

Zpracování 3D skenovaných dat pro obrábění dílů

Bc. David Škrobák

Diplomová práce
2025



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. David Škrobák
Osobní číslo:	T23310
Studijní program:	N0788A270002 Výrobní inženýrství
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Zpracování 3D skenovaných dat pro obrábění dílů

Zásady pro vypracování

- Vypracujte literární studii na dané téma
- Proveďte volbu programu pro práci s daty
- Proveďte skenování a zpracování dat
- Připravte data pro obrábění

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

SEDLÁK, Josef. *Technologie výroby prototypů s podporou reverzního inženýrství a CAD/CAM*. Vědecké spisy Vysokého učení technického v Brně. PhD Thesis. [V Brně: Vysoké učení technické], c2008. ISBN 978-80-214-3689-3. SLOTA, Ján; MANTIČ, Martin a GAJDOŠ, Ivan. *Rapid Prototyping a Reverse Engineering v strojárstve*. Edícia študijnej literatúry. Košice: Strojnícka fakulta, Technická univerzita v Košiciach, 2010. ISBN 978-80-553-0548-6. ŠTRONER, Martin. *Možnosti zvyšování přesnosti 3D skenování*. Profesorské přednášky. V Praze: České vysoké učení technické, 2016. ISBN 978-80-01-05906-7. CONFALONE, Gary C.; SMITH, John a KINNARE, Thomas. *3D Scanning for Advanced Manufacturing, Design, and Construction*. John Wiley & Sons, 2023. ISBN 9781119758518.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Martin Řezníček, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2025**
Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2025**

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

doc. Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 3. února 2025

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

- odevzdáním diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění bez ohledu na výsledek obhajoby;
- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a bude dostupná k nahlédnutí;
- jedno vyhotovení diplomové práce v listinné podobě bude ponecháno Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně k uložení;
- na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou práci – nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá; neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji, že

- jsem na diplomové práci pracoval(a) samostatně a použitou literaturu jsem řádně citoval(a); v případě publikace výsledků budu uveden(a) jako spoluautor;
- odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne

.....
podpis autora

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá reverzním inženýrstvím zvolené strojní součásti, především pak zpracováním digitalizovaných dat. Práce je složena ze dvou hlavních částí, teoretické a praktické části. Teoretická část je zaměřena především na reverzní inženýrství a zpracování digitalizovaných dat. Zahrnuje popis skenovacích zařízení, technologie skenování společně se zpracováním dat a popis hlavního formátu nasnímaných dat – STL. Praktická část zahrnuje popis snímané součástky, dále proces skenování dané součásti, následně zpracování naskenovaných dat, parametrickou tvorbu funkčních ploch a v neposlední řadě tvorbu technologického modelu pro obrábění. Cílem této práce je tedy aplikovat metody reverzního inženýrství na zvolenou součást, což zahrnuje skenování součásti, zpracování nasnímaných dat a tvorbu modelu vhodného k obrábění.

Klíčová slova: Reverzní inženýrství, 3D skenování, digitalizace, technologický model, práce s STL soubory

ABSTRACT

This diploma thesis focuses on reverse engineering of a selected mechanical component, with particular emphasis on the processing of digitized data. The thesis is divided into two main parts, a theoretical part and a practical part. The theoretical part is primarily focused on reverse engineering and the processing of digitized data. It includes a description of scanning devices, scanning technologies, data processing, and an overview of the main format of scanned data – STL. The practical part includes a description of the scanned component, the scanning process of the given part, subsequent processing of the scanned data, parametric creation of functional surfaces, and finally the creation of a technological model for machining. This thesis aims to apply reverse engineering methods to the selected component, which includes scanning the part, processing the acquired data, and creating a model suitable for machining.

Keywords: Reverse engineering, 3D scanning, digitization, technological model, working with STL files

Tímto bych chtěl poděkovat všem, kteří se podíleli na vzniku této diplomové práce.

Na prvním místě bych chtěl poděkovat své rodině za veškerou podporu, která mi byla poskytnuta po dobu tvorby této práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Pavlu Stokláskovi, Ph.D., který poskytl k dispozici 3D skenovací zařízení, sdílel se mnou spoustu cenných informací ohledně 3D skenování a také za nápomocnost při samotném snímání součástí. Poděkování taktéž náleží Bc. Terezii Martinátové, která provedla pravopisnou korekturu této práce. Především bych pak chtěl poděkovat mému vedoucímu Ing. Martinu Řezníčkovi, Ph.D. za jeho čas, cenné rady, vedení, poskytnuté materiály a aktivní komunikaci během tvorby této diplomové práce.

OBSAH

ÚVOD.....	13
I TEORETICKÁ ČÁST	14
1 REVERZNÍ INŽENÝRSTVÍ.....	15
1.1 DEFINICE	15
1.2 PRAKTICKÉ VYUŽITÍ	16
2 KONTAKTNÍ 3D SKENERY	18
2.1 METODIKA DIGITALIZACE	18
2.2 TYPY KONTAKTNÍCH SKENERŮ	19
2.2.1 Souřadnicový měřicí systém (CMM).....	19
2.2.2 Mechanické rameno	22
2.2.3 Destruktivní skenovací systém.....	23
2.3 VÝHODY / NEVÝHODY KONTAKTNÍCH 3D SKENERŮ	24
3 BEZKONTAKTNÍ 3D SKENERY	25
3.1 METODIKA DIGITALIZACE	25
3.1.1 Triangulace.....	25
3.1.2 Optická interferometrie	29
3.1.3 Doba letu světla.....	29
3.2 TYPY BEZKONTAKTNÍCH SKENERŮ	30
3.2.1 Optické	30
3.2.2 Laserové	31
3.2.3 Elektromagnetické.....	32
3.2.4 Ultrazvukové	33
3.3 VÝHODY / NEVÝHODY BEZKONTAKTNÍCH 3D SKENERŮ	33
4 TECHNOLOGIE 3D SKENOVÁNÍ A PRÁCE S DATY	35
4.1 PROCES REKONSTRUKCE	35
4.1.1 Získávání dat	35
4.1.2 Příprava objektu na skenování	36
4.1.3 Fyzické skenování objektu.....	37
4.2 ZPRACOVÁNÍ DAT.....	37
4.2.1 Práce s body	37
4.2.2 Práce s polygonní sítí	37
4.2.3 Práce s křivkami	38
4.2.4 Práce s NURBS plochami	38
4.3 MRAČNO BODŮ	38
4.3.1 Hustota bodového mračna.....	39
4.3.2 Optimalizace bodového mračna	39
4.4 POLYGONNÍ SÍŤ	40

4.4.1	Optimalizace polygonní sítě	41
4.4.2	Úpravy a opravy sítě	42
5	STL SOUBORY	45
5.1	DEFINICE	45
5.1.1	Princip	45
5.1.2	Parametry	46
5.1.3	Tvorba	46
5.2	PROBLÉMY STL SOUBORŮ	46
5.3	VYUŽITÍ	47
5.3.1	Částečné využití	47
5.3.2	Přímé využití	47
II	PRAKTICKÁ ČÁST	48
6	CÍLE PRÁCE	49
7	ZPRACOVÁVANÁ SOUČÁST	50
8	PROCES SKENOVÁNÍ	51
8.1	3D SKENOVACÍ ZAŘÍZENÍ	51
8.2	PROCES	52
8.2.1	Příprava součásti	52
8.2.2	Skenování součásti	52
8.2.3	Základní úprava naskenovaných dat před zpracováním	54
9	ZPRACOVÁNÍ NASKENOVANÝCH DAT	55
9.1	VOLBA SOFTWARE PRO ZPRACOVÁNÍ NASKENOVANÝCH DAT	55
9.2	POLYGONNÍ MODEL NASKENOVANÝCH DAT	56
9.3	OPRAVENÝ POLYGONNÍHO MODEL	56
9.3.1	Oprava vad skenování	56
9.3.2	Oprava vad součásti	66
9.3.3	Porovnání před a po úpravách	77
9.4	TECHNOLOGICKÝ POLYGONNÍ MODEL ODLITKU	78
9.4.1	Odstranění obráběných povrchů	78
9.4.2	Odstranění nadbytečných součástí	79
9.4.3	Tvorba přídavků na obrábění	80
9.4.4	Optimalizace polygonní sítě	82
9.4.5	Porovnání před a po úpravách	86
9.5	MODEL VE FORMÁTU STEP	87
9.5.1	Tvorba popisujících křivek	87
9.5.2	Tvorba NURBS ploch	88
9.5.3	Optimalizace NURBS ploch	88
9.5.4	Export STEP modelu	89
10	TVORBA FUNKČNÍCH PLOCH	90
10.1	TVORBA ROVINNÝCH PLOCH	90

10.2	TVORBA OTVORŮ	91
11	TVORBA TECHNOLOGICKÉHO MODELU	92
	ZÁVĚR	94
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	96
	SEZNAM OBRÁZKŮ	101
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	104

ÚVOD

Reverzní inženýrství je dnes již celkem rozsáhlým oborem, který je hojně využíván především v průmyslovém odvětví. Lze se s ním však setkat také mimo tento průmysl, například ve zdravotnictví, filmovém průmyslu či jiných neprůmyslových odvětvích. Název tohoto oboru vypovídá o tom, že se bude jednat o jakési opačné inženýrství – zpětné, kdy pomocí reverzních metod, lze převést reálný objekt do digitální podoby, nejčastěji 3D modelu a to ať už se jedná o objekty velkých rozměrů (např. budovy) nebo miniaturních objektů – v řádu milimetrů. Postup je tedy opačný jak u inženýrství klasického. Pro převod do digitální podoby slouží 3D skenovací zařízení, které jsou neodlučitelnou součástí tohoto oboru. Pomocí těchto skenerů lze nasnímat v podstatě cokoli, nezáleží na původu snímaného objektu. Může se jednat jak o objekt organický (např. lidské tělo), tak neorganický. V dnešní době se reverzní inženýrství v průmyslu používá především pro kontrolu dílců, kdy tento proces je velice rychlý a lze díky němu měřit plochy jinými způsoby neměřitelnými (např. klasickými měřidly). Další využití nachází tento obor v renovaci starých objektů, či dílců. Na starých výrobcích se často podepisuje zub času. Výrobky často jeví známky opotřebení používáním či působením vnějších povětrnostních podmínek a tím pádem je nelze dále využívat. U některých se lze dokonce setkat s neprofesionální opravou. Spoustu starších výrobků vzniklo ještě dřív, než byly 3D softwary, čili k nim existuje jen výkres bez digitální podoby. V dnešní době, je pro výrobu 3D model stěžejní, a proto je tento model výsledkem reverzního inženýrství. Častými renovacemi jsou renovace automobilů, motocyklů a jiných starších strojů. Součástky na takovéto stroje se již shání komplikovaně, a proto je potřeba nové výroby. Procesy reverzního inženýrství jsou mnohdy náročné. Nasnímaná data se následně musí zpracovat, což je časově mnohonásobně náročnější než samotný proces snímání součástky. Časová náročnost zpracování roste s počtem vad na dílci, kdy krom těchto vad se opravují i vady způsobené samotným snímáním.

Cílem této práce je aplikovat kroky reverzního inženýrství na levou polovinu skříně motocyklu Jawa. To zahrnuje nasnímaní dílce, následné zpracování dat ve vhodně zvoleném softwaru do podoby technologického modelu odlitku, který se převede na 3D model. Skenováním vznikají obecné plochy, které jsou na obrábění obtížné, proto je nutné, z důvodu zvýšení efektivity, tyto plochy lépe matematicky popsat – parametricky, čímž se výrazně zvýší efektivita obrábění a možnosti jeho programování. Přístup je volen takový, aby byly dodrženy všechny zásady reverzního inženýrství a pro výrobu výrobní tolerance.

I TEORETICKÁ ČÁST

1 REVERZNÍ INŽENÝRSTVÍ

Pole působení inženýrství je rozsáhlé. Zahrnuje procesy nutné ke konstrukci, výrobě, montáži, servisu různých výrobků a složitějších systémů. Reverzní inženýrství, dále již jen RE (z anglické zkratky Reverse Engineering), do této sekce spadá také. Jedná se o celkem mladý obor, který se začal v literatuře objevovat asi dvacet let zpět. V dnešní době se dá s termínem RE setkat velmi běžně, a to v oborech jak inženýrských, tak neinženýrských. Ať už se jedná o jakoukoliv oblast, RE lze popsat jako proces analýzy určitého procesu za účelem těchto dvou cílů:

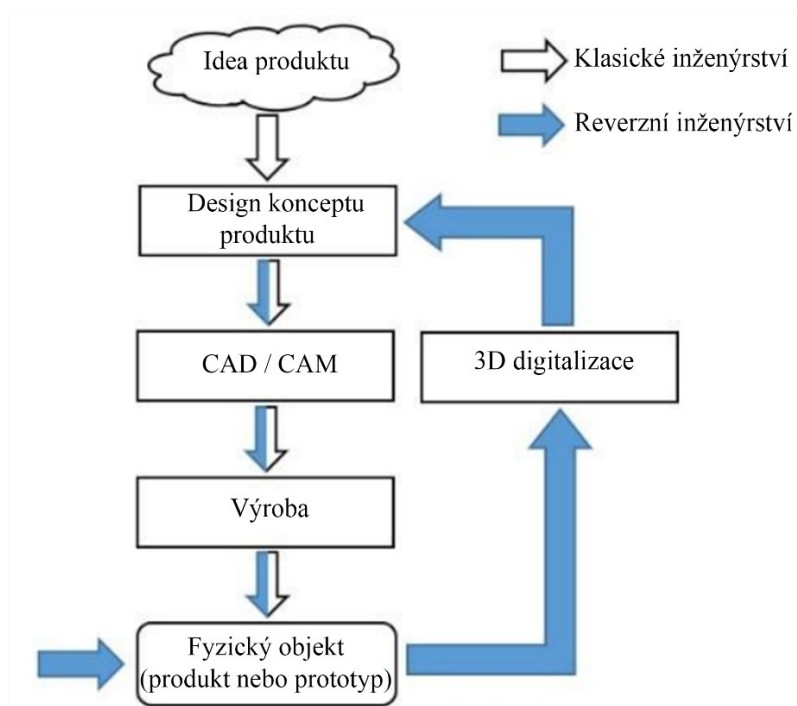
- Identifikovat součásti celku a jejich vzájemné vazby a vztahy
- Vyobrazit celky v jiné podobě nebo na vyšší úrovni abstrakce [1, 2, 3, 4]

1.1 Definice

RE, v nejobecnějším slova smyslu, zahrnuje postupy, za účelem zjištění funkce produktu, popřípadě zjišťuje, jaké technologie či myšlenky předcházely vytvoření původního produktu.

Ve spojitosti se strojním inženýrstvím by se dala předchozí definice více konkretizovat. RE ve strojírenství lze chápat jako proces reprodukce již vyrobeného produktu, buď dílu nebo i sestavy bez jakékoliv technické dokumentace či 3D dat. V širším pojetí lze RE vnímat jako systémový přístup pro určitou analýzu existujícího produktu nebo procesu, a použít pak tyto znalosti například jako jeden z prvních kroků při redesignování produktu. Hlavním cílem je tedy analyzovat principy, na kterých zařízení funguje. V této spojitosti lze pak RE použít pro analýzu fungování daného zařízení, a poté provést zlepšení funkce tohoto prvku.

Pokud je RE porovnáno s klasickým inženýrstvím, lze pozorovat následující (*Obrázek 1*). U klasického inženýrského přístupu je potřeba nejprve definovat myšlenku (určitou abstrakci), následně za pomoci koncepčního a následného CAD modelování vytvořit 3D numerická data a ty využít pro výrobu reálného produktu. RE oproti klasickému inženýrství začíná od fyzického produktu, který je pak pomocí technologie skenování převeden na numerická data. Poté se pak data mohou upravit tak, aby byl výrobek nějak vylepšen či upraven. Následně z těchto dat může být produkt vyroben. [1, 2, 5, 6]

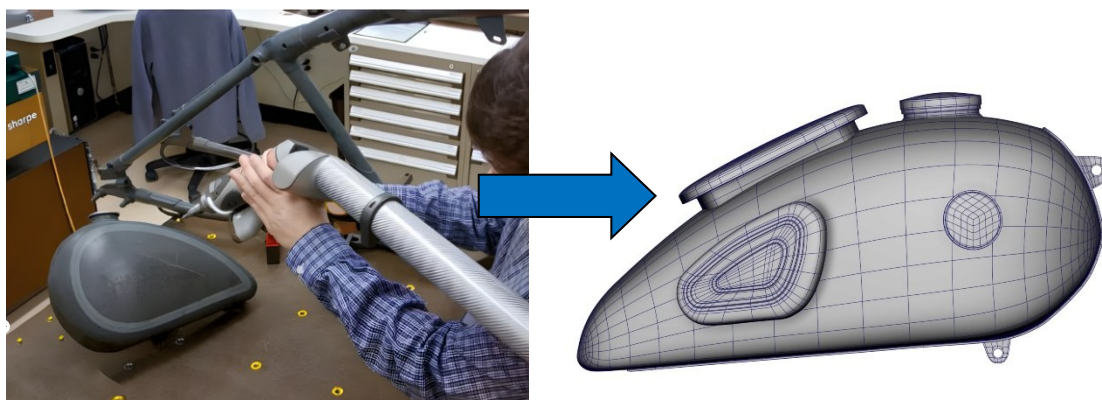


Obrázek 1 Rozdíl postupů mezi klasickým a reverzním inženýrstvím

(zdroj: [1])

1.2 Praktické využití

Prvotní myšlenka ve strojírenském RE vycházela z aplikace tzv. kopírování reálného dílce (Obrázek 2), či funkčního celku, ke kterému nebyly žádné podklady, ať už ve formě 3D dat či výkresové dokumentace. Tato myšlenka úzce souvisí s výrobou náhradních dílů, které již například nelze sehnat. Především pak dílů na veterány, ty jsou sehnatelné velmi problematicky. Prvotní myšlenka samozřejmě zahrnuje i již dříve zmiňovaný redesign výrobků. [1, 2, 7]



Obrázek 2 Prvotní myšlenka RE (příklad RE pro nádrž motocyklu)

(zdroj: [8])

Dnešní designové trendy vynikají čím dál tím více složitými tvary výrobků a jejich geometrie nabývá obecnějších tvarů. Tento fakt začíná dosti komplikovat tvorbu samotných CAD modelů, a proto se začalo využívat tzv. metody kolaborativního designu. Metoda spočívá v tom, že se nejprve ručně připraví fyzický model, například ze dřeva, sádry, hlíny atd. a následně se tento model zpracuje pomocí metody RE. Výsledná data, která jsou získána, se pak přepracují na funkční CAD modely, které dále slouží pro výrobu produktu.

RE je často využíváno i v kombinaci s novodobými technologiemi. Hlavními představiteli jsou například technologie rychlých prototypů (Rapid Prototyping), aditivní výroby (Additive Manufacturing), rychlé výroby nástrojů (Rapid Tooling) či technologie 3D tisku. Často se lze také setkat s RE v oblasti kontroly a měření, popřípadě i v odvětví servisu a opravy poškozených součástí. [1, 9, 10]

2 KONTAKTNÍ 3D SKENERY

Lze rozdělit na nedestruktivní a destruktivní 3D skenery.

Skenery kontaktního nedestruktivního typu využívají přímého kontaktu se snímaným povrchem objektu. Nejčastěji je tento kontakt realizován za pomoci dotykové sondy. Sondy poté postupným kontaktem na různých místech povrchu objektu snímají data (sady bodů) a tak zaznamenávají jeho povrch. Tyto systémy jsou v praxi velice využívány především ke kontrole vyrobených součástí. [5, 11]

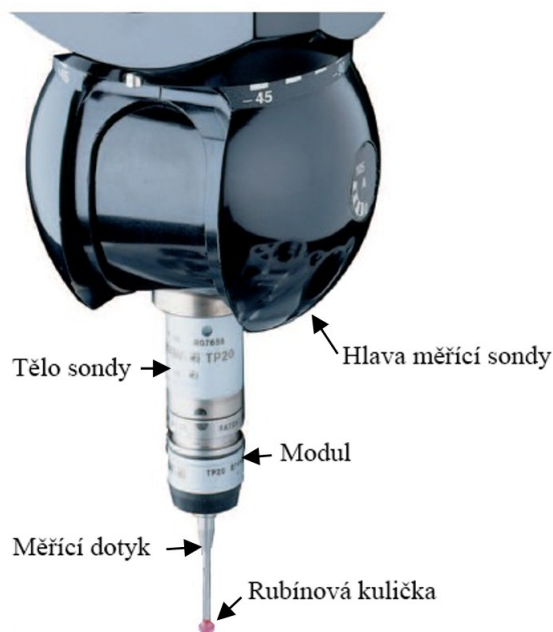
Destruktivní 3D skenery jsou založeny na kontaktním a bezkontaktním snímání. Tyto skenery využívají obráběcího stroje v kombinaci s optickou snímací technologií. Zkoumaný objekt je postupně, vrstvu po vrstvě, např. frézován a každá tato vrstva je snímána optickým skenerem. [12, 13]

2.1 Metodika digitalizace

U kontaktních snímacích zařízení dochází ke snímání dat za pomoci spínací sondy nebo skenovací sondy. Spínací sonda funguje tak, že při kontaktu se snímaným povrchem objektu vyšle signál a tím dojde k zastavení pohybu sondy. V tento moment se odečítají souřadnice daného bodu pomocí odměřování stroje. Bod se zaznamená do systému, a opakovanými kontakty sondy s povrchem vznikají další body, u skenovacích sond je vytvořeno mračno bodů. [12, 14]

Spínací sondy

Spínací sonda je složena z vícero prvků, mezi něž patří – tělo sondy, modul a dotyk (*Obrázek 3*). Tělo sondy je zašroubováno do hlavy. Modul je k tělu připojen magneticky, aby byla možná snadná výměna. Dotyk je charakteristický rubínovou kuličkou na jeho konci (z důvodu skoro nulové tepelné roztažnosti). Systém těchto spínacích sond pracuje na principu diskrétních hodnot, tzn. že data jsou snímána pouze po jednotlivých bodech a nejde o tzv. spojitě snímání souřadnice, jak je tomu u bezkontaktních skenerů. Využití těchto sond je spíše při kontrole dílců. [12, 14]



Obrázek 3 Dotykávková spínací sonda

(zdroj: [12])

Skenovací sondy

Skenovací sondy pracují již na principu skenování. Sonda funguje tak, že její hrot je po celou dobu snímání v kontaktu s povrchem snímaného objektu. Jakmile se sonda dotkne povrchu, je vypnut přítlak a jsou zapnuty boční pohony (v příslušných souřadnicích) skenovacího zařízení. Tím je zabezpečen permanentní kontakt s povrchem objektu. Tyto sondy mohou pracovat jak v režimu diskretním (snímání bodů po jednom), tak v režimu skenovacím – souvislým. Lze tak naskenovat i složitější geometrie objektů. Výsledkem je mračno bodů, které se dále musí zpracovat na CAD model. [12, 14]

2.2 Typy kontaktních skenerů

Hlavními představiteli kontaktních 3D skenerů jsou souřadnicové měřicí stroje, dále již CMM (Coordinate Measuring Machine) a mechanická ramena.

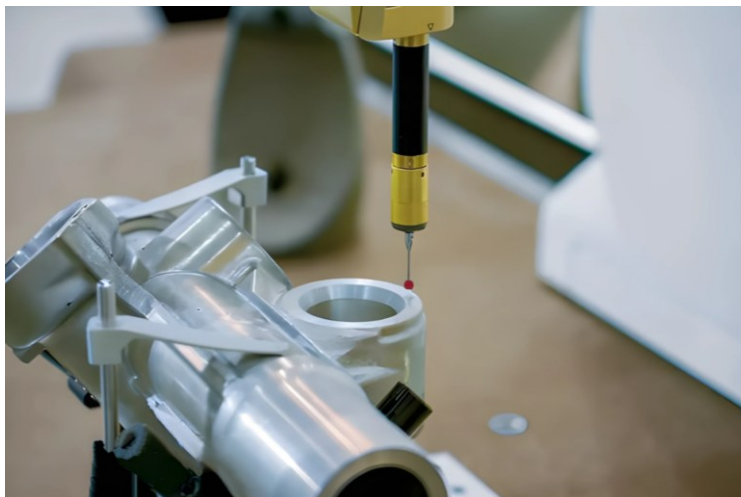
Mezi přechodné 3D skenery se řadí speciální frézky s optickým skenerem. [7]

2.2.1 Souřadnicový měřicí systém (CMM)

CMM je standardem v průmyslu metrologie již mnoho let. Jedná se o zařízení o vysoké přesnosti, kdy lze dosáhnout odchylky kolem $\pm 0,0025$ mm. V oblasti 3D skenování sice již není až tak využíváné, ale v oblasti metrologie je jeho využití nepostradatelné.

Snímací sonda je upevněna na konci ramene stroje, kde následně zaznamenává geometrii povrchu objektu. Výstup jsou body v souřadnicích X, Y a Z. Čím je složitější objekt, tím vícero bodů je třeba nasnímat. Tyto nasnímané body je potřeba zpracovat, stejně tak jako tomu je u bezkontaktních 3D skenerů. Technologie je sice velice přesná, nicméně na úkor rychlosti snímání bodů, která je výrazně nižší než u bezkontaktních 3D skenerů (desítky bodů řády minut). Skenovat lze také pouze pevné objekty, jelikož sonda vyvíjí určitý tlak na snímáný objekt. Tento tlak by mohl některé, například křehké, objekty poškodit. Druhý problém tohoto způsobu měření je, že pokud by bylo potřeba snímat objekty pružné, snímání by nebylo přesné díky pružné deformaci. [5, 7, 8]

Samotný CMM stroj je připevněn na pevném, těžkém stole (nejčastěji žula, ocel atd.). Na tento stůl jsou pokládány objekty určené ke skenování či měření. Stůl musí být odolný vůči rázům, vibracím a dalším nepříznivým jevům, které by mohly narušit proces snímání dat. Nad stolem je tedy umístěna samotná konstrukce CMM stroje, po které se přesouvá svislá část stroje, na jejímž konci je umístěna měřicí sonda (*Obrázek 4*). Konstrukce takového CMM stroje pak dovoluje pohyb sondy ve třech osách – X, Y a Z. Po každém dotyku sondy je signál zaslán do počítače a bod je zaznamenán. [5, 7, 8]



Obrázek 4 Měřicí sonda CMM, měřicí součást

(zdroj: [8])

CMM stroje existují ve vícero variantách, počínaje různými velikostmi (malé až velké) od stolního CMM po velké portálové stroje. Nejmenší stroje mohou mít měřicí rozsah v rozpětí 400 x 400 x 400 mm, až po ty největší o rozsahu 5000 x 10 000 x 4000 mm. Výhodou je, že tyto stroje nemusí vždy využívat pouze kontaktní metodu skenování, pro přesnější měření je lze využívat i v kombinaci s bezkontaktními skenery. [7]

CMM lze rozdělit dle konstrukce do třech hlavních skupin:

- Mostové CMM
- Portálové CMM
- Horizontální CMM [7]

Mostové typy CMM

Tento typ je jednoznačně jeden z nejpoužívanějších. Využívají se dva druhy tohoto typu a to s pohyblivým stolem nebo s pohyblivým mostem (*Obrázek 5*). Tyto stroje se často ukotvují do země, aby mohly nehybně stát. Jejich konstrukce je mohutná a proto se často využívají přímo ve výrobních provozech. Nejsou tak náchylné jako laboratorní typy. Mostové CMM se používají pro snímání menších či středně velkých součástí, které lze položit na pracovní stůl. [8]



Obrázek 5 Mostový kartézský CMM

(zdroj: [8])

Portálové typy CMM

Tento typ se řadí mezi ty největší kontaktní snímací zařízení, které umožňují snímat velké těžké strojní součásti (např. automobily, letecké motory atd.). Portálové CMM stroje jsou připevněny přímo do podlahy (např. výrobní haly) a tedy není zapotřebí žádného stolu (*Obrázek 6*). To umožňuje umísťovat tyto zařízení přímo do výrobních linek a snímat tak velké dílce přímo ve výrobním procesu. Tímto se ušetří na manipulaci s těžkými dílci, které by se jinak musely náročně přemísťovat. [8]



Obrázek 6 Portálový CMM

(zdroj: [7])

Horizontální typy CMM

Jsou určeny pro měření dlouhých úzkých dílů, které by nešly měřit na klasických CMM. Sonda je uložena horizontálně, na klasických CMM je uložena vertikálně (*Obrázek 7*). Může se tak pohybovat ve větších podélných a příčných vzdálenostech, vzhledem ke zkoumanému dílu. [8]

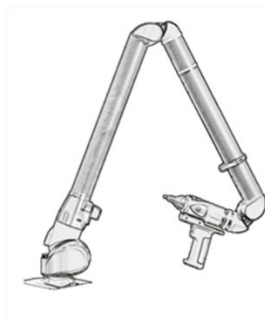


Obrázek 7 Horizontální CMM

(zdroj: [15])

2.2.2 Mechanické rameno

Princip těchto kontaktních skenerů spočívá v tom, že na konci mechanického ramena je umístěna snímací sonda. Rameno je nejčastěji 3-osé nebo 5-osé. V praxi se využívají ramena jak s ručním polohováním (*Obrázek 8*), tak robotickým polohováním. Rotační a úhlové senzory zajišťují snímání ramena a určují tak polohu snímaných bodů. Mechanické rameno lze použít jak plochy vnější, tak vnitřní. [12, 14]



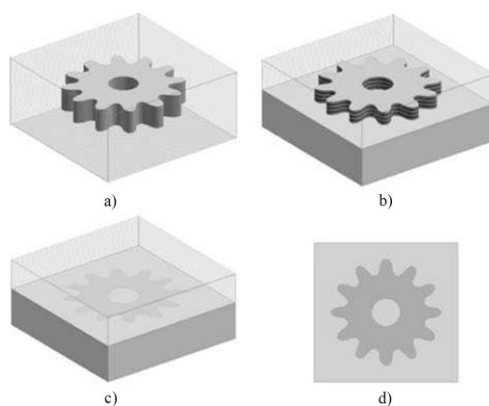
Obrázek 8 Mechanické rameno s ručním polohováním

(zdroj: [7])

2.2.3 Destruktivní skenovací systém

Je založen na bezkontaktně – kontaktní metodě, jak již bylo zmiňováno výše, jedná se o skener destruktivní. Tyto zařízení nejsou příliš rozšířená, nicméně nachází využití především tam, kde je třeba zdigitalizovat vnitřní stavbu objektu (tvarově složité dutiny), kde se nedokáží dostat žádné klasické skenovací systémy. Digitalizovat lze nejen vnitřní ale také vnější povrchy objektu, takže výsledkem je celý model objektu. [12, 13]

Postup skenování je takový, že se nejprve objekt zalije speciálním materiálem, tím se zvýrazní kontrast barvy materiálu s předmětem a zaplní se dutiny v objektu. Takto připravený objekt je vložen a upnut do speciální frézky s optickým skenovacím systémem. Následuje samotný proces, kdy fréza odstraňuje malé vrstvy materiálu z objektu a skenovací systém snímá tuto ofrézovanou plochu. Tento proces se opakuje, dokud není objekt zcela odfrézován. Posledním krokem je převést vzniklé 2D data vrstev na 3D model. [12, 13]



Obrázek 9 Postup přechodného skenování

a) Zalití materiálem, b), c) Odfrézování jednotlivých vrstev, d) Vzniklý řez součásti

(zdroj: [16])

2.3 Výhody / nevýhody kontaktních 3D skenerů

Kontaktní skenery mají stejně tak jako bezkontaktní skenery výhody a nevýhody, níže lze vidět některé z nich.

Mezi hlavní výhody patří:

- Tyto zařízení se řadí mezi velice přesné přístroje, dosahují přesnosti až $\pm 0,0025$ mm.
- Jsou flexibilní – lze naprogramovat vzor pro opakovatelnost snímání, a zároveň je lze použít i pro jednorázové snímání.
- Stroje lze vybavit různými sondami pro měření různých geometrických povrchů.
- Některé typy lze využít přímo ve výrobní lince – není nutnost přemísťování dílů.
- Lze s nimi měřit i hluboké otvory a dutiny.
- Světelné podmínky je nijak neovlivňují.

Mezi nevýhody se řadí:

- Často zabírají více místa než skenery bezkontaktní.
- Rychlost snímání povrchu objektů je značně nižší než u skenerů bezkontaktních.
- Velmi problematické měření pružných materiálů. [8, 12, 14]

3 BEZKONTAKTNÍ 3D SKENERY

Skenery tohoto typu umožňují skenování součástí bez jakéhokoliv fyzického kontaktu se skenovanou součástí. Fungování těchto přístrojů je založeno na principu optiky, laserů, popřípadě pomocí CCD (Charge–Coupled Device) senzorů – elektronická součást snímající obrazové informace. Pomocí skeneru se reálná součást převede na numerický model, kdy skenery snímají 3D souřadnice tzv. mračno bodů. Tyto body leží v souřadnicích X, Y a Z a nacházejí se na povrchu skenované součásti. Naskenovaný povrch je díky tomu velice detailní. Následně se tyto body musí zpracovávat do polygonní sítě a následně do 3D CAD modelu.

Bezkontaktní 3D skenery lze rozdělit např. na aktivní a pasivní. Dalším typem dělení by mohlo být například dle polohování – ručně, strojně atd. Nejprve bude ale nutné pochopit princip digitalizace skenerů, který je uveden v následující kapitole. [5, 17, 18, 19]

3.1 Metodika digitalizace

Jedná se o velmi důležitou součást RE. Digitalizace, jinak řečeno trojrozměrná numerizace, je proces, kdy dochází k převedení fyzického povrchu objektu do prostorových souřadnic (3D numerických dat) díky 3D skeneru. U bezkontaktních skenerů se lze setkat s vícero druhy digitalizace, v této kapitole jsou zmíněny jen ty nejdůležitější. [12, 20]

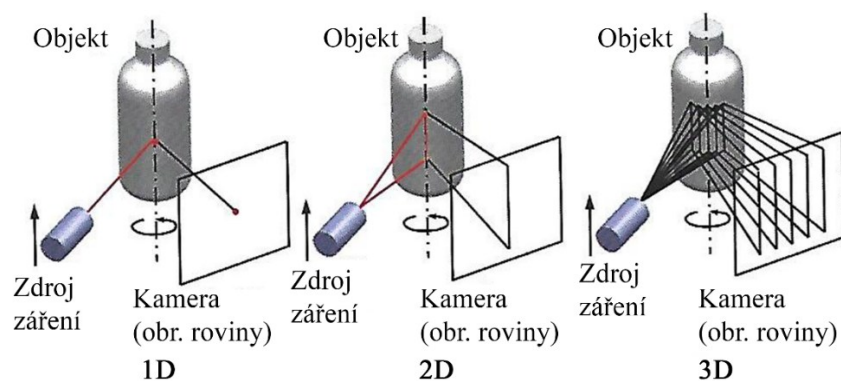
3.1.1 Triangulace

Nejspíše se jedná o jednu z nejstarších a určitě nejběžnější metodu měření pomocí světla. U většiny optických skenovacích zařízení, na bázi laseru, popřípadě projekci světla, se tato metoda využívá. Metodou triangulace se tedy získávají 3D souřadnice každého snímaného bodu, který je zachycen pomocí senzoru (optického) uvnitř skeneru.

Triangulaci lze rozdělit na dva typy, a to na triangulaci aktivní a pasivní. [7, 12, 21]

Aktivní triangulace

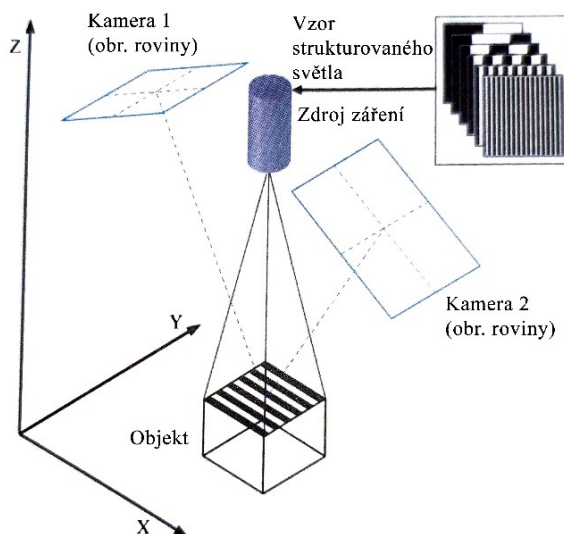
Tato metoda spočívá v nasvícení objektu zdrojem záření (např. LED dioda, laser atd.). Zároveň je nasvícený povrch snímán za pomoci CCD senzorů (kamer). Záření je upraveno tak, aby s ním bylo možno skenovat bodově, aby se jednalo o strukturované světlo ve formě čar nebo ve formě předem definovaného vzoru. Dle formy světla lze pak aktivní triangulace rozdělit na 1D, 2D a 3D (Obrázek 10). [7, 12, 13, 21]



Obrázek 10 Porovnání 1D, 2D a 3D triangulace

(zdroj: [22])

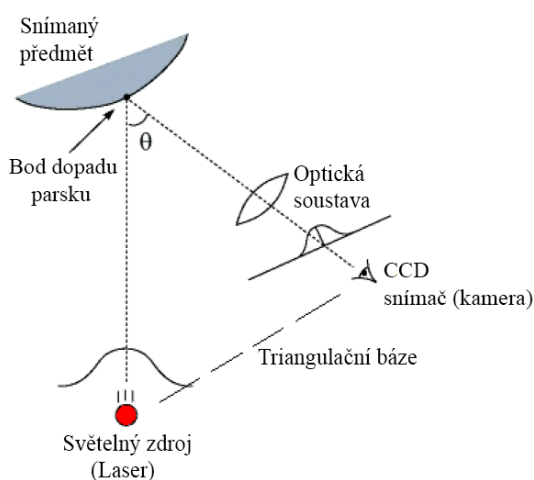
1D triangulace využívá pouze bodového světelného paprsku. 1D se získá pouze souřadnice bodu v ose Z. 2D triangulace je využito rozkmitaného pruhu laseru. Laserový pruh koná pohyb po objektu a zachytává jeho povrch. 3D triangulace je v podstatě 2D triangulace s vícero pruhy, popřípadě vzory – tzv. strukturované světlo (Obrázek 11). [7, 12, 13, 21]



Obrázek 11 Schéma 3D triangulace za pomoci strukturovaného světla

(zdroj: [22])

Název triangulace vypovídá o tom, že metoda bude založena na bázi trojúhelníků. Tyto trojúhelníky vznikají pomocí zdroje světla, bodem na skenovaném objektu a světelně citlivých senzorů (kamer s CCD snímači). Základem je znalost vzdálenosti mezi zdrojem světla (tzv. triangulační báze) a senzorem kamery uvnitř skeneru – je vždy konstantní (stejně tak i jejich úhel). Poté je možné určit úhel dopadu světelného paprsku přijatého na CCD senzor kamery přeměnou pozice vysvíceného bodu. Následně lze spočítat vzdálenost bodu od senzoru kamery díky trigonometrickým funkcím – sinovou větou (Obrázek 12). [7, 12, 21, 23]



Obrázek 12 Triangulační báze

(zdroj: [12])

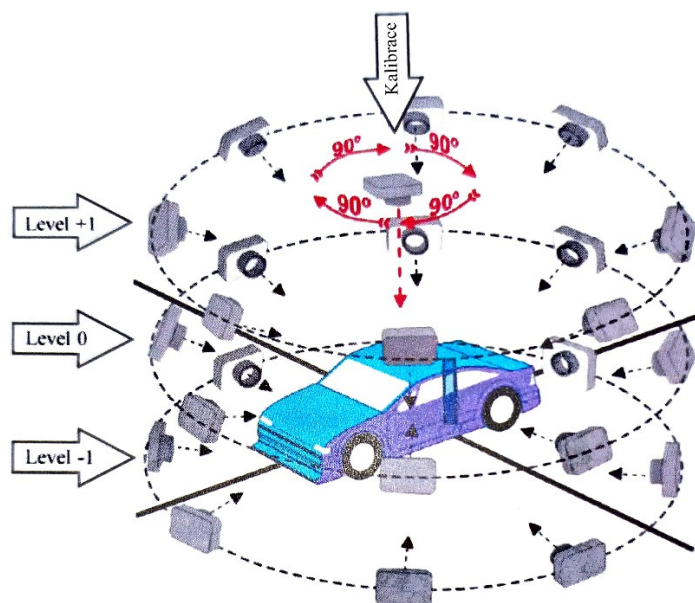
Pasivní triangulace – Fotogrammetrie

Skenovací systémy pracující na principu pasivní triangulace se vyznačují tím, že neuvažují uspořádání světelných paprsků a využívají různé druhy digitální fotogrammetrie. Základní princip je takový, že ze dvou nebo více snímků vytvořených ve vícero směrech, lze zjistit polohu jakéhokoliv bodu na těchto snímcích. Základní rozdělení může být takovéto:

- Vícero kamer s danou orientací
- Více kamer s automatickou kalibrací
- Jedna kamera v různých polohách s automatickou kalibrací

Mezi dynamické systémy se řadí systémy s více kamerami. Je nutná znalost umístění kamer vůči skenovanému objektu nebo metod automatické kalibrace. Jedna kamera

se využívá u systému statických, kdy snímání probíhá z vícero poloh (minimálně dvou) (Obrázek 13). [12, 22]



Obrázek 13 Příklad pasivní triangulace s vícero kamerami

(zdroj: [22])

Automatická kalibrace je výhodná proto, že není třeba znát přesnou polohu kamery. Poloha kamer vůči skenovanému objektu, či poloha kamer vůči sobě se určí přímo z naskenovaných snímků. Pro dosažení tohoto výsledku je často využíván kalibrační předmět. U tohoto předmětu jsou známy rozměry, a specifický vzor. Předmět je přítomen při skenování samotného objektu. Při zpracování těchto dat, se pomocí známých rozměrů předmětu pomocí měřítka určí rozměry skenovaného objektu. [12, 22]

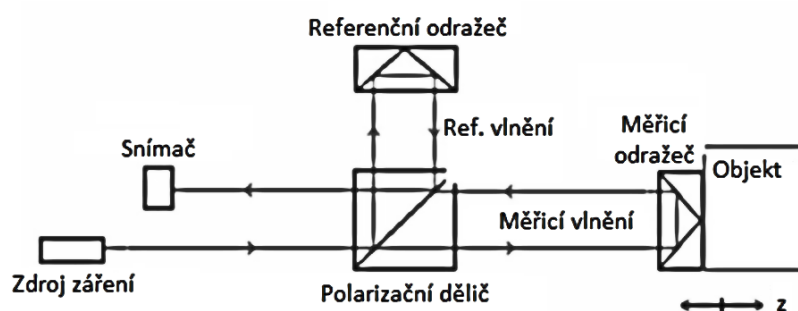
Stereovidění

Spadá pod skupinu pasivní triangulace. Skener je vybaven dvěma a více kamerami. 3D souřadnice povrchu skenovaného objektu jsou pak získány díky znalosti poloh kamer vůči sobě. Stereovidění by se dalo přirovnat k lidskému zraku, kdy pomocí dvou očí vidí člověk prostorově. Paprsky vycházející z kamer se protnou ve snímaném místě. Každá kamera zpracovává své data zvlášť, posléze se spojí do jednoho prostorového obrazu. Předností této metody je schopnost snímat i problematické povrchy. Metoda ovšem není tak přesná.

Výsledkem je hloubková mapa, která popisuje vzdálenost každého naskenovaného bodu od snímací kamery. [7, 12]

3.1.2 Optická interferometrie

Jedná se o metodu pracující na principu měření doby letu koherentního záření (světla). Za koherentní zdroj světla lze považovat takový zdroj, který generuje záření o stálé frekvenci, kdy rozdíl fáze paprsků zůstává stejný – nemění se. Vyzařovaný paprsek je rozdělen do dvou větví a to měřicí a referenční. Tyto dvě větve spolu interferují a generovaný výsledek je snímán za pomoci CCD kamer, popřípadě fotodiodou. V těchto přístrojích se využívají komponenty jako polopropustné zrcadlo (polarizační dělič) a lineární odražeče (Obrázek 14). Zdroj světelného záření je umístěn ve směru osy měření. Dochází tak k měření relativní vzdálenosti povrchových bodů skenovaného objektu. Absolutní vzdálenost lze zjistit až po kalibraci zařízení. [12, 21, 24, 25]



Obrázek 14 Schéma interferometru

(zdroj: [12])

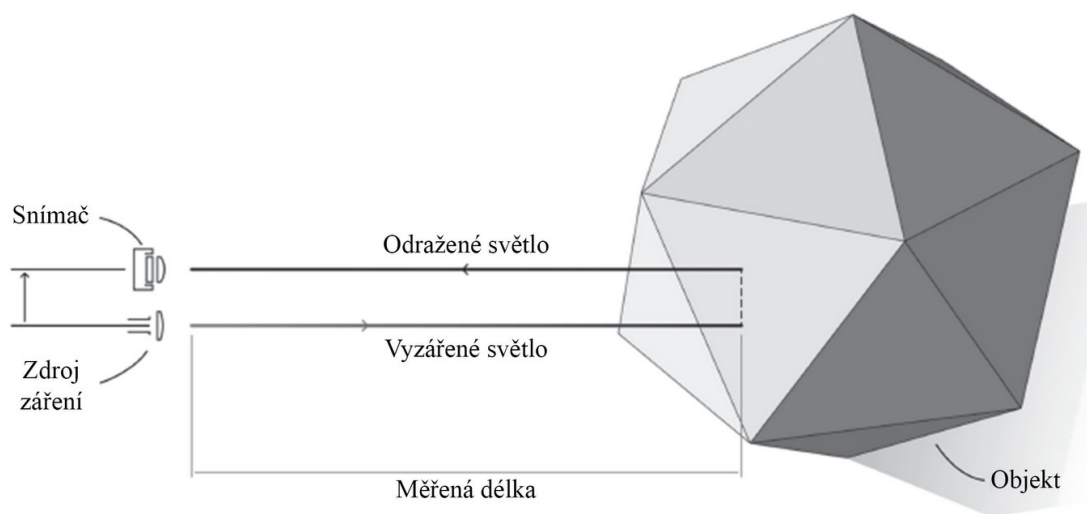
Na této metodě je založeno hned několik principů:

- Interferometrie využívá záření s vícero různými vlnovými délkami
- Holografická interferometrie
- Skvrnitá interferometrie
- Interferometrie s bílým světlem [12, 25]

3.1.3 Doba letu světla

Metoda využívá principu měření času letu záření. Tento čas odpovídá cestě paprsku směrem k povrchu snímaného povrchu a cestě zpět k přijímači (Obrázek 15). Tímto úkonem se získává Z – souřadnice bodu skenovaného povrchu. Zdroj světla vysílá koherentní záření (laser), které je snímáno za pomoci dálkoměru. Využití laseru je zde proto, že se jedná o světlo o stejné vlnové délce a frekvenci, tím pádem je paprsek rozptylován jen minimálně.

Díky tomu se intenzita paprsku nemění ani po odrazu od cíle. Tento fakt je zásadní pro přesnost měření. [8, 12]



Obrázek 15 Schéma skenování pomocí doby letu světla

(zdroj: [8])

Světlo laserového paprsku se šíří víceméně konstantní rychlostí. Lze tak spočítat vzdálenost mezi zdrojem paprsku a objektem za pomoci znalosti času letu paprsku a rychlosti světla. [8, 12]

3.2 Typy bezkontaktních skenerů

Níže jsou uvedeny přední typy skenerů, a to skenery optické, laserové, elektromagnetické a ultrazvukové.

3.2.1 Optické

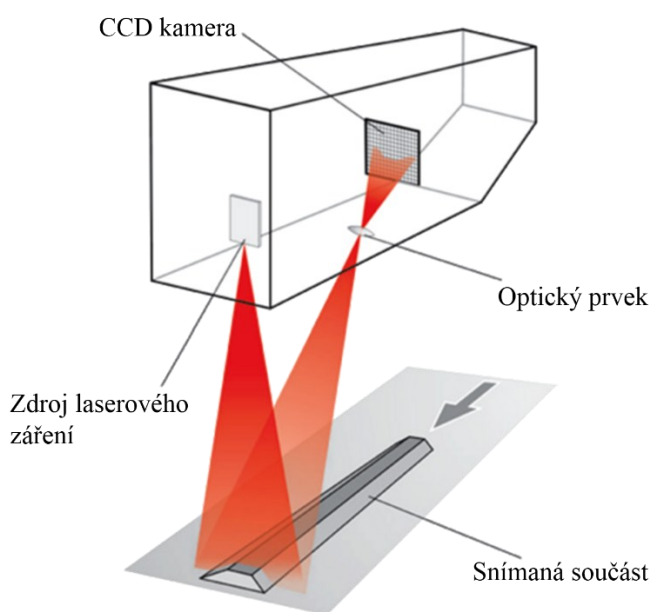
Skenery fungující na principu optiky, k digitalizaci využívají kamery či fotoaparáty. Základ této technologie je snímání objektu z různých úhlů. Objekt či kamery se postupně otáčejí a dochází k pořizování snímků. Optické systémy fungují na dvou hlavních principech, strukturovaného světla (aktivní metoda) a fotogrammetrie (pasivní metoda).

Jak již bylo popsáno v kapitole výše, rozdíl je v tom, že při aktivní metodě dochází ke generování světelných paprsků, což u pasivní metody není. Oba typy používají poziční značky pro přesnější spojování snímků v jeden model.

Skenery strukturovaného světla jsou rychlé a přesné, dosahují přesnosti $\pm 0,02$ mm a rychlosti větší než například skenery laserové. Některé senzory jsou vybaveny zdrojem generujícím bílé světlo a jsou tak schopny zaznamenat i barvu objektu. [10, 12, 16]

3.2.2 Laserové

Technologie tohoto typu jsou již dnes standardem pro spoustu 3D skenerů, především díky své jednoduchosti, malým rozměrům a flexibilitě využití. Řadí se mezi skenery aktivní, kdy využívá principu buď doby letu světla, optické interferometrie, či triangulace. Laserové skenery na bázi triangulace (pro skenování strojních součástí nejpoužívanější) promítají pruh na skenovaný objekt, či pruhy laserového světla, tyto pruhy jsou poté snímány kamerou pořizující určitý počet snímků. Proužky kopírují povrch a tím vynikne geometrie skenovaného objektu. Pohybuje se buď skener, nebo objekt (*Obrázek 16*). [7, 12, 23, 26]



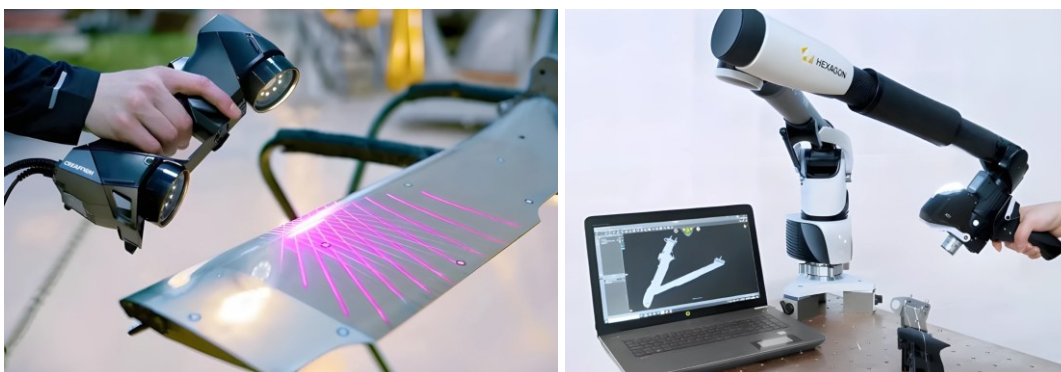
Obrázek 16 Schéma laserové skenování

(zdroj: [12])

Reflexní nebo černé povrchy jsou problematické nasnímat, protože je komplikován návrat paprsku laseru do CCD kamery. V praxi se tento problém řeší nánosem speciálního spreje o tloušťce 5–15 μm , jak již bylo zmíněno v kapitole výše.

Tyto laserové skenery se využívají pro skenování malých i rozměrných objektů (několikametrové). Způsob snímání je pak možný hned několika způsoby. Mezi tyto způsoby se řadí umístění nad objektem, kdy je skener připevněn na CMM zařízení, dále na robotickém rameni, kloubovém rameni ovládaným operátorem nebo se může jednat

o skener ruční – přenosný (Obrázek 17). Dosahuje se zde přesnosti skenování až $\pm 0,03$ mm. [7, 8, 26]

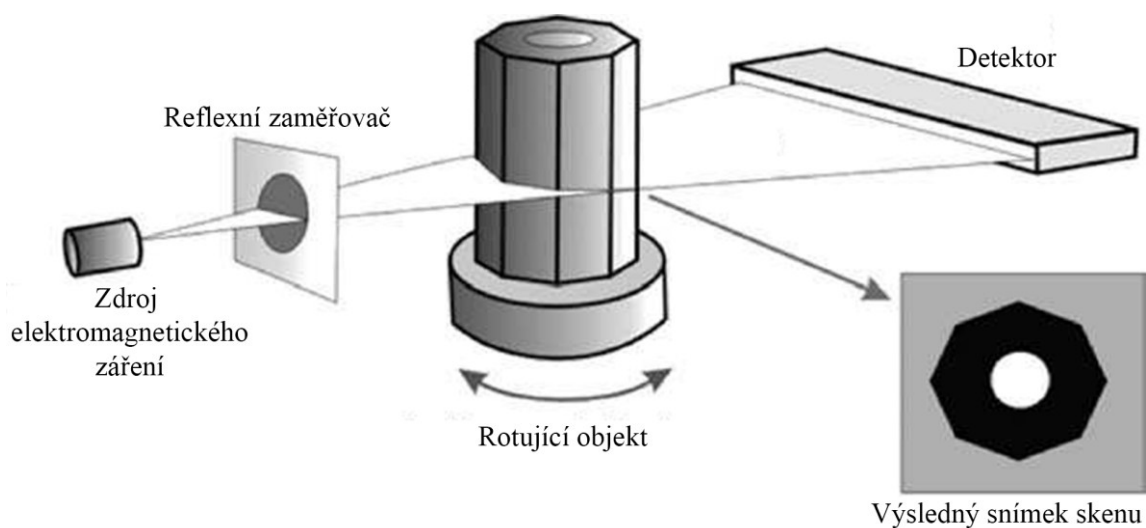


Obrázek 17 Laserové skenování přenosným skenerem (vlevo) a na rameni (vpravo)

(zdroj: [8])

3.2.3 Elektromagnetické

Nově se rozšiřujícími skenery v průmyslu jsou skenery založené na počítačové tomografii, dále jen CT (Computed Tomography). Tyto aktivní skenery se již dlouhodobě používají ve zdravotnictví pro zobrazení jednotlivých částí lidského těla. CT skenery v průmyslu pracují s intenzivnějším elektromagnetickým zářením, kdy toto záření snímá daný objekt v jednotlivých tenkých 2D vrstvách – rentgenových projekcích (Obrázek 18). Spojením těchto snímků se vytvoří digitální 3D model. Digitální model obsahuje jak vnější povrch, tak i vnitřní strukturu objektu. [7, 16]



Obrázek 18 Schéma elektromagnetického skeneru

(zdroj: [16])

Tato technologie nalézá uplatnění především ve zkoumání vnitřní struktury například kompozitních dílců, které byly vyrobeny aditivní technologií a jsou plněné výstužnými vlákny. Zjišťují se parametry jako velikost, natočení a jejich objemové množství v daném dílci. Konkrétním příkladem pak může být zkoumání vnitřní stavby pneumatiky. Pro účely RE se využívá na součásti s vnitřními dutinami, či jiné uzavřené součásti. Existuje také technologie s názvem mikro-CT skenování, ta se používá při zkoumání vnitřních vad výrobků a dosahuje přesnosti 1–20 μm . U klasického průmyslového CT lze dosáhnout přesnosti kolem $\pm 0,25 \text{ mm}$. [7, 16]

3.2.4 Ultrazvukové

Jedná se o aktivní skenery, které jsou cenově nejméně náročné, ale také nejméně přesné. Přesnost zde dosahuje 0,3–0,5 mm. Technologie funguje na principu snímání ultrazvukovou sondou a provádí se manuálně. Kovový hrot skenovací hlavice je přiložen ke snímanému objektu a stisknutím páčky je vyslán ultrazvukový signál. Tento signál se odrazí tam, kde je daný objekt a je dekodován čidly. Snímaná data se následně převedou do digitálních souřadnic a následně se zpracují na 3D model. Ultrazvukové skenování se využívá tam, kde není třeba přesnost, např. animace, filmy, kontroly svarů atd. [12]

3.3 Výhody / nevýhody bezkontaktních 3D skenerů

Bezkontaktní skenery mají spoustu výhod a nevýhod. Ty nejdůležitější jsou popsány níže.

Mezi výhody patří hned několik bodů a to:

- Nespornou výhodou bezkontaktních skenerů je jejich rychlost zachycování dat (i tvarově složitých dílců).
- Dokáží pojmout velké množství bodů (skenování velké plochy najednou) a to za zlomek času.
- Výsledkem je trojrozměrný model součástí (mračno bodů).
- Lze skenovat jak velmi velké součásti, tak i součásti o malých rozměrech – flexibilita.
- Skenování neovlivňuje tuhost skenované součásti ani teplota součásti.
- Bezkontaktnost zajišťuje šetrnost ke skenovaným dílcům (nepoškodí je).

Bezkontaktní skenery mají také nevýhody. Několik z nich je uvedeno níže.

- Klasicky tyto skenery dosahují přesnost v rozmezí $\pm 0,02$ až $\pm 0,3$ mm, což nemusí být vždy dostačující.
- Velký problém je snímání povrchů rovnoběžných na osu skenování. K tomuto problému dochází především u skenování otvorů nebo dutin, popřípadě ke špatně přístupným oblastem, kde se skener nemůže umístit do správné pozice. Pro ideální výsledek by měla být snímaná plocha kolmá na osu skenování.
- K snímání povrchů je používáno světlo, z čehož vyplývá, že snímání datových bodů z povrchu lesklé součásti bude problematické. Tento problém lze nicméně řešit tak, že se musí provést předpříprava povrchu nanesením dočasného (nejčastěji bílého) povlaku ve formě jemného prášku.

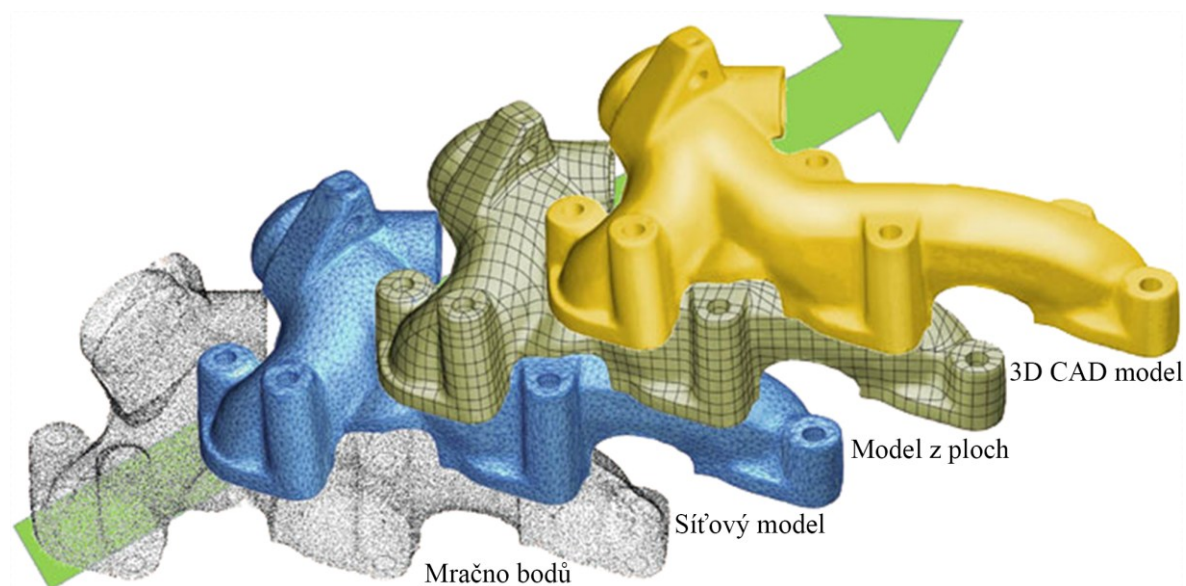
Bezkontaktní skenery se tedy využívají tam, kde je potřeba rychle a efektivně provést snímání povrchu dílce. Přesnost, ačkoliv není až taková jako u jiných měřicích zařízení, stále nebrání v použití v mnoha technických oblastech. V dnešní době se tedy tyto skenovací zařízení používají čím dál tím více, především díky rychlosti zachycení dat. [5, 8]

4 TECHNOLOGIE 3D SKENOVÁNÍ A PRÁCE S DATY

V této kapitole je popsán proces sběru dat pomocí 3D skenování, práce s naskenovanými daty a typy formátů souborů pro práci s těmito daty.

4.1 Proces rekonstrukce

Celý proces se skládá ze získání dat pomocí vhodné skenovací technologie, přípravy součásti na skenování a následné fyzické skenování součásti. Výsledkem je mračno bodů – jedná se o soubor bodů ve 3D, reprezentující povrch skenovaného objektu. Tyto body jsou snímány neselektivně (nepopisují specifické části modelu, jako vrcholy, hrany atd.). Následuje proces zpracování naskenovaných dat (tvorba síťového modelu, modelu z ploch atd.) a transformace na 3D CAD model (Obrázek 19). [6, 7, 27]



Obrázek 19 Proces technologie 3D skenování

(zdroj: [7])

4.1.1 Získávání dat

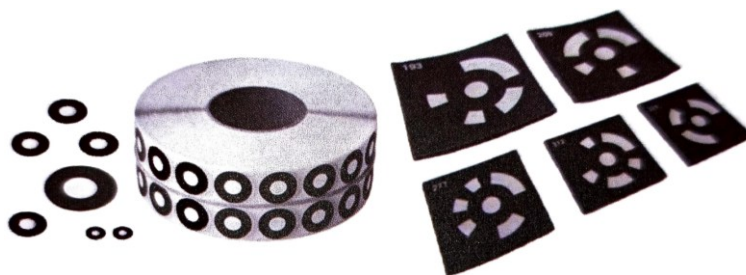
Prvním krokem je zdigitalizovat snímáný objekt a získat tak potřebná data, které budou obsahovat tvar daného objektu. Získaná data jsou ve formě bodového mračna a mají tvar jeho povrchu. Tomuto předurčuje volba vhodného skenovacího zařízení. Systémů je dnes na trhu velké množství, nicméně žádný není univerzální, a proto je potřebné zvolit to správné zařízení. Volba zařízení závisí na tvaru snímaného objektu, potřebné přesnosti, zde se jedná o skenování povrchu vnějšího či vnitřního atd. [6, 7]

4.1.2 Příprava objektu na skenování

Příprava objektu může být různá, záleží na zvolené metodě snímání a typu objektu. V případě bezkontaktního skenování je nutno vícero příprav, než je tomu u skenování kontaktního.

Bezkontaktní skenery fungují na odrazivosti světla, tím pádem je problém se snímáním povrchů černých, transparentních, lesklých atd. Vliv na odrazivost má také drsnost povrchu, čím je drsnost nižší tím jsou paprsky světla více rozptylovány, což není žádoucí – dochází k odchylkám snímání. Před začátkem skenování je tedy nutné ošetřit tyto typy povrchů pomocí dočasné matné práškové nebo kapalně barvy aby byl zaručen co nejlepší odraz. Tloušťka vrstvy by měla být konstantní a co nejmenší, ideálně v řádu desítek mikrometrů (pod rozlišovací schopnost skeneru), aby nebyl ovlivněn tvar skenovaného objektu. Povlak lze nanášet například v elektrostatickém poli, pokud je objekt vodivý, popřípadě klasičtější metodou – lakovací pistolí. Často používaným povlakem je například povlak na alkoholové bázi s pigmentem TiO_2 . [6, 13, 28, 29]

Poziční značky jsou nedílnou součástí přípravy objektu před skenováním. Mezi hlavní typy se řadí poziční značky kódované a nekódované (*Obrázek 20*). Kódované poziční značky se umísťují přímo na snímáný dílec, či mimo něj a využívají se pro určení pozice v prostoru soustavy skener – objekt. Nekódované se nejčastěji aplikují přímo na snímáný objekt a slouží k zarovnání snímků pořizovaných z různých pozic. Lze je také použít pro určení mezních 3D souřadnic, či pro znovu naskenování již snímané součásti (značky z předešlého snímání nesmí být odstraněny). Poziční značky jsou umísťovány nahodile v minimální vzdálenosti 20 mm od sebe. V některých případech mohou být vzdáleny až 100 mm od sebe, záleží na tvarové složitosti součásti. Ideální umístění značek je na rovných plochách, kdy skener značky nesnímá, namísto toho je zaplní dle okolí. Není je tedy vhodné umísťovat blízko detailů, či k hranám snímaného objektu. [13, 22]



Obrázek 20 Nekódované poziční značky (vlevo) a kódované (vpravo)

(zdroj: [22])

4.1.3 Fyzické skenování objektu

Snímaný objekt musí být pevně uchycen a v průběhu snímání musí být stabilní. Dle typu skenovacího zařízení se může pohybovat buď skener nebo snímaný objekt (například na otočném stole). Samotný skener musí být napolohován ideálně kolmo ke snímanému povrchu, aby bylo zaručeno snímání dat s minimální chybovostí. Objekt je skenován postupně, nejprve z jedné strany, poté dojde k přepolohování a následně k dalšímu snímání. Důležitým parametrem je vzdálenost skeneru od snímaného objektu, tato hodnota závisí na typu skenovacího zařízení, obvykle to je od 0,3 – 5 m. [10, 13, 30]

4.2 Zpracování dat

Po nasnímání dat je třeba provést kompletní zpracování dat. Samotné zpracování lze pak rozdělit na čtyři fáze:

- Práce s body
- Práce s polygonní sítí
- Práce s křivkami
- Práce s NURBS plochami [6, 7, 16]

4.2.1 Práce s body

V této fázi jsou naskenovaná data, nejčastěji více mračen bodů, připravována pro budoucí tvorbu 3D polygonní sítě. Práce s body zahrnuje zarovnání mračen bodů vůči sobě, buď ručně nebo automaticky, dále optimalizace dat, operace typu rotace, posunutí, separace atd., popřípadě práce s 2D vrstvami. Práce s 2D vrstvami neboli řezy nastává například při použití skenovacích zařízení využívajících elektromagnetického principu, popřípadě u skenerů destruktivních. Ostatní bezkontaktní skenery fungujících na principu triangulace a fotogrammetrie sbírají data ve formě mračna bodů. [6, 7, 16]

4.2.2 Práce s polygonní sítí

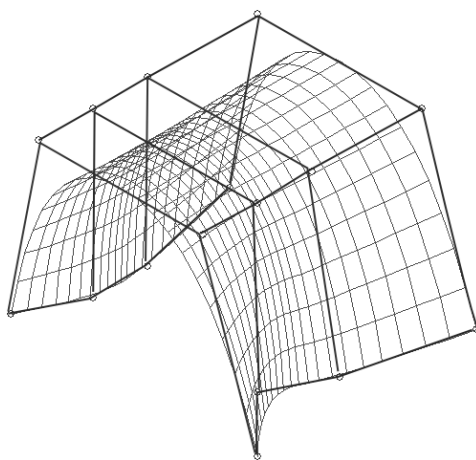
V této fázi se provede tvorba 3D polygonní sítě z mračna/mračen bodů. Stejně jako u mračna bodů se síť dále upravuje a kontroluje. Provádí se optimalizace sítě zahrnující čištění, odstranění šumu atd., dále editace sítě, kde dochází k odstranění defektů a taktéž se provádějí základní operace typu rotace, posunutí, a to vše pro dosažení optimální sítě. [7, 16]

4.2.3 Práce s křivkami

Většina nasnímaných dat slouží pro tvorbu geometrického modelu v CAD systémech. Generování modelů lze v určitých případech přímo z mračen bodů, či z polygonních sítí pomocí určitých úprav. Tohoto lze docílit pouze u jednodušších modelů, u tvarově složitých modelů (například s obecnými plochami) je třeba využít křivky. Tyto křivky vytyčují například hranice modelu, kopírují jeho povrch a pomáhají vytvořit plochy, které lze transformovat na CAD model. [7, 16]

4.2.4 Práce s NURBS plochami

NURBS (Non-uniform rational basis surfaces/spline) plochy/ křivky jsou určeny body, kterými jsou aproximovány a tedy neprocházejí těmito body (*Obrázek 21*). V podstatě se jedná o finální výstup RE, pak už se jen tyto plochy vyexportují v potřebném formátu, např. STEP. NURBS plochy se získávají pomocí polygonní sítě daného objektu, obohaceného o křivky (minulá podkapitola). V podstatě přesně definují volné plochy (nasnímaná data), což pak umožňuje CAD softwarům tyto data zpracovávat. [16, 31]



Obrázek 21 NURBS plochy určené křivkami a body

(zdroj: [31])

4.3 Mračno bodů

3D skenovací systémy vytváří tzv. mračna bodů. Tento název vychází ze vzhledu při zobrazení v softwarech. V softwaru se vyobrazují jako 3D snímaný objekt složený z mnoha malých bodů, které jsou blízko u sebe a tvoří tzv. „mraky“. Jednotlivé body jsou dány souřadnicemi X, Y, Z snímaného povrchu objektu. Jedno mračno bodů může nabývat až miliony bodů. Pro zobrazení objektu ze všech stran je potřeba

těchto mračen bodů vícero, čili vícero skenů z různých úhlů. Spojením těchto mračen bodů pak vznikne digitální model odpovídající reálnému tvaru objektu v reálném měřítku.

Kvalita dat – bodového mračna, závisí na několika faktorech. Mezi tyto faktory se řadí použité skenovací zařízení, vzdálenost a úhel skenování, nastavení rozlišení (hustoty bodů) a snímáním objektu. Tato kvalita má dopad na následné zpracování dat. [8, 16, 32, 33]

4.3.1 Hustota bodového mračna

Jedná se o klíčovou vlastnost pro vytvoření přesného digitálního modelu. Hustota mračna bodů lze také označit jako „skenovací rozlišitelnost dat“. Tato vlastnost je u většiny skenovacích zařízení používaných pro skenování zblízka přednastavená výrobcem. Pro skenování středně velkých a velkých předmětů, se využívají laserové skenery s možností nastavení rozlišitelnosti. Lze se setkat i se skenery pro menší dílce, které mohou upravovat výslednou hustotu nasnímaného mračna bodů, popřípadě lze měnit vzdálenost snímání. Zmenšením vzdálenosti dojde k nasnímání většího množství dat a naopak. Laserové skenery vysílají série paprsků, které se postupně rozptylují po povrchu snímání součásti. Při zvýšení rozlišitelnosti se zvyšuje frekvence vysílaných paprsků a tak dochází k nasnímání vícero bodů. Nastavení úrovně rozlišitelnosti závisí na složitosti snímání objektu. Při snímání rovných velkých ploch není potřeba velké hustoty bodového mračna, zakřivení povrchu se nemění. Pokud je potřeba snímat členitý povrch s detaily, je třeba větší hustoty bodového mračna, aby bylo zajištěno ideální pokrytí snímání povrchu. [8, 16]

4.3.2 Optimalizace bodového mračna

Optimalizace se skládá z několika bodů – redukce šumu, optimalizace počtu bodů, identifikace základních tvarů.

Redukce šumu

Při skenování vzniká vždy určitá chybovost, to znamená, že se určité naskenované body mohou odchýlit do nesprávné polohy nebo se mohou překrývat opakovaným skenováním tvarově složitých objektů. K přerývání může také dojít při spojování mračen bodů, což je nežádoucí. [16, 34]

Odstranění šumu v datech se provádí jak automaticky, tak manuálně. Při automatickém odstraňování těchto odlehlých či překrývajících se bodů, se vypočítá ideální poloha těchto bodů a na tuto polohu jsou pak přesunuty. Tato místa jsou vypočtena na základě

statistických informací o datech. U dílů s jasnými hranami či ostrými rohy, tato operace pomáhá zajistit jejich přesný tvar.

Operace redukce šumu se tedy využívá pro snížení bodů v bodovém mračnu, aby se odstranily body buď moc vzdálené, nebo co se překrývají. [16, 34]

Optimalizaci počtu bodů

Slouží pro snížení počtu bodů v bodovém mračnu. Odstraňují se body tam, kde je jejich velké množství zbytečné, tím se zjednoduší struktura bodového mračna a usnadní se jeho následné zpracování. Optimalizace počtu bodů se dělí na tři typy: dle zakřivení, náhodné a rovnoměrné.

- **Dle zakřivení**

Tímto způsobem dochází v místech rádiusů k odstranění menšího počtu bodů než na plochách rovinných. Přesnost křivosti je tak zachována a v plochách s minimálním zakřivením je dosaženo zjednodušení.

- **Náhodné**

Vybírání bodů k odstranění je náhodné. Body jsou vybírány v určité oblasti či na celém modelu. Velikost redukce je dána procentem bodů, které je třeba odstranit.

- **Rovnoměrné**

Snížování počtu bodů je rovnoměrné. Prostor bodového mračna je rozděleno do několika částí o tvaru krychlí, stejně velkých. Následně se z těchto krychlí odstraní všechny body až na jeden. [16, 34]

Identifikace základních tvarů

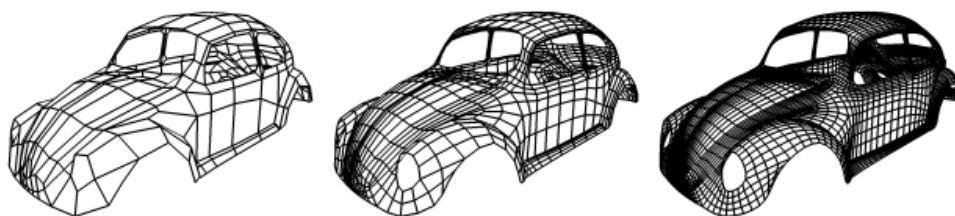
Základní tvary, jako jsou koule, válce, roviny atd. je důležité rozeznávat. Díky tomu se dají regulovat nedostatky skenovaných dat, jako je šum, či jiné defekty. Pokud jsou tyto tvary na skenovaných datech známy, lze je přemodelovat a jsou tak matematicky dokonalé. [16, 34]

4.4 Polygonní síť

Tento typ sítě se běžně používá pro 3D modelování v RE. Naskenovaná data typu bodového mračna sice poskytují přesný popis snímaného objektu, ale k 3D modelování

jsou skoro nepoužitelná. Mezi nevýhody patří především špatná vizuální kvalita a velká problematika úpravy dat. [8, 35, 36]

Polygonní síť je schopna přeměnit bodové mračno na 3D pevnou vizualizaci. Síť propojuje body bodového mračna, nejčastěji tři nebo více bodů. Propojením se docílí vzniku různých ploch, hran, které definují nasnímaný objekt. Každá vytvořená hrana musí být součástí polygonu a vzniklé vrcholy musí být sdíleny aspoň dvěma hranami. Tímto vznikne spousta malých propojených ploch, nejčastěji trojúhelníků či mnohoúhelníků. Množství těchto dílčích ploch ovlivňuje kvalitu popisu nasnímaného objektu. Čím více jich je, tím lépe je povrch popsán (*Obrázek 22*). Plynulost napojení těchto polygonů pak záleží na hustotě a kvalitě nasnímaného bodového mračna. [8, 35, 36]



Obrázek 22 Vliv množství dílčích ploch na kvalitu popsání povrchu

(zdroj: [37])

4.4.1 Optimalizace polygonní sítě

Optimalizace slouží ke zlepšení kvality sítě, je tomu podobně jako u mračna bodů. Operace optimalizace využívané nejčastěji jsou tyto: redukce šumu a začištění, čištění nadbytečných ploch, zpřesnění sítě a decimaci sítě.

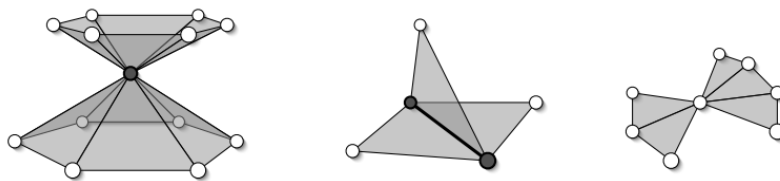
Redukce šumu a začištění

Je podobná jako redukce šumu u mračna bodů. Dojde k filtraci a následnému odstranění. Prvky jako ostré hrany či rohy jsou zachovány. Čištění povrchu polygonní sítě upravuje jeho hladkost – jak dobře na sebe navazují polygony. Dochází tak k odstranění prohlubní, vyhlazení válcových a rovinných ploch, či vyniknutí ostrých hran a rohů. Některé detaily mohou zaniknout, což nemusí být vždy přípustné (například malé popisky na snímaném dílci). [16, 34]

Čistění nadbytečných ploch

Dochází k odstranění nadbytečných ploch, a ty jsou tyto (*Obrázek 23*):

- Křížící se plochy – vzniknou, když více ploch protne stejný bod
- Nadbytečné plochy – jsou to plochy, co mají společnou hranu a vrchol
- Nепropojené plochy – plochy „ležící na sobě“ bez propojení [16, 34]



Obrázek 23 Křížící se plochy (vlevo), nadbytečné (střed) a nepropojené (vpravo)

(zdroj: [37])

Zpřesnění sítě a decimace sítě

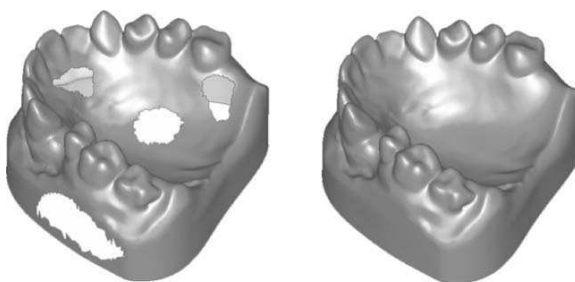
Přidáváním nových vrcholů či posunutím stávajících vrcholů dochází ke zlepšení kvality sítě. Vznikem nových polygonů, např. trojúhelníků, dochází k vyhlazení povrchu. Dochází k rozdělení jednoho trojúhelníku na vícero, např. na tři, čtyři atd. Decimace snižuje počet trojúhelníků, většinou na větších plochách, kde není jejich velké množství potřeba. [16, 36]

4.4.2 Úpravy a opravy sítě

Úprava je třeba především díky vadám polygonní sítě a je třeba je opravit, čehož lze docílit přidáváním, odebráním či posunem trojúhelníků. Vznikají buď špatným nasnímáním dat (chybí body v bodovém mračnu) či špatným vytvořením sítě. Typy úprav, které je třeba provést, jsou následující: zaplnění otvorů, odstranění detailů, detekování a úprava hran, úprava základních tvarů, úprava samotných trojúhelníků atd. [16, 34]

Zaplnění otvorů

Jedná se o otvory v modelu sítě, které vznikly špatným nasnímáním dat či převodem na polygonní síť. Otvory je třeba zaplnit (*Obrázek 24*), ideálně na metodě založené na zakřivení okolí, což zajistí plynulost napojení nově vytvořených trojúhelníků. Metod je samozřejmě vícero. [16, 34]



Obrázek 24 Zaplnění otvorů v síti (síť není zobrazena)

(zdroj: [16])

Odstranění detailů

Využívá se tvorby nových trojúhelníků, které vyplní a přepracují danou oblast polygonní sítě dle lokálního zakřivení. Může jít např. o různé malé nerovnosti povrchu.

Detekování a úprava hran

Skenovací zařízení často špatně rozeznávají ostré hrany, proto je vytvořená síť v rozích zaoblená. Zaoblení sítě je nepřípustné, pokud se má jednat o ostrou hranu, je potřeba tyto hrany detekovat a pomocí vhodných matematických funkcí v softwaru je upravit.

Úprava základních tvarů

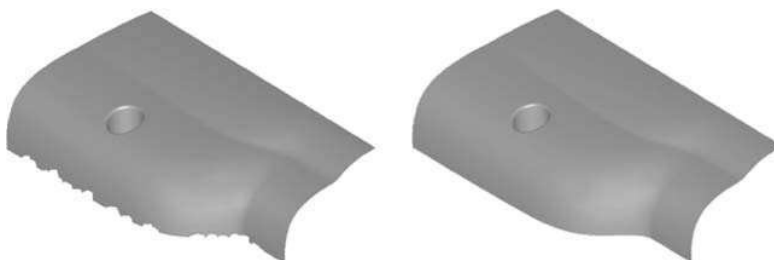
Využívají se obdobné úpravy jako u mračna bodů, kdy je nutné nejprve lokalizovat základní tvary jako je válec, koule atd. a následně je přetvořit na matematicky dokonalé.

Úprava trojúhelníků (polygonů)

Přepracování probíhá na úrovni samotných trojúhelníků. Provádějí se úpravy typu překlápění hran, zkracování hran, rozdělení hran atd.

Oprava hranic

Touto operací dochází k úpravě hran sítě modelu (*Obrázek 25*). Vybráním hran trojúhelníků lze vytvořit nové okraje sítě, buď přidáním, odebráním či přesunutím samotných trojúhelníků. [16, 34, 36]



Obrázek 25 Úprava hran polygonního modelu (sít' není zobrazena)

(zdroj: [16])

Ostatní operace

Mezi další operace, které lze provést na polygonní síti jsou např. tyto: booleanské operace (spojení, odečtení, průnik atd.), ořezávání, posunutí, zrcadlení, rotace atd. [16]

5 STL SOUBORY

Jedná se o typ souborů, které se využívají hlavně při zpracování dat při RE.

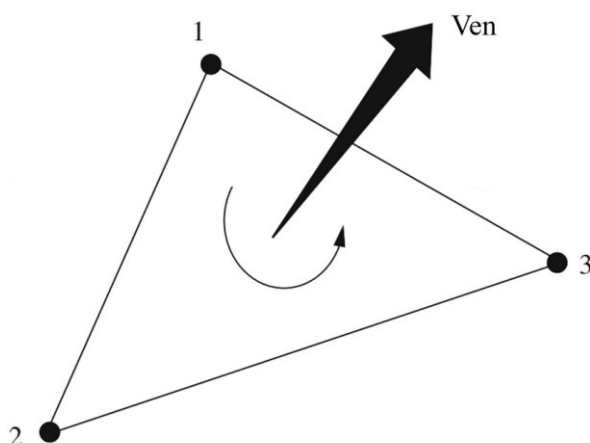
5.1 Definice

STL (Surface Tessellation Language) je jednoduchý datový formát, který je charakteristický popisem pouze povrchu modelu – trojúhelníkovou polygonní sítí. Tyto data nenesou žádné informace o geometrii prvků modelu, barvy, textury, materiálu ani žádné další informace, které jsou charakteristické pro klasické CAD modely. Lze je upravovat jen za pomoci specializovaných softwarů. [7, 38, 39]

5.1.1 Princip

Soubory typu STL charakterizují každý trojúhelník zvlášť. Tyto trojúhelníky popisují povrch 3D modelu. Trojúhelníky jsou definovány normálovým vektorem směřujícím ven z povrchu modelu a vrcholovými body definované souřadnicemi X, Y, Z. Uspořádání vrcholů je protisměru hodinových ručiček, při pohledu do normálového vektoru (*Obrázek 26*). Takto jsou definovány všechny zbylé trojúhelníkové plochy tvořící kompletní síť. Tyto data jsou označována souborovou příponou *.stl.

STL soubory lze rozdělit na dva typy, ASCII a binární typ. ASCII je typ, který lze přímo upravovat a je čitelný člověkem, ale má větší velikost. Binární typ má velikost menší a je uložen v binární soustavě (nelze přímo upravit). [7, 39, 40]

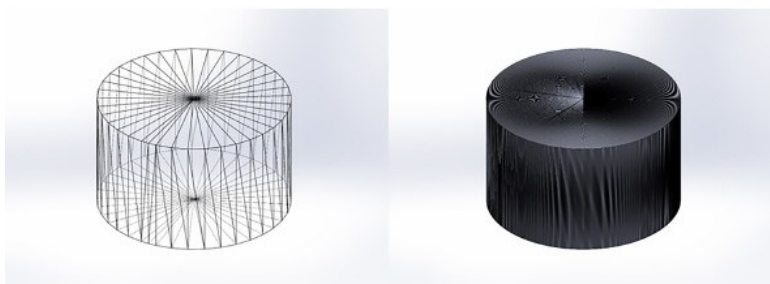


Obrázek 26 Definice trojúhelníku v STL souboru

(zdroj: [7])

5.1.2 Parametry

Hlavním parametrem STL souboru je jeho velikost. Tato velikost roste s rostoucím počtem trojúhelníkových ploch. Pokud je model vykreslen velmi podrobně, musí obsahovat velké množství trojúhelníků a jsou tak zobrazeny maximální detaily, zvětšuje se jeho velikost. Na obrázku níže (*Obrázek 27*) lze pozorovat, že na rozlišení souborů může dosti záležet. Válcový model je zde vyobrazen v nízkém a vysokém rozlišení. Velikost modelu s nízkým rozlišením je asi 8 kB a u modelu s vysokým rozlišením je velikost 141 kB. [7, 14, 41]



Obrázek 27 Síť s nízkým rozlišením (vlevo) a s vysokým rozlišením (vpravo)

(zdroj: [14])

5.1.3 Tvorba

Generování STL souboru může být provedeno vícero způsoby. Jedním způsobem může být generace přímo z CAD modelu (pevného tělesa), kdy se určuje velikost trojúhelníků v polygonní síti, která pak ovlivňuje její přesnost. Optimální velikost se může lišit dle aplikace, pro aditivní výrobu je taková, která vytvoří trojúhelníky popisující model s odchylkou maximálně 0,05 mm. Druhý způsob je vytvoření STL souboru z mračka dat nasnímaných pomocí skenovacího zařízení. Velikost trojúhelníků je dána hustotou mračka bodů. Tento způsob se využívá především při RE. [40, 42]

5.2 Problémy STL souborů

Tvorba souborů ve formě STL může obnášet několik typů problémů – chyb. Mezi tyto chyby se řadí:

Pravidlo vrcholů

Každý trojúhelník v síti musí sdílet dva vrcholy trojúhelníků dalších, přilehlých. Při vytváření STL souborů toto pravidlo nemusí být dodrženo, což je nežádoucí.

Nespojité STL

Vytvořená síť souboru STL by měla být spojitá a tvořit tak celek tělesa. Generování však nemusí být vždy dokonalé a může tak vzniknout síť, která neodpovídá realitě.

Degenerované polygonní plochy

Může dojít k vytvoření špatné velikosti trojúhelníků, špatnému rozložení atd.

Chybějící plochy, překrývající, protínající se plochy

Při vytváření sítě, například z mračna dat, je typické, že mohou chybět v určitých místech body a tím dojde ke vzniku otvorů. Druhá možnost je, že se body překrývají a pak mohou vzniknout plochy navzájem se překrývající. Může také dojít k protnutí trojúhelníků.

Tyto chyby je potřebné lokalizovat a následně opravit. Typy úprav jsou zmiňovány v kapitole výše. [14, 42]

5.3 Využití

STL soubory mají mnohé využití, lze je použít buď částečně jako meziprodukt, či přímo.

5.3.1 Částečné využití

Částečného využití se využívá hlavně u RE. Jedná se o velmi důležitý mezibod, kdy se převádí nasnímané mračno bodů na STL soubor, aniž by bylo zapotřebí CAD systémů. STL soubory jsou následně převedeny na soubory STEP, kdy mohou být dále upravovány klasickými CAD systémy (například kompletně přemodelovány). [14, 41, 42]

5.3.2 Přímé využití

Soubory typu STL, mohou být využity i napřímo, bez nutnosti převodu na jiné formáty, či jiných úprav. Využití je mnoho, dále jsou vypsány ty nejpodstatnější. Lze je použít například pro kontrolu dílů, kdy je STL soubor proložen CAD modelem a porovnává se, zda reálný díl odpovídá 3D modelu. Dále se soubory tohoto typu využívají při aditivní výrobě, např. 3D tisku. Dalším možným využitím je např. využití dat pro obrábění na CNC strojích. Trojúhelníková síť dané součásti je využita přímo ke generování drah nástroje při obrábění. [14, 41, 42]

II PRAKTICKÁ ČÁST

6 CÍLE PRÁCE

V této práci bylo stanoveno několik cílů ke splnění, jedná se o tyto cíle:

- Provést skenování dílce

Provést snímání zvoleného dílce při zachování zásad RE a stanovit orientaci souřadného systému.

- Zvolit vhodný software pro práci s daty

Vybrat vhodný software pro práci s STL modely a realizaci RE.

- Zpracovat naskenovaná data dílce

Provést zpracování nasnímaných dat zvoleného dílce, opravit vady a nedokonalosti skenu. Exportovat opravná data do formátu STEP.

- Modelovat funkční plochy a otvory

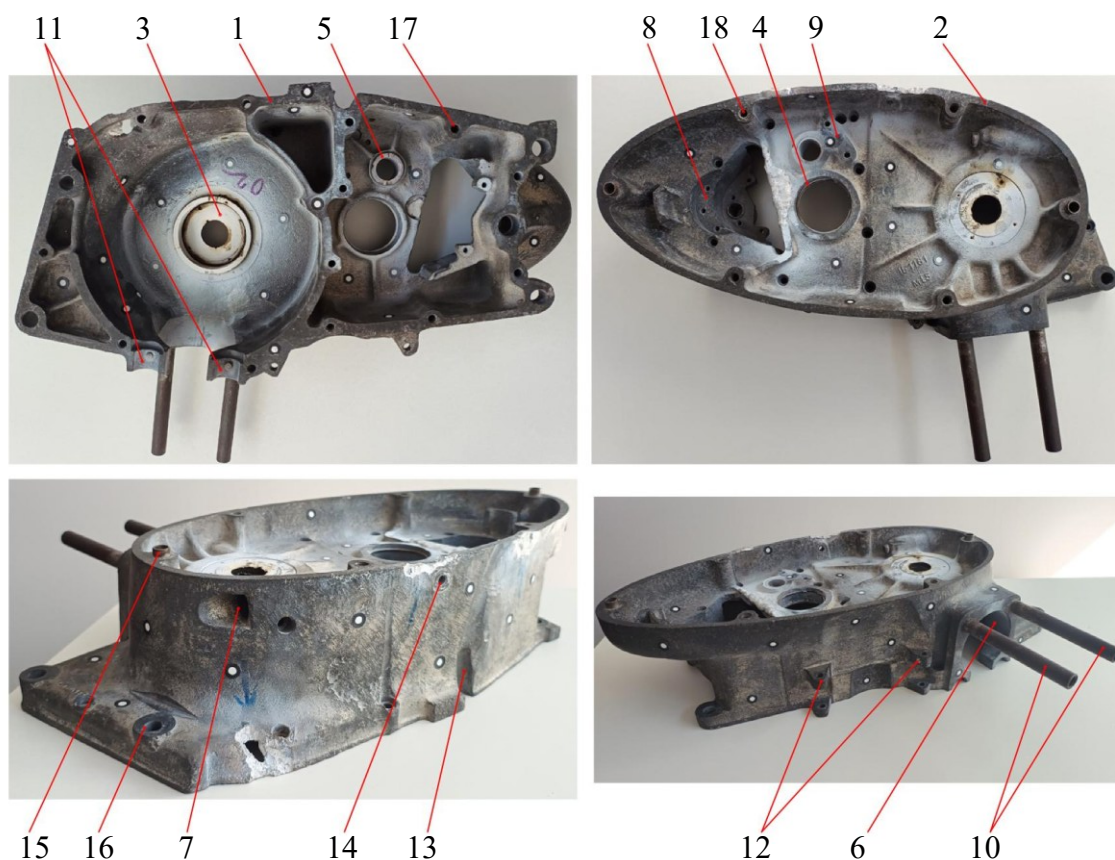
Parametrická tvorba funkčních ploch a otvorů k získání konečného modelu. Tvorba bez výkresového modelu pro obrábění.

- Vytvořit technologický model pro obrábění

Upravit jmenovité rozměry tolerovaných ploch a otvorů na výrobní rozměry dle výrobních tolerancí.

7 ZPRACOVÁVANÁ SOUČÁST

Levá polovina motorové skříně motocyklu je hlavním předmětem této práce. Jedná se o levou polovinu motorové skříně (dále již jen skříň) motocyklu Jawa 500 OHC typ 02. Materiál originálního dílu je hořčíková slitina, která byla vyrobena kombinací odlévání a obrábění. Obrobeny byly funkční plochy a otvory. Pro bližší seznámení se se základními částmi skříně je níže uveden obrázek společně s popisem těchto částí (Obrázek 28).



Obrázek 28 Levá polovina motorové skříně s popisem základních částí

1 – dělicí rovina druhé poloviny skříně, 2 – dělicí rovina levého víka, 3 – uložení ložiska klikového hřídele, 4 – otvor hlavního převodového hřídele, 5 – otvor pro předlohový hřídel s kluzným ložiskem, 6 – otvor válce, 7 – výstup náhonu tachometru, 8 – uložení řadícího automatu, 9 – dosedací plocha domečku náhonu tachometru, 10 – svorníky hlavy válce, 11 – otvory pro střední svorníky hlavy válce, 12 – držáky třměnu dynama, 13 – zafrézování lanovodu zadní brzdy, 14 – vypouštěcí otvor oleje, 15 – vodící pouzdro, 16 – otvor pro montáž na rám, 17 – otvor pro šroub spojující obě poloviny skříně, 18 – závitový otvor pro uchycení levého víka

(zdroj: vlastní)

8 PROCES SKENOVÁNÍ

Prvním krokem RE je převod fyzické podoby součásti do podoby digitální, typicky pomocí 3D skeneru. Tento proces obnáší několik kroků. Nejprve je potřeba nastavit a zkalibrovat skenovací zařízení, dále je zapotřebí připravit samotnou součást na skenování a v neposlední řadě provést samotné snímání dat.

8.1 3D skenovací zařízení

GOM ATOS TripleScan II 5M je 3D skener, kterým byla data snímána. Jedná se o průmyslové přenosné zařízení fungující na principu optiky, konkrétně aktivní triangulace. Strukturované světlo, které toto zařízení používá, vytváří pruhovaný vzor. Tyto pruhy jsou deformovány a tato deformace je zaznamenávána kamerami. V podstatě čím více jsou pruhy zdeformovány, tím je tvar složitější. Zařízení disponuje jedním zdrojem světelného záření a dvěma kamerami s CCD čipy (Obrázek 29). Světlo vyzařováno zdrojem je modré, jelikož zařízení využívá technologii „Blue Light“. Modré světlo leží v úzce definovaném spektru, a tím pádem je velmi těžko narušitelné jiným světelným zářením, například denním světlem. Skener tak dosahuje velmi dobrých výsledků, které nejsou jen tak ovlivnitelné jiným světelným zářením. Označení 5M značí, že kamery dokáží na jeden snímek zaznamenat až 5 milionů bodů (2448 x 2050 pixelů), což ovlivňuje, jak velké detaily mohou být snímány. Rozměry zařízení jsou 570 x 340 x 240 mm, kdy pracovní vzdálenost odpovídá 490–2000 mm. Dle použitého objektivu na zdroji záření lze měřit plochu od 38 x 29 mm – 2000 x 1500 mm, nicméně s rostoucí snímanou plochou se zhoršuje rozlišitelnost. Rozlišitelnost určuje schopnost skeneru snímat ty nejmenší detaily.



Obrázek 29 GOM ATOS TripleScan II 5M

(zdroj: [12])

8.2 Proces

Samotný proces snímání dílce se skládá ze dvou hlavních činností. Nejprve je nutné dílec připravit na snímání a poté se teprve může provést samotný úkon snímání.

8.2.1 Příprava součásti

Součást musela být nejprve řádně očištěna od všech nečistot (mastnota, zbytky barvy atd.). Poté bylo třeba snížit odrazivost lesklých ploch, které mohou zhoršovat přesnost skenování. Pro snížení odrazivosti se využívají antireflexní spreje. Nanášené vrstvy těmito spreji jsou v řádech mikronů, aby nebyla ovlivněna přesnost skenování. Označení spreje použitého na tento dílec neslo název MR 2000 od firmy MR Chemie GmbH. Tento sprej byl použit především na svary a uložení ložiska klikového hřídele, protože tyto části se nejvíce leskly (*Obrázek 30*).

Poziční značky byly dalším krokem přípravy. Tyto body byly lepeny v náhodném rozložení, aby nebylo dosaženo opakujícího se vzoru (*Obrázek 30*). Využily se body o průměru 5 mm (rozměr bílého středu), tato velikost byla volena dle zkušenosti obsluhy a volí se dle velikosti snímaného dílce. Stejně tak je to i s jejich počtem, který nabýval hodnoty 52. Poziční značky se aplikují na co nejvíce rovné plochy (mimo hrany) a slouží k propojování jednotlivých snímků, které svým propojením vytvoří 3D tvar.



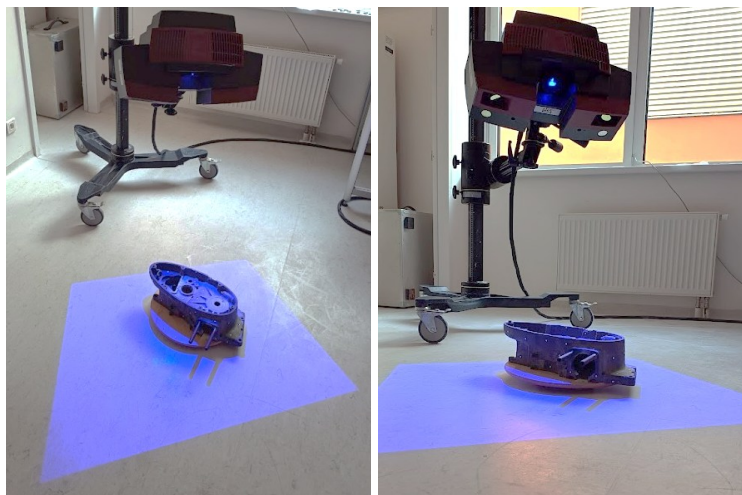
Obrázek 30 Lakovaná místa (bílá) společně s rozložením pozičních značek

(zdroj: vlastní)

8.2.2 Skenování součásti

Skenovaný dílec se nejprve položil na otočný stůl, který byl umístěn před skenerem. Otočný stůl sloužil k jednoduššímu zaznamenávání snímků z různých stran dílce. Následovala výměna objektivu na zdroji světelného záření skeneru. Využilo se objektivu MV700, který má možnost snímat větší objekty. Označení MV – „Measurement volume“, značí skenovací objem, konkrétně u tohoto objektivu jsou rozměry půdorysu tohoto objemu

700 x 530 mm (Obrázek 31). Skener se nastavil do takové pozice, aby nebyl příliš daleko od skříně, a skříně se přesunula do středu skenované plochy. Poté mohlo započít snímání jednotlivých snímků.



Obrázek 31 Příprava na snímání skříně a velikost půdorysu skenovacího objemu

(zdroj: vlastní)

Proměna modrého obdélníku na obdélník tvořený z mnoha pruhů značila zahájení snímání skříně (Obrázek 32), jednalo se o tzv. strukturované světlo. Po vytvoření prvního snímku, byla skříně mírně pootočená pomocí otočného stolu a provedlo se opětovné snímání. Každý následující snímek musel vždy obsahovat minimálně čtyři poziční značky, aby bylo zajištěno správné propojení snímků. Tento proces se několikrát opakoval, dokud nedošlo k otočení skříně v této ose o 360°. Následně se dílec otočil o cca 90° na bok a opět proběhl stejný postup snímání. Posledním otočením bylo otočení skříně o dalších 90°, čili na dělicí rovinu víka skříně. Následoval totožný postup snímání. Celkově bylo vytvořeno 68 ks snímků. Skenování skříně s jeho přípravou zabralo necelé dvě hodiny práce.

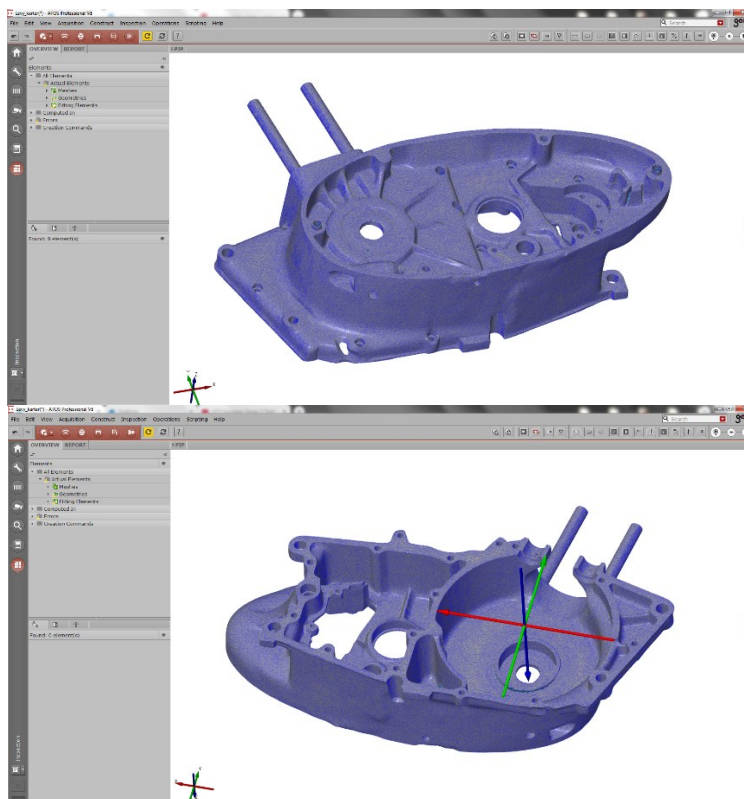


Obrázek 32 Strukturované světlo při snímání skříně

(zdroj: vlastní)

8.2.3 Základní úprava naskenovaných dat před zpracováním

ATOS GOM Professional V8 je software, který byl využit jak pro skenování součásti, tak i pro základní úpravu nasnímaných dat. Jednotlivé snímky vytvořené postupným snímáním bylo potřeba sjednotit, provedla se tzv. polygonizace. Tento software umožňuje při polygonizaci automatickou tvorbu polygonní sítě z mračka bodů a automatické odstranění pozičních značek, které jsou tak zahlazeny. Provedením tohoto kroku vznikla polygonní síť ve tvaru snímané součásti (*Obrázek 33*). Následovalo automatické vyhlazení hrubých nerovností a poté zarovnání součásti se souřadným systémem. Souřadný systém byl vytvořen v ose uložení ložiska klikového hřídele, kdy modrá šipka znázorňuje kladnou souřadnici Z, červená X a zelená Y. Dělicí rovina skříně leží v rovině XY. Rovina XZ prochází osami otvorů – klikového hřídele a hlavního převodového hřídele (*Obrázek 33*). Volba souřadného systému vyplynula ze systému kótování v originální výkresové dokumentaci, kdy většina kót vychází ze středu uložení ložiska klikového hřídele a z roviny procházející dvěma hlavními otvory pro zmiňované hřídele. Toto uspořádání posléze ulehčí přemodelování funkčních rozměrů. Konečným bodem tohoto základního zpracování bylo vygenerování souboru ve formátu STL.



Obrázek 33 Polygonní model v softwaru ATOS GOM Professional V8

(zdroj: vlastní)

9 ZPRACOVÁNÍ NASKENOVANÝCH DAT

STL data, vytvořená pomocí skeneru a softwaru ATOS GOM Professional V8, obsahovala spoustu vad, chybějící část sítě, nadbytečné prvky, které nebyly součástí odlitku skříně atd. Tyto data tedy nebyla použitelná pro okamžitou aplikaci (např. obrábění) a bylo je nutné řádně zpracovat do podoby bez vad. Důležité bylo zvolit vhodný software pro práci s naskenovanými daty a pomocí něj data převést do podoby, ve které budou dále využitelné. Výsledek této části měl být 3D model ve formátu STEP.

9.1 Volba softwaru pro zpracování naskenovaných dat

Rozmanitost softwarů pro RE je veliká. Spousta softwaru, používaných pro práci s 3D modely obsahuje modul pro RE, takže s nimi lze zpracovávat i naskenovaná data. Takovým příkladem může být například software SIEMENS NX. Dalším typem softwarů jsou ty, které se zaměřují speciálně na práci s polygonní sítí a klasické 3D modelování zde není možné. Softwary tohoto typu mají často více propracované funkce na RE a lze tak s nimi dosáhnout lepších výsledků. Z tohoto důvodu byl volen software PolyWorks 2023 od společnosti InnovMetric (*Obrázek 34*).



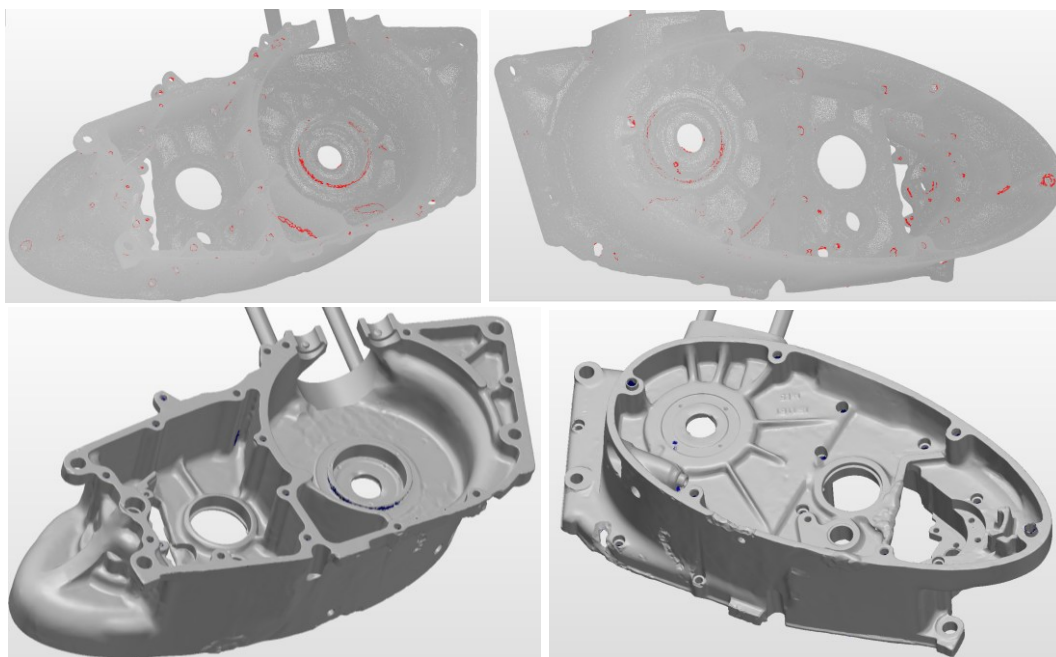
Obrázek 34 Logo softwaru PolyWorks 2023

(zdroj: vlastní)

PolyWorks disponuje dvěma moduly, „Inspector“ a „Modeler“. První modul slouží pro inspekci a analýzu vyrobených dílců. Jedná se především o metodu srovnávací. V podstatě je výrobek naskenován a tento sken je proložen 3D modelem a porovná se, jak moc se dílec odchyluje od tohoto modelu. Druhý modul slouží pro práci s naskenovanými daty ve smyslu úprav. Jedná se o nástroj RE. Lze pomocí něj rekonstruovat polygonní síť naskenované součásti a následně tyto data použít pro tvorbu CAD dat (např. STEP).

9.2 Polygonní model naskenovaných dat

Model ve formátu STL, byl importován do softwaru PolyWorks, do modulu „Modeler“. Importovaná polygonní síť obsahovala 782 500 bodů, které byly propojeny trojúhelníky. Tato síť obsahovala spoustu míst, které nebyly správně nasnímány, a tudíž obsahovala několik otvorů, jejichž počet odpovídal 142 ks. Lokalizované otvory jsou vyobrazeny níže (Obrázek 35), kdy pro lepší ilustraci je zobrazena pouze síť se znázorněnými otvory, níže je klasické (materiálové) zobrazení.



Obrázek 35 Polygonní model skříně, nahoře síť s otvory, dole materiálové zobrazení

(zdroj: vlastní)

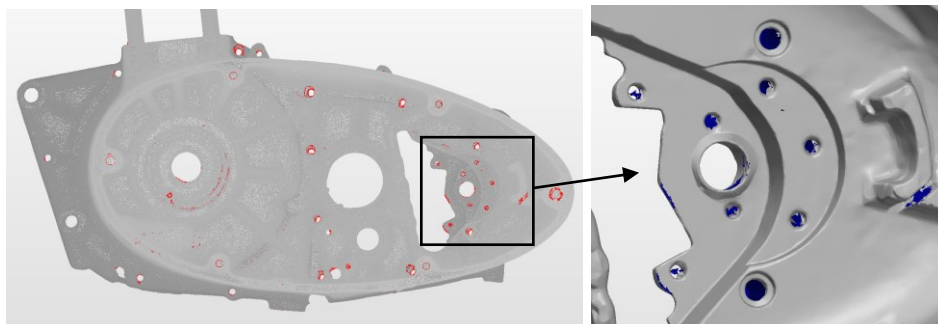
9.3 Opravený polygonního model

Model tvořený polygonní sítí, která byla vytvořena z nasnímaného bodového mračka, obsahoval několik vad. Mezi hlavní dva typy lze zařadit vady zapříčiněné způsobem skenování či skenerem a vady, které byly součástí skenované součásti ještě před samotným skenováním. Tyto vady bylo potřeba odstranit.

9.3.1 Oprava vad skenování

Vady způsobené skenováním vznikaly především tam, kde se již nedokázalo dostat strukturované světlo skeneru. Vzniklé vady se tedy objevovaly na místech, jako jsou hluboké dutiny, otvory o malém průměru či v místech, kde jedna stěna součásti překrývá druhou.

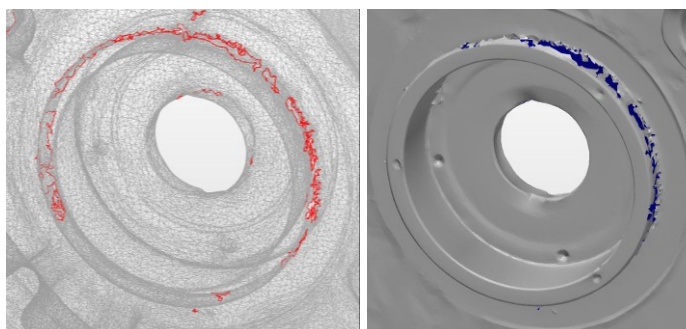
Výsledné vady jsou pak charakteristické především tím, že v těchto místech nebylo možné vytvořit polygonní síť, protože se zde nenalézaly žádné body bodového mračka – nebylo je možno nasnímat (Obrázek 36).



Obrázek 36 Chybějící části polygonní sítě a vpravo detail

(zdroj: vlastní)

Krom chybějících částí sítě, lze v těchto těžko dostupných místech vidět špatnou orientaci trojúhelníků polygonní sítě (Obrázek 37).



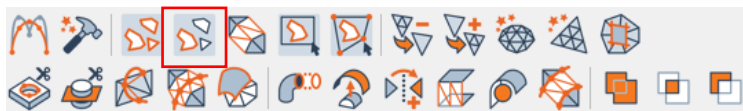
Obrázek 37 Chybějící části polygonní sítě a špatně orientované trojúhelníky

(zdroj: vlastní)

Chybějící části sítě se lokalizovaly pomocí funkce „Boundaries“. Tato funkce umožňuje zobrazit hranu trojúhelníku, dále již jen TR, na kterou nenavazuje další hrana sousedního TR. Toto vyobrazení lze vidět výše na obrázcích, kdy hrana je vyznačena červenou barvou.

Pro opravu vad polygonní sítě bylo třeba využít několika funkcí, jako je například „Fill Holes“ (zacelení děr), „Reconstruct Mesh“ (rekonstrukce sítě), „Smooth Verticales“ (vyhlazení sítě), atd. Průběh opravy a využití samotných funkcí je popsán níže.

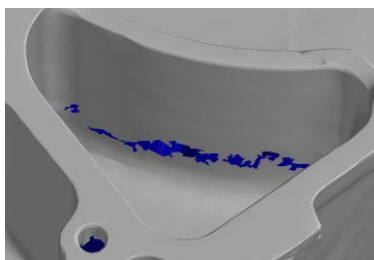
Nejprve se provedlo zacelení chybějících částí sítě, které byly na větších plochách (mimo díry). Primární funkcí pro zacelování otvorů je funkce „Fill Holes Interactively“. Tato funkce nabízí několik operací, které jdou dále nastavovat.



Obrázek 38 Funkce zacelení otvorů „Fill Holes Interactively“

(zdroj: vlastní)

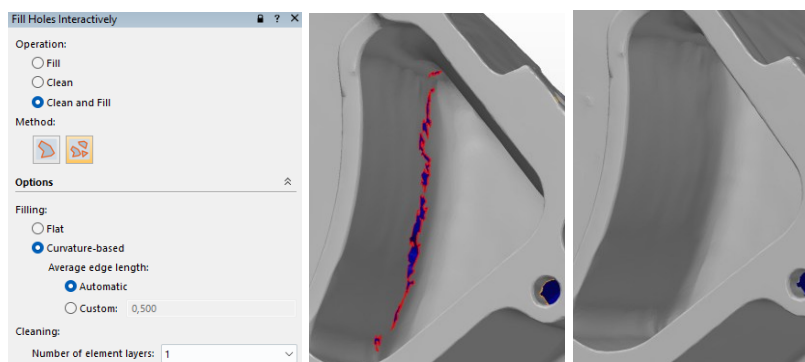
Pro zacelení otvorů na obrázku níže (Obrázek 39), je ideální použít operaci „Clean and Fill“.



Obrázek 39 Otvory v polygonní síti v dutině

(zdroj: vlastní)

Použitím této funkce odebere jednu až pět řad TR kolem otvoru a pak otvor doplní novými TR. Volbou nastavením „Curvature-based“ pak dojde k tečnému napojení TR a tím vznikne zakřivení stejné jako na zbytku polygonní sítě v okolí otvoru. Vyčištěním se pak zajistí, že kolem otvoru nebudou nijak špatně orientované TR a dojde tak k vytvoření ideálního napojení. Lze si také vybrat či zacelit jen jeden otvor, či více otvorů naráz – „Single Boundary“ nebo „Multiple Boundary“. Pro opravu tohoto otvoru bylo vybráno vícero otvorů najednou, aby došlo ke kompletnímu zacelení (Obrázek 40).

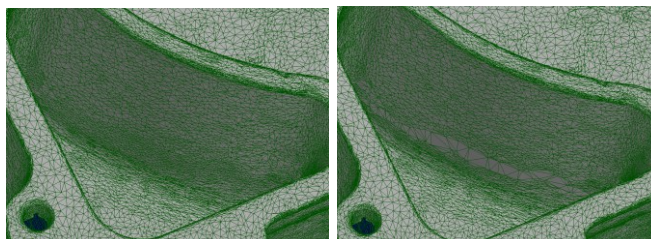


Obrázek 40 Vlevo nastavení zacelení otvorů, vpravo průběh zacelení otvorů

(zdroj: vlastní)

Použitím zakřivení při zacelování nedojde jen ke správnému natočení TR, ale také k vytvoření vhodné velikosti, která se přizpůsobí zakřivení (čím menší TR,

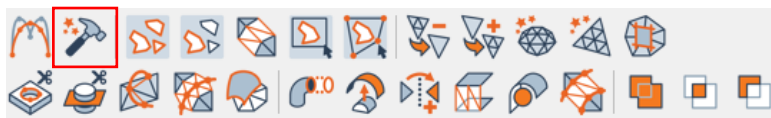
tím lze větší zakřivení). Pokud je použita možnost bez zakřivení „Flat“ (ploché), nedojde k vhodnému zacelení – napojení. Porovnání použití funkce zacelení se zakřivením a bez, lze vidět na obrázku níže (Obrázek 41). Funkce „Flat“ tedy nebyla nadále využívána, vždy bylo využíváno funkcí se zakřivením.



Obrázek 41 Vlevo využití zacelení se zakřivením, vpravo bez

(zdroj: vlastní)

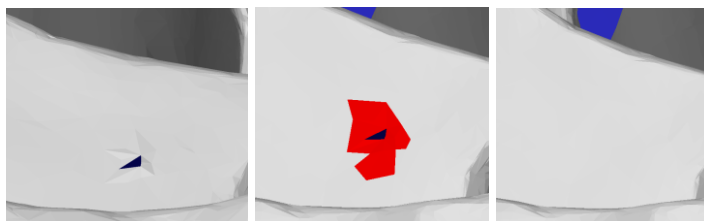
Malé otvory, důlky a jiné drobné vady mohou být odstraněny pomocí funkce „Reconstruct Mesh“ - rekonstrukce sítě (Obrázek 42).



Obrázek 42 Funkce rekonstrukce sítě „Reconstruct Mesh“

(zdroj: vlastní)

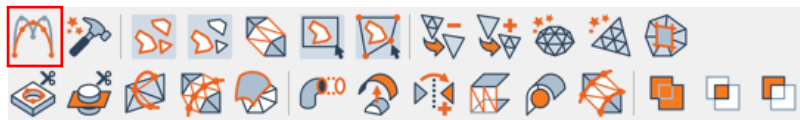
Způsob opravy je takový, že se nejprve vyznačí oblast, která se má zrekonstruovat a následně se použije tato funkce. Podstata této funkce je taková, že nahradí starou polygonní síť novou a pokusí se ji napojit na okolí kolem vyznačené rekonstruované části sítě. Tato funkce je plně automatická, a proto se využívá u jemných vad. V případě komplexnějších oprav často selhává, např. vytváří zvlněnou síť atd. Níže lze vidět příklad využití této funkce, kdy krom chybějícího TR je jeho okolí zdeformováno. Vyznačením okolí kolem otvoru a následné použití této funkce, zacílí síť a srovná ji (Obrázek 43).



Obrázek 43 Postup rekonstrukce sítě drobné vady

(zdroj: vlastní)

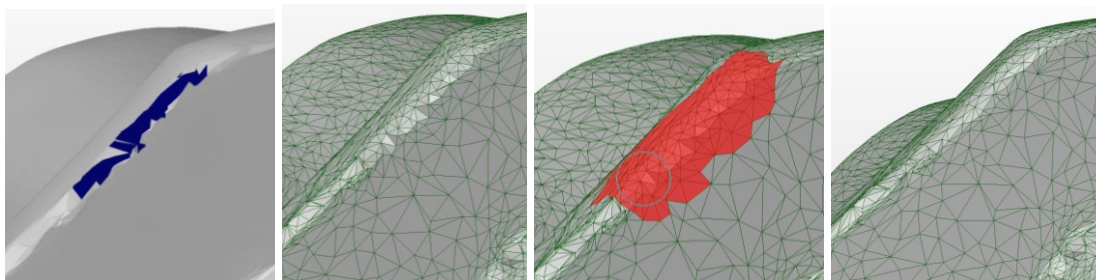
Zacelování, obzvláště těch složitějších, může vyžadovat využití více funkcí. Například při zacelování díry v hraně, kdy kromě použití „Clean and Fill“ se zakřivením, byla použita i funkce „Smooth Verticales“ – vyhlazení sítě (Obrázek 44).



Obrázek 44 Funkce vyhlazení sítě „Smooth Verticales“

(zdroj: vlastní)

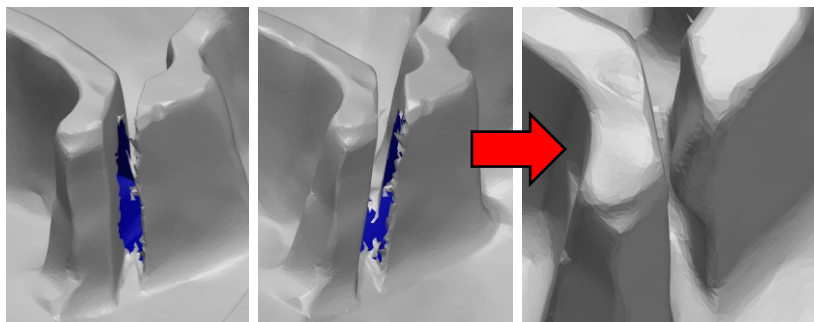
Tato funkce má dvě hlavní metody, buď lze vyhlazovat celý model nebo jen vyznačené části sítě. V tomto případě bylo nutné zacelený otvor dodatečně vyhladit, protože vytvořená síť v této části nebyla plynule napojena. Intenzita vyhlazení byla nastavena na 25 % a pro lepší viditelnost byla zapnuta viditelnost sítě (Obrázek 45). Pokud je potřeba síť vyhladit více, je třeba použít funkci vícekrát, či zvýšit její intenzitu.



Obrázek 45 Postup zacelení otvoru a vyhlazení sítě

(zdroj: vlastní)

Velké otvory na komplexním povrchu vyžadují postupné zacelování, zacelením celého otvoru naráz, často dochází k vytvoření špatně zakřivené sítě (Obrázek 46).

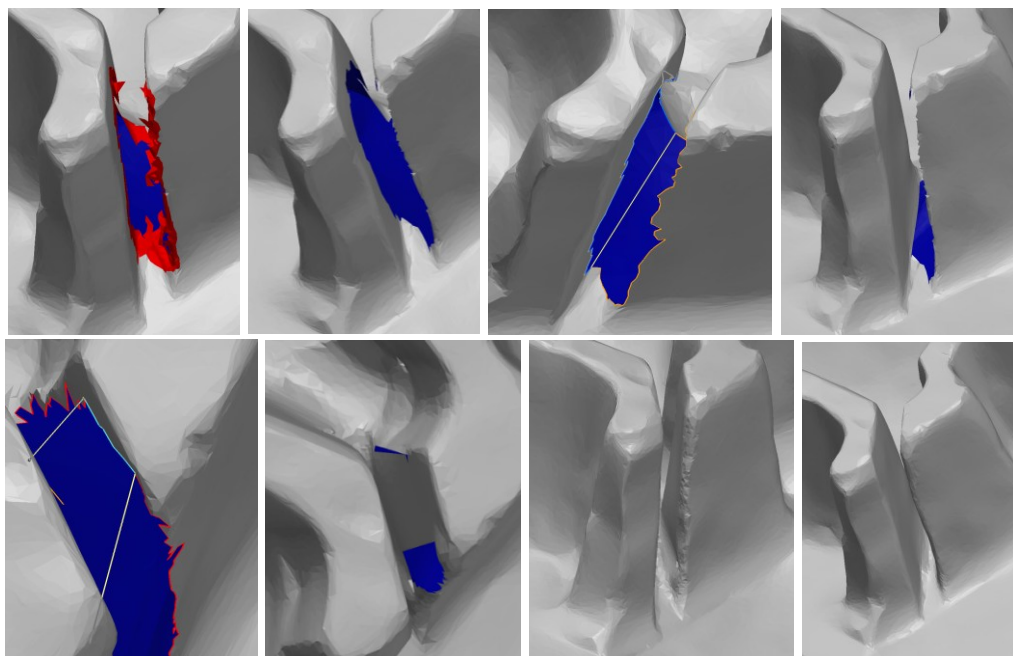


Obrázek 46 Vlevo vada, vpravo nevhodná oprava pomocí „Clean and Fill“

(zdroj: vlastní)

Operace „Fill“ – vyplnit, nabízí spoustu variací částečného zacelování, např. „Partial Filling“ či „Gap Filling“. První z těchto podfunkcí částečně zacelí díru, jen se určí počátek zacelování (přímka). Druhá podfunkce tvoří tzv. most, v podstatě se určí dvě přímky, mezi kterými pak vznikne síť.

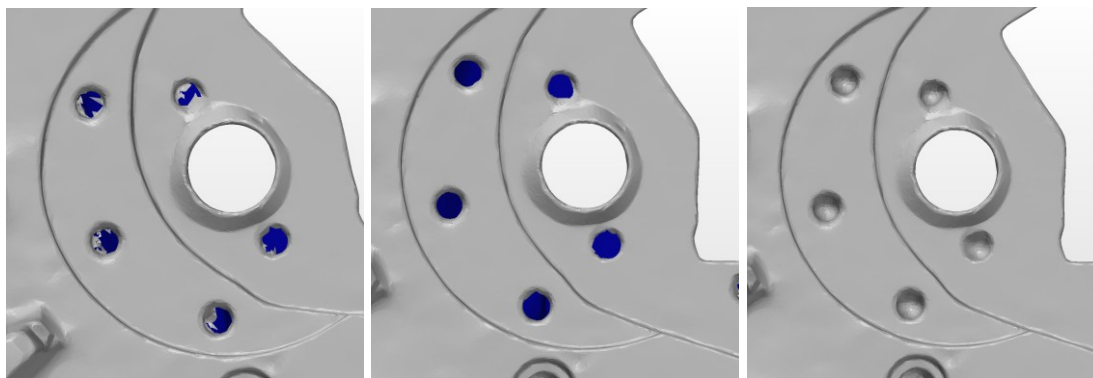
Oprava vady z předešlého obrázku je komplikovaná, jak lze vidět, nachází se zde spousta špatně orientovaných TR, jelikož se nepoužije funkce „Clean and Fill“, je třeba tyto TR ručně odstranit. Následně využitím kombinací „Partial Filling“, „Gap Filling“ a „Clean and Fill“ se otvor zacelí. Nakonec je třeba použít lokální vyhlazení 30% (Obrázek 47). Postup je zkrácený, podfunkce na částečné zacelování musely být využity vícekrát.



Obrázek 47 Postup zacelení komplexní vady

(zdroj: vlastní)

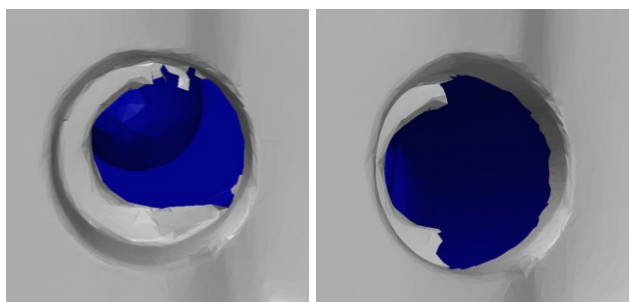
Velkým problémem při 3D skenování je snímání hlubokých a úzkých děr, proto většina vad se nachází právě tam. Neprůchozí díry o jednotném průměru se pouze zacelí v určité hloubce, později jsou většinou zaslepeny a kompletně přemodelovány, aby byla zajištěna jejich přesná poloha a tvar. U takto jednoduchých děr se pouze odstraní špatně orientované TR a pomocí „Clean and Fill“ se zakřivením dojde k vytvoření polokoule na dně díry, což zajistí její zacelení (Obrázek 48). Často se využívá výběru vícero děr naráz, pro urychlení procesu opravy.



Obrázek 48 Zacelení neprůchozích děr

(zdroj: vlastní)

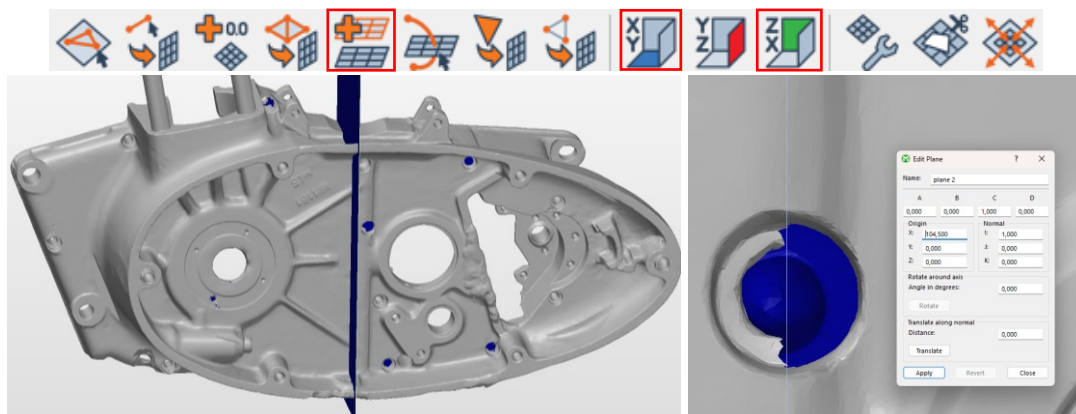
Pokud se jedná o díry se zahloubením, a vada sítě je ve velkém rozsahu (chybí velká část sítě), je třeba využít komplexnějších metod opravy. Stejně jako u předešlých děr se nejprve odstraní špatně orientované TR a poškozená síť (*Obrázek 49*).



Obrázek 49 Vlevo vadně naskenovaná díra, vpravo odstranění vadné sítě

(zdroj: vlastní)

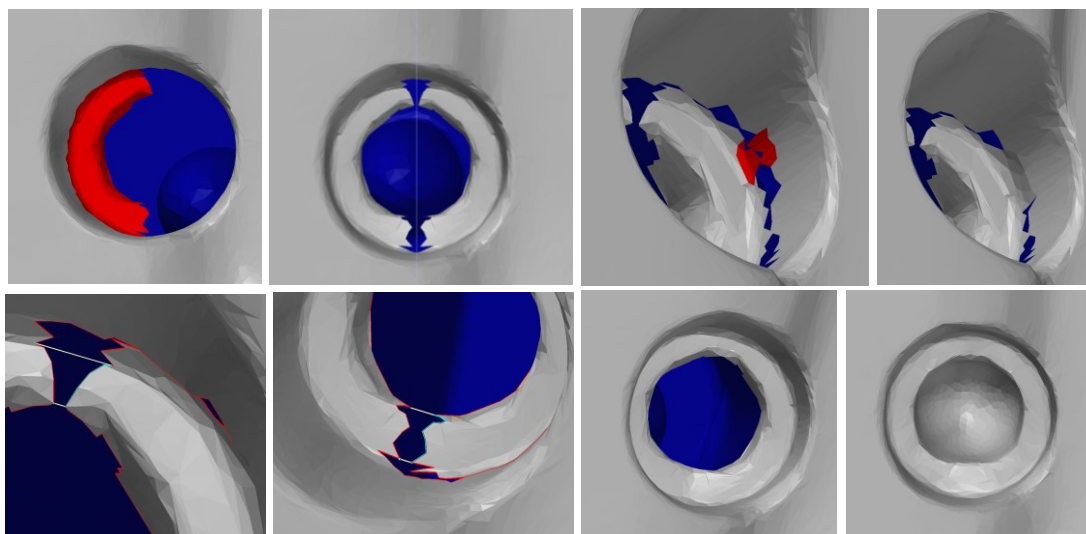
Pokud je aspoň část osazení díry správně nasnímaná, lze ji použít pro opravu zbytku osazení. Nejprve je nutné vytvořit základní rovinu souřadného systému, u této konkrétní díry vyhovuje rovina YZ, to se provede funkcí „Create Plane Parallel to the YZ Plane“. Dalším krokem je tvorba roviny rovnoběžné s YZ na střed opravované díry, to se provede pomocí funkce „Create Plane Parallel to Plane“ (pátá ikona zleva). Následně se upraví numericky její poloha, aby byla co nejvíc ve středu dané díry a to pomocí „Edit Plane Numerically“ (třetí ikona zprava) (*Obrázek 50*).



Obrázek 50 Tvorba roviny a její upřesnění polohy

(zdroj: vlastní)

Následně se vybere část osazení díry, která se bude zrcadlit. Dále se vybere rovina, která poslouží jako osa zrcadlení a následuje samotné zrcadlení. Nově vzniklou polygonní síť je nutné připojit ke stávající, aby bylo možno využít zacelování, především částečného. Poté je třeba pomocí podfunkcí funkce „Fill“ doopravit zahloubení. Posledním krokem je zacelení díry pomocí „Clean and Fill“ se zakřivením a vyhlazením (Obrázek 51).



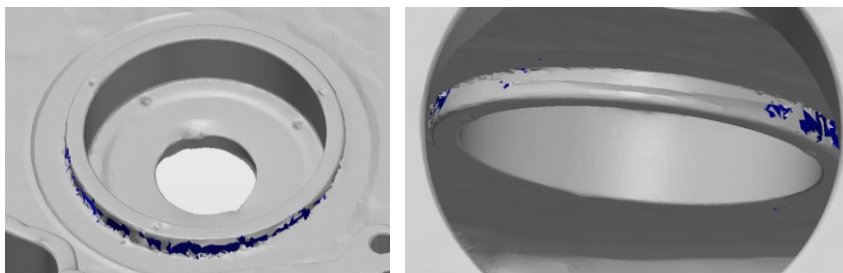
Obrázek 51 Postup opravy díry se zhloubením

(zdroj: vlastní)

Některé průchozí díry, které nejsou příliš hluboké, není třeba zaslepovat, ale přímo je jen opravit. Kdy postup je velice obdobným těm již uvedeným.

Kombinací zacelování, odstraňování poškozených částí sítě, vyhlazování a zrcadlení lze pak dotvořit i velmi složité části modelu, viz (Obrázek 52). Tato vada je tak rozsáhlá, že se velká část sítě musí odstranit. Po odstranění sítě zůstane příliš velký otvor,

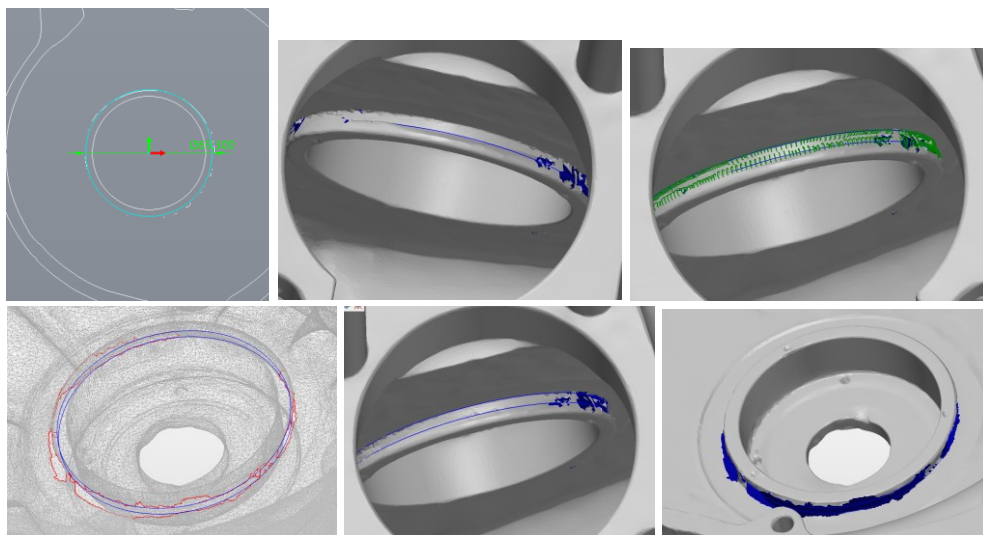
který by se díky komplexnosti tvaru špatně dotvořoval, naštěstí je zde i část nepoškozené sítě, kterou lze na tuto opravu využít (Obrázek 52).



Obrázek 52 Vpravo poškození, vlevo nepoškozená část sítě

(zdroj: vlastní)

Postup opravy je již příliš rozsáhlý, proto bude shrnut a budou zmíněny pouze hlavní kroky. Nejprve se pomocí funkce „Sketch“ vytvoří kružnice v úrovni začátku odsazení a následně pak ve spodní části nalisovaného uložení ložiska klikového hřídele. Tento náčrt se vytvoří na dvou rovinách vytvořených rovnoběžně s rovinou základní – XY. Vytvořené křivky se pak vloží do modelu pomocí funkce „Insert Curves to Polygonal Models“ a to způsobí, že daná síť se přitvaruje kružnicím, vzniknou tak ostré hrany a kostra pro další část opravy. Následně se odstraní vadná síť (Obrázek 53).

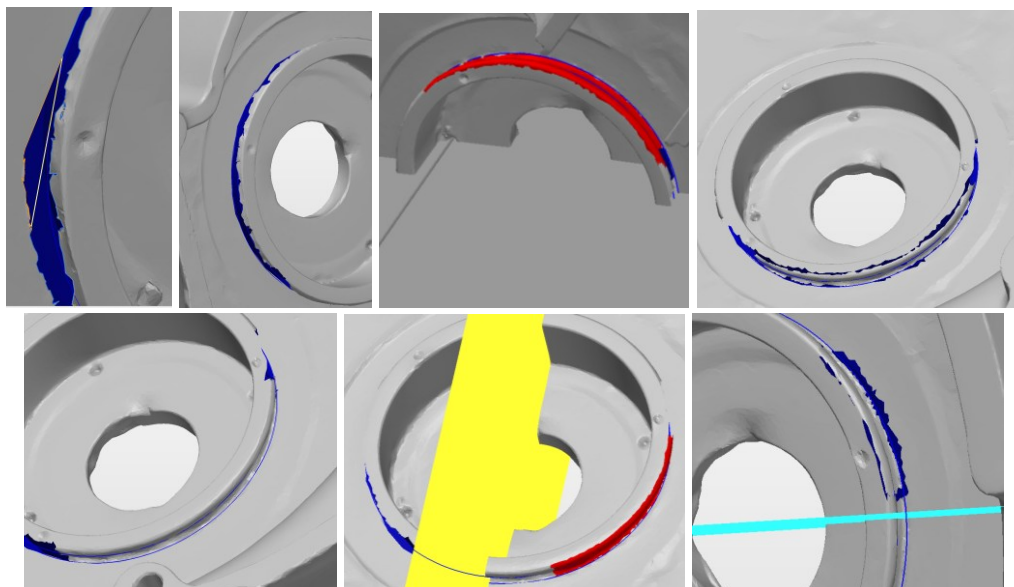


Obrázek 53 Postup opravy uložení ložiska klikového hřídele

(zdroj: vlastní)

Pomocí částečného zacelování, konkrétně „Partial Fill“, se zacelí okraje. Následně se vytvoří rovina, pomocí níž se zrcadlí nepoškozená část sítě – cca čtvrtina uložení ložiska klikového hřídele. Dále se nově vytvořená síť připojí ke stávající, jak již bylo zmiňováno výše.

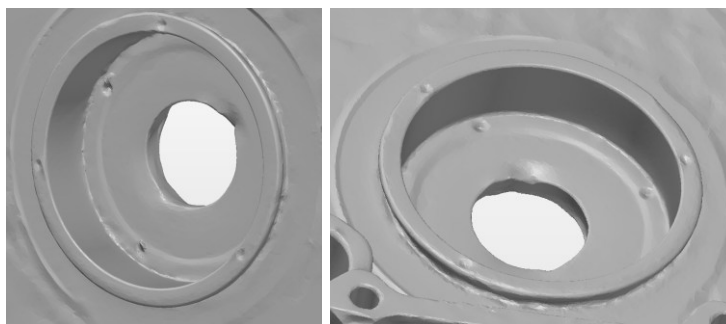
Tato nově vytvořená část se dále zrcadlí přes další rovinu, která je kolmá na tu předešlou a postup se opět opakuje. Nakonec se provede poslední zrcadlení předešlého zrcadlení opět pod novou rovinou, aby se tak zacelil obvod uložení ložiska klikového hřídele (Obrázek 54).



Obrázek 54 Postupné zrcadlení okraje uložení ložiska klikového hřídele

(zdroj: vlastní)

Nakonec se provede částečné vyhlazení (Obrázek 55).



Obrázek 55 Opravená vada chybějícího okraje uložení ložiska klikového hřídele

(zdroj: vlastní)

Vad bylo mnohem více, než je zde zmíněno, proto byly vybrány jen ty neduplicitní a typové vady. Pro odstranění nezmíněných vad byly použity totožné principy a tudíž je zde není třeba dále zmiňovat.

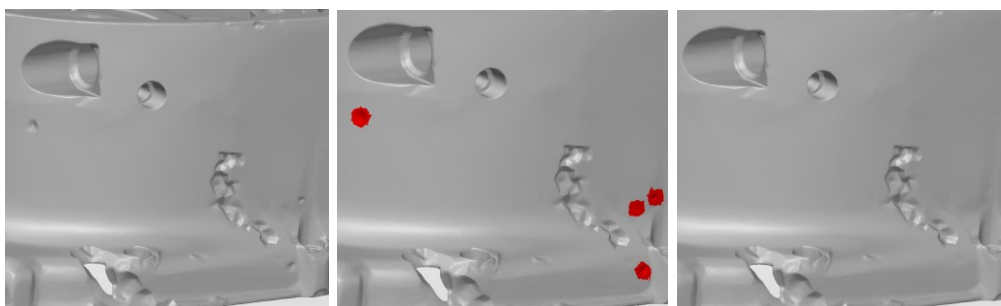
Po zacelení otvorů v modelu, je třeba udělat kompletní vyhlazení polygonní sítě, jelikož zde proběhlo hodně úprav a vyhlazení nemusí být všude zcela dokonalé.

Pro vyhlazení se využila funkce „Smooth Verticales“ pro kompletní model. Intenzita byla nastavena na 70 %.

9.3.2 Oprava vad součástí

Vady součásti jsou povětšinou poškození vzniklé používáním, nejčastěji mechanické opotřebení typu důlek, poškrábaný povrch atd. Další vady mohou být způsobeny např. korozí, mohou vznikat až otvory v součásti. Svary, které byly vytvořeny za účelem opravy dané součásti jsou vlastně taky jakousi vadou, a musí být odstraněny.

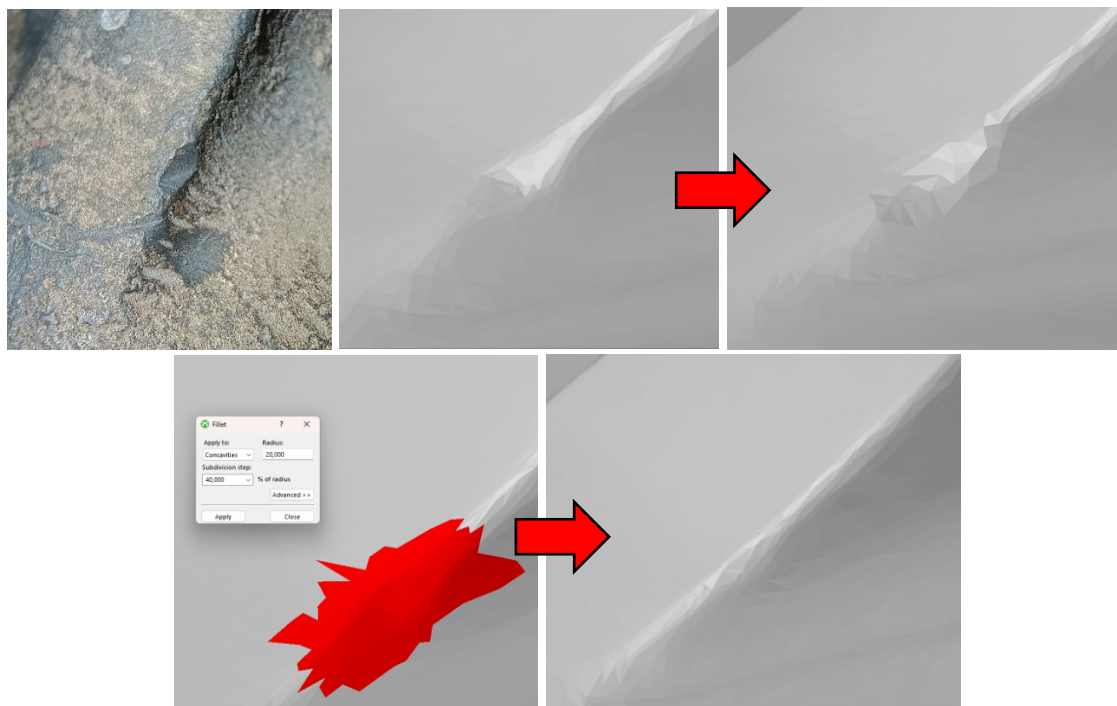
Drobné vady typu důlek či malý výstupek lze opravit pouze pomocí rekonstrukce sítě a v případě potřeby dodatečným vyhlazením (*Obrázek 56*). Těchto vad je na modelu spousta.



Obrázek 56 Oprava drobných vad

(zdroj: vlastní)

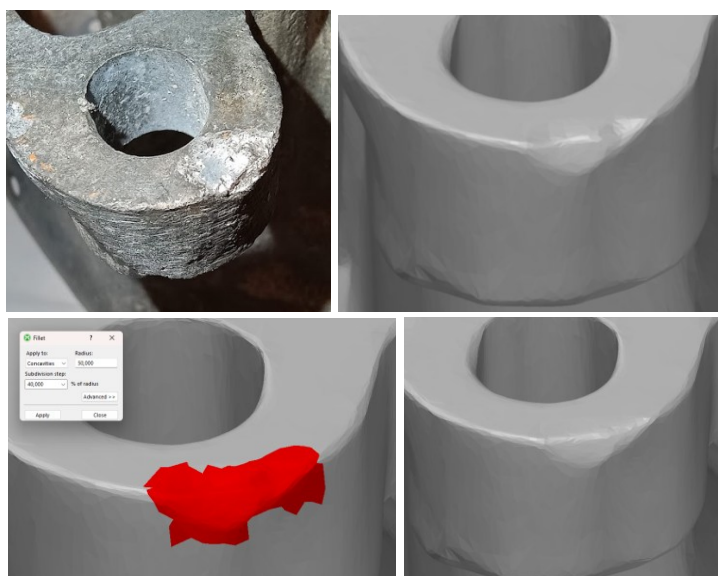
Drobné vady, které se nacházejí v rádiusech součásti nelze opravit pouze rekonstrukcí sítě. Použitím této funkce dojde ke zvětšení vady (*Obrázek 57*). Proto se musí využít kombinace funkcí, či jiné dostupné funkce. Pro opravu takovýchto vad rádiusů je vhodné využít funkce „Edit Fillet Using Rolling Ball Filtering“ – úprava rádiusu pomocí valící se koule. Princip funkce je takový, že koule o určitém poloměru je odvalována po okraji rádiusu a tím software dopočítá vyhlazení přechodů a vytvoří tak plynulejší zaoblení. U funkce se nastavuje velikost poloměru koule, který závisí na velikosti rádiusu a krok dělení, který ovlivňuje především plynulost zaoblení. Po použití této funkce došlo k mnohem lepším výsledkům. Nakonec se použilo částečné vyhlazení (*Obrázek 57*).



Obrázek 57 Nahoře použití rekonstrukce sítě, dole využití úpravy rádiusů

(zdroj: vlastní)

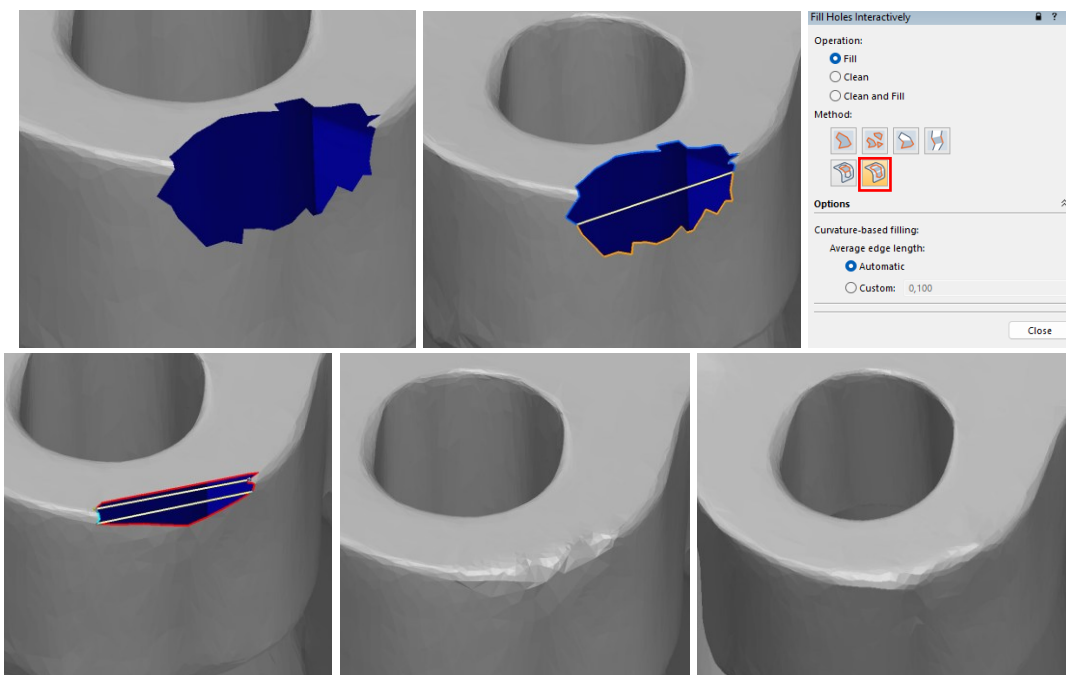
Předchozí metoda je ideální pro méně poškozené rádiusy, pokud ale je zaoblená hrana poškozena příliš, již nejde použít. Na příkladu níže (Obrázek 58) lze vidět znatelně větší poškození, které potřeba opravit, jelikož předešlá metoda tento problém neřeší, je třeba vadnou část sítě odstranit a částečně zacetit.



Obrázek 58 Nahoře vada, dole neúspěšné použití úpravy rádiusu

(zdroj: vlastní)

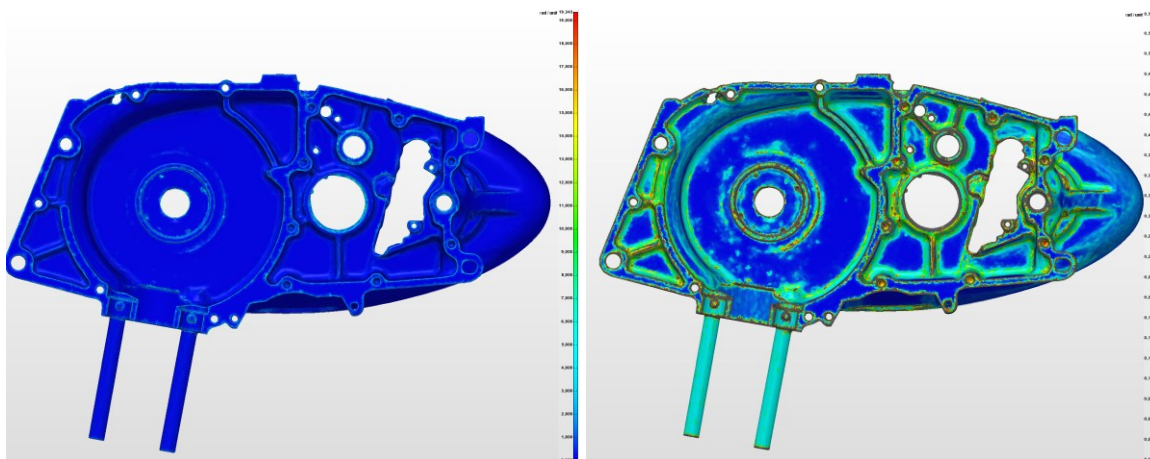
Okolí hrany se nejprve částečně zacelí. Pro vytvoření zaoblené hrany lze využít metodu, která je zahrnuta pod operací „Fill“. Název této funkce je „Fillet and Surroundings Filling“ – zaoblení a vyplnění okolí. Jak již název vypovídá, funkce vytvoří rádius v místech, které se vyznačí dvěma přímkami a okolí zacelí. Jako poslední krok je využití částečného vyhlazení (Obrázek 59).



Obrázek 59 Postup opravy vady pomocí funkce „Fillet and Surroundings Filling“

(zdroj: vlastní)

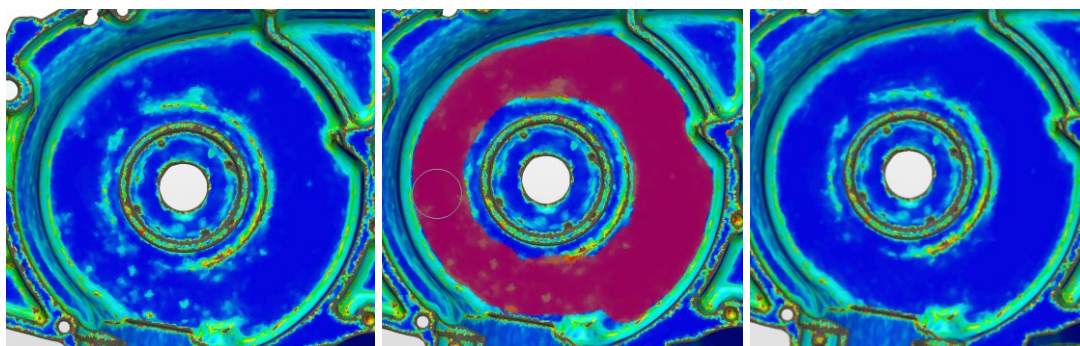
Po odstranění všech malých okem viditelných vad je třeba provést kontrolu nerovností, zda něco nebylo přehlédnuto. Kontrola se provede přepnutím zobrazení ze šedé (barva materiálu) na „Curvature“ – zakřivení. Toto zobrazení díky škále velikosti rádiusů od nuly po maximální hodnotu vykreslí místa se zakřivením. Po úpravě maximální hodnoty na optimální hodnoty, kdy vyniknou všechny rádiusy proběhne kontrola a případné vyhlazení a jiné opravy (Obrázek 60). Maximální hodnota byla nastavena na velikost 0,549 radiánu. Tato hodnota se zjistila postupným snižováním, dokud nevynikly všechny rádiusy.



Obrázek 60 Vlevo zobrazení se zakřivením, vpravo s upravenou max. hodnotou

(zdroj: vlastní)

Lze vidět, že v pravé části modelu, u uložení ložiska klikového hřídele, se nachází zelené oblasti v oblasti modré, kdy modrá barva značí nulové zakřivení. Zelené oblasti je třeba odstranit, jelikož dle škály se jedná o zakřivení kolem menší hodnoty 0,2 radiánu, a proto bude stačit využít vyhlazení. Celá oblast se musí označit, aby mohla být sjednocena, následně se využije 50% funkce vyhlazení. Výsledek lze vidět níže (Obrázek 61).



Obrázek 61 Vyhlazení nerovností

(zdroj: vlastní)

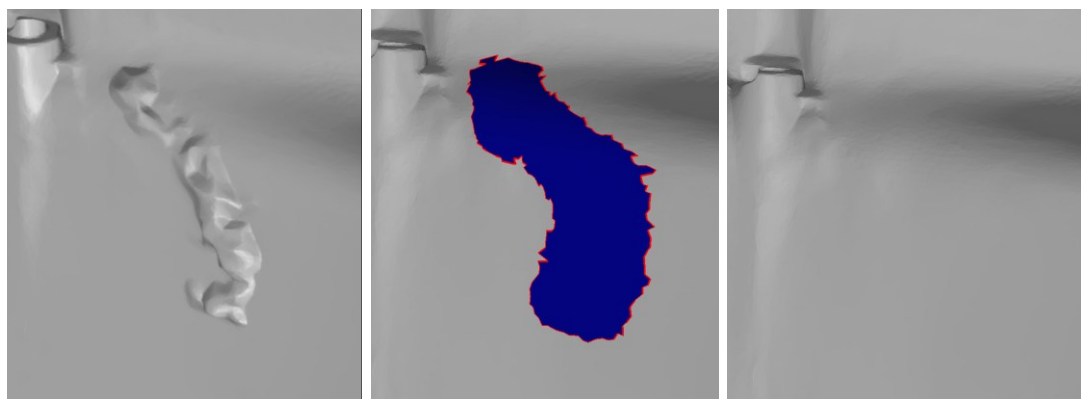
Po odstranění všech drobných nerovností bylo třeba odstranit ty největší vady. Počínaje zkorodovanými částmi, svary a jinými velkými vadami. Pro začátek se odstranily části zkorodované, kdy působením tohoto jevu došlo k odstranění velkého množství materiálu (Obrázek 62).



Obrázek 62 Vady způsobené korozí

(zdroj: vlastní)

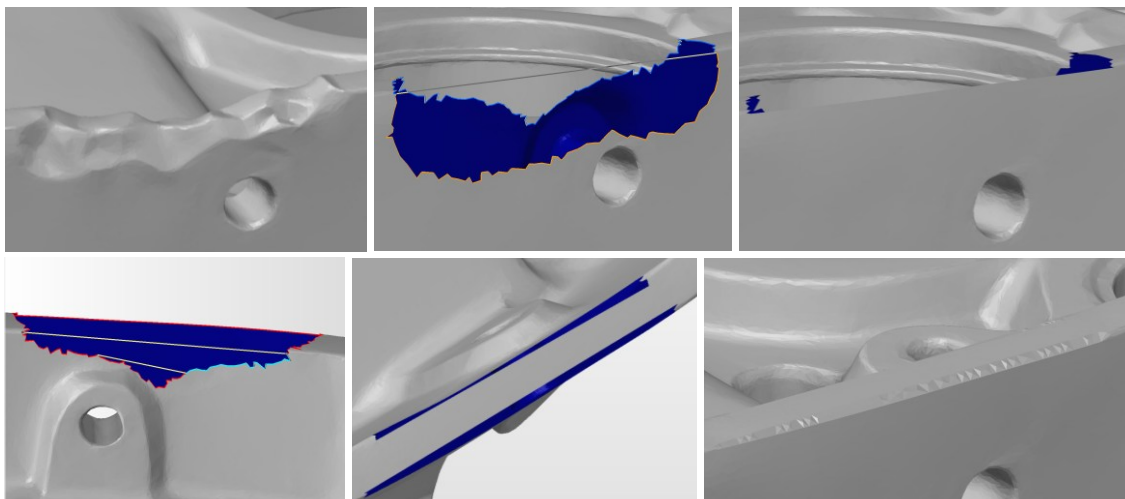
První vadu (*Obrázek 62*) nebylo nijak problematické odstranit. Pomocí odstranění vadné části sítě a následného použití „Clean and Fill“ se zakřivením, došlo k velmi kvalitnímu zacelení (*Obrázek 63*).



Obrázek 63 Postup opravy první vady

(zdroj: vlastní)

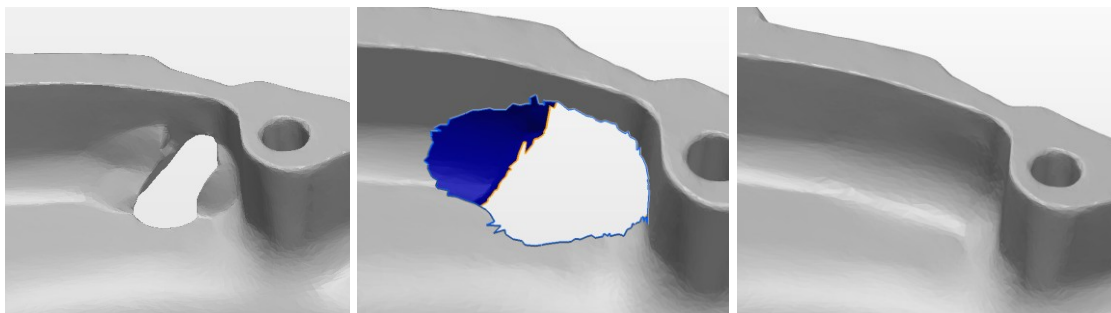
Druhá vada (*Obrázek 62*) byla na odstranění náročnější. Stejně tak jako u vady první, došlo k odstranění vadné části sítě a následovalo zacelení. Vada se nacházela v místě, kde na sebe navazovaly tři plochy, takže bylo třeba využít částečné zacelování. „Partial Fill“ byl použit jako první, nicméně bylo potřeba využít i „Gap Filling“ a také „Fill and Clean“. Pro zacelení s rozumným výsledkem bylo testováno několik kombinací těchto funkcí, kdy nejlepší výsledek přinesla kombinace na následujícím obrázku (*Obrázek 64*). Lze vidět, že hrana není dokonalá (využití „Fill“), nevadí to, protože posléze bude odsazena (vytvoření přídávku). Samotný přídavek pak bude odstraněn v dalším postupu.



Obrázek 64 Postup opravy druhé vady

(zdroj: vlastní)

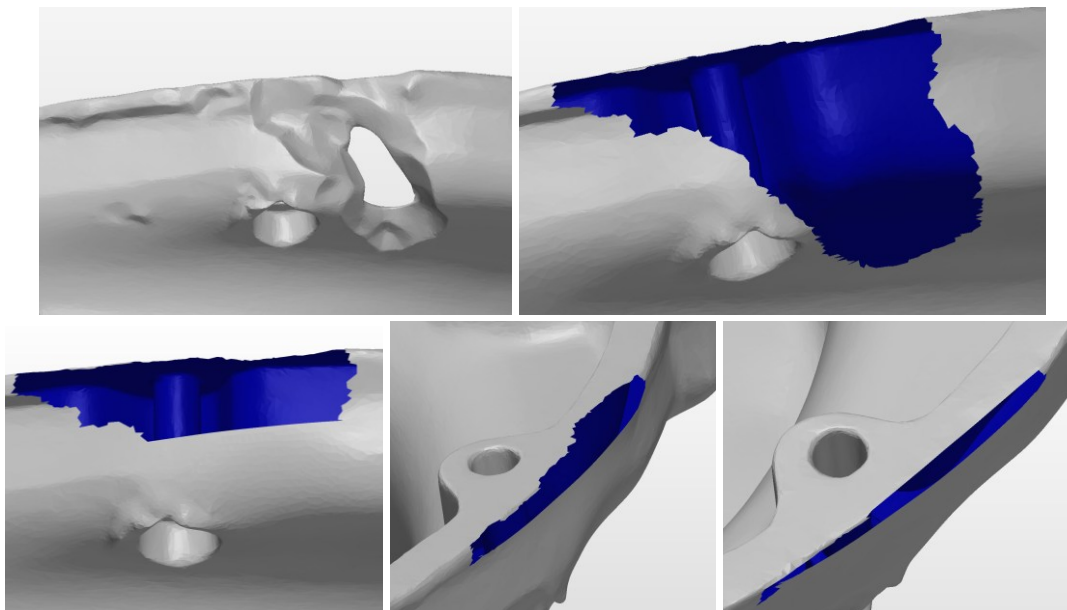
Oprava třetí vady (Obrázek 62) byla nejvíce komplikovaná. Vadná část sítě byla odstraněna z vnitřní i vnější strany. Vnitřní část byla zacelena pomocí „Clean and Fill“ se zakřivením a následně byla vyhlazena 20% vyhlazením. Vnitřní část byla tedy úspěšně opravena (Obrázek 65).



Obrázek 65 Oprava vnitřní části třetí vady

(zdroj: vlastní)

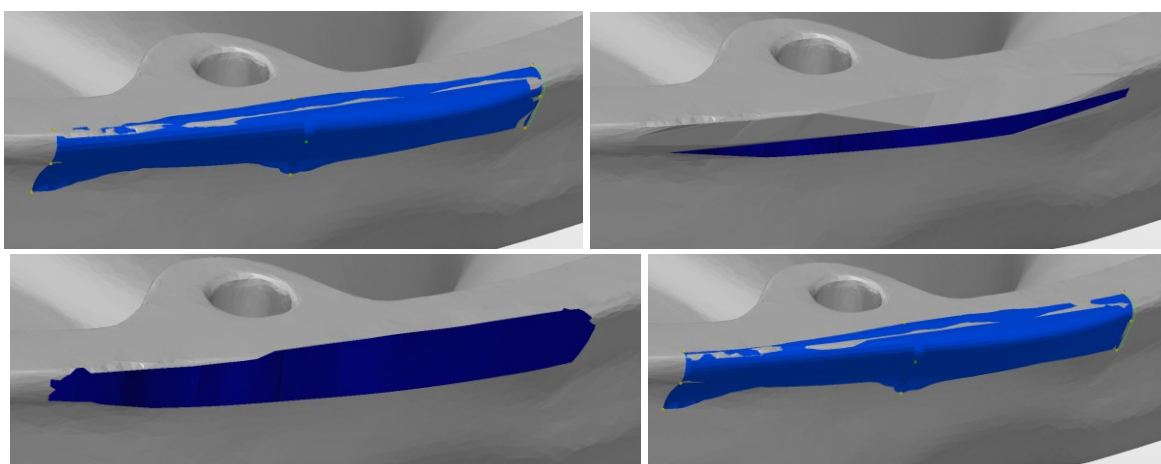
Po odstranění vnější části vadné sítě vznikl velmi velký otvor, který bylo problematické zacelit správně. Pomocí částečného zacelení, rekonstrukce sítě a vyhlazení se podařilo otvor částečně zacelit (Obrázek 66). Zbylá část i po mnoha pokusech o částečné zacelování stále nenavazovala správně na zbytek modelu, proto bylo nutné použít jiný způsob opravy.



Obrázek 66 Částečná oprava třetí vady

(zdroj: vlastní)

První byla vyzkoušena funkce „Fill Holes using Rectangular Surfaces“. Tato funkce vytvoří plochu ve vybrané části sítě, a následně pomocí této plochy se pokusí zacelit otvor. Plocha lépe předpovídá, jak by měl vypadat chybějící povrch než klasické způsoby zacelování. Metoda se jevila jako neúspěšná, proto bylo výsledné zacelení odstraněno, ale plocha byla ponechána. Plocha se funkcí „Fitt Surfaces onto Models“ přizpůsobila síti pod ní, aby lépe vykopírovala povrch modelu (Obrázek 67).

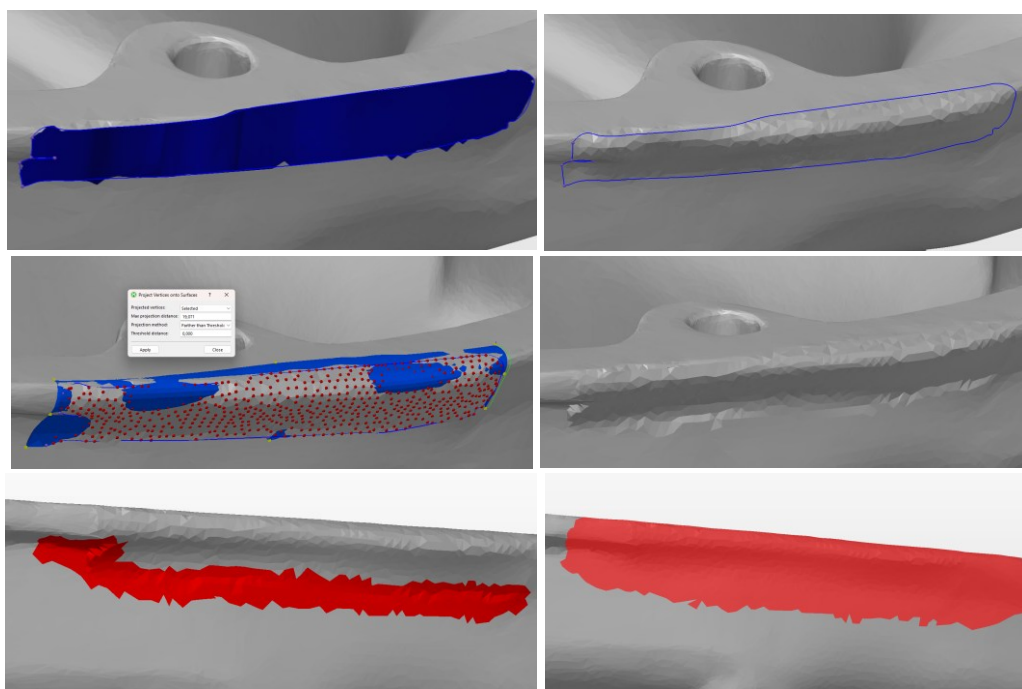


Obrázek 67 Nahoře neúspěšné zacelení, dole přizpůsobená plocha síti

(zdroj: vlastní)

Následně se zvětšil otvor a vytvořily se jeho hranice pomocí křivek – „Create Boundary Curves“, otvor se následně zacelil funkcí „Fill“. Pomocí filtru byly vybrány body sítě

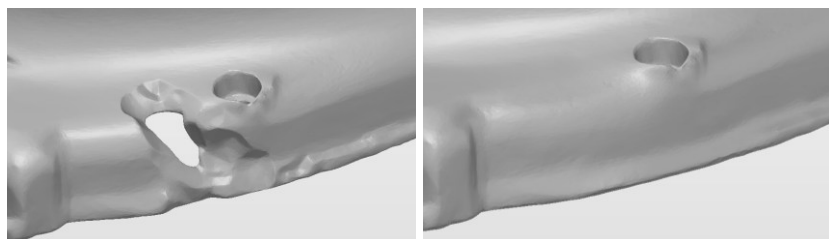
(ne TR) v oblasti ohraničené křivkami. Body byly následně projektovány na plochu pomocí funkce „Project Vertices onto Surface“ metodou „Farther than Threshold“. Metoda posouvá pouze body ve větší vzdálenosti, než je zadaná hodnota, ostatní body se neposouvají. Touto hodnotou byla hodnota nula, tím došlo k posunutí všech bodů na vytvořenou plochu. Metoda také dokáže zobrazit, jak moc se posunuté body odchyľují od plochy – jak přesně kopírují plochu. Touto funkcí bylo docíleno lepšího napojení na zbytek sítě, nicméně ještě bylo potřeba použít v určitých místech rekonstrukci sítě a následně bylo třeba celý opravovaný povrch vyhladit (Obrázek 68).



Obrázek 68 Postup doopravení třetí vady

(zdroj: vlastní)

Dosažený výsledek je mnohem lepší, než se očekávalo. Porovnání před a po opravě lze vidět na obrázku níže (Obrázek 69).



Obrázek 69 Vada před a po opravě

(zdroj: vlastní)

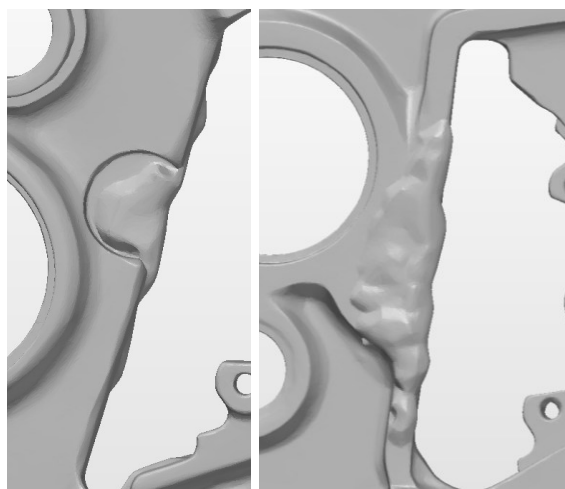
Poslední nutnou opravou bylo odstranit opravovaná místa svary. Svary byly konkrétně na dvou místech (*Obrázek 70*). První místo se nacházelo na boční stěně skříně a druhé uvnitř v zadní části. Místo s menším svarem bylo v podobném umístění jako u předešlé vady druhé čili postup opravy byl obdobný a již nebude zmiňován. Další fokusace byla na odstranění druhého, většího svaru.



Obrázek 70 Vlevo svar na stěně, vpravo svar uvnitř (seshora a zespoda)

(zdroj: vlastní)

Pro porovnání naskenovaná část skříně se svarem v softwaru PolyWorks (*Obrázek 71*).

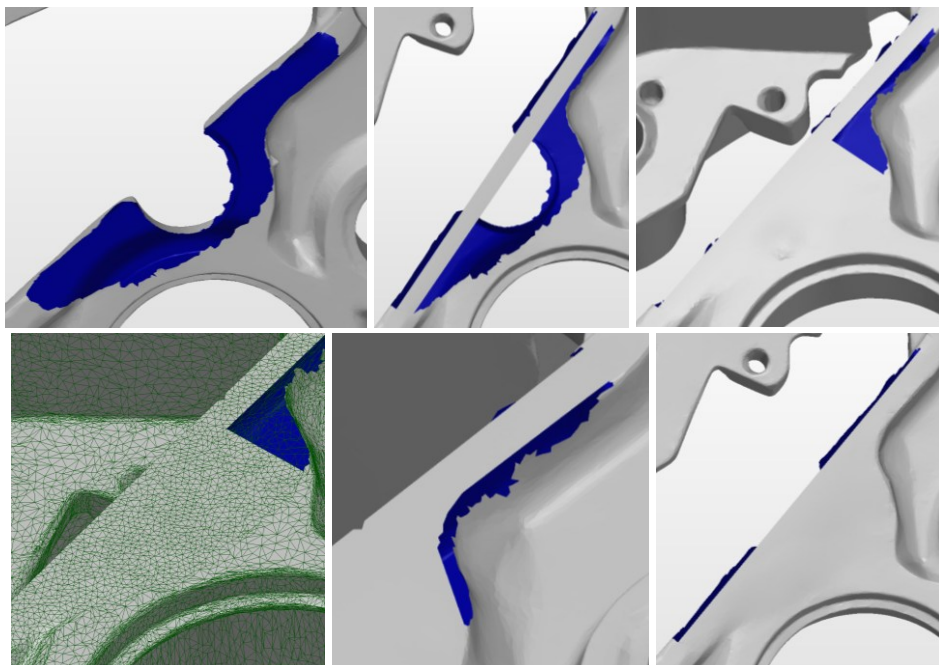


Obrázek 71 Svar v softwaru PolyWorks

(zdroj: vlastní)

Stejně jako u jiných rozsáhlých vad, se nejprve provede odstranění části sítě, konkrétně část se svarem. Následně se ze spodní strany skříně (tam kde je většina sváru) provedlo částečné zacelení. Nejprve se pomocí funkce „Gap Filling“ vytvořila rovná část sítě, od které se pak odvíjelo další zacelování, nejčastěji „Partial Fill“. Po částečném zacelení

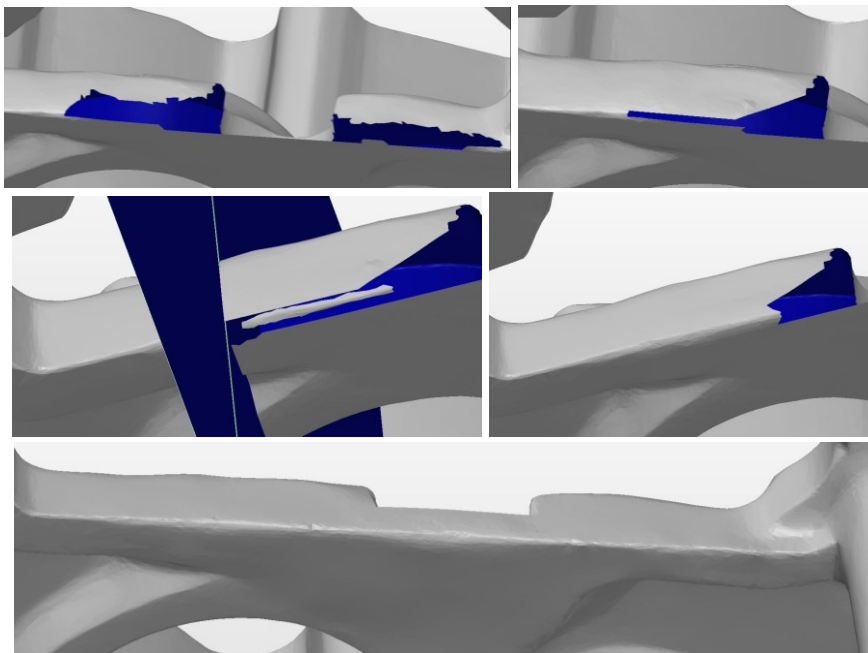
se provedla kontrola sítě, zda se nevytvořily nějaké větší nerovnosti, popřípadě došlo k jejich odstranění pomocí rekonstrukce sítě, či vyhlazení. Zbylý chybějící rádius se pomocí funkce „Fill“ zacelil a následně proběhlo 30% vyhlazení (Obrázek 72).



Obrázek 72 Postup odstranění svaru ze spodní strany

(zdroj: vlastní)

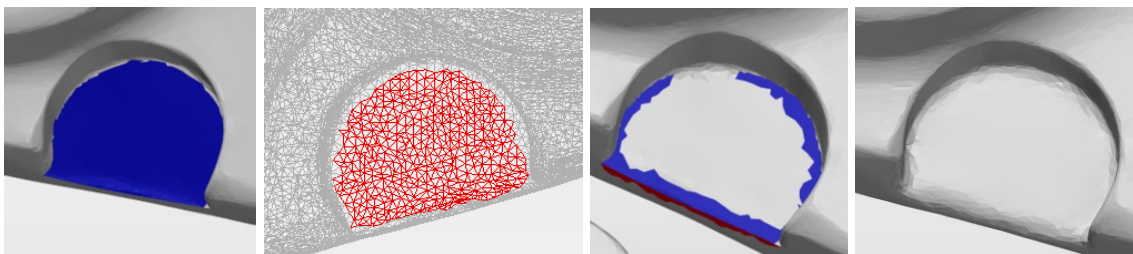
Po dokončení spodní části bylo potřeba opravit boční stěnu. Provedlo se několik částečných zacelení pomocí obou metod zmiňovaných při předešlé části opravy. Poté bylo třeba dodělat rádius mezi boční stěnou a spodní opravovanou plochou. Samotný rádius nešel vytvořit funkcemi pro zacelování, proto musely být postupně tvořeny roviny, kolmé na boční stěnu, pomocí kterých se části rádiusu zrcadlily (Obrázek 73). K dispozici byla totiž jen krátká část rádiusu, tudíž nešlo provést pouze jedno zrcadlení. První rovinu bylo nutno natočit pomocí osy rotace vytvořené na rovině a od této roviny, správně natočené, již byly ostatní roviny jen odsazovány. Počáteční rovina byla vytvořena od roviny XZ. Zpracování nově vzniklých částí sítě zrcadlením, bylo již zmiňováno dříve, postup byl stejný i zde, a tudíž to nebude dál popisováno.



Obrázek 73 Postup opravy boční stěny

(zdroj: vlastní)

Po dokončení rádiusů a jejich okolí zbývalo jen zacetit zafrézování. Pouhým „Fill“ či „Clean and Fill“ to nebylo možné, vznikala prohlubeň místo roviny, proto bylo opět použito funkce zrcadlení, jelikož naproti byla již nově vytvořená rovná plocha. Nejprve se vytvořila rovina rovnoběžná s XY. Následně bylo přepnuto zobrazení na „Wireframe“ – drátové, aby bylo možno vyznačit jen tu část sítě, kterou je třeba zrcadlit. Poté se provedlo pár zrcadlení na zkoušku, aby se zjistilo, zda je rovina ve správné vzdálenosti. Nakonec se zrcadlená část sítě připojila k modelu a zacetily se zbylé chybějící části zafrézování. Dodatečně se provedlo vyhlazení (Obrázek 74).



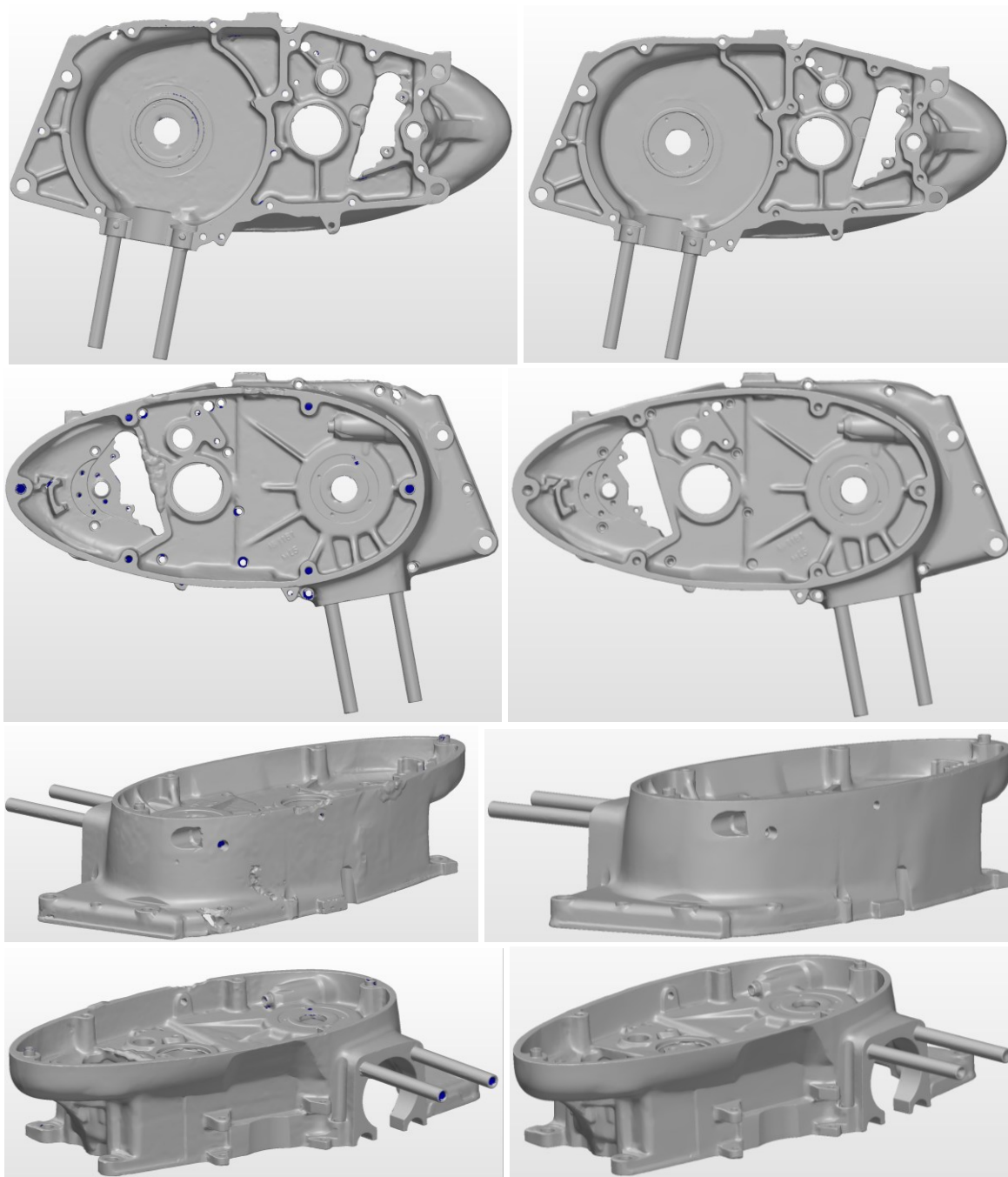
Obrázek 74 Postup opravy zafrézování

(zdroj: vlastní)

Posledním krokem bylo provedení vyhlazení celého modelu – „Smooth Verticales“, stejně tak jako u předešlé podkapitoly.

9.3.3 Porovnání před a po úpravách

V této kapitole jsou vyobrazeny změny, které byly provedeny při opravě polygonní sítě dílce (Obrázek 75). Srovnání je v pořadí před a po opravě.



Obrázek 75 Srovnání před a po opravě polygonní sítě dílce

(zdroj: vlastní)

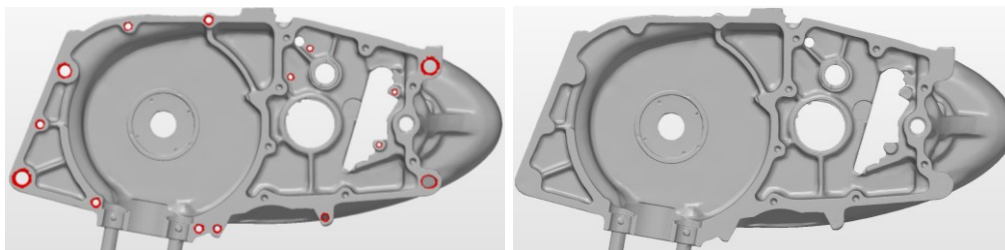
9.4 Technologický polygonní model odlitku

Opravený polygonní model, upravený do podoby, která neobsahuje žádné obráběné plochy a žádné další součásti, které nejsou součástí odlitku skříně. Funkční plochy musí obsahovat přídatky na obrábění.

9.4.1 Odstranění obráběných povrchů

Snímaná součást – skříň obsahuje především spoustu obráběných děr, které je ovšem obtížné nasnímat. Hluboké díry lze jen problematicky opravit a proto byly v předešlé kapitole zaslepovány. Ty díry, které byly průchozí a správně nasnímány, často trpěly na opotřebení, které značně ovlivnilo jejich tvar. Z těchto důvodů bylo třeba díry zcela zaslepit a posléze je vytvořit znova, již klasickou cestou – v CAD softwaru.

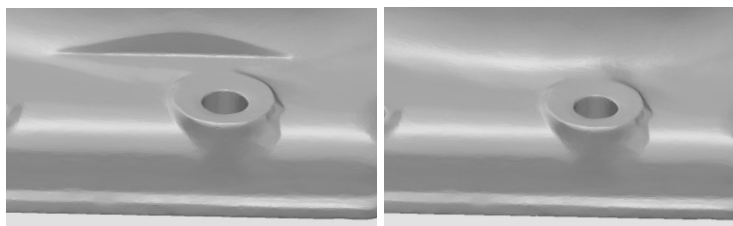
Všechny díry byly nejprve odstraněny. Díry ležící na rovné ploše byly zaceleny pomocí funkce „Clean and Fill“ (Obrázek 76) a u těch co ležely na ploše členitější se provedlo postupné zacelování. V některých případech bylo zapotřebí využít i zrcadlení.



Obrázek 76 Zacelení několika děr

(zdroj: vlastní)

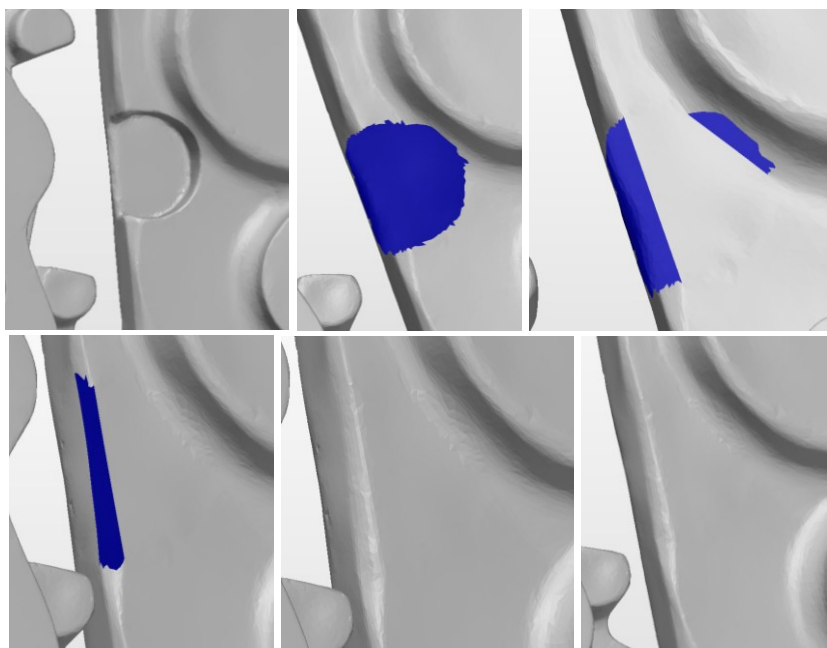
Díry nebyly jediné obráběné plochy k odstranění, nacházelo se zde i několik zafrézování. Ty bylo nejjednodušší odstranit úplně, stejně tak jako díry. Způsob odstranění byl velmi podobný, nejprve došlo k odstranění této části polygonní sítě a následně došlo k zacelení. V prvním případě na obrázku níže došlo pouze k rekonstrukci sítě (Obrázek 77).



Obrázek 77 Odstranění zafrézování pomocí rekonstrukce sítě

(zdroj: vlastní)

Náročnější odstranění zafrézování obsahovalo využití funkcí „Gap Filling“, „Partial Fill“, „Clean and Fill“, rekonstrukci sítě a částečné vyhlazení (Obrázek 78).



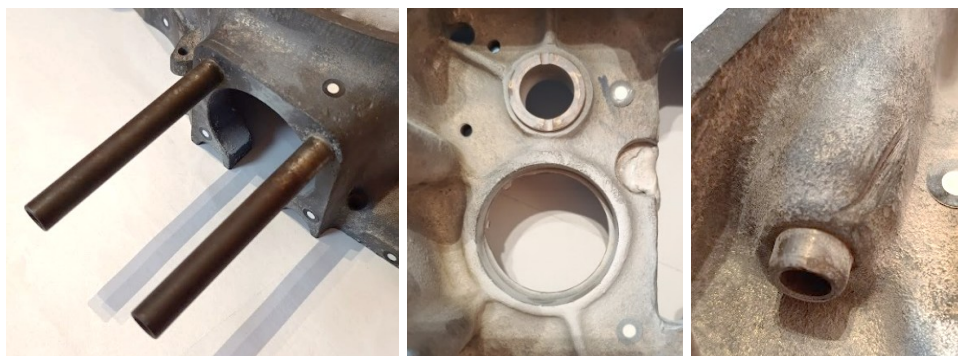
Obrázek 78 Odstranění zafrézování komplexní metodou

(zdroj: vlastní)

Oprav v tomto duchu bylo provedeno několik, proto již zde nebudou dále zmiňovány.

9.4.2 Odstranění nadbytečných součástí

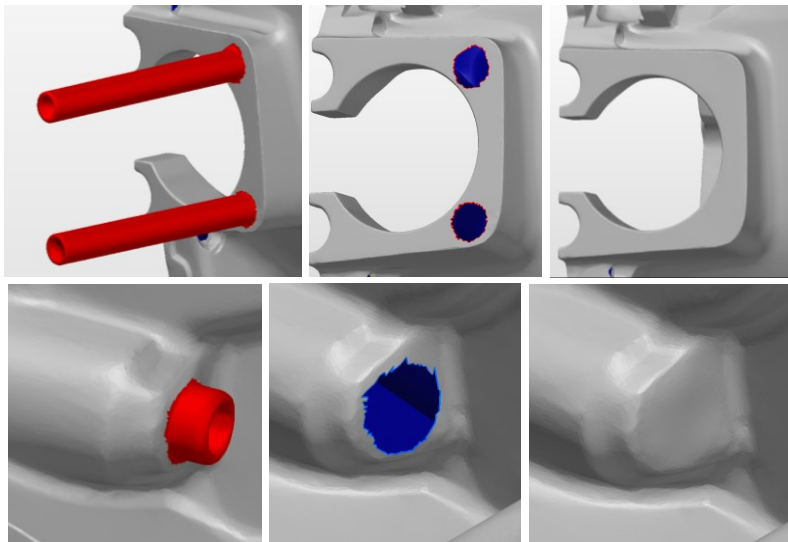
Na nasnímaných datech lze vidět několik součástí, které nebyly před skenováním odstraněny ze skříně. Jedná se například o svorníky hlavy válce, pojistný kroužek, uložení ložiska klikového hřídele, kluzné ložisko atd. (Obrázek 79). Všechny tyto díly jsou zde navíc a proto je byla potřeba odstranit.



Obrázek 79 Příklad součástí, které nejsou součástí odlitku skříně

(zdroj: vlastní)

Postup odstranění součástí je obdobný jako u odstraňování děr. Nejprve se vyznačí součásti k odstranění, odstraní se a následně se provede zaslepení vzniklého otvoru, nejčastěji pomocí funkce „Clean and Fill“ (Obrázek 80).

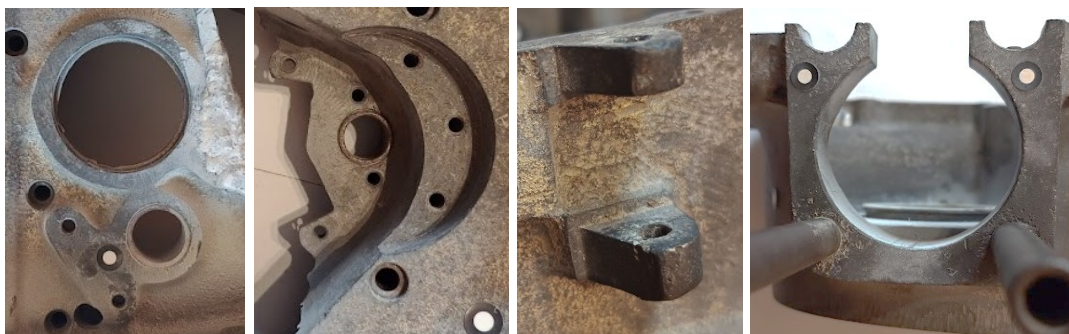


Obrázek 80 Dva příklady odstranění nadbytečných součástí

(zdroj: vlastní)

9.4.3 Tvorba přídavků na obrábění

Rovné frézované plochy bylo potřeba opatřit přídavkem na obrábění. Pro zaručení rovinnosti, a rovnoběžnosti s jinými frézovanými plochami se musí tyto plochy dokončit v klasickém CAD softwaru – parametricky a to bez tohoto přídavku lze problematicky. Přídavek činil na každé takovéto ploše 2 mm. Většinou se jednalo o plochy dosedací, např. dosedací plocha víka, otvor válce, dosedací plochy šroubů, ložisek atd. (Obrázek 81).

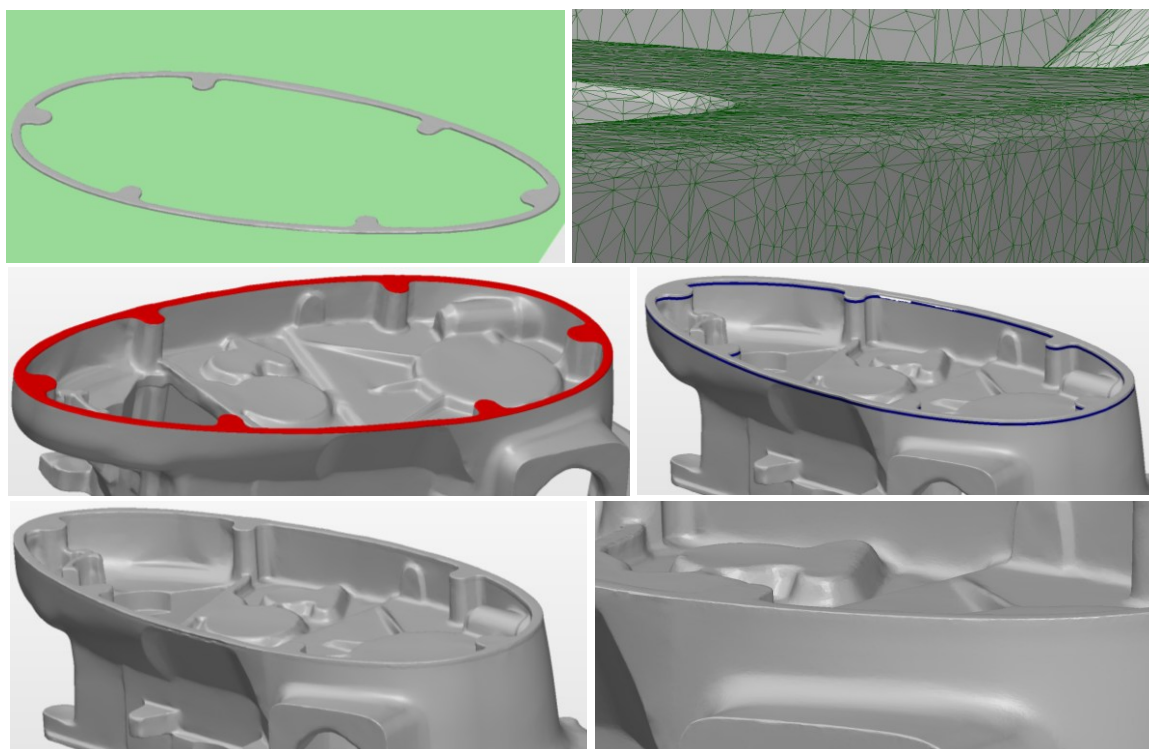


Obrázek 81 Příklady frézovaných povrchů skříně

(zdroj: vlastní)

Princip úpravy polygonní sítě byl takový, že se nejprve vytvoří rovina rovnoběžná s rovinou souřadného systému a posune o 2 mm směrem do modelu. Využije se intersekcce a vyznačí se část sítě pouze nad rovinou. Tato část sítě se odsadí o 2 mm směrem od modelu a vzniklá mezera se zacelí, následně se zacelení vyhladí, aby došlo k plynulému napojení odsazené části od stávajícího modelu.

Ideální příklad je tvorba přídavku na dosedací ploše víka. Nejprve byla vytvořena rovina rovnoběžná s rovinou XY a následně se posunula o 2 mm směrem do modelu. Následně se provedla intersekcce pomocí této roviny funkcí „Slice with Plane“, zároveň se zobrazila síť. Po aplikaci této funkce vznikne intersekční čára (Obrázek 82). Následoval výběr sítě nad touto intersekcí o její odsazení o 2 mm směrem od modelu pomocí funkce „Offset“. Nově vzniklá část sítě se musí připojit stejně tak jako síť vytvořená pomocí zrcadlení. Funkcí „Fill“ se uzavře síť a následně se tento viditelný spoj vyhladí částečným vyhlazením – 100% (Obrázek 82).



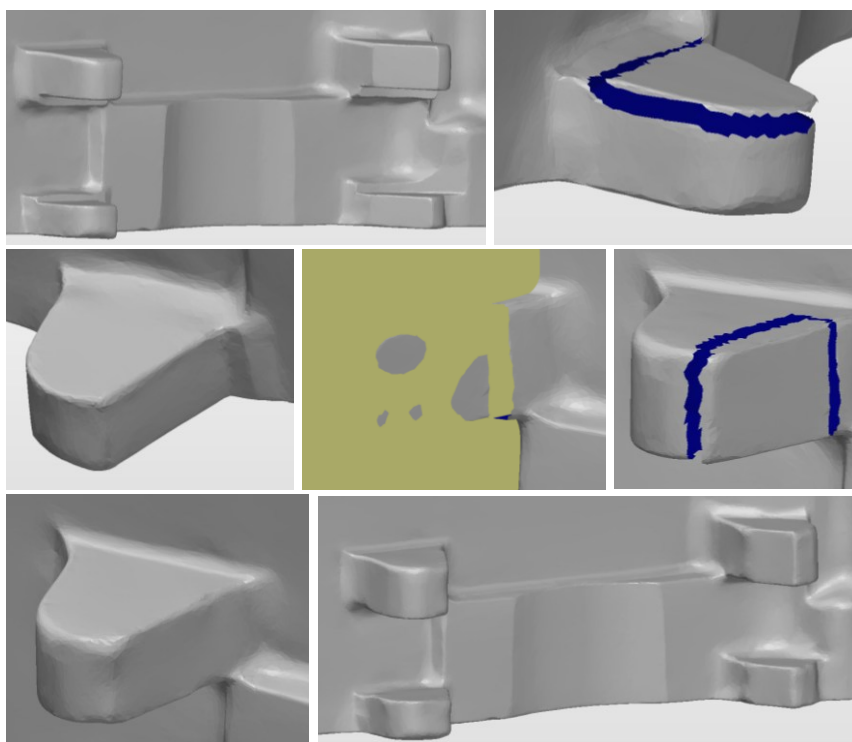
Obrázek 82 Postup tvorby 2 mm přídavku na dosedací ploše víka

(zdroj: vlastní)

Druhá dělicí rovina se upraví naprosto totožně.

Komplikovanější případ vzniká, když některé z odsazovaných stěn na sebe navazují (jeden je vodorovný druhý kolmo na něj svisle) a nejsou ani rovnoběžné s žádnou rovinou

(Obrázek 83). Nejedná se o dělicí rovinu čili nelze využít funkce intersekce. Přídavek se tedy nejprve vytvořil na jedné z ploch (nejprve vodorovné) a to velmi podobně jako u příkladu minulého, až na to, že nebylo využito intersekce. Vznikla část sítě tedy není zarovnaná, kopíruje TR sítě. Zacelení probíhá stejně. Svislá plocha kolmá na již vytvořenou plochu s přídavkem je složitější. Nejprve se musí vytvořit rovina, například pomocí funkce „Fit Plane using Elements“. Vyznačila se část sítě na svislé ploše a poté se použila tato funkce, tím došlo k co nejlepšímu přizpůsobení roviny této vyznačené části sítě. Dál již následoval klasický postup tvorby přídavku. Tento způsob se provedl pro všechny čtyři části držáku třmenu dynamu (Obrázek 83). Vytvořené přídavky odpovídaly 2 mm.



Obrázek 83 Postup tvorby přídavků komplikovanějšího případu

(zdroj: vlastní)

9.4.4 Optimalizace polygonní sítě

Po dokončení všech úprav polygonní sítě bylo zapotřebí provést její optimalizaci. Optimalizace slouží pro lepší pokrytí modelu sítí, tzv. na rovných plochách není potřeba velké množství TR, ale při velkých změnách zakřivení je naopak třeba množství větší. Rovné plochy by měly být pokryty většími TR o malém počtu, není totiž potřeba popisovat složité tvary. Zakřivení a komplexní plochy pokryty velkým množstvím malých TR

jsou lépe popsány, rádiusy jsou tak hladší s plynulými přechody. Dojde také k minimalizaci ostrých hran a prudkých změn normál jednotlivých TR. Těmito úpravami se krom lepšího popisu polygonní sítě změní velikost souboru STL.

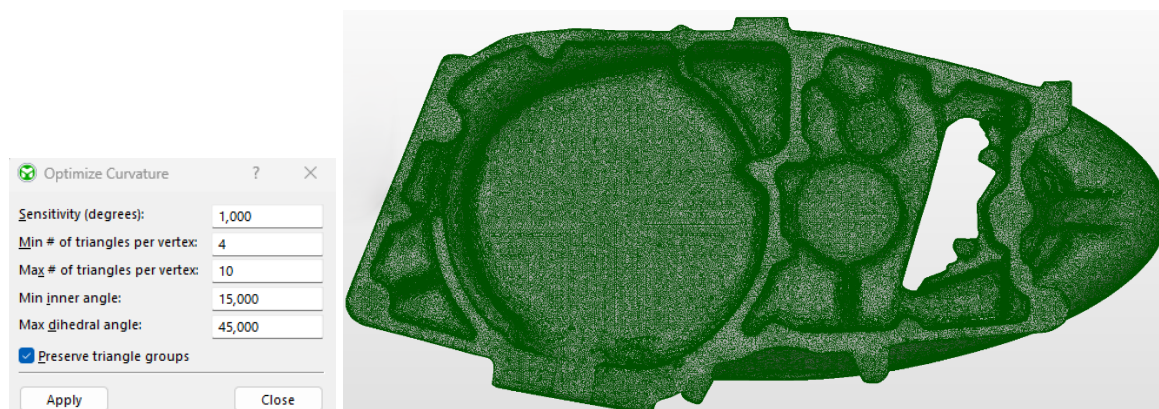
Na obrázku níže jsou uvedeny použité optimalizační funkce (Obrázek 84). Nejprve byla použita třetí, následně první, dále druhá a nakonec poslední čtvrtá zleva.



Obrázek 84 Funkce využité k optimalizaci sítě

(zdroj: vlastní)

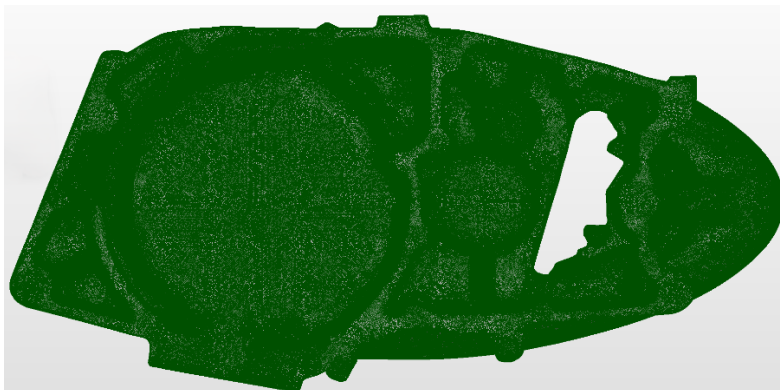
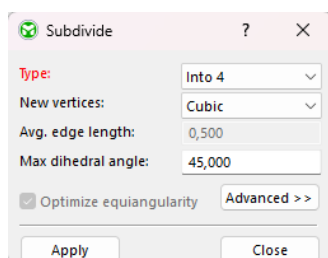
Průběh optimalizace polygonní sítě je následující. Nejprve je provedena optimalizace křivosti, ta minimalizuje hrubé přechody či nerovnosti. TR změni svou orientaci a rozmístění, aby bylo docíleno hladšího povrchu. V určitých místech může dojít ke změně hustoty TR. K tomuto slouží funkce „Optimize Curvature“ (Obrázek 85).



Obrázek 85 Použití optimalizační funkce „Optimize Curvature“

(zdroj: vlastní)

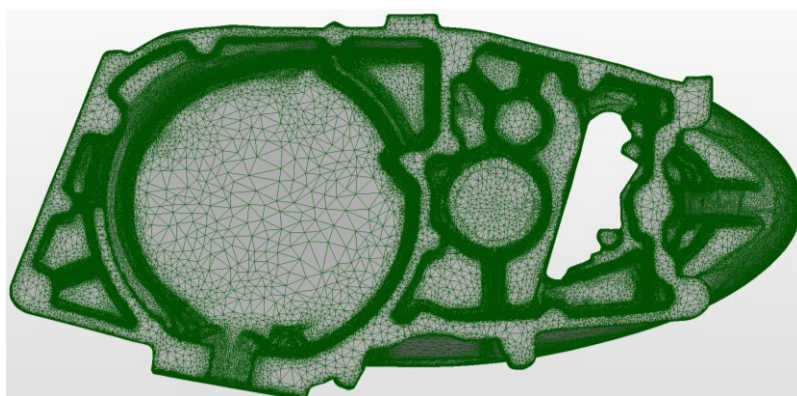
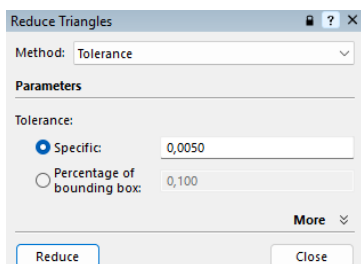
Následující krok rozdělí TR na menší části, tímto dojde ke zvýraznění detailů a zvětšení hustoty TR. V softwaru PolyWorks k tomu slouží funkce „Subdivide“. Tato funkce může rozdělit každou hranu TR na dvě a tím vytvoří čtyři další TR nebo lze využít adaptivní metodu, která změni hustotu TR v různých částech automaticky dle potřeby. V tomto případě došlo k rozdělení každé hrany TR na dvě čili se počet TR zečtyřnásobil (Obrázek 86).



Obrázek 86 Použití optimalizační funkce „Subdivide“

(zdroj: vlastní)

Předposledním krokem je snížení počtu TR v polygonní síti. Funkce k tomuto úkonu se nazývá „Reduce Triangles“. Software automaticky vyhodnotí, na kterých plochách lze TR sloučit a zmenšit tak jejich počet, tak aby nedošlo ke ztrátě detailů. Na plochých površích dochází k velké redukci počtu TR, kdyžto v oblastech kde dochází k velkému zakřivení nikoliv. V této funkci se nastavuje pouze tolerance, která ovlivňuje změnu tvaru polygonní sítě vlivem snížení počtu TR. Volená hodnota odpovídala 0,005 mm, kdy defaultní hodnota byla 0,05 mm. Kdyby nedošlo ke zmenšení tolerance, model by se vrátil do podobné podoby jako byl před zvětšením množství TR, což je nežádoucí. Polygonní síť takto zanechala velmi dobře popsaná velká zakřivení, kdežto na velkých rovných plochách došlo k redukci TR (Obrázek 87).

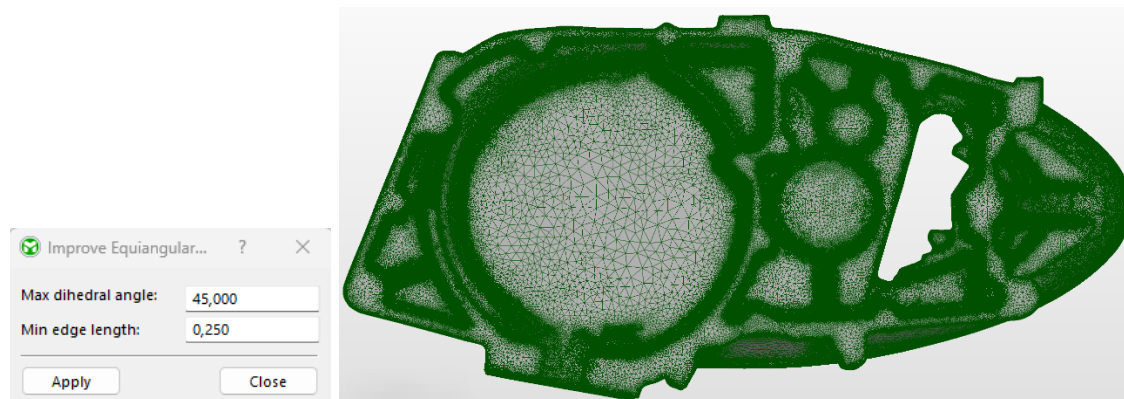


Obrázek 87 Použití optimalizační funkce „Reduce Triangles“

(zdroj: vlastní)

Posledním krokem při optimalizaci polygonní sítě je rovnostranost TR. K této úpravě slouží funkce „Improve Equiangularity“. Funkce je taková, že software prozkoumá všechny TR polygonní sítě a identifikuje ty, které nejsou rovnostranné (mají příliš ostré nebo tupé úhly).

Těmto TR jsou posunuty vrcholy tak, aby se úhly co nejvíce přibližovaly rovnostranného stavu (všechny tři úhly = 60°). Použitím této funkce dochází k lepší distribuci sítě (Obrázek 88).

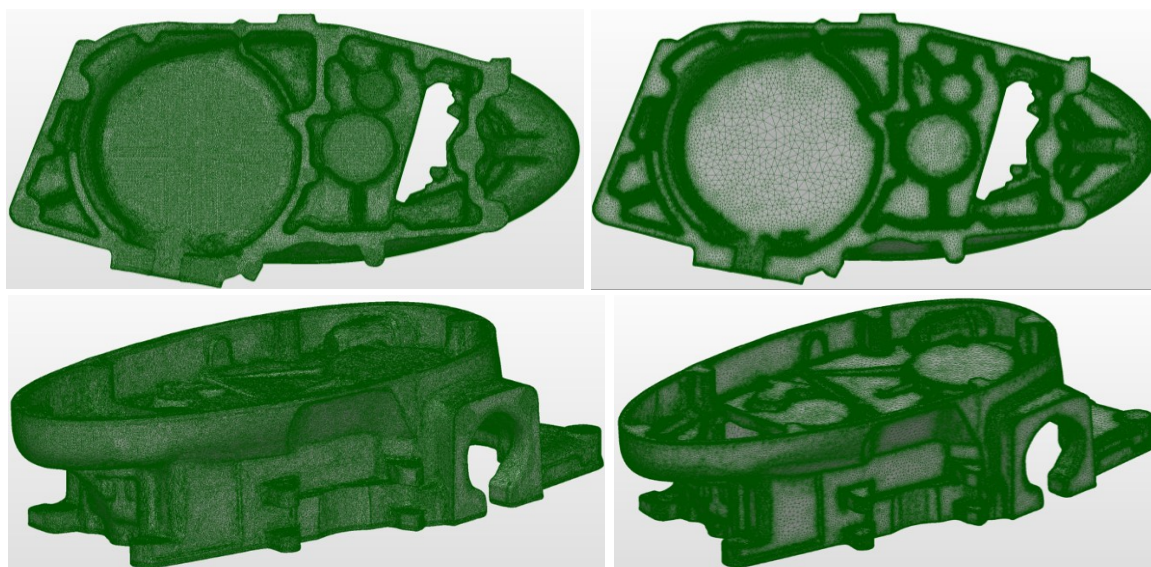


Obrázek 88 Použití optimalizační funkce „Improve Equiangularity“

(zdroj: vlastní)

Po této optimalizaci bylo aplikováno kompletní vyhlazení polygonní sítě pomocí funkce „Smooth Verticales“ a to 80%.

Srovnání, jak vypadala polygonní síť před a po optimalizaci lze vidět na následujícím obrázku (Obrázek 89).

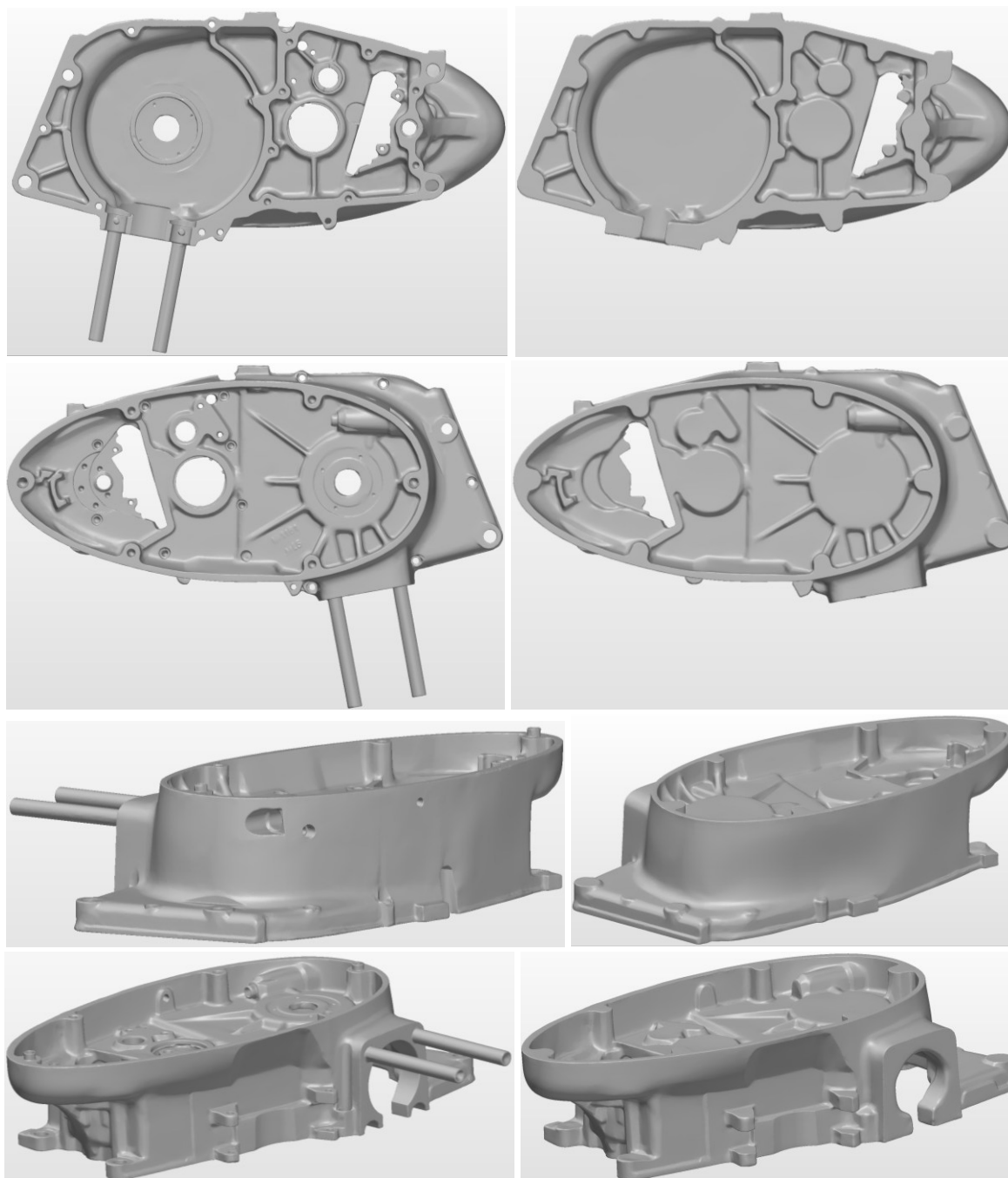


Obrázek 89 Porovnání před a po optimalizaci polygonní sítě

(zdroj: vlastní)

9.4.5 Porovnání před a po úpravách

V této kapitole jsou vyobrazeny změny, které byly provedeny při tvorbě odlitku skříně. Jednalo se o odstranění obráběných ploch, nadbytečných součástí a tvorbu přídavků na obrábění. Provedena byla také optimalizace sítě. Srovnání je v pořadí před a po opravě (Obrázek 90).



Obrázek 90 Srovnání před a po tvorbě technologického modelu – odlitku

(zdroj: vlastní)

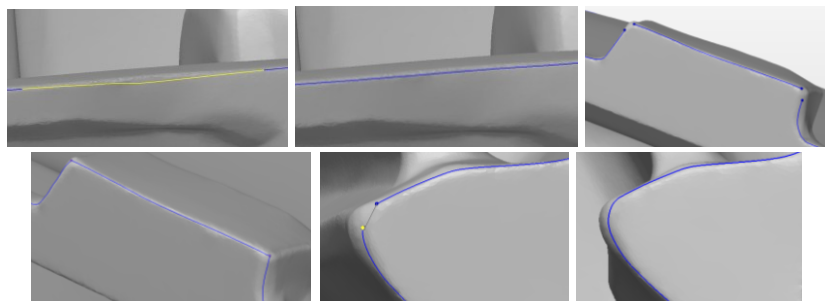
9.5 Model ve formátu STEP

Polygonní síť dílce ve formátu STL nelze upravovat klasickým modelováním v klasických CAD softwarech, proto je nutné tuto síť převést do formátu STEP. Tento formát lze již upravovat standardně. Export do toho formátu nelze provést přímo z polygonní sítě, je nutno provést mezikrok – tvorba NURBS ploch za pomoci křivek.

9.5.1 Tvorba popisujících křivek

Křivky sloužící k vytvoření NURBS ploch. Software PolyWorks umí tyto křivky generovat automaticky a následně je převést na NURBS plochy. Pro lepší popis je dobré, vytvořit několik základních křivek ručně. Jedná se například o křivky obrysové.

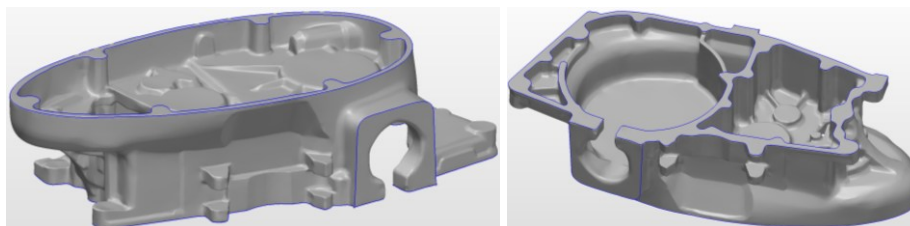
Tvorbu popisujících křivek zahrnovalo využití několika funkcí. Mezi tyto funkce patřilo: „Create Feature Center Curves“ – tvorba křivky na středu rádiusu, „Fair Curves“ – vyrovnaní křivky, „Fit Curves“ – přizpůsobení křivky k modelu, „Reshape Curves“ – ruční úprava tvaru křivky, „Extend Curves to Intersection“ – protažení křivky k další křivce, „Join Curves“ – spojení křivek do jedné křivky a „Extend Curves“ – ruční protažení křivky. Několik využití funkcí je vyobrazeno na následujícím obrázku (Obrázek 91).



Obrázek 91 Využití několika funkcí při tvorbě křivek

(zdroj: vlastní)

Model byl pokryt křivkami v dosedacích plochách aby byl ohraničen jeho tvar (Obrázek 92).

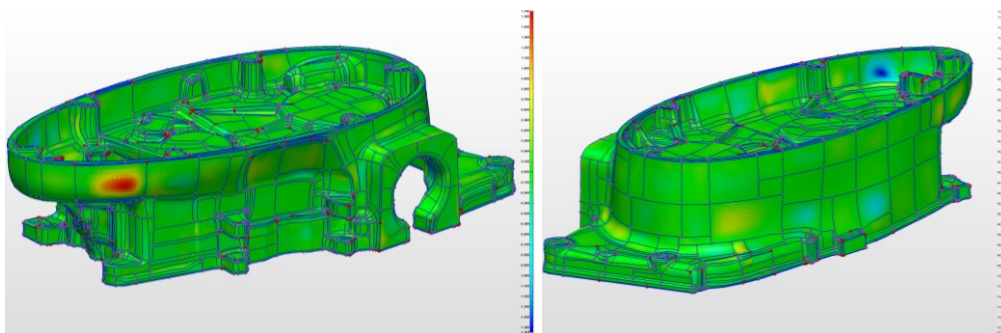


Obrázek 92 Model pokrytý základními křivkami

(zdroj: vlastní)

9.5.2 Tvorba NURBS ploch

Software PolyWorks tyto plochy nazývá „NURBS Patches“. Lze je vytvořit automaticky pomocí funkce „Create NURBS Patches from Polygonal Model“ nebo ručně. Funkce vytvoří několik křivek popisující polygonní síť a následně pomocí těchto křivek vytvoří NURBS plochy, které by měly co nejvíce odpovídat tvaru polygonní sítě. Pokud je vytvořeno několik křivek předtím, jsou využity taktéž. Po automatickém vytvoření NURBS ploch je aktivováno zobrazení, popisující kladnou a zápornou odchylku modelu tvořeného NURBS plochami, oproti modelu z polygonní sítě. Zobrazí se také barevná škála, která ukazuje, kde jsou jednotlivé odchylky, kdy kladná je značena červeně a záporná modře. Největší kladná odchylka NURBS ploch je +1,550 mm a záporná – 1,548 mm (Obrázek 93).

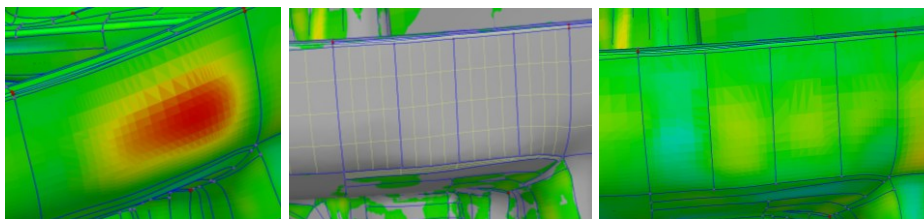


Obrázek 93 Vytvořené křivky a NURBS plochy s odchylkami

(zdroj: vlastní)

9.5.3 Optimalizace NURBS ploch

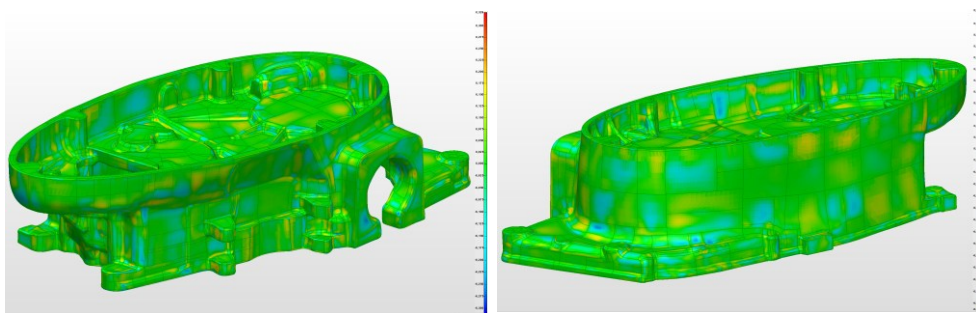
Vytvořené NURBS plochy vykazovaly značnou odchylku od modelu tvořeného polygonní sítí, viz předešlá podkapitola. Tuto odchylku bylo tedy nutné co nejvíce minimalizovat. Princip snižování odchylky byl takový, že vždy tam, kde vzniklo červené či modré pole se vložila křivka tak, aby správně popisovala model. K tomuto sloužila funkce „Create Standard Curves“ a metoda – přizpůsobit křivku modelu. Nově vytvořené křivky se navázaly na polygonní síť a pomohly lépe pospat odchýlenou plochu. Vždy při přidání křivky došlo k odstranění standardní NURBS plochy a zobrazený náhled (žluté obdélníky) nově vytvářené NURBS plochy (Obrázek 94). Následně se využila funkce „Fit Unfitted NURBS“, která NURBS plochu vytvořila. Aplikování této metody stále znovu a znovu vedlo k postupnému snižování odchylky. Při každém snížení odchylky se vybarvila plocha, která odpovídala této snížené hodnotě odchylky. Tímto způsobem se prošel celý model a byly doplněny zpřesňující křivky. Některé automaticky vytvořené křivky musely být odstraněny a nahrazeny novými, případně byl upraven jejich tvar pomocí „Reshape Curves“.



Obrázek 94 Doplnění popisujících křivek pro snížení odchylky

(zdroj: vlastní)

Výsledná odchylka poté dosahovala těchto hodnot: $+0,329$ a $-0,313$ mm (Obrázek 95). Jedná-li se o technologický model odlitku, je odchylka cca ve třech desetínách dostačující. Funkční plochy budou teprve vytvořeny, tím pádem nebude zanesena chyba vlivem odchylky do jejich rozměru ani jejich přesnosti.

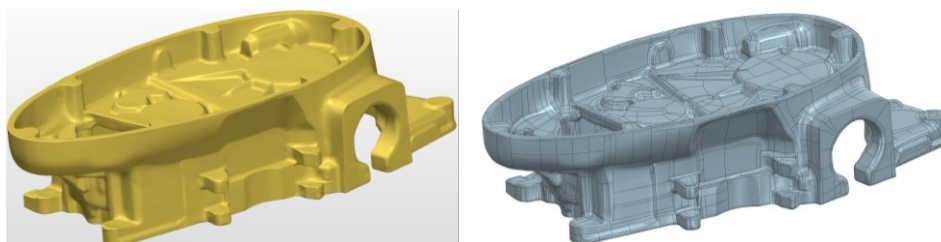


Obrázek 95 Výsledný model z NURBS ploch se sníženou odchylkou

(zdroj: vlastní)

9.5.4 Export STEP modelu

Model tvořený plochami NURBS, je softwarem PolyWorks již převoditelný do formátu STEP. Převod proběhl tím způsobem, že byly vybrány všechny NURBS plochy a pomocí funkce „Export Fitted NURBS Patches“ byl model exportován do formátu STEP. Nastavoval se pouze výstup jednotek a to v milimetrech. Na následujícím obrázku (Obrázek 96) lze vidět model z NURBS ploch a výsledný STEP model.



Obrázek 96 Vlevo model z NURBS ploch a vpravo model ve formátu STEP

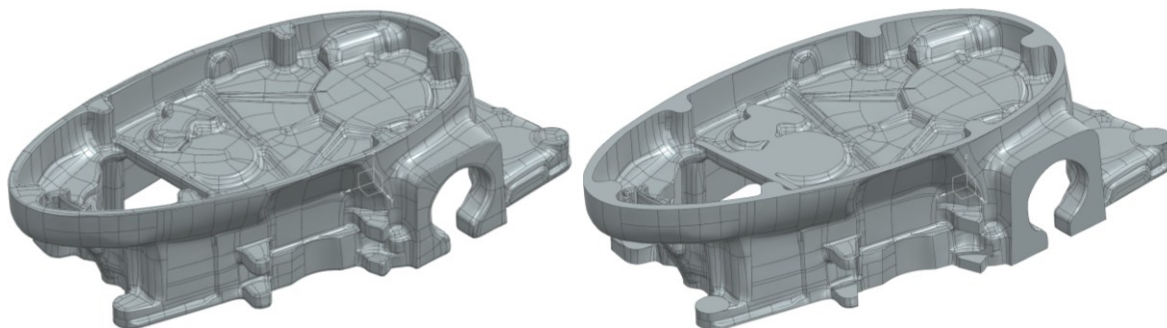
(zdroj: vlastní)

10 TVORBA FUNKČNÍCH PLOCH

Model skříně ve formátu STEP, vytvořeného pomocí softwaru PolyWorks se následně upravoval v softwaru SIEMENS NX verze 2406. Dalším krokem bylo vytvořit funkční plochy a otvory na jmenovité rozměry, tedy vytvořit z modelu odlitku, model již obrobený. Přidávky na obráběných plochách tedy bylo zapotřebí odstranit. Plochy vytvořené klasickým modelováním, jsou parametrické – nejsou obecné. Tento typ ploch má jasně daný tvar a rozměr čili jsou vhodné pro tvorbu obráběcího programu. Takto vytvořené plochy byly následně obarveny dle jejich typu (přesnost, typ – např. závit, tolerovaná díra atd.).

10.1 Tvorba rovinných ploch

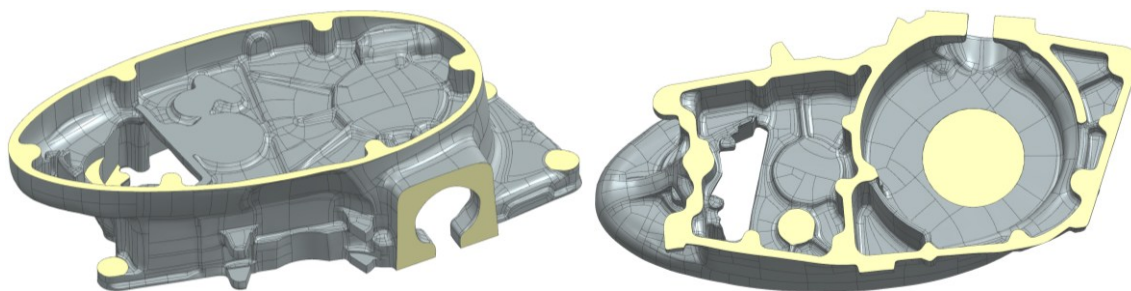
Dělicí roviny, byly vytvořeny jako první, jelikož se od těchto ploch odvíjela spousta dalších rozměrů. Dále následovalo vytvoření rovinné plochy válce a tvorba zbylých rovinných ploch (Obrázek 97). Rozměry se převzaly z výkresové dokumentace této skříně. Parametricky vytvořené rovinné plochy pomocí odebrání přidavků jsou dokonale rovinné a jejich poloha je určena jasně daným rozměrem, což je činní ideálními pro následné obrábění.



Obrázek 97 Vlevo model odlitku a vpravo model s rovinnými plochami

(zdroj: vlastní)

Tolerované rovinné plochy se vyznačily pomocí barvy „slonová kost“, aby bylo jasně určeno, které plochy se nachází pouze v základní toleranci a které jsou v toleranci přísnější (Obrázek 98). Tato barva se v praxi používá pro označení ploch jemně obráběných (nejčastěji dosedacích) čili s přísnější jakostí povrchu, tolerancí a rovinností. Rovinné plochy v základní toleranci nenesou barvu žádnou – mají barvu zbytku modelu.

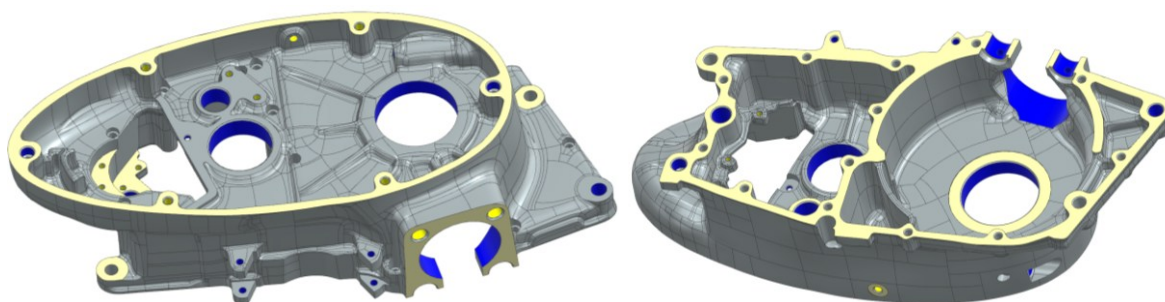


Obrázek 98 Vyznačené rovinné plochy s přísnějšími parametry

(zdroj: vlastní)

10.2 Tvorba otvorů

Díry jsou nejčastějšími obráběnými plochami na této skříni. Nachází se zde tři typy těchto děr a to závitové otvory, tolerované díry a díry se základní tolerancí. Nejprve se parametricky vytvořily díry pro hřídele a válec – tolerované rozměry. Dalšími dírami v řadě byly díry pro šrouby se zápusťnou hlavou (díry se základní tolerancí), díry závitové atd. Každý typ díry nesl určité zbarvení, aby bylo na první pohled jasné, o jaký otvor se jedná. Stejně tak jako u barvy rovinných ploch byly barvy použity takové, které se využívají v praxi, akorát s rozdílem že se využila jedna barva pro všechny tolerované rozměry. V praxi se pro každý jeden typ tolerance používá jiná barva, např. otvor H8 ponese jinou barvu než otvor S7. Pro zjednodušení se využila jednotná barva pro všechny tolerované otvory, protože četnost různorodých tolerancí je vysoká. Žlutá barva reprezentuje závitové otvory a barva modrá otvory tolerované (Obrázek 99). Neobarvené otvory jsou otvory v základní toleranci.



Obrázek 99 Skříň s obarvenými otvory dle typu otvoru

(zdroj: vlastní)

Takto obarvené funkční plochy a otvory jasně udávají, že jsou nějakým způsobem specifické a při tvorbě obráběcího programu mohou programátorovi pomoci se zorientovat. Konkrétní tolerance se pak dohledají ve výkresové dokumentaci skříně.

11 TVORBA TECHNOLOGICKÉHO MODELU

Parametricky upravený model, obsahující funkční plochy se musel upravit tak, aby jej bylo možno jen převzít pro případné obrábění. Model, který je připraven pro obrábění, se nazývá technologický model. Zahrnuje všechny obráběné plochy a otvory, kdy tolerované jmenovité rozměry těchto částí musí být korigovány. Provádí se tzv. korekce jmenovitých rozměrů na střed tolerance. Výpočet těchto rozměrů se provede dle následujícího vzorce. Konkrétní výpočet je uveden pro otvor uložení ložiska klikového hřídele, který má jmenovitý rozměr dle výkresové dokumentace $\varnothing 68\ S7$. Hodnoty horních a dolních úchylek se dohledávaly ve strojnických tabulkách.

$$X_{střed} = JR + \frac{ES+EI}{2} \quad (1)$$

$$\varnothing 68\ S7_{střed} = 68 + \frac{-0,048+(-0,078)}{2}$$

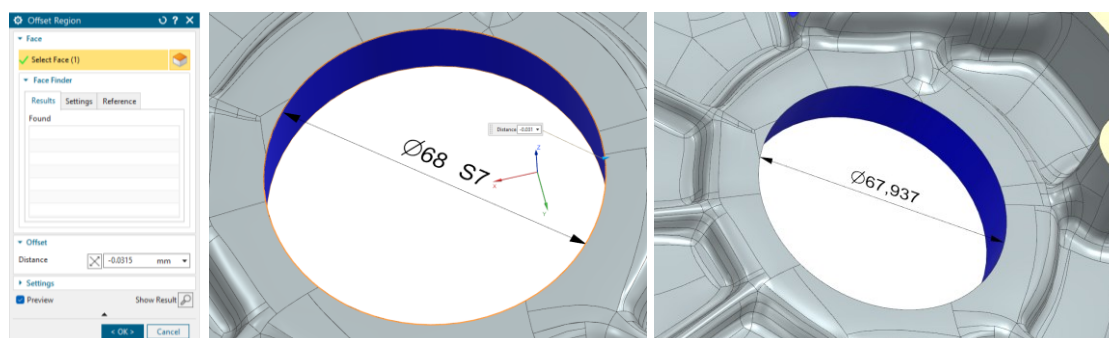
$$\varnothing 68\ S7_{střed} = 67,937\ mm$$

Na následujícím obrázku je vyobrazena korekce rozměru $\varnothing 68\ S7$, provedla se pomocí funkce odsazení (*Obrázek 100*). Hodnota velikosti odsazení byla vypočtena následovně.

$$X_{odsaz} = \frac{ES+EI}{4} \quad (2)$$

$$\varnothing 68\ S7_{odsaz} = \frac{-0,048+(-0,078)}{4}$$

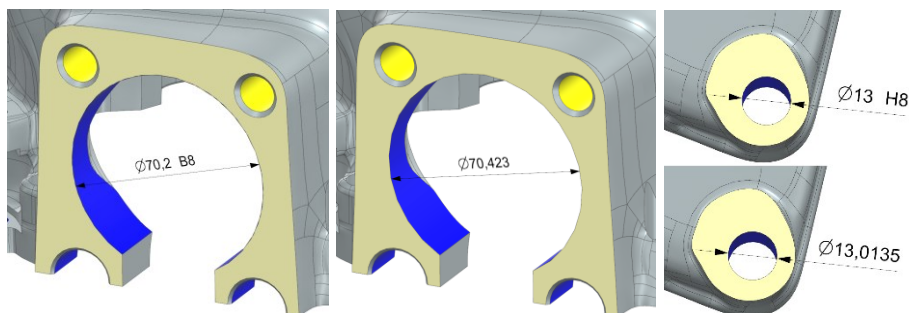
$$\varnothing 68\ S7_{odsaz} = -0,0315\ mm$$



Obrázek 100 Korekce otvoru $\varnothing 68\ S7$ na střed tolerance

(zdroj: vlastní)

Korekce se provádí proto, aby se při následném obrábění dodržely všechny výrobní tolerance. Takto se zkorigovaly všechny zbylé tolerované rozměry, pár z nich lze vidět na následujícím obrázku (*Obrázek 101*).

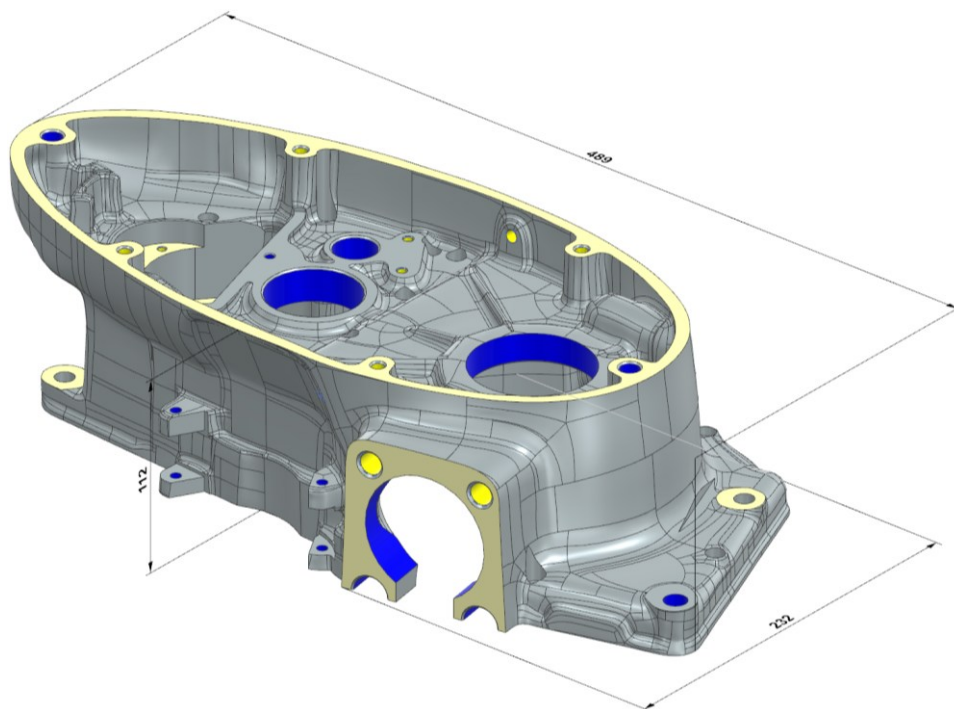


Obrázek 101 Příklady korekce dalších rozměrů

(zdroj: vlastní)

Takto korigovaný model je připraven pro obrábění aniž by na něm bylo zapotřebí cokoliv upravovat. Model obsahuje vhodně orientovaný souřadný systém, tolerované jmenovité rozměry upravené na střed tolerance a obarvené funkční plochy, dle typu tolerování. Pro programování obráběcího programu je připraven i polotovar, je to vlastně technologický model odlitku, se všemi příslušnými přídávky (Obrázek 97 vlevo). Oba tyto modely vycházejí z jednoho modelu čili mají totožné souřadné systémy. Zarovnáním souřadných systému na sebe, je polotvar přesně napasován na technologický model.

Posledním krokem při tvorbě technologického modelu, bylo vytvoření 3D kót základních rozměrů skříně (Obrázek 102). Rozměry nabývají hodnot 112 x 232 x 489 mm.



Obrázek 102 Technologický model skříně se základními rozměry

(zdroj: vlastní)

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo pomocí funkcí reverzního inženýrství digitalizovat zvolenou součást. Nejprve provést digitalizaci, následně data dále upravovat a to do podoby technologického modelu připraveného na obrábění.

Práce je rozdělena na dvě části. V části teoretické se nejprve čtenář seznámí s pojmem reverzní inženýrství, co to vlastně je a kde se prakticky využívá. V následující kapitole jsou charakterizovány kontaktní skenery. Lze se zde seznámit s principem digitalizace, s typy kontaktních skenerů, s jejich výhodami, nevýhodami atd. Další kapitola se zabývá popisem bezkontaktních skenerů, tato kapitola spadá mezi ty více stěžejní vzhledem k tématu této práce. Principy digitalizace jsou prvním tématem této kapitoly, kdy u těchto typů skenerů jsou přiblíženy pojmy jako triangulace, optická interferometrie aj. Dále jsou zde zmíněni typičtí zástupci, kteří jsou v praxi hojně využíváni, řadí se mezi ně např. skenery optické, laserové, elektromagnetické a další. Na konci této kapitoly jsou zmíněny výhody a nevýhody těchto typů zařízení. Navazující kapitola je věnována technologii 3D skenování a práci s těmito daty. Podrobněji jsou zde zmíněny pak pojmy jako mračno bodů, polygonní síť atd. Poslední kapitola je zaměřena na STL soubory, jež jsou hlavním formátem výstupu 3D skenerů.

Jako zpracovávaná součást v praktické části byla zvolena levá polovina motorové skříně motocyklu Jawa 500 OHC typ 02. Skříň se nejprve musela zdigitalizovat a to za pomoci 3D skeneru GOM ATOS TripleScan II 5M. Před samotným úkonem skenování se skříň řádně připravila – očistila se, nalepily se na ni poziční značky, aplikovala se antireflexní barva. Následovalo snímání dat a základní úprava dat před samotným zpracováním (zarovnání se souřadným systémem atd.). Po vyexportování naskenovaného STL modelu se vybral vhodný software pro práci s těmito daty a to PolyWorks 2023 od společnosti InnovMetric. V praktické části v kapitole zpracování naskenovaných dat následovala tvorba tří typů modelů, kdy se nejprve pomocí různorodých funkcí provedla oprava naskenovaného polygonního modelu, která zahrnovala zacelení otvorů vzniklých nedokonalým skenováním a dále opravu vad vzniklých opotřebením součástí. Vznikl tedy opravený polygonní model bez vad, nejvíce se blížíící reálné součásti. Poté se tento model postupnými úpravami předělal na polygonní model odlitku, tzv. se odstranily všechny funkční plochy, otvory a nadbytečné součásti, vytvořily se přídavky, a nakonec se provedla optimalizace polygonní sítě.

Posledním modelem se stal model ve formátu STEP, ten byl vytvořen pomocí NURBS ploch a příslušných křivek. Tyto plochy jsou ale stále obecné, tak jako polygonní síť. Pro tvorbu obráběcího programu je zapotřebí mít plochy lépe matematicky popsané – parametrické, to velmi usnadňuje generování trajektorií nástroje, také se zvyšuje efektivita programování a obrábění atd. Parametricky vytvořené plochy nejsou rozkouskované, jak je tomu u NURBS ploch, což usnadňuje práci jak programátorovi, tak i stroji. Z toho vyplývá další cíl práce, a to tvorba funkčních ploch a otvorů, kdy od této kapitoly je vše zpracováváno v softwaru SIEMENS NX. Zmiňované plochy se zde vytvořily parametricky, nebyly již tedy obecné, měly jasné daný tvar a rozměr, což je pro případné obrábění žádoucí. V praxi, kde ubývá výkresová dokumentace se tolerované otvory a funkční plochy značí specifickými barvami určující jejich typ, proto je tomu v této kapitole taky tak. Posledním cílem této práce bylo vytvořit technologický model vhodný pro obrábění. Jednalo se především o úpravu jmenovitých rozměrů tolerovaných ploch a otvorů na výrobní rozměry dle výrobních tolerancí. Jednotlivé tolerance byly vyčteny z originální výkresové dokumentace a velikost jednotlivých upravených jmenovitých rozměrů se zjistila pomocí strojnických tabulek a výpočtu. Polotovar – technologický model odlitku vznikl při tvorbě modelu ve formátu STEP a je tak možné jej využít při tvorbě programu na obrábění. Výsledný technologický model skříně je tímto připraven na obrábění, a není na něm třeba provádět již žádné úpravy.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KENDER, Štefan. REVERZNÉ INŽINIERSTVO V TECHNICKEJ PRAXI [PDF]. Košice: Transfer inovácií, 48/2023 [cit. 2025-01-14]. ISSN 1337-7094. Dostupné z: <https://www.sjf.tuke.sk/transferinovacii/pages/archiv/transfer/48-2023/pdf/135-138.pdf>
- [2] SLOTA, Ján; MANTIČ, Martin a GAJDOŠ, Ivan. *Rapid Prototyping a Reverse Engineering v strojárstve*. Edícia študijnej literatúry. Košice: Strojnícka fakulta, Technická univerzita v Košiciach, 2010. ISBN 978-80-553-0548-6.
- [3] THE MINERALS, Metals & Materials Society. *TMS 2022 151st Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings*. Springer Nature, 2022. ISBN 978-3-030-92380-8. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-92381-5>.
- [4] SEDLÁK, Josef. *Technologie výroby prototypů s podporou reverzního inženýrství a CAD/CAM*. Vědecké spisy Vysokého učení technického v Brně. PhD Thesis. V Brně, c2008. ISBN 978-80-214-3689-3.
- [5] KUMAR, Kaushik; ZINDANI, Divya a DAVIM, J. Paulo. *Rapid Prototyping, Rapid Tooling and Reverse Engineering - From Biological Models to 3D Bioprinters*. De Gruyter, 2020. ISBN 978-3-11-066324-2. Dostupné také z: <https://doi.org/doi:10.1515/9783110664904>.
- [6] HELLE, Robin H. a LEMU, Hirpa G. A case study on use of 3D scanning for reverse engineering and quality control. *Materials Today: Proceedings*. 2021, roč. 45, s. 5255-5262. ISSN 2214-7853. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.828>.
- [7] PEI, Eujin; BERNARD, Alain; GU, Dongdong; KLAHN, Christoph; MONZÓN, Mario et al. *Springer Handbook of Additive Manufacturing*. Springer Nature, 2023. ISBN 978-3-031-20751-8. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-20752-5>.
- [8] CONFALONE, Gary; KINNARE, Thomas a SMITS, John. *3D scanning for advanced manufacturing, design, and construction: Additive manufacturing skills in practice series*. Online. Hoboken, New Jersey: John Wiley, 2023. ISBN 978-1119758518. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1002/9781119758532>.
- [9] TARANCÓN, Albert a ESPOSITO, Vincenzo. *3D printing for energy applications*. Online. Hoboken, New Jersey: Wiley-American Ceramic Society, 2021. ISBN 978-1-119-56075-3. Dostupné také z: <http://dx.doi.org/10.1002/9781119560807>.

- [10] BERNIER, Samuel N.; LUYT, Bertier a REINHARD, Tatiana. *Design for 3D printing: scanning, creating, editing, remixing, and making in three dimensions*. San Francisco: Maker Media, 2015. ISBN 978-1-4571-8736-0.
- [11] KUTZ, Myer. *Mechanical Engineers' Handbook, Volume 2 - Design, Instrumentation, and Controls (4th Edition)*. John Wiley, 2014. ISBN 978-1-118-11283-0.
- [12] ČEPOVÁ, Lenka a PETŘKOVSKÁ, Lenka. *Legislativa ve strojírenské metrologii a přesné měření 3D ploch: studijní opora*. Ostrava: VŠB-TUO, Fakulta strojní, katedra obrábění a montáže, 2011. ISBN 978-80-248-2514-4.
- [13] FIŠEROVÁ, Věra. *Laserové skenování*. Acta Universitatis Purkynianae Facultatis philosophicae. Fundamenta Scholarium. Ústí nad Labem: Centrum pro dokumentaci a digitalizaci kulturního dědictví, Filozofická fakulta Univerzity J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, 2012. ISBN 978-80-7414-458-5.
- [14] CHUA, Chee Kai; WONG, Chee How a YEONG, Wai Yee. *Standards, Quality Control, and Measurement Sciences in 3D Printing and Additive Manufacturing*. Elsevier, 2017. ISBN 978-0-12-813489-4.
- [15] BRAVO HD: *The heavy-duty horizontal arm CMM*. Online. In: Hexagon. ©2025. Dostupné z: <https://hexagon.com/products/bravo-hd>. [cit. 2025-01-13].
- [16] RAJA, Vinesh a FERNANDES, Kiran J. *Reverse Engineering: an Industrial Perspective: Springer Series in Advanced Manufacturing*. London: Springer-Verlag, 2008. ISBN 978-1-84628-855-5 Dostupné také z: <https://doi.org/10.1007/978-1-84628-856-2>.
- [17] LUXIMON, Ameersing a LUXIMON, Yan. Chapter 19 - New technologies—3D scanning, 3D design, and 3D printing. In: *The Textile Institute Book Series*. Woodhead Publishing, 2021, s. 477-503. ISBN 978-0-12-821606-4. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821606-4.00019-3>.
- [18] ŠTRONER, Martin. *Možnosti zvyšování přesnosti 3D skenování*. Profesorské přednášky. V Praze: České vysoké učení technické, 2016. ISBN 978-80-01-05906-7.
- [19] OGRODNIK, Peter. *Medical Device Design - Innovation from Concept to Market (2nd Edition)*. Academic Press: Elsevier, 2020. ISBN 978-0-1281-4962-1.

- [20] ZAKARIA, Norsaadah. *Digital Manufacturing Technology for Sustainable Anthropometric Apparel*. Online. Elsevier, 2022. ISBN 978-0-12-823969-8. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1016/c2020-0-01151-5>.
- [21] HARDING, Kevin G. *Practical optical dimensional metrology*. Online. Bellingham, Washington: SPIE, 2019. ISBN 978-1-5106-2293-7. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1117/3.2513685>.
- [22] MOROVIČ, Ladislav. *Non-contact measurement of free-form surfaces*. Vědecké monografie. Plzeň: Vydavatelství a nakladatelství Aleš Čeněk, 2016. ISBN 9788073806286.
- [23] PAVELKA, Karel. *Laserové skenování - nová technologie sběru prostorových dat*. Habilitační přednášky. V Praze: České vysoké učení technické, 2006. ISBN 80-01-03501-8.
- [24] HARRY, Ralph Gordon a ROSEN, Meyer R. *Harry's Cosmeticology, Volume 3 (9th Edition)*. New York: Chemical Publishing Company, 2015. ISBN 978-0-8206-01786.
- [25] BASU, Bikramjit; KALIN, Mitjan a KUMAR, B. Venkata Manoj. *Friction and Wear of Ceramics - Principles and Case Studies*. John Wiley, 2020. ISBN 978-1-119-53838-7.
- [26] ŠTRONER, Martin. *3D skenovací systémy*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2013. ISBN 978-80-01-05371-3.
- [27] VERLAG, VDE. *54th International Symposium on Robotics (ISR Europe 2022), 20-21 June 2022, Munich, Germany*. VDE Verlag, 2022. ISBN 978-3-8007-5891-3.
- [28] FRANKE, Jakub; KOUTECKÝ, Tomáš; MALÝ, Milan; KALINA, Michal a KOUTNÝ, Daniel. Study of process parameters of the atomizer-based spray gun for the application of a temporary matte coating for 3D scanning purposes. *Materials Chemistry and Physics*. 2022, roč. 282, s. 125950. ISSN 0254-0584. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.125950>.
- [29] HRUBOŠ, David; KOUTECKÝ, Tomáš a PALOUŠEK, David. An experimental study for determination of an application method and TiO₂ powder to ensure the thinnest matte coating layer for 3D optical scanning. *Measurement*. 2019, roč. 136, s. 42-49. ISSN 0263-2241. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.12.058>.

- [30] GIMÉNEZ-EL-AMRANI, Anuar; SANZ-GARCIA, Andres; VILLALBA-ROJAS, Néstor; MIRABET, Vicente; VALVERDE-NAVARRO, Alfonso et al. The untapped potential of 3D virtualization using high resolution scanner-based and photogrammetry technologies for bone bank digital modeling. *Computers in Biology and Medicine*. 2024, roč. 183, s. 109340. ISSN 0010-4825. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compbimed.2024.109340>.
- [31] PROCHÁZKOVÁ, J. *Výuka počítačové grafiky a geometrie s využitím flash animací*. In: *Sborník příspěvků 27. mezinárodní konference o geometrii a počítačové grafice*. Brno: 2007. s. 181-185. ISBN: 978-80-85763-41-6.
- [32] ROSCHLI, Alex C.; BORISH, Michael C.; BARNES, Abby K.; FELDHAUSEN, Thomas A.; WANG, Peter L. et al. *Motion and Path Planning for Additive Manufacturing*. Online. Elsevier, 2024. ISBN 978-0-443-15286-3. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1016/c2022-0-01328-3>.
- [33] KĘSIK, Jacek; MIŁOSZ, Marek a MONTUSIEWICZ, J. Problems of acquisition and postprocessing of 3D scans of large architectural objects. *MATEC Web of Conferences*. 2019, roč. 252, s. 03001. Dostupné z: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201925203001>.
- [34] ZHANG, Yongjie Jessica. *Geometric Modeling and Mesh Generation from Scanned Images*. Online. New York: Chapman and Hall/CRC, 2018. ISBN 9781315372259. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1201/9781315372259>.
- [35] BOISSE, Philippe. *Composite Reinforcements for Optimum Performance (2nd Edition)*. Online. Duxford: Elsevier. ISBN 978-0-12-819005-0. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1016/c2018-0-04574-0>.
- [36] ZHANG, Yongjie (Jessica). *Image-Based Geometric Modeling and Mesh Generation: Lecture notes in computational vision and biomechanics; volume 3*. Online. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013. ISBN 978-94-007-4254-3. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4255-0>.
- [37] BOTSCH, Mario; PAULY, Mark; KOBELT, Leif; ALLIEZ, Pierre a LEVY, Bruno. *Geometric Modeling Based on Polygonal Meshes*. Online. The Eurographics Association, 2008. Dostupné z: <https://doi.org/10.2312/egt.20081055>.

- [38] KIM, Yoon-Ji; JHA, Nayansi; GUPTA, Shalini; ZVIRIN, Alon; QENDRO, Andis et al. Principles and Applications of Various 3D Scanning Methods for Image Acquisition for 3D Printing Applications in Oral Health Science. Springer International Publishing, 2022, s. 7-45. ISBN 978-3-031-07368-7. Dostupné také z: https://doi.org/10.1007/978-3-031-07369-4_2.
- [39] DANGEL, Rainer. *Injection Molds for Beginners (3rd Edition)*. Online. Hanser Publishers, 2023. ISBN 978-1-56990-911-9. Dostupné také z: <https://doi.org/10.3139/9781569909249.fm>.
- [40] GIBSON, I.; ROSEN, David a STUCKER, B. *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing*. Second edition. New York: Springer, 2015. ISBN 9781493921126.
- [41] PANNETT, Len. *Supercharg3d - How 3D Printing Will Drive Your Supply Chain*. 2nd edition. Newark: John Wiley, 2019. ISBN 978-1-11953-2-354.
- [42] GEBHARDT, Andreas a HÖTTER, Jan-Steffen. *Additive Manufacturing - 3D Printing for Prototyping and Manufacturing*. Online. Hanser Publishers, 2016. ISBN 978-1-56990-582-1. Dostupné také z: <https://doi.org/10.3139/9781569905838.fm>.

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1 Rozdíl postupů mezi klasickým a reverzním inženýrstvím.....</i>	<i>16</i>
<i>Obrázek 2 Prvotní myšlenka RE (příklad RE pro nádrž motocyklu)</i>	<i>16</i>
<i>Obrázek 3 Dotyková spínací sonda</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 4 Měřicí sonda CMM, měřicí součást</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 5 Mostový kartézský CMM</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 6 Portálový CMM.....</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 7 Horizontální CMM</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 8 Mechanické rameno s ručním polohováním.....</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 9 Postup přechodného skenování</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 10 Porovnání 1D, 2D a 3D triangulace</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 11 Schéma 3D triangulace za pomoci strukturovaného světla</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 12 Triangulační báze.....</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 13 Příklad pasivní triangulace s vícero kamerami</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 14 Schéma interferometru</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 15 Schéma skenování pomocí doby letu světla.....</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 16 Schéma laserové skenování</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 17 Laserové skenování přenosným skenerem (vlevo) a na rameni (vpravo)</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 18 Schéma elektromagnetického skeneru.....</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 19 Proces technologie 3D skenování</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 20 Nekódované poziční značky (vlevo) a kódované (vpravo)</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 21 NURBS plochy určené křivkami a body</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 22 Vliv množství dílčích ploch na kvalitu popsání povrchu</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 23 Křížíce se plochy (vlevo), nadbytečné (střed) a nepropojené (vpravo).....</i>	<i>42</i>
<i>Obrázek 24 Zaplnění otvorů v síti (sít' není zobrazena)</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 25 Úprava hran polygonního modelu (sít' není zobrazena)</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 26 Definice trojúhelníku v STL souboru</i>	<i>45</i>
<i>Obrázek 27 Sít' s nízkým rozlišením (vlevo) a s vysokým rozlišením (vpravo)</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 28 Levá polovina motorové skříně s popisem základních částí</i>	<i>50</i>
<i>Obrázek 29 GOM ATOS TripleScan II 5M.....</i>	<i>51</i>
<i>Obrázek 30 Lakovaná místa (bílé) společně s rozložením pozičních značek</i>	<i>52</i>
<i>Obrázek 31 Příprava na snímání skříně a velikost půdorysu skenovacího objemu</i>	<i>53</i>
<i>Obrázek 32 Strukturované světlo při snímání skříně.....</i>	<i>53</i>
<i>Obrázek 33 Polygonní model v softwaru ATOS GOM Professional V8.....</i>	<i>54</i>
<i>Obrázek 34 Logo softwaru PolyWorks 2023</i>	<i>55</i>

<i>Obrázek 35 Polygonní model skříně, nahoře síť s otvory, dole materiálové zobrazení</i>	<i>56</i>
<i>Obrázek 36 Chybějící části polygonní sítě a vpravo detail</i>	<i>57</i>
<i>Obrázek 37 Chybějící části polygonní sítě a špatně orientované trojúhelníky</i>	<i>57</i>
<i>Obrázek 38 Funkce zacelení otvorů „Fill Holes Interactively“</i>	<i>58</i>
<i>Obrázek 39 Otvory v polygonní síti v dutině</i>	<i>58</i>
<i>Obrázek 40 Vlevo nastavení zacelení otvorů, vpravo průběh zacelení otvorů</i>	<i>58</i>
<i>Obrázek 41 Vlevo využití zacelení se zakřivením, vpravo bez</i>	<i>59</i>
<i>Obrázek 42 Funkce rekonstrukce sítě „Reconstruct Mesh“</i>	<i>59</i>
<i>Obrázek 43 Postup rekonstrukce sítě drobné vady</i>	<i>59</i>
<i>Obrázek 44 Funkce vyhlazení sítě „Smooth Verticales“</i>	<i>60</i>
<i>Obrázek 45 Postup zacelení otvoru a vyhlazení sítě</i>	<i>60</i>
<i>Obrázek 46 Vlevo vada, vpravo nevhodná oprava pomocí „Clean and Fill“</i>	<i>60</i>
<i>Obrázek 47 Postup zacelení komplexní vady</i>	<i>61</i>
<i>Obrázek 48 Zacelení neprůchozích děr</i>	<i>62</i>
<i>Obrázek 49 Vlevo vadně naskenovaná díra, vpravo odstranění vadné sítě</i>	<i>62</i>
<i>Obrázek 50 Tvorba roviny a její upřesnění polohy</i>	<i>63</i>
<i>Obrázek 51 Postup opravy díry se zahloubením</i>	<i>63</i>
<i>Obrázek 52 Vpravo poškození, vlevo nepoškozená část sítě</i>	<i>64</i>
<i>Obrázek 53 Postup opravy uložení ložiska klikového hřídele</i>	<i>64</i>
<i>Obrázek 54 Postupné zrcadlení okraje uložení ložiska klikového hřídele</i>	<i>65</i>
<i>Obrázek 55 Opravená vada chybějícího okraje uložení ložiska klikového hřídele</i>	<i>65</i>
<i>Obrázek 56 Oprava drobných vad</i>	<i>66</i>
<i>Obrázek 57 Nahoře použití rekonstrukce sítě, dole využití úpravy rádiusů</i>	<i>67</i>
<i>Obrázek 58 Nahoře vada, dole neúspěšné použití úpravy rádiusu</i>	<i>67</i>
<i>Obrázek 59 Postup opravy vady pomocí funkce „Fillet and Surroundings Filling“</i>	<i>68</i>
<i>Obrázek 60 Vlevo zobrazení se zakřivením, vpravo s upravenou max. hodnotou</i>	<i>69</i>
<i>Obrázek 61 Vyhlazení nerovností</i>	<i>69</i>
<i>Obrázek 62 Vady způsobené korozí</i>	<i>70</i>
<i>Obrázek 63 Postup opravy první vady</i>	<i>70</i>
<i>Obrázek 64 Postup opravy druhé vady</i>	<i>71</i>
<i>Obrázek 65 Oprava vnitřní části třetí vady</i>	<i>71</i>
<i>Obrázek 66 Částečná oprava třetí vady</i>	<i>72</i>
<i>Obrázek 67 Nahoře neúspěšné zacelení, dole přizpůsobená plocha síti</i>	<i>72</i>
<i>Obrázek 68 Postup doopravení třetí vady</i>	<i>73</i>
<i>Obrázek 69 Vada před a po opravě</i>	<i>73</i>

<i>Obrázek 70 Vlevo svár na stěně, vpravo svár uvnitř (seshora a zespoda)</i>	74
<i>Obrázek 71 Svar v softwaru PolyWorks</i>	74
<i>Obrázek 72 Postup odstranění svaru ze spodní strany</i>	75
<i>Obrázek 73 Postup opravy boční stěny</i>	76
<i>Obrázek 74 Postup opravy zafrézování</i>	76
<i>Obrázek 75 Srovnání před a po opravě polygonní sítě dílce</i>	77
<i>Obrázek 76 Zacelení několika děr</i>	78
<i>Obrázek 77 Odstranění zafrézování pomocí rekonstrukce sítě</i>	78
<i>Obrázek 78 Odstranění zafrézování komplexní metodou</i>	79
<i>Obrázek 79 Příklad součástí, které nejsou součástí odlitku skříně</i>	79
<i>Obrázek 80 Dva příklady odstranění nadbytečných součástí</i>	80
<i>Obrázek 81 Příklady frézovaných povrchů skříně</i>	80
<i>Obrázek 82 Postup tvorby 2 mm přídavku na dosedací ploše víka</i>	81
<i>Obrázek 83 Postup tvorby přídavků komplikovanějšího případu</i>	82
<i>Obrázek 84 Funkce využití k optimalizaci sítě</i>	83
<i>Obrázek 85 Použití optimalizační funkce „Optimize Curvature“</i>	83
<i>Obrázek 86 Použití optimalizační funkce „Subdivide“</i>	84
<i>Obrázek 87 Použití optimalizační funkce „Reduce Triangles“</i>	84
<i>Obrázek 88 Použití optimalizační funkce „Improve Equiangularity“</i>	85
<i>Obrázek 89 Porovnání před a po optimalizaci polygonní sítě</i>	85
<i>Obrázek 90 Srovnání před a po tvorbě technologického modelu – odlitku</i>	86
<i>Obrázek 91 Využití několika funkcí při tvorbě křivek</i>	87
<i>Obrázek 92 Model pokrytý základními křivkami</i>	87
<i>Obrázek 93 Vytvořené křivky a NURBS plochy s odchylkami</i>	88
<i>Obrázek 94 Doplnění popisujících křivek pro snížení odchylky</i>	89
<i>Obrázek 95 Výsledný model z NURBS ploch se sníženou odchylkou</i>	89
<i>Obrázek 96 Vlevo model z NURBS ploch a vpravo model ve formátu STEP</i>	89
<i>Obrázek 97 Vlevo model odlitku a vpravo model s rovinnými plochami</i>	90
<i>Obrázek 98 Vyznačené rovinné plochy s přísnějšími parametry</i>	91
<i>Obrázek 99 Skříň s obarvenými otvory dle typu otvoru</i>	91
<i>Obrázek 100 Korekce otvoru Ø68 S7 na střed tolerance</i>	92
<i>Obrázek 101 Příklady korekce dalších rozměrů</i>	93
<i>Obrázek 102 Technologický model skříně se základními rozměry</i>	93

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

RE	Reverzní inženýrství
CAD	Počítačová podpora v konstrukci
CMM	Souřadnicový měřicí stroj
CCD	Zařízení s vázanými náboji – senzor
CT	Počítačová tomografie
NURBS	Racionální neuniformní základní plochy/křivky
STL	Datový formát popisující povrch modelu
STEP	Standard pro výměnu modelových dat o produktu
OHC	Typ ventilového rozvodu pístového motoru
TR	trojúhelníky/trojúhelník
$X_{\text{střed}}$	Hodnota jmenovitého rozměru upraveného na střed tolerance
JR	Jmenovitý rozměr
ES	Horní úchylka díry
EI	Dolní úchylka díry
X_{odsaz}	Hodnota velikosti odsazení jmenovitého rozměru