

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



Zpracování STL dat pro potřeby reverzního inženýrství

Diplomová práce

Jan Jindra

2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Jindra** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **466580**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výrobní inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Zpracování STL dat pro potřeby reverzního inženýrství

Název diplomové práce anglicky:

STL data processing for reverse engineering purposes

Pokyny pro vypracování:

- 1) Charakteristika a využití reverzního inženýrství
- 2) Možnosti digitalizace geometrie fyzických objektů
- 3) Softwarové nástroje pro zpracování STL dat
- 4) Zpracování a úprava STL dat z reálného dílu

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Lukáš Pelikán, 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. Lukáš Pelikán
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

Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem všechny zdroje uvedl v příloženém seznamu použité literatury.

Dále prohlašuji, že nemám žádný 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).

V Praze dne:

Podpis:

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Lukáši Pelikánovi za vlídný přístup při konzultacích a za odborné vedení při zpracování mé diplomové práce.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

Autor:	Bc. Jan Jindra
Fakulta a ústav:	Fakulta strojní ČVUT, Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie (ú12134)
Název práce:	Zpracování STL dat pro potřeby reverzního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Lukáš Pelikán
Rozsah práce:	
Rok:	2021
Klíčová slova:	Reverzní inženýrství, snímací systémy, STL (polygonizace), Blender, Fusion 360, Meshmixer
Anotace:	<p>Tato diplomová práce obecně popisuje reverzní inženýrství, jeho historii, oblasti využití, důvody využití a výhody. Dále popisuje části a možnosti celého procesu reverzního inženýrství. Řeší problematiku práce s STL modely od nahrání modelu po úpravy, mezi které patří i parametrizace STL modelu. Představuje programy používané reverzním inženýrstvím k práci s těmito modely. Ke konci teoretické části nastiňuje problematiku konstrukční optimalizace, zejména optimalizaci ergonomie. Pro praktickou část byl obdržen naskenovaný model trysky, který byl upravován třemi různými programy. Výsledkem bylo závěrečné porovnání programů z hlediska dostupnosti, pracovního rozhraní, možností importu a exportu, funkcí a konečného výsledku úprav.</p>

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JINDRA, J. *Reverzní inženýrství*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2021. Vedoucí diplomové práce Ing. Lukáš Pelikán.

SUMMARY OF BACHELOR THESIS

Author:	Bc. Jan Jindra
Faculty and department:	Faculty of mechanical Engineering department of Machining, Process Planning and Metrology
Title:	STL data processing for reverse engineering purposes
Supervisor:	Ing. Lukáš Pelikán
Number of pages:	
Year:	2021
Key words:	Reverse engineering, scanning systems, STL (polygonization), Blender, Fusion 360, Meshmixer
Abstract:	<p>This thesis generally describes reverse engineering, its history, areas and reasons for use and benefits. It also describes the parts and possibilities of the whole process of reverse engineering. It solves the problem of working with STL models from model loading to editing, which includes parameterization of the STL model. Thesis introduces programs used by reverse engineering to work with these models. Towards the end of the theoretical part, it outlines the issue of design optimization, especially the optimization of ergonomics. For the practical part, a scanned model of the nozzle was obtained, which was modified by three different programs. The result was a final comparison of programs in terms of availability, working interface, import and export options, functions and the final result of modifications.</p>

Obsah

Seznam zkratk	11
1 Úvod	12
2 Reverzní inženýrství	13
2.1 Historie	13
2.2 Oblasti využití	14
2.3 Důvody využití reverzního inženýrství	14
2.4 Výhody	14
2.5 Proces reverzního inženýrství	15
3 Získávání dat rozměrových a tvarových	16
3.1 Skenování	17
3.2 Destruktivní a nedestruktivní skenery	17
3.3 Dotykové a bezdotykové skenování	18
3.4 Stacionární a mobilní skenery	20
3.5 Systémy snímající pouze vnější geometrii	20
3.6 Systémy snímající vnitřní i vnější geometrii	21
4 Zpracování nasnímaných dat	23
4.1 Přípona *.STL	23
4.2 Přípona *.OBJ	23
4.3 Mračno bodů, přípony *.dxf; *.igs; *.asc; *.vtx; *.wrl; *.obj	23
5 Práce s STL modelem	24
5.1 Oprava STL modelu	25
5.2 Úprava STL modelu	25
6 Tvorba CAD modelu z naskenovaných dat	26
6.1 Automaticky generované povrchy	26

6.1.1	NURBS plochy	27
6.2	Ruční modelování	27
6.3	Programy	28
7	Konstrukční optimalizace	29
7.1	Optimalizace ergonomie	31
8	Praktická část.....	32
9	Blender	33
9.1.1	Object mode	33
9.1.2	Edit mode	35
9.1.3	Sculpt mode	36
9.2	Nahrání modelu trysky	36
9.3	Centrování součástí	37
9.4	Odstranění chyb	38
9.5	Odstranění spodní části trysky po délce závitu	40
9.5.1	Odstranění části modelu – Boolean	40
9.5.2	Odstranění části modelu – Bisect.....	42
9.6	Vytvoření optimalizovaného tvaru.....	44
9.6.1	Modelování v programu Solidworks 2017	44
9.6.2	Modelování v programu Blender	45
9.7	Spojení šestihranu s modelem trysky	46
9.7.1	Ruční spojování	46
9.7.2	Spojení booleovskou funkcí.....	49
10	Fusion 360.....	52
10.1	Pracovní rozhraní	52
10.2	Pracovní prostředí	54
10.3	Nahrání modelu trysky	54
10.4	Centrování součástí	56

10.5	Odstranění chyb	56
10.6	Odstranění spodní části trysky po délce závitu	58
10.6.1	Odstranění části modelu – mesh nástroje	58
10.6.2	Odstranění části modelu – CAD nástroje	59
10.7	Vytvoření optimalizovaného tvaru.....	62
10.7.1	Modelování pomocí nástrojů surface + mesh.....	62
10.7.2	Modelování pomocí nástrojů solid	65
11	Meshmixer	67
11.1	Pracovní rozhraní	67
11.2	Nahrání modelu trysky	68
11.3	Centrování součásti	69
11.4	Odstranění chyb	70
11.5	Odstranění spodní části trysky po délce závitu	72
11.5.1	Odstranění části modelu – Boolean	72
11.5.2	Odstranění části modelu – Plane cut.....	73
11.6	Vytvoření optimalizovaného tvaru.....	74
11.7	Spojení šestihranu s modelem trysky	75
11.7.1	Spojení booleovskou funkcí.....	75
11.7.2	Spojení funkcí combine	77
12	Výsledné porovnání	78
12.1	Dostupnost.....	78
12.2	Pracovní rozhraní	79
12.3	Možnosti importu a exportu dat	79
12.4	Funkce a nástroje.....	81
12.4.1	Pohyb v pracovním prostoru.....	82
12.4.2	Centrování součásti.....	82
12.4.3	Odstranění chyb	83

12.4.4	Ostatní funkce programu	83
12.5	Model trysky	84
12.6	Tabulka hodnocení	86
13	Vyhodnocení praktické části.....	86
14	Závěr	88
	Seznam použitých zdrojů.....	89
	Seznam obrázků.....	93
	Seznam tabulek	95

Seznam zkratk

CAD	Computer aided design (počítačová podpora konstruování)
STL	Stereolithography (Stereolitografie)
CNC	Computer numerical control (číslicové řízení počítačem)
3D	Three-dimensional (trojrozměrný)
NURBS	Non-uniform rational basis spline (Neuniformní racionální B-spline)

1 Úvod

Pojem reverzní inženýrství rezonuje v oblastech strojírenství již řadu let. Je tedy pochopitelné, že je kladen stále větší důraz na rozvíjení a zdokonalování každé jeho části. Ať už se jedná pouze o trojrozměrnou digitalizaci reálného dílu ve formát použitelný v aditivní výrobě nebo o jeho následné převedení do CAD formátů. Pokaždé je potřeba naskenovaná data upravit. Tím se dostáváme do oblastí softwarů schopných práce s těmito formáty. Je zřejmé, že vývoj neminul ani softwarovou část procesu reverzního inženýrství. V současné době existuje spousta programů umožňujících práci s plošnými modely, ale existují i programy zvládající práci s plošnými a objemovými modely zároveň.

Volba správného programu pro úpravu plošného modelu je pro uživatele v reverzním inženýrství zásadním krokem k dobrému výsledku. Pro uživatele to v první řadě znamená znát schopnosti programů, které mu jsou dostupné.

Cílem teoretické části práce je obecné představení pojmu reverzního inženýrství. Dále je popsán celý proces reverzního inženýrství. V posledních kapitolách teoretické části je řešena problematika konstrukční optimalizace se zaměřením na optimalizaci ergonomie.

Praktická část diplomové práce představuje tři zvolené programy umožňující práci s plošnými modely. V těchto programech je upravován model trysky za účelem získání dat potřebných pro jejich konečné porovnání. V závěru práce jsou tyto tři programy porovnány z hlediska několika parametrů. Pro lepší orientaci byla vytvořena tabulka hodnocení.

2 Reverzní inženýrství

Pojmem reverzní inženýrství, překlad z anglického reverse engineering, je definován proces opačný běžnému inženýrskému procesu. Obecným cílem reverzního inženýrství je odhalit princip fungování zkoumaného předmětu za účelem vytvoření stejně či podobně fungujícího předmětu. Hotový předmět nemusí být vždy totožný s originálem, ale může zahrnovat úpravy, které vedou k dosažení lepší funkčnosti nebo kvality.

2.1 Historie

S reverzním inženýrstvím se setkáváme dnes a denně a jeho vznik nelze snadno určit. Obrovský význam zaznamenalo v oblasti vojenství, kdy často docházelo ke kopírování cizích technologií. Mezi nejznámější reverzované technologie patří sovětský strategický bombardér Tupolev Tu-4, který se inspiroval americkým letounem B-29 nebo německý vojenský kanystr na benzín, který inspiroval západní mocnosti k vytvoření obdobného kanystru s názvem „Jerrycan“.



Obrázek 1: B-29 a Tu-4

2.2 Oblasti využití

Reverzní inženýrství se nachází v mnoha odvětvích průmyslu, jako je například letecký a automobilový průmysl, strojírenství, lékařství, stomatologie, geologie, ale také i v informačních systémech, herním a filmovém průmyslu atd.

V oblastech strojírenství je pojem reverzní inženýrství spojován s technologiemi trojrozměrné digitalizace a je označován jako proces, který si klade za cíl odvození digitálního modelu z fyzického objektu a jeho následné použití v dostupných CAD systémech. Naskenovaná polygonální data se tedy převádí na data objemová nebo na plochy. [1]

2.3 Důvody využití reverzního inženýrství

- Neexistence původního dílu a jeho nutná náhrada,
- ztráta výkresové dokumentace,
- inovování dílů, u kterých nejsou k dispozici CAD data,
- kontrola kvality výroby (zjištění odchylek při výrobě),
- analýza konkurenčních produktů,
- optimalizace produktu z hlediska zvýšení výkonu nebo jeho funkcionality,
- zjišťování aktuálního opotřebení dílu nebo nástroje po určité době v provozu,
- kontrola vad vzniklých výrobním procesem (lítí, tváření, ...),
- filmový a videoherní průmysl – tvorba modelů a postav,
- archivace objektů,
- výroba a vývoj implantátů (kloubní náhrady, kosti, zuby, ...),
- oblečení a obuv na míru. [2;3]

2.4 Výhody

- Zkrácení doby vývoje inovovaného dílu,

- úspora peněz ve vývoji inovovaných i nových dílů,
- není nutné vlastnit výkresovou dokumentaci,
- reverzovaný díl může být poškozen,
- získaný 3D model se dá využít k dalším analýzám nebo jako podklad pro samotnou výrobu součásti. [2]

Velmi blízkou oblastí reverse engineeringu je quality control (kontrola kvality), zabývající se kontrolou rozměrů reálného výrobku. V této oblasti se uplatňují jiné specializované softwary, které pro kontrolu využívají výstupní data 3D skenerů. Porovnání spočívá v přiložení naskenovaných bodů na teoretický 3D model (CAD model) a vyhodnocení rozměrových a geometrických tolerancí předepsaných na teoretickém modelu. Rozdíly naskenovaných bodů se oproti teoretickému modelu na monitoru graficky zobrazí pomocí barevné palety. Následně je možné určit, zda je daný výrobek vadný a je-li nutná jeho oprava či odstranění z výrobní série. Příkladem takového softwaru může být například Verdict od firmy Imageware. [13]

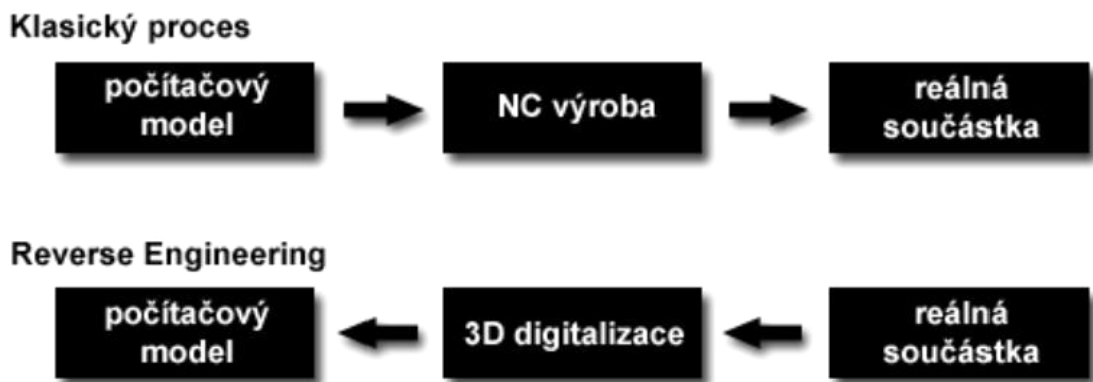
2.5 Proces reverzního inženýrství

V běžném výrobním procesu je na počátku vytvořen návrh a konstrukce 3D modelu součásti (nejčastěji pomocí CAD programu), následuje volba vhodné technologie výroby (obrábění, frézování, 3D tisk...), může, ale i nemusí být vytvořena výkresová dokumentace, a nakonec se součást vyrobí. U reverzního inženýrství je tento postup opačný. Ze zhotoveného výrobku se pomocí vhodné technologie skenování nasnímá celá součást a následně se převede do digitální formy (vytvoření trojúhelníkové sítě STL). Z STL sítě se pomocí parametrizace vytvoří 3D model a pokračuje opět běžný proces výroby. [2;5]

Pro zvolení strategie reverzního inženýrství se musí zvážit následující fakta:

- Důvod, proč daný díl podstupuje proces reverzního inženýrství,
- počet skenovaných dílů – jeden či více,

- velikost dílu – malý či velký,
- složitost dílu – jednoduchý nebo složitý,
- materiál dílu – tvrdý nebo měkký,
- povrch dílu – lesklý nebo matný,
- geometrie dílu – organická nebo hranolová a vnitřní nebo vnější,
- vyžadovaná přesnost – lineární nebo objemová. [6]



Obrázek 2: Srovnání běžného výrobního procesu s reverzním inženýrstvím [13]

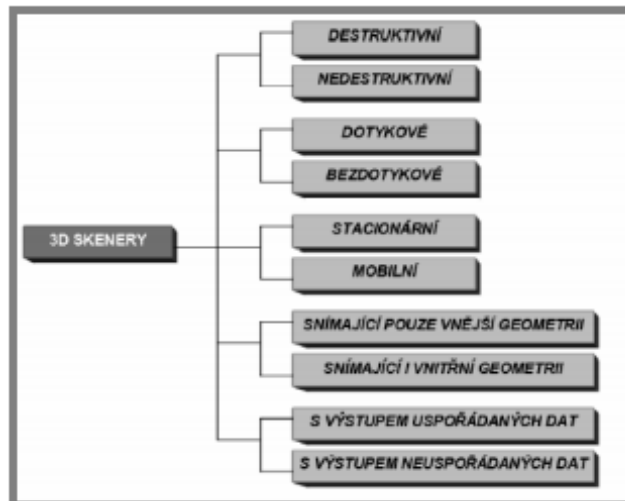
3 Získávání dat rozměrových a tvarových

První fází celého reverzního postupu je získání dat z již vyhotoveného výrobku. Získání informací o kompletní geometrii dílu lze docílit dvěma způsoby. Prvním způsobem používaným primárně pro geometricky jednodušší díly je měření pomocí dílenských měřidel (mikrometr, posuvné měřítko, úhломěr...). Z takto získaných dat se poté ručně vytvoří CAD model a výkresová dokumentace, které dále slouží jako podklady pro výrobu.

S narůstající tvarovou složitostí dílu klesá přesnost získaných dat i efektivita jejich sběru, proto je nutno použít metodu, která tyto nedostatky eliminuje.

3.1 Skenování

Použití skenování pro získávání tvarových a rozměrových dat eliminuje problémy s přesností a efektivitou jejich sběru, ale vyžaduje zvolení správné skenovací strategie. Tato strategie zahrnuje zvolení správného skenovacího přístroje, přípravu dílu před skenováním a záznam prováděného skenování geometrických prvků dílů, jako jsou hrany, plochy, kapsy, díry atd. Pro skenování geometrie dílů se používají 3D skenery, jejichž výstupní data jsou mračna bodů definující povrchovou geometrii. Tato skenovací zařízení jsou dostupná jako samostatná zařízení nebo jako doplňky CNC strojních center. Skenovací zařízení rozdělujeme dle několika parametrů viz. obrázek 3. [6]



Obrázek 3: Rozdělení 3D skenerů [8]

3.2 Destruktivní a nedestruktivní skenery

Hlavní rozdělení skenerů je rozdělení na destruktivní a nedestruktivní. Destruktivní skenery mají schopnost digitalizovat vnější i vnitřní povrch součásti, ale při jejich použití se digitalizovaný objekt zničí. Hlavní oblastí použití těchto skenerů je digitalizace součástí se složitou vnitřní geometrií. [9]

Před samotným procesem skenování je objekt umístěn na nastavitelný rám a je pokryt speciálním materiálem, který umožňuje naskenování snímků s vysokým kontrastem mezi

součástí a výplňovým materiálem. Následuje vyčerpání vzduchu a vznik vakua, což má za následek vyplnění všech dutin součásti speciálním materiálem. Poté se připravený blok přemístí do skenovacího zařízení a připevní se na frézovací stůl. [9]

Samotné skenování probíhá v cyklu, kdy se odfrézuje ultratenká vrstva materiálu z bloku a vzniklá plocha je naskenována optickým skenerem. Posledním krokem cyklu je odeslání získaných dat k softwarovému zpracování a následuje další cyklus. [9]

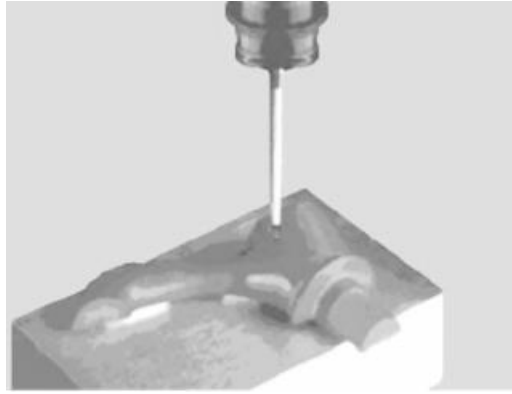


Obrázek 4: Destruktivní skener RE 1000 [13]

3.3 Dotykové a bezdotykové skenování

Nedestruktivní skenování se dále dělí na skenování dotykové a bezdotykové. Tyto dva způsoby snímání se odlišují způsobem získávání dat ze skenovaného objektu.

Dotykové skenování pro získávání dat z objektu využívá hmotný dotyk snímače s povrchem součásti. Mezi systémy dotykového skenování se řadí 3D digitizéry a stacionární souřadnicové měřicí systémy. Touto metodou se dají skenovat jak malé objekty, tak objekty dlouhé až několik metrů. Výhodou dotykové metody je oproti bezdotykové větší tolerance vůči znečištění (malé předměty odsune, olejovou vrstvou projde). Nevýhodou je existence takových povrchů, které nelze touto metodou vůbec měřit (nedostupná vnitřní geometrie, poddajný materiál) a je tedy nezbytné použití bezdotykové metody. [7;9]



Obrázek 5: Dotykový skener [6]

Bezdotykové skenování naopak nevyžaduje kontakt snímače s povrchem. Bezdotyková zařízení jsou označována jako skenery a pracují nejčastěji na laserovém nebo optickém principu. Získávání 3D souřadnic povrchových bodů z měřeného objektu je mnohem rychlejší, tudíž se tato metoda vyznačuje vysokou produktivitou. Další výhodou je vysoký stupeň detailu u ploch, které jsou pro mechanickou sondu těžce nebo úplně nepřístupné. Povrch součásti netrpí na jakékoliv poškození a systém vytváří velmi hustou síť bodů. Bezdotyková metoda (optická) vyžaduje čistý měřený povrch. Je nutné použití hodnotících parametrů struktury povrchu, které jsou specifikovány ve standardech ISO. [7;9]



Obrázek 6: Bezdotykový skener (Optický) [6]

Použitím dotykového a bezdotykového způsobu měření na stejném vzorku dostaneme dva různé výsledky. Je tedy nutné volit správnou technologii měření povrchu s ohledem na různé aplikace. [7]

3.4 Stacionární a mobilní skenery

Dalším významným dělením snímacích systémů je dělení na stacionární, kde se snímáný objekt musí dopravit k zařízení, a mobilní, se kterým je možná manipulace přímo ke snímanému objektu. Mobilním snímacím systémům zajišťuje kloubový mechanismus schopnost snímat obtížně dostupná místa ve vysoké přesnosti a dobré mobilitě. Data o snímaném bodu se získají vyhodnocením údajů ze všech kloubů ramene. Každý kloub disponuje senzorem zaznamenávajícím natočení ramene. Výhodou mobilních systémů je neomezená rotace kloubů a rychlá výměna měřících doteků. Nevýhodou je pomalé získávání 3D modelu objektu, protože se snímání na těchto zařízeních provádí ručně. [9]



Obrázek 7: Mobilní skener (měřící rameno Romer absolute arm) [10]

3.5 Systémy snímající pouze vnější geometrii

Tyto systémy se vyznačují neschopností snímat uzavřenou vnitřní geometrii. Jedná se převážně o dotykové snímací systémy, ale i bezdotykové (laserové a optické skenery).

- Laserové – Pracují na podobném principu jako sonar. Získávání dat spočívá v odeslání laserového paprsku kolmo k předmětu, jeho odražení, následné vrácení do skenovacího zařízení a vyhodnocení doby mezi vysláním a vrácením paprsku. Zakřivení objektu lze odečíst z úhlu, pod kterým se paprsek vrátí zpátky do

zařízení. Kombinace těchto informací umožní skeneru získat přesnou polohu snímaného bodu, kterou posléze odešle do počítače. [9]



Obrázek 8: Laserový skener [11]

- Optické – Objekt je snímán z několika úhlů pomocí optického zařízení, které při každém natočení objekt v podstatě vyfotí a data se odešlou do počítače. Po získání dat ze všech nezbytných úhlů pohledu proběhne zpracování dat a po využití metody aproximace dojde k vytvoření digitalizovaného modelu. Ke zpřesnění „slepování“ obrázků v 3D těleso se využívají tzv. centrovací terčíky, které jsou umístěné na skenovaném objektu. Snímky bodů musí vedle centrovacích terčíků obsahovat i kalibrační tyč umístěnou vedle měřeného objektu. [9]

3.6 Systémy snímající vnitřní i vnější geometrii

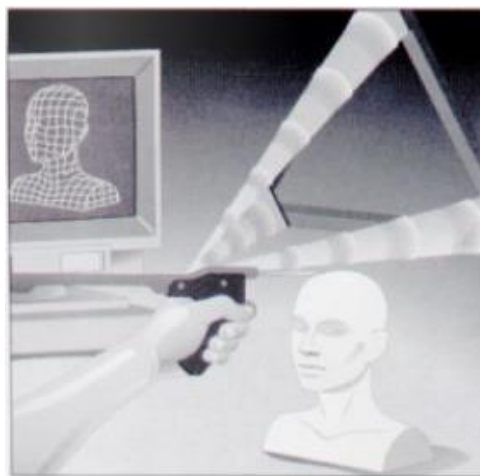
Jedná se o zařízení, která kromě sběru dat o vnější geometrii zvládají sbírat data i o vnitřní geometrii. Jednou z metod je použití destruktivního 3D skeneru, kterému byla věnována samostatná kapitola. Další možností je využití nedestruktivní bezdotykové metody. Konkrétně se jedná o rentgenové nebo ultrazvukové 3D skenery.

- Rentgenové – Použití rentgenového záření umožňuje získávání informací o geometrii součásti. Tyto skenery fungují na stejném principu jako rentgeny, které se používají ve zdravotnictví. Největším rozdílem je vyšší intenzita záření použitá v případě rentgenového 3D skeneru. [9]



Obrázek 9: Rentgenový skener [12]

- Ultrazvukové – Tyto skenery používají ke snímání geometrie ultrazvukovou sondu. Řešení problematiky prostorového snímání povrchů je v tomto případě cenově nejpříznivější. Ultrazvuková sonda, připomínající tvar pistole s kovovým hrotem, je při skenování manuálně přikládána k povrchu součásti a následným stisknutím spouště je vyslán ultrazvukový signál. Vyslaný signál je dále zachycen a dekodován ultrazvukovými čidly a je přetvořen do prostorových souřadnic. Prostorové souřadnice se mohou vkládat přímo do CAD systémů nebo do datových souborů. Nevýhoda použití této metody tkví v její relativně malé přesnosti pohybující se v rozmezí 0,3 až 0,5 mm. [9]



Obrázek 10: Ultrazvukový skener Freepoint [13]

4 Zpracování nasnímaných dat

Druhou fází procesu je zpracování získaných dat. Každé skenovací zařízení má předem určeno, v jakém formátu budou nasnímaná data exportována. Některá zařízení umožňují exportovat jak mračna bodů, tak přímo STL data. Pro zařízení umožňující export pouze mračna bodů je nutný přídatný program, který mračno bodů zpracuje a vytvoří polygonizaci sítě. Vybraný typ výstupních dat ovlivňuje jejich následné zpracování v dalších aplikacích.

4.1 Přípona *.STL

Tento formát vyjadřuje data pomocí trojúhelníkové sítě a zajišťuje tím jejich další přehlednější a pohodlnější úpravu. Trojúhelníky tvořící povrch totiž vytvářejí reálný dojem plošného modelu. STL data však větší množství CAD systémů dokáže načíst pouze jako grafiku. Jsou zde programy, které tato data dokážou zpracovat do ploch v CAD systémech čitelných. Data přímo ve formátu STL nacházejí uplatnění při tisku na všech 3D tiskárnách. [14]

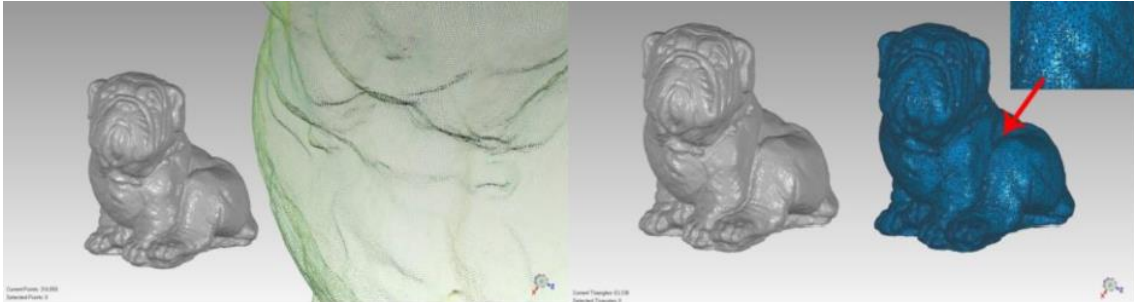
4.2 Přípona *.OBJ

Stejně jako u formátu STL jsou i zde data vyjádřena pomocí trojúhelníkové sítě. Rozdílem je, že data OBJ obsahují navíc i texturu vytvořenou snímkem zachycenými během 3D skenování. [14]

4.3 Mračno bodů, přípony *.dxf; *.igs; *.asc; *.vtx; *.wrl; *.obj

3D objekt je definovaný mračnem bodů s polohou v osách X, Y, Z. Upřesňující hodnotou pro tyto body může být informace o barvě bodu nebo směr normály. Jednotlivé body

v mračnu bodů nejsou nijak spojené, tudíž nevytváří jednotnou plochu a vizuálně se s nimi hůře pracuje. Při snaze vytvoření řezu součásti se v rovině řezu zobrazí jen ty body, které rovina přímo protne. Tyto formáty najdou využití především u skenerů snímajících velkou oblast kolem sebe. [14]



Obrázek 11: Porovnání výstupních formátů (vlevo mrak bodů, vpravo STL)

5 Práce s STL modelem

Existují dvě hlavní cesty k opravě či úpravě STL modelu. První cestou je úprava přímo trojúhelníkové sítě v programu pro úpravu STL souborů nebo plošné těleso převést do tělesa objemového a následně jej upravit klasickými CAD metodami.

Úprava STL modelu se ve větší míře používá v oblastech 3D tisku. Chyby se zde mohou projevit různě. Například se může jednat o náhodné vrstvy uprostřed modelu v místech, kde by se měla nacházet pouze výplň. Nebo se může jednat o neúplnost modelu, která vyžaduje jeho úpravu. Z volně přístupných řešení se může jednat například o Microsoft STL repair (online služba), Meshmixer, 3D Builder, Blender, Fusion 360 a další. [15]

5.1 Oprava STL modelu

Microsoft STL repair funguje jako online oprava modelů. Model s chybami se nahraje a následně se zpátky stáhne již opravený model. Nevýhodami jsou například nutnost vlastnit Microsoft účet, nutný souhlas s tím, že Microsoft může model dále používat, editovat a vystavovat. Poslední nevýhodou je, že opravený model není k dispozici ve formátu STL, ale s koncovkou *.3MF. [15]

3D Builder je program dostupný pouze pro Windows 10 nebo 8. Po nahrání modelu do programu jsou detekovány chyby modelu a jsou označeny červeným obrysem. V pravém dolním rohu se zobrazí okno s nabídkou opravy. Po opravení všech chyb je možné model uložit buďto ve výchozím formátu *.3MF nebo přímo jako STL. [15]

5.2 Úprava STL modelu

Úpravou STL modelu se rozumí jakýkoliv zásah do geometrie tělesa. Důvodů k úpravě modelu může být několik. Například optimalizace tvaru z hlediska namáhání nebo menší úpravy, jako je změna nevyhovujících rozměrů. Pro úpravu STL modelů existuje několik programů, které pracují buď přímo s plošným tělesem nebo ho dokážou převést do objemového tělesa a následně provádět úpravy pomocí CAD nástrojů. Programy pro úpravu STL modelů disponují též funkcí k jejich opravám.

Blender je volně dostupný nástroj pro tvorbu 3D modelů. Poskytuje celou škálu funkcí jako modelování, vytváření animací a simulací, vykreslování, skládání a sledování pohybu a další.

Fusion 360 je cloudový nástroj od společnosti Autodesk disponující zmíněnými dvěma způsoby úprav. Zde je možná úprava přímo mesh modelu (STL) nebo mesh převést do objemového tělesa a potom klasickými CAD metodami upravit. Po úpravě pomocí CAD nástrojů lze objemové těleso opět exportovat jako STL soubor.

Meshmixer je bezplatný software od společnosti Autodesk. Nabízí velice intuitivní prostředí pro tvorbu a úpravu 3D modelů.

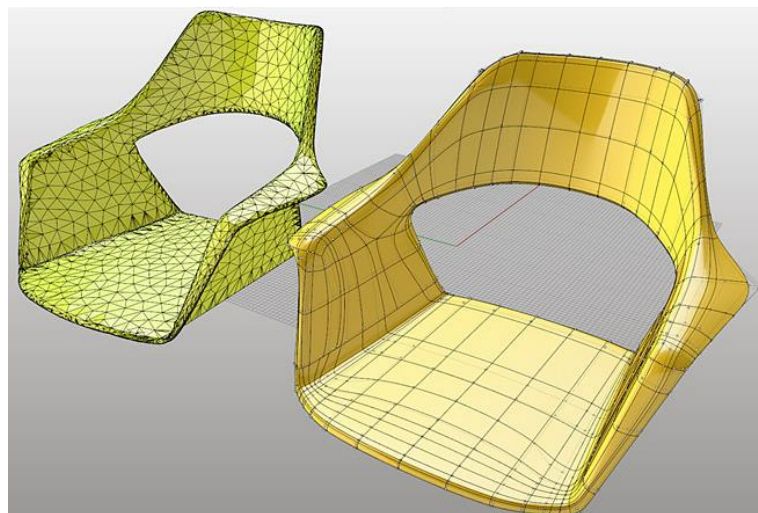
Další volně dostupný program pro úpravu STL modelu je Onshape, Shapeshifter, Autodesk 123D, OpenSCAD a další.

6 Tvorba CAD modelu z naskenovaných dat

Postup hojně využívaný v reverzním inženýrství, kdy se naskenovaná data pomocí speciálního programu transformují do objemového modelu čitelného pro CAD/CAM aplikace. Pro převod dat se využívají buď automaticky generované povrchy (NURBS plochy) nebo převod probíhá pomocí ručního modelování. [16]

6.1 Automaticky generované povrchy

Na povrchu polygonové sítě nebo přímo z mraku bodů program vytvoří čtyřboké plochy (NURBS plochy) plně reprezentující tvar modelu. Pokud je polygonová síť kompletní, je vytvořen objemový model. Nevýhodou modelu vytvořeného touto metodou může být nepříliš snadná úprava a její cenová nedostupnost pro běžného uživatele. Tato cesta je vhodná pro převedení dat do CAD systému a následnému obrábění, nebo pro použití modelu jako podkladu pro konstrukci. [16]

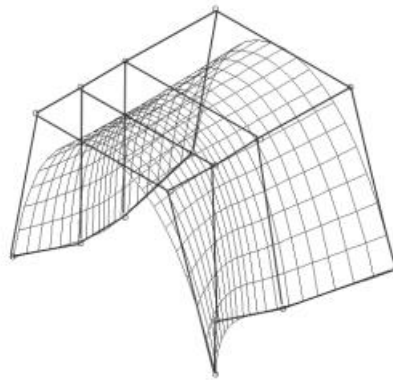


Obrázek 12: Převedení polygonové sítě na NURBS plochy [17]

6.1.1 NURBS plochy

NURBS plochy se skládají z křivek NURBS směřujících dvěma směry (U a V). Plocha je tvořena mřížkou křivek. Tvar plochy je definován stupněm plochy ve směrech U a V, řídicími body a jejich váhami. Stejně proměnné se dále používají k výpočtu tvaru, tečen, normál, křivosti a dalších vlastností. NURBS křivky a plochy najdou využití v oblastech CAD systémů, kde se využívají pro jejich dobré modelační schopnosti. Pro lokální změnu tvaru křivky či plochy je nutno změnit polohu řídicího bodu, velikost váhy nebo tvar uzlového vektoru. [18;20]

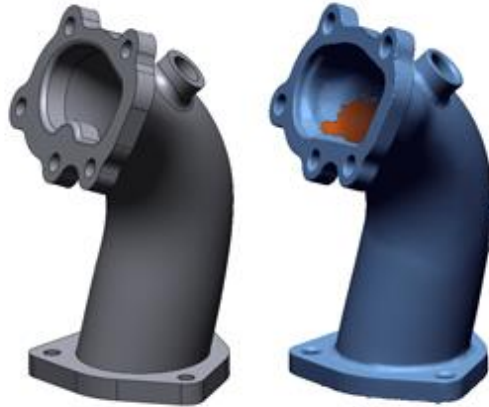
V porovnání s ostatními typy křivek (B-spline, Coonsovy, Bézierovy, Fergusonovy) dovedou NURBS křivky jako jediné přesně zobrazit kuželosečky, což umožňuje modelování základních těles, jako jsou kužely, válce, anuloidy atd. [20]



Obrázek 13: Řídící síť a NURBS plocha [19]

6.2 Ruční modelování

Probíhá na stejném principu jako modelování v CAD systému, kde naskenovaná data slouží jako podklad pro vytvoření parametrického modelu. Tento postup disponuje snazší možností úpravy modelu díky historii modelování a skicování. Přesnost modelování zajišťuje možnost zobrazení odchylek vytvořeného tělesa či skici oproti naskenovaným datům. Použití této metody je oproti metodě automaticky generovaných NURBS ploch časově i cenově náročnější. [16]



Obrázek 14: Převod naskenovaných dat do CAD formátu [16]

6.3 Programy

Programy hojně využívané v reverzním inženýrství fungují jako doplňky k jiným CAD systémům nebo jako samostatné CAD modeláře. Spojují možnost zpracování naskenovaných dat s převedením těchto dat do formátu, ve kterém se tyto data dají poměrně snadno editovat a dále používat. Mezi nejrozšířenější programy patří Geomagic Design X, VXmodel, Geomagic for SolidWorks a Scan to 3D.

Geomagic Design X funguje jako CAD modelář s možností zpracování naskenovaných dat a vytvořením parametrického modelu. Obsahuje též aktivní historii modelování, která je zachována i při exportování do jiných CAD systémů. [21]

VXmodel je program od firmy Creaform 3D a je používán jako program pro základní provádění reverzního inženýrství. Jedná se o doplněk pro software VXelements. Při práci s tímto programem se skrz naskenovaná data prokládají geometrické prvky a řezy a dají se vytvářet i NURBS plochy. Takto vytvořené prvky se dále exportují do CAD modeláře a je možné vytvoření plnohodnotného CAD modelu. [22]

Geomagic for SolidWorks pracuje jako integrovaný plugin systému SolidWorks. Lze spustit přímo v programu Solidworks, kde se nachází jako jedna z karet na hlavním panelu. Umožňuje import STL souborů a jejich následnou úpravu pomocí nástrojů, jako jsou například tvorby 2D řezů s entitami křivek a oblouků, prokládání parametrických ploch, převod STL do objemových prvků a další. [23]

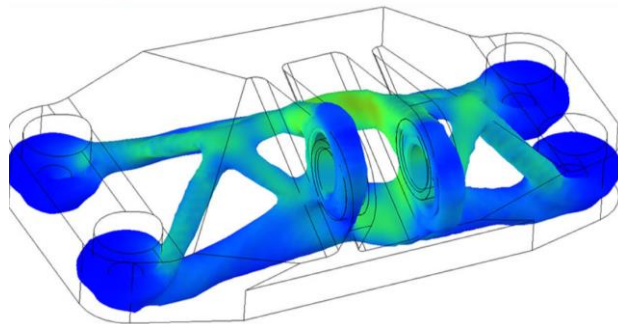
Scan to 3D je modul, který je součástí balíčku SolidWorks Premium. Používá se k úpravě mračen bodů a polygonálních sítí. Poté lze upravená či neupravená data převést do ploch, se kterými je možné dále pracovat v prostředí SolidWorks. [24]

7 Konstrukční optimalizace

Úkolem konstrukční optimalizace je analýza minulých či stávajících konstrukčních řešení a změna jejich vlastností, aby efektivita systému byla maximální při současném splnění požadavků účelovosti. Konstrukční optimalizace zahrnuje optimalizaci rozměrů při daném zatížení, materiálu, tvaru a topologie. Důležitým krokem je určení optima uspořádání konstrukce (topologie, tvar, rozměry), které splňuje všechny vedlejší podmínky (např. účelovost). [25]

Optimalizace topologie dodržuje podmínky napětí, frekvence a zatížení při změně topologie součásti. Proměnné u prutových sestav tvoří jednotlivé uzly, které jsou buďto zanechány nebo odstraněny. U spojitých dílců je proměnná objem nebo prázdný prostor. [26]

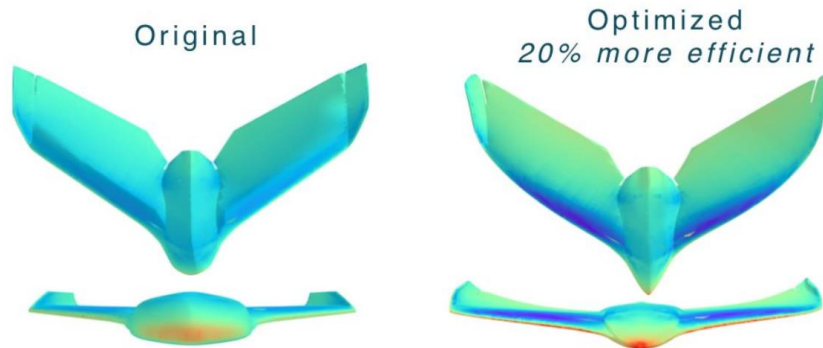
Obrázek 15 zachycuje topologickou optimalizaci dílu silově namáhaného v oblastech děr. Optimalizací bylo dosaženo úspory materiálu při dodržení pevnostních limitů.



Obrázek 15: Optimalizace topologie [27]

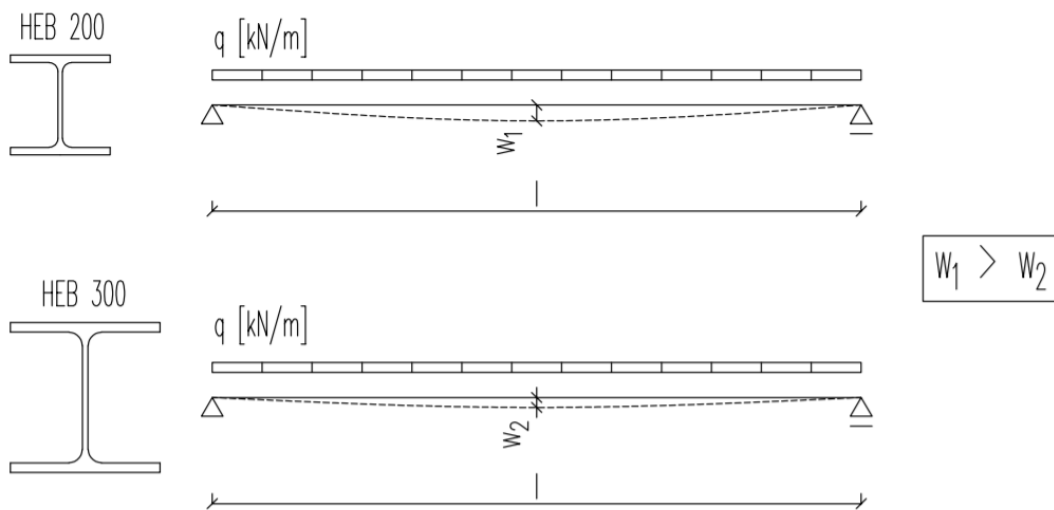
Tvarová optimalizace optimalizuje tvary hranic spojitých dílců nebo prutových sestav. Proměnnými zde jsou geometrické křivky popisující hranice struktur. [26]

Na obrázku 16 je zachycena tvarová optimalizace modelu křídel, která vedla ke snížení aerodynamického odporu.



Obrázek 16: Tvarová optimalizace [28]

Rozměrová optimalizace optimalizuje rozměry dílce se specifikovaným typem struktury, topologie a tvaru. Proměnnými jsou například průřezové charakteristiky, tloušťky, výšky atd. [26]



Obrázek 17: Rozměrová optimalizace

7.1 Optimalizace ergonomie

Pojem ergonomie, převzatý z anglického slova „ergonomis“, je složený z řeckých slov ergo (práce) a nomos (zákon). Jedná se o vědní obor komplexně a systémově řešící systém člověka, techniky a prostředí. Snaží se optimalizovat psychicko-fyzickou zátěž člověka, společně se zajištěním rozvoje jeho osobnosti při maximální efektivitě jeho činnosti. [31]

Ve strojírenství se ergonomie snaží změnit přístup k navrhování techniky (pracoviště) tak, aby bylo přihlíženo k limitám člověka vycházejících z jeho možností, schopností a dovedností. Vztah člověka a prostředí hraje ve strojírenské ergonomii menší roli, zvyšuje se však s narůstajícím počtem techniky a její automatizací a s množstvím dalších pracovníků na pracovišti. [29]

Člověk a nástroj – Řeší především běžné používání náradí a pomůcek k jakékoli činnosti. Úspora je především pohybová a energetická a klade důraz na dynamické stereotypy pracovníka. [29]

Člověk a výrobní zařízení – Nejběžnější situace, kdy techniku pohání vnější energie a úloha člověka spočívá v přijímání informací, jejich zpracování a provedení regulační činnosti pomocí ovladačů či přímým zásahem. [29]

Člověk a více technických zařízení – Obsluha více strojů zvyšuje nároky na kvalifikaci pracovníka, zejména na jeho psychické vlastnosti. [29]

Lidé a technika – Zařízení je obsluhováno více lidmi a do popředí se dostávají mezilidské vztahy, výběr vedoucího skupiny a organizační schopnosti každého jedince. [29]

Člověk a automat – Automatizace, mechanizace, používání CNC strojů, práce s výpočetní technikou. To vše vytváří specifické vazby mezi člověkem a technikou. Člověk je řídicím nebo kontrolním článkem systému a zátěž na něj vyvolaná je především psychická. [29]

8 Praktická část

Pro praktickou část byl využit STL model trysky naskenovaný v prostorách budovy ČVUT pomocí průmyslového tomografu Carl Zeiss Metrotom. Součást trysky slouží k přívodu řezného oleje k tvarovému nástroji brusky na ozubení. Do prostor stroje je tryska uchycena na výpusť oleje přes vnitřní závit v její dolní části.

Doposud bylo nutné trysku při montáži uchopit do univerzálních kleští, které při šroubování trysky na výpusť mohou vytvořit defekt na stěnách trysky, ba dokonce mohou deformovat trysku do takového měřítka, které znemožní její našroubování. Byl tedy navržen optimalizovaný tvar trysky ve tvaru šestihranu, který bude při montáži uchopen pomocí metrického klíče. Taková změna eliminuje možnost destrukce trysky a usnadní její montáž.

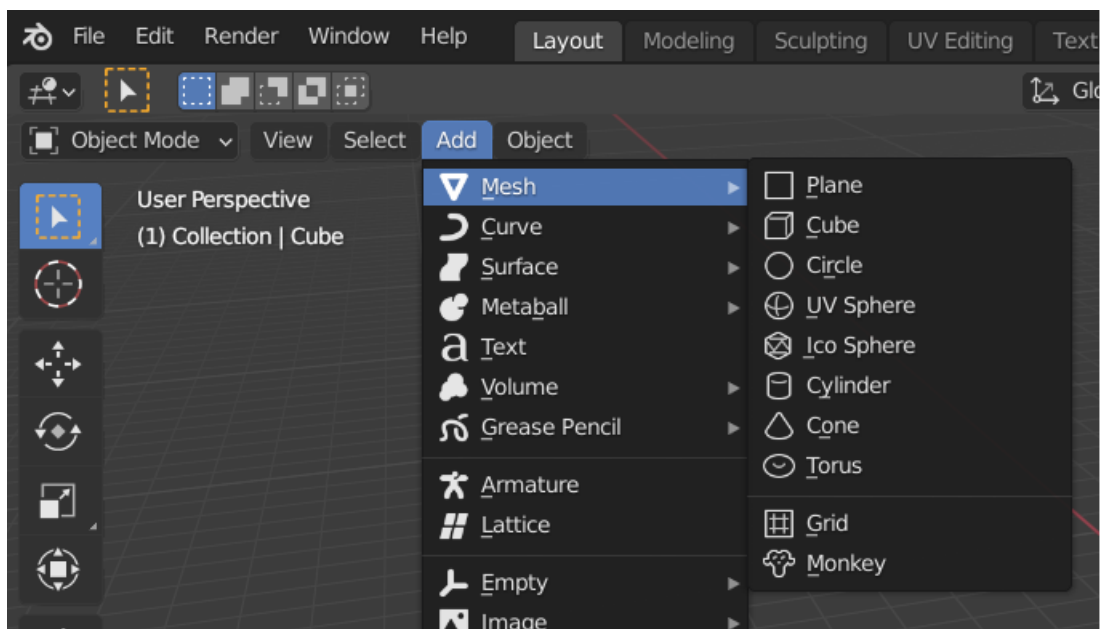
V praktické části byl model trysky postupně upraven pomocí tří programů. Postup práce byl detailně popsán a sloužil jako vstupní data pro finální zhodnocení programů.

9 Blender

Blender je bezplatný software pro tvorbu 3D plošných modelů. Tento program disponuje možností tvorby vlastního modelu, jednoduchých či složitých tvarů, nebo nahráním již existujícího modelu a jeho následnou úpravu pomocí integrovaných funkcí. Zmíněné funkce najdeme rozdělené v deseti editačních režimech, jejichž záložky najdeme na horním panelu programu. Pro základní práci s programem si každý uživatel vystačí s prvními třemi režimy, kterými jsou object mode, edit mode, sculpt mode.

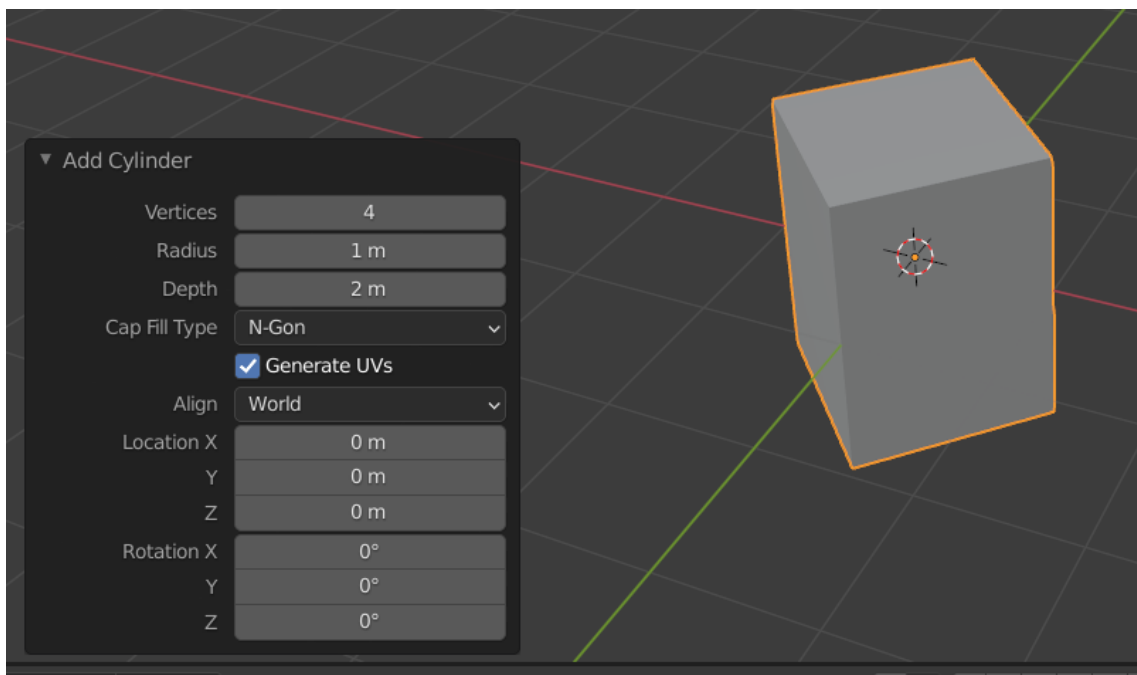
9.1.1 Object mode

V prvním režimu (object mode) nalezneme funkce pro tvorbu základních tvarů nabízených programem. V záložce add/mesh nalezneme nabízené možnosti viz. obrázek 18.



Obrázek 18: Vytvoření základního objektu

Po zvolení požadovaného objektu např. cylinder (válec) se v levé dolní části obrazovky objeví ikona add cylinder, ve které je možné přiřadit tělesu rozměry v tomto případě poloměr a výšku. Dalším parametrem, se kterým můžeme pracovat, je počet vertices (bodů, ze kterých se skládá základna válce). Pro představu po zadání čísla 4 do kolonky pro počet vertices, program vytvoří kvádr, jehož základnou je čtverec o úhlopříčce rovnající se dvojnásobku námi zadaného poloměru viz. obrázek 19. Posledním parametrem je lokace a rotace objektu vzhledem k základnímu souřadnicovému systému. Lokaci objektu určuje object origin (počátek), který program vygeneruje jako těžiště objektu. Rotace je prováděna podle základních os rotace procházejících počátkem. Pokud se počátek nachází mimo střed hlavního souřadnicového systému, je v počátku vytvořen lokální souřadnicový systém, jehož osy jsou rovnoběžné s hlavním souřadnicovým systémem.

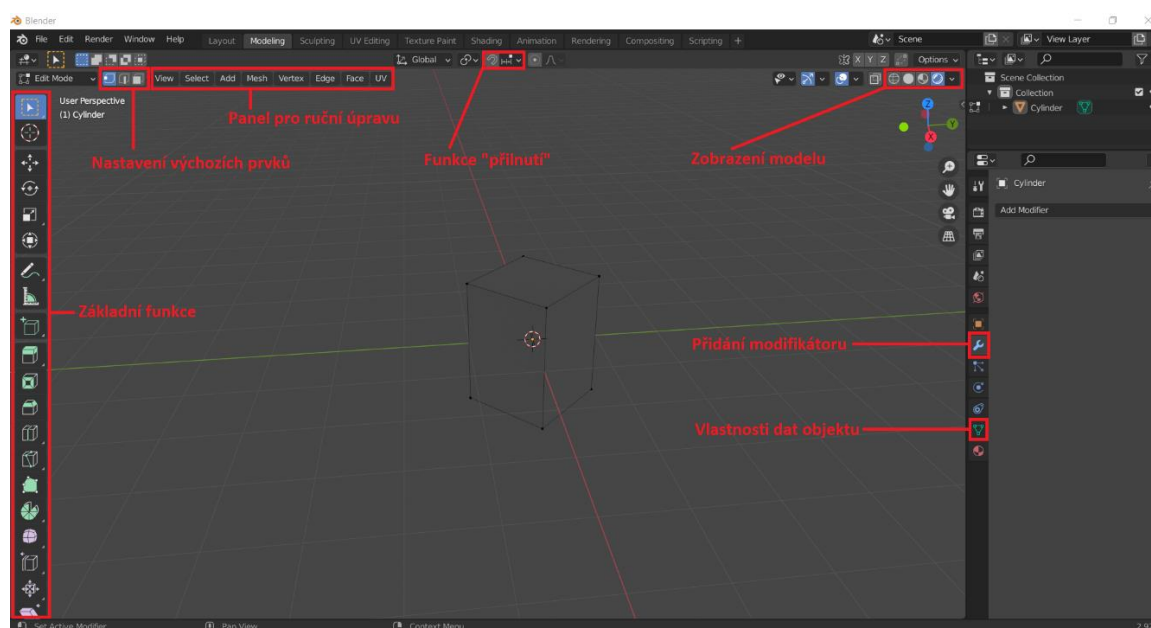


Obrázek 19: "Válec" vytvořený pomocí čtyř bodů základny

Nastane-li situace, kdy byl objekt nastaven chybně, je možná úprava pomocí funkcí nacházejících se na liště v levé části obrazovky. Jedná se o funkce move (pohyb), rotate (otočení), scale (měřítko), transform (přetvoření). Tyto funkce nám dávají možnost opětovného nastavení objektu.

9.1.2 Edit mode

Druhým režimem, který je pro tvorbu modelu velice důležitý, je režim editace. Tento režim umožňuje úpravu objektu, který byl vytvořen v prvním režimu. Důležité je upozornit na tři pracovní nastavení v levé horní části obrazovky, díky kterým uchopujeme buďto body, hrany nebo plochy. Po tomto nastavení můžeme dále pracovat s jednotlivými prvky. Na levé liště přibývají funkce jako například extrude region (potáhnout oblast), inset faces (vložené plochy), bevel (úkos), loop cut (obvodový řez) a další. Některé z funkcí mají více variant a jsou značené trojúhelníčkem pro rozbalení, který se aktivuje delším stlačením levého tlačítka myši. Celý tento panel je doplňován rozšiřujícími funkcemi na pravé straně obrazovky nebo panelem pro ruční úpravu. Nejdůležitějšími rozšiřujícími funkcemi jsou add modifier (přidání modifikátoru) a object data properties (vlastnosti dat objektu). Jednotlivé modifikátory se dělí do skupin modify (úprava), generate (tvorba), deform (přetvoření), physics (fyzikální veličiny). Dále je možnost nastavení tzv. „přilnutí“, které zajišťuje přilnutí kurzoru myši k nejbližšímu prvku (bod, hrana, plocha). V poslední řadě je nutno se zmínit o možnosti zobrazení modelu, kde nám program dává na výběr ze 4 možností – wireframe (drátový model), solid (kubický model), material preview (náhled materiálu), rendered (vyobrazení ve smyslu vizualizace 3D dat do reálného obrazu).



Obrázek 20: Edit mode

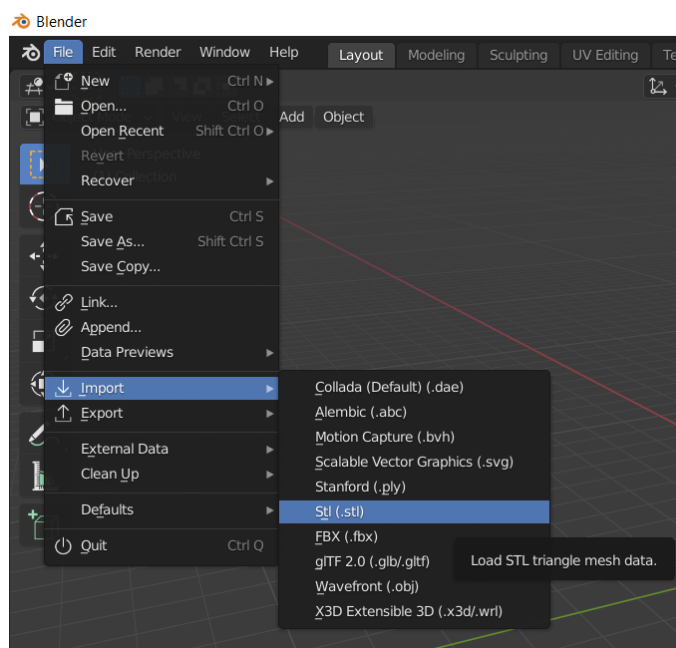
9.1.3 Sculpt mode

Posledním režimem, který je nutný zmínit je sculpt mode (režim „vysochání“). V tomto režimu se modelu přiřazují jednotlivé tvary dle nabídky, jako jsou například blob, flatten, smooth, fill atd. Jedná se o funkce přetvářející mřížku objektu za účelem vytvoření více organického neboli reálnějšího vzhledu. Těmito funkcemi nelze docílit přesného rozměru, ale jsou velmi nápomocné například při vyhlazování nerovností nebo pro vytvoření plynulejšího zaoblení.

Mimo volbu funkce sochání lze nastavit i rádius ovlivněné oblasti, míru přetvoření, hustotu sítě a další.

9.2 Nahrání modelu trysky

Po spuštění a načtení programu blender bylo pro nahrání naskenovaného modelu potřeba otevřít záložku file/import a vybrat formát souboru viz obrázek 21. Jakmile byl zvolen formát souboru, program blender automaticky požádal o cestu k souboru na disku. Po zadání cesty a po potvrzení tlačítkem import STL, byl požadovaný soubor nahrán do pracovního prostoru programu.



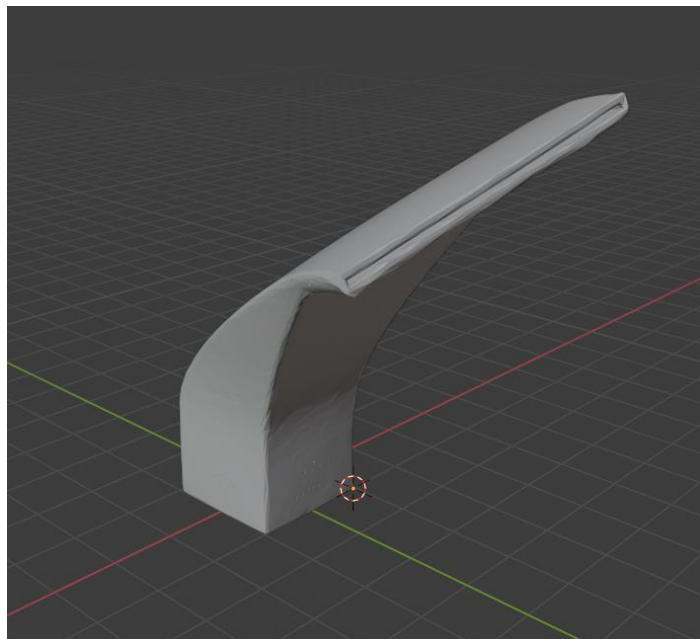
Obrázek 21: Import STL dat

9.3 Centrování součásti

Jakmile je součást importována do programu, měla by se zobrazit někde v pracovním prostoru v závislosti na object origin (počátku). V případě trysky byl počátek definován tak vysoko nad součásti, že se tryska v programu nevykreslila. Bylo proto nutné trysku pomocí funkce move posunout po ose Z až do chvíle, kdy se tryska zobrazila v pracovním prostoru.

Dalším krokem byla změna počátku součásti do bodu, který se nachází na spodní dosedací ploše trysky. Toho bylo docíleno v editačním režimu, kde byl vybrán tento bod, následně bylo stisknuto pravé tlačítko myši pro rozbalení vertex context menu a v nabídce snap vertices (uchopené body) vybráno cursor to selected (kurzor do vybraného). Posléze byl přepnut editační režim do objektového (klávesovou zkratkou TAB nebo použitím rozbalovacího menu v levé horní části) a pomocí pravého tlačítka myši bylo rozbaleno object context menu, kde byl počátek součásti nastaven do místa kurzoru cestou set origin/origin to 3D cursor.

Samotné centrování bylo záhy provedeno funkcemi move a rotate do výsledné polohy viz. obrázek 22.

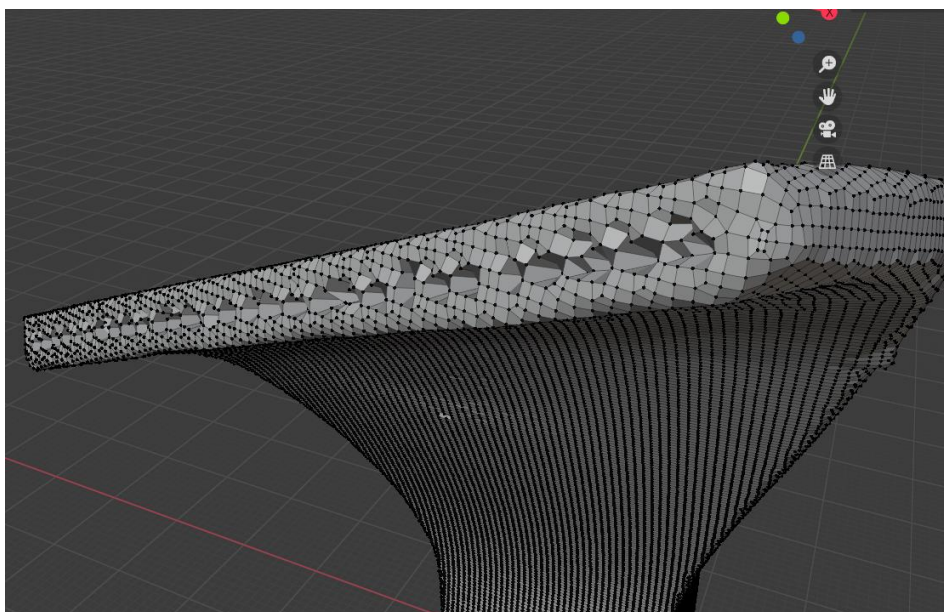


Obrázek 22: Centrování

9.4 Odstranění chyb

Základní funkcí, kterou program blender poskytuje k rychlému opravení chyb, je funkce remesh (přetvoření). K aplikování přetvoření vedou dvě cesty. Jedna z cest vede přes object data properties/remesh, druhá přes modifier properties/add modifier/generate/remesh. Použitím této funkce program vygeneruje z výchozí trojúhelníkové sítě čtvercovou a většinu chyb zcela opraví. Další výhodou je i snazší práce s čtvercovou sítí, která je mnohem přehlednější.

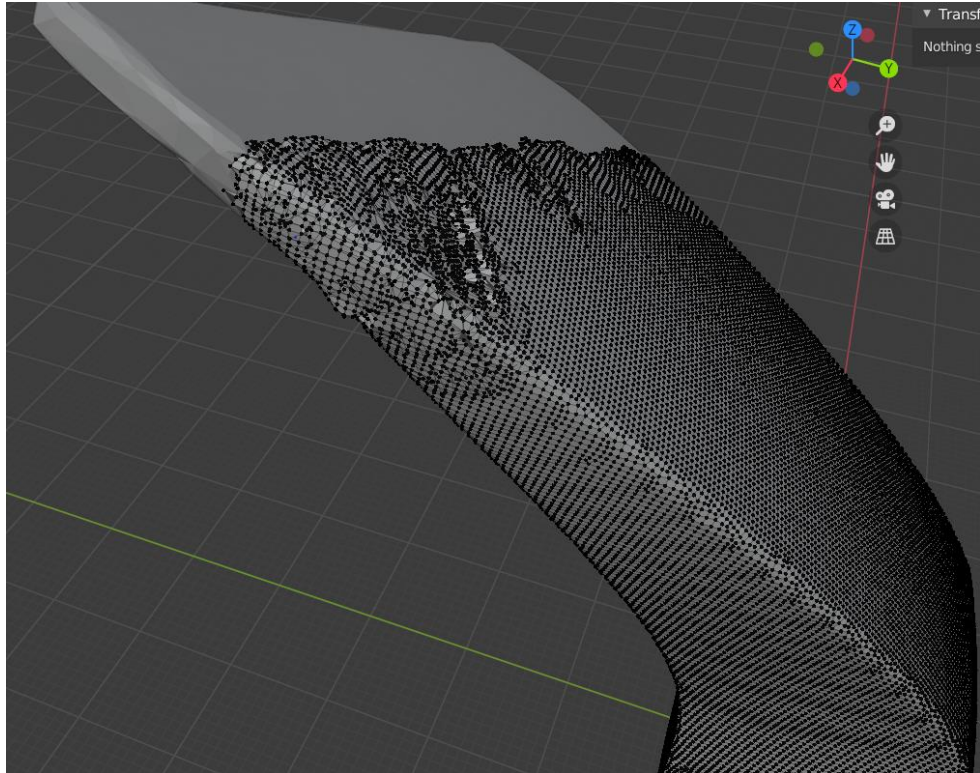
V případě trysky byl však tento postup nevhodný. Díky šumu chybných bodů v úzké části trysky vzniklo spojení mezi stranami trysky viz. obrázek 23.



Obrázek 23: Propojení vnitřních stran trysky po přetvoření mřížky

Problém nebyl vyřešen ani použitím funkce bisect (odstříhnutí). V editačním režimu byl označen celý objekt (všechny body) a poté byla tryska funkcí odstříhnutí rozdělena v místě začínajícího rozšíření trysky. Na modelu se vytvořila přímá čára rozdělení, jejíž body zůstaly označeny. Dalším krokem bylo označení všech bodů na rozšiřující se straně trysky cestou select/select loops/select loop inner-region. Označené body byly od neoznačených rozděleny funkcí mesh/separate/selection. Jako poslední krok bylo samotné přetvoření aplikované v objektovém režimu již zmíněnými cestami. Výsledek

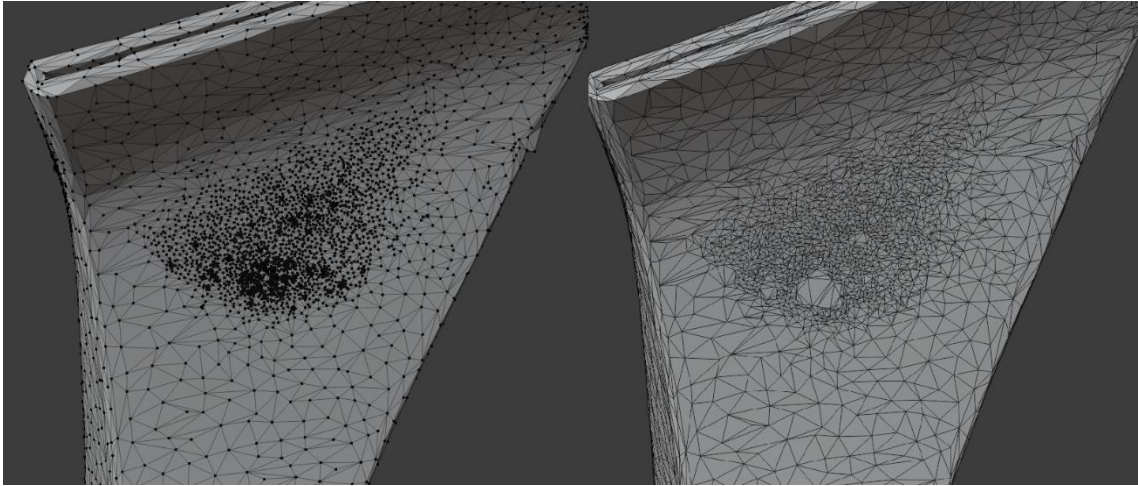
byl na větší části modelu výborný, avšak v horní části došlo k chybě při tvoření několika ploch viz. obrázek 24.



Obrázek 24: Chyby vzniklé při přetvoření odstříhnuté části trysky

K odstranění chyb na modelu bylo nutné zvolit cestu ruční opravy. Shluk bodů tvořící chybně vygenerované plochy je možný odstranit dvěma metodami ruční opravy. První poněkud časově náročnější metodou je přesouvání jednotlivých bodů po hranách k sousedícím bodům. Toho je možné docílit označením bodu, dvojitým zmáčknutím písmena G a vybráním hrany, po které se má bod přesunout. Druhou metodou je odstranění chybných bodů a následné vyplnění vzniklé díry plochami. Pro snazší označování bodů je potřeba stisknout klávesu C, což má za následek vytvoření kruhové oblasti okolo kurzoru. Po stisknutí levého tlačítka myši jsou označeny všechny body nacházející se uvnitř oblasti. K odstranění takto označených bodů slouží klávesa delete. Jakmile jsou chybné body odstraněny, je nutné přepnout výchozí prvek pro vybírání z bodů na hrany. Posledním krokem je označení hran vzniklé díry, stisknutí pravého tlačítka pro rozbalení nabídky a vybrání funkce fill (vyplnění).

Při úpravě trysky byla použita kombinace těchto dvou metod. Výsledek viz. obrázek 25 byl přijatelný. Použití ruční úpravy by mělo následovat až po neúspěšném použití metody přetvoření zejména pro její časovou náročnost.



Obrázek 25: Odstranění chyb pomocí metod ručních úprav

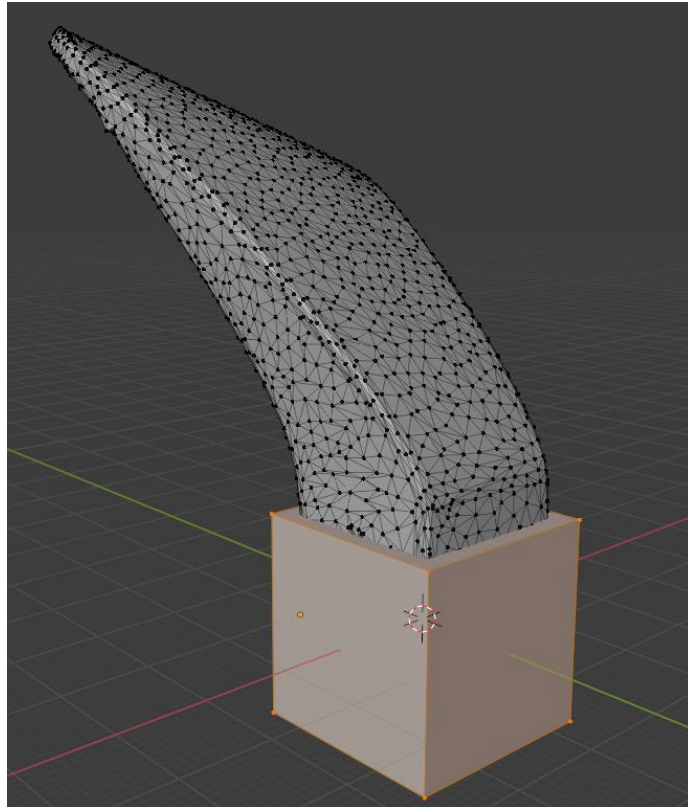
9.5 Odstranění spodní části trysky po délce závitu

Při návrhu nového modelu byla nutná optimalizace spodní části trysky pro její snazší montáž. Součást se při ustavování do prostor brusky šroubuje na výpuštění chladicí kapaliny. Při dotahování trysky před optimalizací tvaru bylo nutné použití univerzálních kleští. Práci s těmito kleštěmi často vzniká defekt na uchopené součásti od poškrábání vnějších ploch až po celkovou deformaci. Optimalizace měla za úkol tento nedostatek na tvaru odstranit. Toho bylo docíleno jednoduchou náhradou obtížně uchopitelné čtyřhranné části za šestihrannou. Po této úpravě je možné trysku snadno ustavit do pozice pomocí otevřeného metrického klíče.

9.5.1 Odstranění části modelu – Boolean

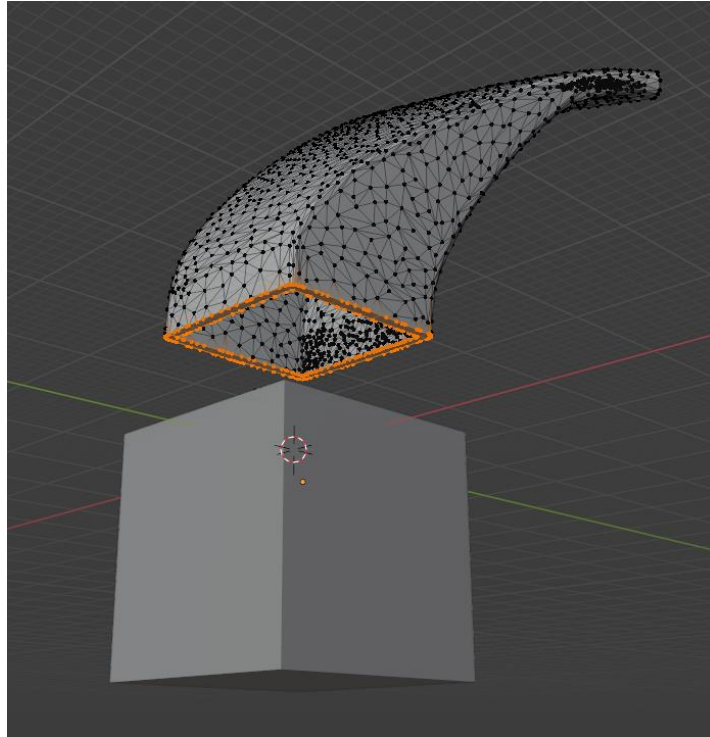
K odstranění části modelu v programu Blender vedly dvě cesty. První cesta vedla přes vytvoření tělesa, kterým byla součást rozdělena. Nejprve bylo nutné přepnout pracovní

režim do object mode a posunout kurzor do pomyslného středu díry se závitem na spodní stranu trysky. Následně pomocí cesty add/mesh/cube byla vložena krychle, jejíž těžiště leží v místě kurzoru. Dále byl nastaven rozměr tak, aby krychle překrývala trysku ze všech stran. K zajištění odstranění části po celé délce závitu bylo potřeba nastavit vrchní plochu krychle do místa konce závitu viz. obrázek 26.



Obrázek 26: Vytvoření a umístění pomocné krychle

Rozdělení modelu trysky na dvě části v oblasti pomocné krychle bylo uskutečněno pomocí funkce boolean po cestě add modifier/boolean/difference. Po rozdělení viz. obrázek 27. byla označena pomocná krychle a klávesou delete byla odstraněna. Na rozdíl od následující metody se v místě řezu na modelu trysky vytvořila plocha spojující vnější část s vnitřní.

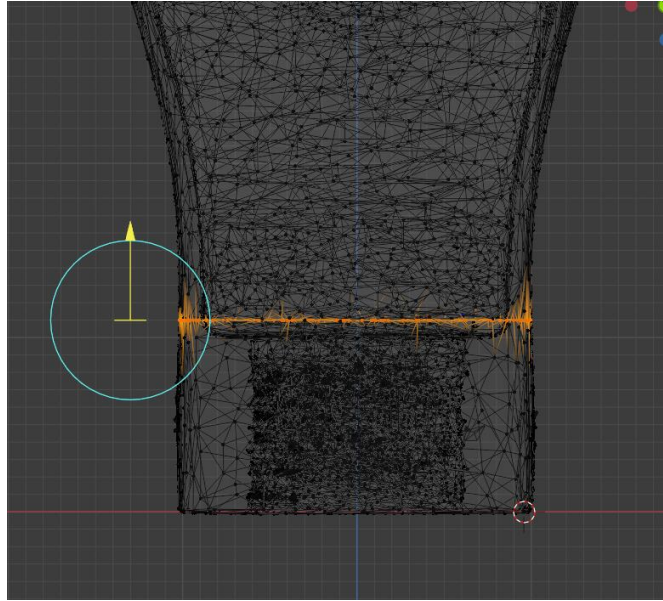


Obrázek 27: Oddělení pomocné krychle od modelu trysky

9.5.2 Odstranění části modelu – Bisect

Alternativou výše zmíněné metody je použití funkce bisect. Pro použití funkce bisect je nutné pracovat v edit mode. Práci velmi usnadnilo přepnutí objemového modelu do modelu drátěného, u kterého bylo možné sledovat vnitřní geometrii tělesa (vnitřní závit). Dalším krokem bylo přepnutí pohledu na pohled zepředu klávesou 1. Posledním krokem v nastavení, před použitím samotné funkce, je označení všech bodů klávesovou zkratkou A. Po takovémto nastavení byl vyznačen řez již zmíněnou funkcí bisect viz. obrázek 28.

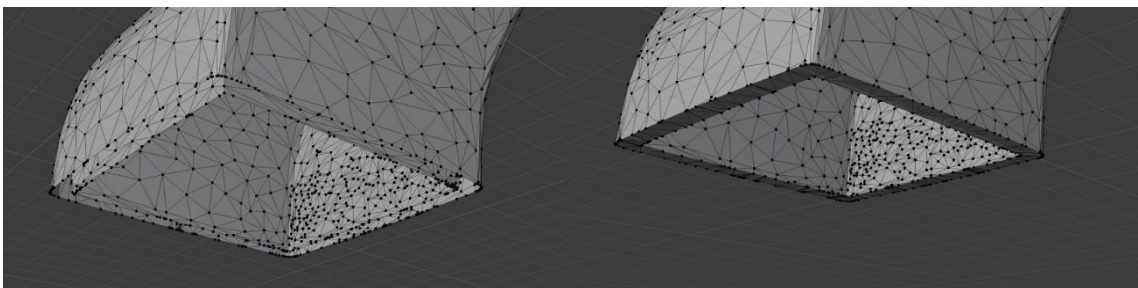
Modrý kruh a žlutá šipka, znázorněný na obrázku 28, značí možnost posunutí rezné roviny ve směru kolmém na rovinu řezu.



Obrázek 28: Použití funkce bisect

Následný postup je obdobný postupu popsaném v kapitole 9.4 Odstranění chyb. Po zvolení místa řezu byly přes cestu select/select loops/select loop inner-region označeny všechny body nacházející se pod čarou řezu. Oddělení takto zvolených bodů bylo dosaženo přes cestu mesh/separate/selection. Odstranění oddělených bodů proběhlo opět přes klávesu delete.

Jak již bylo zmíněno, touto metodou nemůže být dosaženo automaticky vygenerované plochy v místě řezu. Pro uzavření modelu bylo nutné použít funkci fill viz. obrázek 29, jejíž použití bylo též zmíněno v kapitole 11.4.



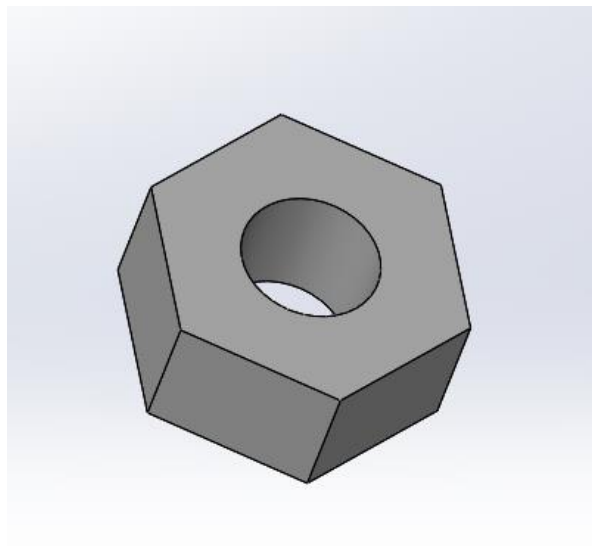
Obrázek 29: Vytvoření plochy v místě řezu (Bisect)

9.6 Vytvoření optimalizovaného tvaru

Po odstranění nevyhovující části následovalo vymodelování požadovaného tvaru. Novým tvarem měl být šestihran se vzdáleností dvou protilehlých stěn rovné rozměru používaném v řadě metrických klíčů. Dále měl šestihran obsahovat otvor pro vytvoření závitu M12. A posledním požadavkem byla samotná výška (nejméně deset milimetrů) potřebná k dostatečnému dotažení trysky na výpust' chladicí kapaliny.

9.6.1 Modelování v programu Solidworks 2017

Jednou z cest, známou pro většinu lidí pohybujících se v oblastech strojírenství, je modelování v CAD programu. Ve zvolené rovině XY byla vytvořena skica základny šestihranu s otvorem o požadovaných rozměrech (protilehlé strany jsou vzdáleny 21 mm). Skica byla poté ukončena a pomocí funkce přidání vysunutím se zadanou hloubkou deset milimetrů byla skica protažena podél osy Z. Takto hotový model byl exportován ve formátu STL a byl připraven k nahrání do prostředí programu Blender.

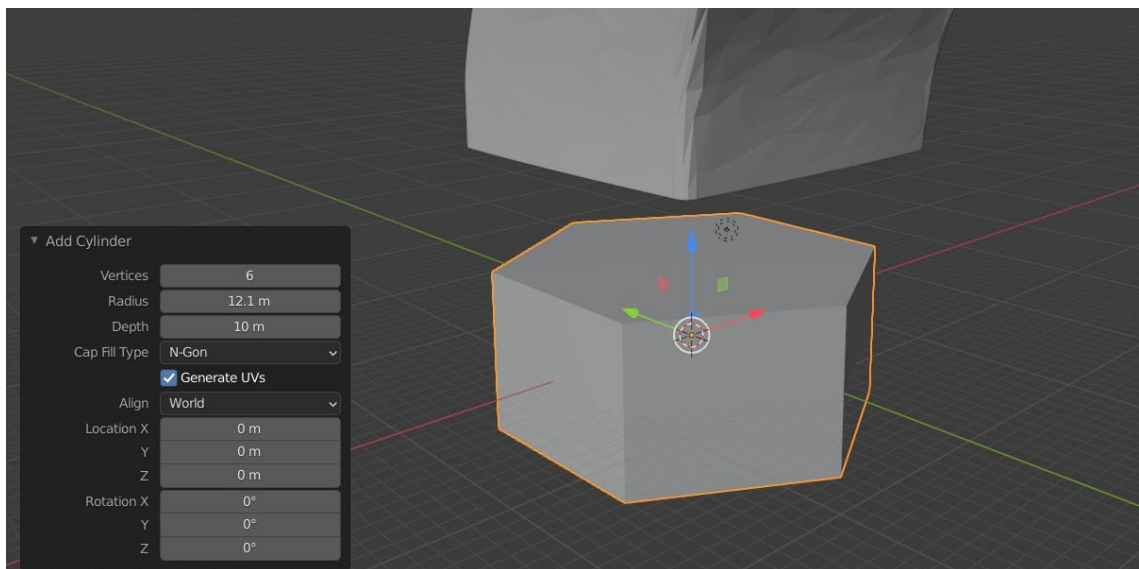


Obrázek 30: Šestihran vymodelovaný v programu Solidworks 2017

9.6.2 Modelování v programu Blender

Tvorba šestihranu v prostředí Blenderu se může na první pohled zdát obtížná. Žádná z dostupných předvoleb totiž nenabízí tvorbu více než čtyřhranného tělesa viz. kapitola 9.1.1 Object mode obrázek 18. Šestihran se však dá vytvořit z tělesa cylinder (válec). Dále je nutné pracovat v režimu object mode. Kdyby byl šestihran vytvořen v editačním režimu, byl by brán jako součást trysky a nebylo by možné s tělesem manipulovat.

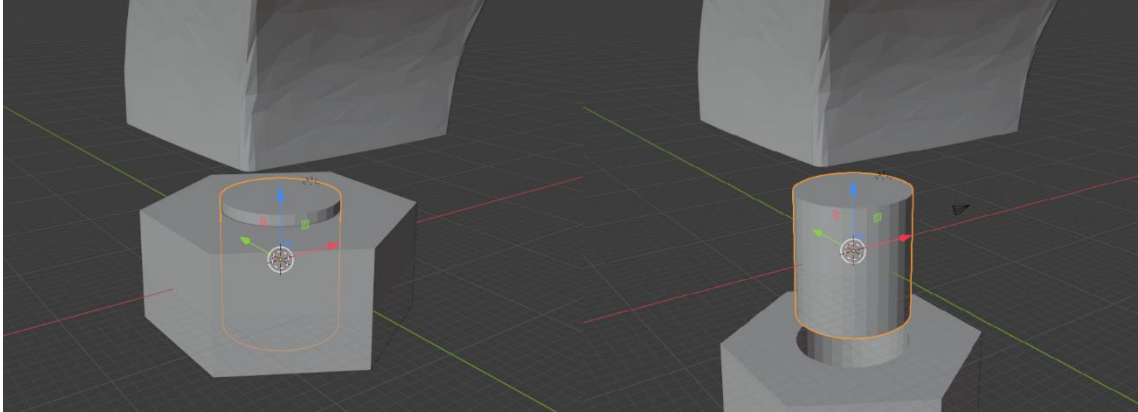
V object mode byl přes pravé tlačítko myši a následné snap/cursor to world origin nastaven kurzor do středu souřadnicového systému. V záložce add/mesh byl zvolen válec, který se po nahrání do prostředí objevil s těžištěm v místě kurzoru. S válcem se současně objevila i tabulka s rozměrovými a prostorovými parametry viz. obrázek 31. Šestihran byl z válce vytvořen zadáním šesti bodů do kolonky vertices. Do kolonky radius byl zadán poloměr 12,15 mm tak, aby dvě protilehlé strany byly vzdáleny 21 mm pro použití metrického klíče. Do poslední rozměrové kolonky depth byla zadána hloubka 10 mm.



Obrázek 31: Šestihran vymodelovaný v programu Blender

V tuto chvíli zbývalo vytvoření otvoru o průměru 10,5 mm vhodného k vytvoření závitu M12. Do místa kurzoru byl stejným způsobem nahrán válec požadovaných rozměrů. Přes funkci Boolean/difference byl válec vybrán z šestihranu za vzniku otvoru o průměru 10,5

mm viz. obrázek 32. Pomocný válec byl odstraněn tlačítkem delete. Takto hotový model byl připraven ke spojení s modelem trysky.



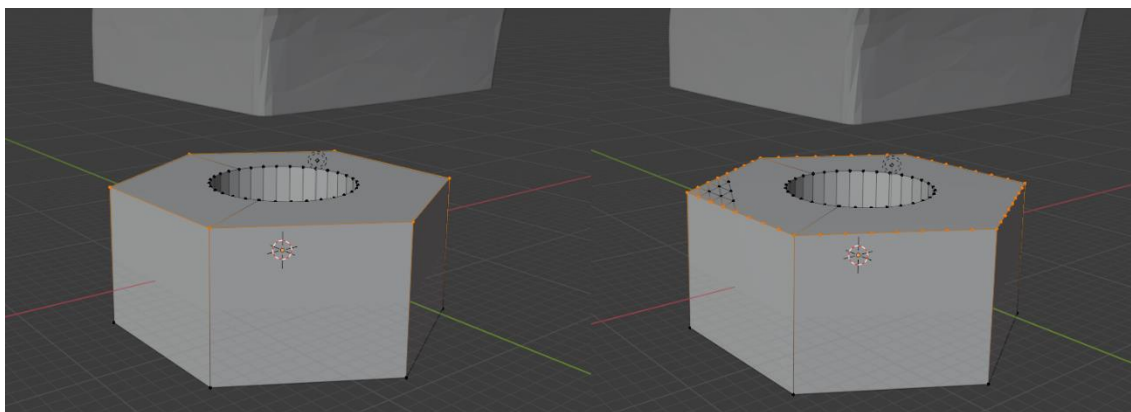
Obrázek 32: Tvorba otvoru pro závit M12

9.7 Spojení šestihranu s modelem trysky

V programu Blender jsou dostupné dvě možnosti spojení dvou objektů. Náročnější metodou je ruční spojování jednotlivých bodů z obou objektů. Výhodnější je však použití funkce boolean/union.

9.7.1 Ruční spojování

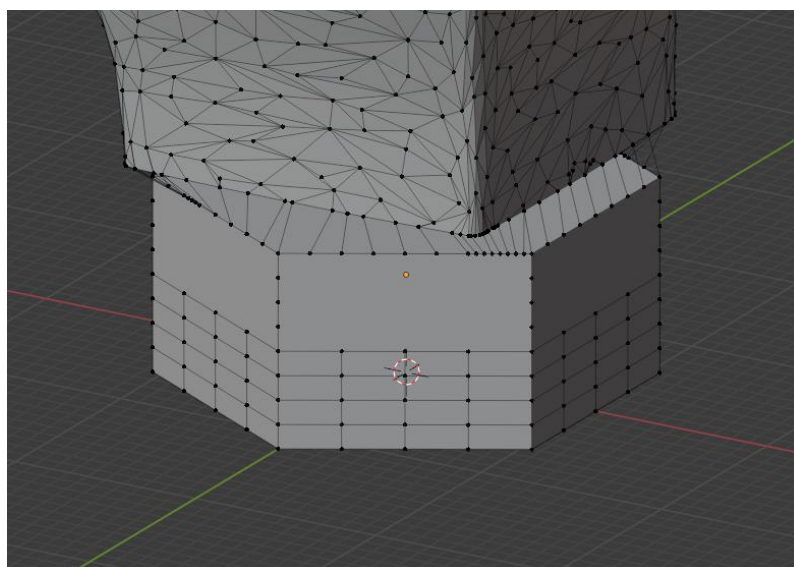
Pro ruční spojování objektů bylo nutné mít na spojovaných hranách dostatek bodů, ideálně by se měl tento počet bodů na obou tělesech rovnat. Počet těchto bodů byl dán počtem bodů na modelu trysky. Rozdílný počet bodů je vyrovnán označením hran, na kterých je bodů nedostatek. Rozbalením nabídky vertex context menu (pomocí pravého tlačítka myši) a použitím funkce subdivide se hrana uprostřed rozdělí za vzniku nového bodu viz. obrázek 33. Tento krok byl proveden tolikrát, dokud nebyl dosažen stejný nebo alespoň podobný počet bodů jako na druhém objektu.



Obrázek 33: Použití funkce subdivide

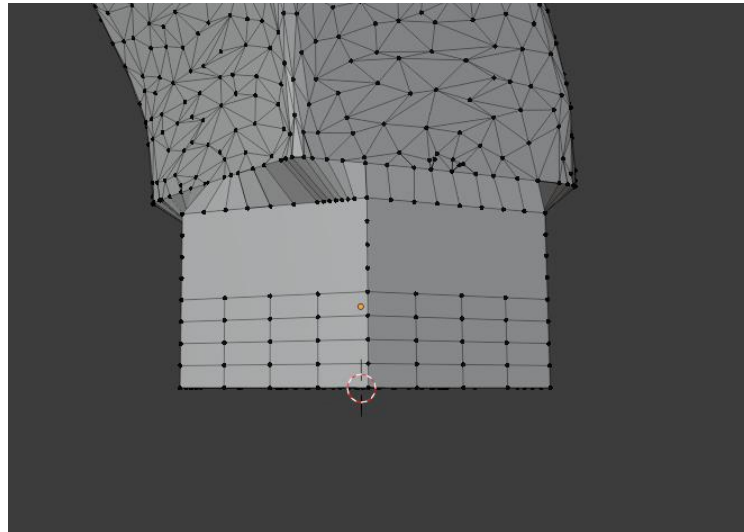
Dalším krokem bylo nastavení šestihranu do pozice, ve které byl spojován s modelem trysky. Po nastavení do pozice byly obě tělesa označena levým tlačítkem s přidržením klávesy shift. V object menu byla vybrána funkce join (spojení) a obě tělesa se spojila v jedno. Kontrolu spojení je možné provést přepnutím do editačního režimu, kde by měly být vykresleny jednotlivé body obou již spojených těles.

První možností spojení je ruční tvorba sítě hran a následné vyplnění plochami. Spojováním protilehlých bodů byla vytvořena síť hran viz. obrázek 34. Spojující hrana dvou označených bodů byla vytvořena pomocí funkce new edge (nová hrana) ve vertex context menu.



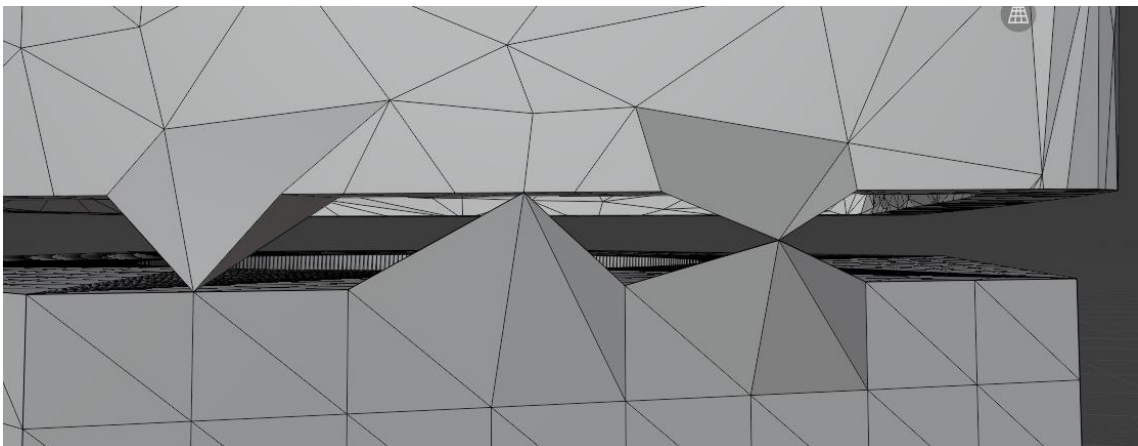
Obrázek 34: Síť hran

Prvním krokem k vyplnění sítě bylo označení nově vytvořených hran a hran k nim přilehlých. Takto označené hrany byly v druhém kroku funkcí fill v edge context menu vyplněny viz. obrázek 35.



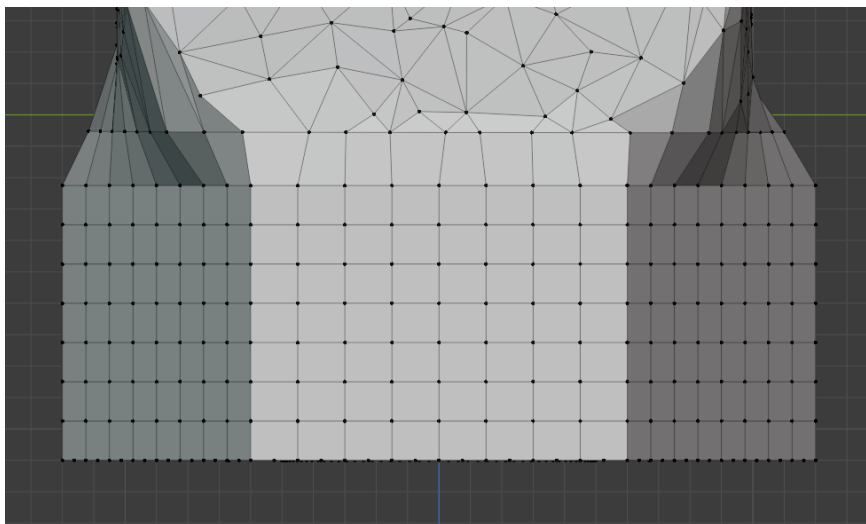
Obrázek 35: Vyplnění sítě použitím funkce fill

Druhou možností je spojování dvou bodů do jednoho. Tato funkce nese název merge a má několik variant. At first spojí dva body v prvním označeném, at last v druhém označeném a at center spojí body uprostřed pomyslné spojnice těchto dvou bodů viz. obrázek 36 (Na obrázku 36 byl vždy nejprve označen bod šestihranu a následně bod trysky).



Obrázek 36: Funkce merge (zleva at first, at last, at center)

Nejplynulejší přechod mezi dvěma objekty tvoří funkce `merge at center`. Na obrázku 37 je znázorněn hotový spoj dvou objektů. Pro plynulejší přechod mezi dvěma objekty byl ve `sculpt mode` použit modifikátor `smooth`. Vyhlazení modifikátorem `smooth` probíhá na základě změny úhlu mezi stěnami. Výpočetní algoritmus vezme dvě sousední plochy a zmenší jejich svírající úhel.

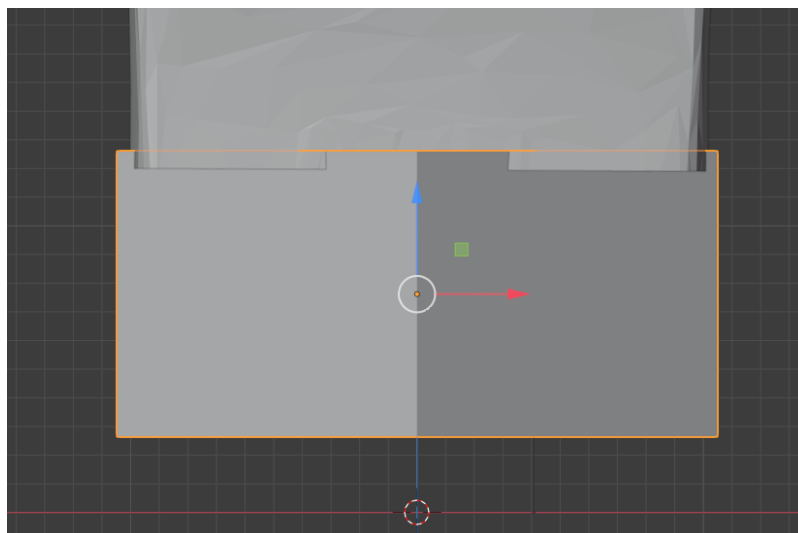


Obrázek 37: Hotový spoj pomocí funkce `merge at center`

9.7.2 Spojení booleovskou funkcí

Druhý způsob spojení dvou těles je použití již známé funkce `boolean`. Před samotným spojováním bylo nutné objekt šestihranu rozčlenit na více ploch z důvodu následných úprav. Toho bylo dosaženo již známou funkcí `subdivide`.

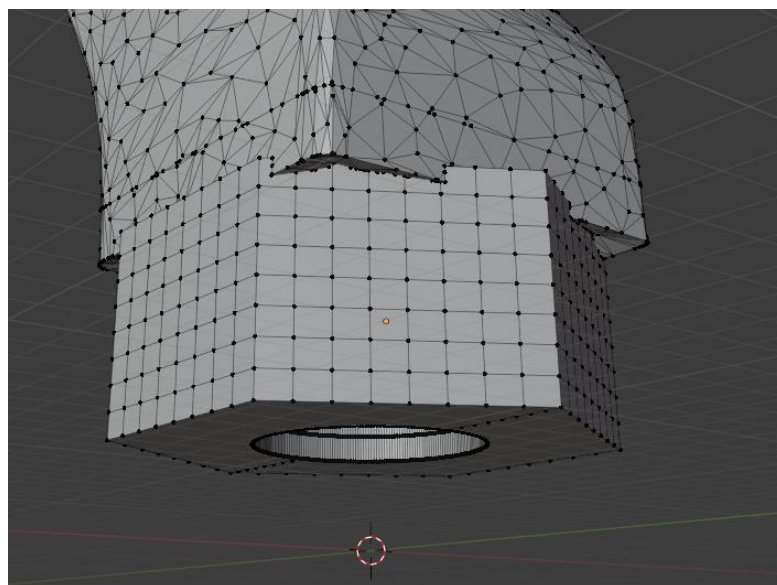
Prvním rozdílem od ručního spojování je umístění obou těles. V případě použití funkce `boolean` musela být obě tělesa zanořena do sebe tak, aby vznikl alespoň jeden průnik ploch. Šestihran byl vsunut do těla trysky pomocí funkce `move` viz. obrázek 38.



Obrázek 38: Vsunutí šestihranu do těla trysky

Jakmile byla obě tělesa nastavena do požadované pozice, bylo označeno jedno ze dvou těles. Dále byla použita funkce boolean/union a v poli object bylo označeno druhé z těles. Hotové spojení je znázorněné na obrázku 39.

U funkce boolean/union nezáleží na pořadí výběru prvního a druhého tělesa, protože výsledkem je spojení obou těles. V případě boolean/difference je první vybrané těleso oříznuto o druhé vybrané, které svůj tvar nemění.



Obrázek 39: Hotový spoj pomocí funkce boolean/union

Z obrázku 36 je patrné, že hotové spojení nebylo vhodné pro výrobu kvůli ostrým přechodům a převisům. Úprava těchto kritických míst v režimu sculpt měla příznivý dopad na celkový vzhled součásti viz. obrázek 40.



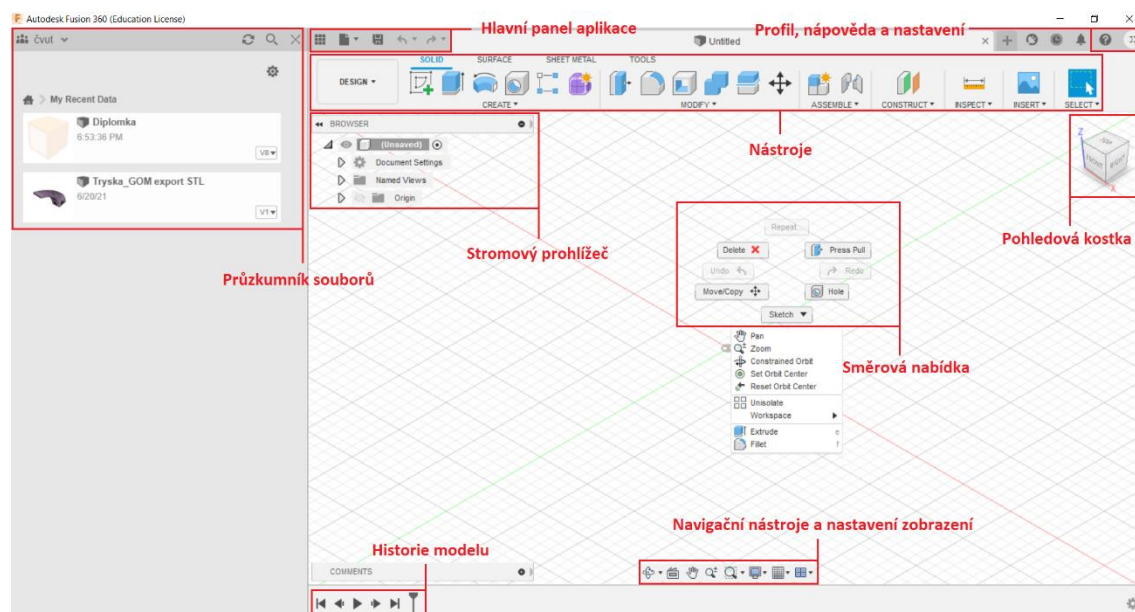
Obrázek 40: Finální spojení metodou booleovské funkce

10 Fusion 360

Fusion 360 je inovativní a profesionální 3D CAD/CAM cloudová aplikace zejména pro strojírenské použití metodou digitálního prototypování. Aplikace umožňuje práci s modely od návrhu a tvorby 3D modelu, otestování pomocí simulací až po výrobu typu CAM, 3D tisk či laserové vyřezávání a další. Program umožňuje tvorbu objemových i plošných modelů. Import je možný v padesáti možných formátech. [30]

10.1 Pracovní rozhraní

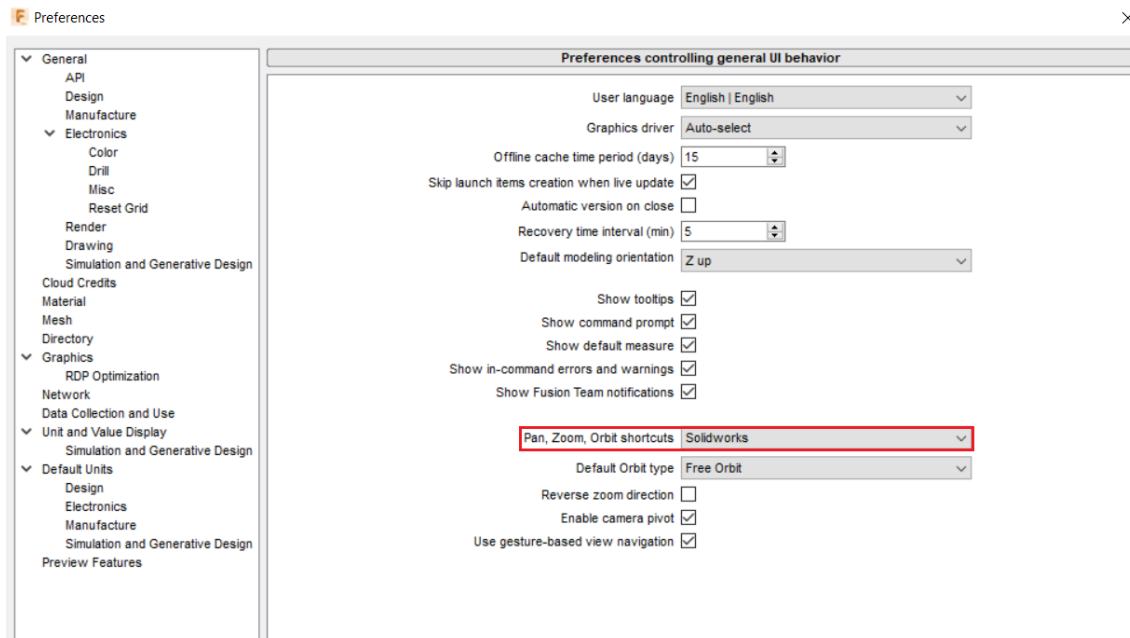
Na obrázku 41 jsou vyznačeny důležité funkce a nástroje v rozhraní programu.



Obrázek 41: Pracovní rozhraní programu Fusion 360

Na vrchní liště nechybí hlavní panel aplikace, ve kterém se nachází příkazy jako uložit, otevřít, krok zpět atd. Na opačném konci lišty se nachází ikony profilu a nápovědy. Rozkliknutím ikony profilu a rozbalením nabídky preferences nám program umožňuje nastavení základních funkcí viz. obrázek 42. Zajímavostí je například možnost nastavení

pohybu, rotace a přiblížení z programu, ze kterého do programu fusion přecházíme (červený rámeček na obrázku 42).

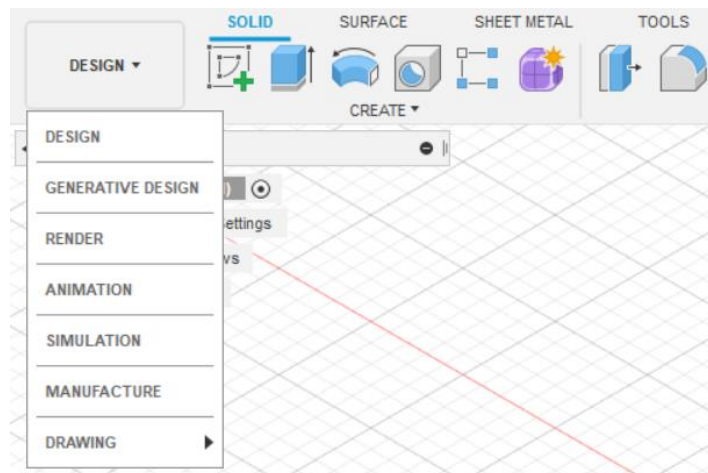


Obrázek 42: Preferences

Pod hlavní lištou se nachází panel nástrojů. Zde se nachází všechna nástrojová prostředí jako například nástroje pro modelování, sestavy, renderování a simulace. V pravém horním rohu pracovního prostoru se nachází pohledová kostka. Ta slouží jako další možnost k natáčení modelu a ke snazší orientaci v prostoru. V druhém horním rohu má své místo stromový prohlížeč. Ten obsahuje veškerý seznam rovin, těl a skic modelu, které se dají zviditelňovat či skrývat, upravovat nebo odstraňovat. Kliknutím pravým tlačítkem myši do pracovního prostoru se rozbálí směrová nabídka, kde se nacházejí nejčastěji používané úkoly a nástroje. Spodní část pracovního prostoru obsazují navigační nástroje a nastavení zobrazení. Tyto nástroje umožňují rotaci a přiblížení či oddálení modelu a dále nastavení zobrazení a vzhledu. Spodní lišta obsahuje historii modelu, ve které je možné najít seznam operací a úkonů provedených na modelu s možností vrácení o několik úloh zpět včetně jejich úprav. Poslední je průzkumník souborů na levé liště programu. Zde se zobrazují složky se soubory, odtud je možné dané soubory načíst k práci.

10.2 Pracovní prostředí

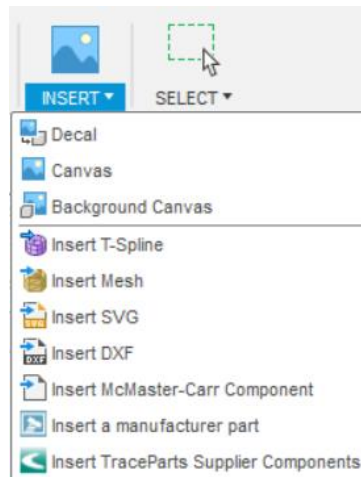
Program Fusion 360 obsahuje několik pracovních prostředí. Ty jsou voleny v závislosti na aktuální potřebě (např. při práci na 3D modelu, práci s plochami, práci s rendery atd.). Pracovní prostředí se mění kliknutím a rozbalením ikony v levé části panelu nástrojů viz. obrázek 43.



Obrázek 43: Pracovní prostředí

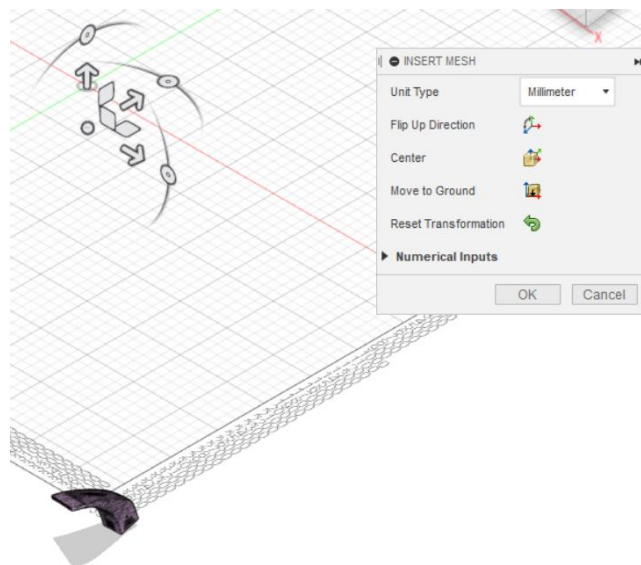
10.3 Nahrání modelu trysky

Po spuštění a načtení programu Fusion 360 bylo pro nahrání souboru nutné pracovat v prostředí Design. Soubor byl importován do programu přes funkci Insert/insert mesh, která se nachází v pravé části panelu nástrojů viz. obrázek 44. Program následně požádal o cestu k souboru na disku.



Obrázek 44: Insert mesh

Jakmile byla cesta potvrzena, model trysky byl nahrán do pracovního prostředí programu. Společně s modelem se v pravém horním rohu objevila tabulka, pomocí které bylo možné nastavit měřítko a vyrovnaní modelu viz. obrázek 45.

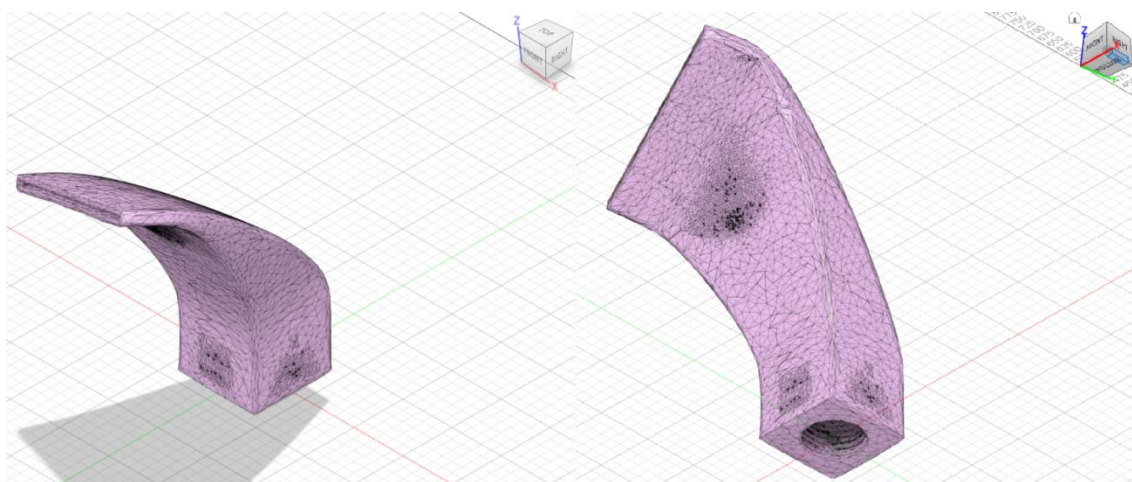


Obrázek 45: Nahráný model v prostředí Fusion 360

10.4 Centrování součásti

Z Obrázku 45 je patrné, že se model trysky, stejně jako v případě nahrávání do programu Blender, nahrál hluboko pod střed souřadného systému. To je způsobeno polohou počátku tělesa, které se nachází vysoko nad součásti. Mimo to byl model po nahrání pootočen kolem osy X a Y. Použitím nástroje modify/move bylo dosaženo vycentrování součásti. Výsledné vyrovnání modelu je znázorněno na obrázku 46.

Rotace součásti probíhá vzhledem k souřadnému systému umístěnému ve zvoleném bodě v blízkosti tělesa. Proto není závislá na poloze počátku tělesa. Po natočení podle některé z os je následný pohyb umožněn v pootočeném souřadnicovém systému. Je-li nutné posunout těleso podél některé z os základního souřadnicového systému, stačí nástroj move zrušit a následně opětovně spustit.

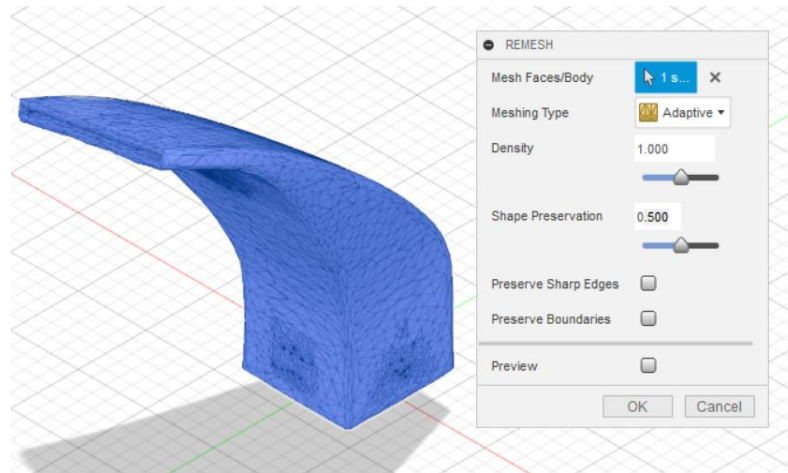


Obrázek 46: Centrování modelu v programu Fusion 360

10.5 Odstranění chyb

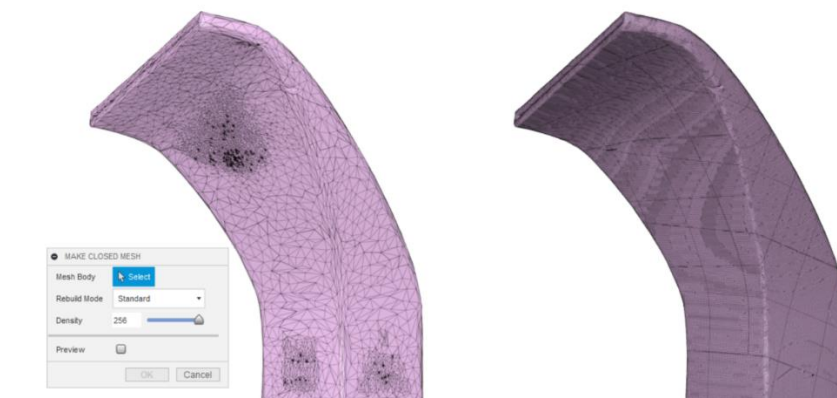
Program Fusion 360 disponuje, stejně jako program Blender, funkcí remesh, která zajišťuje přetvoření základní sítě do nové vhodnější sítě pro další úpravy. Funkce remesh se nachází v nástrojích pro mesh tělesa na cestě modify/remesh. Remesh nabízí výběr nastavení typu „meshování“ mezi adaptivním (přizpůsobuje se lépe detailům, velikost

plošek sítě se mění) a uniformním (některé detaily mohou zaniknout, síť se skládá ze stejně velkých plošek). Dále je možné nastavit hustotu nové sítě a kvalitu zachování tvarů, zachování ostrých rohů a zachování hranic viz. obrázek 47.



Obrázek 47: Funkce remesh

V případě trysky se tento nástroj nedal použít, protože plášť modelu obsahoval nespočet děr a v okolí modelu se nacházely plochy nenavazující na plochy modelu. K odstranění takového druhu chyb byl použit nástroj modify/make closed mesh. Bylo nutné nastavit nejvyšší možnou hustotu nově vytvářené sítě z důvodu tvoření můstků mezi blízkými stěnami vyústění trysky. Nástroj přetvořil síť a kompletně zbavil model děr a nenavazující plochy spojil s modelem viz. obrázek 48.



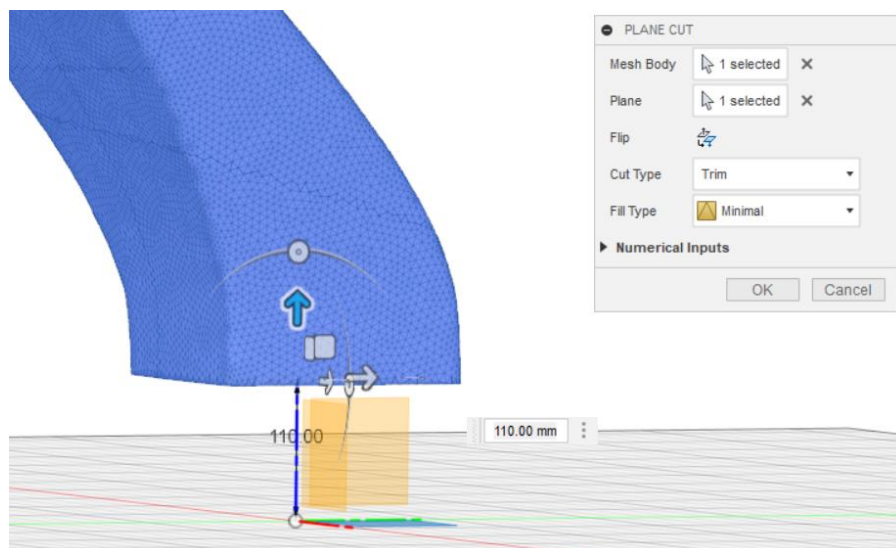
Obrázek 48: Funkce make closed mesh

10.6 Odstranění spodní části trysky po délce závitu

Důvod odstranění a nahrazení spodní části trysky byl již popsán v kapitole 9.5 Odstranění spodní části trysky po délce závitu. V programu Fusion 360 vedou dvě cesty k úpravě STL modelu. První cesta je přímá úprava STL dat v nástrojích pro mesh tělesa. Druhá cesta vede přes parametrizaci modelu a následnou úpravu klasickými CAD nástroji.

10.6.1 Odstranění části modelu – mesh nástroje

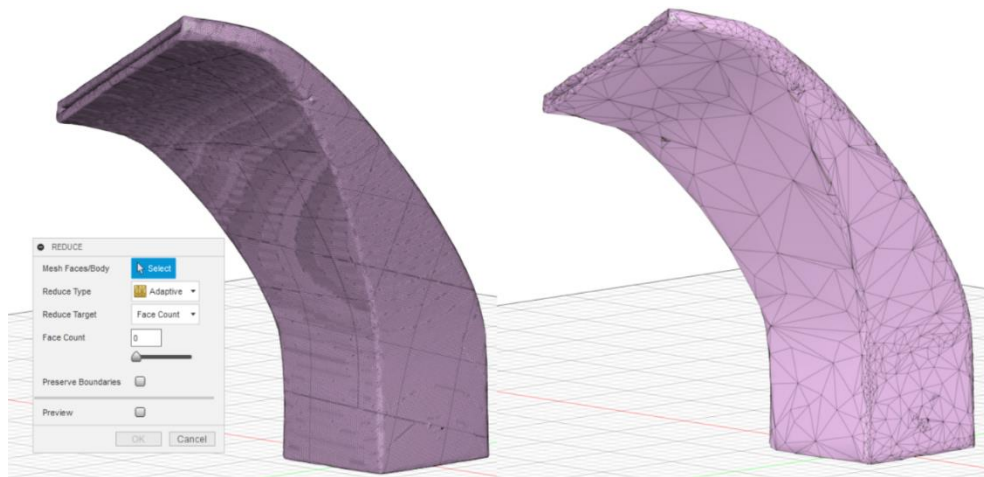
K přímé úpravě STL modelu bylo nutné pracovat s nástroji pro mesh tělesa. Pro odstranění části modelu byl použit nástroj Modify/plane cut, který umožňuje řez a odstranění části tělesa pomocí jedné ze základních rovin souřadného systému nebo pomocí předem vytvořené referenční roviny. Jedním z předchozích kroků úprav modelu bylo však centrování součásti tak, aby spodní plocha trysky ležela v rovině XY. Pro řez tělesa byla použita rovina XY posunutá v hladině Z o +110 mm. Program se dále ptal na typ řezu, který byl nastaven na trim (řez + odstranění). Pro jiné úpravy jsou zde dostupné ještě možnosti split body (řez + rozdělení na dvě tělesa) a split faces (řez rozdělí plošky modelu v rovině řezu, ale model zůstává celý). Do poslední kolonky fill type bylo zadáno minimal, což mělo za následek vyplnění díry modelu v místě řezu sítí o co nejmenším počtu ploch. Další možností fill type je uniform (vyplnění pravidelnou sítí ploch) či no fill (bez výplně). Takto zadané parametry vedly k vytvoření řezu viz. obrázek 49.



Obrázek 49: Nástroj plane cut

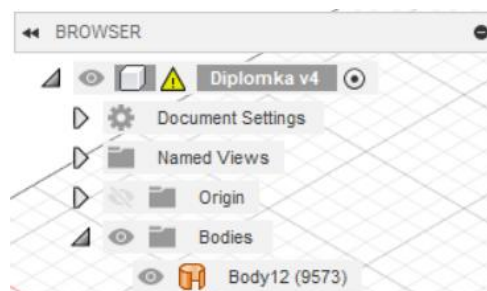
10.6.2 Odstranění části modelu – CAD nástroje

Před použitím klasických CAD nástrojů bylo nutné STL model trysky parametrizovat do objemového tělesa. Avšak po opravě chyb nástrojem make closed mesh došlo k výraznému zhuštění sítě. Počet ploch opraveného modelu činil 113 033 ploch. Maximální počet ploch k aplikování parametrizace je 10 000. Bylo proto nutné plochy sítě zredukovat na tuto maximální hodnotu. K tomu byl použit další z nástrojů pro mesh tělesa modify/reduce. Program dával na výběr mezi adaptivním a uniformním typem zredukované sítě (reduce type) a dále mezi redukcí na určité množství ploch nebo redukcí na určitou hustotu sítě (reduce target). V případě trysky byl reduce type nastaven na adaptive, reduce target byl nastaven na face count a do pole pro face count bylo zadáno číslo 10 000. Výsledná redukce počtu ploch na modelu trysky je znázorněna na obrázku 50.



Obrázek 50: Nástroj reduce

Jakmile byly plochy tělesa zredukovány na požadovanou hodnotu, bylo možné provést parametrizaci do objemového tělesa. Funkce pro parametrizaci se nazývá mesh to brep a pro její použití bylo nutné pracovat v prostředí s nástroji pro objemová tělesa (solid). Pravým kliknutím na těleso byla rozbalena směrová nabídka a zvolena funkce mesh to brep. V políčku operation bylo zvoleno new body, což mělo za následek vytvoření nového tělesa. Program přes všechny předchozí opravy modelu nedokončil parametrizaci z důvodu chybějících ploch v plášti. Program hlásí chybu v podobě červeného otevřeného válečku ve stromovém prohlížeči viz. obrázek 51. Problém byl eliminován až odstraněním spodní části trysky, která nejspíše obsahovala chybu v oblasti vnitřního závitu.

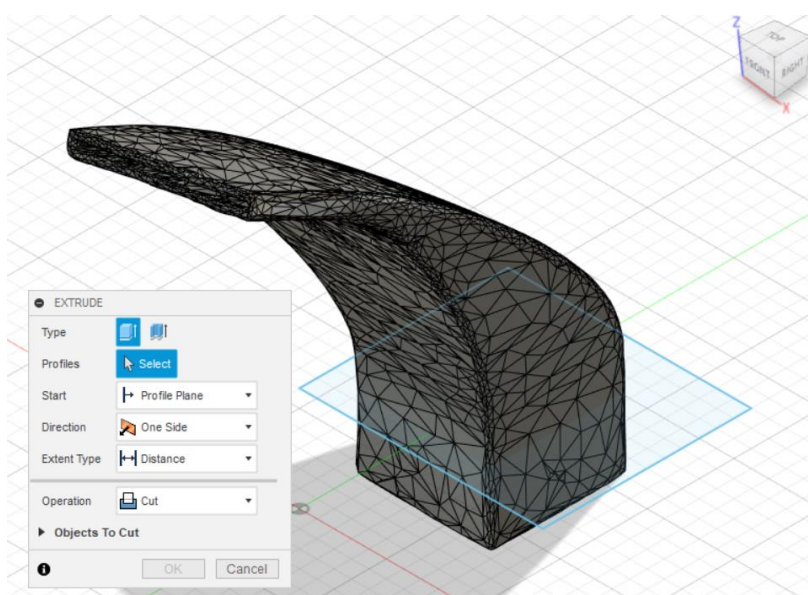


Obrázek 51: Chybové hlášení o nedokončené parametrizaci

Odstranění části trysky se závitem bylo provedeno v několika krocích pomocí nástrojů pro solid tělesa. Prvním krokem bylo posunutí modelu trysky v hladině Z o -110 mm přes

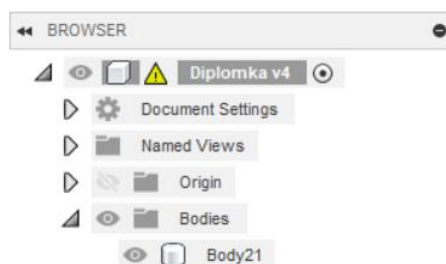
funkci modify/move. Druhý krok obsahoval vytvoření čtvercové skici v základní rovině XY, která svými rozměry na všech stranách přesahovala přes model trysky. Toho bylo docíleno cestou create/create sketch. Posledním krokem bylo odstranění spodní části trysky vysunutím skici v záporném směru osy Z viz. obrázek 52. K tomu byla použita funkce create/extrude s parametry nastavenými dle obrázku 52.

Alternativou funkce extrude by mohlo být použití funkce modify/split body v místě požadovaného řezu a následné odstranění spodní části rozděleného tělesa.



Obrázek 52: Odstranění spodní části trysky funkcí extrude

Poté, co byla spodní část odstraněna, byla znovu použita funkce mesh to brep a těleso se podařilo bez chyby parametrizovat. Objemové těleso je ve stromovém prohlížeči znázorněno plným válečkem viz. obrázek 53.



Obrázek 53: Značení tělesa po bezchybné parametrizaci

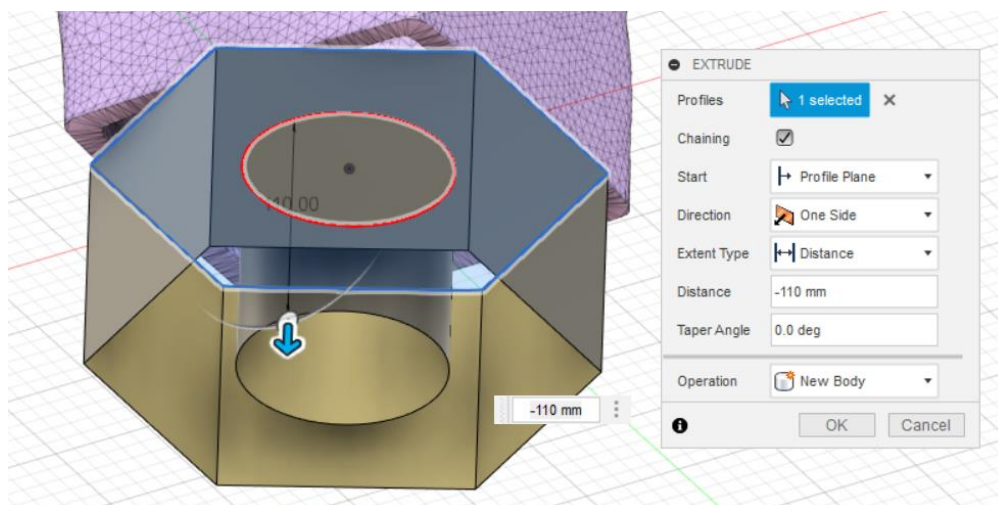
10.7 Vytvoření optimalizovaného tvaru

Po dokončení operace, která měla za úkol odstranit spodní část trysky, následovala další operace s názvem vytvoření optimalizovaného tvaru. Specifikace požadovaných vlastností a rozměrů byla blíže popsána v kapitole 9.6 Vytvoření optimalizovaného tvaru.

Program Fusion 360 nabízí dvě velmi podobné cesty k vytvoření šestihranu s dírou pro závit. Jedna cesta používá nástroje surface + mesh a druhá nástroje solid. Obě zahrnují vytvoření skici ve zvolené rovině a její vysunutí za vzniku nového těla. Liší se časovou náročností a výsledným formátem modelu, kdy při použití surface + mesh nástrojů vznikne mesh těleso a při použití nástrojů solid vzniká těleso objemové.

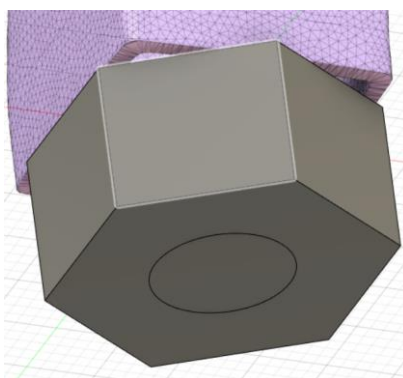
10.7.1 Modelování pomocí nástrojů surface + mesh

Prvním krokem bylo vytvoření skici šestihranu s dírou požadovaných rozměrů v rovině XY. K vytvoření skici vede cesta create/create sketch. Druhým krokem bylo použití funkce create/extrude k vysunutí profilu skici v záporném směru osy Z do vzdálenosti 110 mm. Náhled vysunutí se zadanými parametry viz. obrázek 54.



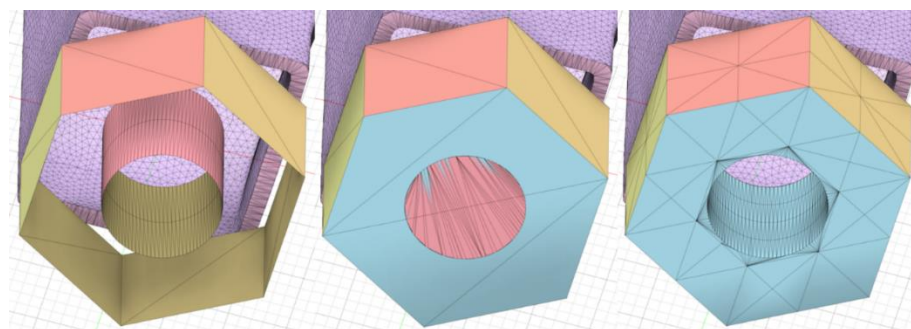
Obrázek 54: surface nástroj extrude

Dále bylo nutné spojit šestihran s válcem a vytvořit tak vrchní a spodní podstavu. V nástrojích surface k tomu slouží funkce patch. Ta však přes všechny možné úpravy chybně vyplnila celou podstavu a nebylo možné ponechat díru pro závit viz. obrázek 55. Důvodem nejspíše bylo to, že vysunutím ze skici vznikla dvě surface tělesa (šestihran a válec) a použitím funkce patch na obvod šestihranu nebylo možné vybrat hranu válce jako vnitřní hranici plochy.



Obrázek 55: Surface nástroj patch

Podstavy se podařilo vytvořit až pomocí mesh nástrojů. Obě surface tělesa byla nástrojem create/tessellate převedena na mesh tělesa. Těm byly funkcí prepare/repair uzavřeny díry (podstavy) a vznikla dvě samostatná mesh tělesa. Finální podstavy s dírou o velikosti válce byly v posledním kroku vytvořeny funkcí modify/combine/cut. Těleso šestihranu bylo bráno jako target body a těleso válce jako tool body, kterým bylo těleso šestihranu vystřiženo. Celý postup tvorby podstav je zachycen na obrázku 56.

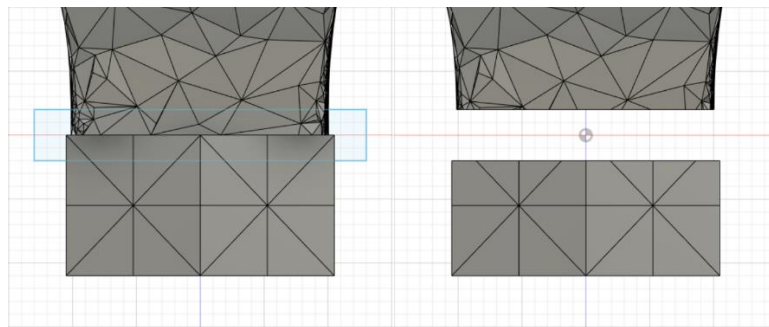


Obrázek 56: Postup tvorby podstav: tessellate-repair-combine/cut

Spojení šestihranu s modelem trysky

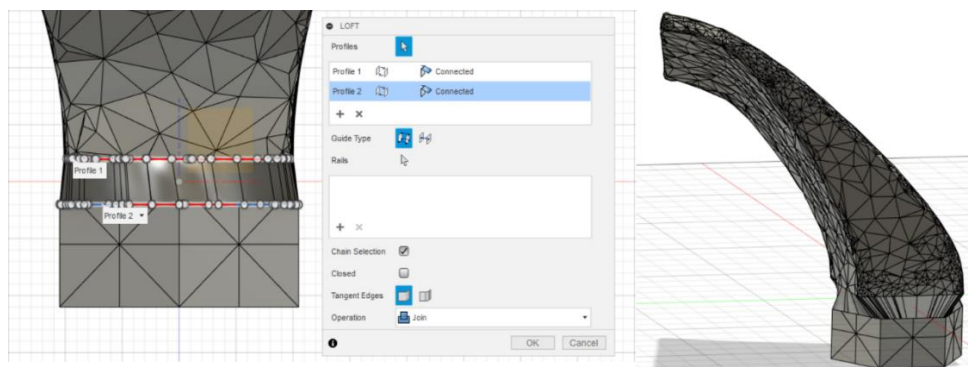
Jakmile byla tvorba šestihranu s dírou pro závit dokončena, bylo nutné tuto část spojit s modelem trysky. V nástrojích mesh k tomu slouží funkce modify/combine/join. Po spojení obou částí pokračovalo odstranění ostrých rohů. Avšak nástroje pro mesh nedisponují žádnou vhodnou metodou k této úpravě, a tak bylo nutné mesh těleso převést na těleso solid.

V nástrojích solid je ke spojování dvou profilů dostupná funkce create/loft. Nejdříve bylo nutné tyto dva profily získat. Možným krokem, pokud by obě části nebyly spojeny, bylo jejich oddálení a použití jejich podstav jako dvou základních profilů pro funkci loft. Avšak z předchozí operace již byly obě části spojeny v jednu. Z tohoto důvodu a z důvodu zachování původní výšky trysky byla mezera mezi dvěma částmi modelu vytvořena funkcí create/extrude/cut viz. obrázek 57.



Obrázek 57: Tvorba mezery mezi šestihranem a tryskou pro použití funkce loft

Tímto řezem byly vytvořeny dva profily, vrchní na části trysky a spodní na části šestihranu. Tyto profily byly následně použity ve funkci loft jako dva profily ke spojení. Nastavené parametry funkce loft a výsledné spojení je zachyceno na obrázku 58.

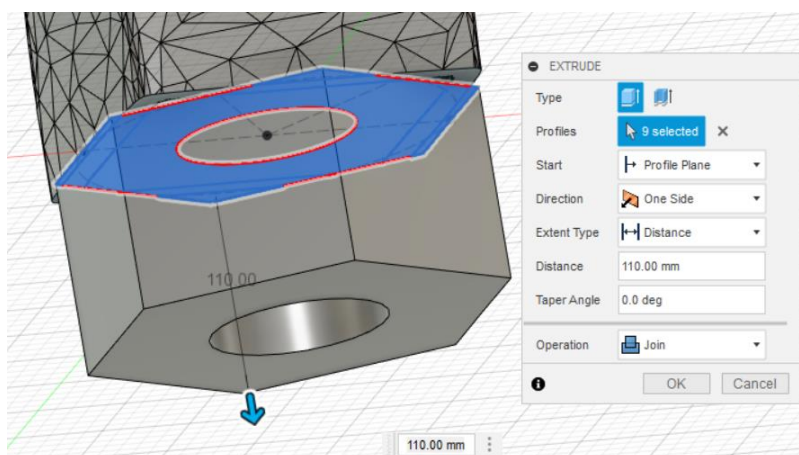


Obrázek 58: Spojení dvou profilů pomocí funkce loft

10.7.2 Modelování pomocí nástrojů solid

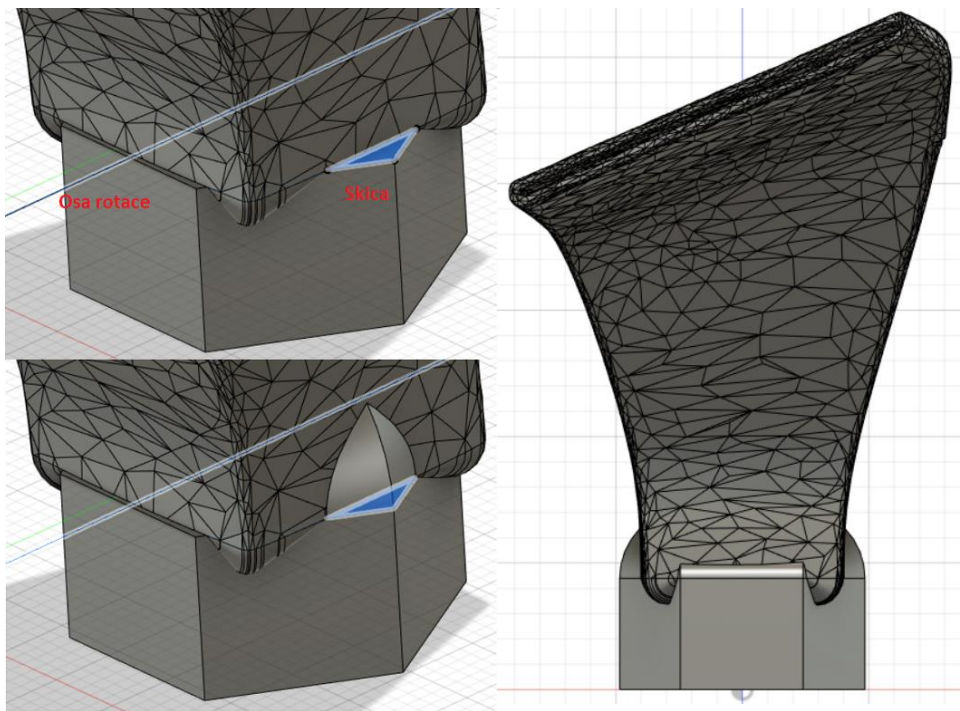
Stejně jako v předchozím případě se i v tomto nejprve začalo skicou s tím rozdílem, že skica byla vytvořena přímo na ploše řezu z předchozí operace. Bylo to učiněno z důvodu používání nástrojů pro solid tělesa, u kterých nevznikají nová tělesa, ale upravuje se těleso původní. Tím odpadá nutnost spojování nového tělesa s původním.

Jakmile byla skica vytvořena, následovalo použití funkce create/extrude již známé z nástrojů pro surface tělesa. Na rozdíl od funkce extrude z nástrojů surface funkce extrude z nástrojů solid vysune celou plochu skici, nikoliv jen její hraniční křivky. Vysunutím skici podél osy kolmé na rovinu skici vznikla nová část původního modelu bez potřeby následného napojování. Výsledné vysunutí a jeho nastavené parametry jsou znázorněny na obrázku 59.



Obrázek 59: Solid nástroj extrude

Posledním krokem po vytvoření optimalizovaného tvaru spodní části trysky bylo odstranění ostrých rohů v místě napojení. Plynulého přechodu mezi oběma částmi modelu bylo docíleno funkcí create/revolve. Jako skica rotace byla použita vždy jedna vyčnívající část (trysky nebo šestihranu) a osa rotace byla přímka rovnoběžná s vnitřní hranou skici. Pro lepší názornost použití funkce revolve a pro vyobrazení finální úpravy spojení byl vytvořen obrázek 60.



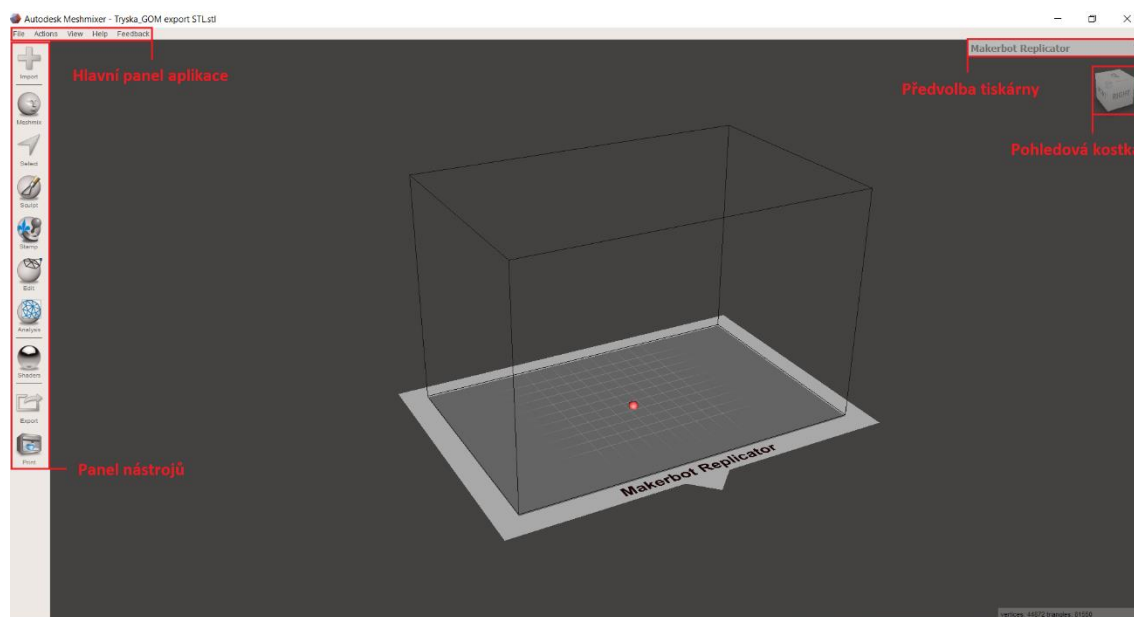
Obrázek 60: Funkce revolve a finální spojení tryska-šestihran

11 Meshmixer

Jedná se o software pro 3D modelování a 3D tisk zaměřený na rychlou a snadnou úpravu či kombinaci 3D sítí. V roce 2016 firma Autodesk vydala již třetí verzi tohoto programu a stejně jako jeho předchozí verze je stále volně dostupný ke stažení na stránkách společnosti. Disponuje plnou kompatibilitou se sítovými soubory, jako jsou .stl, .obj, .ply, .amf, .3mf, .off, .mix.

11.1 Pracovní rozhraní

Na obrázku 61 je zachyceno pracovní rozhraní programu Meshmixer s jeho nástroji a funkcemi.



Obrázek 61: Pracovní rozhraní programu Meshmixer

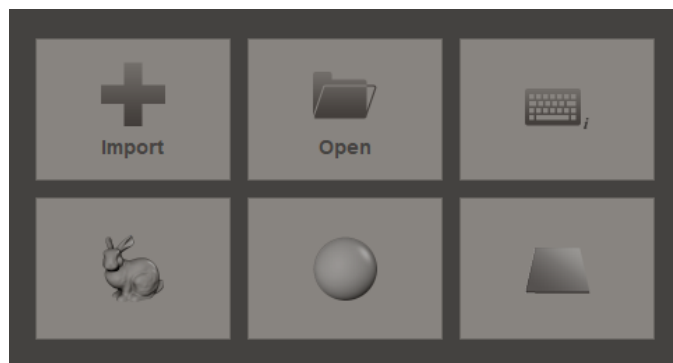
Na horní liště se nachází hlavní panel aplikace, kde jsou umístěny nástroje pro import, uložení dat, vrácení kroku vpřed či vzad a další.

Na hlavní panel navazuje v levé části obrazovky panel nástrojů. Je zde druhá možnost pro import dat (první je na hlavním panelu v sekci file). Dále jsou zde nástroje meshmix, které umožňují přidání již hotových 3D sítí převážně pro tvorbu figur (nohy, uši, hlavy, nohy), popisků (písmena, číslice, symboly), ale i pro tvorbu jednoduchých útvarů (koule, válec, krychle atd.) či nahrání vlastního dílu. Nejdůležitější nástroje z hlediska úprav modelů jsou nástroje select, sculpt, edit a analysis. Nástroje select slouží k vybírání jednotlivých plošek či skupin plošek a pro jejich následnou úpravu (odstranění, redukce počtu, remesh atd.). Sculpt nástroje pomáhají s úpravou sítě ve zvoleném rádiusu a jsou podobné sculpt nástrojům v programu blender. Mezi nejpoužívanější patří smooth, flatten a inflate. V nástrojích edit je možné najít nástroje pro přesnější úpravy pomocí řezů, zrcadlení, duplikování atd. Poslední nástroje, důležité z hlediska úprav modelů, jsou nástroje analysis. Slouží k měření a vyhodnocování vlastností modelu, jako jsou například chyby, tloušťky, rozměry, stabilita a orientace.

V pravém horním rohu pracovního rozhraní se nachází předvolba tiskárny (rozměrů pracovního prostoru) a pohledová kostka.

11.2 Nahrání modelu trysky

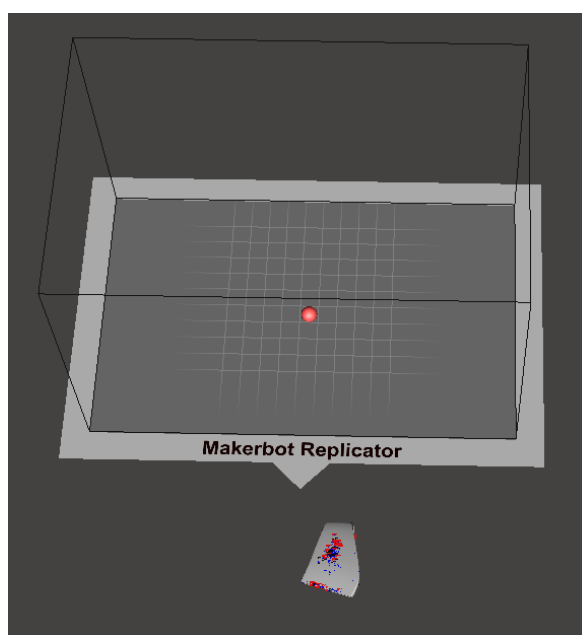
Po spuštění a nahrání programu se v pracovním prostoru objeví nabídka s volbou dalšího kroku. Na výběr je zde z importu nebo otevření souboru v počítači, dále je zde odkaz na klávesové zkratky a poté jsou zde odkazy na import sítě ve tvaru plochy, koule nebo králíka viz. obrázek 62.



Obrázek 62: Úvodní nabídka programu Meshmixer

Pro nahrání modelu trysky byla zvolena ikona pro import. Program se poté dotázal na cestu k souboru na disku. Po importu tělesa se tryska, stejně jako v předchozích případech, objevila hluboko pod pracovní plochou programu viz. obrázek 63.

Na obrázku 63 je též vidět, že program Meshmixer zvolil jako pracovní prostor tiskárnu Makerbot Replicator.

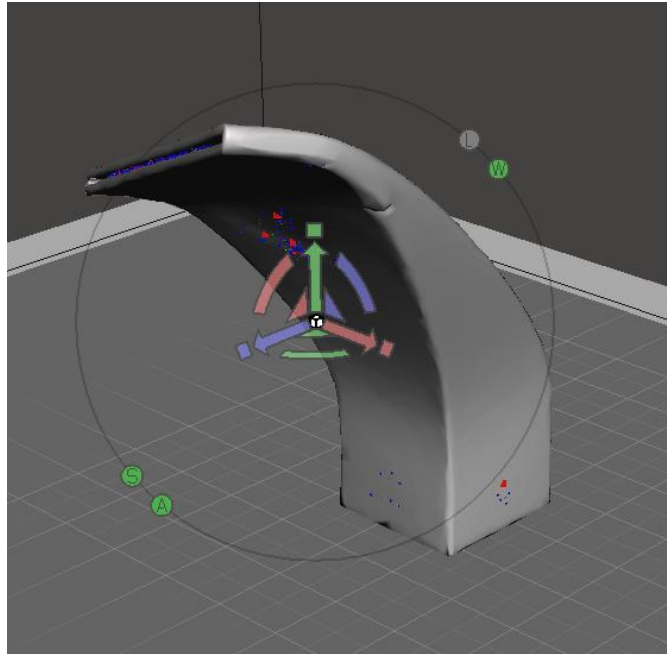


Obrázek 63: Importovaný model trysky

11.3 Centrování součásti

Nahráný model trysky bylo nutné posunout po ose Z a vyrovnat rotací vzhledem k osám X a Y. Funkce, která tyto pohyby umožňuje, nese název transform a nachází se v nástrojích edit. Pohyb tělesa je umožněn dvěma cestami. První cesta vede přes zadání číselné hodnoty přímo do tabulky se souřadnicemi a rotacemi podle jednotlivých os. Druhou možností je využití barevných šipek a oblouků pro ruční posunutí a rotaci. Při ručním vyrovnávání je pohyb omezen hustotou měřítka, která se dá nastavit šipkami nahoru a dolů na klávesnici. Vyrovnaný model trysky je zachycen na obrázku 64.

Rotace probíhá okolo těžiště tělesa a není díky tomu závislá na poloze jeho počátku. Jakmile je těleso pootočeno, další pohyb je umožněn v pootočeném souřadnicovém systému podobně jako v případě programu Fusion 360. Pro pohyb v základním souřadnicovém systému stačí v políčku coordinate space v parametrech tabulky pro funkci transform zaměnit local frame za world frame.

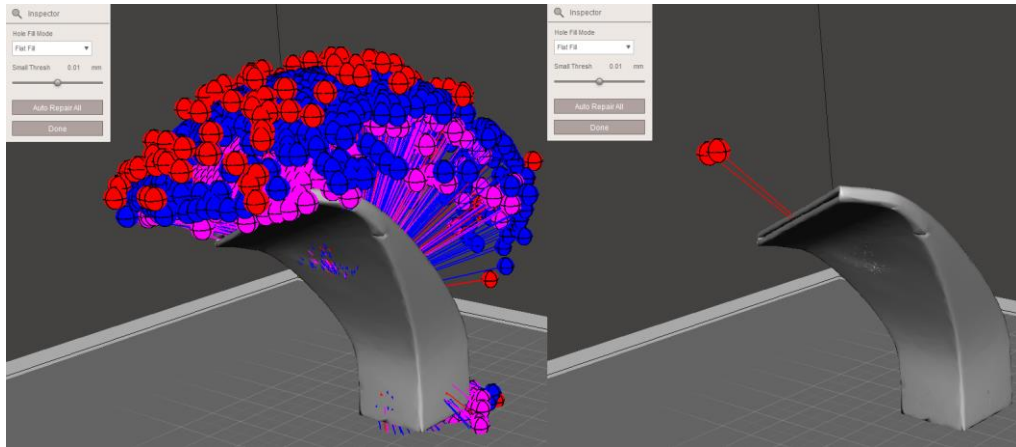


Obrázek 64: Centrování modelu v programu Meshmixer

11.4 Odstranění chyb

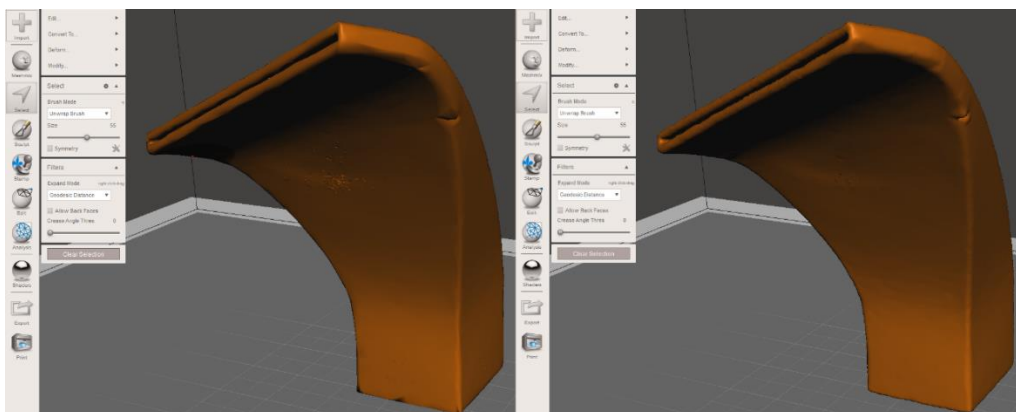
Chyby se na nahraném modelu zobrazují červenou, modrou nebo fialovou barvou. Program Meshmixer disponuje velmi spolehlivým a přesným nástrojem pro odstranění chyb. Nachází se v nástrojích analysis a jmenuje se inspector. Po jeho spuštění vyznačil všechny chyby na modelu „špendlíkem“. Chyby se dají odstraňovat jednotlivě kliknutím na vybraný špendlík nebo hromadně kliknutím na políčko auto repair all. Před samotným odstraněním bylo nutné nastavit parametr hole fill mode na flat fill. Velikost chyb, které program detekuje, nebyla změněna a zůstala nastavena na velikosti 0,01 mm. Postup opravy modelu je znázorněn na obrázku 65. Z obrázku je též patrné, že program odstranil

všechny chyby až na dvě. Tyto dvě chyby byly následně odstraněny jednotlivě kliknutím na oba špendlíky.



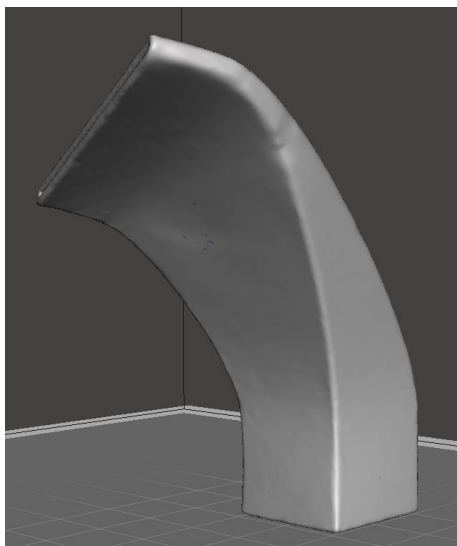
Obrázek 65: Odstranění chyb pomocí funkce inspector

Vyplněním děr nezmizely nerovnosti na modelu, které bylo třeba vyhladit. K dosažení hladkého povrchu lze použít dva nástroje. Prvním nástrojem je funkce remesh, kterou umožňují použít i předchozí dva programy. V prvním kroku bylo nutné označit celý model trysky. K označení byla použita klávesová zkratka ctrl + A, která označila celý model a rozbalila nástroje select. V těchto nástrojích v sekci edit byla vybrána již zmíněná funkce remesh. Výsledné přetvoření odstranilo nerovnosti v dolní části trysky a z větší části i v té horní viz. obrázek 66. Funkce remesh v programu Meshmixer jako jediná nespojila stěny v úzké části trysky a vytvořila velmi kvalitní síť.



Obrázek 66: Funkce remesh

Zbylé nerovnosti byly vyhlazeny druhým nástrojem s názvem sculpt/robust smooth viz. obrázek 67. V nástrojích sculpt je možné kromě funkce přetvoření dále nastavit například jeho bravu, hloubku, šířku, sílu a symetričnost. V případě trysky byl měněn pouze parametr šířky ovlivňované oblasti a všechny ostatní parametry byly ponechány v základním nastavení.



Obrázek 67: Funkce robust smooth

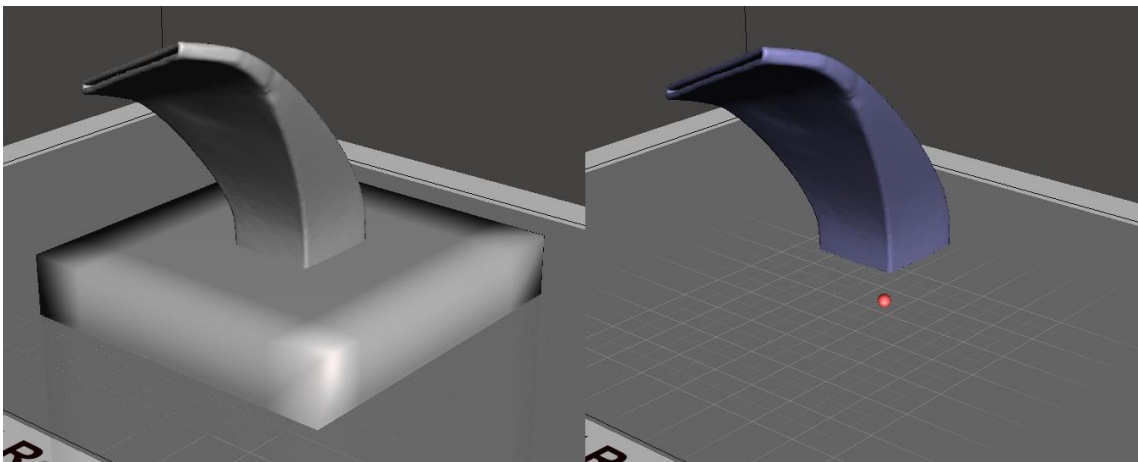
11.5 Odstranění spodní části trysky po délce závitů

V programu Meshmixer jsou dostupné dvě možnosti k odstranění části modelu. První, již známou možností z programu Blender, je booleovská funkce. Druhou možností je použití funkce plane cut, která svým použitím též připomíná funkci bisect z programu Blender.

11.5.1 Odstranění části modelu – Boolean

Prvním krokem bylo vytvoření tělesa, kterým byl model trysky oříznut. K tomu byly použity nástroje meshmix/primitives, ve kterých byla vybrána obyčejná krychle. Do prostředí programu byla krychle nahrána kliknutím, přidržením na zvoleném tvaru a následným přetažením do pracovního prostoru. Poté, co byla krychle úspěšně nahrána, ji

bylo nutné nastavit v prostoru tak, aby vrchní hrana přesahovala přes vrchní konec závitů (vrchní hrana krychle v případě trysky tvoří rovinu řezu). Dále bylo nutné, aby krychle přesahovala na všechny strany přes model trysky (nastavení krychle viz. obrázek 68). Dalším krokem bylo označení obou těles, kdy je nutné, aby bylo těleso trysky označeno jako první a těleso krychle jako druhé. Označení těles lze dosáhnout přidržetím klávesy shift a kliknutím na každé těleso. Po označení obou těles, program automaticky otevře speciální nabídku nástrojů edit pro dvě a více těles. V těchto nástrojích byla použita funkce boolean difference a těleso trysky bylo krychlí odstráženo viz. obrázek 68.

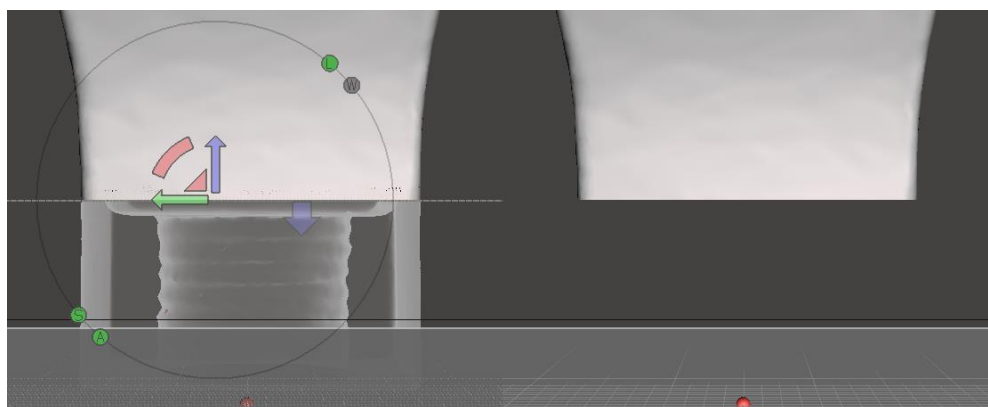


Obrázek 68: Funkce boolean difference

Použitím funkce boolean k odstrážení modelu byly vnější a vnitřní stěny modelu v místě řezu spojeny plochou.

11.5.2 Odstranění části modelu – Plane cut

Druhou možností je použití funkce plane cut z nástrojů edit. V případě trysky je tato metoda výhodnější z důvodu možnosti nahlédnutí do vnitřní geometrie odřezávané části viz. obrázek 69. To umožnilo daleko snazší umístění polohy řezu do místa za vrchním koncem vnitřního závitů. Dále bylo nutné v parametrech řezu nastavit cut type na cut (discard half) a fill type na remeshed fill. Tímto nastavením byla ponechána vrchní část trysky a vnější stěna byla spojena s vnitřní v místě řezu.

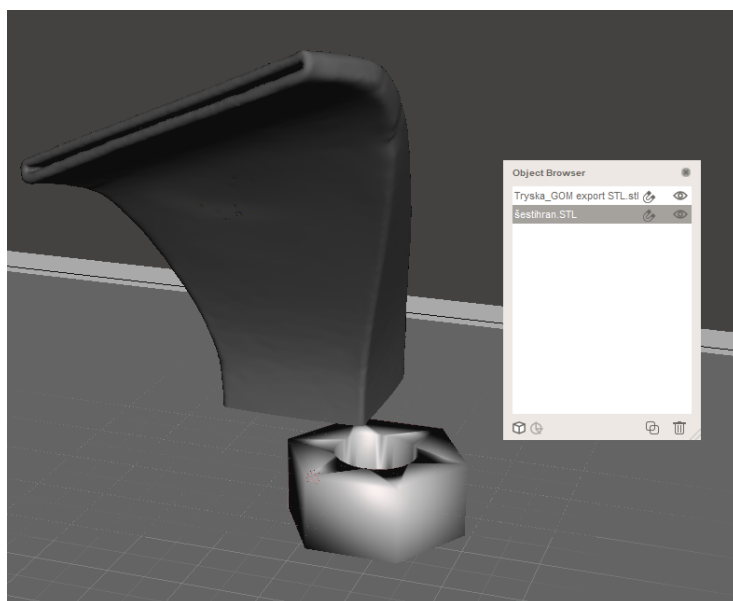


Obrázek 69: Funkce plane cut

11.6 Vytvoření optimalizovaného tvaru

Program Meshmixer se zaměřuje především na úpravu již hotových modelů a tvorbu vlastních těl má proto omezenou na ty nejzákladnější geometrické tvary (nástroje meshmix – primitives). Avšak z těchto tvarů nebylo možné vytvořit požadovaný tvar šestihranu. Bylo nutné získat STL model šestihranu s dírou pro závit pomocí jiného programu. Byl použit již hotový model, jehož postup tvorby byl popsán v kapitole 9.6.1 Modelování v programu Solidworks 2017.

Model šestihranu byl nahrán pomocí ikony import z panelu nástrojů. Před nahráním se program dotáže, zdali má být nový model nahrán k modelu trysky (append) nebo ho má nahradit (replace). S modelem šestihranu se v pracovním prostoru zobrazil i object browser sloužící ke zlepšení přehledu o nahraných tělesech viz. obrázek 70.



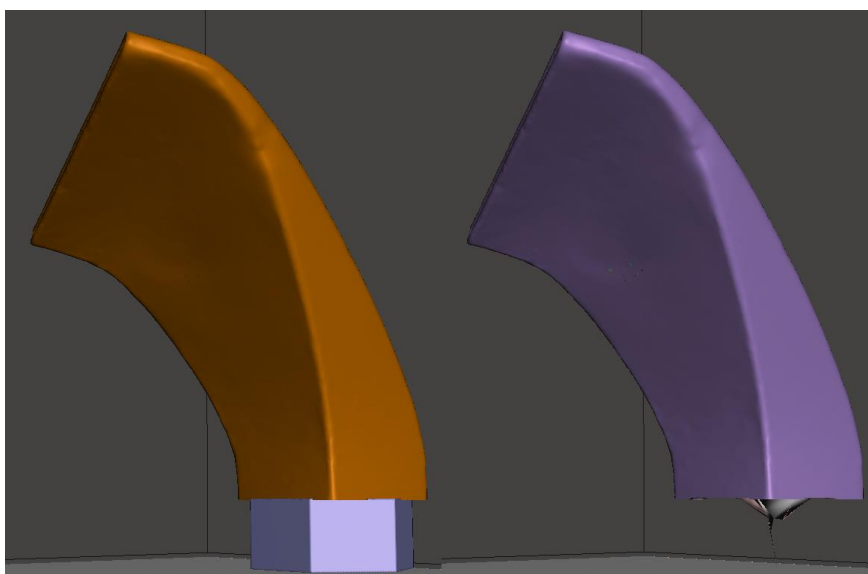
Obrázek 70: Import šestihranu a object browser

11.7 Spojení šestihranu s modelem trysky

Ke spojení dvou těles vedou v programu Meshmixer, stejně jako v předchozích programech, dvě cesty. První cestou je použití booleovské funkce z nástrojů edit zmíněné již v kapitole 13.5.1 Odstranění části modelu – Boolean. Druhou možností je funkce combine, která se též nachází v nástrojích edit. U obou metod je důležité nastavit obě tělesa tak, aby mezi tělesy vznikl průnik. Jestliže spolu spojovaná tělesa nemají průnik, tak výpočet booleovského spojení neproběhne a u funkce combine výrazně ztíží následné úpravy.

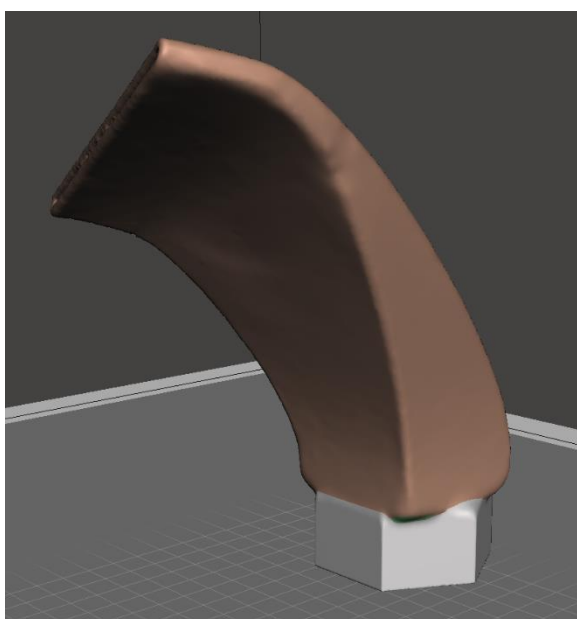
11.7.1 Spojení booleovskou funkcí

Před samotným spojováním obou těles bylo zapotřebí na obě tělesa použít funkci make solid z nástrojů edit, která udělá tělesa „jednotlivými“. Make solid například sjednotí automaticky generované opravy na tělese s modelem trysky a vytvoří jednotlivý model. Kdyby byl tento krok přeskočen, výpočet booleovské funkce by neproběhl nebo by proběhl chybně viz. obrázek 71.



Obrázek 71: Funkce boolean union bez použití funkce make solid

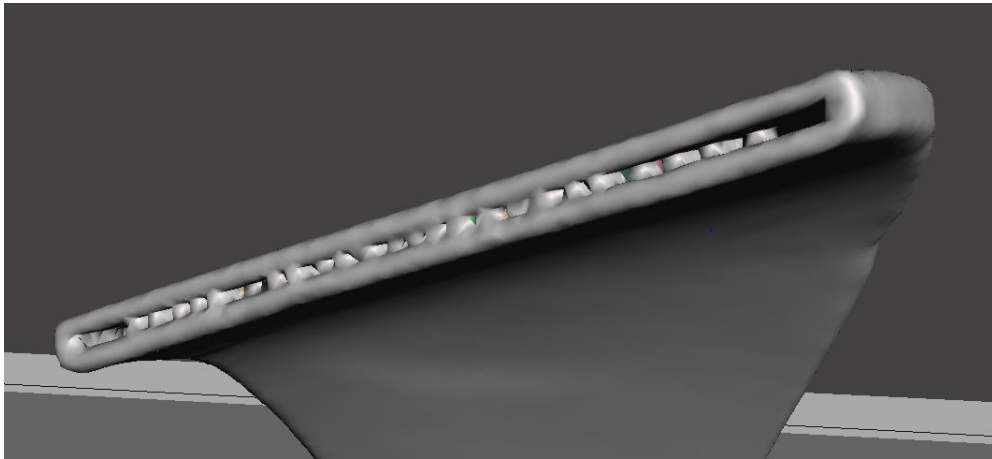
Výpočet proběhl správně až s použitím funkce make solid. Spojený model však obsahoval ostré a nevhledné hrany, které bylo potřeba odstranit. K vyhlazení přechodu mezi oběma tělesy byla použita funkce sculpt/robust smooth. Výsledné spojení a vyhlazení je zachyceno na obrázku 72.



Obrázek 72: Funkce boolean union s použitím funkce make solid

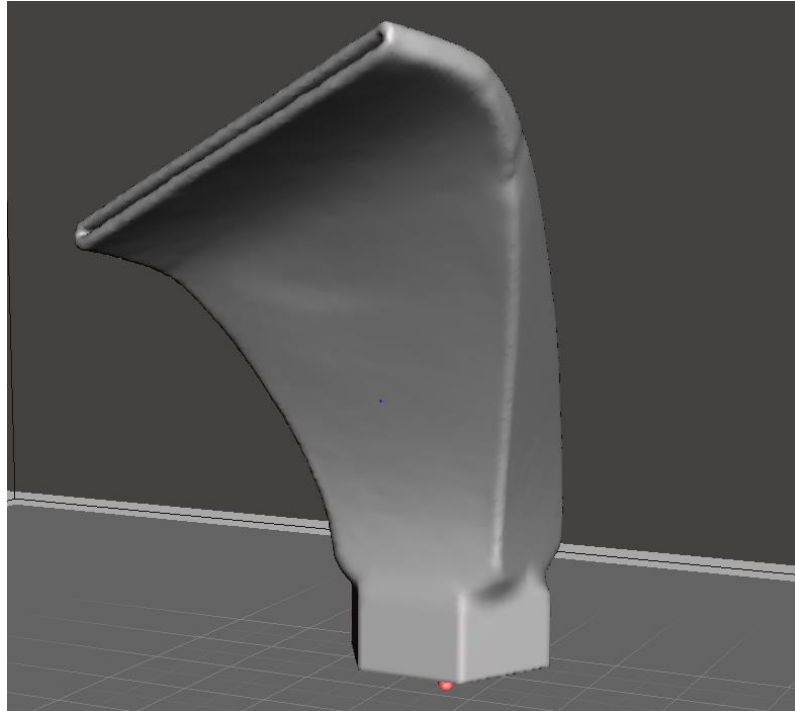
11.7.2 Spojení funkcí combine

Postup při spojování funkcí combine je velmi podobný postupu spojování booleovskou funkcí. Po správném nastavení obou částí bylo prvním krokem spojení těles funkcí edit/combine. Obě tělesa byla spojena za vzniku jednoho celku. Funkce make solid byla však použita až na spojené těleso. V případě většího počtu spojovaných částí by byla metoda combine zásadně rychlejší nežli metoda booleovská. Je však potřeba zmínit, že použitím funkce make solid se kvalita modelu zhoršuje. Je tedy nutné nastavit nejvyšší přesnost přetvoření tělesa v kolonce solid accuracy. V případě trysky měla nízká přesnost za následek spojování protilehlých stěn v úzké části trysky viz. obrázek 73.



Obrázek 73: Funkce make solid s nízkou přesností přetvoření

Poslední úpravou bylo odstranění ostrých přechodů spojovaných těles funkcí sculpt/robust smooth stejně jako v předchozí kapitole. Výsledný model je zachycen na obrázku 74.



Obrázek 74: Hotový spoj s použitím funkce combine

12 Výsledné porovnání

Programy byly porovnávány z hlediska několika zkoumaných parametrů zmiňovaných v jednotlivých kapitolách. Počínaje jejich dostupností přes přehlednost rozhraní po dostupné funkce programů. V několika následujících kapitolách bude uveden zkoumaný parametr a jeho následné vyhodnocení v jednotlivých programech.

12.1 Dostupnost

Blender – Bezplatný software dostupný na stránkách společnosti Blender.

Fusion 360 – Placený software dostupný v několika pracovních verzích od společnosti Autodesk. Dostupný v bezplatné studentské verzi.

Meshmixer – Bezplatný software dostupný na anglických stránkách společnosti Autodesk.

12.2 Pracovní rozhraní

Blender – Pracovní rozhraní programu blender může být pro začátečníky dost komplikované. Možnosti přepínání několika pracovních režimů střídající se s různými možnostmi zobrazení modelů působí na první pohled nepřehledně. Po delší práci v programu a zorientování se v možnostech zobrazení začíná být program intuitivní. K programu navíc existuje nespočet video návodů i návodů ve formě PDF, což výrazně urychluje začátečnickovi práci v programu.

Fusion 360 – Pracovní rozhraní programu Fusion 360 je velmi přehledné a pro uživatele s předchozí zkušeností v CAD systémech i velice intuitivní. Pracovní režimy jsou si funkcemi dost podobné, a tak je snadná práce i v režimu mesh, se kterým se nový uživatel dosud neseťkal. Na internetu jsou dostupné video návody v českém jazyce i s doplňujícím textem.

Meshmixer – Pracovní rozhraní v tomto programu je z porovnávaných programů nejjednodušší. Pracovní režimy jsou přehledné a nový uživatel se s jejich možnostmi rychle seznámí. Avšak jednoduchost a přehlednost programu má negativní vliv na celkové možnosti programu, které jsou ve srovnání s předchozími programy omezenější. K programu Meshmixer je návodů nejméně. Jedná se především o video návody v anglickém jazyce.

12.3 Možnosti importu a exportu dat

Z tabulek 1,3 a 5 se dá usoudit, že největší škálu souborů je možné importovat do programu Fusion 360. Fusion 360 je CAD/CAM program umožňující import CAD souborů. Z hlediska možnosti importu souborů plošných modelů poskytuje největší výběr program Blender, následuje Meshmixer a nejhůře je na tom Fusion 360.

To samé platí i v případě exportu dat (tabulky 2,4 a 6), kdy sice program Fusion 360 poskytuje nejvíce možností, ale tyto možnosti zahrnují i export CAD souborů. Z tohoto důvodu má opět nejširší výběr exportu program Blender, poté Meshmixer a nejmenší výběr poskytuje program Fusion 360.

Tabulka 1: Možnosti importu do programu Blender

Blender - import	
Soubor	Přípona
Collada Files	(* .dae)
Alembic Files	(* .abc)
Motion Capture Files	(* .bvh)
Scalable Vector Graphics Files	(* .svg)
Stanford Files	(* .ply)
STL Files	(* .stl)
FBX Files	(* .fbx)
glTF 2.0 Files	(* .glb * .gltf)
Wavefront Files	(* .obj)
X3D Extensible 3D Files	(* .x3d * .wrl)

Tabulka 2: Možnosti exportu z programu Blender

Blender - export	
Soubor	Přípona
Collada Files	(* .dae)
Alembic Files	(* .abc)
Universal Scene Description Files	(* .usd * .usdc * .usda)
Stanford Files	(* .ply)
STL Files	(* .stl)
FBX Files	(* .fbx)
glTF 2.0 Files	(* .glb * .gltf)
Wavefront Files	(* .obj)
X3D Extensible 3D Files	(* .x3d * .wrl)

Tabulka 3: Možnosti importu do programu Fusion 360

Fusion 360 - import	
Soubor	Přípona
Alias Files	(* .wire)
AutoCAD DWG Files	(* .dwg)
Autodesk Eagle Files	(* .sch * .brd * .lbr)
Autodesk Fusion 360 Archive Files	(* .f3d * .f3z * .fsch * .fbrd * .flbr * .f2t)
Autodesk Inventor Files	(* .iam * .ipt)
CATIA V5 Files	(* .CATProduct * .CATPart)
DXF Files	(* .dxf)
FBX Files	(* .fbx)
IGES Files	(* .ige * .iges * .igs)
NX Files	(* .prt)
Wavefront Files	(* .obj)
Parasolid Binary Files	(* .x_b)
Parasolid Text Files	(* .x_t)
Pro/ENGINEER and Creo Parametric Files	(* .asm * .prt*)
Pro/ENGINEER Granite Files	(* .g)
Pro/ENGINEER Neutral Files	(* .neu*)
Rhino Files	(* .3dm)
SAT/SMT Files	(* .sab * .sat * .smb * .smt)
SolidWorks Files	(* .prt * .asm * .sldprt * .sldasm)
SolidEdge Files	(* .par * .asm * .psm)
STEP Files	(* .ste * .step * .stp)
STL Files	(* .stl)
SketchUp Files	(* .skp)
123D Files	(* .123dx)

Tabulka 4: Možnosti exportu z programu Fusion 360

Fusion 360 - export	
Soubor	Přípona
3D Manufacturing Files	(* .3mf)
AutoCAD DWG Files	(* .dwg)
Autodesk Fusion 360 Archive Files	(* .f3d)
Autodesk Inventor Files	(* .ipt)
DXF Files	(* .dxf)
FBX Files	(* .fbx)
IGES Files	(* .iges *. igs)
Wavefront Files	(* .obj)
SAT/SMT Files	(* .sat *.smt)
STEP Files	(* .step *. stp)
STL Files	(* .stl)
SketchUp Files	(* .skp)
Universal Scene Description Files	(* .usdz)

Tabulka 5: Možnosti importu do programu Meshmixer

Meshmixer - import	
Soubor	Přípona
Wavefront Files	(* .obj)
Stanford Files	(* .ply)
STL Files	(* .stl)
Additive Manufacturing Files	(* .amf)
3D Manufacturing Files	(* .3mf)
Object Files	(* .off)
MIX files	(* .mix)

Tabulka 6: Možnosti exportu z programu Meshmixer

Meshmixer - export	
Soubor	Přípona
Wavefront Files	(* .obj)
Stanford Files	(* .ply)
STL Files	(* .stl)
Additive Manufacturing Files	(* .amf)
3D Manufacturing Files	(* .3mf)
Collada Files	(* .dae)
SMESH files	(* .smesh)
VRLM Files	(* .wrl)

12.4 Funkce a nástroje

Každý program má své specifické funkce a nástroje. V případě trysky byly používány takové funkce a nástroje, které měly v konečném výsledku stejný efekt. Jejich porovnání bylo rozděleno do několika podkapitol, aby bylo co nejvíce srozumitelné.

12.4.1 Pohyb v pracovním prostoru

Blender – Základní pohyb v pracovním prostoru zajišťuje pouze pohyb myši a kolečko myši (přiblížení – rotace kolečka, rotace v prostoru – přidržení kolečka a pohyb myši). Pohyb dále usnadňuje pohledová kostka v pravém horním rohu.

Fusion 360 – Základní pohyb v pracovním prostoru je možné nastavit podle několika předvoleb pohybů. Tyto předvolby jsou převzaté z programů Alias, Inventor, Solidworks, Tinkercad nebo Powermill. Tím je zajištěn příjemnější přechod mezi Fusionem a jiným programem. Orientaci v prostoru navíc usnadňuje přehledná pohledová kostka.

Meshmixer – Základní pohyb v pracovním prostoru zajišťuje pohyb myši, kolečko myši a její pravé tlačítko (přiblížení – rotace kolečka, stranový pohyb – přidržení kolečka a pohyb myši, rotace v prostoru – přidržení pravého tlačítka a pohyb myši). Orientaci v prostoru usnadňuje pohledová kostka, která je téměř identická s pohledovou kostkou programu Fusion 360.

12.4.2 Centrování součástí

Blender – Pohyb modelu je vztažen k počátku modelu. V některých situacích je potřeba posunout počátek modelu do jiného vhodnějšího místa. Pohyb vztažený na počátek modelu může být pro nové uživatele zprvu potíží, avšak po delší práci v programu a pro některé složitější aplikace je velkou výhodou.

Fusion 360 – Pohyb modelu je vztažen ke zvolenému bodu v blízkosti tělesa. Jedná se o období přemísťování počátku z programu Blender s tím rozdílem, že program Fusion nabízí pouze pár bodů v blízkosti tělesa a není kvůli tomu možné zvolit konkrétní místo na modelu nebo mimo model.

Meshmixer - Pohyb modelu je vztažen k jeho těžišti. Pro jednoduché aplikace je tento způsob pohybu naprosto dostačující.

12.4.3 Odstranění chyb

Blender – V programu chybí jednoduchá funkce, která by všechny kroky odstraňování provedla zároveň. Cesta k odstranění je tím složitější. Nejprve je nutné zadat programu úkol k označení děr nebo bodů mimo model. U děr je dalším krokem použití funkce fill a u bodů mimo plášť stisknutí klávesy delete. Použití funkce remesh nebylo v případě trysky vhodné. I po veškeré snaze model opravit, model stále obsahoval shluky bodů, které funkce remesh nedokázala správně přetvořit.

Fusion 360 – Program obsahuje funkce repair k odstraňování děr, sešívání částí modelů a k přestavbě modelu. Funkce remesh je i v programu Fusion 360 velice náchylná na chyby, ale plně jí zastoupí funkce rebuilt (přestavba), která chyby opraví a zároveň vytvoří novou síť modelu.

Meshmixer – Program vlastní, dle mého názoru, nejkvalitnější nástroj k odstraňování chyb. Nástroj se nazývá Inspektor. Různé druhy chyb mají svou vlastní barvu a je pouze na uživateli, aby vybral k opravě všechny chyby naráz nebo vybral pouze ty, které potřebuje. Program nedisponuje funkcí remesh, ale obsahuje funkci make solid, která vytváří podobný efekt.

12.4.4 Ostatní funkce programu

Blender – Program obsahuje desítky funkcí a nástrojů k úpravě plošných modelů. Od základních po pokročilejší ve všech režimech úprav, což program Blender řadí k programům pro náročnější uživatele. Funkce a nástroje fungují správně, ale v některých případech jsou hůře popsány a mohou působit složitě.

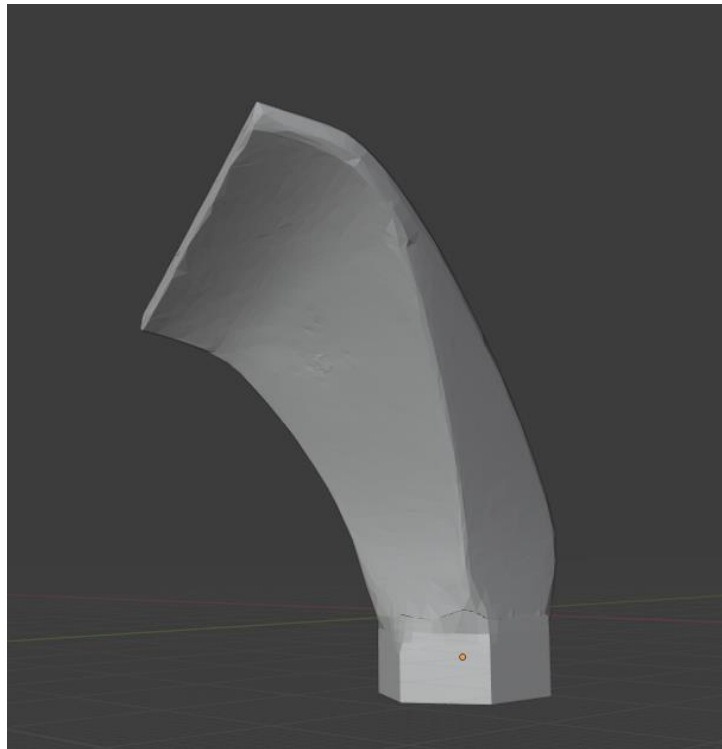
Fusion 360 – Vzhledem k možnosti práce jak s plošnými, tak s objemovými modely může program nabídnout širší spektrum úprav. Pro práci s plošnými modely nabízí pouze základnější funkce, které běžnému uživateli postačí. V některých případech funkce programu nefungovaly přesně, což může být následek stále probíhajícího vývoje programu.

Meshmixer – Jednoduchost a srozumitelnost pracovního prostředí umožní uživateli naplno pochopit vlastnosti jednotlivých funkcí. Takovýto prostor umožní tvorbu i složitějších úprav s menším spektrem funkcí a nástrojů dostupných například v prostředí Blenderu. Funkce a nástroje fungují správně, jsou přehledně popsány a srozumitelné.

12.5 Model trysky

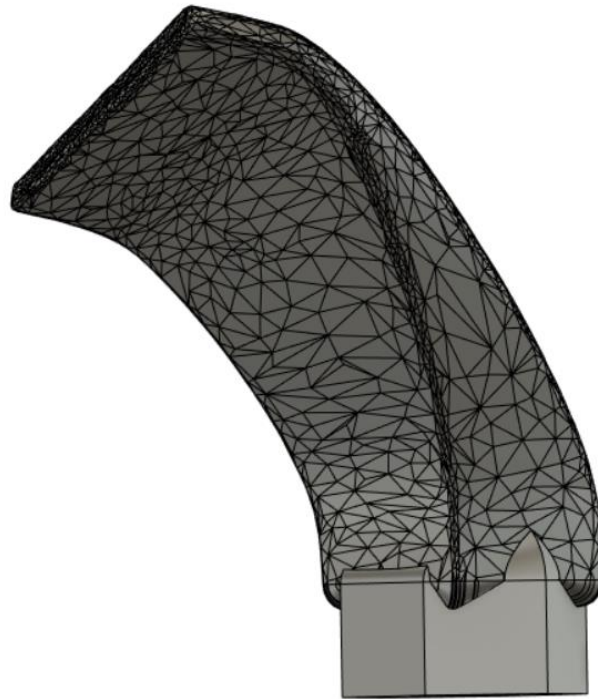
Z každého programu byl vybrán finální model trysky, který byl považován za nejpovedenější.

Blender:



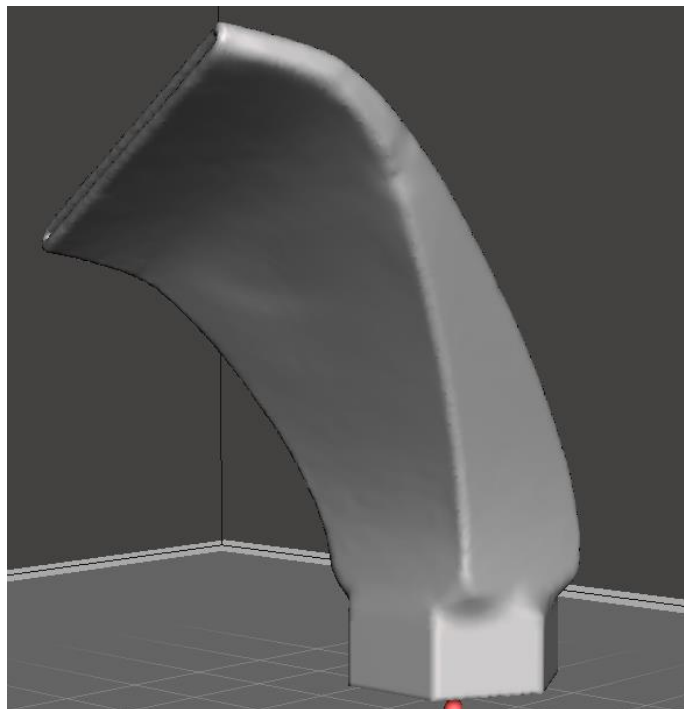
Obrázek 75: Finální model trysky (Blender)

Fusion 360:



Obrázek 76: Finální model trysky (Fusion 360)

Meshmixer:



Obrázek 77: Finální model trysky (Meshmixer)

12.6 Tabulka hodnocení

Pro lepší orientaci v hodnocení parametrů byla vytvořena tabulka. Hodnoceným parametrům byly přiděleny body 1-5 (1 – nejhorší, 5 – nejlepší) a jsou sečteny na konci tabulky. Jedná se o bodování na základě subjektivního dojmu autora ohledně práce s daným softwarem.

Tabulka 7: Hodnocení programů

Program	Blender	Fusion 360	Meshmixer
Dostupnost	5	3	5
Pracovní rozhraní	3	5	4
Možnosti importu a exportu	5	3	4
Pohyb v pracovním prostoru	2	5	4
Centrování součástí	5	4	4
Odstranění chyb	2	4	5
Ostatní funkce programu	5	3	4
Návody	5	4	3
Model trysky	4	3	5
Součet	36	34	38

13 Vyhodnocení praktické části

Z výsledků součtu přidělených bodů v tabulce 7 je možné dojít k závěru, že nejlepším programem k úpravě STL modelu je program Meshmixer. Na druhém místě se umístil program Blender a na posledním místě se umístil Fusion 360. Finální hodnocení může být pro různé potřeby úprav subjektivní. Před volbou programu je nutné si uvědomit, jaké funkce a nástroje budou k úpravám potřeba.

Program Blender byl ze tří hodnocených programů nejúspěšnější v oblastech možností importu a exportu, centrování součástí, ostatních funkcí a návodů.

Program Fusion 360 dostal nejvyšší hodnocení za pracovní rozhraní a za pohyb v pracovním prostoru.

Program Meshmixer byl nejúspěšnější ve zbylých parametrech hodnocení, mezi které patří odstranění chyb a finální model trysky.

V oblastech dostupnosti obdržely programy Blender a Meshmixer stejné hodnocení z důvodu bezplatného stažení a instalace.

14 Závěr

Rešeršní část diplomové práce měla za úkol obecně představit pojem reverzního inženýrství. Následoval rozbor procesu reverzního inženýrství, mezi jehož hlavní části patří získávání rozměrových a tvarových dat, zpracování nasnímaných dat, práce s STL modelem a tvorba CAD modelu z naskenovaných dat. Poslední kapitola byla věnována konstrukční optimalizaci a optimalizaci ergonomie.

Praktická část diplomové práce měla za úkol upravit naskenovaný model trysky získaný pomocí průmyslového tomografu Carl Zeiss Metrotom. Jednalo se o úpravu tvaru spodní části trysky z důvodu snazší instalace do prostor brusky na ozubení.

Pro praktickou část byly zvoleny programy Blender, Fusion 360 a Meshmixer, ve kterých bylo dosaženo výměny původní čtyřhranné části se závitem za šestihrannou s dírou pro závit M12. Celý postup úprav byl detailně popsán v jednotlivých kapitolách a v závěru praktické části byla vytvořena tabulka s porovnáním programů.

Z výsledků hodnocení plyne, že pro úpravu trysky byl nejvhodnější program Meshmixer. Program Blender se umístil na druhém místě a poslední byl program Fusion 360. Při volbě programu je velmi důležité, k jakým účelům bude program využíván. Pro náročnější úpravy s možností velmi detailních úprav je nejvhodnější program Blender. Transformaci plošného modelu do modelu objemového umožňuje program Fusion 360, a proto je vhodný pro následné CAD/CAM aplikace. Pokud dostačuje rychlá a snadná úprava STL modelu, tak nejideálnější cestu nabízí program Meshmixer.

Seznam použitých zdrojů

- [1] Reverse engineering. *3Dlaboratory* [online]. Brno [cit. 2021-02-04]. Dostupné z: <http://3dlaboratory.cz/reverse-engineering/>
- [2] BERÁNEK, Libor a Jan Šimota. *Revers engineering, technologie měření (digitalizace) využitelné jako zdroj dat pro 3D tisk, rapid prototyping* [online prezentace]. Moodle, ČVUT, Ústřední knihovna. 73 snímků. [cit. 2021-02-04]. Dostupné z: https://moodle-vyuka.cvut.cz/pluginfile.php/368338/mod_resource/content/0/AAT%202020%20-%206.%20p%C5%99en%C3%A1%C5%A1ka%20-%20Reverzn%C3%AD%20in%C5%BEen%C3%BDrstv%C3%AD%20-%20zdroj%20dat%20pro%203D%20tisk.pdf
- [3] Reverzní inženýrství. *Academia* [online]. 2018 [cit. 2021-02-04]. Dostupné z: https://www.3d-skenovani.cz/wp-content/uploads/2020/01/ACADEMIA_ReverseEngineering_ukazka.pdf
- [4] Copying with a straight face. *Thaivisa* [online]. 2018 [cit. 2021-02-04]. Dostupné z: <https://forum.thaivisa.com/topic/1045866-copying-with-a-straight-face/page/3/>
- [5] PREČAN, Filip. *Aplikace reverse engineeringu na součást sportovního vybavení* [online]. Praha, 2018 [cit. 2021-02-04]. Dostupné 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 v Praze. Vedoucí práce Ing. Jan Tomíček, Ph.D.
- [6] RAJA, Vinesh a Kiran J. FERNANDES. *Reverse engineering: An Industrial Perspective* [online]. Londýn: Springer, 2008 [cit. 2021-03-02]. ISBN 978-1-84628-855-5. Dostupné z: https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=1_KFIdjML8wC&oi=fnd&pg=PR17&dq=reverse+engineering&ots=rYfcdjFlz5&sig=u25ptX1Gbth8vjOLvsMCWzUBa-w&redir_esc=y#v=onepage&q=reverse%20engineering&f=false

- [7] Dotykové, nebo bezdotykové měření struktury povrchu? *MM Průmyslové Spektrum* [online]. 2005, **2005**(6) [cit. 2021-03-08]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/dotykovne-nebo-bezdotykovne-mereni-struktury-povrchu>
- [8] SKOUPÝ, Pavel. *3D OPTICKÉ MĚŘÍCÍ A SKENOVACÍ SYSTÉMY PRO STROJÍRENSTVÍ* [online]. Brno, 2007 [cit. 2021-03-08]. Dostupné z: http://www.ustavkonstruovani.cz/FileDownload/getFile/118/Bakalarska_prace_Skoupy_Pavel.pdf/. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. David Paloušek.
- [9] ŠIMONÍK, Martin. Digitalizace - její princip a rozdělení. *MM Průmyslové Spektrum* [online]. 2004, **2004**(6) [cit. 2021-03-10]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/digitalizace-jeji-princip-a-rozdeleni>
- [10] Měřicí rameno Romer absolute arm. *Strojírna TYC* [online]. 2016 [cit. 2021-03-25]. Dostupné z: <https://www.strojirna-tyc.cz/merici-rameno-romer-absolute-arm/>
- [11] Průvodce 3D skenery: jaké jsou jejich výhody a nevýhody? *Toner partner* [online]. [cit. 2021-03-25]. Dostupné z: <https://www.tonerpartner.cz/clanky/pruvodce-3d-skenery-jake-jsou-jejich-vyhody-a-nevyhody-25287cz39332/>
- [12] DeskTom. *3D scan* [online]. [cit. 2021-03-25]. Dostupné z: <https://www.3d-skenovani.cz/skenery/ukoncene-produkty/1519-2/>
- [13] Mechanické 3D skenery. *Yumpu* [online]. 2016 [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: <https://www.yumpu.com/xx/document/view/49333572/1-mechanicke-3d-skenery>
- [14] Výstupní data. *3D Scan* [online]. [cit. 2021-03-31]. Dostupné z: <https://www.3d-skenovani.cz/3d-skenovani/vystupni-data/>
- [15] ZUZA, Mikolas. Jak opravit chyby v 3D modelech pro tisk. *Josef Průša* [online]. 2018 [cit. 2021-04-01]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/jak-opravit-chyby-v-3d-modelech-pro-tisk/>
- [16] Zpracování dat. *3D Scan* [online]. [cit. 2021-04-02]. Dostupné z: <https://www.3d-skenovani.cz/3d-skenovani/zpracovani-dat/>

- [17] SLANINA, Jan. Reverse engineering: Převod bodů a sítí na plochy. *Dimensio* [online]. [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: <https://dimensio.cz/reverse-engineering>
- [18] Geometrie pro výpočetní návrh: Plochy. *Dynamo* [online]. [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: https://primer.dynamobim.org/cs/05_Geometry-for-Computational-Design/5-5_surfaces.html
- [19] Křivky a plochy technické praxe. *Mathonline* [online]. [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: <http://mathonline.fme.vutbr.cz/pg/flash/TeorieGrafika/pocGrafika7.pdf>
- [20] LÁVIČKA, Miroslav, Bohumír BASTL a František JEŽEK. *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie: Geometrické modelování – od historie k současnosti a budoucnosti* [online]. Plzeň: Jednota českých matematiků a fyziků, 2013 [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: https://dml.cz/bitstream/handle/10338.dmlcz/143374/PokrokyMFA_58-2013-2_1.pdf
- [21] Geomagic Design X. *3D Scan* [online]. [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: <https://www.3d-skenovani.cz/software/reverzni-inzenyrstvi/geomagic-design-x/>
- [22] VXmodel. *3D Scan* [online]. [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: <https://www.3d-skenovani.cz/software/reverzni-inzenyrstvi/vxmodel/>
- [23] Geomagic for SolidWorks. *3D Scan* [online]. [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: <https://www.3d-skenovani.cz/software/reverzni-inzenyrstvi/solidworks-geomagic-for-solidworks/>
- [24] Scan to 3D. *3D Scan* [online]. [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: <https://www.3d-skenovani.cz/software/reverzni-inzenyrstvi/solidworks-modul-scan-to-3d/>
- [25] MAREŠ, Tomáš. *Základy Konstrukční Optimalizace* [online]. Praha, 2006 [cit. 2021-6-16]. Dostupné z: <http://users.fs.cvut.cz/tomas.mares/z/z/ZakladyKonstrukcniOptimalizace/zko.pdf>
- [26] ZDRÁHAL, Milan. *Konstrukční optimalizace rámu lisovacího stroje* [online]. Zlín, 2017 [cit. 2021-6-16]. Dostupné z: https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/42391/zdr%C3%A1hal_2018_dp.pdf?isAllowed=y&sequence=1. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Doc. Ing. Oldřich Šuba, CSc.

- [27] Optimalizace topologie v 3D tisku. *3D FOX* [online]. Liberec, 2020 [cit. 2021-6-16]. Dostupné z: <https://foxclub.cz/optimalizace-topologie-v-3d-tisku/>
- [28] Shape optimization for fixed Wing UAV. *NEURAL CONCEPT* [online]. Lausanne [cit. 2021-6-16]. Dostupné z: <https://neuralconcept.com/neural-concept-case-studies-3d-deep-learning-software/ncs-shape-optimization-for-fixed-wing-uav/>
- [29] CHUNDELA, Lubor. *Ergonomie*. Praha: ČVUT, 2001.
- [30] Fusion 360. *ADEON* [online]. Adeon CZ, c2012-2019 [cit. 2021-7-4]. Dostupné z: <https://www.inventor3dblog.cz/category/fusion-360/>
- [31] Co je to ergonomie. *BOZP info* [online]. Praha, 2004 [cit. 2021-6-17]. Dostupné z: <https://www.bozpinfo.cz/co-je-ergonomie>

Seznam obrázků

Obrázek 1: B-29 a Tu-4	13
Obrázek 2: Srovnání běžného výrobního procesu s reverzním inženýrstvím [13].....	16
Obrázek 3: rozdělení 3D skenerů [8]	17
Obrázek 4: Destruktivní skener RE 1000 [13].....	18
Obrázek 5: Dotykový skener [6].....	19
Obrázek 6: Bezdotykový skener (Optický) [6].....	19
Obrázek 7: Mobilní skener (měřící rameno Romer absolute arm) [10]	20
Obrázek 8: laserový skener [11]	21
Obrázek 9: Rentgenový skener [12]	22
Obrázek 10: Ultrazvukový skener Freepoint [13]	22
Obrázek 11: Porovnání výstupních formátu (vlevo mrak bodů, vpravo STL)	24
Obrázek 12: Převodění polygonové sítě na NURBS plochy [17].....	26
Obrázek 13: Řídící síť a NURBS plocha [19]	27
Obrázek 14: Převod naskenovaných dat do CAD formátu [16]	28
Obrázek 15: Optimalizace topologie [27].....	29
Obrázek 16: Tvarová optimalizace [28]	30
Obrázek 17: Rozměrová optimalizace	30
Obrázek 18: Vytvoření základního objektu	33
Obrázek 19: "Válec" vytvořený pomocí čtyř bodů základny	34
Obrázek 20: Edit mode	35
Obrázek 21: Import STL dat	36
Obrázek 22: Centrování	37
Obrázek 23: Propojení vnitřních stran trysky po přetvoření mřížky	38
Obrázek 24: Chyby vzniklé při přetvoření odstříhnuté části trysky	39
Obrázek 25: Odstranění chyb pomocí metod ručních úprav	40
Obrázek 26: Vytvoření a umístění pomocné krychle	41
Obrázek 27: Oddělení pomocné krychle od modelu trysky	42
Obrázek 28: Použití funkce bisect	43
Obrázek 29: Vytvoření plochy v místě řezu (Bisect)	43
Obrázek 30: Šestihran vymodelovaný v programu Solidworks 2017	44
Obrázek 31: Šestihran vymodelovaný v programu Blender	45

Obrázek 32: Tvorba otvoru pro závit M12	46
Obrázek 33: Použití funkce subdivide	47
Obrázek 34: Síť hran.....	47
Obrázek 35: Vyplnění sítě použitím funkce fill.....	48
Obrázek 36: Funkce merge (zleva at first, at last, at center)	48
Obrázek 37: Hotový spoj pomocí funkce merge at center.....	49
Obrázek 38: Vsunutí šestihranu do těla trysky	50
Obrázek 39: Hotový spoj pomocí funkce boolean/union	50
Obrázek 40: Finální spojení metodou booleovské funkce.....	51
Obrázek 41: Pracovní rozhraní programu Fusion 360.....	52
Obrázek 42: Preferences	53
Obrázek 43: Pracovní prostředí	54
Obrázek 44: Insert mesh	55
Obrázek 45: Nahraný model v prostředí Fusion 360	55
Obrázek 46: Centrování modelu v programu Fusion 360.....	56
Obrázek 47: Funkce remesh	57
Obrázek 48: Funkce make closed mesh.....	57
Obrázek 49: Nástroj plane cut	59
Obrázek 50: Nástroj reduce	60
Obrázek 51: Chybové hlášení o nedokončené parametrizaci	60
Obrázek 52: Odstranění spodní části trysky funkcí extrude	61
Obrázek 53: Značení tělesa po bezchybné parametrizaci	61
Obrázek 54: surface nástroj extrude	62
Obrázek 55: Surface nástroj patch	63
Obrázek 56: Postup tvorby podstav: tessellate-repair-combine/cut	63
Obrázek 57: Tvorba mezery mezi šestihranem a tryskou pro použití funkce loft.....	64
Obrázek 58: Spojení dvou profilů pomocí funkce loft	65
Obrázek 59: Solid nástroj extrude	65
Obrázek 60: Funkce revolve a finální spojení tryska-šestihran	66
Obrázek 61: Pracovní rozhraní programu Meshmixer	67
Obrázek 62: Úvodní nabídka programu Meshmixer	68
Obrázek 63: Importovaný model trysky	69
Obrázek 64: Centrování modelu v programu Meshmixer	70
Obrázek 65: Odstranění chyb pomocí funkce inspector	71

Obrázek 66: Funkce remesh	71
Obrázek 67: Funkce robust smooth	72
Obrázek 68: Funkce boolean difference	73
Obrázek 69: Funkce plane cut	74
Obrázek 70: Import šestihranu a object browser	75
Obrázek 71: Funkce boolean union bez použití funkce make solid	76
Obrázek 72: Funkce boolean union s použitím funkce make solid	76
Obrázek 73: Funkce make solid s nízkou přesností přetvoření	77
Obrázek 74: Hotový spoj s použitím funkce combine.....	78
Obrázek 75: Finální model trysky (Blender)	84
Obrázek 76: Finální model trysky (Fusion 360).....	85
Obrázek 77: Finální model trysky (Meshmixer).....	85

Seznam tabulek

Tabulka 1: Možnosti importu do programu Blender	80
Tabulka 2: Možnosti exportu z programu Blender	80
Tabulka 3: Možnosti importu do programu Fusion 360	80
Tabulka 4: Možnosti exportu z programu Fusion 360.....	81
Tabulka 5: Možnosti importu do programu Meshmixer.....	81
Tabulka 6: Možnosti exportu z programu Meshmixer	81
Tabulka 7: Hodnocení programů	86