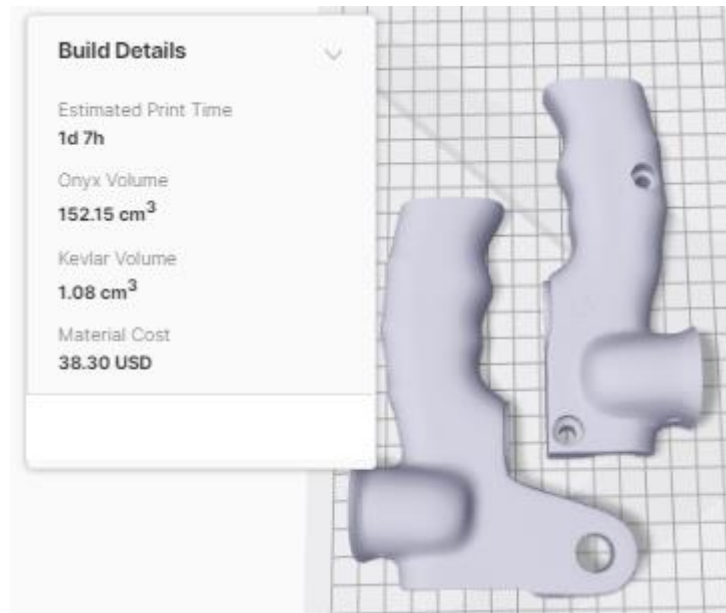


Obrázek 50 Vizualizace parametrů 1

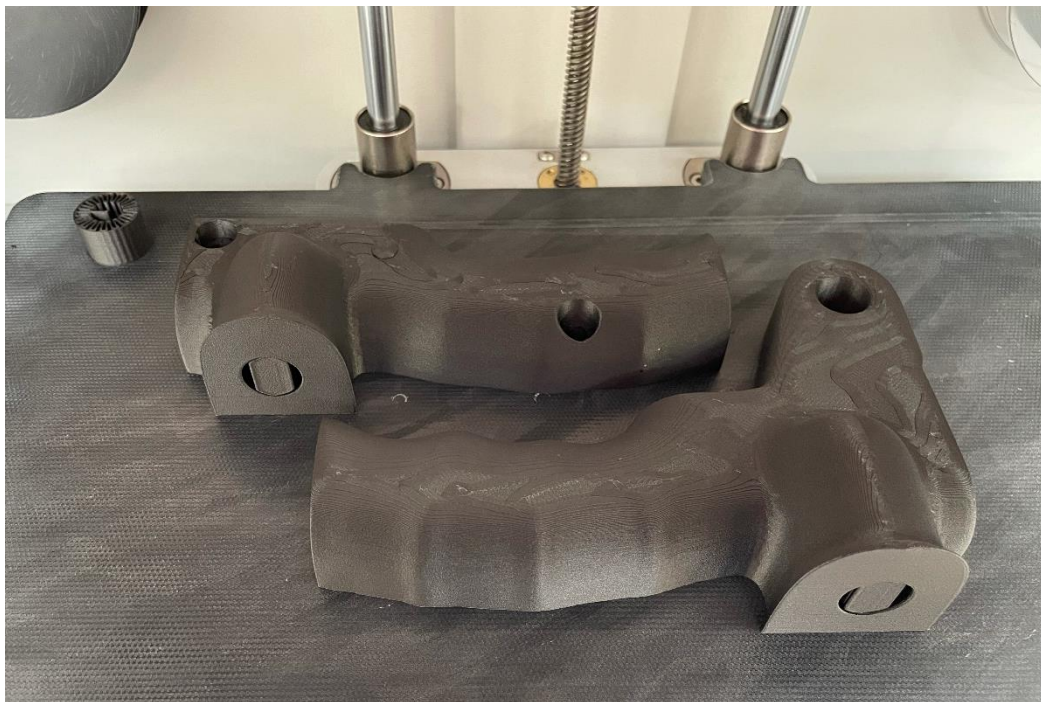


Obrázek 51 Vizualizace parametrů 2

Příprava tiskového prostoru spočívala v očištění tiskové desky a nanesení kancelářského lepidla pro lepší přilnutí první vrstvy tisku na tiskovou desku.



Obrázek 52 Informace o tisku



Obrázek 53 Vytisknutý díl na tiskové podložce

5.8 Postprocessing

Po vytištění manipulátoru bylo nejprve zapotřebí odstranit podpěry.



Obrázek 54 Podpěry pro tisk

Pro spojení obou vytištěných polovin byly použity dvě závitové vložky M5x8,3 určené pro 3D tištěné díly a dva šrouby M5x20 s vnitřním šestihranem. Cena jedné vložky byla 8,49 Kč s DPH. Cena jednoho šroubu byla 0,63 Kč s DPH. Největší z potřebných úprav po tisku byla nutnost vyříznout závity pro další prvky. Závity budou sloužit pro uchycení přepínačů na ovládání a kabelové vývodky. Pro uchycení přepínačů byly vyříznuty závity M16 a pro kabelou vývodku závit M20.



Obrázek 55 Použité spojovací prvky



Obrázek 56 Spojení obou polovin manipulátoru

6 Závěr

Tato diplomová práce byla zaměřena na reverzní inženýrství a procesy, které zahrnuje.

V teoretické části bylo nejprve obecně popsáno reverzní inženýrství. Následně byly detailněji rozepsány jednotlivé technologie a jejich principy, které reverzní inženýrství zahrnuje. Byly popsány technologie získávání 3D dat z daného objektu a jednotlivé technologie aditivní výroby. Byl popsán směr ke kovovému 3D tisku, kterým se momentálně 3D tisk vyvíjí. Dále byly uvedeny běžné materiály pro 3D tisk a moderní kompozitní materiály pro 3D tisk, které jsou současným trendem pro výrobu 3D tištěných funkčních dílů. U základních kompozitních materiálů byly rozebrány jejich mechanické vlastnosti.

Úkolem práce bylo realizovat díl pro využití ve výrobním prostředí. Vybraný díl pro aplikaci reverzního inženýrství byl zvolen manipulátor používaný ve výrobě v automobilovém průmyslu. Protože se jedná o tvarově složitou součást, byla pro vytvoření, respektive získání, 3D dat použita metoda skenování. Jako skener byl použit Zeiss Comet L3D, který je podporován programem Zeiss Colin3D. V tomto programu byla získaná data hrubě upravena a byla z nich vytvořena trojúhelníková síť.

Pro finální úpravu 3D dat získaných skenováním byl použit program GOM Inspect. Bylo provedeno uzavření děr v síti a vyhlazení sítě. Pro odstranění všech chyb v síti byla použita funkce programu PrusaSlicer Netfabb, která dokáže odstranit případné chyby v STL souborech. Opravené modely tímto způsobem bylo nutné pro další úpravy převést na objemové těleso funkcí programu CREO a vyexportovat v univerzálním formátu pro objemová tělesa STP. Vyexportované modely byly finálně upraveny v programu Autodesk Inventor.

Byl proveden zkušební tisk z materiálu PLA na tiskárně Prusa i3 MK3S, který by odhalil případné nedostatky v modelu. Bylo tak učiněno, aby případně špatně vytištěný díl (zmetek), nebyl tištěn z výrazně dražšího materiálu. Zkušební tisk proběhl v pořádku a jeho cena byla přibližně 75 Kč.

Pro finální díl byl zvolen materiál Onyx s podporou vláken kevlaru od firmy Markforged, který splňuje požadované mechanické vlastnosti na používání manipulátoru při montáži kokpitů, kde je díl silově namáhaný. Tisk proběhl na tiskárně od stejné firmy - Mark Two.

Na vytištěném díle byl proveden postprocessing, který zahrnoval odstranění podpor a vyvrtání závitů pro kabelové vývodky a pro přepínače.

Tato práce zajistila flexibilitu v dostupnosti, aplikaci, výrobě a případné opravě manipulátoru. Model manipulátoru a všechna získaná data budou k dispozici konstruktérům, kteří mohou případně vytvořený model dále upravovat tak, aby byl vhodný i pro použití v jiných aplikacích. Kdyby byl například manipulátor použit tak, že by nebyl příliš zatěžován, bylo by ho možné vytisknout z materiálu PETG nebo kteréhokoliv jiného vhodného materiálu a tím ještě více ušetřit při výrobě dílu. Byl by manipulátor v průběhu jeho používání na jedné z jeho oddělitelných částí poškozen, bylo by možné vyrobit pouze danou poškozenou část a nahradit ji. Dříve se musel objednávat celý nový manipulátor. Použitím zvolených materiálů bylo také dosaženo výrazného snížení hmotnosti oproti původnímu dílu. Původní díl má hmotnost 523 g a nový díl má hmotnost 157 g. Úspora hmotnosti na konstrukci manipulátoru je téměř 70 %.

Bylo docíleno přibližně 40% úspory pořizovacích nákladů, bude-li se počítat s pořízením třech kapacitních přepínačů v hodnotě tisíc korun (běžná cena) za kus. V případě použití menšího počtu nebo levnější varianty přepínačů a použití jiného tiskového materiálu bude úspora ještě vyšší. V případě objednávání manipulátoru od dodavatele nebyla možná konfigurace, cena byla pevná a počet snímačů tři bez možnosti změny.

Cílem práce byla realizace typového příkladu pro využití ve výrobním prostředí. Tento cíl byl splněn.

7 Zdroje

- [1] BLAŽEK, Jiří. Reverzní inženýrství. Praha, 2018. Dostupné také z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/79919/F2-BP-2018-Blazek-Jiri-reverseengineering.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Bakalářská práce. ČVUT.
- [2] Aditivní a alternativní technologie: Revers engineering, technologie měření (digitalizace) využitelné jako zdroj dat pro 3D tisk, rapid prototyping. Moodle [online]. Praha, 2021 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://moodle-vyuka.cvut.cz/mod/resource/view.php?id=106305>
- [3] Reverzní inženýrství [online], Wikipedie: Otevřená encyklopedie, c2021, Datum poslední revize 5-06-2021, 19:43 UTC, [citováno 20.6.2021] https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Reverzn%C3%AD_in%C5%BEen%C3%BDrstv%C3%AD&oldid=20028465
- [4] PREČAN, Filip. Aplikace reverse engineeringu na součást sportovního vybavení. Praha, 2018. Dostupné také z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/79894/F2-BP-2018-Precan-Filip-Precan_BP_2018_Aplikace%20reverse%20engineeringu%20na%20soucast%20sportovniho%20vybaveni.pdf?sequence=-1&isAllowed=y. Bakalářská práce. ČVUT. Vedoucí práce Ing. Jan Tomíček, Ph.D.
- [5] NAVRÁTIL, Robert. Reverse engineering. CAD [online]. 2002, 4 [cit. 2021-5-25]. Dostupné z: <https://drive.google.com/file/d/1rponzI2qooQCUtS2vREjwdND1s1eRQe/view>.
- [6] 3D skenování. 3d-skenovani.cz [online]. [cit. 2021-1-25]. Dostupné z: <https://www.3d-skenovani.cz/3d-skenovani/zpracovani-dat/>
- [7] Vztažná a souřadnicová soustava. Bakalářská fyzika [online]. Ostrava: VŠB, 2015 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <http://if.vsb.cz/bf/04.html>
- [8] AHMAD K. Elshennawy a Gamal S. Weheba. Manufacturing Processes & Materials, d 5th Edition. Ilustrované vydání. Society of Manufacturing Engineers (SME), 2015. ISBN 0872638715, 9780872638716.
- [9] ZEISS ACCURA. Zeiss [online]. [cit. 2021-1-30]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/systemy/bridge-typecmms/accura.html>

- [10] GINDUMAC: 3D souřadnicový měřicí stroj ZEISS UC 850 [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: https://www.gindumac.cz/produkt/zeiss-uc-850_NL-MEA-ZEI-1987-00001
- [11] HEXAGON METROLOGY. Dea GANTRY line: 3D souřadnicový měřicí stroj ZEISS UC 850 [online]. 2015 [cit. 2021-5-20]. Katalog výrobků. Dostupné z: https://www.gindumac.cz/produkt/zeiss-uc-850_NL-MEA-ZEI-1987-00001
- [12] ZEISS PRO. Zeiss [online]. [cit. 2021-1-30]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/systemy/merici-stroje-shorizontálním-ramenem/pro-and-pro-t.html>
- [13] DOLÁK, David. Rešerše souřadnicových měřicích strojů CMM a měřicích ramen CMMs. Brno, 2010. Bakalářská práce. VUT. Vedoucí práce Ing. MIROSLAV OPL.
- [14] PRIMA BILAVČÍK, s.r.o [online]. [cit.2021-6-20]. Dostupné z: <https://www.merici-pristroje.cz/merici-rameno/>
- [15] Senzor pro přesnou a komplexní inspekci. MMSpektrum [online]. [cit. 2021-4-30]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/senzor-pro-presnou-akomplexni-inspekci-ci-reverzni-inzenyrstvi.html>
- [16] HSIEH, Jiang. Computed tomography: principles, design, artifacts, and recent advances. 2nd ed. Hoboken, N.J.: Bellingham, Wash: Wiley Interscience; SPIE Press, 2009. 556 s. ISBN 978-0-470-56353-3.
- [17] CARL ZEISS SLOVAKIA, s.r.o. Kontrola kvality plastových dílů se ZEISS počítačovou tomografií CT. Plastic Portal EU [online]. Bratislava: Plastic Portal EU, 2020 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.merici-pristroje.cz/merici-rameno/>
- [18] NAVRÁTIL, Jakub. Porovnání měřicích metod pro kontrolu kvality dílů. Ostrava, 2019. Diplomová práce. Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Prof. Ing. Robert Čep, Ph.D.
- [19] 5 Reasons to Use Markforged's 3D Printer Slicer Software, Eiger. Markforged.com [online]. USA [cit. 2021-6-28]. Dostupné z: <https://markforged.com/resources/blog/5-reasons-to-use-markforged-3d-printer-slicer-software-eiger>

- [20] Aditivní výroba-moderní způsob obrábění. Axiomtech.cz [online]. 2017 [cit. 2021-2-18]. Dostupné z: <https://www.axiomtech.cz/25836n-aditivni-vyrobamoderni-zpusob-obrabeni>
- [21] ALKAIOS BOURNIAS Varotsis. 3D printing vs. CNC machining. HUBS [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/3d-printing-vs-cnc-machining/>
- [22] KAŠPÁRKOVÁ, Kristýna. 3D TISK KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ. Brno, 2020. Diplomová práce. VUT. Vedoucí práce Ing. Jan Zouhar, Ph.D. Dostupné z: <https://netsoc.org/blog/2015/01/01/3d-printing-makes-complexity-free/>
- [23] DAVID, Orban. 3D Printing Makes Complexity Free. NETSOC [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://netsoc.org/blog/2015/01/01/3d-printing-makes-complexity-free/>
- [24] Přehled technologií 3D tisku. DKMP [online]. Ostrava [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <http://www.dkmp.cz/o-nas/detail/prehled-technologie-3d-tisku>
- [25] Informace o technologiích 3D tisku. Easycnc [online]. 2017 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.easycnc.cz/inpage/informace-o-technologiech-3d-tisku/>
- [26] Technologie 3D tisku. Prusa 3D [online]. 2017 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/>
- [27] Technologie 3D tisku. 3D-tisk [online]. 2019 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/wiki/dlp/>
- [28] INDRA, Zdeněk. MULTIFUNKČNÍ MODULÁRNÍ 3D FDM TISKÁRNA. Brno, 2019. Bakalářská práce. VUT. Vedoucí práce Ing. Kamil Jaško.
- [29] Laminated Object Manufacturing. ResearchGate [online]. 2017 [cit. 2021-6-20]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Laminated-Object-Manufacturing-LOMCourtesy-CoustromPartNet-Inc_fig3_322096608
- [30] BAŠTOVÁ, Bára. Konstrukční systémy. Drevostavitel [online], 13.09.2018 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.drevostavitel.cz/clanek/3d-tisk-domu-je-stale-dostupnejsi-domek-vyjde-na-80-000-kc-a-stoji-za-den>

- [31] TIPLER, Paul A.; Mosca, Gene (2008). Fyzika pro vědce a inženýry – svazek 1. Mechanika/oscilace a vlny/termodynamika. New York, NY: Worth Publishers. str. 666–670. ISBN 978-1-4292-0132-2.
- [32] STEVENSON, Kerry. Curious Thing Thing about 3.00 vs 1.75mm 3D Printer Filament. Fabbaloo [online]. 2015 [cit. 2021-4-30]. Dostupné z: <https://www.fabbaloo.com/blog/2015/7/26/a-curious-thing-about-300-vs-175mm-3d-printerfilament>
- [33] L.K. Engineering, s.r.o. [online]. [cit. 2021-7-25]. Dostupné z: <https://www.lke.cz/cz/mechanicke-vlastnosti-materialu-pro-3d-tisk/>
- [34] PRŮVODCE MATERIÁLY. Prusa3D [online]. 2018 [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/materialy/>
- [35] MATERIÁLOVÝ SLOVNÍK. MaterialPro3D [online]. 2018 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/>
- [36] EHRENSTEIN, W. G. Polymerní kompozitní materiály. 1. vydání. Praha: Scientia, 2009. 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [37] ASSEMBLY RSS Feed. Assembly Magazine | Manufacturing automation and design [online]. Assembly Magazine, 2020 [cit. 2021-5-27]. Dostupné z: [view-source: https://www.assemblymag.com](https://www.assemblymag.com), doi: 10.1016/j.compstruct.2017.08.088.
- [38] XU, Zhen a Chao GAO. Graphene fiber: a new trend in carbon fibers. Materials Today [online]. 2015. s. 480-492 [cit. 2021-5-27]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2015.06.009>.
- [39] KRATOCHVÍLOVÁ, Jitka. 3D tisk. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, 2015. ISBN 978-80-7414-936-8.
- [40] Composite Materials for 3D Printing. Metal and Carbon Fiber 3D Printers for Manufacturing | Markforged [online]. Markforged, 2020 [cit. 2021-5-27]. Dostupné z: <https://markforged.com/materials/composites/>
- [41] CAMPBELL, F. C. ASM INTERNATIONAL. Structural Composite Materials. Materials Park: A S M International, 2010. ISBN 9781615030378.

[42] KAŠPÁRKOVÁ, Kristýna. 3D TISK KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ. Brno, 2020. Diplomová práce. VUT. Vedoucí práce Ing. Jan Zouhar, Ph.D.

Seznam obrázků

Obrázek 1 Proces reverzního inženýrství [5].....	11
Obrázek 2 Kartézské souřadnice v prostoru [7]	
Obrázek 3 Sférické souřadnice v prostoru [7]	13
Obrázek 4 Mostový souřadnicový měřicí stroj Zeiss UC 850 [10]	14
Obrázek 5 Využití portálového SMS v leteckém průmyslu [11].....	15
Obrázek 6 Stojanový SMS Zeiss Pro [12]	15
Obrázek 7 Použití měřicího ramena [14]	16
Obrázek 8 Skenování plochy-kopírování povrchu [15].....	17
Obrázek 9 kontrola plastových dílů pomocí CT [17]	17
Obrázek 10 Proces získání informace pomocí strukturovaného světla [18].....	18
Obrázek 11 Ekonomičnost technologií [21]	20
Obrázek 12 Vhodné technologie v závislosti na počtu dílů a jejich složitosti [21].....	21
Obrázek 13 Porovnání ekonomičnosti technologií [23]	21
Obrázek 14 Technologie SLS [25]	23
Obrázek 15 3D tiskárna Průša [25].....	25
Obrázek 16 Tiskárna Průša SLA s vytvrzovacím zařízením [25]	26
Obrázek 17 Princip tisku SLA, DLP a MSLA [28].....	27
Obrázek 18 Popis tiskárny s LOM technologií [29]	27
Obrázek 19 Průběh 3D tisku domu [30]	28
Obrázek 20 Hotový 3D tištěný dům [30].....	28
Obrázek 21 Druhy tkanin [36]	33
Obrázek 22 Deformační křivky kontinuálních vláken. [40]	36
Obrázek 23 Závislost modulu pevnosti v tahu na úhlu zatížení. [41].....	38
Obrázek 24 Delaminace kompozitního materiálu [42].....	39
Obrázek 25 Foto originálního manipulátoru.....	40
Obrázek 26 Příklad použití manipulátoru 1	40
Obrázek 27 Příklad použití manipulátoru	41
Obrázek 28 Průběh skenování	42
Obrázek 29 Nastavení průběhu skenování.....	43

Obrázek 30 Zpracování dat.....	44
Obrázek 31 Funkce programu na zpracování dat	44
Obrázek 32 Export dat	45
Obrázek 33 Naskenovaný díl po importu do programu GOM Inspect.....	46
Obrázek 34 Díry v síti způsobené špatným nasnímáním dílu	47
Obrázek 35 Funkce uzavírání děr v mesh síti.....	47
Obrázek 36 Funkce GOM Inspect vyhlazení mesh sítě.....	48
Obrázek 37 Vyhlazená síť pomocí GOM Inspect.....	48
Obrázek 38 Funkce Nerfabb v PrusaSliceru	49
Obrázek 39 Editování parametrů exportovaného modelu	50
Obrázek 40 Vytvoření plochy pro tisk na spodní části dílu.....	51
Obrázek 41 Upravený model manipulátoru v Inventoru	52
Obrázek 42 Výsledek zkušební tisku.....	53
Obrázek 43 Rozměry zkušebních tělísek.....	53
Obrázek 44 Typy použitých vzorků pro tahovou zkoušku	54
Obrázek 45 Zkouška tahem Onyx + kevlarové vlákno-isotropic	55
Obrázek 46 Zkouška tahem Onyx + kevlarové vlákno-concentric.....	55
Obrázek 47 Zkouška tahem Onyx 100% výplň.....	56
Obrázek 48 parametry výplně manipulátoru	57
Obrázek 49 Vyztužení vláknem kevlaru.....	57
Obrázek 50 Vizualizace parametrů 1	58
Obrázek 51 Vizualizace parametrů 2.....	58
Obrázek 52 Informace o tisku.....	59
Obrázek 53 Vytisknutý díl na tiskové podložce	59
Obrázek 54 Podpěry pro tisk	60
Obrázek 55 Použité spojovací prvky	60
Obrázek 56 Spojení obou polovin manipulátoru	61

Seznam tabulek

Tabulka 1 Srovnání mechanických vlastností materiálů pro 3D tisk [33].....	29
Tabulka 2 Shrnutí vlastností vláken Markforged vhodné pro 3D tisk. [40].....	36