

ATELIÉR POČÍTAČOVEJ PODPORY NÁVRHU A VÝROBY III

Reverzné inžinierstvo a reverzné geometrické modelovanie

Ivan Buranský
Ladislav Morovič



SLOVENSKÁ TECHNICKÁ
UNIVERZITA V BRATISLAVE
MATERIÁLOVOTECHNOLOGICKÁ
FAKULTA SO SÍDLOM V TRNAVE

© Materiálovotechnologická fakulta STU so sídlom v Trnave
doc. Ing. Ivan Buranský, PhD., doc. Ing. Ladislav Morovič, PhD.

Recenzenti: doc. Ing. Jana Gulánová, PhD.
prof. Dr. Ing. Jozef Peterka

Jazyková korektúra: Mgr. Milan Bošák

Schválila Vedecká rada Materiálovotechnologickej fakulty STU ako vysokoškolské skriptá dňa 19 novembra 2020 pre študijný program Ateliér počítačovej podpory návrhu a výroby III Materiálovotechnologickej fakulty STU v Trnave

ISBN 978-80-8096-289-0
EAN 9788080962890

OBSAH

ZOZNAM OBRÁZKOV.....	5
PREDSLOV.....	7
1. REVERZNÉ INŽINIERSTVO V PROCESE VÝROBY SÚČIASTOK.....	8
1.1 VSTUPNÝ A VÝSTUPNÝ FORMÁT REVERZNÉHO INŽINIERSTVA.....	10
1.1.1 MRAK BODOV.....	10
1.1.2 POLYGONÁLNY MODEL (STL FORMÁT).....	11
1.2 NEUTRÁLNE FORMÁTY V REVERZNOM GEOMETRICKOM MODELOVANÍ.....	13
1.2.1 IGES FORMÁT.....	13
1.2.2 STEP FORMÁT.....	14
1.2.3 FORMÁT STL.....	14
1.2.4 FORMÁT JT.....	16
1.2.5 FORMÁT PLY.....	16
1.2.6 FORMÁT OBJ.....	16
2 ZÍSKAVANIE ÚDAJOV REÁLNYCH SÚČIASTOK.....	17
2.1 METÓDY ZÍSKAVANIE ÚDAJOV REÁLNYCH SÚČIASTOK.....	17
2.1.1 ZÍSKAVANIE ÚDAJOV POUŽITÍM SÚRADNICOVÝCH MERACÍCH STROJOV.....	18
2.1.2 ZÍSKAVANIE ÚDAJOV POUŽITÍM OPTICKÉHO 3D SKENERA.....	19
2.1.3 ZÍSKAVANIE ÚDAJOV POUŽITÍM PRIEMYSELNÉHO POČÍTAČOVÉHO TOMOGRAFU.....	22
2.2 VÝHODY A NEVÝHODY KONTAKTNÝCH A BEZKONTAKTNÝCH METÓD ZBERU DÁT.....	24
3 3D DIGITALIZÁCIA OPTICKÝM 3D SKENEROM.....	26
3.1 PRÍPRAVA SÚČIASTKY PRED OPTICKÝM 3D SKENOVANÍM.....	26
3.2 KALIBRÁCIA.....	27
3.3 PROCES ZÍSKAVANIA ÚDAJOV REÁLNYCH SÚČIASTOK POUŽITÍM OPTICKÉHO SKENERA (3D DIGITALIZÁCIA).....	28
3.4 ÚPRAVA ZÍSKANÝCH ÚDAJOV.....	30
3.5 VYUŽITIE ZÍSKANÝCH ÚDAJOV.....	33
4 REVERZNÉ GEOMETRICKÉ MODELOVANIE.....	35
4.1 ÚLOHA REVERZNÉHO GEOMETRICKÉHO MODELOVANIA.....	36
4.2 ANALÝZA POLYGONÁLNEHO 3D MODELU.....	37
4.3 PRÍSTUPY REVERZNÉHO GEOMETRICKÉHO MODELOVANIA.....	39

4.4 PROCES REVERZNÉHO GEOMETRICKÉHO MODELOVANIA V CAD SOFTVÉRI....	40
4.5 POSTUP REVERZNÉHO GEOMETRICKÉHO MODELOVANIA.....	43
4.6 FUNKCIE REVERZNÉHO GEOMETRICKÉHO MODELOVANIA.....	47
4.6.1 PRIMITÍVA V REVERZNOM GEOMETRICKOM MODELOVANÍ.....	48
4.6.2 GEOMETRICKÉ ELEMENTY Z CAQ V REVERZNOM GEOMETRICKOM MODELOVANÍ	50
4.6.3 FUNKCIA REZ A OBRYSOVÁ KRIVKA V REVERZNOM GEOMETRICKOM MODELOVANÍ	51
4.6.4 PRICHYTENÁ KRIVKA A PLOCHA V REVERZNOM GEOMETRICKOM MODELOVANÍ	54
4.6.5 SEGMENTY A SEGMENTÁCIA V REVERZNOM GEOMETRICKOM MODELOVANÍ.....	56
4.6.6 NABALENÁ PLOCHA V REVERZNOM GEOMETRICKOM MODELOVANÍ	62
4.6.7 POLYGONÁLNE SIETE NA B-REP V REVERZNOM GEOMETRICKOM MODELOVANÍ 63	
4.6.8 QUAD SURFACE V REVERZNOM GEOMETRICKOM MODELOVANÍ	65
4.6.9 GENERATÍVNE NAVRHOVANIE	65
5 PRÍKLADY REVERZNÉHO GEOMETRICKÉHO MODELOVANIA.....	68
5.1 REVERZNÉ GEOMETRICKÉ MODELOVANIE SUŠIČKY	69
5.2 REVERZNÉ GEOMETRICKÉ MODELOVANIE OCEĽOVEJ NÁDOBY KOMPRESORA	70
5.3 REVERZNÉ GEOMETRICKÉ MODELOVANIE PLECHOVÉHO VÝLISKU.....	72
5.4 REVERZNÉ GEOMETRICKÉ MODELOVANIE KOLESA HISTORICKÉHO TANKU	74
5.5 REVERZNÉ GEOMETRICKÉ MODELOVANIE LODNEJ SKRUTKY	76
5.6 REVERZNÉ GEOMETRICKÉ MODELOVANIE FIALY NA DÓME SV. MARTINA	78
5.7 REVERZNÉ GEOMETRICKÉ MODELOVANIE ŠACHOVEJ FIGÚRKY	79
5.8 REVERZNÉ GEOMETRICKÉ MODELOVANIE FORMY NA BETÓNOVÉ OPLOTENIE.....	82
5.9 REVERZNÉ GEOMETRICKÉ MODELOVANIE REZNÝCH NÁSTROJOV	83
6 ZOZNAM SOFTVÉROV	85
7 SLOVENSKO-ANGLICKÝ SLOVNÍK.....	87
ZOZNAM BIBLIOGRAFICKÝCH ODKAZOV	89

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1 Klasický spôsob výroby súčiastok.....	8
Obr. 2 Výroba súčiastok použitím reverzného inžinierstva	9
Obr. 3 Príklady fyzických modelov reálnych súčiastok.....	10
Obr. 4 Model reprezentovaný mrakom bodov.....	11
Obr. 5 Polygonálna trojuholníková sieť.....	11
Obr. 6 Model reprezentovaný polygonálnym 3D modelom (Autor habilitačnej práce).....	12
Obr. 7 Zápis jedného trojuholníka vo formáte STL – syntax ASCII.....	14
Obr. 8 Zápis trojuholníkov v binárnom formáte.....	14
Obr. 9 Orientácia trojuholníka [13].....	15
Obr. 10 Pravidlo tvorby trojuholníkov pre STL formát.....	15
Obr. 11 Metódy zberu dát [14][15].....	17
Obr. 12 Princíp snímacej hlavy spínacieho typu (touch-trigger probe) [20].....	18
Obr. 13 Princíp 3D meracej hlavy (scanning probe) [20].....	18
Obr. 14 Rôzne svetelné vzory použité pri meraní štruktúrovaným svetlom [18].....	19
Obr. 15 Princíp aktívnej triangulácie (1-D triangulácia) [21].....	21
Obr. 16 Princíp priemyselného počítačového tomografu.....	23
Obr. 17 Guľový kalibračný element od firmy GOM GmbH - Zeiss Group (Servisný) [24].....	26
Obr. 18 Kalibračné elementy od firmy GOM GmbH - Zeiss Group [25].....	27
Obr. 19 Kalibračné elementy od firmy ZEISS (Servisné).....	28
Obr. 20 Mrak bodov (Body P1 - Pn).....	28
Obr. 21 Polygonizácia (Body Px, Čiara Lx, Trojuholník Tx).....	29
Obr. 22 Polygonálna sieť (Body Px, Trojuholník Tx).....	30
Obr. 23 Spracovanie a úprava polygonálneho modelu.....	30
Obr. 24 Vyhľadanie a zaplnenie diery na polygonálnej sieti.....	30
Obr. 25 Princíp vyhľadania polygonálnej siete a tolerancia vyhľadania „t“ [30].....	30
Obr. 26 Redukcia trojuholníkov na polygonálnej sieti.....	31
Obr. 27 Schéma konverzie 3D modelov od autora [34].....	32
Obr. 28 Rozšírená schéma konverzie 3D modelov.....	33
Obr. 29 Tvary súčiastok (tvar polygonálneho 3D modelu) (Autor habilitačnej práce).....	34
Obr. 30 Funkčné a voľné povrchy na súčiastkách [35].....	35
Obr. 31 Prístupy reverzného modelovania.....	36
Obr. 32 Metóda 3-2-1.....	37
Obr. 33 Primitívne objekty v reverznom geometrickom modelovaní.....	37
Obr. 34 Primitívne teleso (kocka) v reverznom geometrickom modelovaní.....	39
Obr. 35 Primitívny objekt z bodov v reverznom geometrickom modelovaní.....	39
Obr. 36 Geometrické elementy z CAQ v reverznom geometrickom modelovaní.....	41
Obr. 37 Vytvorené elementy a importované elementy	44
Obr. 38 Funkcia rez a obrysová krivka v reverznom geometrickom modelovaní	48
Obr. 39 Príklad funkcie rez v reverznom geometrickom modelovaní.....	48
Obr. 40 Premodelovanie krivky získanej rezom polygonálneho modelu	49
Obr. 41 Zjednodušená krivka získaná rezom polygonálneho modelu.....	50
Obr. 42 Obrysová krivka v reverznom geometrickom modelovaní.....	51
Obr. 43 Prichytená krivka a plocha v reverznom geometrickom modelovaní.....	52
Obr. 44 Prichytená krivka v reverznom geometrickom modelovaní.....	52
Obr. 45 Prichytená plocha v reverznom geometrickom modelovaní.....	53
Obr. 46 Segmenty a segmentácia v reverznom geometrickom modelovaní.....	53
Obr. 47 Výber trojuholníkov pri tvorbe segmentov.....	54
Obr. 48 Segmentácia (rozdelenie) polygonálnej siete.....	55
Obr. 49 Segmentácia polygonálnej siete na základe farebnej mapy odchýlok.....	55
Obr. 50 Rozdelenie polygonálneho 3D modelu na základe krivosti.....	55

Obr. 51 Automatická tvorba segmentov.....	56
Obr. 52 Segmenty vytvorené ručne.....	57
Obr. 53 Nabalená plocha v reverznom geometrickom modelovaní.....	58
Obr. 54 Funkcia nabalená plocha na tvarovej ploche v prostredí CAD softvéru PowerShape.....	59
Obr. 55 Polygonálna sieť na B-REP v reverznom geometrickom modelovaní.....	60
Obr. 56 Konvertovanie polygonálneho modelu na B-REP v prostredí softvéru Fusion 360.....	61
Obr. 57 Vytváranie plôch použitím Quad Surface (Štvorcovej plochy).....	61
Obr. 58 Návrhy súčiastok vytvorených generatívnym navrhovaním v programe FUSION 360.....	62
Obr. 59 Schéma pre získavanie farebnej mapy odchýlok.....	63
Obr. 60 Reverzné geometrické modelovanie sušičky.....	64
Obr. 61 Detail polygonálnej siete.....	64
Obr. 62 Vytváranie plôch použitím Quad Surface (Štvorcovej plochy).....	65
Obr. 63 Farebná mapa odchýlok pre obal kompresora.....	66
Obr. 64 Polygonálny 3D model plechového výlisku a detail polygonálnej siete 279 494 bodov, 555 900 trojuholníkov, 26,9 MB.....	67
Obr. 65 3D CAD model plechového výlisku (Autor habilitačnej práce).....	68
Obr. 66 Farebná mapa odchýlok plechového dielu.....	69
Obr. 67 Polygonálny 3D model kola historického tanku.....	71
Obr. 68 Detail polygonálneho modelu kola historického tanku.....	71
Obr. 69 Objemový 3D CAD model kola historického tanku.....	72
Obr. 70 Farebná mapa odchýlok kola historického tanku.....	73
Obr. 71 Polygonálny 3D model lodnej skrutky.....	73
Obr. 72 Detail polygonálnej siete.....	74
Obr. 73 3D CAD model lodnej skrutky.....	75
Obr. 74 Fiala – Dóm sv. Martina.....	75
Obr. 75 Polygonálny model šachovej figúrky.....	76
Obr. 76 Meč 3D CAD model šachovej figúrky – Kráľ.....	76
Obr. 77 Šachová trofej.....	77
Obr. 78 Forma na betónové oplatenie.....	77
Obr. 79 Polygonálny model vrtáka.....	78
Obr. 80 3D CAD model časti vrtáka.....	79
Obr. 81 Polygonálny model šachovej figúrky.....	80
Obr. 82 Meč 3D CAD model šachovej figúrky- Kráľ.....	81
Obr. 83 Šachová trofej.....	81
Obr. 84 Forma na betónové oplatenie.....	82
Obr. 85 Polygonálny model vrtáka.....	84
Obr. 86 3D CAD model časti vrtáka.....	84

PREDSLOV

Tieto skriptá vznikli na základe dlhoročných skúsenosti autorov skript v oblasti reverzného inžinierstva a reverzného geometrického modelovania. Skriptá slúžia ako učebná pomôcka k predmetu Ateliér počítačovej podpory návrhu a výroby III. Skriptá sú rozdelené na 5 hlavných kapitol. Študent získa vedomosti z oblasti procesu reverzného inžinierstva, ako je 3D digitalizácia a reverzné geometrické modelovanie. Reverzné inžinierstvo sa využíva pri návrhu a tvorbe nových súčiastok, pri poškodených súčiastkach, pri kopírovaní existujúcich súčiastkach a pri tvorbe chýbajúcej výkresovej dokumentácie.

Novou oblasťou v rámci reverzného inžinierstva je reverzné geometrické modelovanie. Úlohou reverzného geometrického modelovania je vytvorenie plošného alebo objemového 3D modelu z mraku bodov alebo z polygonálneho 3D modelu, ktorý bol získaný kontaktnými alebo bezkontaktnými metódami zberu dát. Študenti sa oboznámia hlavne s optickým 3D skenovaním, ktoré patrí do skupiny bezkontaktných metód zberu dát. V skriptách nájdú základné rozdelenie, ako aj postup a funkcie, ktoré sa využívajú pri rekonštrukcii polygonálneho 3D modelu alebo mraku bodov.

Súčasťou skript sú príklady reverzného geometrického modelovania rôznych fyzických modelov, ktoré sa využívajú v odvetviach, ako sú automobilový priemysel, energetický priemysel, strojársky priemysel, stavebníctvo a umenie. Skriptá sú doplnené o prehľad softvérov, ktoré sa využívajú pri reverznom geometrickom modelovaní. Taktiež obsahujú slovensko-anglický slovník používaných výrazov v oblasti reverzného inžinierstva.

Veríme, že skriptá pomôžu študentom rozšíriť si svoje vedomosti o oblasť reverzného inžinierstva a reverzného geometrického modelovania.

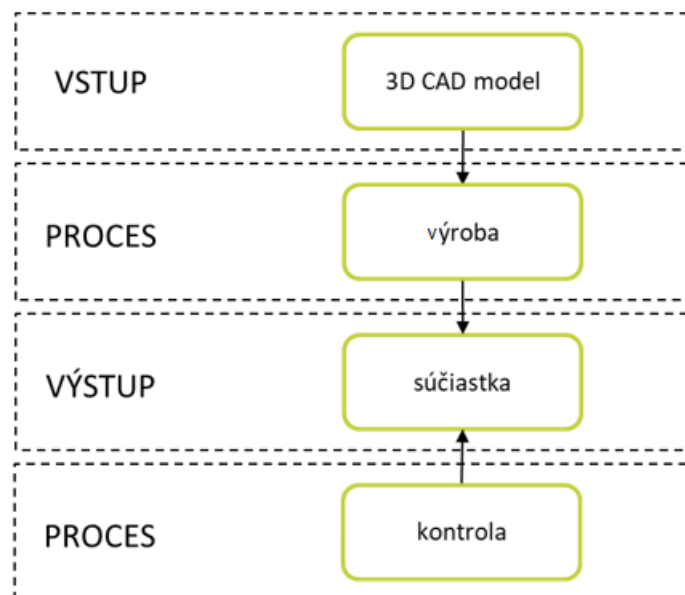
Tieto skriptá vznikli ako súčasť riešenia projektu KEGA 022STU-4/2019 Zvyšovanie profesijných kompetencií absolventov univerzitného vzdelávania v odbore Výrobné technológie implementovaním prvkov duálneho vzdelávania.

Kolektív autorov

1 REVERZNÉ INŽINIERSTVO V PROCESE VÝROBY SÚČIASTOK

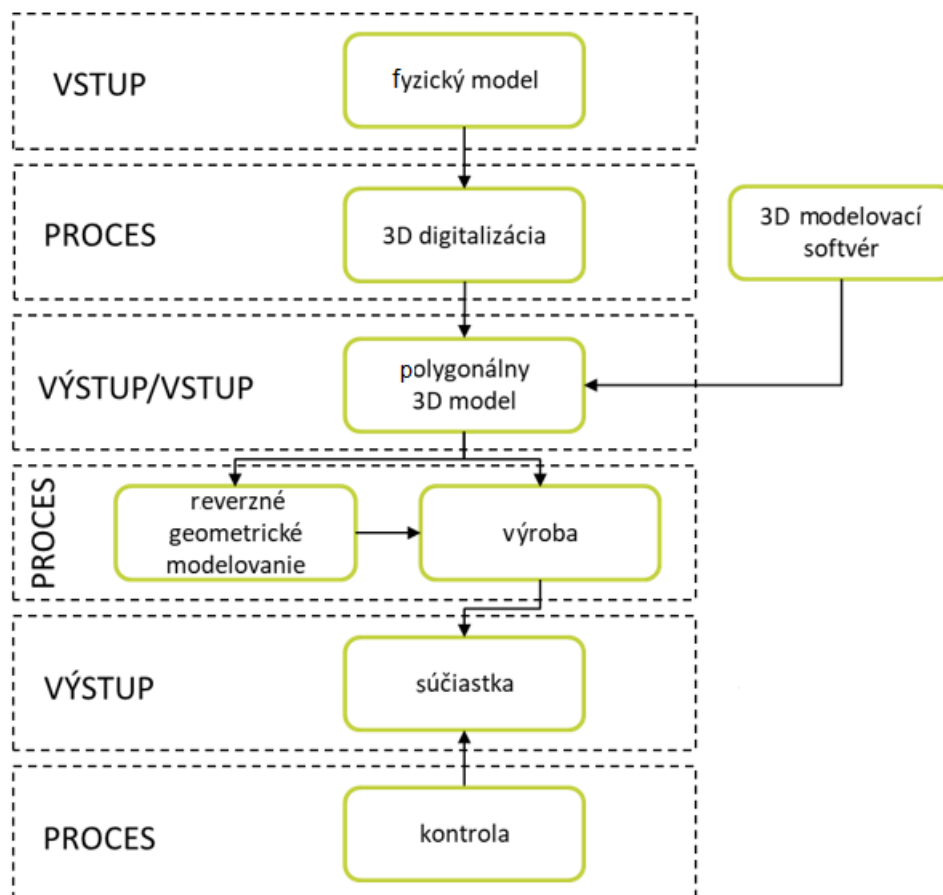
Reverzné inžinierstvo je spätný proces projektovej činnosti [1]. Reverzné inžinierstvo je proces konverzie veľkého mraku bodov na 3D CAD model [2], [3]. Reverzné inžinierstvo zahŕňa použitie takých techník, kde sa získavajú informácie o vyrobených produktoch [4]. Reverzné inžinierstvo je technika na vytvorenie 3D virtuálneho modelu z existujúceho fyzického objektu [5].

Výrobu súčiastok rozdeľujeme na klasický spôsob výroby súčiastok a výrobu súčiastok použitím reverzného inžinierstva (Obr. 2). Pri klasickom spôsobe výroby súčiastok (Obr. 1) je vstupným formátom 3D CAD model vytvorený v CAD softvéri. 3D CAD model sa použije ako vstupný formát do CAM softvéru, pomocou ktorého sa generujú dráhy pre aditívnu výrobu alebo subtraktívnu výrobu. Aditívna a subtraktívna výroba je CNC riadená. Princípom aditívnej výroby je pridávanie hmoty a princípom subtraktívnej výroby je odoberanie hmoty. Proces výroby súčiastok zahŕňa okrem modelovania a výroby aj spätnú kontrolu súčiastok.



Obr.1 Klasický spôsob výroby súčiastok

Pri použití **reverzného inžinierstva** v procese výroby súčiastok (Obr. 2) je dôležitým krokom rekonštrukcia polygonálneho 3D modelu. Preto sa proces výroby súčiastok použitím reverzného inžinierstva doplnil o proces, ktorý zahŕňa spätné vytvorenie plošného alebo objemového 3D modelu z polygonálneho 3D modelu alebo polygonálnej siete. Tento proces sa nazýva **reverzné geometrické modelovanie**.



Obr. 2 Výroba súčiastok použitím reverzného inžinierstva

Na obrázku 3 sú znázornené tvary reálnych súčiastok – fyzický model. Do procesu výroby súčiastky použitím reverzného inžinierstva v prvom kroku vstupuje fyzický model. Fyzický model reprezentuje súčiastku, ktorá môže byť poškodená, je potrebné realizovať jej úpravu, alebo neexistuje výkresová dokumentácia. Ďalším krokom v reverznom inžinierstve je 3D digitalizácia, ktorá zahŕňa získavanie tvaru a rozmeru fyzického modelu použitím kontaktných alebo bezkontaktných metód získavania dát. Dôležitou oblasťou reverzného inžinierstva je výroba súčiastok na

základe 3D polygonálneho modelu (výroba aditívnou výrobou) alebo výroba súčiastok na základe 3D CAD modelu (napr. trieskové CNC obrábanie).



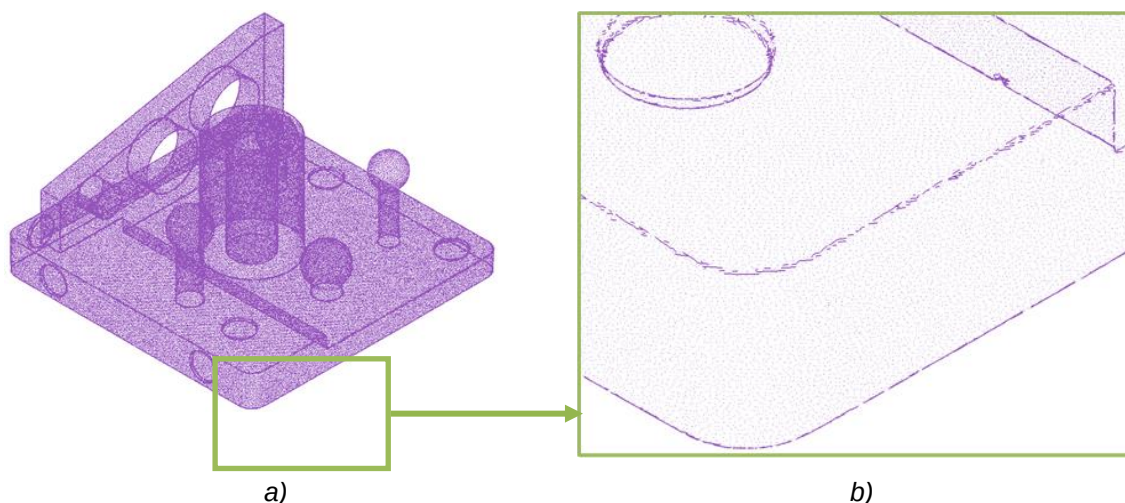
Obr. 3 Príklady fyzických modelov reálnych súčiastok

1.1 VSTUPNÝ A VÝSTUPNÝ FORMÁT REVERZNÉHO INŽINIERSTVA

Vstupným formátom pre reverzné inžinierstvo je mrak bodov alebo polygonálny model tvorený trojuholníkovou sieťou. Výstupným formátom z reverzného inžinierstva je objemový alebo plošný model.

1.1.1 MRAK BODOV

Mrak bodov znázornený na obrázku 4 je v podstate súbor bodov, ktoré sa získajú kontaktnými a bezkontaktnými spôsobmi zberu dát. Použitím kontaktných metód zberu dát a niektorých bezkontaktných metód zberu dát (laser, optika) získame mrak bodov, ktorý má informácie iba o vonkajšej časti súčiastky. Použitím bezkontaktných metód zberu dát ako sú CT, MRI získame informácie nielen o vonkajšej časti, ale aj informácie o vnútornej časti súčiastky. Každý bod z mraku bodov je definovaný súradnicami X, Y, Z. Ako je uvedené na strane [6], známe formáty pre mrak bodov sú: txt, asc, xyz, mod, pim, prd, csv, PCD a iné. Mrak bodov je výstupný formát z 3D digitalizácie. Z mraku bodov je možné získať polygonálnu sieť, krivku, rozdeliť mrak na menšie časti, spojiť mrak bodov a iné [7]. Trianguláciou mraku bodov sa vytvorí polygonálny 3D model alebo polygonálna sieť.

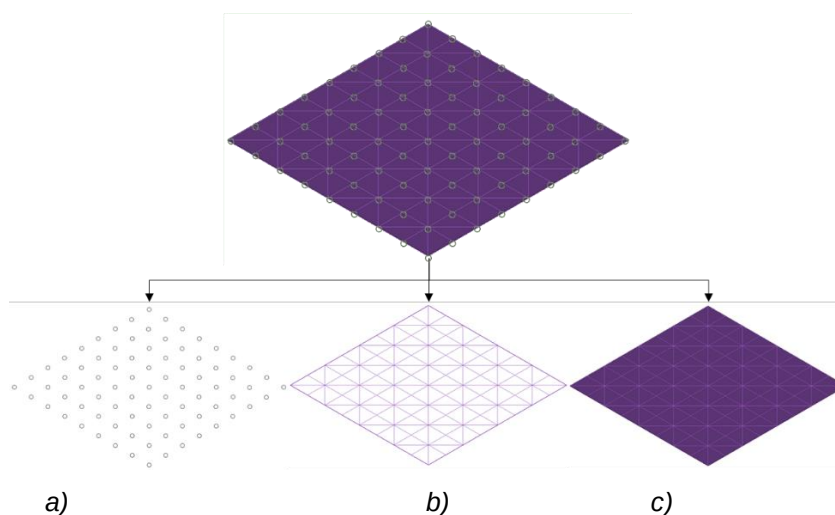


Obr. 4 Model reprezentovaný mrakom bodov

- a) mrak bodov,
b) detail na mrak bodov.

1.1.2 POLYGONÁLNY MODEL (STL FORMÁT)

Polygonálny 3D model je tvorený polygonálnou sieťou. Polygonálna sieť je tvorená polygónom, ktorým je trojuholník, štvorhran alebo viachran. Jeden polygón sa nazýva „face“. Polygón je tvorený vrcholovými bodmi, hranami a plochou. Tejto ploche sa hovorí „face“ [8]. Polygonálny (trojuholníkový) 3D model vznikne trianguláciou mraku bodov. Na obrázku 5 je znázornená polygonálna sieť a jej rozklad na body, hrany a plochy.

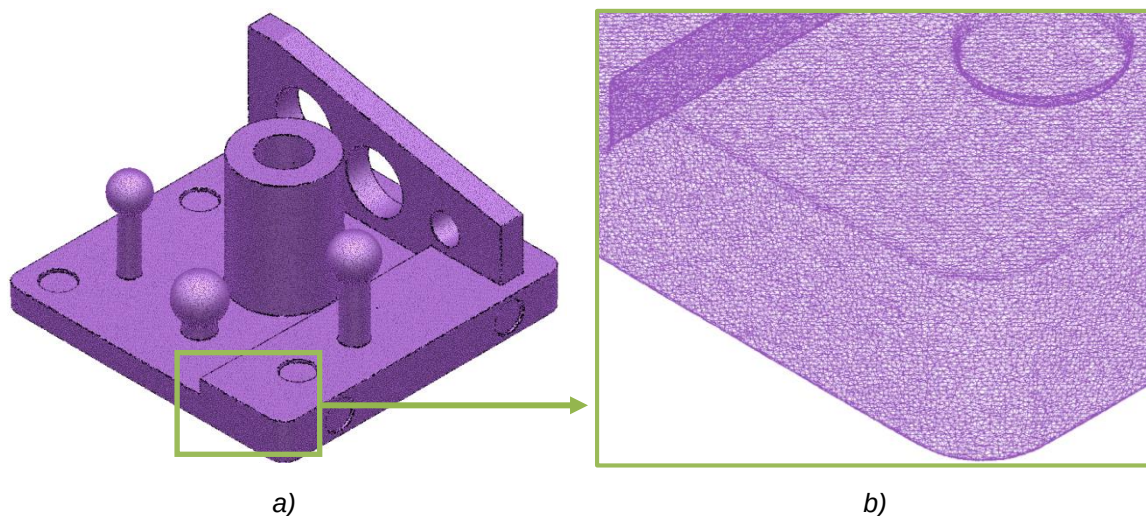


Obr. 5 Polygonálna trojuholníková sieť

- a) mrak bodov,
b) hrany polygonálnej siete,
c) plochy polygonálnej siete tzv. „faces“.

Najpoužívanejší formát pre zápis polygonálneho 3D modelu je formát STL. Formát STL sa stal štandardom pri aditívnej výrobe a ako výstupný formát z CAQ softvérov. Polygonálny 3D model vo formáte STL môže byť v binárnom alebo v ASCII zápise (Fabbers.com, 2020). Rozdiel je v zápise a vo veľkosti súboru v MB. Polygonálny 3D model znázornený na obrázku 6 má v binárnom zápise veľkosť súboru 29,1 MB a pri ASCII zápise je veľkosť súboru 116,1 MB.

Na obrázku 6a je zobrazený polygonálny 3D model a na obrázku 6b je zobrazený detail polygonálnej trojuholníkovej siete. Polygonálny 3D model je jeden zo vstupov do reverzného geometrického modelovania. Využíva sa ako 3D model pre polotovary do CAM softvérov. Úprava a modelovanie polygonálnych 3D modelov sa realizuje špeciálnymi funkciami pridať a odobrať materiál, základnými funkciami ako sú booleovské operácie, vytvorenie škrupiny a ďalšie [9]. Softvér Meshmixer výhradne pracuje s polygonálnym trojuholníkovým 3D modelom. Softvér obsahuje okrem základných funkcií aj rozšírené funkcie na prácu s polygonálnym 3D modelom [10].



Obr. 6 Model reprezentovaný polygonálnym 3D modelom (Autor habilitačnej práce)

- a) polygonálny (trojuholníkovej) 3D model,
- b) detail na polygonálnu (trojuholníkovú) sieť.

1.2 NEUTRÁLNE FORMÁTY V REVERZNOM GEOMETRICKOM MODELOVANÍ

Neutrálne formáty sú dôležitými výmennými formátmi medzi softvérmi CAE, CAD a CAM. Výhodou neutrálnych formátov je jednoduchá výmena súborov vytvorených v CAD softvéri. Ako sa spomína v **kapitole 4**, úlohou reverzného geometrického modelovania je rekonštrukcia polygonálneho modelu (formát STL) do plošného alebo objemového modelu (IGES (IGS) alebo STEP (STP)). Opis nasledujúcich formátov je podľa normy [11].

Z prehľadu vedeckej literatúry vyplýva, že pri reverznom geometrickom modelovaní dôležitú úlohu zohráva výstupný formát 3D modelu. Neutrálne formáty sú také, ktoré sa využívajú nielen naprieč CAD softvérmi, ale aj naprieč CA systémami. Dôvodom použitia neutrálnych formátov je rozmanitosť CAD softvérov. Každý výrobca CAD softvéru používa vlastný vnútorný formát. Tento vnútorný formát CAD softvéru nie je možné použiť v inom CAD softvéri, pokiaľ nie sú vyriešené licenčné poplatky. Z dôvodu týchto skutočností vznikli neutrálne formáty. Neutrálne formáty sa rozdeľujú na 2D a 3D neutrálne formáty. Medzi neutrálne formáty, ktoré reprezentujú počítačový model sa radia [12]: DXF, IGES, IGS, STEP, STP, STL, VRML, U3D, PRC, JT, X_T, X_B, TXT, ASC a iné.

1.2.1 IGES FORMÁT

IGES (Initial Graphics Exchange Specification) je neutrálny formát a medzinárodný štandard na výmenu CAD dát (modelov) medzi rozdielnymi CAD systémami. Formát IGES bol vyvinutý prevažne na prenos geometrických údajov týkajúcich sa 2D výkresovej dokumentácie a pre 3D plošné modely (vrátane Bezierových a NURBS plôch). IGES vo verzii 5.3 a vyššie používa tiež objemové prvky (kváder, valec, guľa atď.). Časom pribudlo ďalších 40 geometrických prvkov (plochy, krivky, oblúky, body a súradnicové systémy) a viac ako 35 negeometrických prvkov (text, kótovanie, tolerancie atď.). IGES verzia 6.0 je najnovšia a zároveň posledná verzia [11].

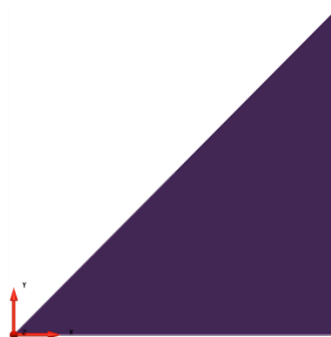
1.2.2 STEP FORMÁT

STEP (Standard for the Exchange of Product model data) je systémovo neutrálny formát na opis a výmenu údajov o modeli medzi rôznymi CAD systémami. STEP sa dá použiť na prenos údajov o produkte (napr. farby, text a iné.) okrem geometrických údajov (ako v prípade IGES alebo DXF). Do STEP formátu môžu byť integrované všetky formy dátového CAD modelu (drôtové modely, plošné modely a objemové modely)[11].

1.2.3 FORMÁT STL

STL formát je štandardný formát na prenos dát. STL súborový formát (Surface Tessellation Language alebo Stereolitografia) sa etabloval ako kvázi priemyselný štandard na prenos údajov v aditívnej výrobe. Je to neutrálny formát na výmenu čisto geometrických dát. Hraničné plochy sú opísané trojuholníkmi a normálovými vektormi. Súbor údajov možno uložiť ako ASCII alebo binárne. Binárny formát (**Obr. 8**) je preferovaný, pretože objem údajov je výrazne menší ako pri ASCII (**Obr. 7a**). Formát STL nie je odporúčaný na výmenu údajov medzi CAD/CAM systémami, pretože geometria je tvorená trojuholníkmi.

```
solid Jeden_trojuholnik_ASCII.stl
facet normal 0.000000 0.000000 1.000000
outer loop
  vertex 6.250000 6.250000 0.000000
  vertex 0.000000 0.000000 0.000000
  vertex 6.250000 0.000000 0.000000
endloop
endfacet
endsolid Jeden_trojuholnik_ASCII.stl
```



a)

b)

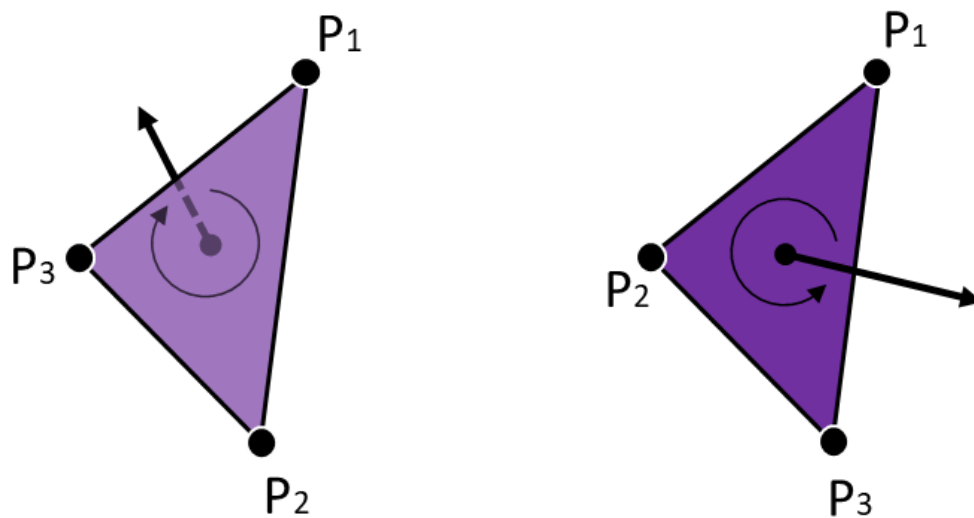
Obr. 7 Zápis jedného trojuholníka vo formáte STL – syntax ASCII

a) ASCII zápis trojuholníka, b) trojuholník vytvorený v softvéri PowerShape.

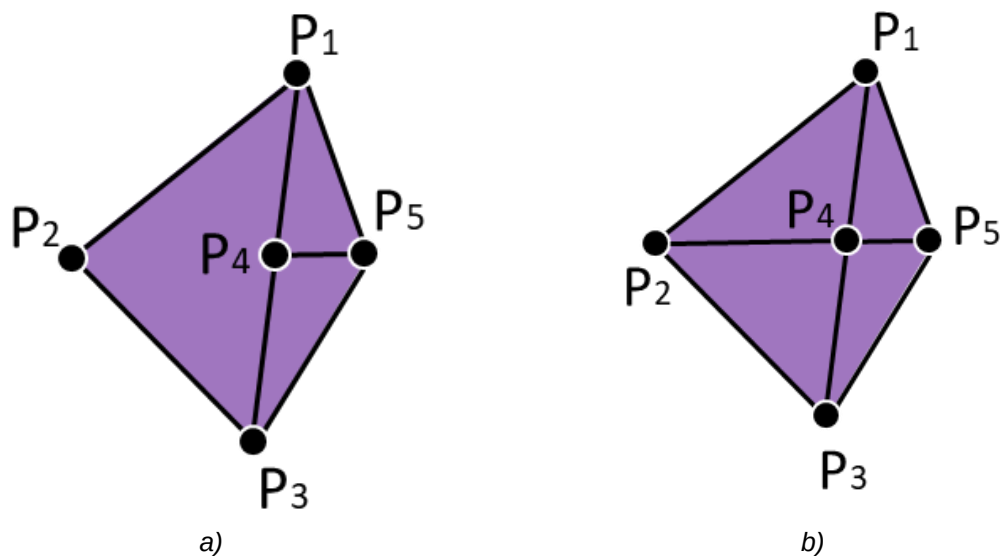
```
UINT8[80] – Header
UINT32 – Number of triangles
foreach triangle
  REAL32[3] – Normal vector
  REAL32[3] – Vertex 1
  REAL32[3] – Vertex 2
  REAL32[3] – Vertex 3
  UINT16 – Attribute byte count
End
```

Obr. 8 Zápis trojuholníkov v binárnom formáte

Pri tvorbe polygonálnej siete, ktorá je tvorená trojuholníkmi, je potrebné dodržať niekoľko pravidiel. Prvým pravidlom je dodržanie orientácie trojuholníkov zobrazených na obrázku 9. Trojuholník je tvorený bodmi P_1 , P_2 a P_3 , normálový vektorom orientácie. Trojuholníky sa tvoria vždy na základe troch bodov v protismere hodinových ručičiek.



Obr. 9 Orientácia trojuholníka [13]



Obr. 10 Pravidlo tvorby trojuholníkov pre STL formát

- a) porušenie pravidla tvorby trojuholníkov,
- b) správne vytvorené trojuholníky.

1.2.4 FORMÁT JT

JT (Jupiter Tessellation) je neutrálny dátový formát, ukladá a prenáša teselovú geometriu v rôznych rozlíšeniach (JT ULP), ako aj hraničnú geometriu (JT BREP a XT BREP). Formát je štandardizovaný podľa ISO 14306. Podporuje ukladanie ďalších metadát geometrie, ako sú farby, väzby alebo tolerancie. Výsledkom je kompaktný formát údajov, ktorý ukladá obsah obzvlášť efektívne. Formát JT je už zavedený ako kvázi priemyselný štandard v niektorých oblastiach.

1.2.5 FORMÁT PLY

PLY formát predstavuje formát súboru typu Polygon. Je tiež známy ako formát Stanfordského trojuholníka, ktorý bol navrhnutý predovšetkým na ukladanie 3D údajov z 3D skenerov. PLY sa skladá z jedného objektu, ktorý popisuje súbor vrcholov, „faces“ a ďalších prvkov, ako sú farba a smery normály. Má dva formáty súborov: ASCII a binárne[13].

1.2.6 FORMÁT OBJ

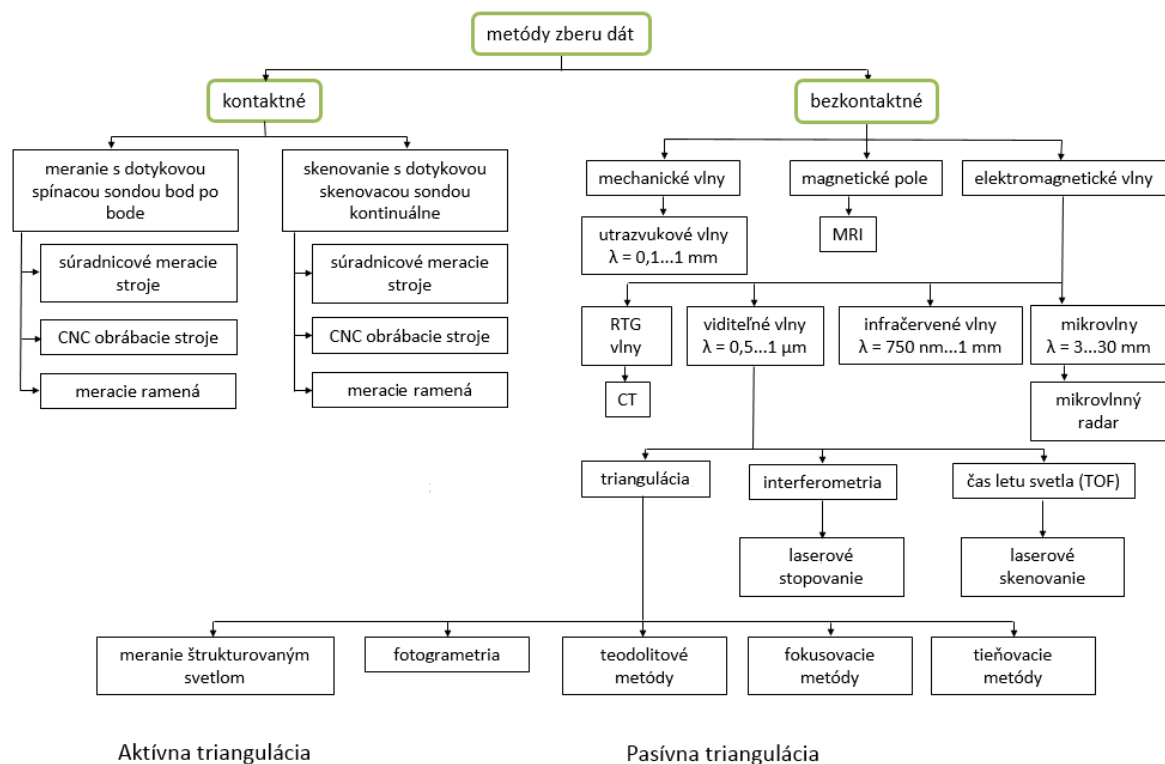
OBJ wavefront formát je jednoduchý, otvorený a textovo založený geometrický formát. Formát súboru OBJ predstavuje 3D geometriu, konkrétne polohu každého vrcholu. Súbor OBJ sú uložené s príponou .obj. Tieto súbory nedefinujú objemovo materiály a mikroštruktúru [13]. Formát je využívaný pri aditívnej výrobe ako vstupný formát.

2 ZÍSKAVANIE ÚDAJOV REÁLNYCH SÚČIASTOK

Obsahom druhej kapitoly sú metódy zberu údajov reálnych modelov, inak tiež nazývaných fyzické modely, súčiastky alebo diely. V kapitole sú opísané spôsoby získavania údajov použitím súradnicových meracích zariadení, optickým 3D skenerom a priemyselným súradnicovým tomografom. Každá zo spomínaných metód získavania údajov má svoje výhody a nevýhody.

2.1 METÓDY ZÍSKAVANIE ÚDAJOV REÁLNYCH SÚČIASTOK

Metódy zberu dát fyzických modelov sú znázornené na obrázku 11. Rozdelenie metód zberu údajov je podľa autora uvedeného v literatúre [14], [15], ktorý pri rozdelení zberu dát vychádzal zo známych klasifikácií mnohých autorov [3], [16], [17].



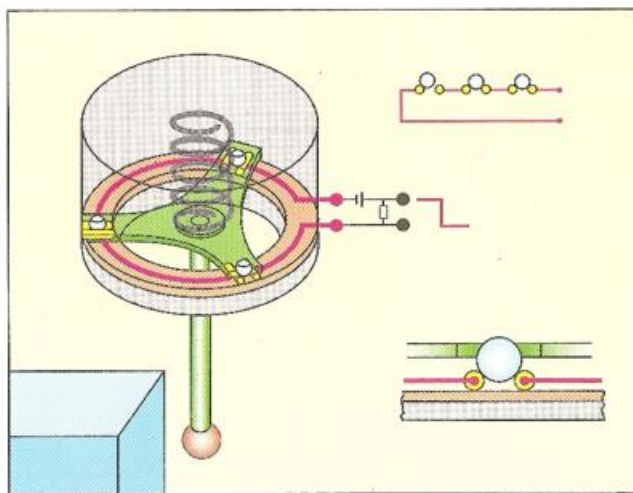
Obr. 11 Metódy zberu dát [14][15]

2.1.1 ZÍSKAVANIE ÚDAJOV POUŽITÍM SÚRADNICOVÝCH MERACÍCH STROJOV

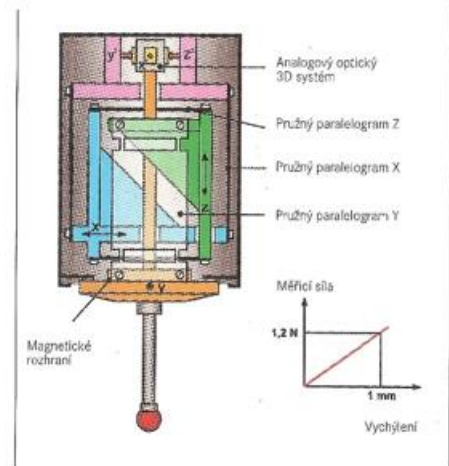
V prípade kontaktných metód zberu dát súradníc bodov medzi meracou sondou a meraným objektom počas merania nastáva fyzický kontakt. Na kontaktné meranie povrchu sa používajú **súradnicové meracie stroje**, **meracie ramená** alebo **CNC obrábacie stroje**, kde do vretena stroja namiesto obrábacieho nástroja počas merania je upnutý merací dotykový senzor. Do týchto zariadení sa dajú upnúť aj meracie hlavice, ktoré merajú súradnice bodov bezkontaktnou metódou.

V prípade kontaktných metód sú známe 2 typy techník používaných pri zbere dát:

- a) **snímanie „bod po bode“ so spínacím dotykom** (touch-trigger probe),
- b) **snímanie analógové so skenovacím dotykom** (scanning probe) [18].



Obr. 12 Princíp snímačej hlavy spínacieho typu
(touch-trigger probe) [20]



Obr. 13 Princíp 3D merace
(scanning probe) [20]

V prípade snímania technikou „bod po bode“ je použitý **spínací dotyk** (touch trigger probe) (Obr. 12), ktorý je namontovaný na CMM, CNC frézovací stroj alebo na mechanické meracie rameno na zber súradníc bodov na povrchu. Ručne obsluhované mechanické meracie rameno so spínacím dotykom (touch trigger probes) umožňuje polohovanie s viacnásobným stupňom voľnosti na zber meraných bodov. CMM so spínacím dotykom (touch trigger probe) je naprogramovateľný na sledovanie naplánovanej trasy na povrchu meraného objektu. CMM vykonáva presnejšie meranie s porovnaním s mechanickým meracím ramenom. CMM majú však menej stupňov voľnosti v porovnaní s mechanickými meracími ramenami, t.j.

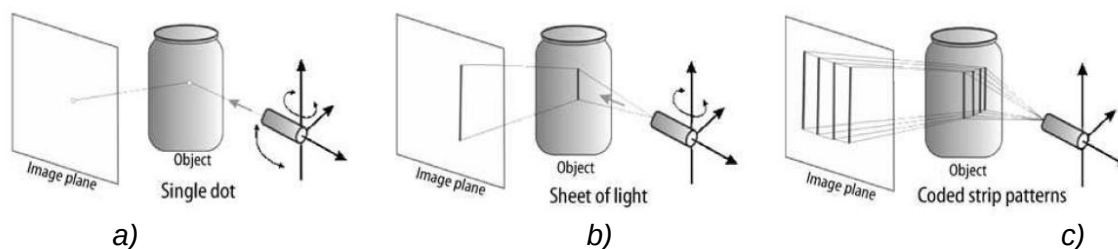
CMM nemožno použiť na digitalizáciu komplexných povrchov rovnakým spôsobom ako mechanické meracie ramená [19].

V prípade **analogového snímania skenovací dotyk** (scanning probe) (Obr. 13) je nainštalovaný na CMM alebo na CNC stroj. Skenovací dotyk (scanning probe) vykonáva neprerušovaný pohyb, ktorý môže byť kombinovaný s polohou stroja na získanie polohy povrchu. Počas skenovania **snímací hrot sa dotýka povrchu a pohybuje sa kontinuálne po ploche skenovaného objektu** a zbiera údaje počas pohybu. Rýchlosť skenovania (snímania) v prípade analogového snímania je max. 3-krát rýchlejšia ako pri snímaní metódou bod po bode [18], hrozí tu však nebezpečenstvo poškodenia modelu ryhami po hrote.

2.1.2 ZÍSKAVANIE ÚDAJOV POUŽITÍM OPTICKÉHO 3D SKENERA

Metóda aktívnej triangulácie je založená na získaní súradníc bodu povrchu meraného objektu osvetlením povrchu objektu pri jeho súčasnom snímaní. Princíp metódy aktívnej triangulácie je na (obr. 14) a (obr. 15). **Zdroj svetla** (určený na osvetlenie povrchu objektu), **snímač** (snímajúci osvetlený bod povrchu objektu, obvykle CCD chip) a **snímaný bod** povrchu objektu tvoria **trojuholník**. Spojnica (b) medzi svetelným zdrojom a snímačom sa nazýva **triangulačná báza**. Uhol (α) na strane svetelného zdroja je nemenný, kým uhol (β) na strane snímača je premenný podľa meniaceho osvetleného bodu (pixelu) CCD chipu snímača.

Na základe známeho uhla (α) a (β), jednej strany trojuholníka (b) a parametrov snímača (t.j. kamery tvorený objektívom a CCD chipom, známe parametre sú rozmery CCD chipu (c), rozlíšenie CCD chipu (počet pixelov - pxl) a ohnisková vzdialenosť objektívu (f)) možno vypočítať vzdialenosť (l) [21].



Obr. 14 Rôzne svetelné vzory použité pri meraní štruktúrovaným svetlom [18]

- a) svetelný bod,
- b) svetelná čiara,
- c) štruktúrovaný svetelný vzťah.

K osvetleniu povrchu meraného objektu sa používajú nasledovné vzory zobrazené na obrázku 14. [22], [18]:

- svetelný bod (1-D triangulácia; single point, single dot),
- svetelná čiara (2-D triangulácia; sheet of light),
- štruktúrovaný svetelný zväzok (3-D triangulácia; prúžok (strip), mriežka (grid) alebo zložené, komplikované kódované svetlo (complex coded light)).

Na projektovanie svetelného bodu a svetelnej čiary na meraný povrch sa používa laserový zdroj svetla. V prípade štruktúrovaného svetelného zväzku je použitý **svetelný projektor**. Systém premieta vzory (prúžok (strip), mriežku (grid) alebo zložené, komplikované kódované svetlo (complex coded light)) na povrch meraného objektu [18].

Z pohľadu počtu použitých CCD čipov (snímačov) sú známe 2 varianty aktívnej triangulácie [18]:

- a) systém s 1 CCD kamerou (single CCD kamera),
- b) systém s 2 CCD kamerami (double CCD kamera).

Matematický opis 1-D triangulácie [21]

Ak odrazený lúč svetla od meraného povrchu je premietaný na n-tý pixel z celkového počtu pixelov (pxl) CCD snímača, potom veľkosť zodpovedajúceho premietania (a) možno vypočítať podľa (vzorca 1), kde (c) je rozmer CCD čipu.

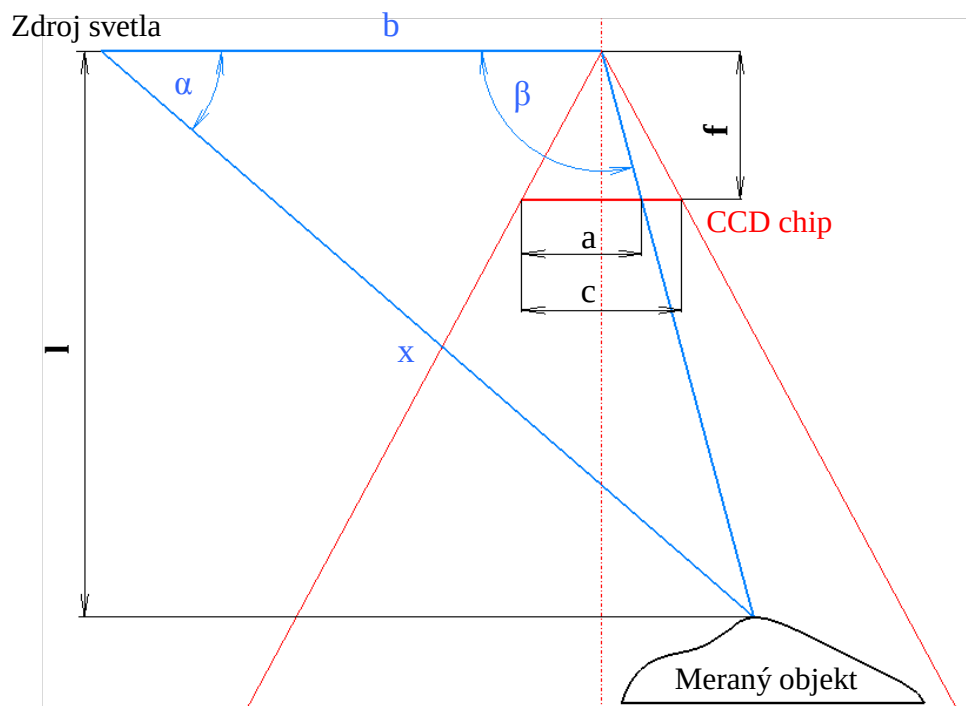
$$a = \frac{c \cdot n}{pxl} \quad [\text{mm}] \quad (1)$$

Hodnota premietanie (projekcie) (a) je použitá pri výpočte uhla (β) (vzorcom 2), kde (f) je ohnisková vzdialenosť objektívu

$$\beta = \arctg\left(\frac{c/2 - a}{f}\right) + 90^\circ \quad [^\circ] \quad (2)$$

Vzdialenosť (l) potom možno určiť podľa (vzorca 3), kde (b) je triangulačná báza

$$l = \frac{b \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta}{\sin(180^\circ - (\alpha + \beta))} \quad [\text{mm}] \quad (3)$$



Obr. 15 Princíp aktívnej triangulácie (1-D triangulácia) [21]

Matematický opis 2-D a 3-D triangulácie je zložitý. To je dôvodom, prečo je použitý transformačný vzorec získaný kalibráciou. Použitá je transformačná matica (rozmer 3x3). Každý prvok matice predstavuje, znázorňuje, opisuje, vyjadruje vzájomný, spoločný vzťah medzi obrazom (súradnice u, v) a priestorom objektu (x, y, z). Tento vzťah je určený (vzorcom 4)

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_1 & t_2 & t_3 \\ t_4 & t_5 & t_6 \\ t_7 & t_8 & t_9 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

Na zistenie členov matice ($t_1, t_2, \dots, t_9$) je potrebná kalibrácia známym objektom (známe priestorové súradnice bodov resp. značiek na kalibračnom objekte. Potom je potrebné stanoviť dátový súbor so sadou bodov vo formáte u, v, x, y, z . Týmito údajmi je transformačná matica zostavená minimalizáciou rozdielov medzi nastavenými a vypočítanými hodnotami [21].

Metódou aktívnej triangulácie sa dajú získať súradnice bodov povrchu v relatívne krátkom čase. Presnosť merania je určená hlavne rozlíšením snímača (CCD čipu) a vzdialenosťou medzi meraným povrchom a snímačom [3]. Presnosť merania je

závislá aj na optických vlastnostiach materiálu skenovaného objektu. Rozhodujúcim faktorom je povrchová úprava súčiastky. Povrch súčiastky môže byť matný alebo lesklý. V prípade lesklých súčiastok je potrebné povrch zmatniť.

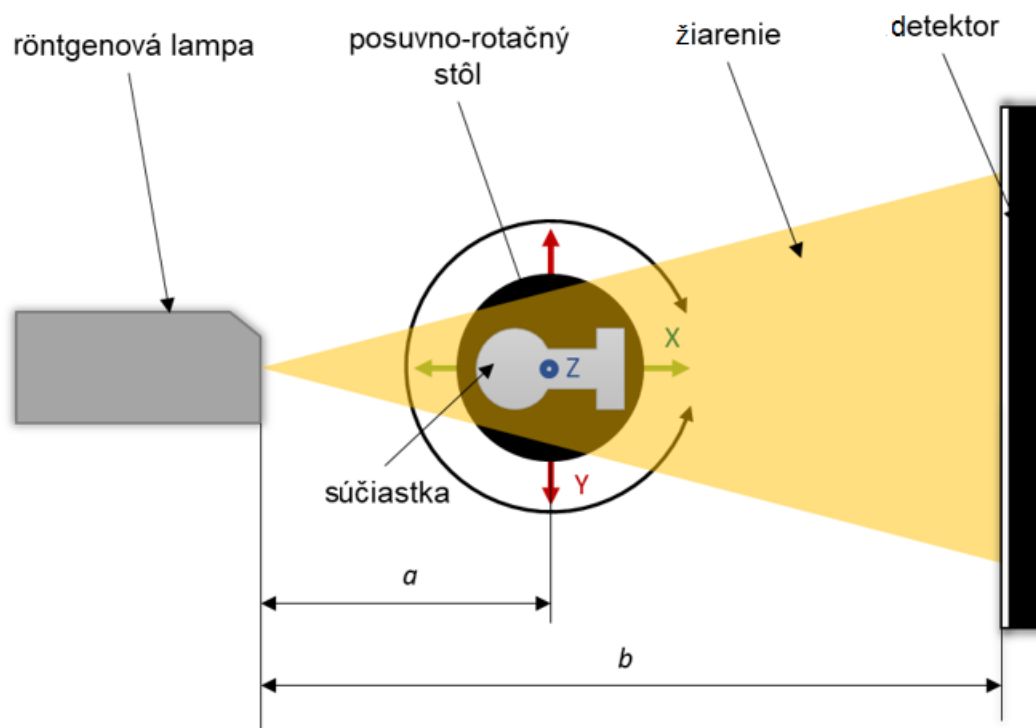
Pri použití 3-D aktívnej triangulácie je naraz naskenovaná väčšia plocha objektu ako pri 1-D a 2-D aktívnej triangulácie. 3D skenery využívajúce metódy aktívnej triangulácie sú zvyčajne použité na skenovanie objektov objemu cca do $3 \div 4 \text{ m}^3$ zo vzdialeností cca do 3 mm. Dosiahnuteľná presnosť 3D skenovania je cca 0,02 mm. Sú dodávané ako kompletne skenovacie systémy so statívom alebo ako nezávislé skenovacie hlavice pre montovanie na štandardné meracie ramená, CMM alebo CNC frézovacie stroje [18].

2.1.3 ZÍSKAVANIE ÚDAJOV POUŽITÍM PRIEMY SELNÉHO POČÍTAČOVÉHO TOMOGRAFU

Priemyselné tomografy ponúkané na trhu majú poväčšine podobnú konštrukciu. Medzi zdrojom rtg žiarenia a detektorom, ktorý premieňa žiarenie na elektrický signál (čiže na informáciu), rotuje meraná súčiastka okolo zvislej osi. Počas jej rotácie sa v jednotlivých krokoch snímajú rtg obrazy, tzv. röntgénogramy. Z týchto obrazov (často niekoľko stoviek) vytvorí rekonštrukčný softvér trojrozmerný model reálnej súčiastky vo forme mračna bodov[23].

Získaný trojrozmerný model je reprezentovaný mračnom bodov, kde každému bodu sú priradené konkrétne súradnice x , y , z v priestore a intenzita, ktorá zodpovedá hustote materiálu súčiastky. Tieto body sa nazývajú aj voxely – názov je odvodený od trojrozmerného obrazového bodu VOlume piXEL. To znamená, že nedostaneme naskenované iba povrchové plochy súčiastky (obalové), ako je to napríklad pri skenovaní optickým skenerom pomocou kamier, ale dostaneme informáciu aj o vnútornom materiáli, ktorý tvorí objem súčiastky. Princíp priemyselnej počítačovej tomografie je zobrazený na obrázku 16.

Veľkosť voxelu možno vypočítať ako pomer veľkosti pixelu a zväčšenia (M). Zväčšenie sa kvantifikuje ako podiel vzdialenosti medzi röntgenovou lampou a detektorom (b) a vzdialenosti medzi röntgenovou lampou a skenovanou súčiastkou (a). Z toho vyplýva, že čím je súčiastka umiestnená bližšie k röntgenovej lampe, tým menšia je hodnota voxelu. Hodnota voxelu sa udáva v μm .



Obr. 16 Princíp priemyselného počítačového tomografu

*a – vzdialenosť súčiastky od röntgenovej lampy,
b – vzdialenosť röntgenovej lampy od detektora.*

Hlavné parametre, ktoré sa nastavujú pri získavaní dát použitím priemyselnej počítačovej tomografii, sú: napätie [kV], prúd [μ A], integračný čas [ms], rozlíšenie detektora [pixel - px], počet snímok [-], vzdialenosť meranej súčiastky od röntgenovej lampy. Ďalej sa používajú filtre, ktoré zabraňujú odrazom röntgenového žiarenia. Filter sa umiestňuje pred röntgenovú lampu. Materiál filtra môže byť olovený alebo medený.

Meraná súčiastka sa pri priemyselnej počítačovej tomografii umiestňuje na posuvno-rotačný stôl (niektoré zariadenia obsahujú rotačno-výklopno-posuvný stôl). Najvhodnejším prípravkom na upnutie a ustavenie meranej súčiastky je prípravok vyrobený z polystyrénu. Výhodou počítačovej tomografie je získavanie nielen informácií o vonkajších rozmeroch súčiastky, ale aj vnútorných rozmeroch a tvaru. Získané údaje sa používajú pri kontrole rozmerov (dĺžkových a uhlových) a kontrole pórovitosti súčiastok.

2.2 VÝHODY A NEVÝHODY KONTAKTNÝCH A BEZKONTAKTNÝCH METÓD ZBERU DÁT

Ako uvádza autor Morovič (2013) vo svojej habilitačnej práci, v strojárstve a v príbuzných odboroch na získavanie súradníc bodov sa najčastejšie využívajú kontaktné metódy zberu dát a 3D skenery (optické, laserové). V súčasnosti sa rozširuje bezkontaktná metóda zberu dát použitím počítačovej tomografie (priemyselná počítačová tomografia). V tabuľke 1 sú uvedené hlavné výhody a nevýhody kontaktných a bezkontaktných metód podľa [14], ktoré sú doplnené o výhody a nevýhody priemyselnej počítačovej tomografie. Uvedené sú len niektoré výhody a nevýhody.

Tabuľka 1: Výhody a nevýhody kontaktných a bezkontaktných metód zberu dát

	kontaktné metódy zberu dát [14]	bezkontaktné metódy zberu dát	
		3D skenery[14]	Počítačová tomografia
výhody	- vysoká presnosť - nízka spúšťacia sila dotykového senzora - pri analógových dotykových sondách vysoká hustota získaných dát - možnosť skenovať reflexné plochy - skenovanie kolmých plôch - nie je potrebné sprejovať priesvitné a reflexné plochy objektu - možnosť nastavenia dynamiky snímania	- rýchly zber dát - Vysoká hustota získaných dát - absencia fyzického kontaktu medzi zariadením a objektom - 3D digitalizácia objektov z mäkkých materiálov - možnosť skenovať tvarovo zložité objekty - mobilita 3D skenerov	- rýchly zber dát - Vysoká hustota získaných dát - možnosť skenovať neprístupné miesta a vnútornú geometriu - 3D digitalizácia objektov z mäkkých materiálov - možnosť skenovať tvarovo zložité objekty - možnosť merať vnútorné defekty, póry a inklúzie

nevýhody	- pomalá rýchlosť získavania dát - opotrebenie snímača dotykovej sondy - možnosť frakcie drieku snímača - nemožno skenovať neprípustné miesta objektu a vnútornú geometriu	- nevhodne pre 3D digitalizáciu priesvitných a reflexných plôch - potreba povrchovej úpravy priesvitných a reflexných plôch - nemožnosť skenovať neprípustné miesta objektu a vnútornú geometriu - potreba lepenia reflexných nekódovaných (kódovaných) bodov	- obmedzený pracovný rozmer pre skenovaný objekt - skenovanie ovplyvňuje hustota materiálu meraného objektu - röntgenové žiarenie počas skenovania - čas skenovania závisí od rozlíšenia a počtu obrázkov
--	---	--	--

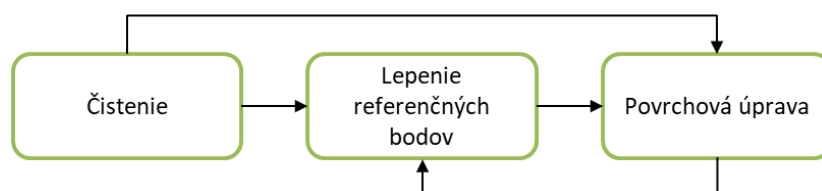
Každú zo spomínaných metód zberu dát je možné použiť na rozdielne spôsoby aplikácie. Kontaktná metóda zberu dát sa používa hlavne na meranie geometrických rozmerov strojárskych súčiastok. Bezkontaktné metódy zberu dát spomínané v tabuľke 3 sa okrem merania rozmerov používajú aj na získavanie polygonálnych 3D modelov.

3 3D DIGITALIZÁCIA OPTICKÝM 3D SKENEROM

Optické 3D skenovanie je veľmi rýchly spôsob získavania údajov fyzických objektov, kde je potrebné dodržať postup krokov potrebných pre získanie 3D počítačového modelu fyzického objektu. Kapitola obsahuje spôsob rozdelenie získavania údajov na jednoduchý a komplexný proces. Komplexný proces tiež nazývame 3D digitalizácia.

3.1 PRÍPRAVA SÚČIASTKY PRED OPTICKÝM 3D SKENOVANÍM

Príprava súčiastky (Obr. 17) je v procese reverzného inžinierstva veľmi dôležitá. Pozostáva z čistenia súčiastky, povrchovej úpravy a lepenia nekódovaných a kódovaných referenčných bodov. Čistenie súčiastok sa realizuje kvôli mastnote a drobným nečistotám. Povrchová úprava a lepenie nekódovaných a kódovaných referenčných bodov sa používa hlavne pri bezkontaktných metódach získavania dát (3D digitalizácii). Niektoré zariadenia bezkontaktného merania nepotrebujú lepenie referenčných bodov patrí tam laserové snímanie povrchu súčiastky. Povrchová úprava sa používa pri súčiastkach, ktoré sú lesklé alebo čierne. Pre zmatnenie povrchu sa používajú kriedové spreje alebo titánový prášok (TiO_2). Titánový prášok sa nanáša vo väčšine prípadov kompresorom pomocou paintbrush-u. Nové 3D digitalizačné zariadenia spolu so softvérovou podporou sú schopné identifikovať lesklé plochy. Pri 3D digitalizácii sa tieto plochy snímajú pod iným uhlom, aby sa zamedzilo odlesku snímanej plochy. Použitím moderných optických 3D skenerov od spoločnosti Zeiss v minulosti vyvíjané spoločnosťou GOM, nie je nutné realizovať povrchovú úpravu lesklých súčiastok. Optický 3D skener spolu so softvérom dokáže identifikovať lesklé časti na súčiastke, ktoré spôsobujú odraz. Tento odraz spôsobuje na polygonálnom modeli diery, ktoré je potrebné v niektorých prípadoch zaplniť.



Obr. 17 Príprava súčiastky pre optický 3D skener

3.2 KALIBRÁCIA

Spôsob **kalibrácie** závisí od typu použitého zariadenia na získavanie polygonálneho modelu alebo mraku bodov. Kalibráciu rozdeľujeme na **dielenskú** a **laboratórnu (tiež nazývaná servisná kalibrácia)**. **Dielenská kalibrácia** sa v prevažnej miere realizuje operátorom meracieho zariadenia priamo na pracovisku. Pozostáva z jednotlivých úkonov a pri týchto úkonoch je potrebné dodržiavať odporúčané postupy. Pri dielenskej kalibrácii sa používajú kalibračné objekty. Medzi kalibračné objekty radíme kalibračné gule (používané pri SMS), kalibračné dosky a kríže (používané pri Optickom 3D skenovaní) a kalibračné elementy (používané pri priemyselných CT). **Laboratórna (servisná) kalibrácia** sa realizuje v klimatizovaných priestoroch pre niektoré meracie systémy. Pokiaľ sa jedná o servisný zásah, vždy po servise sa realizuje kalibrácia zariadenia. Realizuje ho osoba, ktorá je vyškolená. Používajú sa špeciálne kalibračné elementy. Kalibračné elementy pre optické 3D skenery, počítačový tomograf a súradnicové meracie stroje sú zobrazené na obrázku 18, 19, 20[24].



Obr. 18 Gul'ový kalibračný element od firmy GOM GmbH - Zeiss Group (Servisný) [24]



Obr. 19 Kalibračné elementy od firmy GOM GmbH - Zeiss Group [25]

- a) kalibračná doska,
b) kalibračný kríž.

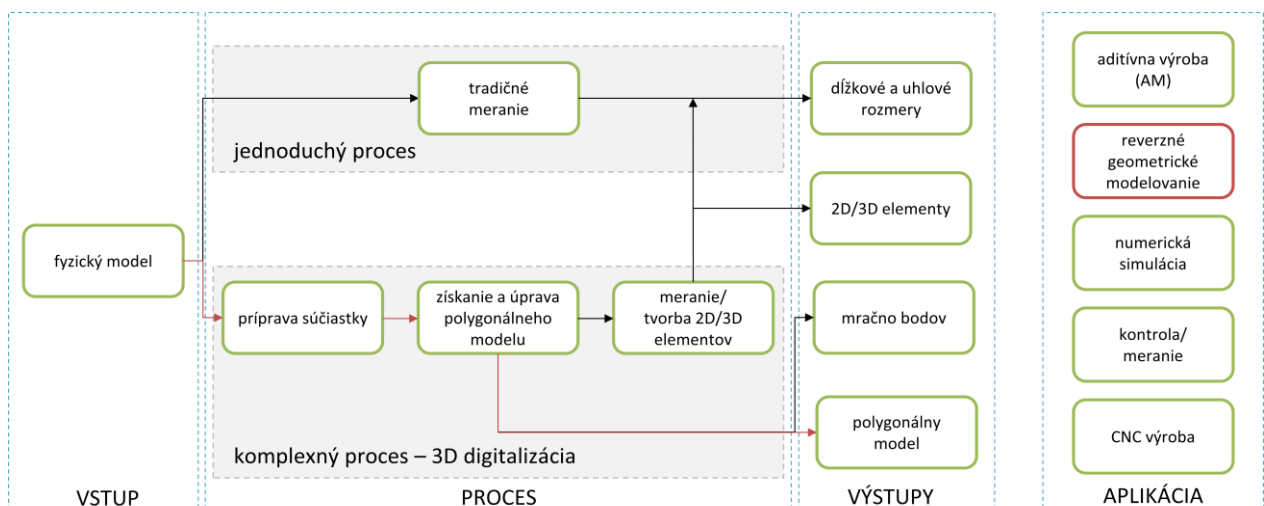


Obr. 20 Kalibračné elementy od firmy ZEISS (Servisné)

- a) kalibračný element pre opakovateľnosť [26],
b) kalibračný element pre SMS [27].

3.3 PROCES ZÍSKAVANIA ÚDAJOV REÁLNYCH SÚČIASTOK POUŽITÍM OPTICKÉHO SKENERA (3D DIGITALIZÁCIA)

Pri získavaní údajov je potrebné poznať vstupy, procesy a výstupy. Reverzné inžinierstvo je systém spätného procesu projektovej činnosti. Reverzné inžinierstvo a reverzné geometrické modelovanie má taktiež svoje vstupy, procesy a výstupy. Dôležité sú aplikácie výstupov z reverzného inžinierstva. Obrázok 21 znázorňuje procesy získavania údajov fyzických modelov v strojárstve pre reverzné inžinierstvo. Vstupom do procesu získavania údajov z fyzických modelov je fyzický model, tzv. reálna súčiastka, ktorá je priestorová alebo plošná. Procesy, ktoré prebiehajú v prípade získavania údajov fyzických modelov, rozdeľujeme na jednoduché a komplexné procesy.

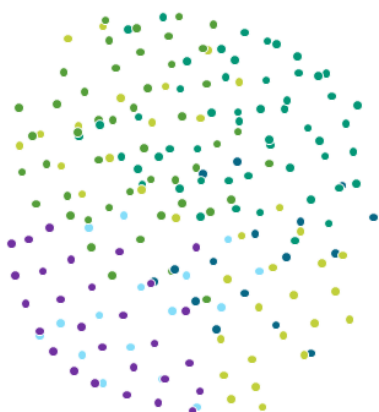


Obr. 21 Procesy získavania údajov fyzických modelov

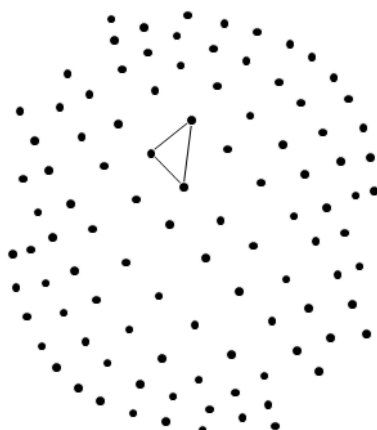
Jednoduchý proces reverzného inžinierstva pozostáva z tradičného merania súčiastok pomocou jednoduchých ručných dĺžkových a uhlových meradiel. Medzi jednoduché meradlá môžeme zaradiť posuvné meradlá, mikrometre, hĺbkomery, uhlomery a iné ručné meradlá. Výstupom jednoduchého procesu sú prevažne dĺžkové a uhlové rozmery.

Komplexný proces reverzného inžinierstva v seba zahŕňa prípravu súčiastky, kalibráciu, spracovanie mraku bodov a úpravu polygonálneho 3D modelu, tvorbu 2D/3D elementov a 2D/3D meranie. V tomto procese sa používajú hlavne moderné kontaktné a bezkontaktné zariadenia na získavanie údajov fyzických modelov. Taktiež komplexný proces nazývame 3D digitalizácia. Výstupom z komplexného procesu reverzného inžinierstva sú dĺžkové a uhlové rozmery, mrak bodov, **polygonálny 3D model** a 2D/3D elementy.

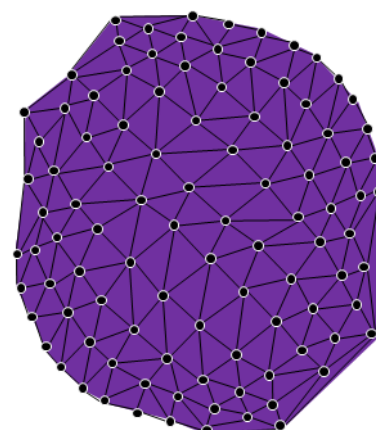
Obrázok 22 znázorňuje mrak bodov, ktoré sa získali 3D digitalizáciou. Farebne sú znázornené jednotlivé snímky, ktoré vytvárajú mrak bodov. Po získaní mraku bodov nasleduje polygonizácia (Obr. 23), ktorá pozostáva z vyrovňania snímok, redukcie bodov a následne prebieha triangulácia. Po polygonizácii vzniká polygonálna sieť (obrázok 24), ktorá tvorí polygonálny model. Polygonálny model obsahuje presne definovaný počet bodov P_x a presný počet počet trojuholníkov T_x .



Obr. 22 Mrak bodov
(body $P_1 - P_n$)



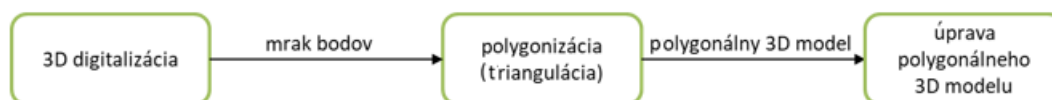
Obr. 23 Polygonizácia
(body P_x , čiara L_x , trojuholník T_x)



Obr. 24 Polygonálnasieť (body P_x , trojuholník T_x)

3.4 ÚPRAVA ZÍSKANÝCH ÚDAJOV

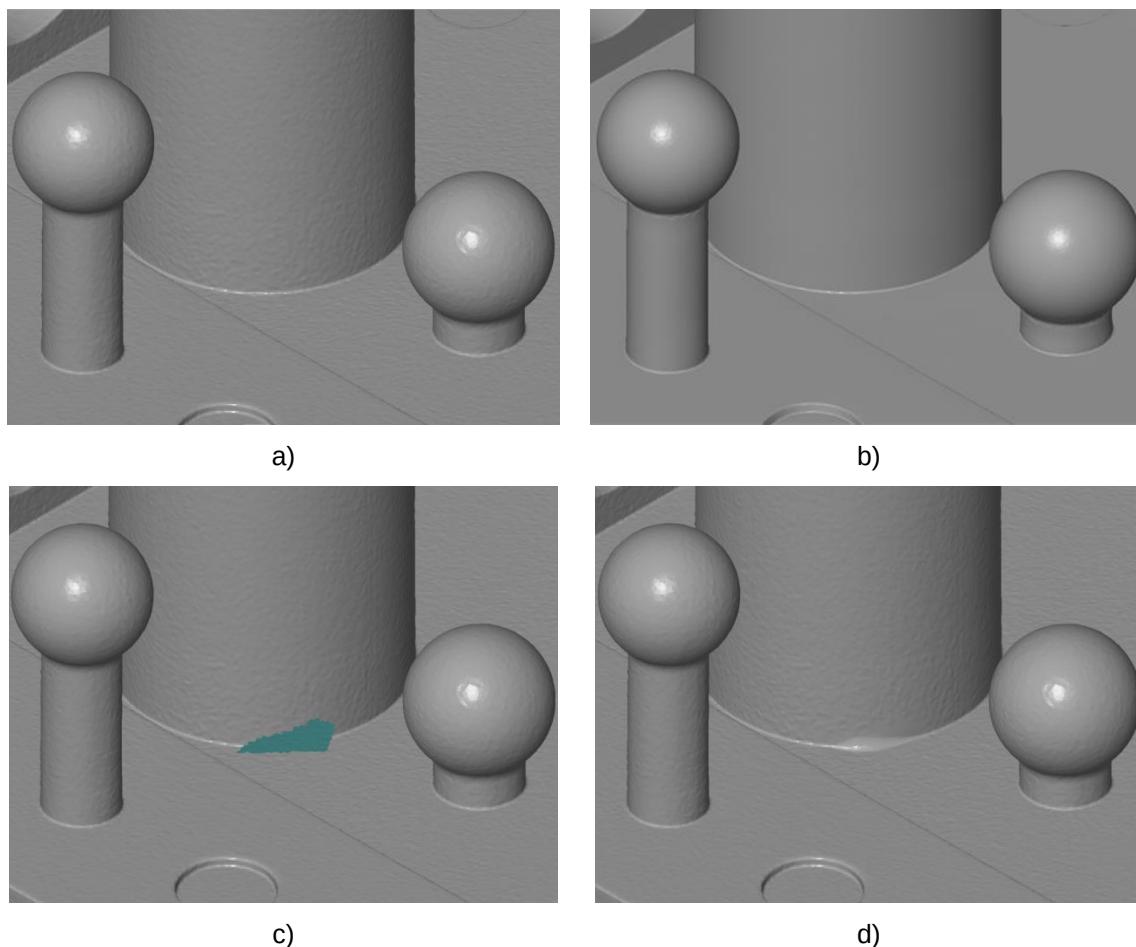
Spracovanie a úprava polygonálneho modelu (Obr. 25) je ďalším krokom v komplexnom procese reverzného inžinierstva. Na získavanie polygonálneho modelu sa v prevažnej miere používajú bezkontaktné zariadenia získavania dát. Takéto zariadenia nazývame 3D skenery. Proces nazývame 3D skenovanie alebo 3D digitalizácia. 3D digitalizáciou získame mrak bodov. Mrak bodov je polygonizovaný do tzv. trojuholníkovej siete. Polygonizácia je proces, ktorý v sebe zahŕňa vyrovnanie jednotlivých 3D skenov súčasti, elimináciu veľmi malých trojuholníkov a redukciu bodov, ktoré sú veľmi blízko seba. V rámci polygonizácie prebieha triangulácia. Polygonizáciou získame 3D polygonálny model, ktorý je tvorený spomínanou trojuholníkovou sieťou.



Obr. 25 Spracovanie a úprava polygonálneho modelu

Úprava polygonálneho modelu pozostáva prevažne z funkcií, ktoré slúžia na konečnú úpravu polygonálneho 3D modelu. Medzi tieto funkcie patrí **zaplnenie otvorov** (Closed holes) (Obr.26c, d), oprava polygonálnej siete (Repair mesh), tvorba mostov (Bridge), **vyhladenie siete** (Smooth mesh) (Obr.26a, b), **redukcia trojuholníkov** (Thin mesh) (Obr. 28c, d, e), zvýšenie počtu trojuholníkov (Refine

mesh), tvorba rovnako veľkých trojuholníkov (Relax a Regularize) (Obr. 28f), mierka (Scale), zrkadlenie (Mirror), odsadenie (Offset), úkos (Draft wall), hrúbka (Thicken mesh), booleovské operácie [28], [9].

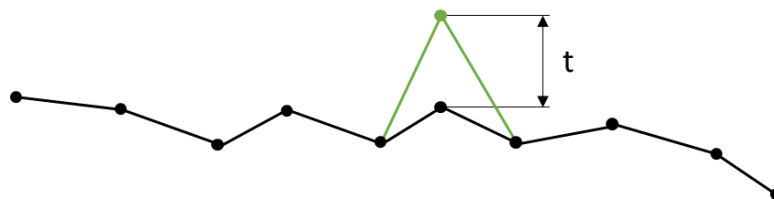


Obr. 26 Vyhladenie a zaplnenie diery na polygonálnej sieti

- a) pôvodná sieť polygonálneho modelu,
- b) vyhladená sieť polygonálneho modelu,
- c) diery na polygonálnom modeli,
- d) zaplátaná diery.

Najčastejšie používanou funkciou po získaní polygonálneho modelu je zaplnenie otvorov (Obr. 26 c, d). Zaplnenie otvorov sa realizuje manuálne alebo automaticky. Manuálne zaplnenie otvoru je úplné alebo čiastočné. CAD softvér PowerShape [29] využíva dva typy záplat, pre tvarové plochy sa používa tvarová záplata a pre rovinné plochy sa používa rovinná záplata. Zaplnenie otvorov na polygonálnej sieti má vplyv na výslednú kvalitu polygonálneho modelu. Automatické zaplnenie otvorov prehľadá polygonálny 3D model a automaticky zaplní diery v polygonálnej sieti.

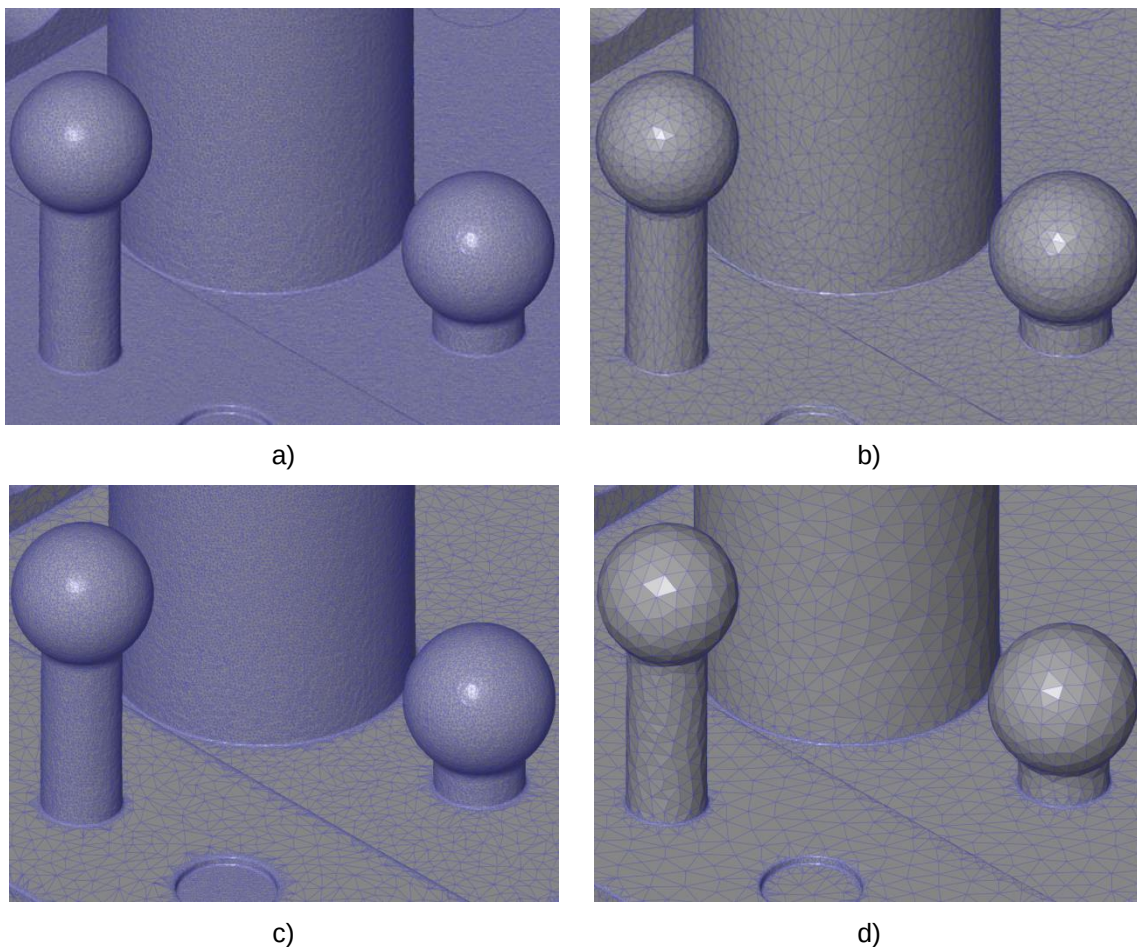
Vyhľadanie polygonálnej siete na polygonálnom modeli sa používa na redukciu šumu. Vyhľadanie polygonálnej siete znižuje kvalitu polygonálnej siete [28], [18]. Vyhladením polygonálnej siete sa dajú odstrániť jemné nerovnosti. Pri vyhladení sa používa parameter, ktorý sa nazýva tolerancia vyhľadania [30]. Na obrázku 27 je znázornený princíp vyhľadania. Bod označený zelenou farbou sa posunie o definovanú toleranciu vyhľadania definovanú parametrom „ t “ na novú pozíciu. Následne vznikne vyhladená polygonálna sieť.



Obr. 27 Princíp vyhľadania polygonálnej siete a tolerancia vyhľadania „ t “ [30]

Redukcia trojuholníkov sa používa hlavne kvôli zníženiu počtu bodov, ktoré sú súčasťou polygonálnej siete, ktorá tvorí polygonálny 3D model. Pri reverznom geometrickom modelovaní má spomínaná redukcia výhodu hlavne pri rekonštrukcii polygonálneho modelu na menej výkonných pracovných staniciach (počítačoch). Redukcia sa využíva buď na celej polygonálnej sieti alebo iba na vybraných plochách. Obrázok 28c znázorňuje redukciu trojuholníkov na rovinných plochách. Redukcia na plochách, ktoré nie sú rovinné (valcová, guľová, kužeľová, alebo tvarovozložitá plocha), sa používa minimálne z dôvodu straty pôvodného tvaru (z guľovej plochy dostaneme n -hran).

Spracovanie mraku bodov a úprava polygonálneho modelu pri reverznom geometrickom modelovaní sa používa hlavne pri redukcii šumu a redukcii počtu bodov. Spomínané kroky sú dôležité pri rekonštrukcii polygonálneho modelu v reverznom geometrickom modelovaní. Pri úprave polygonálneho 3D modelu nie je vždy potrebné zaplnenie otvorov. Stačí, aby polygonálna sieť, ktorá tvorí polygonálny 3D model, mala dostatok bodov na rekonštrukciu. Po spracovaní a úprave polygonálneho 3D modelu sa exportuje 3D model do neutrálneho formátu STL. Výstupom je polygonálny 3D model.



Obr. 28 Redukcia trojuholníkov na polygonálnej sieti
 a) pôvodná sieť polygonálneho modelu,
 b) redukcia trojuholníkov na celom polygonálnom modeli,
 c) redukcia trojuholníkov na rovinných plochách,
 d) rovnako veľké trojuholníky.

3.5 VYUŽITIE ZÍSKANÝCH ÚDAJOV

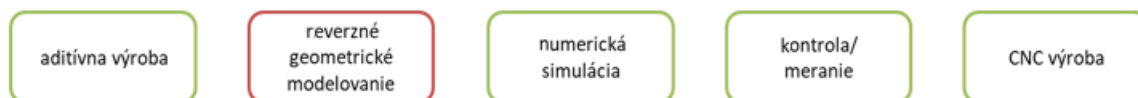
Výstupy z reverzného inžinierstva (obrázok 29) sa aplikujú do rôznych odvetví a oblastí priemyslu. Najpoužívanším výstupom je polygonálny 3D model. V strojárskom priemysle je to prevažne spätná tvorba 3D modelov z dôvodu chýbajúcej výkresovej dokumentácie, vtedy sa jedná o **reverzné geometrické modelovanie**.

Ďalej sa polygonálny model používa ako vstup do softvérov pre počítačovú podporu výroba pre tzv. CAM softvéry, ktoré generujú dráhy obrábania. Dráhy sa používajú pri **CNC výrobe** súčiastok. Najčastejšie sa polygonálny 3D model používa ako vstupný polotovár do CAM softvérov. Pomocou CAM softvérov sa programujú výrobné stroje a zariadenia, kde súčiastky vznikajú odoberaním materiálu vo forme

triesky. V predvýrobnej etape sa výstupy z reverzného inžinierstva a reverzného geometrického modelovania používajú ako vstupy do CAE softvérov pre **numerickú simuláciu** [31], [4].

Kontrola alebo meranie súčiastok sa realizuje kontaktnou alebo bezkontaktnou metódou zberu dát. Pri bezkontaktnom meraní sa ako vstupný 3D model používa polygonálny 3D model reálnej súčiastky získaný 3D digitalizáciou, ktorý sa následne porovnáva s 3D CAD modelom vytvoreným v CAD softvéri.

Rozširujúca sa oblasť výroby súčiastok pridávaním tzv. **aditívnej výroby** alebo Rapid Prototyping využíva polygonálne 3D modely pri výrobe súčiastok pridávaním. Polygonálny 3D model sa používa ako vstupný 3D model, ktorý sa v príslušnom CAM softvéri rozdelí na jednotlivé vrstvy.



Obr. 29 Využitie polygonálneho 3D modelu

4 REVERZNÉ GEOMETRICKÉ MODELOVANIE

Pre reverzné geometrické modelovanie existuje niekoľko definícií. Geometrické reverzné inžinierstvo možno opísať ako proces prichytenia plôch na mrak bodov a ich spájanie s topologicky definovaným CAD modelom [32]. Proces reverzného geometrického modelovania pozostáva z mnohých krokov, ktoré môžeme skombinovať do troch hlavných etáp: 3D digitalizácia, rekonštrukcia tvaru a 3D modelovanie. Extrakcia geometrie z existujúceho produktu na rekonštrukciu 3D CAD modelu je najpoužívanejším prístupom pre geometrické reverzné inžinierstvo [33]. Na obrázku 30 sú znázornené tri hlavné etapy procesu reverzného geometrického modelovania, medzi ktorými prebieha iterácia.



Obr. 30 Tri hlavné etapy reverzného geometrického modelovania [33]

a) 3D digitalizácia

Digitalizácia produktu sa vo všeobecnosti týka fázy digitalizácie fyzického produktu pomocou meracích a skenovacích zariadení. Môže sa rozšíriť o všetky ďalšie procesy, ktoré môžu definovať virtuálny produkt alebo jeho význam, ako je mechanická simulácia, simulácia výrobného procesu a optimalizácia tvaru a topológie. Geometrické reverzné inžinierstvo sa teda zameriava nielen na rekonštrukciu tvaru z merania, ale aj na integráciu vlastností materiálov a výrobných procesov a ich prirodzenú variabilitu [33].

b) Rekonštrukcia tvaru (Analýza plôch)

Rekonštrukcia tvaru je určenie plôch, ktoré sa približujú plochám na súčiastke. Veľkým problémom je určenie tvaru plochy, ktorá sa približuje ploche na súčiastke. Okrem toho mrak bodov je charakterizovaný rozdielnym počtom bodov a presnosťou získavania 3D geometrických údajov. Hlavnou úlohou je

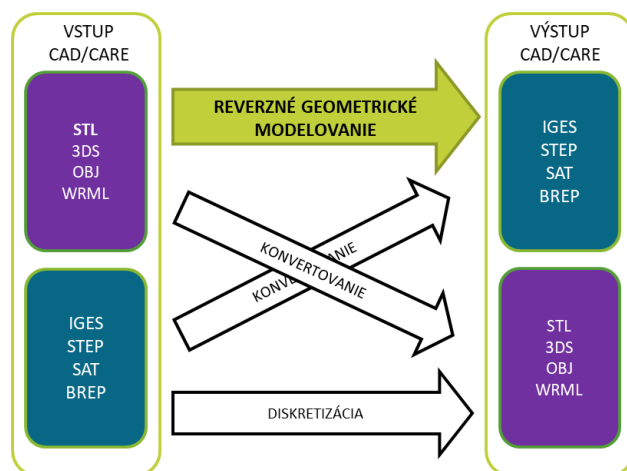
zachovanie topológie pôvodného tvaru súčiastky. Najstaršou technikou tvorby nových plôch boli NURBS a B-Splines [33].

c) 3D CAD modelovanie

3D CAD modelovanie je posledným krokom k vytvoreniu geometrického 3D modelu pomocou hraničnej reprezentácie alebo parametrického modelovania založeného na vlastnostiach, aby sa vložili zámery návrhu prostredníctvom geometrických prvkov, parametrov a obmedzení. Parametrické 3D modely sú často požadované ako dopyt na 3D CAD model alebo pre úpravu 3D CAD modelu [33].

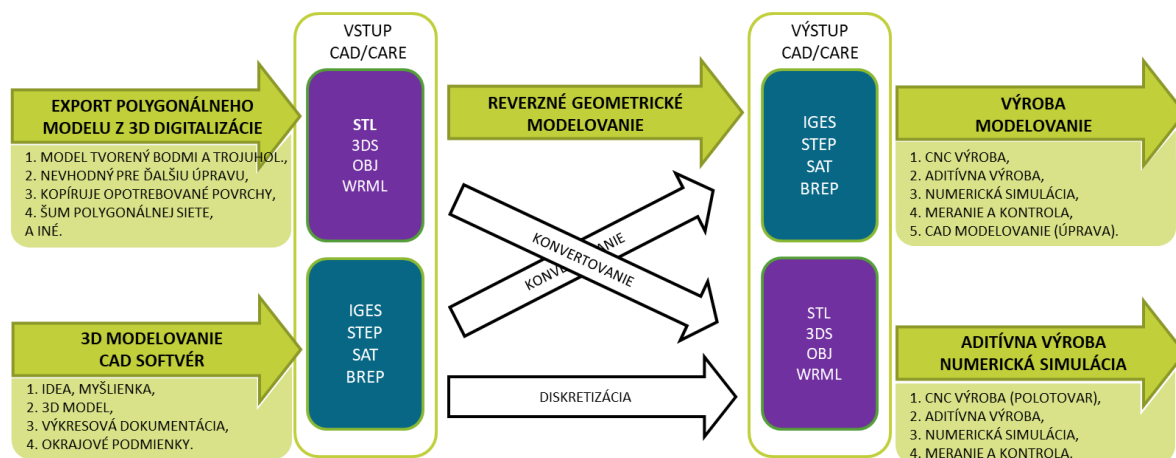
4.1 ÚLOHA REVERZNÉHO GEOMETRICKÉHO MODELOVANIA

Autor[34] uvádza potrebu rekonštrukcie polygonálneho modelu, ktorý je vo formáte STL alebo OBJ z toho dôvodu, že v skutočnosti v 90-tich % prípadov je požiadavka na formát **IGES** alebo **STEP**. Obrázok 31 znázorňuje schému konverzie 3D modelov. Ak vstupom do reverzného geometrického modelovania je polygonálny 3D model, je potrebné realizovať rekonštrukciu na získanie plošného alebo objemového modelu. Medzi modelmi je možné realizovať operáciu konvertovania a diskreditáciu modelov (Obr. 31). Konvertovanie sa realizuje medzi rôznymi formátmi súborov. Diskreditácia sa realizuje hlavne pre polygonálne modely súčiastok.



Obr. 31 Schéma konverzie 3D modelov od autora [34]

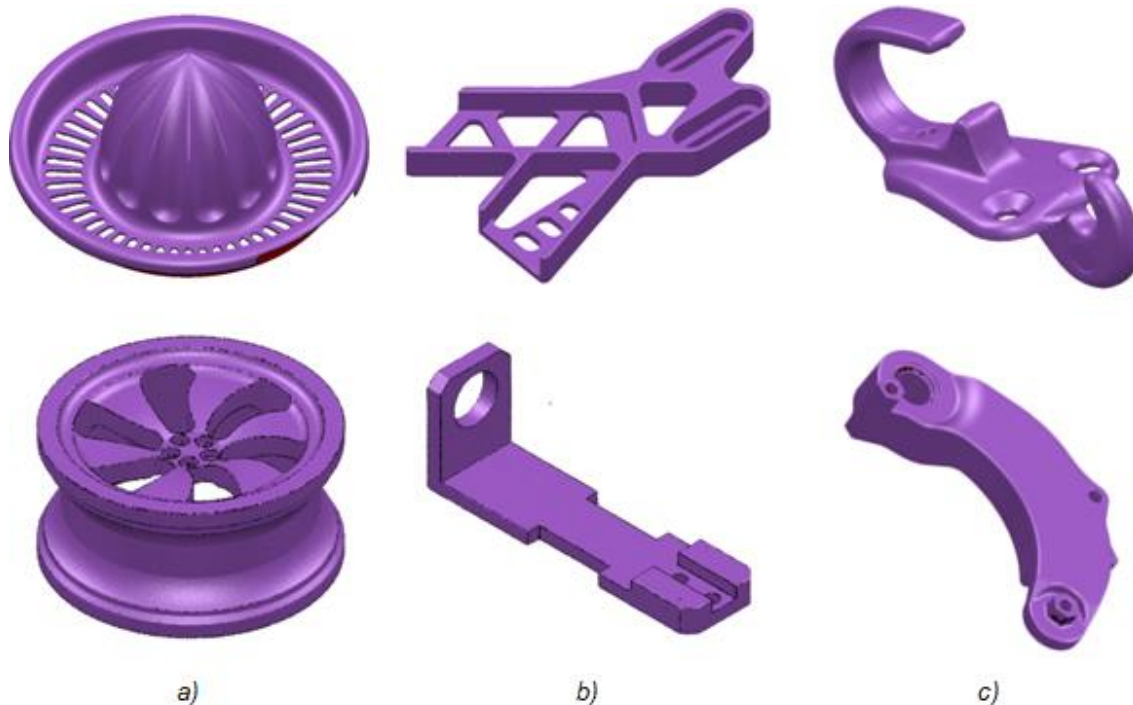
Ak schému na obrázku 32 rozšírime o vstupy a výstupy dostaneme rozšírenú schému konverzie 3D modelov, ktorá obsahuje informácie, v akej oblasti je možné použiť výstupný model z reverzného geometrického modelovania.



Obr. 32 Rozšírená schéma konverzie 3D modelov

4.2 ANALÝZA POLYGONÁLNEHO 3D MODELU

Analýza polygonálneho 3D modelu je dôležitá z hľadiska správneho aplikovania funkcií reverzného geometrického modelovania v CAD alebo CARE softvéri.



Obr. 33 Tvary súčiastok (tvar polygonálneho 3D modelu) (Autor habilitačnej práce)

- a) rotačné súčiastky,
- b) skriňové súčiastky,
- c) tvarovozložené súčiastky .

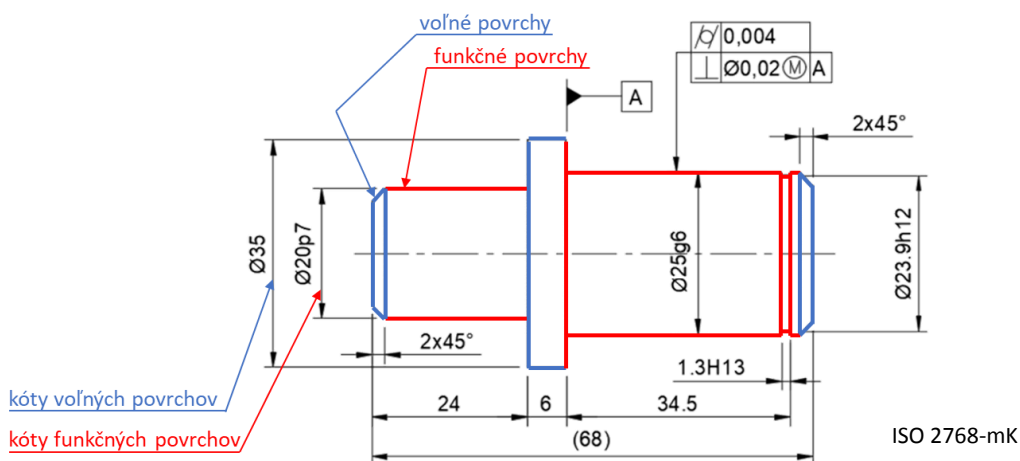
Polygonálny 3D model sa musí rozdeliť na jednoduché plochy, aby bolo možné analyzovať, akým spôsobom sa tieto plochy budú rekonštruovať a aký postup rekonštrukcie sa zvolí. Základom je vytvorenie prvotného 3D CAD modelu. Existuje niekoľko postupov na vytvorenie prvotného modelu z polygonálneho 3D modelu použitím funkcií reverzného geometrického modelovania.

Na obrázku 33 sú znázornené súčiastky, ktoré na základe tvaru rozdeľujeme na rotačné, skriňové a tvarovozložené súčiastky. Z hľadiska tohto rozdelenia sme schopní analyzovať spôsob, akým boli súčiastky v CAD softvéri vytvorené. Ak sa pozrieme na akýkoľvek polygonálny 3D model zobrazený na obrázku 30, vieme analyzovať plochy, ktoré tvoria polygonálny 3D model a postup akým sa vytvára 3D CAD model v CAD softvéri. Preto vieme aplikovať funkcie reverzného geometrického modelovania spolu s postupmi 3D modelovania tak, aby vznikol plošný alebo objemový 3D CAD model. Pri rekonštrukcii polygonálneho 3D modelu musíme zohľadniť okrem spôsobu modelovania aj použitie rekonštruovanej súčiastky. Každá súčiastka má predpísané tolerancie. Pri reverznom geometrickom modelovaní je veľmi ťažké určiť, aké tolerancie boli predpísané na výkresovej dokumentácii, keďže vstupom do reverzného inžinierstva je fyzická súčiastka. Pri reverznom inžinierstve vo väčšine chýba výkresová dokumentácia, ktorá nesie informácie o predpísaných toleranciách.

Ako uvádza autor [34], povrch každej súčiastky tvoria funkčné a voľné povrchy. Rozmery, ktoré určujú funkčné povrchy, tzv. funkčné rozmery - musia byť tolerované, aby sa zabezpečila správna funkcia uložení a zmontovateľnosť (na obr. 34 označené červene). Rozmery voľných povrchov (na obr. 34 označené modro) len obmedzujú a určujú tvar súčiastky, ale jeho dodržanie môže byť z hľadiska funkcie významné, napr. z hľadiska tuhosti, vyváženia, montáže a pod. Veľkosť tolerancií týchto "voľných" alebo "netolerovaných" rozmerov sa volí tak, aby ich bolo možné ľahko dodržať v bežných podmienkach výroby a merania a aby nevzrastali zbytočne výrobné náklady. Tieto tolerancie sa určujú spravidla spoločným zápisom na výkrese. Je úplne zrejmé, že hodnoty týchto tolerancií musia byť rozdielne pri výrobe súčiastok napríklad trieskovým obrábaním alebo pri výrobe súčiastky odlievaním.

Pre funkčné povrchy je potrebné predpísať aj správny geometrický tvar, orientáciu, polohu a pod. Geometrické tolerancie voľných povrchov spravidla stačí predpísať spoločným zápisom na výkrese. Náležitosti všeobecných tolerancií a spôsob ich predpisovania na výkresoch určujú medzinárodné normy ISO 2768-

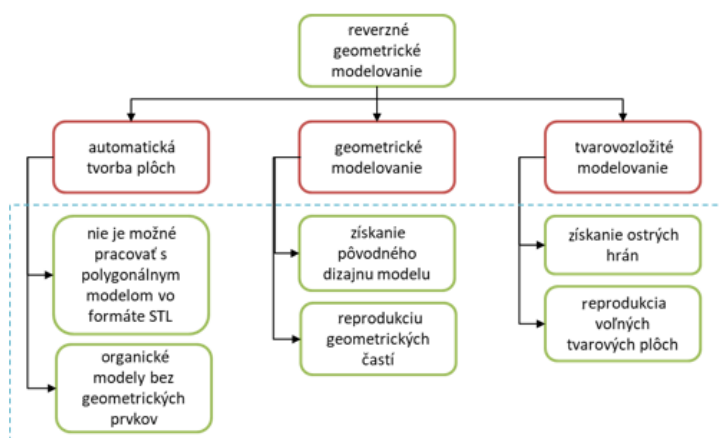
1 a ISO 2768-2, ktoré boli do sústavy noriem STN prevzaté ako národné normy STN EN 22768-1 a STN EN 22768-2. Norma ISO 2768-1 obsahuje systém všeobecných tolerancií pre dĺžkové rozmery, skosenia a zaoblenia hrán a uhlové rozmery pre súčiastky zhotovené trieskovým obrábaním a pre súčiastky zhotovené tvárnením plechu. Norma ISO 2768-2 určuje všeobecné geometrické tolerancie pre priamost', rovinnosť, kolmosť, súmernosť a kruhové hádzanie a pre ďalšie geometrické charakteristiky [35].



Obr. 34 Funkčné a voľné povrchy na súčiastkach [35]

4.3 PRÍSTUPY REVERZNÉHO GEOMETRICKÉHO MODELOVANIA

Pri spätnej tvorbe 3D modelu existujú tri prístupy reverzného geometrického modelovania. Patrí sem automatická tvorba plôch, geometrické modelovanie, tvarovozložené modelovanie [36]. Obrázok 35 znázorňuje prístupy reverzného geometrického modelovania a ich výhody.



Obr. 35 Prístupy reverzného modelovania

Automatická tvorba plôch (Auto-surfacing): medzi jej hlavné vlastnosti patrí: presnosť, rýchlosť, strata ostrých hrán; model je tvorený množstvom malých plôch a sú možné chyby pri preklade údajov. Vytvorený model sa skladá z veľmi malých NURBS plôch. Tieto plochy kopírujú pôvodnú polygonálnu sieť. Preto vytvorený 3D CAD model je veľmi blízko pôvodnej polygonálnej sieti. 3D CAD model je generovaný veľmi rýchlo. Existujú iba malé alebo obmedzené možnosti zmeny nastavení s cieľom zlepšiť výsledný 3D CAD model. Pri tomto spôsobe dochádza k strate malých detailov a ostrých hrán [36].

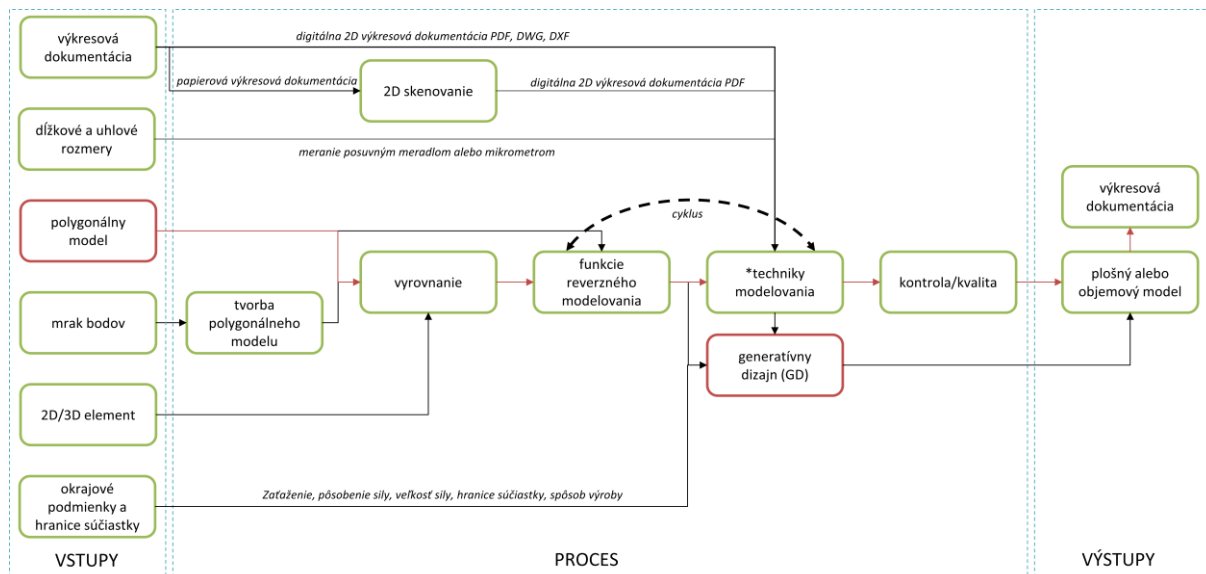
Geometrické modelovanie (Geometric modeling): jeho hlavné vlastnosti sú: veľmi čistý model, rovné plochy a perfektné zaoblenia (polomery, rádiusy), jednoduchá úprava v iných CAD softvéroch. Pretože pri geometrickom modelovaní sa používajú iba geometrické tvary 3D CAD, model je veľmi čistý a bude mať malú veľkosť súboru. Výsledný 3D CAD model je kompatibilný s inými CAD softvérmi. Pre tento typ modelu je možné ľahko meniť geometriu. Ak sa používajú iba dokonalé geometrické tvary, môže dôjsť k väčšej odchýlke od pôvodnej polygonálnej siete [36].

Tvarovozložené modelovanie (Freeform modeling): jeho hlavné vlastnosti sú: čistý model, NURBS plochy, relatívne jednoduché úpravy v iných CAD softvéroch. Pri tomto spôsobe reverzného modelovania sa zachytí zložitý tvar voľne tvarovaného objektu. V závislosti od zložitosti plôch je aj výsledná veľkosť súboru. Dostať sa k presnému výsledku je časovo náročné[36]. Využitie tohoto princípu je hlavne pri dizajnerských plochách alebo na dosiahnutie komplexných tvarovozložitých tvarov. Týmto princípom sa dá dosiahnuť presná kópia objektu v prírode.

4.4 PROCES REVERZNÉHO GEOMETRICKÉHO MODELOVANIA V CAD SOFTVÉRI

Reverzné geometrické modelovanie je spätné vytvorenie plošného alebo objemového 3D modelu z polygonálneho 3D modelu. Vstupom do reverzného geometrického modelovania je výkresová dokumentácia, dĺžkové a uhlové rozmery, polygonálny model, mrak bodov a 2D alebo 3D elementy. Výstupom z procesu reverzného geometrického modelovania je hlavne plošný alebo objemový 3D CAD model.

Plošný a objemový 3D model je vhodný pre ďalšiu úpravu v CAD softvéroch. Z takto vytvoreného 3D CAD modelu sa vytvára výkresová dokumentácia. Výstup z procesu reverzného geometrického modelovania je využiteľný vo všetkých technológiách a ich softvéroch pre počítačovú podporu (CAE, CAD, CAM, CAQ).



Obr. 36 Proces reverzného geometrického modelovania v CAD softvéri

**techniky modelovania (priame modelovanie, objemové modelovanie, plošné modelovanie).*

Obrázok 36 znázorňuje proces reverzného geometrického modelovania v CAD softvéri. Červenou farbou je znázornený proces, ktorý je najčastejšie používaný pri rekonštrukcii polygonálneho 3D modelu. Hlavným vstupom je polygonálny 3D model, ktorý je potrebné vyrovnať vzhľadom k súradnicovému systému. Následne sa používajú funkcie reverzného geometrického modelovania a 3D techniky modelovania. Medzi funkciami RGM a 3D modelovaním existuje určitý cyklus, ktorý je závislý od tvarovej zložitosti a počtu prvkov, ktoré tvoria rekonštruovanú súčiastku. Pri rekonštrukcii polygonálneho 3D modelu je dôležitá kontrola rekonštruovaných plôch, ktorá sa realizuje meraním uhlových a dĺžkových rozmerov alebo farebnou mapou odchýlok.

Procesy reverzného geometrického modelovania sa rozdeľujú podľa vstupov na proces reverzného geometrického modelovania, kde jedným vstupom do procesu je výkresová dokumentácia a ďalšími sú dĺžkové a uhlové rozmery, polygonálny model, mrak bodov, 2D/3D elementy a okrajové podmienky a hranice súčiastky. Výkresová

dokumentácia môže byť buď v digitálnej 2D forme alebo v papierovej forme. V digitálnej forme sa najčastejšie objavuje výkresová dokumentácia v 2D CAD formáte DWG alebo v neutrálnom formáte DXF. Tieto formáty sú priamo použiteľné ako vstup do CAD softvéru. Tu sú známe rozmery a tvar, ktoré reprezentujú súčiastku pomocou 2D geometrie. Digitálnu 2D výkresovú dokumentáciu vo formáte PDF reprezentuje vektorová grafika. Niektoré CAD softvéry sú schopné použiť PDF formát ako vstupný formát do CAD softvéru. CAD softvér rozpozná vektorovú grafiku a prevedie ju do prostredia CAD softvéru. Nevýhodou je, že PDF formát nemusí reprezentovať skutočné rozmery súčiastky. Preto je potrebné prispôsobiť získanú 2D geometriu z PDF formátu kótam, ktoré opisujú rozmer súčiastky. Výkresová dokumentácia v papierovej forme sa v prevažnej miere využíva pri spätnom modelovaní súčiastok. Papierovú výkresovú dokumentáciu skenujeme 2D skenerom, v tomto prípade sa získa digitálna 2D forma výkresovej dokumentácie, ktorá sa dá použiť tak ako je opísané vyššie. Dôležité pri vytvorení digitálnej 2D formy výkresovej dokumentácie z papierovej dokumentácie je, aby výstup z 2D skenera bol vo vektorovej grafike a nie v bitmapovej grafike.

Dĺžkové a uhlové rozmery sa získavajú ručnými meracími zariadeniami, tzv. ručnými meradlami, kontaktnými (súradnicové meracie stroje) alebo bezkontaktnými zariadeniami (3D skenery a ďalšie). Dĺžkové a uhlové rozmery sú ďalším vstupom do procesu reverzného geometrického modelovania. Vstupom do procesu reverzného geometrického modelovania môžu byť aj dĺžkové a uhlové rozmery získané CAQ softvérmí.

Mrak bodov je súbor bodov, ktoré definujú rozmery a tvar súčiastky. Samotný mrak bodov nie je z hľadiska modelovanie použiteľný. V procese reverzného geometrického modelovanie je preto potrebné takýto mrak bodov triangulovať. Triangulácie je proces, kde sa z mraku bodov vytvorí polygonálny 3D model, ktorý je definovaný súborom trojuholníkov. Inak tento proces nazývame polygonizácia.

Exportom **2D** alebo **3D elementov** z CAQ softvérov, ktoré komunikujú s kontaktnými a bezkontaktnými zariadeniami, sa získa ďalší zo vstupov do reverzného geometrického modelovania. 2D a 3D elementy sa CAQ softvéroch vytvárajú prevažne metódou fitting. Medzi 2D a 3D elementy získané z CAQ softvérov sa radia: čiara, oblúk, krivka, obdĺžnik, štvorec, valec, kužeľ, guľa, plocha a iné.

Novým spôsobom pri reverznom geometrickom modelovaní je využitie **generatívneho dizajnu**. Generatívne modelovanie/navrhovanie súčiastok je závislé od okrajových podmienok, hraníc súčiastky, spôsobu výroby a materiálu súčiastky. Súčiastka je vytvorená na základe optimalizácie topológie tvaru, ktorá je generovaná vždy iba pri zadaní okrajových podmienok a obmedzujúcich hraníc pre súčiastku.

4.5 POSTUP REVERZNÉHO GEOMETRICKÉHO MODELOVANIA

Postup reverzného geometrického modelovania sa rozdeľuje na kroky, ktoré vedú k vytvoreniu 3D CAD modelu v CAD softvéri. **Postup opisuje vytvorenie plošného alebo objemového 3D modelu z polygonálneho 3D modelu.** Polygonálny 3D model sa môže získať z iného CAD softvéru (alebo CAD/CAM dialógového softvéru ako je napr. NUMROTOPlus a iné softvéry, ktoré ponúkajú výstup vo formáte polygonálneho 3D modelu a mraku bodov) alebo z procesu **komplexného reverzného inžinierstva** (3D digitalizácia). Postup sa zameriava prevažne na proces, ktorý začína vstupným polygonálnym 3D modelom, ďalej nasledujú spôsoby vyrovnanie polygonálneho 3D modelu, úprava polygonálneho 3D modelu, funkciami reverzného geometrického modelovania, technikami 3D modelovania, kontrolou kvality plôch a výsledného 3D modelu a na záver výstupným plošným alebo objemovým 3D modelom (Obr. 36).

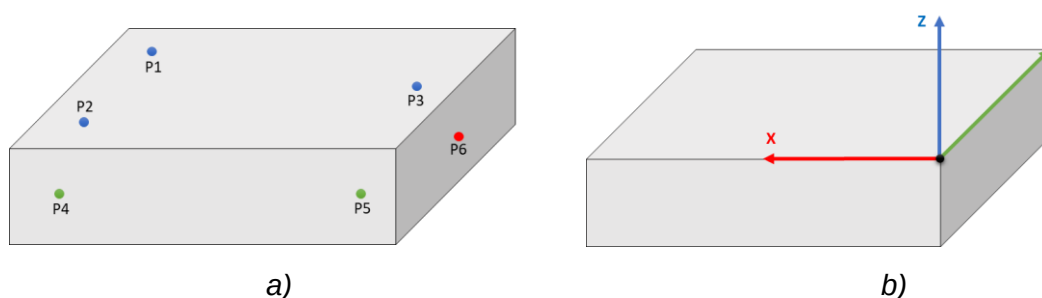
1. import polygonálneho 3D modelu,
2. vyrovnanie, ustavenie, polohovanie,
3. úprava polygonálneho modelu,
- 4. funkcie reverzného geometrického modelovania,**
5. techniky modelovania,
6. kontrola kvality plôch,
7. export 3D modelu,
8. výkresová dokumentácia,

V nasledujúcej časti si rozoberieme jednotlivé body postupu reverzného geometrického modelovania. Reverzné geometrické modelovanie využíva pri vytváraní plošného alebo objemového 3D modelu polygonálny 3D model alebo mrak bodov. Preto je dôležité, aby CAD softvér, ktorý sa používa pri reverznom geometrickom modelovaní, obsahoval modul na **import polygonálnych 3D**

modelov alebo **import mraku bodov** a modul na polygonizáciu mraku bodov do polygonálneho 3D modelu.

Vyrovnanie polygonálneho 3D modelu sa realizuje z dôvodu lepšej využiteľnosti funkcií reverzného geometrického modelovania. Vyrovnaním vytvárame nový súradnicový systém na polygonálnom 3D modeli. Vyrovnanie môžeme rozdeliť na **vyrovnanie s 3D CAD modelom** a **vyrovnanie bez 3D CAD modelu**. Úlohou vyrovnania je zabezpečiť, aby rovinné plochy, valcové plochy (os valca) polygonálneho 3D modelu boli kolmé na globálny súradnicový systém alebo na novovytvorený súradnicový systém. Vyrovnanie sa realizuje buď v externom softvéri CAQ alebo priamo v CAD softvéri, ktorý obsahuje funkcie a modul na reverzné geometrické modelovanie. Funkcie vyrovnania odoberajú stupne voľnosti polygonálnemu 3D modelu, ktorý sa použije na reverzné geometrické modelovanie.

Použitím 3D CAD modelu(využívané v CAQ softvéroch) na vyrovnanie polygonálneho modelu sa nevytvára nový súradnicový systém, využije sa súradnicový systém 3D CAD modelu. Tento súradnicový systém bol vytvorený pri modelovaní a exportovaní 3D CAD modelu z CAD softvéru. **Najlepšie vyrovnanie tzv. best-fit** sa používa pri vyrovnaní na základe 3D CAD modelu. Polygonálny 3D model sa vyrovná na základe porovnania tvaru polygonálneho 3D modelu s 3D CAD modelom. Vyrovnanie **geometrickými elementami** sa vytvára pomocou 2D alebo 3D elementov. Polygonálny 3D model je následne vyrovnaný na základe spomínaných elementov. Medzi 2D a 3D elementy patria bod, čiara, kružnica, rovina, valec a ďalšie.



Obr. 37 Metóda 3-2-1

a) definovanie bodov pre os Z, Y, X ,

b) vytvorený súradnicový systém na základe definovaných bodov.

Pri **trojbodovom vyrovnaní** sa vytvoria tri priestorové body na 3D CAD modeli a tri priestorové body na polygonálnom 3D modeli. Tieto body sa navzájom prepoja a nastane vyrovnanie polygonálneho 3D modelu na 3D CAD model. Pri vyrovnávaní

polygonálneho 3D modelu **bez použitia 3D CAD modelu** sa využíva **metóda 3-2-1**. Touto metódou (Obr. 37) sa transformuje polygonálny 3D model do definovaného súradnicového systému [28]. Pri vyrovnaní metódou 3-2-1 sa definuje 6 bodov. Tri body opisujú rovinu, dva body opisujú priamku a jeden bod opisuje bod. Pri vytváraní vyrovnaní metódou 3-2-1 existujú pravidlá, ktoré súvisia s usporiadaním osí súradnicového systému.

Vytvorenie pomocného 2D alebo 3D elementu funkciou reverzného geometrického modelovania v CAD softvéri. Vytvorený element na polygonálnej sieti sa použije na tvorbu nového súradnicového systému. Ďalší spôsob vyrovnania je možné realizovať **pomocou troch bodov**, ktoré sa priamo aplikujú na polygonálny 3D model. Použitím tohto spôsobu sa vytvorí nový súradnicový systém. Prvý bod definuje začiatok súradnicového systému, druhý bod definuje os „X“ a tretí bod definuje rovinu „XY“. Softvér následne vypočíta na rovinu „XY“ kolmú os „Z“. Takto vznikne zarovnaný súradnicový systém na polygonálnom 3D modeli. Vyrovnanie polygonálneho 3D CAD modelu na **primitívne 3D teleso** vytvorené v CAD softvéri, ktorým môže byť valec, kocka, kužeľ a iné. Vyrovnanie sa realizuje na základe definovaných bodov rovnakého počtu na primitívnom 3D telese a na polygonálnom 3D modeli. Body sa následne prepoja (preložia) a zároveň sa aplikuje metóda najlepšieho vyrovnania (poznáme pod pojmom best-fit). Polygonálny 3D model sa vyrovná a je pripravený na reverzné geometrické modelovanie. Existujú prípady, kedy nie je možné vytvoriť vyrovnanie alebo nový súradnicový systém na polygonálnom 3D modeli. Zvyčajne sa jedná o tvarovo zložité súčiastky. V tomto prípade sa polygonálny 3D model vyrovná na základe subjektívneho vyrovnania použitím funkcií **posunutie** a **rotácia**. Polygonálny 3D model sa posúva a rotuje vzhľadom na globálny súradnicový systém dovedy, pokiaľ polygonálny model nebude vyrovnaný.

Pri **úprave polygonálneho 3D modelu** dochádza k optimalizácii povrchu polygonálneho 3D modelu. Úprava nie je vždy potrebná. Realizuje sa iba v prípadoch, keď polygonálny 3D model je potrebné vyhladiť, zaplátať nepotrebné otvory, redukovať počet trojuholníkov a rozdeliť zložitú polygonálnu sieť na menšie jednoduchšie časti.

Funkcie reverzného geometrického modelovanie sú funkcie, ktoré sú priamo integrované do CAD softvéru alebo do CARE softvéru. Pomáhajú s vytvorením prvotného 3D modelu z polygonálneho 3D modelu. Funkcie, ktoré sa používajú pri geometrickom reverznom modelovaní sú opísané v kapitole 4.6.

Techniky modelovanie sa používajú pri vytváraní prvotného modelu po použití funkcií reverzného geometrického modelovania. Techniky modelovania rozdeľujeme na plošné, objemové a priame. Niektoré základné funkcie objemového a plošného modelovanie sú rotácia, vytiahnutie, posunutie po krivke, operácie medzi plochami a ďalšie. Funkcie priameho modelovania využívajú hlavne editovacie funkcie na úpravu vytvoreného modelu. Medzi editovacie funkcie zaraďujeme hlavne ťahanie a tlačenie.

Kontrola kvality vytvorených objemov a plôch sa realizuje funkciami, ktoré poskytuje CAD softvér. Medzi takéto funkcie sa radí meranie dĺžkových a uhlových rozmerov (kótovanie) alebo farebná mapa odchýlok. Kontrolu delíme na **priebežnú** a **finálnu** kontrolu kvality rekonštruovaného CAD modelu. Priebežná kontrola sa môže realizovať vždy, ak je vytvorený nový objem alebo nová plocha, ktorá nahrádza plochu na polygonálnom 3D modeli. Priebežná kontrola je cyklický dej, kde sa pri nahradení plochy polygonálneho 3D modelu novou plochou robí kontrola. Ak výsledok nezodpovedá predstave o novej ploche, plocha sa premodeluje a znovu sa realizuje kontrola. Finálna kontrola sa realizuje najčastejšie farebnou mapou odchýlok. Farebná mapa odchýlok zobrazuje odchýlky od referenčného 3D modelu. Na zobrazenie farebnej mapy odchýlok je potrebné mať dva 3D modely, jeden referenčný model a druhý model, ktorý sa porovnáva.

Výstupom z procesu reverzného geometrického modelovania je plošný, objemový alebo kombinovaný 3D CAD model. Kombinovaný 3D model vzniká iba vtedy, ak sa funkcie reverzného geometrického modelovania použijú iba na vybranú časť rekonštruovanej súčiastky. Výsledkom je model, ktorý je tvorený polygonálnou sieťou a objemovým (plošným) prvkom. Zrekonštruovaného 3D CAD modelu sa vytvára **výkresová dokumentácia**.

4.6 FUNKCIE REVERZNÉHO GEOMETRICKÉHO MODELOVANIA

Vstupným údajom pre funkcie reverzného modelovanie je polygonálny 3D model, na ktorý sú jednotlivé funkcie aplikované. Medzi funkcie reverzného geometrického modelovania v CAD a CARE softvéri radíme nižšie spomínané funkcie.

1. primitíva (Primitívne teleso a plocha, Primitívny objekt)
 - 1.1. základné primitíva,
 - 1.2. primitíva z bodov,
2. export elementov z CAQ softvéru,
3. rez (Profil),
4. obrysová krivka,
5. prilepená krivka,
6. prilepená plocha,
7. tvorba segmentov,
8. segmentácia,
9. nabalená plocha,
10. konvertovanie polygonálnej siete na BREP,
11. quad surface (Štvorcová plocha),

12. generatívne navrhovanie.

Pri tvorbe počítačového 3D CAD modelu sa spomínané funkcie kombinujú v takom pomere, aby výsledný 3D CAD model bol vhodný na použitie objemových alebo plošných techník 3D modelovania a aby spĺňal kritéria na zmenu topológie a rozmerov, ktoré požaduje konštruktér, technolog.

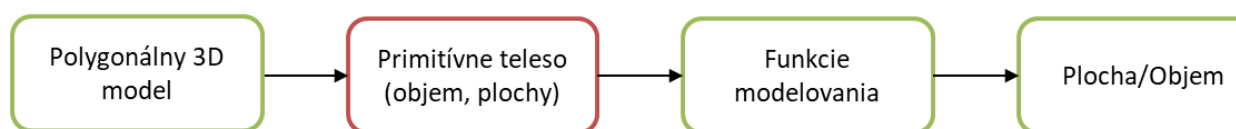
Nie je potrebné použiť všetky funkcie, treba ich kombinovať tak, aby bol výsledný 3D CAD model použiteľný na ďalšiu úpravu alebo aby bol použiteľný v iných CA softvéroch. Niektorými funkciami reverzného geometrického modelovania sa získavajú prvotné modely. Pri spätnom vytvorení 3D CAD modelu z polygonálnej siete sa využívajú techniky prvkového, parametrického a priameho modelovania.

Princíp generatívneho navrhovania opísaný v kapitole 4.6.9 je možné použiť pri reverznom geometrickom modelovaní. Výsledkom generatívneho navrhovania použitého pri reverznom geometrickom modelovaní je nový dizajn rekonštruovanej

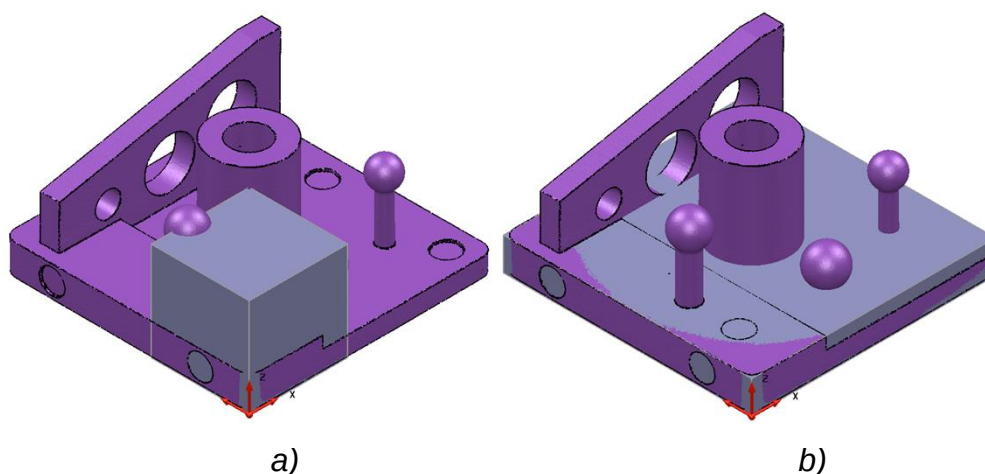
súčiastky. Generatívne navrhovanie nepatrí priamo do funkcií reverzného geometrického modelovanie, pretože sa jedná o nový spôsob navrhovania súčiastok, kde vzniká nový dizajn súčiastky.

4.6.1 PRIMITÍVA V REVERZNOM GEOMETRICKOM MODELOVANÍ

Pri analyzovaní polygonálneho 3D modelu zistíme, že geometrický model je prevažne tvorený základnými prvkami, tzv. **primitívnymi telesami** a primitívnymi plochami - budeme ich tiež nazývať primitívne objekty. Preto pri reverznom geometrickom modelovaní je možné pri vytvorení prvotného 3D CAD modelu z polygonálneho 3D modelu použiť spomínané primitívne objekty (obr. 38, 39). Každé vytvorené primitívne teleso alebo primitívna plocha sú pridané k základnému 3D CAD modelu alebo odobrané zo základnému 3D CAD modelu použitím booleovských operácií.



Obr. 38 Primitívne objekty v reverznom geometrickom modelovaní

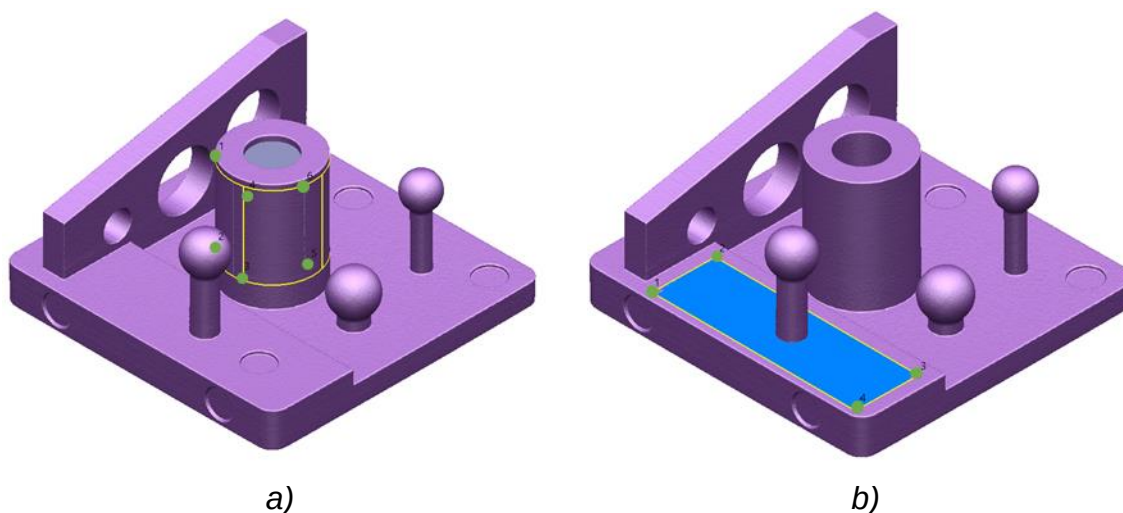


Obr. 39 Primitívne teleso (kocka) v reverznom geometrickom modelovaní

- a) primitívne teleso kocka,
- b) upravené rozmery primitívneho telesa.

Základné primitíva. Poloha primitívneho telesa (plochy) je definovaná súradnicami X, Y, Z. Aby sa zabezpečila správna poloha primitívneho telesa, je potrebné polygonálny 3D model vyrovnať. Na umiestnenie primitívneho telesa sa používa inteligentný kurzor CAD softvéru alebo editovacia funkcia posunutie, pomocou ktorej sa definuje hodnota pre súradnicu X, Y, Z. Na obrázku 39 je znázornené reverzné geometrické modelovanie základnej časti vzorovej súčiastky. Ako je zrejmé z obrázku 39, rozmery kocky sa upravili do požadovaného tvaru pomocou editovateľných dĺžkových rozmerov. Rozmery primitívneho objektu sa upravujú inteligentným natiahnutím alebo úpravou dĺžkových rozmerov vo vlastnostiach primitívneho objektu.

Primitíva z bodov. Pri tvorbe primitív z bodov (Obr. 40a, b) sú presne určené minimálne počty bodov, ktoré sú potrebné na vytvorenie primitívneho objektu (objem, plocha, 2D geometria). Softvér PowerShape ponúka tieto možnosti vytvorenia primitív z bodov: rovinná plocha, čiara, kružnica, valec, kužeľ a guľa. Minimálny počet bodov sa definuje inteligentným kurzorom (pomocou počítačovej myši). Maximálny počet bodov nie je definovaný. Vyšší počet bodov pri tvorbe primitív ako sú rovinná plocha, kužeľ, valec, guľa, kružnica zvyšuje presnosť kopírovania tvaru rekonštruovanej plochy (objemu) na polygonálnom 3D modeli.



Obr. 40 Primitívny objekt z bodov v reverznom geometrickom modelovaní

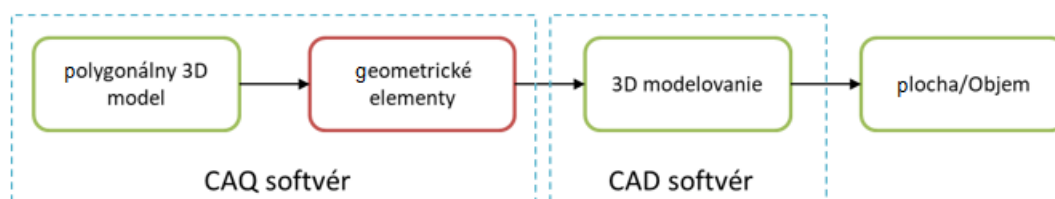
- a) definovanie 6-tich bodov pre valec (zelená bodka),
- b) definovanie 4-roch bodov pre rovinnú plochu (zelená farba).

Zaujímavosťou pri tvorbe primitív z bodov je definovanie vzťahov medzi vytvorenými primitívnymi objektami. Vzťahy rozdeľujem na: *kolmost'*, *rovnobežnosť*,

kolineárnosť, zarovnanie na os, sústrednosť. Príkladom definovania vzťahov môže byť vytvorený valec, ktorý bude kolmý na rovinu. V tomto prípade sa definuje vzťah *kolmosť*. Rozmery, orientáciu a pozíciu vytvoreného primitívneho objektu z bodov je možné editovať priamo v dialógovom okne. Výhodou primitívnych objektov (typu objem a plocha) pri reverznom geometrickom modelovaní je veľmi rýchla rekonštrukcia tvaru. Tento spôsob rekonštrukcie tvaru je použiteľný iba pri súčiastkach alebo časti súčiastok, ktoré sú geometricky definované alebo súčiastka je tvorená z primitívnych telies (plôch). Dôležité je ustavenie polygonálneho modelu vzhľadom na súradnicový systém.

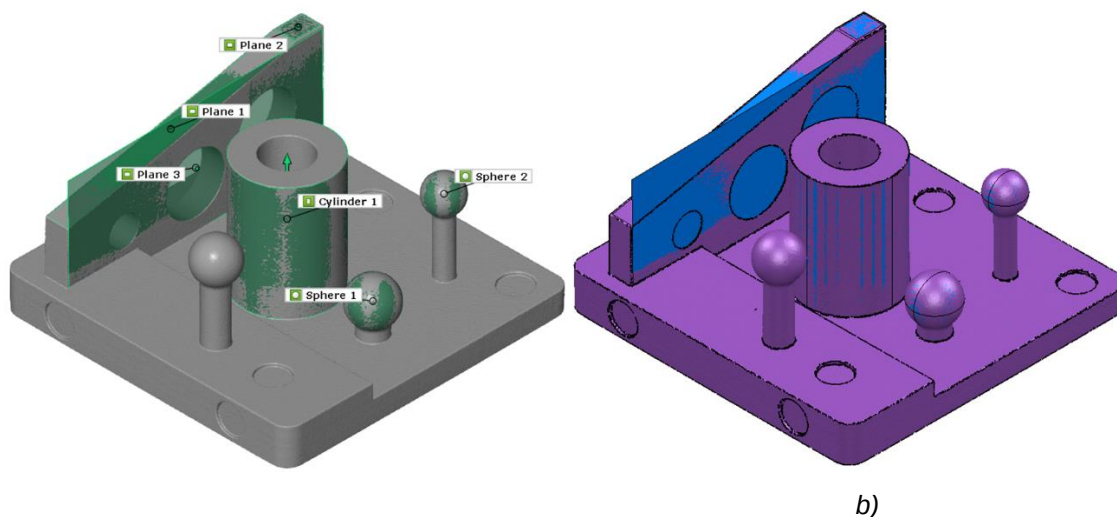
4.6.2 GEOMETRICKÉ ELEMENTY Z CAQ V REVERZNOM GEOMETRICKOM MODELOVANÍ

Geometrické elementy sa vytvárajú v CAQ softvéroch, ktoré dokážu pracovať s polygonálnym modelom a majú funkcie na vytváranie geometrických elementov. Geometrické elementy sú v podstate primitívne plochy. Elementy sa vytvárajú na základe mraku bodov. Takto vytvorené geometrické elementy sú exportované do neutrálneho formátu IGES alebo STEP. V CAD softvéri sa importované geometrické elementy upravujú do tvaru budúceho geometrického 3D CAD modelu použitím modelovacích techník.



Obr. 41 Geometrické elementy z CAQ v reverznom geometrickom modelovaní

Obrázok 42 zobrazuje vytvorené geometrické elementy v softvéri GOM Inspect a import geometrických elementov do CAD softvéru PowerShape. Výhodou tvorby geometrických elementov v CAQ softvéroch v reverznom geometrickom modelovaní je získanie plôch, ktoré sa dajú využiť v CAD softvéroch pri rekonštrukcii polygonálneho 3D modelu.



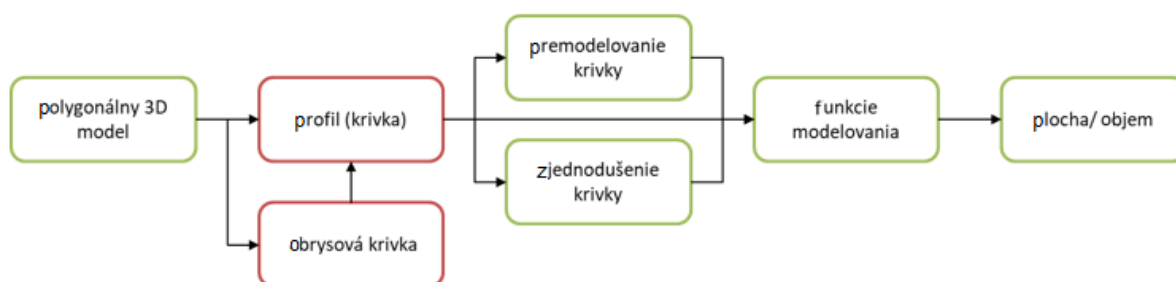
Obr. 42 Vytvorené elementy a importované elementy

- a) elementy vytvorené v CAQ softvéri GOM Inspect,
- b) elementy importované do softvéru PowerShape.

4.6.3 FUNKCIA REZ A OBRYSOVÁ KRIVKA V REVERZNOM GEOMETRICKOM MODELOVANÍ

Použitím funkcie rez sa vytvorí profil, ktorý reprezentuje krivka. Na základe pozície definovanej rovinou rezu na polygonálnom 3D modeli vznikne spomínaná krivka. Na určenie polohy rezovej roviny sa používajú osi súradnicového systému. Rovina rezu určuje miesto vzhľadom na súradnicový systém, kde vznikne krivka po reze polygonálneho 3D modelu. Tvar krivky je daný tvarom polygonálneho 3D modelu a umiestnením roviny rezu. Rovina rezu sa posúva vzhľadom na os súradnicového systému alebo rotuje okolo príslušnej osi súradnicového systému.

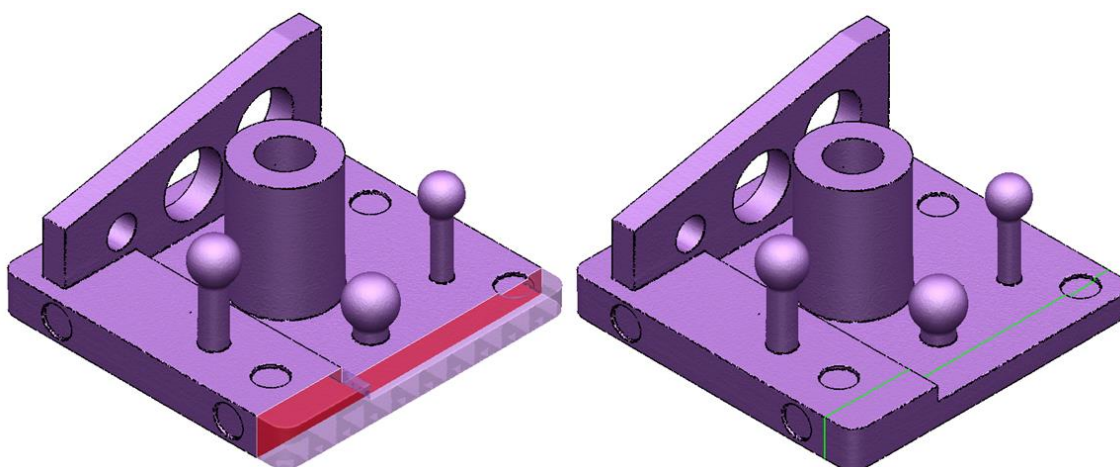
Na obrázku 40 je znázornená funkcia rezu a funkcia obrysová krivka. Vytvorená krivka rezom sa môže použiť tak, ako sa vytvorila rezom, ale v tomto prípade krivka nesie určitú geometrickú odchýlku od ideálneho tvaru 2D geometrie. Je to spôsobené tým, že polygonálny 3D model je tvorený trojuholníkovou sieťou (obsahuje šum polygonálnej siete) alebo fyzický model, z ktorého vznikol polygonálny 3D model, bol poškodený. Na odstránenie geometrickej odchýlky od ideálneho tvaru sa používajú dva spôsoby.



Obr. 43 Funkcia rez a obrysová krivka v reverznom geometrickom modelovaní

Prvým spôsobom je **premodelovanie** krivky (obr. 45) pomocou 2D geometrie. Na pôvodnú krivku získanú rezom sa modeluje 2D geometria, krivka sa prekladá čiarami, oblúkmi alebo novými ideálnymi krivkami. Farebná mapa odchýlok (obr. 45c) zobrazuje rozdiel medzi krivkou získanou rezom a krivkou, ktorá je premodelovaná.

Druhým spôsobom je tzv. **zjednodušenie krivky** (obr. 46). Zjednodušenie krivky je založené na princípe metódy prichytenia ideálnej krivky na profil (krivku), ktorý vznikol rezom. Pri tomto spôsobe je možné získať editovateľnú 2D geometriu, ktorú zobrazujú farebné mapy odchýlok (obr. 45c a obr. 46c) ovplyvnené technikou akou boli profily získané.

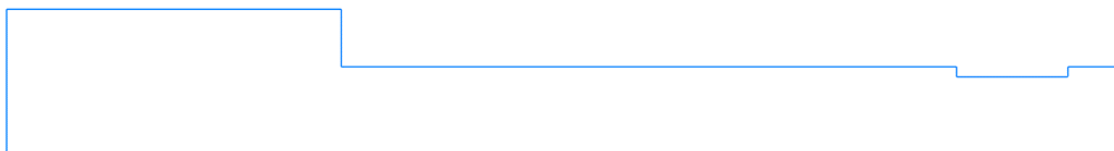


Obr. 44 Príklad funkcie rez v reverznom geometrickom modelovaní

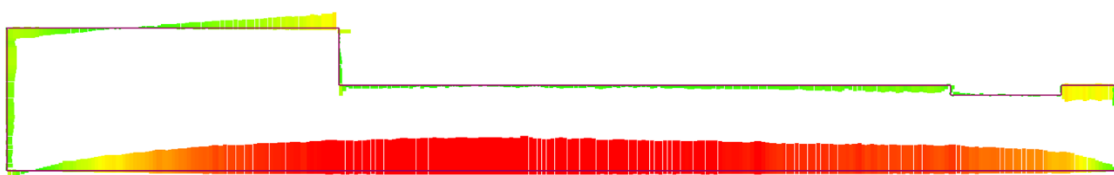
Obrázok 44 zobrazuje použitie funkcie *dynamický rez* v prostredí CAD softvéru PowerShape. Zelenou farbou je zobrazená vytvorená krivka. Keďže sa jedná o rez, vytvorená krivka kopíruje plochu polygonálneho 3D modelu.



a)



b)



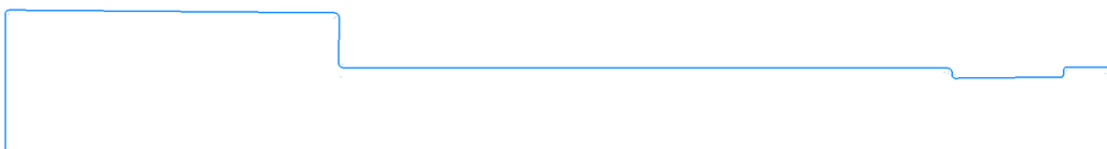
c)

Obr. 45 Premodelovanie krivky získanej rezom polygonálneho modelu

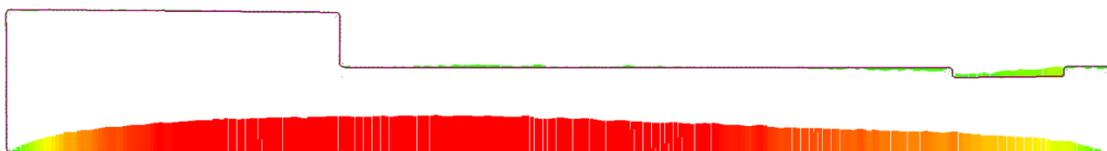
- a) krivka získaná rezom polygonálneho modelu,
- b) premodelovaná krivka,
- c) farebná mapa odchýlok pre krivku rezu a premodelovanú krivku.



a)



b)



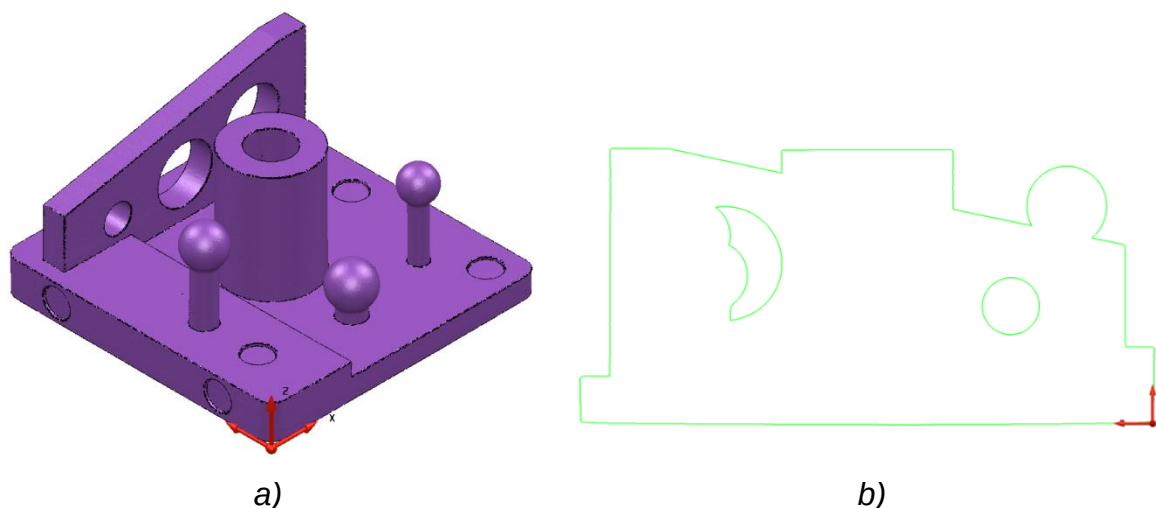
c)

Obr. 46 Zjednodušená krivka získaná rezom polygonálneho modelu

- a) krivka získaná rezom polygonálneho modelu,
- b) zjednodušená krivka,
- c) farebná mapa odchýlok pre krivku rezu a zjednodušenú krivku.

Premodelovaním alebo zjednodušením krivky sa získa krivka (profil), ktorá sa použije pri vytvorení prvotného modelu rotáciou alebo vytiahnutím. Získaním viacerých kriviek je možné použiť techniku 3D modelovania SWEEP alebo LOFT. Výsledný tvar je buď objem alebo plocha. Rozdiely, ktoré zobrazujú farebné mapy odchýlok, (Obr. 45c a Obr. 46c) sú ovplyvnené spôsobom, akým boli krivky zrekonštruované.

Obrysová krivka sa získava vzhľadom na súradnicový systém polygonálneho 3D modelu. Obrysová krivka sa používa na tvarovozložené súčiastky, ako aj na súčiastky, ktoré sú tvorené primitívnymi objektami. Na obrázku 47 je zobrazená obrysová krivka na vzorový polygonálny 3D model. Získaná obrysová krivka sa premodeluje alebo zjednoduší.



Obr. 47 Obrysová krivka v reverznom geometrickom modelovaní

- a) polygonálny 3D model s definovanou pracovnou rovinou,
b) obrysová krivka v smere osi Y.

4.6.4 PRICHYTENÁ KRIVKA A PLOCHA V REVERZNOM GEOMETRICKOM MODELOVANÍ

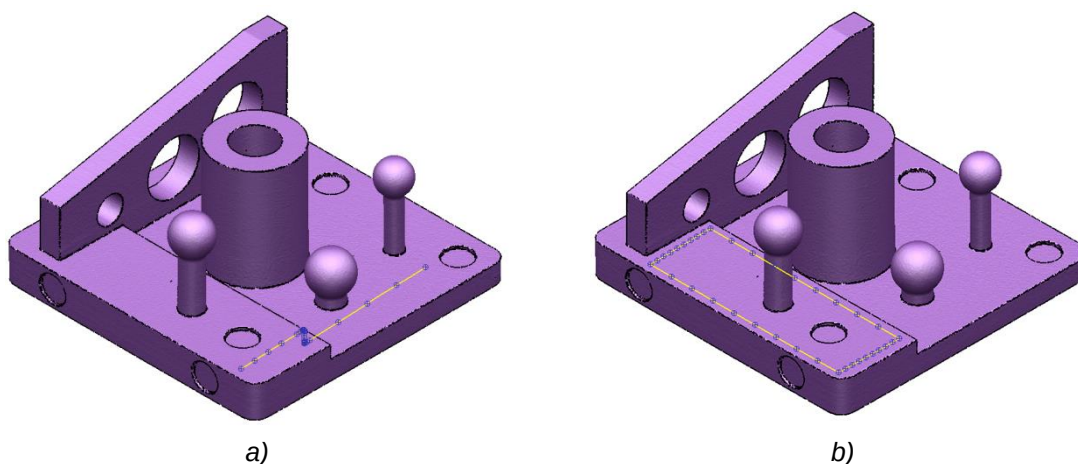
Prichytená krivka a plocha sa používa v reverznom geometrickom modelovaní pri spätnej tvorbe plošných 3D modelov (Obr. 48). Využívajú sa prevažne techniky plošného modelovania použitím funkcie *strihanie plôch*.

Prichytená krivka (naviazaná) (Obr. 49) je vytvorená na polygonálnom 3D modeli takým spôsobom, že sa definujú body krivky kliknutím na povrch polygonálneho 3D modelu (polygonálnej siete). Krivka kopíruje tvar polygonálnej siete, na ktorú je tvorená. Vytvorená krivka môže byť otvorená alebo uzavretá.

Uzavretá krivka sa vytvára kvôli následnému vytvoreniu plochy. Plocha sa automaticky vytvorí a prichytí na polygonálnu sieť polygonálneho 3D modelu použitím funkcie na plošné modelovanie, napr. *automatická (inteligentná) tvorba plôch* alebo funkcia, ktorá vytvorí plochu medzi krivkami.

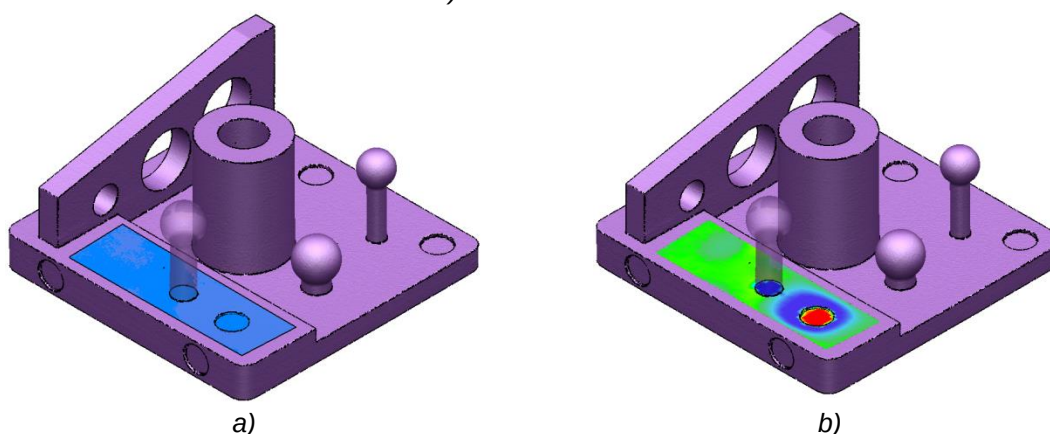


Obr. 48 Prichytená krivka a plocha v reverznom geometrickom modelovaní



Obr. 49 Prichytená krivka v reverznom geometrickom modelovaní

- a) otvorená krivka,
b) uzavretá krivka.



Obr. 50 Prichytená plocha v reverznom geometrickom modelovaní

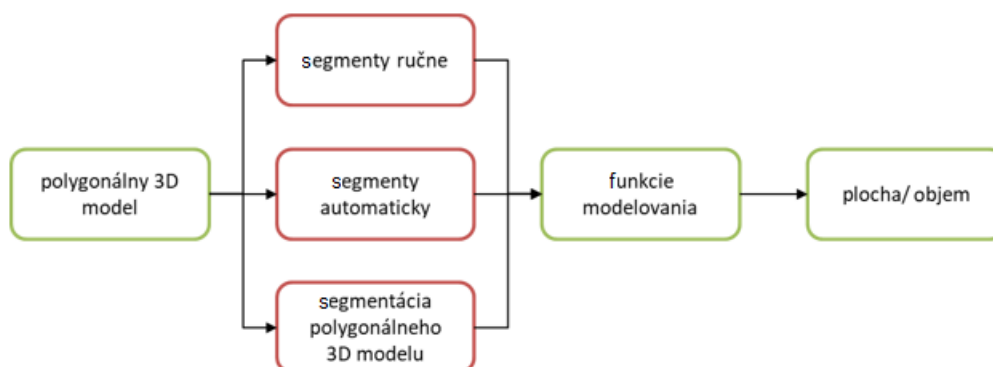
- a) prichytená plocha,
b) farebná mapa odchýlok prichytenej plochy.

Funkcia **prichytená plocha** (Obr. 50) sa vytvorí na polygonálnej sieti, ktorej tvar dokonale kopíruje. Rozmer a tvar plochy sa definuje krivkou, ktorá kopíruje tvar

polygonálnej siete. Krivka sa musí uzatvoriť a následne sa vytvorí plocha. Vytvorená plocha je tvorená laterálnymi a longitudiálnymi krivkami. Počet laterálnych a longitudiálnych kriviek definuje ako presne plocha kopíruje tvar polygonálnej siete. Výsledkom použitia tejto funkcie reverzného geometrického modelovania sú taktiež plochy, preto je potrebné používať techniky plošného modelovania. Presnosť vytvorenej plochy sa zisťuje farebnou mapou odchýlok (Obr. 50b).

4.6.5 SEGMENTY A SEGMENTÁCIA V REVERZNOM GEOMETRICKOM MODELOVANÍ

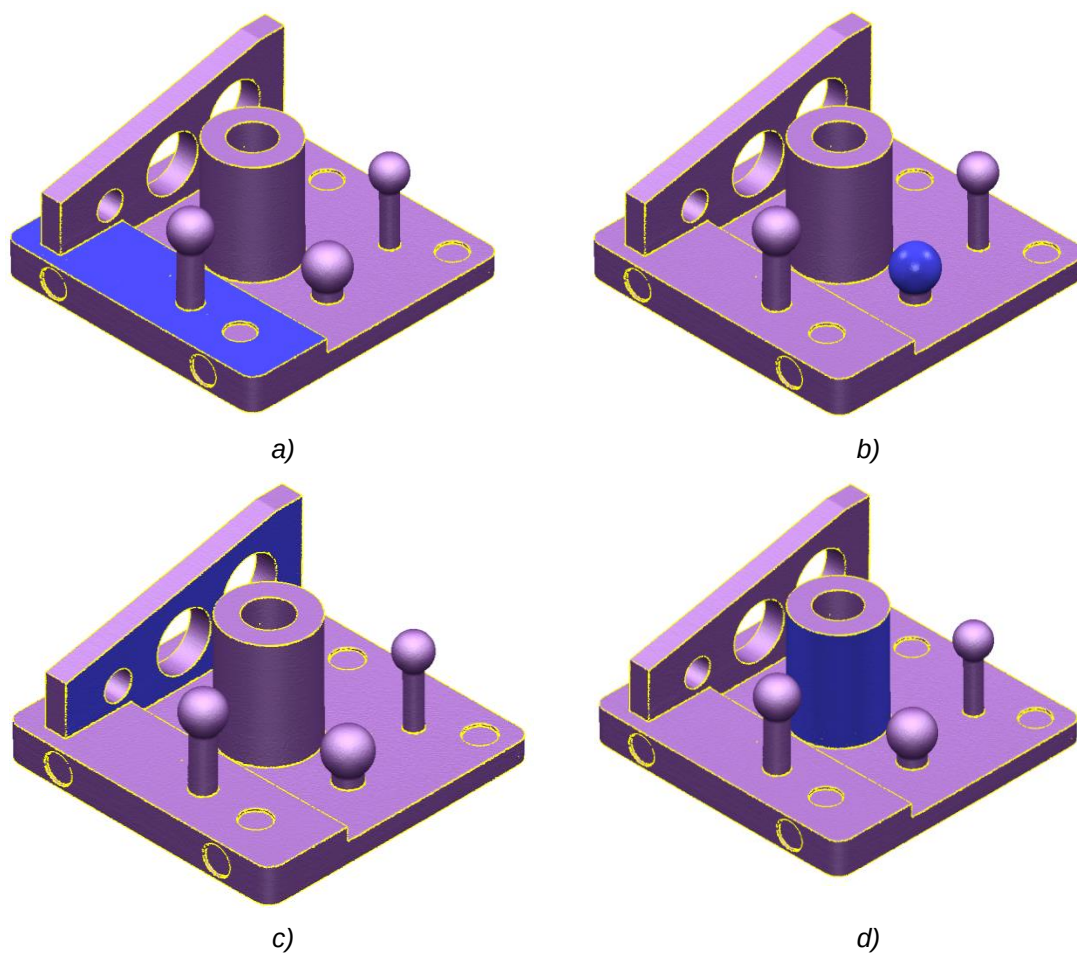
Segmentácia je založená na rozpoznávaní (extrahovaní) prvkov (segmentov) na polygonálnom 3D modeli. Súčasťou segmentácie v reverznom geometrickom modelovaní je aj rozdelenie polygonálnej siete. Segmentácia polygonálnej siete je založená na rozdelení polygonálnej siete na menšie časti. Na novovytvorenú polygonálnu sieť sa následne prichytáva plocha, ktorá vzniká aproximáciou plochy cez body, ktoré sú súčasťou polygonálnej siete. Pri použití segmentov a segmentácie nie je potrebné polygonálny model vyrovnávať.



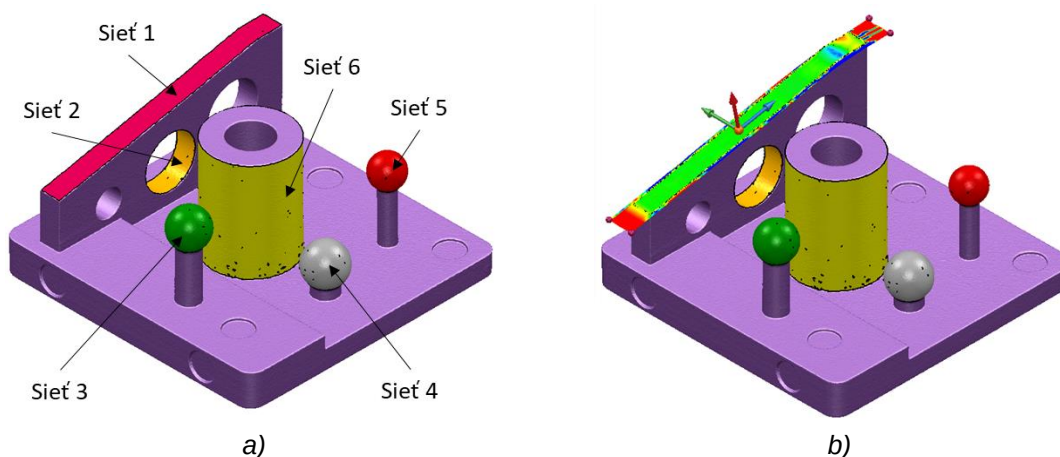
Obr. 51 Segmenty a segmentácia v reverznom geometrickom modelovaní

Segmenty sa tvoria ručne alebo automaticky. Pri tvorbe segmentov ručne sa plochy na polygonálnom 3D modeli vyberajú výberovými funkciami (Obr. 52). Výberovými funkciami vyberieme na polygonálnom modeli oblasť trojuholníkov, na ktorú sa následne vytvorí segment, alebo oblasť sa oddelí od polygonálnej siete. Výberové funkcie v CAD softvéri PowerShape sú [9]: *povrch*, *viditeľné*, *skrz*, *box* a *laso*. Pri rozdelení polygonálnej siete na menšie siete sa používa funkcia *rozdeliť sieť*. Plochy sa ideálne vytvárajú na sieť, ktorá nie je uzatvorená. Obrázok 53 zobrazuje rozdelenie polygonálneho 3D modelu. Medzi uzatvorenú polygonálnu sieť

môžeme zaradiť Sieť 2 až Sieť 6, Sieť 1 je otvorená a ideálna na tvorbu plochy. Rozdelenie polygonálnej siete sa využíva taktiež pri **veľkých, symetrických a tvarovo zložitých** polygonálnych modeloch.



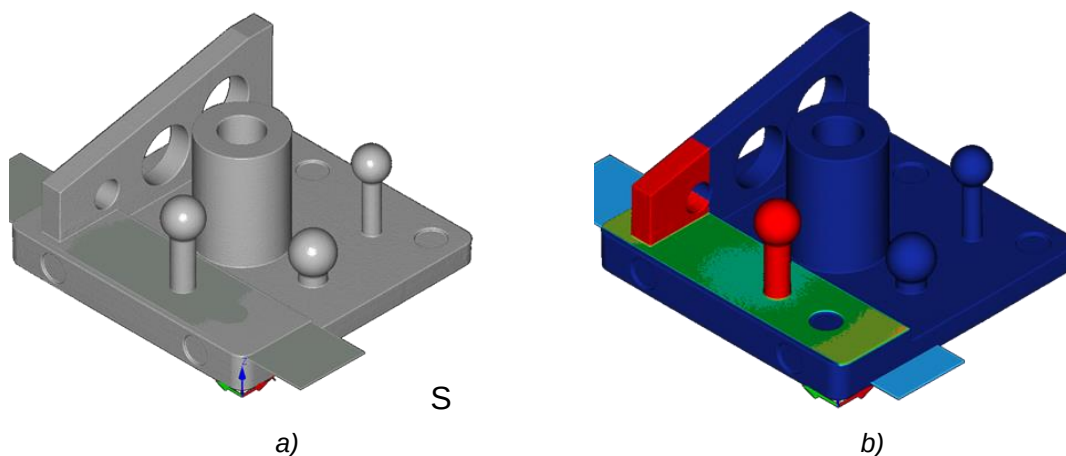
Obr. 52 Výbertrojuholníkov pri tvorbe segmentov
a) vodorovná plocha, b) guľová plocha, c) zvislá plocha, d) valcová plocha.

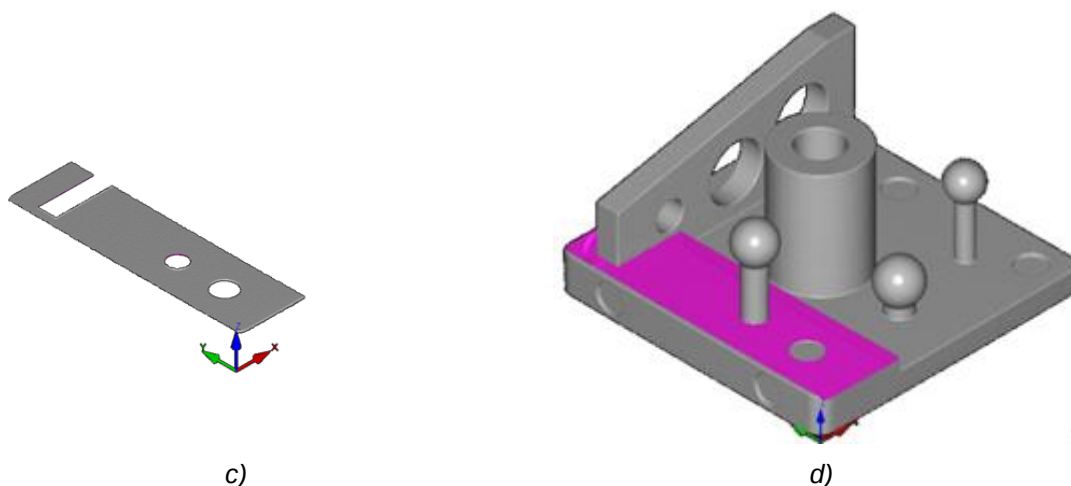


Obr. 53 Segmentácia (rozdelenie) polygonálnej siete

- a) rozdelenie polygonálnej siete na menšie siete,
b) plocha vytvorená na základe Siete 1 (Obr. 53a).

Segmentácia na základe farebnej mapy odchýlok (Obr. 54) je ďalší spôsob rozdelenia polygonálnej siete na menšie časti (CARE softvér Zeiss Reverse Engineering). Rozdelenie polygonálnej siete sa realizuje na základe farebnej mapy odchýlok (Obr. 54 b), kde sa porovnáva prichytená plocha (ako nominálne dáta) s polygonálnym modelom (ako aktuálne dáta). Polygonálny model sa rozdelí na dve časti, a to buď v definovanom rozsahu tolerančnej zóny alebo mimo definovanú tolerančnú zónu. Na obrázku 54a je znázornená vzorová súčiastka s prichytenou plochou (S).

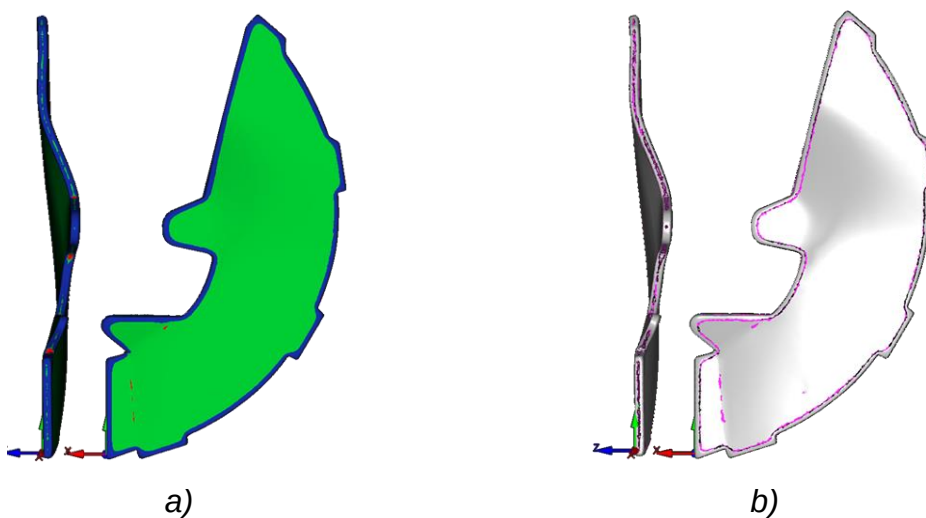


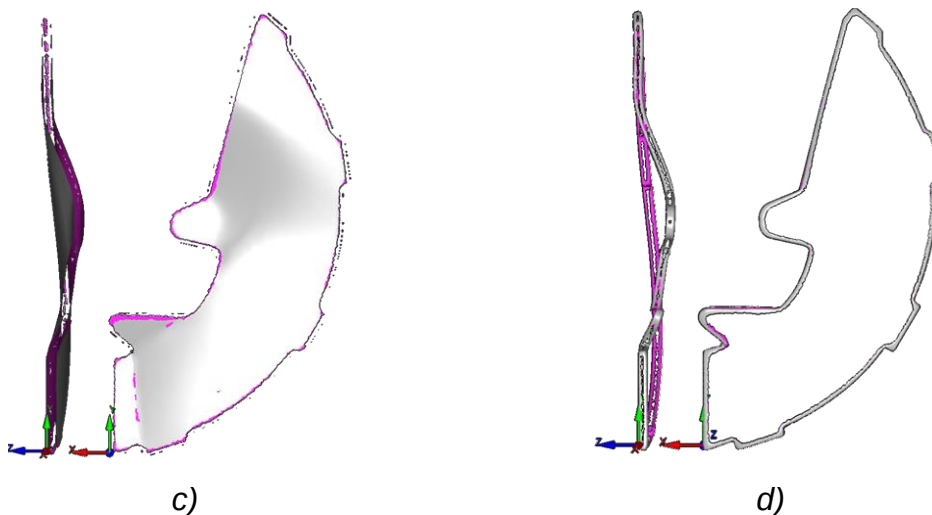


Obr. 54 Segmentácia polygonálnej siete na základe farebnej mapy odchýlok

- a) polygonálny model s prichytenou plochou (S),
- b) farebná mapa odchýlok pre plochu (S) s toleranciou -0,5 až 0,5 mm,
- c) polygonálna sieť s rozsahu tolerancie -0,5 až 0,5 mm,
- d) polygonálna sieť mimo rozsahu tolerancie -0,5 až 0,5 mm.

Spôsob rozdelenia polygonálneho 3D modelu sa taktiež realizuje na tvarovozložitých súčiastkach. Okrem klasického spôsobu výberu trojuholníkov (Obr. 52) sa využíva analýza krivosti. Výsledkom analýzy krivosti je farebná mapa odchýlok v rozmedzí definovanej tolerancie (napr. -0,1 až 0,1 mm), pozri obrázok 50. Segmentácia tvarovozložitého polygonálneho 3D modelu je zobrazená na obrázku 55. Rozdelenie polygonálneho 3D modelu na základe krivosti je vytvorené v CARE softvéri Zeiss Reverse Engineering.

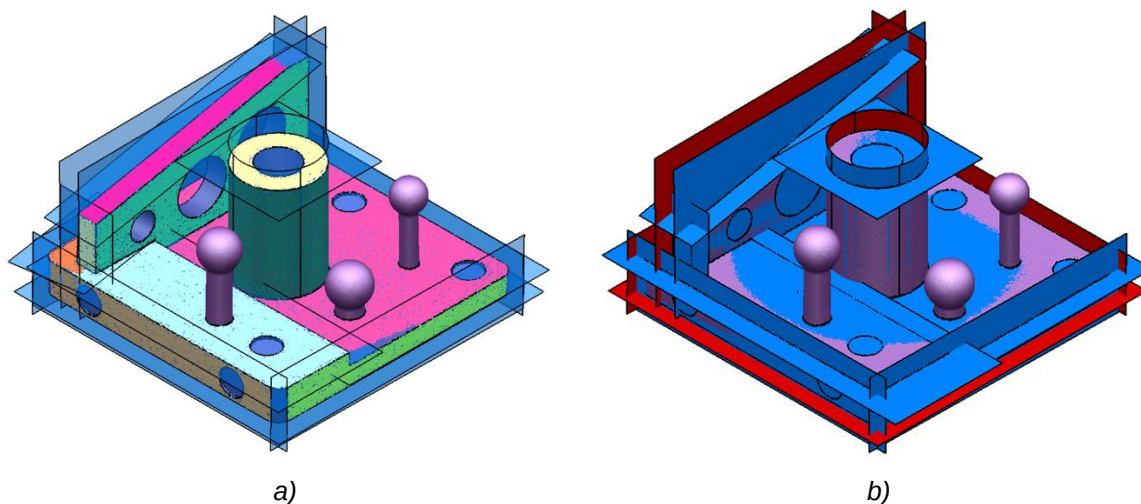




Obr. 55 Rozdelenie polygonálneho 3D modelu na základe krivosti

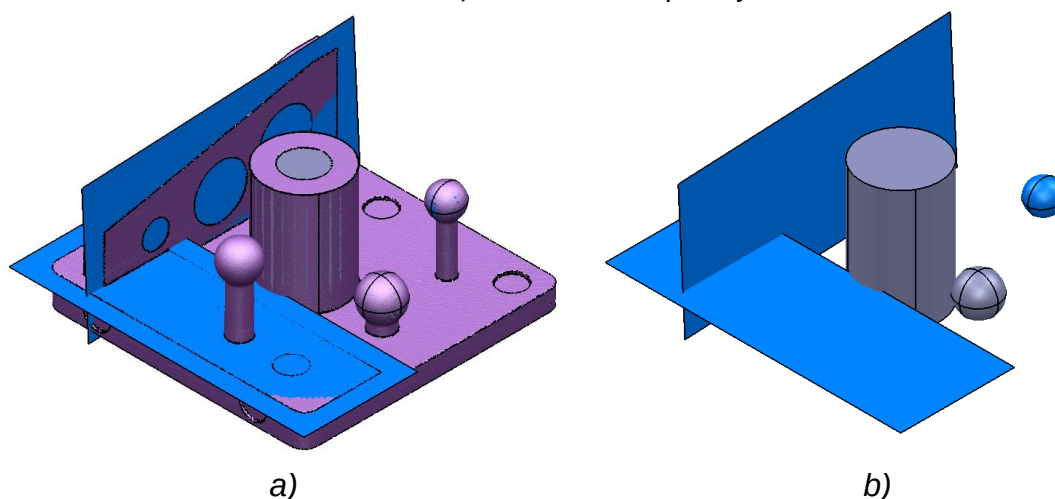
- a) farebná mapa odchýlok krivosti,
- b) rozdelený polygonálny 3D model ,
- c) polygonálna sieť v rozsahu tolerancie -0,1 až 0,1 mm,
- d) polygonálna sieť mimo rozsah tolerancie -0,1 až 0,1 mm.

Pri automatickej tvorbe segmentov sa automaticky rozpoznávajú na polygonálnom 3D modeli plochy (Obr. 56), ktoré zodpovedajú primitívnym plochám alebo primitívnym objemovým telesám, v podstate ide o rozpoznanie a extrahovanie prvkov z polygonálnej siete. Vytvorené plochy sa technikami plošného modelovania upravujú tak, aby výsledný 3D CAD model spĺňal požadované rozmery a tvar. Na použitie funkcií plošného modelovania *strihanie plôch* je nutné, aby medzi extrahovanými plochami existoval prienik. V niektorých CAD softvéroch sa využíva funkcia *automatického orezania plôch*, ktorá vytvorí uzatvorený plošný alebo objemový 3D CAD model. Pravdaže automatické orezanie plôch nie je možné realizovať pre všetky tvary polygonálnych 3D modelov.



Obr. 56 Automatická tvorba segmentov

- a) extrahovanie a rozpoznávanie plôch na polygonálnej sieti,
b) extrahované plochy.



Obr. 57 Segmenty vytvorené ručne

- a) segmenty s polygonálnou sieťou,
b) primitívne plošné a objemové objekty.

Tvorba segmentov ručne je založená na extrahovaní objektov z polygonálnej siete na základe podobnosti tvaru s primitívnym objektom. Niektoré softvéry majú možnosť extrahovať tvarovo zložité plochy z polygonálnej siete. Pri vytváraní segmentov je dôležité nastaviť spôsob prichytenia segmentu na polygonálnu sieť. Poznáme tri spôsoby prichytenia [37]: vnútorné, stredné, vonkajšie. Tieto spôsoby prichytenia majú výrazný vplyv na geometrické parametre výsledného 3D CAD modelu.

Po automatickej a ručnej tvorbe segmentov sa používajú techniky plošného, objemového alebo priameho modelovania. Pri segmentácii sa používajú hlavne techniky plošného modelovania. Použitie automatickej segmentácie je určené hlavne

pre jednoduché geometrické súčiastky, ktoré sú tvorene výlučne základnými geometrickými prvkami, ako sú rovinná plocha, valec, guľa, kužeľ a toroid. Tvorba segmentov ručne sa používa nielen pre súčiastky, ktoré sú tvorené geometrickými prvkami, ale aj pre súčiastky, ktoré obsahujú tvarovozložené plochy. Vytvorené segmenty sa využívajú pri ustavení polygonálneho modelu (tvorba nového súradnicového systému). Každý vytvorený geometrický prvok má v CAD softvéri prístupné editovacie vlastnosti (rozmery a polohu).

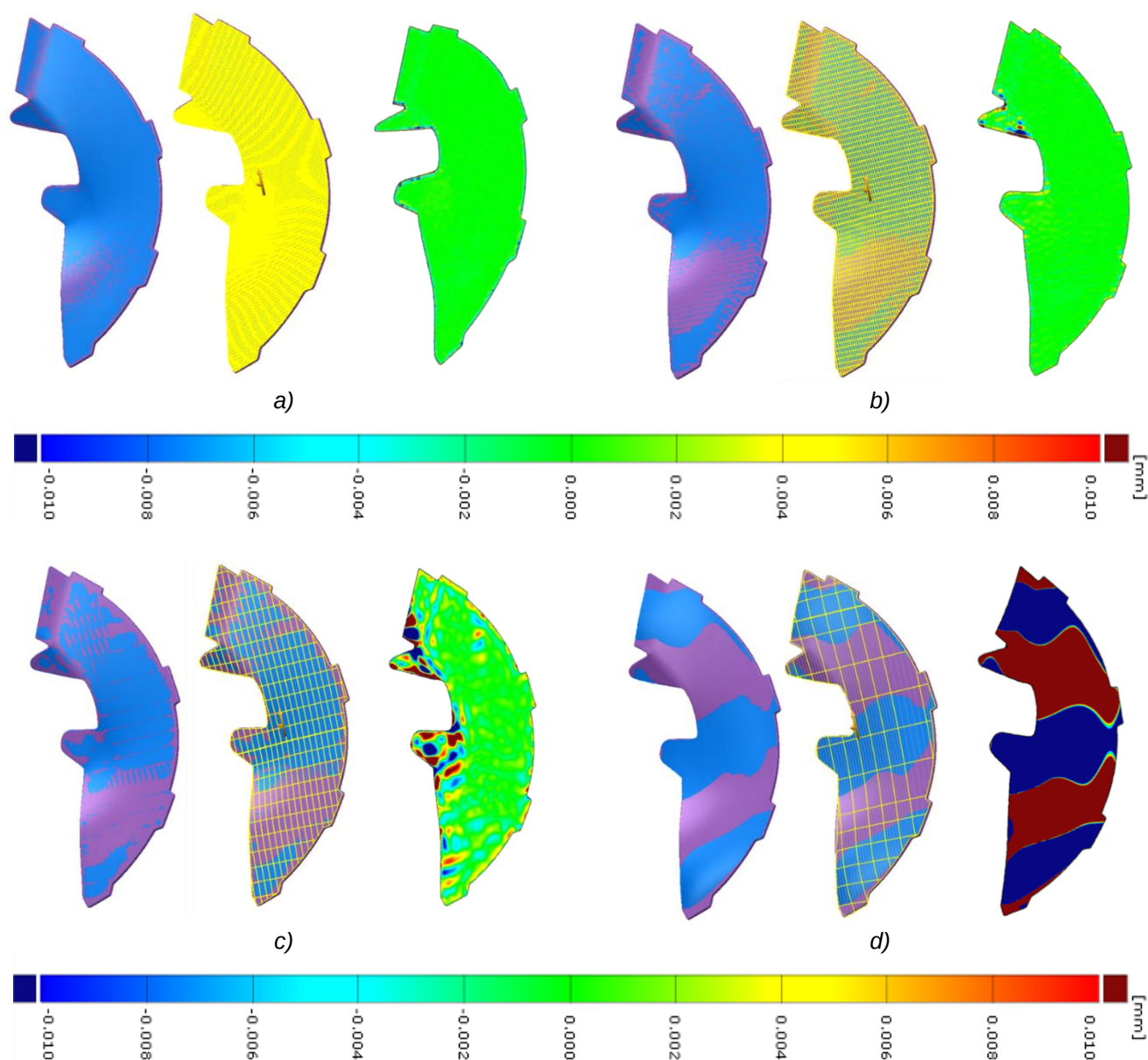
4.6.6 NABALENÁ PLOCHA V REVERZNOM GEOMETRICKOM MODELOVANÍ

Nabalená plocha (Obr. 58) sa využíva hlavne pri reverznom geometrickom modelovaní tvarovozložitých plôch. Definuje sa počet kontrolných bodov U a V plochy. Vytvorenú plochu na polygonálnom modeli tvorí sieť laterálnych a longitudiálnych kriviek (alebo isočiar) (priečne-pozdĺžne). Vyšší počet spomínaných kriviek tvorí plochu, ktorá presnejšie kopíruje tvar polygonálnej siete na polygonálnom 3D modeli.



Obr. 58 Nabalená plocha v reverznom geometrickom modelovaní

Na obrázku 56 je uvedený príklad použitia nabalenej plochy pri nastavení rozdielnej hustoty kontaktných bodov, ktoré tvoria výslednú plochu prichytenú na polygonálnu sieť. Ako je vidieť z obrázka nabalená plocha je ovplyvnená počtom kontaktných bodov U a V. Vyšší počet kontaktných bodov (riadiacich bodov) nabalenej plochy presnejšie kopíruje tvar polygonálnej siete, ale na úkor veľkosti výstupného formátu v MB. V popise obrázku 59a, b, c, d je vidieť veľkosť IGES súboru. Príkladom na nabalenú plochu je forma na betónové oplotenie kapitola 5.8.



Obr. 59 Funkcia nabalená plocha na tvarovej ploche
v prostredí CAD softvéru PowerShape

- a) počet bodov 144, veľkosť IGES súboru 32 MB,
- b) počet bodov 75, veľkosť IGES súboru 659 kB,
- c) počet bodov 24, veľkosť IGES súboru 388 kB,
- d) počet bodov 3, veľkosť IGES súboru 352 kB.

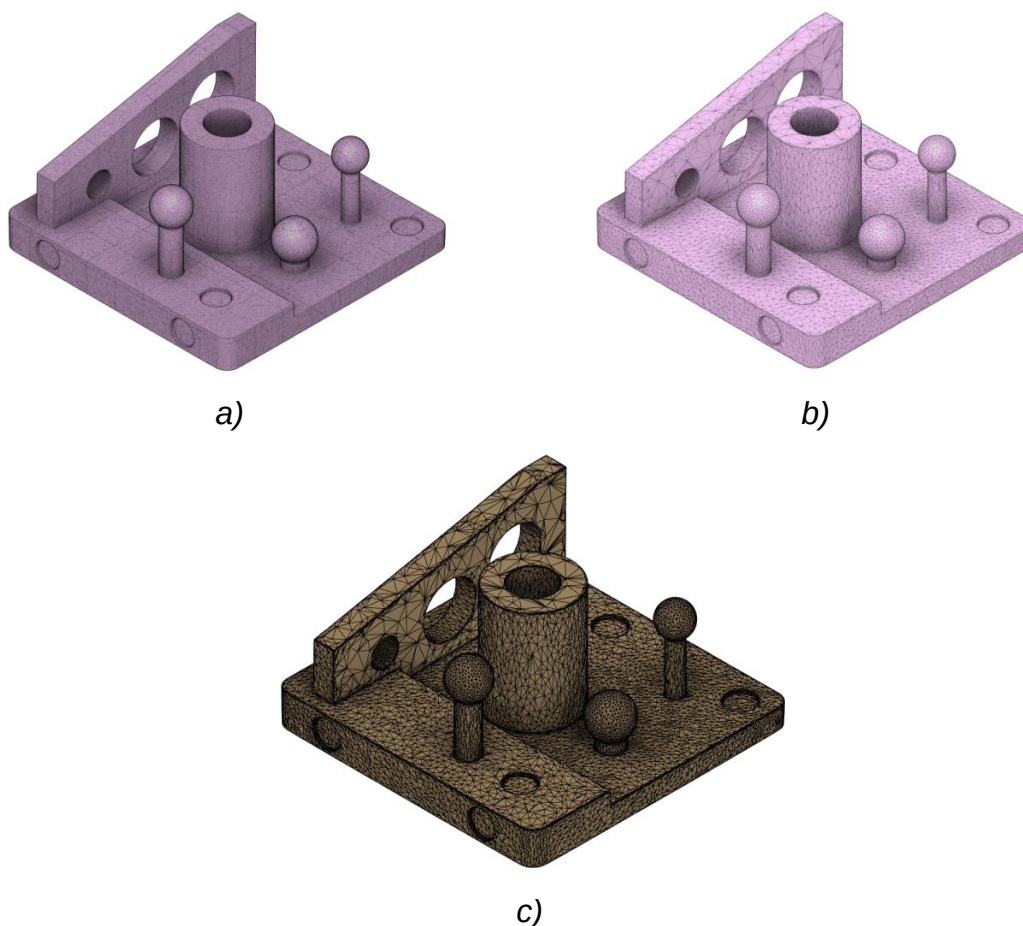
4.6.7 POLYGONÁLNE SIETE NA B-REP V REVERZNOM GEOMETRICKOM MODELOVANÍ

Konvertovanie polygonálneho 3D modelu (polygonálnej siete) (Obr. 60) na objemový B-REP model sa realizuje na princípe metódy B-REP. Každý trojuholník, ktorý tvorí polygonálny 3D model, má svoj vrchol, hranu a plochu tak ako plochy

v modeli reprezentovanom ako B-REP. Takže každý trojuholník sa prevedie na plochu objemového modelu. Na obrázku 61 je znázornený polygonálny model konvertovaný na B-REP. Aby bolo možné konvertovať polygonálny model na B-REP, je potrebné znížiť počet trojuholníkov polygonálneho modelu (Obr. 61b). Neodporúča sa pre polygonálne 3D modely, ktoré obsahujú veľký počet trojuholníkov, pretože pri redukcii trojuholníkov dochádza k deformácii plôch 3D modelu. Výhodou je použitie funkcií objemového modelovania, ako sú: rotácia, vytiahnutie a ďalšie. Tento spôsob môžeme považovať za automatické reverzné geometrické modelovanie.



Obr. 60 Polygonálna sieť na B-REP v reverznom geometrickom modelovaní

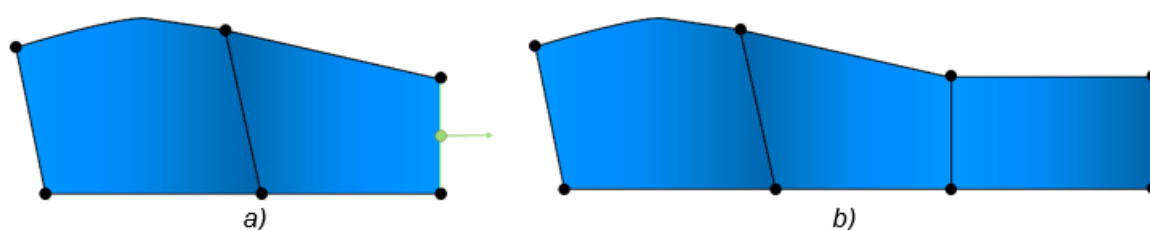


Obr. 61 Konvertovanie polygonálneho modelu na B-REP v prostredí softvéru Fusion 360

- a) pôvodný polygonálny 3D model,
- b) redukovaný počet trojuholníkov polygonálneho 3D modelu,
- c) B-REP objemový 3D model.

4.6.8 QUAD SURFACE V REVERZNOM GEOMETRICKOM MODELOVANÍ

Pri rekonštrukcii tvarovozložitých plôch sa využívajú tzv. Quad Surface. Quad Surface je plocha, ktorá je tvorená štyrmi vrcholovými bodmi a štyrmi hranami. Vrcholové body je možné po povrchu polygonálnej siete posúvať a tým sa mení tvar plochy. Potiahnutím hrany štvorcovej plochy (Obr. 62a) vzniká nová plocha (Obr. 62b). Plocha sa tvaruje podľa polygonálnej siete polygonálneho 3D modelu. Ako uvádza firma KVS Ltd. (2020)[38], využitie štvorcovej plochy pri rekonštrukcii umožňuje používateľovi vytvárať ľubovoľné tvary veľmi rýchlo.

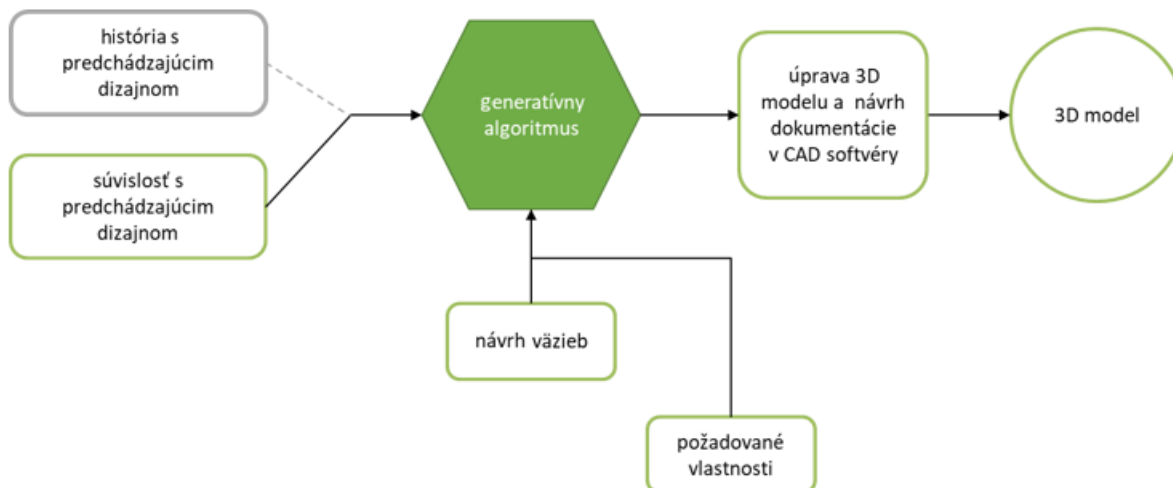


Obr. 62 Vytváranie plôch použitím Quad Surface (Štvorcovej plochy)

- a) Quad Surface,
- b) vytvorenie novej plochy.

4.6.9 GENERATÍVNENAVRHOVANIE

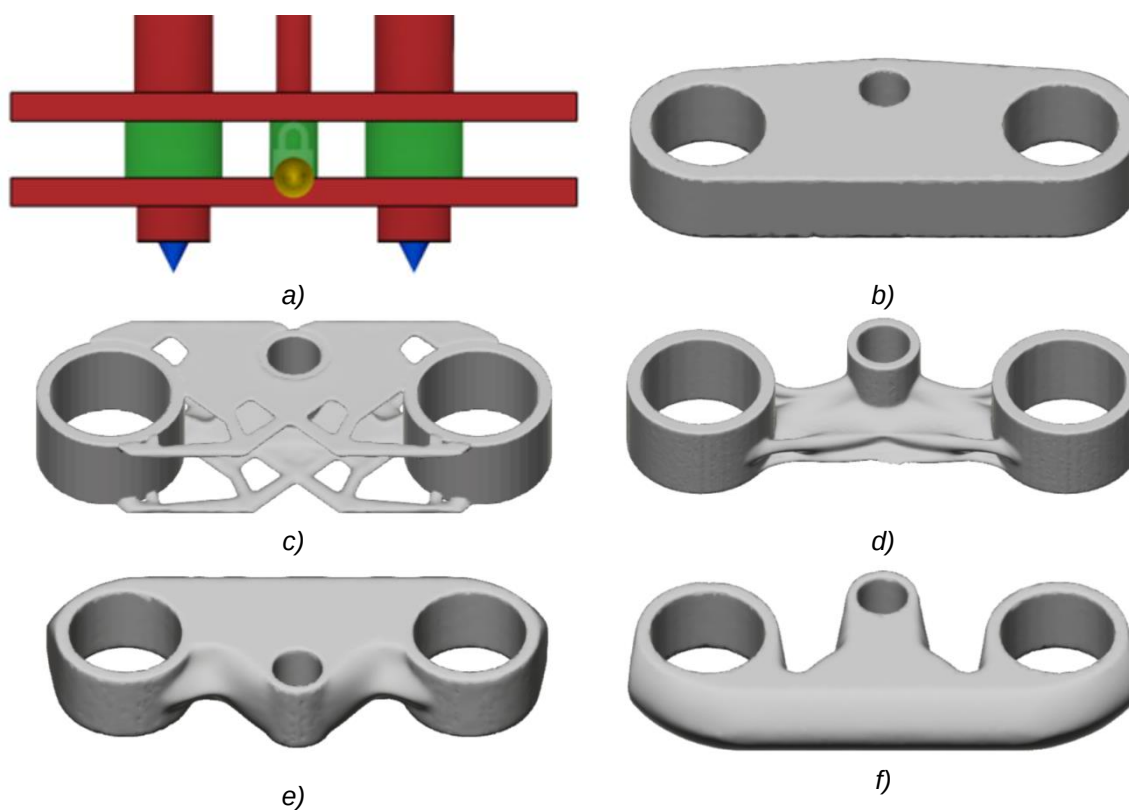
Typický proces navrhovania, často označovaný ako klasický proces navrhovania, vyžaduje odborné znalosti projektanta na návrh a výrobu výrobkov, ktoré zodpovedajú potrebám koncového používateľa. Klasický proces často vyžaduje, aby dizajnéri a technici dôkladne pochopili rôzne princípy a procesy preto, aby primerane vygenerovali konečný návrh v CAD systéme. Po mnohých hodinách navrhovania, realizovaní analýzy a prototypovaním sú tlaky na zníženie vývojového cyklu produktu. Výsledkom sú často návrhy, ktoré nie sú ani zďaleka optimálne. Generatívne navrhovanie pomôže vytvoriť optimalizované návrhy pre výrobu budúcnosti[39]. Generatívne navrhovanie je optimalizovanie topológie súčiastky. Obrázok 63 zobrazuje princíp generatívneho navrhovania.



Obr. 63 Generatívne navrhovanie [40]

Generatívne navrhovanie súčiastok je priamo prepojené s technológiou výroby. Jedným z dôležitých vstupných parametrov pri návrhu súčiastok pomocou generatívneho navrhovania je, akou technológiou sa bude súčiastka vyrábať. V súčasnosti generatívne navrhovanie zahŕňa technológie: aditívna výroba, technológia frézovania (2D, 2,5D, 3D, 3+2D a 5D), odlievanie. Na obrázku 64 je znázornený proces navrhovania súčiastok generatívnym spôsobom. Generatívne navrhovanie podporujú softvéry CATIA, NX, FUSION 360, Creo, SolidEdge, MSC Apex Generative Design, Live Parts™, Ansys Discovery Live. [41], [42], [43], [44], [39], [45], [46], [47], [48]. Posledné dva softvéry sa zaraďujú medzi Real-time Generative Design.

Výsledkom generatívneho navrhovania je množstvo tvarov 3D modelu, ktoré sa exportujú buď ako polygonálny 3D model alebo ako plošný, objemový 3D model. Exportované 3D modely je možné ďalej upravovať v CAD softvéri. Generatívne navrhovanie je možné využiť pri reverznom geometrickom modelovaní a súvisí hlavne s návrhom nového tvaru súčiastky. Generatívne navrhovanie ako jeden zo spôsobov reverzného geometrického modelovania nie je možné použiť na všetky tvary súčiastky, pretože limitujúcim faktorom je použiteľnosť novovytvorenej súčiastky v existujúcej zostave (napr. lisovací alebo strihací nástroj).



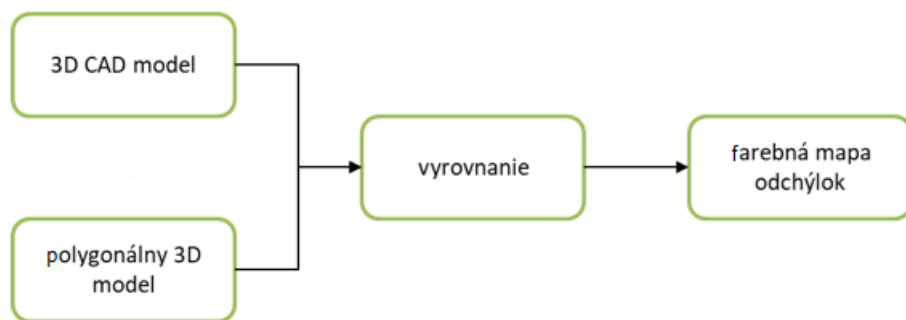
Obr. 64 Návrhy súčiastok vytvorených generatívnym navrhovaním v programe FUSION 360

- a) definovanie okrajových podmienok (modrá a zlatá farba),
oblasť nového dizajnu (zelená farba), prekážky (červená farba),
- b) prvý návrh pre aditívnu výrobu a výrobu frézovaním,
- c) príklad súčiastky pre aditívnu výrobu – obojstranný návrh,
- d) príklad súčiastky pre aditívnu výrobu – jednostranný návrh,
- e) príklad návrhu pre 3-osové frézovanie,
- f) príklad návrhu pre 3-osové frézovanie.

5 PRÍKLADY REVERZNÉHO GEOMETRICKÉHO MODELOVANIA

V tejto kapitole sú uvedené príklady reverzného geometrického modelovania, ktoré boli realizované na pracovisku UVTE MTF STU so sídlom v Trnave. Ako je vidieť v nasledujúcich kapitolách, reverzné geometrické modelovanie má široké uplatnenie v rôznych odvetviach. Reálne bolo realizovaných omnoho viac projektov, kde sa použili rôzne prístupy a funkcie reverzného geometrického modelovania. Farebná mapa odchýlok bola vytvorená v softvéri GOM Inspect 2019. Farebná mapa odchýlok bola použitá na hodnotenie presnosti vytvoreného výsledného plošného alebo objemového 3D CAD modelu. Vyrovnanie a ustavenie polygonálneho 3D modelu vzhľadom na 3D CAD model nebolo realizované. Modely (polygonálny a 3D CAD) boli nastavené ako vyrovnané, pretože sa vychádzalo zo základného ustavenia polygonálneho 3D modelu vytvoreného pred rekonštrukciou.

Schéma na získanie farebnej mapy odchýlok 3D CAD modelu po reverznom geometrickom modelovaní s polygonálnym modelom je znázornená na obrázku 65. Schéma vychádza zo schémy autorov [49], [50], [51].

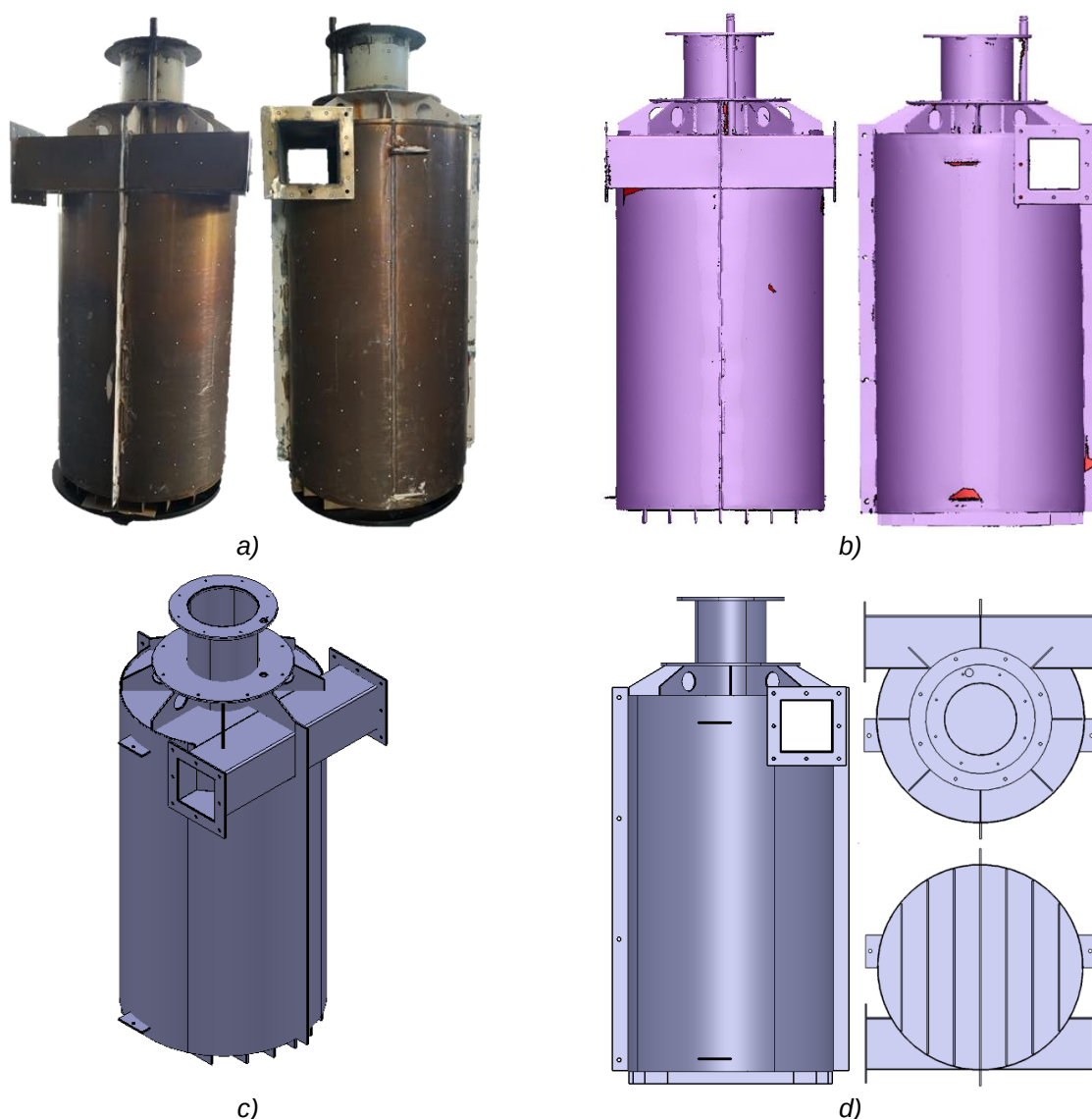


Obr. 65 Schéma na získavanie farebnej mapy odchýlok

Na príklady v nasledujúcich kapitolách 5.1 až 5.9 boli použité dva prístupy, a to hlavne geometrické a tvarovozložené reverzné modelovanie, kde boli aplikované funkcie reverzného geometrického modelovania spomínané v kapitole 4.6. Nie je možné na všetky príklady reverzného geometrického modelovania realizovať farebnú mapu odchýlok z dôvodu ochrany informácií o rozmeroch, kvalite a presnosti zrekonštruovaných plôch 3D CAD modelu. V zátvorke je uvedené meno a priezvisko osoby, ktorá spolupracovala pri riešení projektov a výskumných úloh.

5.1 REVERZNÉ GEOMETRICKÉ MODELOVANIE SUŠIČKY

Pri získavaní 3D dát sušičky bola použitá kombinácia bezkontaktného meracieho systému GOM TRITOP a optického 3D skenera GOM ATOS Triple Scan II (Ing. Ján Milde, PhD.). Polygonálny 3D model bol vytvorený v softvéri GOM ATOS Professional 7.5.2. Na obrázku 66a je znázornený reálny model sušičky. Požiadavka bola zadaná na vytvorenie výkresovej dokumentácie jednotlivých dielov sušičky. Sušička mala rozmer 1 488,5 mm (výška) a 698 mm (šírka) a bola vytvorená zvaraním jednotlivých dielov.



Obr. 66 Reverzné geometrické modelovanie sušičky

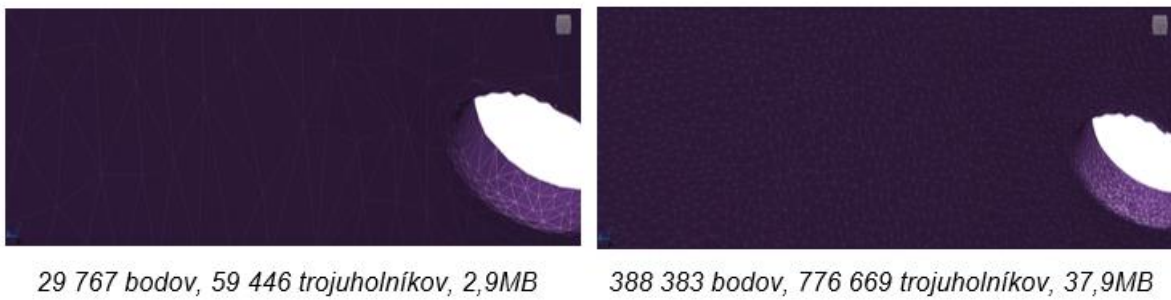
- a) reálny model sušičky (zvarenec),
- b) polygonálny 3D model sušičky,
- c) ISO pohľad na 3D CAD model sušičky,
- d) bočný pohľad a pohľad z hora a zospodu.

Pri reverznom geometrickom modelovaní sušičky bola používaná prevažne funkcia rez. Na vytvorenie valcovej časti sušičky bola rezom získaná kružnica, ktorá bola zjednodušená a následne prevedená na základnú kružnicu, kde bol upravený priemer. Zo spodnej časti nádoby bola získaná hrúbka plechu. Získaný rozmer hrúbky plechu bol použitý na ofset základnej kružnice (obvodu valcovej nádoby). Vytvorené kružnice použitím funkcie *vytiahnuť* vytvorili valcovú plochu nádoby. Dôležité boli hlavne kotviace otvory, ktoré slúžili na kotvenie sušičky. Z dôvodu zvaranej konštrukcie sušičky bolo reverzné geometrické modelovanie rozdelené na jednotlivé časti sušičky. Spolu bolo vytvorených 19 3D CAD modelov a výkresových dokumentácií (Ing. Marcel Kuruc, PhD.) častí sušičky.

5.2 REVERZNÉ GEOMETRICKÉ MODELOVANIE OCEĽOVEJ NÁDOBY KOMPRESORA

Plechový výlisok oceleovej nádoby kompresora vyrobený hlbokým ťahaním bol digitalizovaný optickým 3D skenerom GOM ATOS TripleScan II, získané údaje boli následne spracované a upravené v softvéri GOM ATOS Professional 7.5.2. Cieľom bolo vytvoriť 3D CAD model, ktorý bol použitý pri návrhu elektród na spájanie (zváranie, spájkovanie). Polygonálny 3D model (Obr. 68a) bol ustavený na vrchnej časti oceleovej nádoby kompresora a zjednodušený redukciou trojuholníkov. Detail polygonálnej siete je na obrázku 67.

V tomto príklade nebolo potrebné rekonštruovať celú nádobu kompresora. Výberovou funkciou bola oddelená vnútorná časť oceleovej nádoby kompresora z polygonálneho 3D modelu. Na oddelenú časť nádoby kompresora bola použitá funkcia *nabalená plocha* s maximálnym počtom kontaktných bodov U a V. Otvory boli vytvorené použitím funkcie *segment ručne* pre valcovú plochu so stredným prichytením. Výsledný rekonštruovaný 3D CAD model (obr. 68b) bol plošný a exportovaný do neutrálneho formátu IGES. Farebná mapa odchýlok (Obr. 69) zobrazuje rozdiel medzi rekonštruovanou plochou nádoby kompresora a polygonálneho 3D modelu.

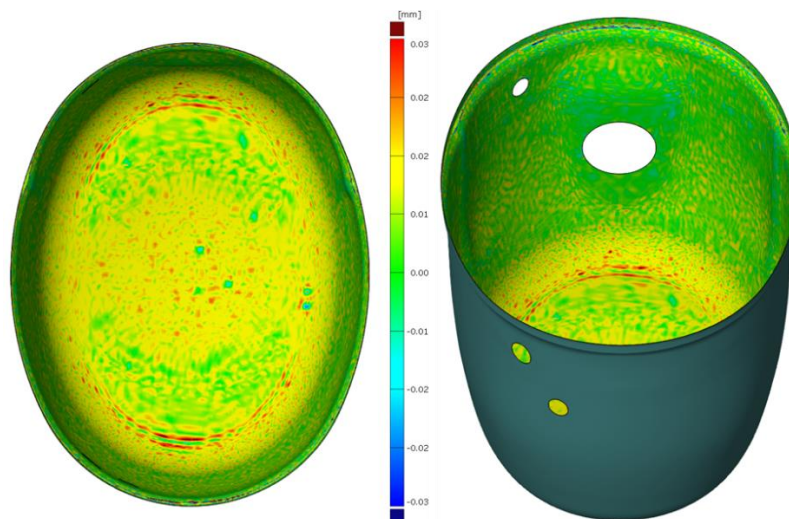


Obr. 67 Detail polygonálnej siete



Obr. 68 Oceľová nádoba kompresora

- a) polygonálny 3D model,
- b) plošný 3D CAD model.

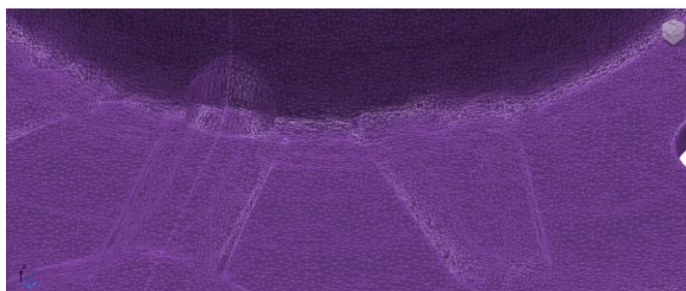


Obr. 69 Farebná mapa odchýlok pre obal kompresora

5.3 REVERZNÉ GEOMETRICKÉ MODELOVANIE PLECHOVÉHO VÝLISKU

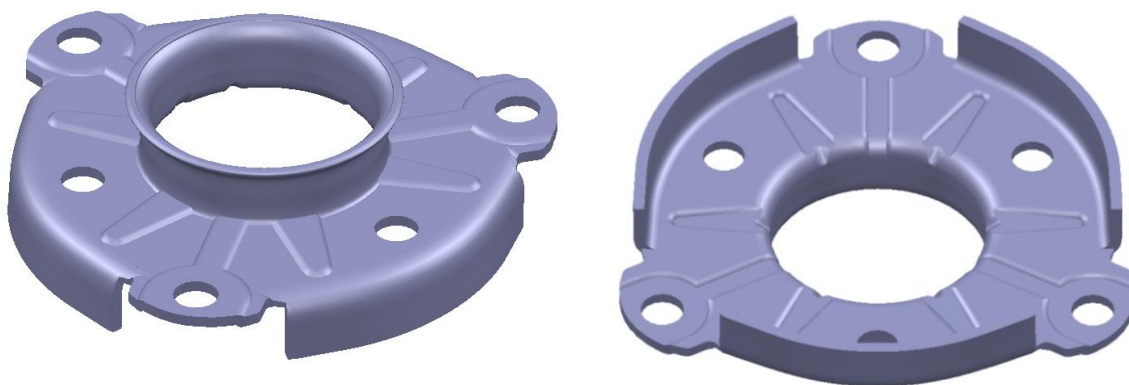
Digitalizácia plechového výlisku bola realizovaná použitím optického 3D skenera GOM ATOS Triple Scan II s meracím objemom MV 320. Polygonálny 3D model bol vytvorený v softvéri GOM ATOS Professional 7.5.2. Úlohou bolo vytvorenie objemového 3D CAD modelu výlisku. Rekonštrukcia polygonálneho 3D modelu bola realizovaná v softvéri PowerShape. Na obrázku 70 je zobrazený polygonálny 3D model a detail na polygonálnu sieť.



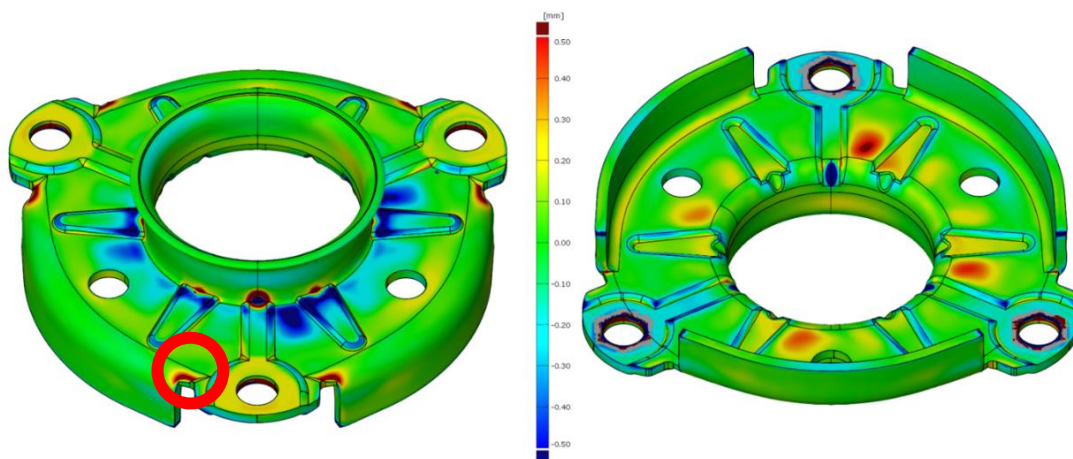


Obr. 70 Polygonálny 3D model plechového výlisku a detail polygonálnej siete
279 494 bodov, 555 900 trojuholníkov, 26,9 MB

Reverzné geometrické modelovanie výlisku z plechu bolo obtiažne, pretože na fyzickom modeli po strihaní a ohýbaní zostávali stopy po spomínaných operáciách. Keďže sa jedná o symetrický rotačný objekt, reverzné geometrické modelovanie bolo realizované na 1/3 polygonálneho 3D modelu. Na polygonálnom 3D modeli boli zalisované matice, ktoré nebolo nutné rekonštruovať. Prvotný model bol vytvorený na základe rezu, ktorý bol rotovaný okolo osi Z. Výsledný 3D CAD model je zobrazený na obrázku 71. Obrázok 72 zobrazuje farebnú mapu odchýlok plechového výlisku. Na farebnej mape odchýlok je vidieť miesto (červený krúžok), ktoré bolo ovplyvnené spôsobom výroby dielu a nebolo ho možné zrekonštruovať.



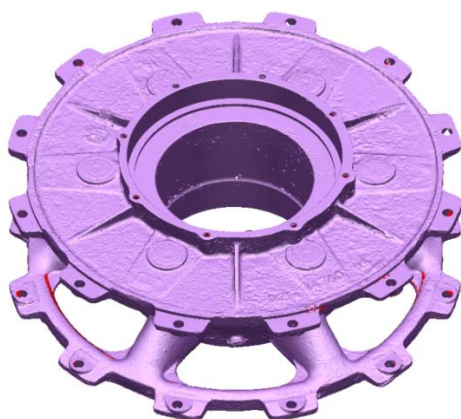
Obr. 71 3D CAD model plechového výlisku (Autor habilitačnej práce)



Obr. 72 Farebná mapa odchýlok plechového dielu

5.4 REVERZNÉ GEOMETRICKÉ MODELOVANIE KOLESA HISTORICKÉHO TANKU

Polygonálny 3D model kolesa tanku (Obr. 82) bol získaný optickým 3D skenerom GOM ATOS TripleScan II (Ing. Ján Milde, PhD.). Na vytvorenie polygonálneho modelu bol použitý softvér GOM ATOS Professional v 7.5.2. Pôvodný polygonálny 3D model mal veľkosť 913,8 MB. Preto bola potrebná redukcia trojuholníkov. Po redukcii trojuholníkov mal polygonálny model veľkosť 5,8 MB. Na úpravu polygonálneho 3D modelu bol použitý softvér GOM Inspect 2016. Priemer kolesa bol 633,4 mm a výška kolesa bola 220,15 mm. Koleso tanku ako rotačný objekt, ktorý okrem základnej časti bol tvorený aj niekoľkými geometrickými prvkami. Prvotný 3D model bol vytvorený rotáciou krivky okolo osi Z. Krivka bola získaná rezom a následne zjednodušená do oblúkov a čiar. Pri rekonštrukcii kolesa bol vybraný jeden prvok (otvor, výstupok a iné.) a ten bol následne zrekonštruovaný a rotovaný okolo osi Z v potrebnom počte.

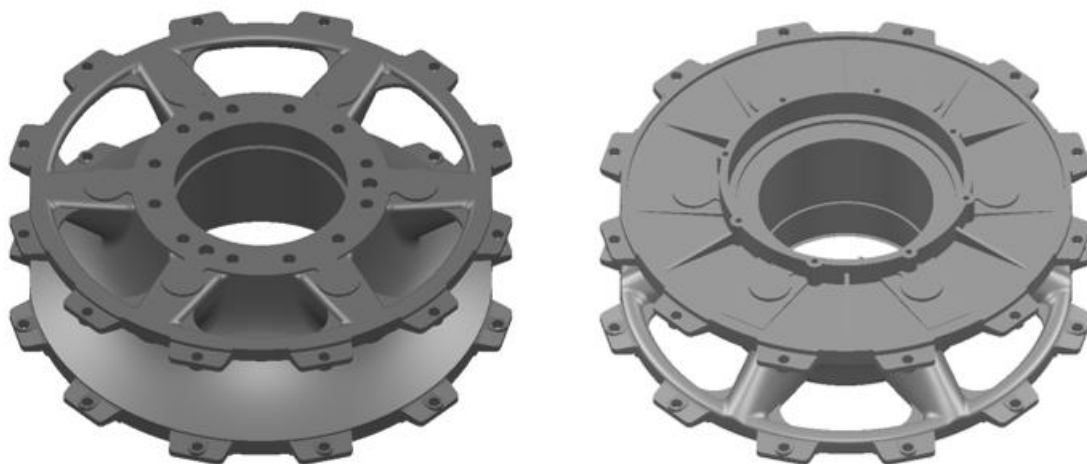


Obr. 73 Polygonálny 3D model kola historického tanku

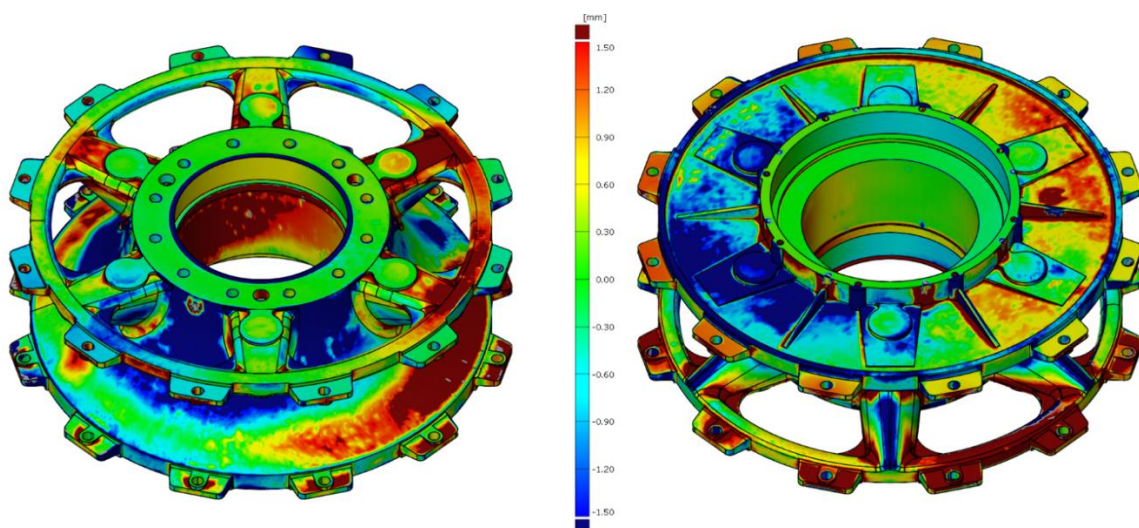
Na obrázku 74a, b, c je znázornený detail polygonálnej siete kola historického tanku po redukcii počtu trojuholníkov. Obrázok 75d zobrazuje polygonálnu sieť bez redukcie. Na obrázkoch je vidieť hustotu trojuholníkovej siete. 3D CAD model a farebná mapa odchýlok, je zobrazená na obrázku 75 a obrázku 76. Ako je vidieť z farebnej mapy odchýlok koleso nebolo symetrické. Reverzným geometrickým modelovaním sa vytvoril symetrický 3D CAD model a ten bol exportovaný do neutrálneho formátu STEP.



Obr. 74 Detail polygonálneho modelu kola historického tanku



Obr. 75 Objemový 3D CAD model kola historického tanku



Obr. 76 Farebná mapa odchýlok kola historického tanku

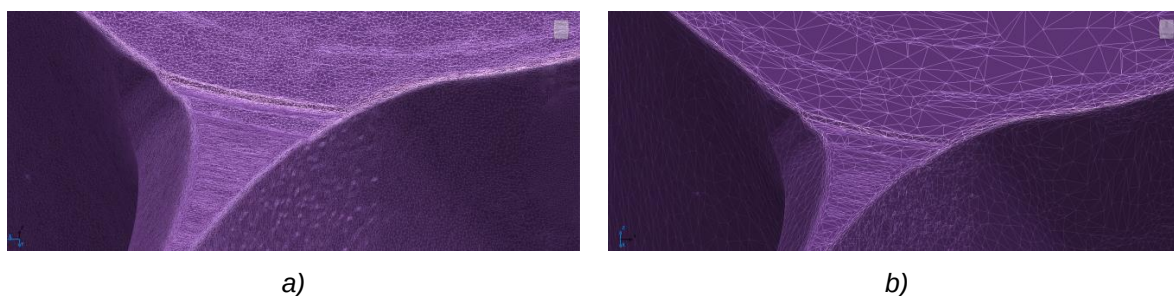
5.5 REVERZNÉ GEOMETRICKÉ MODELOVANIE LODNEJ SKRUTKY

3D digitalizácia lodnej skrutky bola realizovaná optickým 3D skenerom ATOS TripleScan II s meracím objemom MV 320. Spracovanie získaných údajov 3D digitalizáciou bolo realizované v softvéri GOM ATOS Professional 7.5.2. Na obrázku 77 je zobrazený polygonálny 3D model lodnej skrutky (doc. Ing. Ladislav Morovič, PhD.). Polygonálny 3D model bol upravený redukciou počtu trojuholníkov. Detail polygonálnej siete je zobrazený na obrázku 78a, b.

Rekonštrukcia lodnej skrutky bola realizovaná v softvéri PowerShape. Lodná skrutka bola tvorená tvarovozložitými plochami, ktoré tvoria lopatky, a primitívnym tvarom, ktorý bol reprezentovaný valcovou plochou. Pri rekonštrukcii lodnej skrutky bol prvotný model vytvorený z valcového otvoru vytvorením objemového valca, použitá bola funkcia segment ručne. Následne bol podobným spôsobom vytvorený objemový valec na vonkajšej valcovej ploche. Vonkajší valec musel byť centrovaný na stred súradnicového systému. Súradnicový systém sa následne umiestnil na vnútornú valcovú plochu (otvor v lodnej skrutke).



Obr. 77 Polygonálny 3D model lodnej skrutky



a)

b)

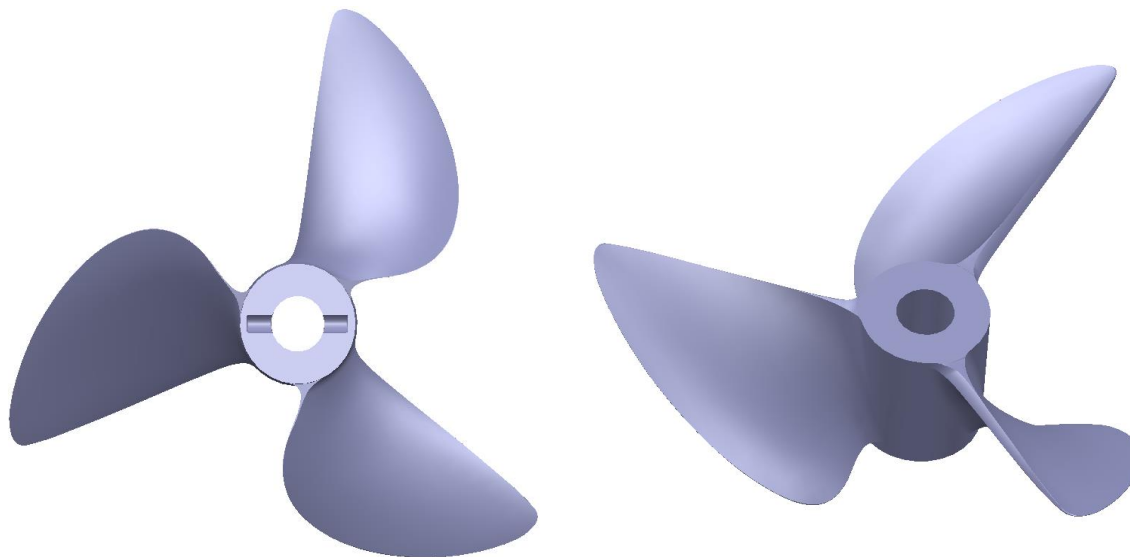
Obr. 78 Detail polygonálnej siete

a) 1 989 346 bodov, 3 974 561 trojuholníkov, 194 MB

b) 98 118 bodov, 192 451 trojuholníkov, 9,4 MB.

Lopatky lodnej skrutky boli rekonštruované použitím funkcie *nabalená plocha*. Táto funkcia bola použitá na obe strany lopatky lodnej skrutky. Rovinná plocha na lopatke bola zrekonštruovaná vytvorením rovinnej plochy použitím funkcie segment ručne. Takto vytvorené plochy boli orezané. Keďže sa jedná o rotačnú súčiastku, nie

je potrebné rekonštruovať všetky lopatky. Zrekonštruovaná lopatka bola rotovaná 3x po 120°. Na obrázku 79a je zobrazený 3D CAD model lodnej skrutky, kde je vidieť valcové drážky. Na obrázku 79b je vidieť priestorový pohľad na lodnú skrutku. 3D CAD model lodnej skrutky bol exportovaný do neutrálneho formátu STEP.

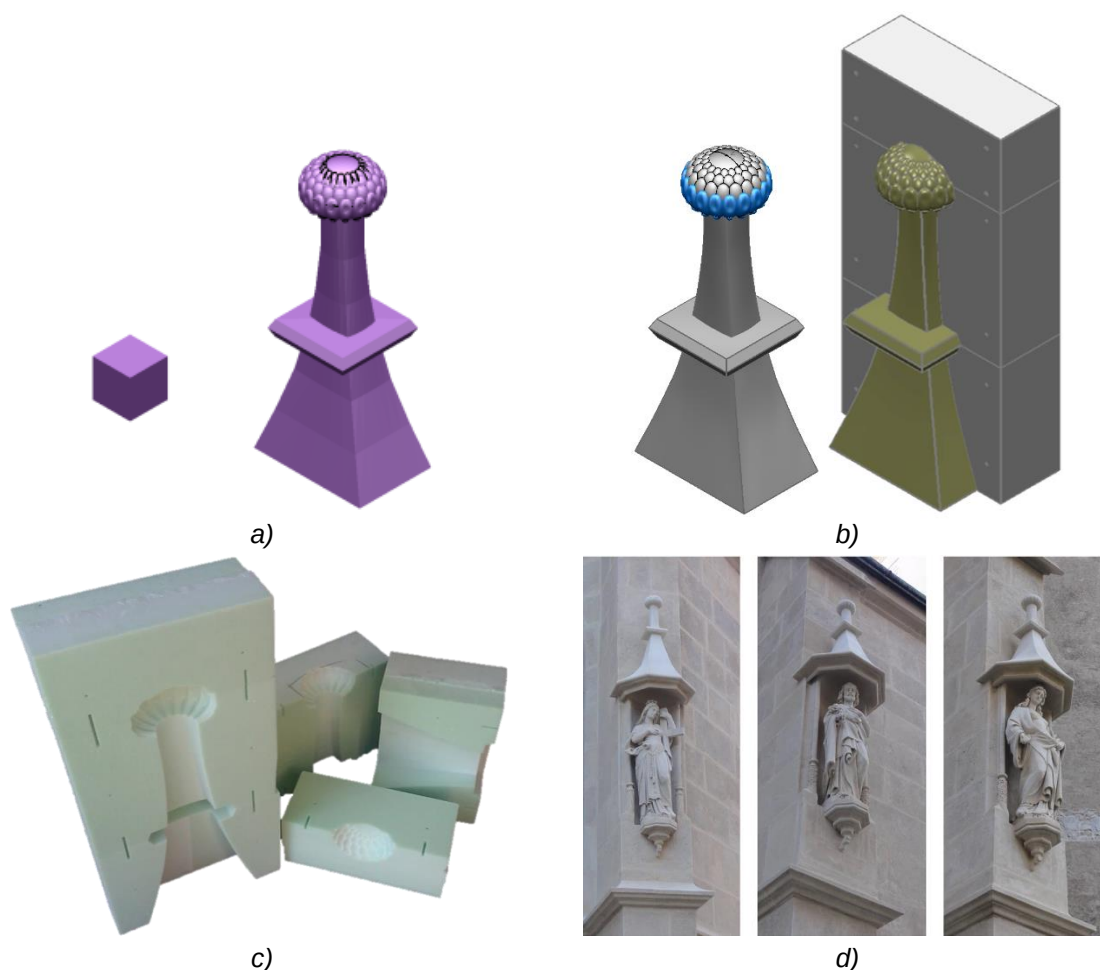


Obr. 79 3D CAD model lodnej skrutky
*pohľad zospodu,
priestorový pohľad.*

5.6 REVERZNÉ GEOMETRICKÉ MODELOVANIE FIALY NA DÓME SV. MARTINA

Na vykreslenie tvaru fialy bol použitý softvér Autodesk AutoCAD a 3D model fialy bol vytvorený v programe Autodesk 3D Studio Max na Fakulte architektúry v Bratislave [52]. Výstupným modelom bol polygonálny 3D model vo formáte STL. Úlohou bolo vytvoriť formu na odlievanie betónových fiál. Formy boli vyrobené 5-osovým frézovaním v CE5AM a dráhy obrábania boli navrhnuté v CAM softvéri PowerMill (Ing. Martin Kováč, PhD.). V tomto príklade nebola potrebná 3D digitalizácia, keďže model na rekonštrukciu bol dodaný vo formáte STL (polygonálny 3D model). Dodaný polygonálny 3D model mal výšku 26 mm. Preto bolo potrebné polygonálny 3D model zväčšiť v mierke tak, aby výška bola 682 mm. Reverzné geometrické modelovanie bolo realizované v softvéri PowerShape. Lupene fialy boli rekonštruované použitím funkcie *nabalená plocha* (Obr. 80b – lupene označené modrou farbou). Hlavu fialy tvorili lupene, ktoré boli rovnomerne rozložené okolo osi Z, nebolo potrebné rekonštruovať všetky lupene. Ďalšie časti fialy boli vytvorené

nabalenou plochou a vytvorením rovinných plôch prichytením na polygonálnu sieť. Rekonštruovaná fiala slúžila ako podklad na vytvorenie 3D modelu formy na odlievanie fialy z betónu. Výstupným modelom bol objemový 3D model formy a 3D model bol exportovaný do neutrálneho formátu STEP. Na obrázku 80c je vidieť jednotlivé časti formy a obrázok 80d zobrazuje fialy nad plastikami sv. Heleny, sv. Jozefa, sv. Alžbety.



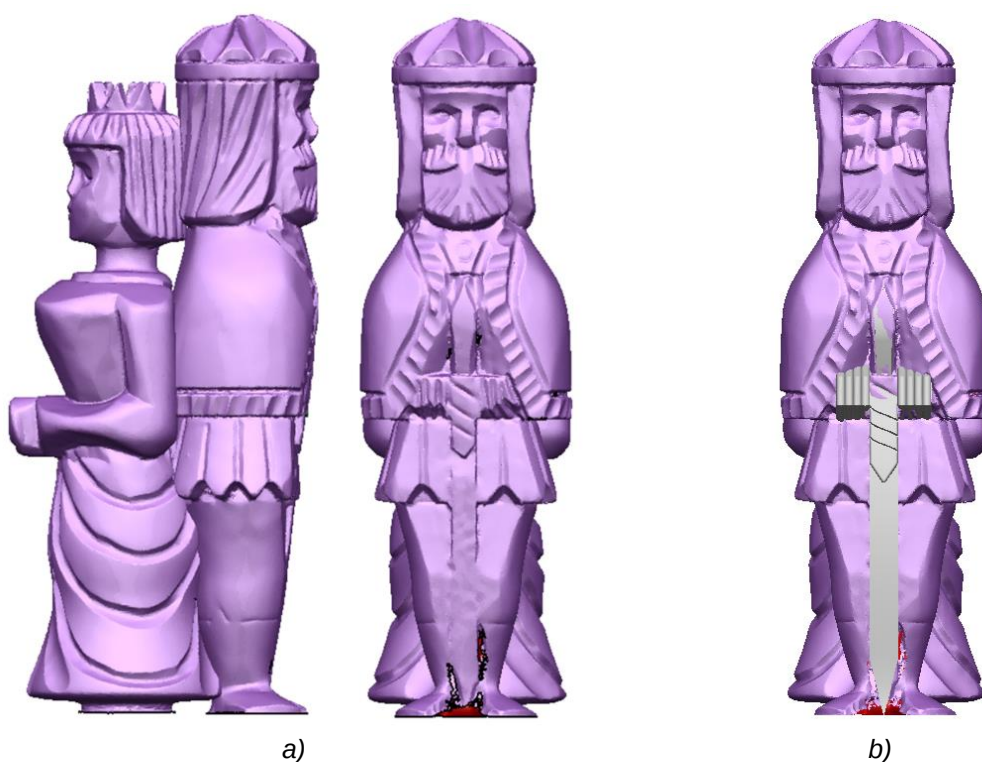
Obr. 80 Fiala – Dóm sv. Martina

- a) polygonálny 3D model fialy zo softvéru 3D Studio Max, výška modelu 26 mm,
b) rekonštruovaný 3D model fialy a časť 3D modelu formy, výška modelu 682 mm,
c) forma z tvrdého polystyrénu pre fialy [52],
d) 3x fiala pre plastiky sv. Helena, sv. Jozef, sv. Alžbeta [52].

5.7 REVERZNÉ GEOMETRICKÉ MODELOVANIE ŠACHOVEJ FIGÚRKY

Pre šachový turnaj na MTF STU so sídlom v Trnave, ktorý organizoval dekan Materiálovotechnologickej fakulty so sídlom v Trnave v období 2014 až 2018, bolo

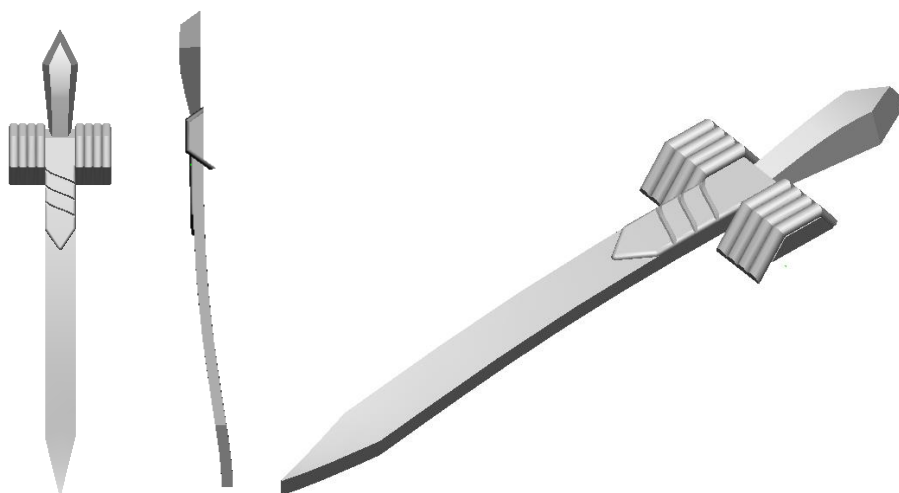
potrebné navrhnuť trofej pre víťaza turnaja. Trofej pre šachového víťaza bola vytvorená z dvoch šachových figúrok (kráľ a kráľovná). Šachové figúrky boli vyrezávané z dreva, preto každá figúrka bola unikátna. Figúrky kráľa a kráľovnej boli digitalizované samostatne. Na získanie údajov bol použitý optický 3D skener GOM ATOS TripleScan II s meracím objemom MV 320. Získané údaje boli spracované v softvéri GOM ATOS Professional 7.5.2. Softvér GOM ATOS Professional sa použil na vyrovnanie a ustavenie figúrok tak, ako je vidieť na obrázku 81a, figúrky sa zadnou časťou prekrývajú. Ďalej z obrázka 81b je vidieť nedokonalosť kráľovho meča. Reverzné geometrické modelovanie meča bolo vytvorené kopírovaním tvaru meča použitím 2D geometrických entít. Rekonštrukcia bola realizovaná v prostredí softvéru PowerShape. Na obrázku 82 je znázornený 3D CAD model meča. Ako je vidieť z obrázka, meč bol ohnutý do tvaru kráľovho tela použitím funkcie *morph - krivka*. Hotový model bol exportovaný do STL formátu.



Obr. 81 Polygonálny model šachovej figúrky

- a) bez reverzného geometrického modelovania meča,
- b) s reverzným geometrickým modelovaním meča

Kráľ – 136 251 bodov, 271 541 trojuholníkov, 16 MB
 Kráľovná – 139 016 bodov, 277 872 trojuholníkov 15,7 MB.



Obr. 82 Meč 3D CAD model šachovej figúrky – Kráľ

Rekonštruovaný polygonálny model bol následne vyrobený na 3D tlačiarňi Zortrax M200 z bieleho filamentu (Ing. Ján Milde, PhD.). Takto vytvorený model šachovej trofeje bol upravený na vytvorenie formy a následne odliaty (Ing. Eugen Belica, PhD.). Na obrázku 83a je znázornený vyrobený model šachových figúrok. Na obrázku 83b je znázornená trofej určená pre víťaza šachového turnaja.



a)



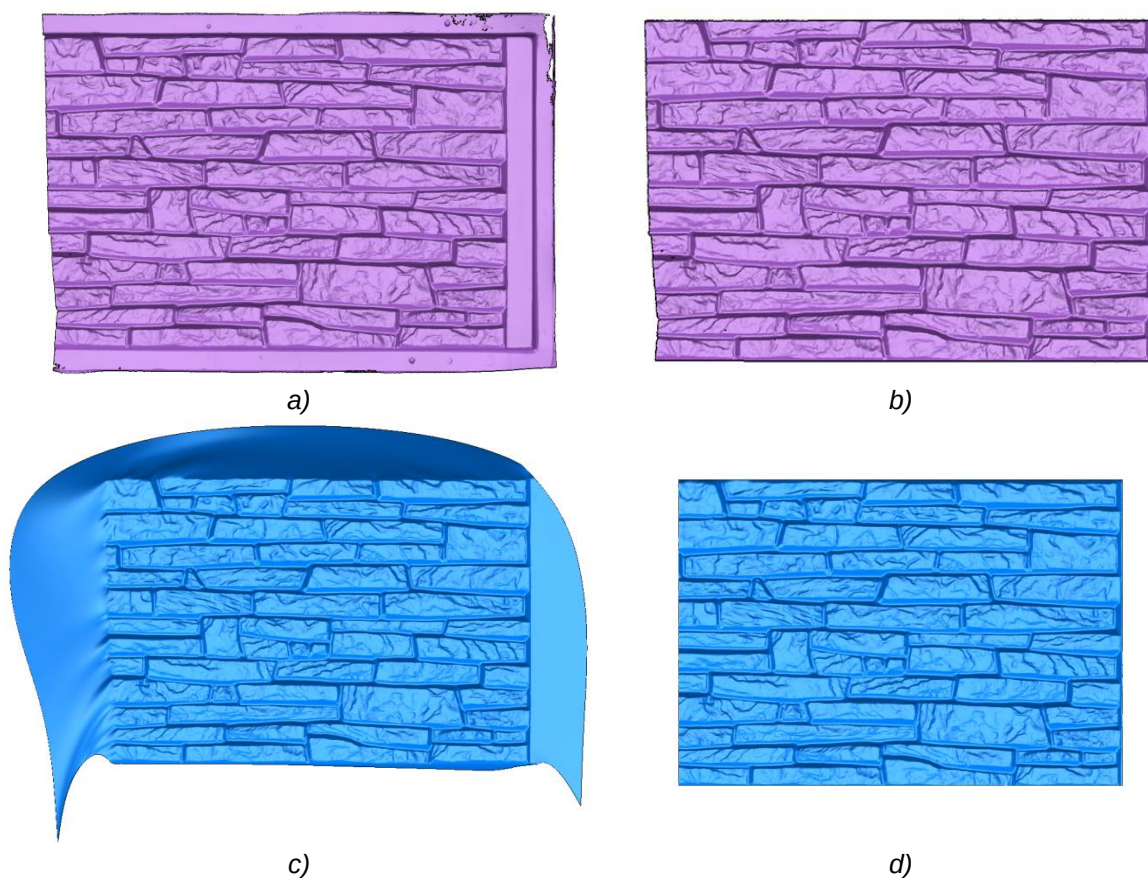
b)

Obr. 83 Šachová trofej

- a) vyrobený model šachových figúrok 3D tlačou,
b) finálna šachová trofej.

5.8 REVERZNÉ GEOMETRICKÉ MODELOVANIE FORMY NA BETÓNOVÉ OPLOTENIE

Ďalším príkladom, kde bolo využité reverzné geometrické modelovanie, je rekonštrukcia štruktúry formy na betónové oplotenie, ktorá má slúžiť ako predloha na vytvorenie foriem na betónové stĺpiky, ktoré budú obsahovať podobnú štruktúru ako betónové oplotenie. Novovytvorené formy budú mať štruktúru betónového plotu. 3D digitalizácia bola realizovaná optickým 3D skenerom ATOS TripleScan II, získaný mrak bodov bol spracovaný v softvéri GOM Professional 7.5.2 (Ing. Ján Urminský, PhD.).



Obr. 84 Forma na betónové oplotenie

- a) polygonálny 3D model časť formy, 2 351 844 bodov, 4 692 415 trojuholníkov, 229,1 MB,
- b) orezaný polygonálny 3D model, 830 157 bodov, 1 657 205 trojuholníkov, 80,9 MB,
- c) nabalená plocha vytvorená,
- d) orezaná nabalená plocha.

Polygonálny 3D model bol následne upravený a zjednodušený v softvéri GOM Inspect 2019. Na obrázku 84a je znázornený pôvodný polygonálny 3D model a na obrázku 84b je zobrazený orezaný polygonálny 3D model. Štruktúra formy bola rekonštruovaná použitím funkcie nabalená plocha, ktorá presne kopírovala tvar

zjednodušeného polygonálneho 3D modelu. Polygonálny 3D model bol rekonštruovaný v CAD softvéri PowerShape. Nabalená plocha obsahovala cez 300 kontaktných bodov U a V pre následne vytvorenú nabalenú plochu. Výstupom bola tvarová plocha, ktorá bola exportovaná do neutrálneho formátu IGS/IGES s veľkosťou súboru 35 MB, STEP model mal veľkosť súboru 85 MB.)

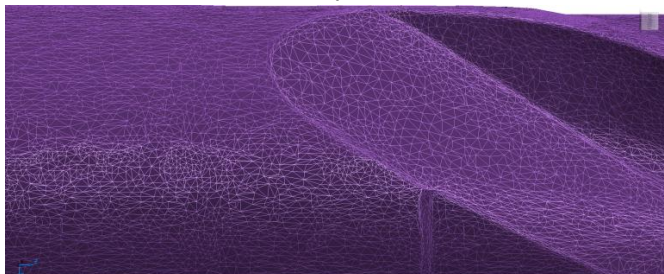
5.9 REVERZNÉ GEOMETRICKÉ MODELOVANIE REZNÝCH NÁSTROJOV

3D CAD modely rezných nástrojov sa využívajú hlavne pri numerickej simulácii procesov rezania. Pokiaľ chceme realizovať numerickú simuláciu reálnych rezných nástrojov, musíme získať údaje o tvare a rozmere pomocou 3D digitalizácie. Ďalším spôsobom na získanie tvaru a rozmerov rezných nástrojov je CAD/CAM softvér určený na návrh a výrobu rezných nástrojov, ako bolo opísané v článku [31]. Výstupom z CAD/CAM softvéru je polygonálny 3D model vo formáte STL. Tento spôsob rekonštrukcie polygonálneho 3D modelu bol použitý pri numerickej simulácii v softvéri DEFORM 3D (Ing. Martin Necpal, PhD.). Polygonálny 3D model vrtáka na obrázku 85a bol získaný optickým 3D digitalizáciou prostredníctvom optického 3D skenera ATOS TripleScan II s meracím objemom MV 170. Detail polygonálnej siete je zobrazený na obrázku 85b. Získané údaje boli spracované v softvéri GOM ATOS Professional 7.5.2.

Rekonštrukcia polygonálneho 3D modelu bola realizovaná v softvéri PowerShape. Drážka a fazetka sa získali použitím funkcie *rez*. Získaný profil bol premodelovaný na požadované rozmery a funkciou *SWEEP* bola vytvorená skrutkovica. Špička vrtáka bola vytvorená pomocou segmentu rovinná plocha (pre čelnú plochu na čele, chrbtovú plochu 1, 2 a odľahčenie). Keďže špička vrtáka bola symetrická, preto bola rekonštruovaná iba polovica špičky. Vytvorená plocha bola následne rotovaná o 180°. Vzniknuté plochy na špičke boli použité pre rozdelenie objemu. Na obrázku 86a je znázornený 3D CAD model, ktorý bol použitý pri numerickej simulácii teplotnej analýzy v softvéri ANSYS [53]. Na obrázku 86b je znázornená farebná mapa odchýlok časti vrtáka.



a)



b)

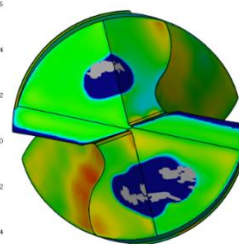
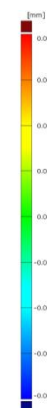
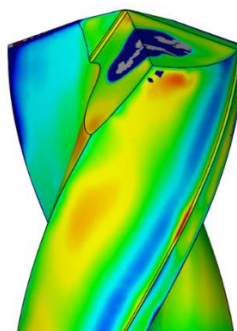
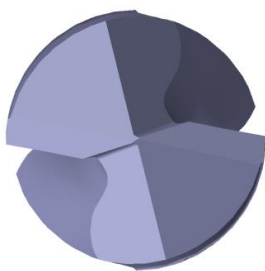
Obr. 85 Polygonálny model vrtáka

a) polygonálny 3D model vrtáka,

b) detail polygonálnej siete 83612 bodov, 166548 trojuholníkov, 8,13 MB.



a)



b)

Obr. 86 3D CAD model časti vrtáka

a) bočný a čelný pohľad na 3D model vrtáka,

b) farebná mapa odchýlok časti vrtáka.

6 ZOZNAM SOFTVÉROV

Nasledujúca tabuľka zobrazuje prehľad softvérov, ktoré sa používajú pri reverznom geometrickom modelovaní v oblasti CAD, CARE a CAQ.

Názov softvéru	CAD/CARE/ Modul	Internetový odraz
PowerShape	CAD	https://www.autodesk.com/products/powershape/overview
FUSION 360	CAD	https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview
Geomagic Design X 3D	CAD	https://www.3dsystems.com/software/geomagic-design-x
TEBIS	CAD	https://www.tebis.com/en/software/cad-software/reverse-engineering
Polyworks Modeler	CAD	https://www.innovmetric.com/en/products-solutions/polyworksmodelertm
SpaceClaim	CAD	https://www.ansys.com/products/3d-design/ansys-spaceclaim/reverse-engineering
NX	CAD	https://www.plm-europe.org/admin/presentations/2017/1940_PLM_Europe_25.10.17-08-00_TOD-PARRELLA_SPLMM_SOFTWARE_practical_uses__convergent_modeling_and_reverse_engineering.pdf
SolidEdge	CAD	https://solidedge.siemens.com/en/solutions/products/3d-design/next-generation-design/reverse-engineering/
ZEISS Reverse engineering	CARE	https://www.zeiss.com/metrology/products/software/reverse-engineering.html
3DR Meteor	CARE	https://www.3dreshaper.com/en/meteor-en/3dreshaper-metro/cad-reverse-engineering
VISI Reverse	CARE	https://www.visicadcam.com/visi-reverse
quickSurface	CARE	https://www.quicksurface3d.com/
Mesh2Surface	Modul Rhinceros	https://www.mesh2surface.com/?p=product_mesh2surface
Xtract3D	Modul SolidWorks	(https://www.polyga.com/xtract3d/)
VXmodel	Modul	https://www.creaform3d.com/en/metrology-

	Inventor SolidEdge SolidWorks	solutions/3d-applications-software- platforms/vxmodel-scan-cad-software-module
Geomagic for SOLIDWORKS	Modul	https://www.3dsystems.com/software/geomagic-solidworks
spScan	CARE	https://www.armonicos.co.jp/en/products/spscan/
VG Studio Max	CAQ	https://www.volumegraphics.com/en/products/vg-studio-max/what-s-new-in-vgstudio-max-3-4-x.html

7 SLOVENSKO-ANGLICKÝ SLOVNÍK

Anglický výraz	Slovenský výraz
3D digitizing	3D digitalizácia
3D model	3D model
Additive manufacturing	aditívna výroba
Point	bod
CNC machining	CNC obrábanie
Line	čiara
Colour deviation map	farebná mapa odchýlok
Geometrical parameters	geometrické parametre
Global coordinate system	hlavný súradnicový systém
Boundary representation	hraničná reprezentácia
Curve	krivka
Cloud of points	mrak bodov
Numerical simulation	numerická simulácia
Solid	objem
Solid model	objemový model
Optical 3D scanning	optické 3D skenovanie
Surface	plocha
Surface model	plošný model
Computer Aided Design	počítačová podpora návrhu
Computer Aided Reverse Engineering	počítačová podpora reverzného inžinierstva
Computed tomography	počítačová tomografia
Polygonal model	polygonálny model
Remodel curve	premodelovaná kvivka
Fitted curve	prichytená krivka
Fitting	prichytenie
Primitives	primitíva
Primitives from points	primitíva z bodov
Primitives objects	primitívne objekty

Reverse Geometrical Modelling	reverzné geometrické modelovanie
Reverse Engineering	reverzné inžinierstvo
Section	rez
Mesh	sieť
Part	súčastka
Coordinate Measuring Machine	súradnicový merací stroj
Coordinate System	súradnicový systém
Quad surface	štvorcová plocha
Triangel	trojuholník
Free form surface	tvarovozložitá plocha
Sample	vzorka
Reconstruction	rekonštrukcia
Basic primitives	základné primitíva
Trim Surface	strihanie plochy
Modelling function	funkcie modelovania
Dimension	rozmer
Analysis	analýza
Analysis of polygonal model	analýza polygonálneho modelu
Mesh outline curve	obrysová krivka zo siete
Wireframe model	drôtový model
Direct modelling	priame modelovanie
Parametric modelling	parametrické modelovanie
Mesh modelling	modelovanie polygonálnej siete
Software	softvér
Triangulation	triangulácia

ZOZNAM BIBLIOGRAFICKÝCH ODKAZOV

- [1] M.-I. Ouamer-Ali, F. Laroche, A. Bernard, and S. Remy, "Toward a Methodological Knowledge based Approach for Partial Automation of Reverse Engineering," *Procedia CIRP*, vol. 21, pp. 270–275, Jan. 2014, doi: 10.1016/J.PROCIR.2014.03.190.
- [2] P. Benkő and T. Várady, "Segmentation methods for smooth point regions of conventional engineering objects," *Comput. Des.*, vol. 36, no. 6, pp. 511–523, May 2004, doi: 10.1016/S0010-4485(03)00159-3.
- [3] T. Várady, "Reverse engineering of geometric models—an introduction," *Comput. Des.*, vol. 29, no. 4, pp. 255–268, Apr. 1997, doi: 10.1016/S0010-4485(96)00054-1.
- [4] A. P. Valerga, M. Batista, R. Bienvenido, S. R. Fernández-Vidal, C. Wendt, and M. Marcos, "Reverse Engineering Based Methodology for Modelling Cutting Tools," *Procedia Eng.*, vol. 132, pp. 1144–1151, Jan. 2015, doi: 10.1016/J.PROENG.2015.12.607.
- [5] G. M. Lecrivain, I. Kennedy, A. Slaouti, and E. Int Assoc, "A hybrid methodology for the creation of high quality surfaces for Reverse Engineering applications," *World Congr. Eng. 2007, Vols 1 2*, vol. II, pp. 1269–+, 2007.
- [6] Pointclouds.org, "The PCD (Point Cloud Data) file format," 22.8.2020, 2020. [Online]. Available: https://pointclouds.org/documentation/tutorials/pcd_file_format.html#why-a-new-file-format.
- [7] Autodesk PowerShape, "Cloud modelling," 02.6.2018, 2020. [Online]. Available: <https://knowledge.autodesk.com/support/powershape/getting-started/caas/CloudHelp/cloudhelp/2019/ENU/PWRS-ReferenceHelp/files/GUID-CC4BEBFB-181C-4303-87CD-C0E9630892C6-hm.html>.
- [8] Autodesk Inc., "Maya - Polygonal Modeling," 30.7.2019, 2019. [Online]. Available: <https://knowledge.autodesk.com/support/maya/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2019/ENU/Maya-Modeling/files/GUID-7941F97A-36E8-47FE-95D1-71412A3B3017-hm.html>.
- [9] Autodesk Inc., "PowerShape 2020 Offline manual." p. , 2020.
- [10] Autodesk Inc., "Autodesk Meshmixer," 20.8.2020, 2020. [Online]. Available:

- <http://help.autodesk.com/view/MSHMXR/2019/ENU/?guid=GUID-7B6A26A2-1E8A-4352-99A5-6C4026D5B89D>.
- [11] VDI 3405, "Additive Fertigungsverfahren Grundlagen, Begriffe, VVerfahrensbeschreibungen - Additive manufacturing processes, rapid manufacturing . Basic, definitions, processes," *ICS 25.020, Dezember 2014*, Düsseldorf, p. 40, 2014.
 - [12] B. Courter, "A Brief Introduction to CAD File Formats," 22.4.2013, 2013. [Online]. Available: <https://blog.grabcad.com/blog/2013/04/22/a-brief-introduction-to-cad-file-formats/>.
 - [13] E. S. A. Nasr, A. Al-Ahmari, and K. Moiduddin, "10.14 – CAD Issues in Additive Manufacturing," in *Comprehensive Materials Processing*, 2014, pp. 375–399.
 - [14] L. Morovič, "Návrh, obrábanie, meranie a skenovanie tvarovozložitých plôch," Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2013.
 - [15] L. Morovič, *Non-contact Measurement of Free-Form Surfaces*. Aleš Čeněk s.r.o., 2016.
 - [16] T. Luhman, S. Robson, S. Kyle, and I. Harley, *Close Range Photogrammetry: Principles, Techniques and Applications*, 1st ed. Whittles Publishing, 2011.
 - [17] D. T. Pham and L. C. Hieu, "Reverse Engineering—Hardware and Software," in *Reverse Engineering*, London: Springer London, 2008, pp. 33–70.
 - [18] V. Raja and K. J. Fernandes, *Reverse Engineering*, 1st ed. London: Springer London, 2008.
 - [19] G. Rajkumar, R. Balasundaram, N. Ganesh, and S. Rajaram, "Investigation of Turning Parameters of Machining INCONEL 718 using Titanium and Carbide Inserts," *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 5, pp. 11283–11294, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.MATPR.2018.02.095.
 - [20] R. Christoph and H. J. Neumann, *Multisenzorová souřadnicová měřicí technika : měření rozměrů, tvarů, polohy a drsnosti - opticky, dotykově a rentgenovou tomografií*. Uherské Hradiště: PRIMA Bilavčík, 2008, 2008.
 - [21] I. Kalová and M. Lisztwan, "Industrial applications of triangulation technique," *IFAC Proc. Vol.*, vol. 39, no. 21, pp. 258–263, Feb. 2006, doi: 10.1016/S1474-6670(17)30194-5.
 - [22] I. Kalová and H. Karel, "Optické metody měření 3D objektů," 2005. [Online]. Available: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/05023/index.html>.
 - [23] R. H. Peter Kaľuch, Jozef Živčák, "Čo ponúka priemyselná počítačová

- tomografia?," 2012. [Online]. Available:
<https://www.mmspektrum.com/clanek/co-ponuka-priemyselna-pocitacova-tomografia>.
- [24] GOM GmbH, "ATOS - Process Description." Braunschweig, Germany, pp. 1–39, 2014, doi: 10.1016/b978-088415289-7/50002-0.
 - [25] GOM GmbH, *User Manual - Hardware*. Germany, 2013, p. 62.
 - [26] H. Lettenbauer, B. Georgi, and D. Weiß, "Means to verify the accuracy of CT systems for metrology applications (in the absence of established international standards)," *Int. Symp. Digit. Ind. Radiol. Comput. Tomogr.*, no. April, p. 6, 2007.
 - [27] Zeiss Gmbh, "ZEISS CMM-Check," 20.8.2020, 2020. [Online]. Available:
https://world.probes.zeiss.com/en/Machine-Accessories/Calibration-Artifacts/CMM-Check/category-383/product-ARTIKEL_2882.html.
 - [28] GOM GmbH, "GOM Inspect - Direct Help." Braunschweig, Germany, p. , 2019.
 - [29] Autodesk PowerShape, "Autodesk PowerShape 2020 - Fill holes," 4.8.2020, 2019. [Online]. Available:
<https://help.autodesk.com/view/PWRS/2020/ENU/?guid=GUID-727E60F6-7D38-48D6-9210-B80E86F16EA1>.
 - [30] VDI 5620, "Reverse engineering of geometrical data," 2017.
 - [31] I. Buranský, M. Necpal, and M. Bračák, "3D Model Optimization of Four-Facet Drill for 3D Drilling Simulation," vol. 24, no. 38, pp. 87–94, 2016.
 - [32] J. A. P. Kjellander and M. Rahayem, "An Integrated Platform for 3D Measurement with Geometric Reverse Engineering," *Comput. Aided. Des. Appl.*, vol. 6, no. 6, pp. 877–887, Jan. 2009, doi: 10.3722/cadaps.2009.877-887.
 - [33] N. Anwer and L. Mathieu, "From reverse engineering to shape engineering in mechanical design," *CIRP Ann.*, vol. 65, no. 1, pp. 165–168, Jan. 2016, doi: 10.1016/J.CIRP.2016.04.052.
 - [34] R. Bénére, G. Subsol, G. Gesquière, F. Le Breton, and W. Puech, "A comprehensive process of reverse engineering from 3D meshes to CAD models," *Comput. Des.*, vol. 45, no. 11, pp. 1382–1393, Nov. 2013, doi: 10.1016/J.CAD.2013.06.004.
 - [35] M. Žarnay *et al.*, "Konštruovanie," 20.8.2020, 2012. [Online]. Available:
<http://www.konstruovanie1.uniza.sk/>.

- [36] TertaVision, "REVERSE ENGINEERING SERVICE - DIFFERENT APPROACHES FOR MODELING," 20.2.2020, 2020. [Online]. Available: <https://www.tetravision.be/services/reverse-engineering/#geometric-modeling>.
- [37] Autodesk Inc., "PowerShape 2020 Offline manual - Manually segment meshes." p. , 2020.
- [38] KVS Ltd., "QUICKSURFACE Free Form," 20.8.2020, 2020. [Online]. Available: https://www.quicksurface3d.com/?p=product_quicksurface_freeform.
- [39] M. McKnight, "Generative Design: What it is? How is it being used? Why it's a game changer," *KnE Eng.*, vol. 2, no. 2, p. 176, Feb. 2017, doi: 10.18502/keg.v2i2.612.
- [40] intrinSIM LLC, "A VISION FOR GENERATIVE DESIGN," 2019.
- [41] Hexagon/MSC Software, "MSC Apex Generative Design," 26.8.2020, 2020. [Online]. Available: <https://www.mscsoftware.com/product/msc-apex-generative-design>.
- [42] J. Hendrickson, "Ansys - Real-Time Generative Design Drives Innovation," 25.3.2019, 2019. [Online]. Available: <https://www.ansys.com/blog/real-time-generative-design-drives-innovation>.
- [43] Siemens Industry Software Inc., "Generative Design brings Topology Optimization to Solid Edge," 26.8.2020.2020, 2020. .
- [44] Siemens Industry Software Inc., "Generative Design - NX," 26.8.2020, 2020. [Online]. Available: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/our-story/glossary/generative-design/27063>.
- [45] PTC, "Innovate Faster With Generative Design and AI," 26.8.2020, 2020. [Online]. Available: <https://www.ptc.com/en/technologies/cad/generative-design>.
- [46] I. Desktop Metal, "Real Time Generative Design with Live Parts," 26.8.2020, 2020. [Online]. Available: <https://www.desktopmetal.com/resources/live-parts>.
- [47] A. Winkler, A. Narasimhan, and J. Miller, "Considering Print Direction in Topology Optimization to Minimize Overhang Constraints," no. June, 2017.
- [48] Autodesk Inc., "GENERATIVE DESIGN FOR MANUFACTURING WITH FUSION 360," 26.8.2020, 2020. [Online]. Available: <https://www.autodesk.com/solutions/generative-design>.
- [49] I. Baranek, I. Buransky, and J. Peterka, "Influence of Material Removal Way on Thin-Walled Part Quality By Milling," *MM Sci. J.*, vol. 2013, no. 02, pp. 415–

- 418, 2013, doi: 10.17973/mmsj.2013_06_201306.
- [50] I. Buransky, M. Bracik, V. Simna, and T. Vopat, "Influence of end mill variable pitch on surface quality of aluminium thin-walled parts," *MM Sci. J.*, vol. 2018, no. November, pp. 2552–2557, 2018, doi: 10.17973/MMSJ.2018_11_201827.
- [51] I. Buranský, M. Bračík, and V. Šimna, "Influence of End Mill Helix Angle on Surface Quality of Aluminium Thin-Walled Parts," *Res. Pap. Fac. Mater. Sci. Technol. Slovak Univ. Technol.*, vol. 26, no. 42, pp. 177–188, 2018, doi: 10.2478/rput-2018-0022.
- [52] V. Hain and M. Ganobjak, "Návrh rekonštrukcie chýbajúcej gotickej fiály, Dóm sv. Martina v Bratislave," 27.8.2020, 2012. [Online]. Available: <https://ganobjakm.wixsite.com/draft1/rekontrukcia-fily>.
- [53] V. Kolesnyk *et al.*, "Experimental Study of Drilling Temperature, Geometrical Errors and Thermal Expansion of Drill on Hole Accuracy When Drilling CFRP/Ti Alloy Stacks," *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 14, p. 3232, Jul. 2020, doi: 10.3390/ma13143232.

Autori: doc. Ing. Ivan Buranský, PhD., doc. Ing. Ladislav Morovič, PhD.

Názov: ATELIÉR POČÍTAČOVEJ PODPORY NÁVRHU A VÝROBY III
Reverzné inžinierstvo a reverzné geometrické modelovanie

COMPUTER AIDED DESIGN AND MANUFACTURING STUDIO III
REVERSE ENGINEERING AND REVERSE GEOMETRIC MODELLING

Miesto vydania: Trnava
Vydavateľ: Materiálovotechnologická fakulta STU, Vydavateľstvo AlumniPress
Rok vydania: 2021
Vydanie: prvé
Rozsah : 93 strán (6,379 AH, počet obrázkov: 86, tabuliek:1)
Edičné číslo: 9 AP/2021

ISBN 978-80-8096-289-0
EAN 9788080962890