TECHNICKÁ UNIVERZITA V KOŠICIACH STROJNÍCKA FAKULTA



MODELOVANIE PROTETICKÝCH A ORTOTICKÝCH PROSTRIEDKOV

Branko ŠTEFANOVIČ Jozef ŽIVČÁK

EDÍCIA ŠTUDIJNEJ LITERATÚRY KOŠICE 2024 TECHNICKÁ UNIVERZITA V KOŠICIACH

STROJNÍCKA FAKULTA

Modelovanie protetických a ortotických prostriedkov

Košice 2024

Tieto skriptá boli vypracované na základe podpory Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe Zmluvy č. APVV-22-0340 a za spolupráce projektu KEGA 044TUKE-4/2022 - Implementácia progresívnych technológií do vzdelávania v oblasti technickej ortopédie a podporu integrácie s praxou.

Ing. Branko ŠTEFANOVIČ, PhD.

Technická univerzita v Košiciach Strojnícka fakulta Katedra biomedicínskeho inžinierstva a merania

Dr. h. c. mult. prof. Ing. Jozef ŽIVČÁK, DrSc., MPH

Akademik UčSS Technická univerzita v Košiciach Strojnícka fakulta Katedra biomedicínskeho inžinierstva a merania

Recenzenti:

prof. Ing. Ivan Virgala, PhD.

doc. Ing. Jaroslav Majerník, PhD.

© Branko ŠTEFANOVIČ Jozef ŽIVČÁK

Predhovor autorov

Predkladané skriptá sú zamerané na využitie moderných technológií ako je 3D skenovanie a CAD (Computer Aided Design) modelovanie pri návrhu protetických a ortotických prostriedkov a zariadení. V dnešnej dobe je vo svete využívanie týchto technológií a postupov veľmi populárne, no počiatočné náklady na modernizáciu výroby v pracoviskách technickej ortopédie sa môžu zdať byť príliš vysoké. To môže byť pre ortopedického technika odradzujúce, čo má za následok zamietnutie inovatívnych metód návrhu protetických pomôcok a ich výroby. Z toho dôvodu sa v daných návodoch používajú výhradne voľne stiahnuteľné softvéry na návrh protéz a ortéz, ktoré je možné vyrábať aj pomocou nízko nákladových stolových 3D tlačiarní na plast.

Skriptá sa zaoberajú získavaniu a úpravou modelov 3D skenov oblasti hlavy a horných končatín ako podkladov na návrh protetických a ortotických zariadení a samotným dizajnom a prípravou na 3D tlač daných pomôcok vo voľne dostupných CAD softvéroch.

Skriptá sú primárne určené pre študentov 3. ročníka prvého stupňa štúdia na Strojníckej fakulte, Technickej univerzity v Košiciach v programe "Protetika a ortotika" ako učebný materiál, ale poskytujú aj návody a rady užitočné pre pracoviská technickej ortopédie a oblasti biomedicínskeho inžinierstva a iným medicínskym a technických vedným odborom ako aj vývojovým pracoviskám.

Autori

OBSAH

Zoznam obrázkov			5
1	1 Využitie CAD/CAM technológií v protetike a ortotike		
2	3D s	keny a práca s dátami	11
	2.1	Skenovanie ruky a predlaktia	11
	2.2	Skenovanie hlavy	12
	2.3	Artec Studio 13 Professional	13
	2.4	Meshmixer	13
3	CAD	návrh individuálnej ortézy palca	15
4	CAD	návrh individuálnej protézy palca	24
5	CAD	návrh individuálnej ortézy ruky a predlaktia	33
6	CAD	návrh individuálnej maxillo-faciálnej masky	40
	6.1	Popáleninová ortotická maska	40
	6.2	Ochranná ortotická maska	46
7 CAD návrh individuálneho protetického lôžka		52	
	7.1	Tvorba transtibiálneho 3D pozitívu	52
	7.2	Návrh transtibiálneho podtlakového CAD lôžka	56
	7.3	Návrh transtibiálneho CAD lôžka s Pin-lock systémom	60
8	Príp	rava CAD modelov na aditívnu výrobu	64
9	9 Použitá literatúra		

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1 Sken ruky a predlaktia	. 12
Obr. 2 Skeny hláv (mužská, ženská)	. 12
Obr. 3 Rozhranie softvéru Meshmixer (1 – Select-Edit, 2 – Select-Convert, 3 – Select-Deform, 4	l —
Select-Modify, 5 – Scuplt-Brushes, 6 – Edit, 7 – Analysis)	.14
Obr. 4 Počet trojuholníkov 3D modelu	. 15
Obr. 5 Funkcia Reduce	. 15
Obr. 6 Funkcia Plane cut	.16
Obr. 7 Wireframe 3D modelu	.16
Obr. 8 Vyhladenie povrchu pozitívu s detailom na oblasť palca	. 17
Obr. 9 Finálny pozitív na návrh ortézy palca	. 17
Obr. 10 Náčrt kontaktnej plochy ortézy palca	. 18
Obr. 11 Vyhladzovanie okraju ortézy palca	.18
Obr. 12 Funkcia Extract.	. 19
Obr. 13 Separovanie škrupiny ortézy a aktivácia sieti trojuholníkov	. 19
Obr. 14 Zväčšovanie hustoty trojuholníkov na okrajoch škrupiny ortézy	. 20
Obr. 15 Znižovanie hustoty trojuholníkov na okrajoch škrupiny ortézy	.20
Obr. 16 Aplikácia vzoru na škrupinu ortézy	.21
Obr. 17 CAD model spony	.21
Obr. 18 Aplikácia CAD modelov spôn na 3D model ortézy palca	.22
Obr. 19 Proces spájania 3D modelov spôn a ortézy palca	.23
Obr. 20 Finálny model ortézy palca	.23
Obr. 21 Úprava 3D modelu skenu pomocou funkcie Plane cut	.24
Obr. 22 Funkcia Mirror	. 25
Obr. 23 Simulovanie deformity na 3D skene ruky	. 25
Obr. 24 Finálne pozitívy na návrh protézy palca	.26
Obr. 25 Náčrt plochy lôžka protézy	.26
Obr. 26 Extrahovanie kontaktnej plochy lôžka protézy	. 27
Obr. 27 Úprava hustoty trojuholníkov plochy (A – mediálna strana, B – laterálna strana)	.27
Obr. 28 Aplikácia vzoru a generovanie lôžka protézy palca	.28
Obr. 29 Separovanie plochy palca	.28
Obr. 30 Zrkadlenie plochy palca	. 29
Obr. 31 Polohovanie škrupiny palca voči lôžku protézy	. 29
Obr. 32 Vytvorenie prepojenia medzi škrupinou palca a 3D modelom lôžka protézy	. 30
Obr. 33 Polohovanie modelov spôn na lôžko protézy palca	.31
Obr. 34 Proces spájania 3D modelov spôn a protézy palca	.31
Obr. 35 Finálny model protézy palca	.32
Obr. 36 Redukcia počtu trojuholníkov	.33
Obr. 37 Odstránenie nepotrebných plôch pomocou funkcie Plane cut	.33
Obr. 38 Aktivovanie Wireframe a kontrola povrchu modelu 3D skenu	.34
Obr. 39 Vyhladenie povrchu pomocou nástrojov vo funkcii Sculpt	.34
Obr. 40 Finálny pozitív na návrh ortézy ruky a predlaktia	.35
Obr. 41 Náčrt hrany kontaktnej plochy ortézy	.35
Obr. 42 Vyfarbenie kontaktnej plochy ortézy	.36

Obr. 43 Vyhladenie hrany kontaktnej plochy ortézy.	. 36
Obr. 44 Extrahovanie kontaktného povrchu ortézy a separácia modelov	. 37
Obr. 45 Úprava počtu trojuholníkov na škrupine ortézy.	. 37
Obr. 46 Aplikácia vzoru na škrupinu ortézy.	. 38
Obr. 47 Model ortézy ruky a predlaktia s individuálnym dizajnom	. 38
Obr. 48 Polohovanie a spájanie modelov spôn na ortézu ruky a predlaktia	. 39
Obr. 49 Finálny model ortézy ruky a predlaktia	. 39
Obr. 50 Odstránenie nepotrebných povrchov pomocou funkcie Plane cut	. 40
Obr. 51 Odstránenie nepotrebných povrchov pomocou funkcie Select – Delete	. 40
Obr. 52 Aktivácia Wireframe a redukcia počtu trojuholníkov	. 41
Obr. 53 Vyhladzovanie povrchu modelu 3D skenu tváre	. 41
Obr. 54 Náčrt kontaktnej plochy popáleninovej masky	. 42
Obr. 55 Tvorba kópie povrchu popáleninovej masky.	. 43
Obr. 56 Oddelenie škrupiny masky a tvorba 3D modelu masky	. 43
Obr. 57 Vyhladenie okraju popáleninovej masky	. 44
Obr. 58 Polohovanie spôn na modely popáleninovej masky	. 44
Obr. 59 Spájanie modelov spôn s modelom popáleninovej masky	. 45
Obr. 60 Finálny model popáleninovej masky	. 45
Obr. 61 Úprava oblasti nosa pomocou nástrojov vo funkcii Sculpt	. 46
Obr. 62 Finálny pozitív na tvorbu ochrannej ortotickej masky	. 47
Obr. 63 Náčrt kontaktnej plochy ochrannej masky.	. 48
Obr. 64 Vytvorenie škrupiny pomocou funkcie Extract	. 48
Obr. 65 Nastavenie hrúbky ortézy pomocou funkcie Extrude	. 49
Obr. 66 Separácia 3D modelu masky	. 49
Obr. 67 Vyhladenie okraju ochrannej masky	. 50
Obr. 68 Polohovanie spôn na modely ochrannej masky.	. 50
Obr. 69 Spájanie modelov spôn s modelom ochrannej masky	. 51
Obr. 70 Finálny model ochrannej ortotickej masky	. 51
Obr. 71 Proces úpravy povrchu transtibiálneho 3D pozitívu	. 53
Obr. 72 Proces globálnej kompresie transtibiálneho 3D pozitívu.	. 53
Obr. 73 Proces separácie distálneho konca transtibiálneho 3D pozitívu.	. 54
Obr. 74 Proces lokálnej kompresie distálneho konca transtibiálneho 3D pozitívu.	. 55
Obr. 75 Aplikácia zaťažiteľných a nezaťažiteľných miest na transtibiálnom 3D pozitíve	. 56
Obr. 76 Náčrt kontaktného povrchu transtibiálneho CAD lôžka	. 57
Obr. 77 Tvorba 3D modelu transtibiálneho CAD lôžka	. 58
Obr. 78 Aplikácia otvoru na jednocestný ventil	. 59
Obr. 79 Finálny 3D model transtibiálneho podtlakového CAD lôžka	. 59
Obr. 80 Model adaptéru pin-lock systému	. 60
Obr. 81 Úprava modelu adaptéru a jeho polohovanie voči modelu lôžka	. 61
Obr. 82 Vytvorenie prepojenia medzi modelmi adaptéra a transtibiálneho lôžka	. 62
Obr. 83 Finálny 3D model transtibiálneho pin-lock CAD lôžka.	. 63
Obr. 84 Rozhranie softvéru PrusaSlicer.	. 64
Obr. 85 Importovanie 3D modelu do rozhranie softvéru.	. 65
Obr. 86 Rozhranie softvéru PrusaSlicer s importovaným 3D modelom	. 66
Obr. 87 Príklad možností nastavení v softvéri PrusaSlicer	. 67

Obr. 88 Polohovanie 3D modelu ortézy palca	69
Obr. 89 Polohovanie 3D modelu protézy palca	69
Obr. 90 Polohovanie 3D modelu ortézy ruky a predlaktia.	70
Obr. 91 Polohovanie 3D modelu maxillo-faciálnej ortotickej masky	71
Obr. 92 Polohovanie 3D modelu transtibiálneho protetického lôžka	71

1 VYUŽITIE CAD/CAM TECHNOLÓGIÍ V PROTETIKE A ORTOTIKE

Ortéza, alebo ortotická pomôcka, je pomôcka aplikovaná na telo, ktorá nahrádza stratenú funkciu pohybového aparátu alebo pomáha obnoviť stratenú alebo poškodenú funkciu, stabilizovať alebo znehybniť časť tela, korigovať správne postavenie, slúžiť ako prevencia deformácií, chrániť proti zraneniu alebo pomáha pri vykonávaní pohybov.[1]

Ortézy sa používajú na:

1. korekciu alebo správne polohovanie segmentu končatín, aby sa posilnil dobrovoľný pohyb končatín a zlepšila sa tak ich funkcia;

2. minimalizovanie vplyvu abnormálneho spôsobu držania tela a pohybu;

3. zlepšenie komfortu a bezpečnosti pri samoobslužných činnostiach, práci alebo voľnočasových aktivitách;

4. podporovanie rehabilitácie a minimalizovanie rizika rozvoja kontraktúr a ďalších sekundárnych muskuloskeletálnych následkov (najmä u rastúcich detí);

5. chránenie končatiny po ortopedickej operácii vykonanej s cieľom nápravy deformácie alebo nestability;

6. zlepšenie rehabilitácie po farmakologickom zásahu botulín toxínu;

7. poskytnutie alternatívnej metódy mobility.[2]

Inovácia technologického procesu výroby ortézy pri využívaní moderných technológií môže spočívať vo fáze zberu merných podkladov a následnej konvenčnej výrobe alebo pri modernizácii celého procesu odoberania mier, návrhu ortotickej pomôcky a jej výroby. Inovácia technologického procesu zberu údajov spočíva v použití 3D skenovania a počítačového spracovania naskenovaných dát do 3D modelu, ktoré nahradia ručné odoberanie mier a získavanie sadrového pozitívu (podkladu) a na samotnú výrobu pomôcky sa použije subtraktívna alebo aditívna metóda výroby pozitívu. Týmto spôsobom sa získa tzv. digitálny pozitív buď pre ťahanie vysokoteplotných termoplastov, alebo pre nasledujúci proces laminácie (konvenčná výroba). Inovácia procesu výroby ortézy spočíva aj v digitálnom CAD (Computer Aided Design) návrhu individuálnej ortézy v príslušnom softvéri, ktorá sa vyrába pomocou aditívnych technológií.[3,4,5]

Moderný prístup k vytváraniu ortotických zariadení začína digitalizáciou ľudského tela a jeho častí s cieľom získať vstupné údaje z tela pacienta pre potreby modelovania ortopedického zariadenia v CAD softvéri, a následnej finálnej výrobe. Táto inovatívna metóda v rukách odborníkov nahrádza nepríjemné a časovo náročné sadrovanie. Vďaka tomuto technologickému procesu je možné dosiahnuť vyššiu presnosť, rýchlosť výroby

zariadenia, novú úroveň pohodlia pre pacienta a funkčnosť v oblasti ortotiky a protetiky. Na zber údajov sa používa technika 3D skenovania. Získané dáta sú spracované počítačovým softvérom, ktorý vytvára trojrozmerný obraz modelu, kde môže technik vykonať korekcie, aby vytvoril finálny model pozitívu. Softvérové nástroje umožňujú odborníkovi použiť širokú škálu nástrojov na úpravu vrátane natočení, rotácií, zmeny mierky, vyrovnania a pridania tlakov alebo odľahčení.[4]

Digitalizácia prináša do systému technickej ortopédie lepšiu kontrolu nad vytvorením ortotického zariadenia a zároveň rešpektuje "know-how" tradičného spôsob výroby a tvorivosť ortopedického technika.

Digitalizácia vo všeobecnosti umožňuje:

- bezkontaktné, okamžité a pohodlné získavanie merných údajov prostredníctvom 3D skeneru,
- 2. úpravu modelu pomocou CAD softvéru,
- 3. výrobu finálneho 3D modelu zariadenia pomocou inovatívnych metód a technológií.

Väčšina softvérov používaných na návrh ortopedických pomôcok využíva funkcie ako napr. šablóny a makra (vopred nastavené sekvencie úprav) dizajnu vybranej ortézy, ktoré ďalej urýchľujú modelovacie práce a zaisťujú konzistentnosť. Ďalšie funkcie sa zameriavajú na dizajn výsledného zariadenia, nielen na jeho pozitív. Dáta sa exportujú do zariadenia CAM, ktorí sa používa na výrobu upraveného pozitívu, ktorý sa následne použije na výrobu ortézy. Tvorba digitálnych modelov prináša aj ďalšie možnosti, ako analýzu možných problémov, ktoré môžu vzniknúť v dôsledku dizajnu, výberu materiálu a v súvislosti s výrobným procesom. Virtuálny model ortotického zariadenia v príslušnom formáte teda zahŕňa nielen samotný model pomôcky, ale aj parametre výrobného procesu a voľbu materiálu.[4]

Všeobecnou črtou metódy aditívnej výroby (Additive Manufacturing - AM), taktiež nazývanou ako 3D tlač, je, že výroba sa neuskutočňuje odoberaním materiálu ako pri frézovaní, ale pomocou postupne pridávaného materiálu, ktorý je vo forme prášku, granulátu, alebo filamentu v tenkých vrstvách, ktoré sú voči sebe spájané prostredníctvom tepla. Základným princípom 3D tlače je počítačová interpretácia objektu, ktorá slúži ako priamy vstup do 3D tlačiarne a vytvára požadovaný fyzický objekt bez špeciálneho náradia. Vďaka AM je možné vyrábať tvarovo komplikované výrobky, ktoré sa bežnými technológiami nedajú vyrobiť, alebo, vzhľadom na ich komplikovaný dizajn, by boli finančné náklady na ich výrobu boli príliš vysoké. Ďalšími výhodami je výroba bez použitia foriem a nástrojov a možnosť výroby z náročných, vysokoteplotných materiálov. Ortézy vyrobené pomocou aditívnych technológií si vyžadujú postprocesing, ktorý zväčša pozostáva z povrchovej úpravy (drsnosť, vzhľad, leštenie, lakovanie, maľba atď.), ktorá sa líši v závislosti od použitej technológie a požiadaviek užívateľa.[1,6]

Mohammed a kol. [7] uviedli, že metóda 3D skenovania pozitívov a návrh CAD ortéz je rýchlejšia, neinvazívna a poskytuje vyššiu presnosť reprodukcie. Na druhej strane ale 3D tlačená ortéza vyžaduje dlhší čas na výrobu, ktorý je však stále prijateľný, ale menej ako je žiaduci, pokiaľ ide o potrebu ďalšej návštevy pacienta. Nevýhodou dlhšieho času výroby sa zaoberajú aj Buonamici a kol. [8], navrhujú však prijatie moderných metód kvôli výhodám, ktoré poskytujú, ako napríklad hmotnosť, pohodlie, priedušnosť a možnosť umývania imobilizovaného segmentu. Barios-Muriel a kol. [9], Fitzpatrick a kol. [10] a Chen a kol. [11] tiež podporujú túto teóriu. Li a kol. [12] navrhli metódu návrhu ortézy, ktorá skracuje trvanie fázy modelovania a výroby pomocou viacerých 3D tlačiarní na výrobu jednotlivých častí ortézy. Pri porovnaní výrobných nákladov na ortézy palca vyrobené inovatívnymi metódami alebo konvenčne sa v analýze, ktorú vykonali Fernandez-Vincente a kol. [13], udáva, že v porovnaní s tradičným spôsobom výroby je cena znížená o polovicu. Pri výrobe väčších ortotických zariadení Redaelli a kol. [14] uviedli, že výroba korzetov pomocou 3D tlače môže poskytnúť alternatívu k súčasným metódam výroby. Celková doba výroby od počiatočného skenovania po dodanie pacientovi trvala približne celý pracovný deň, podobne ako to vyžaduje proces tvarovania za tepla. Celkový počet normohodín sa však znižuje z dôvodu minimálneho dohľadu pri 3D tlači. Cena takého korzetu je preto konkurenčná v porovnaní s výrobnými nákladmi na tepelne tvarovaný korzet a ten sa zvyčajne pohybuje od 250 do 500 eur. Tiež Hale a kol. [15] zistili, že doba od skenovania po dodanie individuálnej krčnej ortézy, ktorej výroba tradičným spôsobom trvá približne 6 týždňov, bola približne 72 hodín a výrobné náklady oboch metód sú porovnateľné.

Tieto fakty potvrdzujú praktické uplatnenie moderných metód pri výrobe protetických a ortotických zariadení.

2 3D SKENY A PRÁCA S DÁTAMI

Pri vytváraní individuálnych protetických a ortotických pomôcok je v prvom kroku nutné získať tvar pozitívu, poprípade somatometrické údaje subjektu (dĺžky, obvody, atď.). Tradičný spôsob odoberania mier pomocou ručných meradiel a získavania pozitívu segmentu tela sadrovaním sa zamení za inovatívnu metódu 3D skenovania. Pomocou technológie 3D skenovania získavame presnú kópiu segmentu tela vo forme 3D modelu (v mierke 1:1), ktorý sa následne použije pri navrhovaní individuálnych pomôcok.

Na získavanie pozitívov sa použije ručný 3D skener Artec Eva (Artec 3D, Luxemburg, Luxembursko). Rozlíšenie zariadenia je vhodné na využitie v oblasti protetiky a ortotiky a obsluha tohto zariadenia je jednoduchá a intuitívna. Snímaný subjekt je zaznamenávaný v reálnom čase v softvéri Artec Studio 13 Professional (Artec 3D, Luxemburg, Luxembursko). Subjekt je preto pri skenovaní zobrazovaný vo farebnej škále, ktorá slúži na kontrolu dodržania vhodnej vzdialenosti od skenovaného subjektu, teda či sa treba vzdialiť (červená) alebo priblížiť sa (modrá). Ideálna vzdialenosť skeneru od subjektu pre získanie kvalitného skenu je približne 40cm (zelená). Frekvencia skenovania je nastaviteľná (1 až 16 fps). Vzhľadom na to, že sa dáta budú používať na navrhovanie protetických pomôcok, je ideálne skenovať s čo najnižšou frekvenciou (minimálne 3 fps), aby sa predišlo náhodným chybám počas skenovania a znížil sa objem získaných dát. Nevýhodou je, že uvedený skener je pripojený ku PC káblom. Okolo snímaného subjektu sa teda odporúča mať voľný priestor pre pohyb a manipuláciu so skenerom. Je vhodné vykonať skenovanie oblasti záujmu na 1. pokus, čím sa odstráni náhodná povrchová deformácia 3D modelu pri následnom spájaní viacerých skenov. Pre začiatočníkov sa neodporúča prerušovať skenovanie (pauzou alebo detekciou chyby), aby sa predišlo manuálnemu spájaniu skenov v softvéri, kedy by mohlo dôjsť ku chybnému zarovnaniu skenov.

Počas týchto cvičení sa budú navrhovať pomôcky aplikovateľné na oblasť hlavy a hornej končatiny a to konkrétne ortéza palca, protéza palca, maxillo-faciálna maska a ortéza ruky a predlaktia.

2.1 Skenovanie ruky a predlaktia

Pre získanie vhodného skenu je dôležité polohovanie. Aby sa skenovanie nemuselo vykonávať viackrát, bude daný segment polohovaný tak, aby jeho 3D model bol vhodný na návrh ortézy palca, protézy palca aj ortézy ruky a predlaktia. Skenovaná je ruka a predlaktie subjektu, pričom celá horná končatina je v abdukcii s 30° rotáciou v ramennom kĺbe a 100° flexiou v lakťovom kĺbe, palcom v opozícii k prstom a zápästím v extenzii 10° až 20°, pričom lakeť je položený na stole pre lepšiu oporu. Počas skenovanie je dôležité, aby os skenovacieho lúča dopadala kolmo na skenovaný povrch. Skenerom je nutné pohybovať v rozsahu 360° okolo predlaktia a pri skenovaní ruky je potrebné klásť dôraz

na dorzálnu aj palmárnu stranu, aby sa detailne zachytila oblasť palca. Nie je ale potrebné, aby prsty boli detailne nasnímané, keďže sa s ich modelmi nebude pracovať (Obr. 1).



Obr. 1 Sken ruky a predlaktia.

2.2 SKENOVANIE HLAVY

Ďalšia ortéza, konkrétne maxillo-faciálna maska, bude navrhovaná podľa získaného 3D modelu hlavy subjektu (Obr. 2). Pri skenovaní je dôležité sa sústrediť hlavne na oblasť tváre. Je dôležité získať čistý sken s detailom na nos, hornú peru, líca, očnicové oblúky, čelo a spánkovú oblasť. Hlavné je odstrániť všetky predmety z oblasti tváre (okuliare) a vlasy, ktoré zakrývajú dôležité črty, potrebné na zachytenie. Subjekt počas skenovania udržiava hlavu vo Frankfurtskej horizontále. Skenerom je nutné pohybovať po myslenej kružnici vo frontálnej rovine približne 40cm od tváre. Odporúča sa klopiť skener, aby sa nasnímali povrchy aj v normálne zatienených oblastiach tváre.



Obr. 2 Skeny hláv (mužská, ženská).

2.3 ARTEC STUDIO 13 PROFESSIONAL

Po ukončení procesu skenovania sa dáta nahrané do softvéru Artec Studio upravujú pomocou dostupných softvérových nástrojov určených na spracovanie 3D modelu. Prvým krokom je v kolónke Editor zvoliť funkciu Eraser. Pomocou nej sa odstránia nepotrebné oblasti modelu a iné nežiadúce artefakty, ktoré skener zaznamenal. Po vyčistení skenu sa zvolí funkcia Autopilot, ktorá automaticky spracuje upravené dáta a vygeneruje finálny 3D model skenovaného segmentu. Tieto modely budú ďalej slúžiť ako pozitívy na návrh individuálnych protetických a ortotických pomôcok. Všetky modely je potrebné uložiť vo formáte STL (Standard Triangle Language).

2.4 MESHMIXER

Na postprocesing modelov 3D skenov a vytvorenie digitálnych modelov protéz a ortéz bude použitý softvér Autodesk Meshmixer (Autodesk, Inc., San Rafael, CA, USA). Je to voľne dostupný modelovací softvér, v ktorom je možné vytvárať a upravovať 3D objekty a obsahuje funkcie vhodné na dizajn protetických a ortotických zariadení.

Rozhranie tohto softvéru je rozdelené na 2 základné časti: ľavá vertikálna lišta s funkciami a hlavné okno s pohľadom na virtuálny pracovný priestor (Obr. 3). Po zapnutí softvéru sa na pracovnom priestore zobrazí ponuka 6 počiatočných možností a to:

- Import (nahratie 3D modelu do rozhrania softvéru),
- Open (otvorenie existujúcej práce v softvéri),
- Keyboard Shortcuts (zoznam užitočných skratiek na klávesnici), •
- Import Bunny (nahratie 3D modelu králika do rozhrania softvéru),
- Import Sphere (nahratie 3D modelu gule do rozhrania softvéru), •
- Import Plane (nahratie 2D modelu roviny do rozhrania softvéru).

Výberom jednej z týchto možností sa aktivuje ľavá lišta s funkciami na generovanie, úpravu, alebo analýzu 3D modelu (Obr. 3). V ľavej lište sú funkcie:

- Import (nahratie nového, alebo ďalšieho 3D modelu do rozhrania softvéru),
- Meshmix (databáza 3D modelov uložených v softvéri),
- Select (obsahuje funkcie na označovanie povrchov a prácu s nimi), •
- Sculpt (obsahuje funkcie na manuálnu úpravu povrchov),
- Stamp (funkcia pečiatky), •
- Edit (obsahuje funkcie na automatizovanú úpravu povrchov),
- Analysis (obsahuje analytické funkcie na kvantitatívnu verifikáciu modelov).

Prostredníctvom tohto softvéru sa budú upravovať všetky 3D modely získaných skenov a vytvárať modely protetických a ortotických zariadení.



Obr. 3 Rozhranie softvéru Meshmixer (1 – Select-Edit, 2 – Select-Convert, 3 – Select-Deform, 4 – Select-Modify, 5 – Scuplt-Brushes, 6 – Edit, 7 – Analysis)

3 CAD NÁVRH INDIVIDUÁLNEJ ORTÉZY PALCA

Ortéza palca je vytváraná na individuálny 3D model skenu ruky a predlaktia. Pred tým než sa na daný model segmentu bude navrhovať akákoľvek ortéza je potrebné skontrolovať povrch a upraviť model do ideálnej podoby. V prvom kroku je potrebné zistiť počet trojuholníkov modelu skenu. Každý model skenu vo formáte STL (Standard Triangel Language) sa skladá zo siete trojuholníkov, ktoré tvoria povrch modelu. Počet trojuholníkov ovplyvňuje povrchovú presnosť modelu. Čím je počet vyšší, tým je model detailnejší a tým sa aj zvyšuje veľkosť súboru. Tento počet je daný v pravom dolnom rohu rozhrania softvéru (Obr. 4).



Obr. 4 Počet trojuholníkov 3D modelu.

V danom prípade je počet trojuholníkov príliš vysoký, keďže model je určený na tvorbu ortotickej pomôcky a tým pádom nemusí byť tak detailný. Pomocou funkcie *Select* sa označí model a následne funkciami *Edit – Reduce* sa aktivuje proces, v ktorom sa redukcia nastaví na 95% (Obr. 5). Tým sa výrazne zníži počet trojuholníkov, čím sa zníži aj veľkosť súboru a práca s modelom je rýchlejšia a jednoduchšia.



Obr. 5 Funkcia Reduce.

V ďalšom kroku je potrebné odstrániť časti modelu, ktoré sú nepodstatné pre návrh danej pomôcky. V prípade navrhovania ortézy palca je oblasť proximálna od zápästia irelevantná a tým pádom môže byť odstránená. Na odstránenie danej časti modelu sa použije funkciu *Edit – Plane cut* a vytvorí sa priečny rez proximálne od zápästia 3D skenu. Typ rezu sa nastaví na *Cut (Discard half)* (Obr. 6).



Obr. 6 Funkcia Plane cut.

Po odstránení nepotrebných častí je vhodné skontrolovať povrch modelu 3D skenu, či oblasť záujmu neobsahuje deformity, alebo nežiadúce artefakty. Pre detailnejší pohľad na povrch je možné si aktivovať *Wireframe* v zložke *View* (Obr. 7).



Obr. 7 Wireframe 3D modelu.

Keďže sa model použije ako podklad na návrh ortézy palca je potrebné sa zamerať na oblasť palca a jeho MCP (metakarpo-falangeálneho) kĺbu. Po kontrole modelu 3D skenu je možné vidieť deformity v oblasti prstov, ale keďže sa návrh ortézy nevzťahuje na túto oblasť, je možné ich zanedbať. Na zjednodušenie tvaru virtuálneho pozitívu sa môže vyhladiť palmárna časť palca, dlaň a dorzálna strana ruky. Na vyhladenie povrchu sa použije funkcia *Sculpt* a v kolónke *Brushes* sa vyberie nástroj *ShrinkSmooth* (Obr. 8). Parametre tohto nástroja sa nastavujú podľa potreby.



Obr. 8 Vyhladenie povrchu pozitívu s detailom na oblasť palca.

Po finálnej kontrole 3D pozitívu a zhodnotení, že model je postačujúci na návrh ortotickej pomôcky sa môže prejsť na samotný návrh individuálnej ortézy palca (Obr. 9).



Obr. 9 Finálny pozitív na návrh ortézy palca.

Návrh individuálnej ortézy palca pozostáva z troch častí:

- Náčrt kontaktného povrchu ortézy,
- Vytvorenie škrupiny ortézy s vôľou ku povrchu pozitívu,
- Nastavenie hrúbky škrupiny ortézy a aplikácia vzorov.

V prvom kroku pri vytváraní ortézy v softvéri Meshmixer je potrebné načrtnúť kontaktnú plochu ortézy s jej hranicami na 3D pozitív. Ortéza ma fixovať palec s oblasťou jeho MCP kĺbu a lôžko ortézy má pokrývať oblasť dlane (Obr. 10). Fixácia ortézy je docielená pomocou popruhu so suchým zipsom na dorzálnej strane ruky. Tento popruh je aplikovaný na predom navrhnuté spony na danej strane lôžka ortézy. Na kreslenie sa používa funkcia *Select*, s nastavením módu štetca *SphereDisc Brush*. Po vyznačení hraníc ortézy sa plocha vyfarbí pomocou štetca, na ktorom sa vie nastaviť priemer jeho stopy v kolónke *Size*. Je veľmi dôležite dbať na to, aby kontaktná plocha ortézy bola plne vyfarbená, inač nebude možné aplikovať funkcie potrebné na vytvorenie ortézy.



Obr. 10 Náčrt kontaktnej plochy ortézy palca.

Na vyhladenie kostrbatého okraju ortézy sa použije funkcia *Modify – Optimize Boundary* a *Modify – Smooth Boundary* (Obr. 11). Nastavenia tejto funkcie sa môže nechať v predvolených hodnotách. Pri dodržaní tohto postupu sa získa kontaktná plocha ortézy.



Obr. 11 Vyhladzovanie okraju ortézy palca.

Po vytvorení náčrtu kontaktného povrchu ortézy je potrebné vytvoriť medzeru/vôľu medzi ortézou a pozitívom. Na to sa použije funkcia *Edit – Extract* (Obr. 12). Parameter tejto funkcie (*Offset*) sa nastavia na 1,5 mm a smer (*Direction*) sa nastaví na *Normal*. Pri tomto nastavení sa vytvorí škrupina ortézy s konštantnou vzdialenosťou od povrchu 3D pozitívu.



Obr. 12 Funkcia Extract.

Ďalším krokom je nastavenie hrúbky škrupiny ortézy a aplikácia vzorov. Pred tým, než sa na pomôcku aplikuje vzor, je dôležité zhodnotiť stav počtu trojuholníkov na modeli pomôcky. V kolónke *View* sa aktivuje *Show wireframe*, aby sa zviditeľnila sieť trojuholníkov, z ktorých sa model skladá (Obr. 13). Funkcia *Make pattern* pracuje s touto sieťou a finálny dizajn závisí od rozloženia a veľkosti trojuholníkov. Čím je sieť redšia, tým je priestor medzi jednotlivými prvkami väčší a naopak. Zároveň ale treba dávať pozor na to, aby sa povrch modelu neredukoval do takého stavu, v ktorom sa zdeformuje tvar kontaktnej plochy pomôcky.



Obr. 13 Separovanie škrupiny ortézy a aktivácia sieti trojuholníkov.

Keďže sa dizajn odvíja od veľkosti, počtu a rozmiestnenia trojuholníkov je potrebné hustotu zväčšiť na okrajoch modelov, aby sa po aplikácii vzoru zachovali hranice pomôcky.

Taktiež je dôležité zväčšiť hustotu trojuholníkov na miestach, kde budú neskôr aplikované spony na fixáciu popruhov. Okraje modelu sa upravia pomocou funkcie *Sculpt – Brushes – Refine*. Parametre tohto nástroja sa nastavia podľa potreby (Obr. 14).



Obr. 14 Zväčšovanie hustoty trojuholníkov na okrajoch škrupiny ortézy.

V ďalšom kroku je potrebné redukovať počet trojuholníkov na vnútornej ploche škrupiny ortézy do požadovaného stavu pomocou funkcie *Sculpt – Brushes – Reduce*. Parametre tohto nástroja sa nastavia podľa potreby (Obr. 15).





Aplikovanie vzoru sa vykoná pomocou funkcie *Edit – Make pattern*. Po aktivácii funkcie je potrebné zvoliť v typoch vzoru *Dual edges* a parametre funkcie nastaviť podľa potreby. V tomto prípade je *Element Dimensions* = 3 mm a *Element Spacing* = 1 mm (Obr. 16).



Obr. 16 Aplikácia vzoru na škrupinu ortézy.

Po aplikácii vzoru, čím sa získa 3D model ortézy palca, je potrebné doplniť tento model o spony, na ktoré bude aplikovaný popruh so suchým zipsom. Táto spona sa navrhne v softvéri SOLIDWORKS (Dassault Systemes, Waltham, USA), keďže softvér Meshmixer nie je určení na návrh parametrických modelov.

Najprv sa nakreslí obdĺžnik o rozmeroch 20x10 mm pomocou funkcie *Sketch – Corner Rectangle*. Aby sa dosiahol požadovaný tvar úchytu je potrebné vyrezať stred obdĺžnika. Tento stred obdĺžnika, ktorý je potrebné odstrániť sa bude nachádzať na spodnom okraji, vzdialený od bočnej steny 5 mm a s rozmermi 10x5 mm. Následne sa spodná nepotrebná čiara odstráni pomocou funkcie *Trim Entities* a tvar sa upraví zaoblením všetkých hrán pomocou funkcie *Sketch Fillet*. Hrany na vrchnom okraji sa zaoblia o polomere 4 mm a hrany na spodnej strane o polomere 1 mm. Vnútorné hrany sa nezaobľujú. Náčrt sa vytiahne do priestoru o 10 mm pomocou funkcie *Extrude Boss Base*. Na záver sa hrany tejto 3D súčiastky zaoblia pomocou funkcie *Features – Fillet* s polomerom 1 mm (Obr. 17).





Aby sa táto spona mohla aplikovať na danú ortotickú pomôcku, je potrebné ju uložiť vo formáte STL a následne ju importovať do softvéru Meshmixer, v ktorom je daná ortotická pomôcka navrhovaná. Spony v počte dvoch kusov je potrebné polohovať na

dorzálnu stranu ortézy, kde bude aplikovaný popruh so suchým zipsom. Polohovanie úchytov sa vykonáva pomocou funkcie *Edit – Transform* (Obr. 18). Počas polohovania úchytov je dôležité dávať pozor na to, aby model úchytu nezachádzal hlboko do modelu ortézy, čím by vyčnieval z kontaktného povrchu danej pomôcky. Po uložení prvej spony je vhodné použiť funkciu *Edit – Duplicate*, aby sa na totožnom mieste vytvorila kópia tohto modelu a následne, funkciou *Transform* polohovať duplikát na ďalšom mieste.



Obr. 18 Aplikácia CAD modelov spôn na 3D model ortézy palca.

Po polohovaní modelov spôn na modely ortézy je nutné všetky modely zjednotiť (Obr. 19). Jednotlivé modely sa označia kombináciou klávesníc *Shift* a *ľavom tlačidle myši* a následne sa pomocou funkcie *Edit – Combine* zjednotia. Tým sa ale vytvoria jednotlivé povrchové skupiny (*FaceGroups*), ktoré sú na modely vyznačené rôznymi farbami. Tieto skupiny označujú povrchy/plochy, ktoré boli pôvodne samostatné 3D modely. Na odstránenie daných skupín je nutné použiť funkciu *Select – Modify – Clear FaceGroup*. V poslednom kroku navrhovania pomôcky je nutné skontrolovať, či 3D model má nejaké chyby vo svojom dizajne. Na to sa aktivuje *Inspector* v kolónke *Analysis*. Ak má dizajn ortézy nejaké chyby, táto funkcia ich identifikuje a pomocou nej sa chyby odstránia.



Obr. 19 Proces spájania 3D modelov spôn a ortézy palca.

Po finálnej kontrole 3D modelu ortézy a zhodnotení, že model je vhodný na výrobu aktuálnej ortézy, je potrebné exportovať model do formátu STL a ten je možné importovať do softvéru 3D tlačiarne (Obr. 20).



Obr. 20 Finálny model ortézy palca.

4 CAD NÁVRH INDIVIDUÁLNEJ PROTÉZY PALCA

Protéza palca bude navrhovaná na individuálny 3D model skenu ruky a predlaktia. Pred tým je ale potrebné skontrolovať povrch a upraviť model do ideálnej podoby. V prvom kroku je potrebné zistiť počet trojuholníkov modelu skenu. Ak je model príliš veľký, je potrebné pomocou funkcie *Select* označiť model a následne funkciami *Edit – Reduce* aktivovať proces s redukciou nastavenou na 95%.

V ďalšom kroku je potrebné odstrániť časti modelu, ktoré sú nepodstatné pre návrh danej pomôcky. V prípade navrhovania protézy palca je oblasť proximálna od zápästia irelevantná a tým pádom môže byť odstránená. Na odstránenie danej časti modelu sa použije funkcia *Edit – Plane cut* a urobí sa priečny rez proximálne od zápästia 3D skenu. Typ rezu má byť nastavený na *Cut (Discard half)* (Obr. 21).



Obr. 21 Úprava 3D modelu skenu pomocou funkcie Plane cut.

Keďže sa 3D model skenu bude používať ako pozitív pre návrh protézy palca, je potrebné nasimulovať reálnu situáciu, kde subjekt ma amputáciu palca. Z toho dôvodu je potrebné vytvoriť model s amputáciou v oblasti MCP kĺbu palca a vytvoriť taktiež odzrkadlenú kópiu modelu, ktorá bude reprezentovať zdravú končatinu subjektu. Na tomto odzrkadlenom modely bude použitá oblasť palca ako podklad na vytvorenie protézy. Odzrkadlený model je možné vytvoriť pomocou funkcie *Edit – Mirror*. Po aktivácii funkcie je nutné posúvať osi zrkadlenia do dostatočnej vzdialenosti na to, aby vzniklo odzrkadlenie celého modelu (Obr. 22).



Obr. 22 Funkcia Mirror.

Na pôvodnom modely je nutné pomocou *Select* vyznačiť povrch, ktorý bude odstránený a pomocou funkcie *Edit – Erase and Fill* sa táto časť modelu odstráni a vzniknutá diera sa automaticky zacelí. Parametre tejto funkcie môžu ostať v pôvodných nastaveniach, no hlavne *Fill Type* musí byť nastavený na *Smooth MVC*. Týmto spôsobom vznikne kýpeť, na ktorý bude navrhované lôžko protézy palca (Obr. 23).



Obr. 23 Simulovanie deformity na 3D skene ruky.

Po finálnej kontrole 3D modelov a zhodnotení, že model je postačujúci na návrh ortotickej pomôcky sa môže prejsť na samotný návrh individuálnej protézy palca (Obr. 24).



Obr. 24 Finálne pozitívy na návrh protézy palca.

Návrh individuálnej protézy palca [16] pozostáva z troch častí:

- Náčrt a tvorba plochy lôžka protézy s vôľou ku povrchu 3D skenu,
- Odzrkadlenie oblasti palca zdravej končatiny na reziduálnu,
- Spájanie modelu palca s modelom kýpťa,
- Generovanie individuálneho 3D modelu protézy.

V prvom kroku je nutné na skene reziduálnej končatiny vyznačiť a extrahovať kontaktnú plochu lôžka protézy. Lôžko protézy musí obopínať oblasť MCP kĺbu palca a časť dorzálnej strany ruky. Plocha sa vyznačí pomocou funkcie *Select* a okraj plochy sa vyhladí funkciou *Modify* – *Optimize Boundary* a *Smooth Boundary* (Obr. 25).



Obr. 25 Náčrt plochy lôžka protézy.

Táto plocha sa následne extrahuje pomocou funkcie *Edit – Extract,* kde parameter funkcie *Offset* sa nastaví na 1,5 mm a *Direction* na *Normal* (Obr. 26). Vytvorená škrupina lôžka protézy sa oddelí od pozitívu pomocou funkcie *Select – Edit – Separate*.



Obr. 26 Extrahovanie kontaktnej plochy lôžka protézy.

Ďalším krokom je nastavenie hrúbky lôžka protézy a aplikácia vzoru. V kolónke *View* sa aktivuje *Show wireframe*, aby sa zviditeľnila sieť trojuholníkov, z ktorých sa model skladá. Je potrebné hustotu trojuholníkov zväčšiť na okrajoch modelov, aby sa po aplikácii vzoru zachovali hranice lôžka protézy (Obr. 27). Taktiež je dôležité zväčšiť hustotu trojuholníkov na miestach, kde budú neskôr aplikované spony na fixáciu popruhov a na mieste, kde bude polohovaný umelý palec. Okraje modelu sa upravia pomocou funkcie *Sculpt – Brushes – Refine*. Parametre tohto nástroja sa nastavia podľa potreby. V ďalšom kroku je potrebné redukovať počet trojuholníkov na vnútornej ploche škrupiny ortézy do požadovaného stavu pomocou funkcie *Sculpt – Brushes – Reduce*. Parametre tohto nástroja sa nastavia podľa potreby.



Obr. 27 Úprava hustoty trojuholníkov plochy (A – mediálna strana, B – laterálna strana).

Aplikovanie vzoru sa vykoná pomocou funkcie *Edit – Make pattern*. Po aktivácii funkcie je potrebné zvoliť v typoch vzoru *Dual edges* a parametre funkcie nastaviť podľa

potreby. V tomto prípade je *Element Dimensions* = 3 mm a *Element Spacing* = 1 mm (Obr. 28).



Obr. 28 Aplikácia vzoru a generovanie lôžka protézy palca.

V ďalšom kroku je nutné selektovať (funkcia *Select*) plochu palca a jeho MCP kĺbu na 3D skene zdravej končatiny. Následne sa táto plocha musí separovať od zvyšku modelu pomocou funkcie *Edit – Separate*. Po separácii nasleduje odzrkadlenie časti modelu. Vyznačí sa model odseparovanej oblasti palca a na odzrkadlenie sa použije funkcia *Edit – Mirror* (Obr. 29).



Obr. 29 Separovanie plochy palca.

Odzrkadlený model sa pomocou funkcie *Edit – Translate* prenesie na 3D model skenu reziduálnej končatiny. Presúvanie modelov sa vykonáva pomocou šípiek danej funkcie a smerovanie zrkadlenia sa nastavuje pomocou modrej šípky v sústave osí. Pri polohovaní odzrkadleného modelu je veľmi dôležité klásť dôraz na uhly, ktoré bude zvierať palec so zvyškom končatiny. Aby protéza palca slúžila ako oporný bod ruky, je nutné ju

polohovať v opozícii ku prstom. Po presune oblasti palca z modelu zdravej končatiny sa môže tento model odstrániť pomocou funkcie *Select a klávesou Delete*, alebo schovať v tabuľke *Object Browser* po separácii modelov prostredníctvom *Select – Edit – Separate* (Obr. 30).



Obr. 30 Zrkadlenie plochy palca.

Následne je potrebné spojiť škrupinu modelu palca s 3D modelom lôžka protézy (Obr. 31). V prvom kroku sa odstrániť proximálny koniec plochy modelu palca, ktorá sa dotýka, alebo preniká do 3D modelu lôžka protézy. Plocha na 3D modely lôžka, na ktorou sa vznáša škrupina modelu palca sa taktiež odstráni. Odstránenie týchto častí modelov je nevyhnutné pre vytvorenie korektného prepojenia medzi oboma modelmi ako z hľadiska funkčnosti, tak aj dizajnu. Obe plochy sa označia pomocou funkcie *Select* a vymažú klávesnicou *Delete* alebo "*X*".



Obr. 31 Polohovanie škrupiny palca voči lôžku protézy.

V mieste medzi upravenými modelmi lôžka a palca sa musí vytvoriť prepojenie (Obr. 32). V prvom kroku sa označia oba modely a pomocou *Edit – Combine* sa zjednotia do 1

modelu. Ďalej funkciou *Select* sa označia obe hrany modelov, ktoré vznikli po odstránení nežiaducich povrchov. Na označenie sa použije funkcia *Select*, pričom je nevyhnutné, aby veľkosť nástroja *Size* bol nastavený na "O". Jedine s týmto parametrom je možné označiť dané hrany. S označenými oboma hranami sa aktivuje funkcia *Select – Edit – Join*, ktorá automaticky vygeneruje prepojenie medzi oboma hranami. Po vytvorení prepojenia je vhodné odstrániť vzniknuté povrchové skupiny *FaceGroups*, ktoré sa odstránia pomocou *Select – Modify – Clear FaceGroup*.



Obr. 32 Vytvorenie prepojenia medzi škrupinou palca a 3D modelom lôžka protézy.

Po aplikácii vzoru, čím sa získa 3D model ortézy palca, je potrebné doplniť tento model o spony, na ktoré bude aplikovaný popruh so suchým zipsom. Spony v počte dvoch kusov je potrebné polohovať na dorzálnu stranu ortézy, kde bude aplikovaný popruh so suchým zipsom. Polohovanie úchytov sa vykonáva pomocou funkcie *Edit – Transform* (Obr. 33). Počas polohovania úchytov je dôležité dávať pozor na to, aby model úchytu nezachádzal hlboko do modelu ortézy, čím by vyčnieval z kontaktného povrchu danej pomôcky. Po uložení prvej spony je vhodné použiť funkciu *Edit – Duplicate*, aby sa na totožnom mieste vytvorila kópia tohto modelu a následne, funkciou *Transform* polohovať duplikát na ďalšom mieste.



Obr. 33 Polohovanie modelov spôn na lôžko protézy palca.

Po polohovaní modelov spôn na modely ortézy je nutné všetky modely zjednotiť (Obr. 34). Jednotlivé modely sa označia kombináciou klávesníc Shift a ľavom tlačidle myši a následne sa pomocou funkcie Edit – Combine zjednotia. Tým sa ale vytvoria jednotlivé povrchové skupiny (FaceGroups), ktoré sú na modely vyznačené rôznymi farbami. Tieto skupiny označujú povrchy/plochy, ktoré boli pôvodne samostatné 3D modely. Na odstránenie daných skupín je nutné použiť funkciu Select – Modify – Clear FaceGroup. V poslednom kroku navrhovania pomôcky je nutné skontrolovať, či 3D model má nejaké chyby vo svojom dizajne. Na to sa aktivuje Inspector v kolónke Analysis. Ak má dizajn ortézy nejaké chyby, táto funkcia ich identifikuje a pomocou nej sa chyby odstránia.



Obr. 34 Proces spájania 3D modelov spôn a protézy palca.

Po finálnej kontrole 3D modelu protézy a zhodnotení, že model je vhodný na výrobu aktuálnej protézy, je potrebné exportovať model do formátu STL a ten je možné importovať do softvéru 3D tlačiarne (Obr. 35).



Obr. 35 Finálny model protézy palca.

5 CAD NÁVRH INDIVIDUÁLNEJ ORTÉZY RUKY A PREDLAKTIA

Ortéza ruky a predlaktia bude navrhovaná na individuálny 3D model skenu ruky a predlaktia. Pred tým je ale potrebné skontrolovať povrch a upraviť model do ideálnej podoby. V prvom kroku je potrebné zistiť počet trojuholníkov modelu skenu. Ak je model príliš veľký, je potrebné pomocou funkcie *Select* označiť model a následne funkciami *Edit* – *Reduce* aktivovať proces s redukciou nastavenou na 95 % (Obr. 36).



Obr. 36 Redukcia počtu trojuholníkov.

V ďalšom kroku je potrebné odstrániť časti modelu, ktoré sú nepodstatné pre návrh danej pomôcky. V prípade navrhovania danej ortézy je oblasť proximálna od lakťového kĺbu irelevantná a tým pádom môže byť odstránená. Na odstránenie danej časti modelu sa použije funkcia *Edit – Plane cut* a urobí sa priečny rez distálne od lakťového kĺbu 3D skenu. Typ rezu má byť nastavený na *Cut (Discard half)* (Obr. 37).



Obr. 37 Odstránenie nepotrebných plôch pomocou funkcie Plane cut.

Po odstránení nepotrebných častí je vhodné skontrolovať povrch modelu 3D skenu, či oblasť záujmu neobsahuje deformity, alebo nežiadúce artefakty. Pre detailnejší pohľad na povrch je možné si aktivovať *Wireframe* v zložke *View* (Obr. 38). Pri upravovaní pozitívu na danú pomôcku je dôležité nemeniť tvar oblasti predlaktia a zápästia, aby kontaktná plocha ortézy mala totožný tvar ako nominálna končatina.



Obr. 38 Aktivovanie Wireframe a kontrola povrchu modelu 3D skenu.

V tomto prípade je vhodné vyhladiť povrch v oblasti medzi palcom a ukazovákom, kde je zvlnená pokožka. Ak by ortéza presne kopírovala tento povrch, mohlo by to byť pre užívateľa nekomfortné. Na vyhladenie povrchu sa použije funkcia *Sculpt* a v kolónke *Brushes* sa vyberie nástroj *ShrinkSmooth* (Obr. 39). Parametre tohto nástroja sa nastavujú podľa potreby.



Obr. 39 Vyhladenie povrchu pomocou nástrojov vo funkcii Sculpt.

Po finálnej kontrole 3D pozitívu a zhodnotení, že model je postačujúci na návrh ortotickej pomôcky sa môže prejsť na samotný návrh individuálnej ortézy ruky a predlaktia (Obr. 40).



Obr. 40 Finálny pozitív na návrh ortézy ruky a predlaktia.

Návrh individuálnej CAD ortézy ruky a predlaktia pozostáva zo štyroch častí:

- 1. Náčrt kontaktného povrchu ortézy,
- 2. Vytvorenie škrupiny ortézy,
- 3. Nastavenie hrúbky škrupiny ortézy a aplikácia vzorov
- 4. Aplikácia CAD komponentov

V prvom kroku je potrebné načrtnúť kontaktnú plochu ortézy s jej hranicami na 3D pozitív. Na kreslenie sa použije funkcia *Select*, s nastavením módu štetca *SphereDisc Brush*. Ortéza ma na distálnom konci obopínať palec s oblasťou jeho MCP kĺbom a okraj ortézy má prechádzať proximálne od MCP kĺbov prstov na palmárnej strane. Na proximálnom konci ortézy má obopínať predlaktie, distálne od lakťovej kosti. Jej hranice sa načrtnú v osi predlaktia od proximálneho po distálny koniec ortézy na dorzálnej strane predlaktia. Medzi mediálnou a laterálnou hranicou sa vytvorí dostatočná vôľa pre aplikáciu na končatinu (Obr. 41).



Obr. 41 Náčrt hrany kontaktnej plochy ortézy.

Po vyznačení hraníc ortézy sa vyfarbí plocha pomocou štetca, na ktorom sa vie nastaviť priemer jeho stopy v kolónke *Size* (Obr. 42). Je veľmi dôležite dbať na to, aby
kontaktná plocha ortézy bola plne vyfarbená, inač nebude možné aplikovať funkcie potrebné na vytvorenie ortézy.



Obr. 42 Vyfarbenie kontaktnej plochy ortézy.

Na vyhladenie kostrbatej hrany ortézy sa použije funkcia *Modify – Optimize Boundary* a *Smooth Boundary* (Obr. 43). Parametre tejto funkcie (*Smoothness, Preserve Shape, Iterations*) sa nastavia na 100%. Pri dodržaní tohto postupu sa získa kontaktný povrch ortézy ruky a predlaktia.



Obr. 43 Vyhladenie hrany kontaktnej plochy ortézy.

V ďalšom kroku je nutné vytvoriť škrupinu ortézy. Po vytvorení náčrtu kontaktného povrchu ortézy je potrebné vytvoriť medzeru/vôľu medzi ortézou a pozitívom. Na to sa použije funkcia *Edit – Extract*. Parameter tejto funkcie *(Offset)* sa nastavia na 2 mm a smer *(Direction)* sa nastaví na *Normal*. Pri tomto nastavení sa vytvorí škrupina ortézy s konštantnou vzdialenosťou od povrchu 3D pozitívu. V tomto stave je model ortézy a model pozitívu chápaný softvérom ako jednotný model. Z toho dôvodu je potrebné použiť funkciu *Edit – Separate*, aby sa jednotlivé modely do seba oddelili (Obr. 44). Po oddelení modelov sa v rozhraní softvéru aktivuje tabuľka *Object Browser*, v ktorej je zoznam aktuálnych modelov v rozhraní softvéru.



Obr. 44 Extrahovanie kontaktného povrchu ortézy a separácia modelov.

Pred tým, než sa na pomôcku aplikuje vzor, je dôležité zhodnotiť stav počtu trojuholníkov na modeli pomôcky (Obr. 45). V kolónke *View* sa aktivuje *Show wireframe*, aby sa zviditeľnila sieť trojuholníkov, z ktorých sa model skladá. Funkcia *Make pattern* pracuje s touto sieťou a finálny dizajn závisí od rozloženia a veľkosti trojuholníkov. Čím je sieť redšia, tým je priestor medzi jednotlivými prvkami väčší a naopak. Zároveň ale treba dávať pozor na to, aby sa povrch modelu neredukoval do takého stavu, v ktorom sa zdeformuje tvar kontaktnej plochy pomôcky.



Obr. 45 Úprava počtu trojuholníkov na škrupine ortézy.

Keďže sa dizajn odvíja od veľkosti, počtu a rozmiestnenia trojuholníkov je potrebné hustotu zväčšiť na okrajoch modelov, aby sa po aplikácii vzoru zachovali hranice pomôcky.

Okraje modelu sa upravia pomocou funkcie *Sculpt – Brushes – Refine*. Parametre tohto nástroja sa nastavia podľa potrieb. V ďalšom kroku je potrebné redukovať počet trojuholníkov na vnútornej ploche škrupiny ortézy do požadovaného stavu pomocou funkcie *Sculpt – Brushes – Reduce*. Parametre tohto nástroja sa nastavia podľa potreby.

Aplikovanie vzoru sa vykoná pomocou funkcie *Edit – Make pattern*. Po aktivácii funkcie je potrebné zvoliť v typoch vzorov *Dual edges* a parametre funkcie nastaviť podľa potreby. V tomto prípade je *Element Dimensions* = 4 mm a *Element Spacing* = 0,2 mm (Obr. 46).



Obr. 46 Aplikácia vzoru na škrupinu ortézy.

Pri dodržaní daného postupu vznikne z navrhnutej škrupiny na mieru vytvorená 3D ortéza ruky a predlaktia s individuálnym dizajnom (Obr. 47).



Obr. 47 Model ortézy ruky a predlaktia s individuálnym dizajnom.

V tejto fáze je potrebné aplikovať spony, ktoré budú slúžiť na upevnenie ortotickej pomôcky na končatinu (Obr. 48). Sponu je potrebné polohovať na okraje na dorzálnej strane ortézy. Je vhodné umiestniť 3 spony na mediálnu aj na laterálnu stranu. Polohovanie spôn sa vykonáva pomocou funkcie *Edit – Transform*. Počas polohovania spôn je dôležité dávať pozor na to, aby model nezachádzal hlboko do modelu ortézy, čím

by vyčnieval z kontaktného povrchu danej pomôcky. Taktiež je dôležité polohovať model tak, aby bola deliaca čiara ortézy polohovaná na stred modelu spony. Po uložení prvého úchytu je vhodné použiť funkciu *Edit – Duplicate*, aby sa na totožnom mieste vytvorila kópia tohto modelu a následne, funkciou *Transform* polohovať duplikát na ďalšom mieste. Tento proces treba opakovať podľa potreby, teda podľa celkového plánovaného počtu úchytov na ortéze. Po polohovaní modelov spôn na modely ortézy je nutné všetky modely zjednotiť. Jednotlivé modely sa označia kombináciou klávesníc Shift a ľavom tlačidle myši a následne sa pomocou funkcie *Edit – Combine* zjednotia. Tým sa ale vytvoria jednotlivé povrchové skupiny (FaceGroups), ktoré sú na modely vyznačené rôznymi farbami. Na odstránenie daných skupín je nutné použiť funkciu *Select – Modify – Clear FaceGroup*.



Obr. 48 Polohovanie a spájanie modelov spôn na ortézu ruky a predlaktia.

V poslednom kroku navrhovania pomôcky je nutné skontrolovať, či 3D model má nejaké chyby vo svojom dizajne. Na to sa aktivuje *Inspector* v kolónke *Analysis*. Ak má dizajn ortézy nejaké chyby, táto funkcia ich identifikuje a pomocou nej sa chyby odstránia. Po finálnej kontrole 3D modelu ortézy a zhodnotení, že model je vhodný na výrobu, je potrebné exportovať model do formátu STL a ten je možné importovať do softvéru 3D tlačiarne (Obr. 49).



Obr. 49 Finálny model ortézy ruky a predlaktia.

6 CAD NÁVRH INDIVIDUÁLNEJ MAXILLO-FACIÁLNEJ MASKY

Maxillo-faciálne ortotické masky majú rôzne funkcie. Slúžia na:

- 1. zlepšenie liečby popálenín v oblasti tváre,
- 2. zlepšenie integrácie kožného štepu v oblasti tváre,
- 3. ochranu tváre užívateľa po rozličných chirurgických zákrokoch.

Keďže sa tieto masky vyrábajú na mieru, inovatívne metódy ako 3D skenovanie, CAD modelovanie a aditívna výroba sú ideálnym riešením na vývoj týchto pomôcok.

6.1 POPÁLENINOVÁ ORTOTICKÁ MASKA

Pri navrhovaní ortotickej masky bude 3D model skenu hlavy, získaný pomocou ručného 3D skeneru, slúžiť ako pozitív. V prvom kroku je nutné pomocou funkcie *Edit – Transform* polohovať model tak, aby oblasť tváre bola vo frontálnej rovine softvéru. Následne sa odrežú nepotrebné časti modelu skenu (temeno, záhlavie, krk, vlasy, uši), aby sa zredukoval počet trojuholníkov, z ktorých sa model skladá. Na odstránenie nepotrebných povrchov sa použije funkcia *Edit – Plane Cut* (Obr. 50), alebo nástroj *Select – Delete* (Obr. 51).



Obr. 50 Odstránenie nepotrebných povrchov pomocou funkcie Plane cut.



Obr. 51 Odstránenie nepotrebných povrchov pomocou funkcie Select – Delete.

Po odstránení nepotrebných plôch je nutné podľa potreby redukovať zvyšný počet trojuholníkov. Ako pomôcku je vhodné aktivovať *Show wireframe* v kolónke *View*. Následne pomocou *Select* sa vyznačí model a v kolónke *Edit* sa vyberie funkcia *Reduce* (Obr. 52). Parametre funkcie sa nastavia podľa potreby.



Obr. 52 Aktivácia Wireframe a redukcia počtu trojuholníkov.

V ďalšom kroku sa pomocou funkcie *Sculpt* odstránia artefakty na povrchu oblasti tváre, konkrétne obočie, vlasy brady, vrásky a pod. Pri upravovaní povrchu sa odporúča použiť nástroje *Reduce a Shrink Smooth*. Parametre týchto nástrojov je potrebné nastaviť podľa potreby.

Vyhladzovanie výčnelkov na povrchu treba vykonať najprv s nástrojom *Reduce*, aby sa zjednodušil daný povrchu. Tým budú nasledujúce úpravy efektívnejšie. Po redukcii povrchu sa prejde na nástroj *Shrink Smooth*, ktorým sa daný povrch vyhladí. Na vyhladzovanie väčších plôch ako sú líca a čelo sa použije nástroj *Shrink Smooth* (Obr. 53).



Obr. 53 Vyhladzovanie povrchu modelu 3D skenu tváre.

Návrh individuálnej popáleninovej masky pozostáva z 3 častí:

- 1. Náčrt kontaktného povrchu ortézy,
- 2. Vytvorenie škrupiny ortézy s vôľou,
- 3. Generovanie individuálneho 3D modelu ortézy.

V prvom kroku je potrebné načrtnúť kontaktnú plochu ortézy s jej hranicami na 3D pozitív (Obr. 54). Na kreslenie sa používa funkcia *Select*, s nastavením módu štetca *SphereDisc Brush*. Ortéza ma pokrývať celú tvár, čiže jej hranice sa načrtnú okolo čela, oblasti spánkov, líc a brady. Je nutné vytvoriť otvory pre oči, ústa a nosné dierky. Pri kreslení je vhodné použiť funkciu *Symmetry*, po aktivácii ktorej, je možné si polohovať rovinu symetrie v priestore rozhrania softvéru, podľa potreby. V tomto prípade je nutné polohovať rovinu symetrie v sagitálnej rovine modelu hlavy. S nastavenou rovinou sa aktivuje zrkadlenie štetca, tým sa zaistí symetrické kreslenie na 3D model, vzhľadom na pomocnú os. Po vyznačení hraníc ortézy sa plocha vyfarbí pomocou štetca. Je veľmi dôležite dbať na to, aby kontaktná plocha ortézy bola plne vyfarbená, inač nebude možné aplikovať funkcia *Modify – Optimize Boundary* a *Modify – Smooth Boundary*. Nastavenia tejto funkcie sa môže nechať v predvolených hodnotách. Pri dodržaní tohto postupu sa získa plocha ortézy.



Obr. 54 Náčrt kontaktnej plochy popáleninovej masky.

Po vytvorení náčrtu kontaktného povrchu ortézy je potrebné vytvoriť kópiu daného povrchu. Na to sa použije funkcia *Edit – Extract*. Parameter tejto funkcie *(Offset)* sa nastavia na 0 mm (Obr. 55). Pri tomto nastavení sa vytvorí škrupina ortézy s totožným povrchom 3D pozitívu.



Obr. 55 Tvorba kópie povrchu popáleninovej masky.

Škrupinu je následne nutné oddeliť od modelu pozitívu s funkciou Select – Edit – Separate. Ďalším krokom je nastavenie hrúbky ortézy. Pomocou funkcie Edit – Extrude sa zo škrupiny vytvorí 3-rozmerný objekt s konštantnou hrúbkou. Hrúbka steny ortézy (Offset) sa nastaví na 3 mm a ako smer ťahania (Direction) zvolíme Normal (Obr. 56). Pri tomto nastavení sa vytvorí ortéza s konštantnou hrúbkou steny.



Obr. 56 Oddelenie škrupiny masky a tvorba 3D modelu masky.

Model ortézy prejde nasledovne fázou postprocesing, kde sa funkciami v kolónke *Sculp* upravuje povrch pomôcky do jej finálnej podoby a okraje modelu masky sa na záver vyhladia pomocou funkcie *Select – Deform – Smooth.* Parametre funkcie ostanú v prednastavených hodnotách, upraví sa iba *Smoothing type – Uniform triangles* (Obr. 57).



Obr. 57 Vyhladenie okraju popáleninovej masky.

Ďalej je potrebné doplniť tento model o spony, na ktoré budú aplikované flexibilné popruhy, slúžiace na upevnenie masky na hlave subjektu. Spony v počte štyroch kusov je potrebné polohovať na laterálne strany masky, kde budú aplikované popruhy. Polohovanie úchytov sa vykonáva pomocou funkcie *Edit – Transform* (Obr. 58). Počas polohovania úchytov je dôležité dávať pozor na to, aby model úchytu nezachádzal hlboko do modelu ortézy, čím by vyčnieval z kontaktného povrchu danej pomôcky. Po uložení prvej spony je vhodné použiť funkciu *Edit – Duplicate*, aby sa na totožnom mieste vytvorila kópia tohto modelu a následne, funkciou *Transform* polohovať duplikát na ďalšom mieste.



Obr. 58 Polohovanie spôn na modely popáleninovej masky.

Po polohovaní modelov spôn na model masky je nutné všetky modely zjednotiť (Obr. 59). Jednotlivé modely sa označia kombináciou klávesníc *Shift* a ľavom tlačidle myši a následne sa pomocou funkcie *Edit – Combine* zjednotia. Tým sa ale vytvoria jednotlivé povrchové skupiny (FaceGroups), ktoré sú na modely vyznačené rôznymi farbami. Na odstránenie daných skupín je nutné použiť funkciu *Select – Modify – Clear FaceGroup*. V poslednom kroku navrhovania pomôcky je vhodné skontrolovať, či 3D model masky má

nejaké chyby vo svojom dizajne. Na to sa aktivuje *Inspector* v kolónke *Analysis*. Ak má dizajn ortézy nejaké chyby, táto funkcia ich identifikuje a pomocou nej sa chyby odstránia.



Obr. 59 Spájanie modelov spôn s modelom popáleninovej masky.

Po finálnej kontrole 3D modelu ortézy a zhodnotení, že model je vhodný na výrobu aktuálnej ortézy, je potrebné exportovať model do formátu STL a ten je možné importovať do softvéru 3D tlačiarne (Obr. 60).



Obr. 60 Finálny model popáleninovej masky.

6.2 OCHRANNÁ ORTOTICKÁ MASKA

Pri navrhovaní ochrannej ortotickej masky je pri úprave 3D pozitívu nutné vykonať ešte dodatočné úpravy. Po vyhladení povrchu modelu, podľa ktorého bude vytváraná kontaktná plocha ortézy, je potrebné upraviť oblasť nosa. Keďže pomôcka má slúžiť na ochranu oblasti nosu po zlomeninách, alebo rozličných chirurgických zákrokoch, je potrebné upraviť daný model pozitívu tak, aby vznikol medzi nosom a ortézou priestor na výstelku pre zefektívnenie ochrany. Vďaka tomuto dizajnu sa pri vonkajších nárazoch na ortézu bude sila rozkladať na plochu tváre a nie na plochu nosa.

Na úpravu plochy nosa je vhodné použiť nástroje *Inflate, Pinch, Reduce a Shrink Smooth.* Parametre týchto nástrojov je potrebné nastaviť podľa potreby. V prvom kroku je nutné nafúknuť plochy nosa laterálne od jeho stredu, aby medzi nosom a lícami vznikol plynulý prechod. Nasledovne sa trhliny, ktoré vznikli nafukovaním zaplátajú pomocou nástroja *Pinch*, ktorý hmotu v mieste pôsobenia nástroja koncentruje do jedného bodu. Po tom sa pomocou nástroja *Reduce* zjednoduší povrch a aktivuje sa funkcia *Edit – Make Solid* (s prednastavenými parametrami), aby boli ďalšie nástroje na úpravu efektívnejšie. Na záver sa daná plocha vyhladí nástrojom *Shrink Smooth* (Obr. 61).



Obr. 61 Úprava oblasti nosa pomocou nástrojov vo funkcii Sculpt.

Po finálnej kontrole 3D modelov a zhodnotení, že model je postačujúci na návrh ortotickej pomôcky sa môže prejsť na samotný návrh individuálnej ochrannej masky (Obr. 62).



Obr. 62 Finálny pozitív na tvorbu ochrannej ortotickej masky.

Návrh individuálnej ochrannej masky pozostáva z 3 častí:

- 1. Náčrt kontaktného povrchu ortézy,
- 2. Vytvorenie škrupiny ortézy s vôľou,
- 3. Generovanie individuálneho 3D modelu ortézy.

V prvom kroku je potrebné načrtnúť kontaktnú plochu ortézy s jej hranicami na 3D pozitív (Obr. 63). Na kreslenie sa používa funkcia *Select*, s nastavením módu štetca *SphereDisc Brush*. Ortéza ma pokrývať tvár v oblasti nosa a očí, čiže jej hranice sa načrtnú krížom cez čelo nad obočie, cez spánkové kosti smerom dolu, pokračovať cez lícne kosti smerom na špičku nosa. Na pomoc je vhodné použiť funkciu *Symmetry*, po aktivácii ktorej, je možné si polohovať rovinu symetrie v priestore rozhrania softvéru, podľa potreby. V tomto prípade je nutné polohovať rovinu symetrie v sagitálnej rovine modelu hlavy. S nastavenou rovinou sa aktivuje zrkadlenie štetca, tým sa zaistí symetrické kreslenie na 3D model, vzhľadom na pomocnú os. Po vyznačení hraníc ortézy sa plocha vyfarbí pomocou štetca. Je veľmi dôležite dbať na to, aby kontaktná plocha ortézy bola plne vyfarbená, inač nebude možné aplikovať funkcia *Modify – Optimize Boundary* a *Modify – Smooth Boundary*. Nastavenia tejto funkcie sa môže nechať v predvolených hodnotách. Pri dodržaní tohto postupu sa získa plocha ortézy.



Obr. 63 Náčrt kontaktnej plochy ochrannej masky.

Po vytvorení náčrtu kontaktného povrchu ortézy je potrebné vytvoriť medzeru/vôľu medzi ortézou a pozitívom. Na to sa použije funkcia *Edit – Extract*. Parameter tejto funkcie *(Offset)* sa nastavia na 3 mm a smer *(Direction)* na *Normal* (Obr. 64). Pri tomto nastavení sa vytvorí škrupina ortézy s konštantnou vzdialenosťou od povrchu 3D pozitívu.



Obr. 64 Vytvorenie škrupiny pomocou funkcie Extract.

Posledným krokom je nastavenie hrúbky ortézy. Pomocou funkcie *Edit – Extrude* sa zo škrupiny vytvorí 3-rozmerný objekt s konštantnou hrúbkou. Hrúbka steny ortézy *(Offset)* sa nastaví na 3 mm a ako smer ťahania *(Direction)* zvolíme *Normal* (Obr. 65).



Obr. 65 Nastavenie hrúbky ortézy pomocou funkcie Extrude.

Po schválení funkcie *Extrude* sa selektovaná plocha povrchu deaktivuje a kvôli ďalším úpravám je potrebné si opätovne označiť teraz už 3D model ortézy. V tomto stave je model ortézy a model pozitívu chápaný softvérom ako jednotný model. Z toho dôvodu je potrebné použiť funkciu *Edit – Separate*, aby sa jednotlivé modely do seba oddelili (Obr. 66). Po oddelení modelov sa v rozhraní softvéru aktivuje tabuľka *Object Browser*, v ktorej je zoznam aktuálnych modelov v rozhraní softvéru. V nej je možné selektovať modely, schovávať ich, alebo vymazávať. Tabuľku je možné odstrániť, alebo opätovne aktivovať v kolónke *View*.





V ďalšom kroku sa schová model 3D skenu hlavy, aby bolo možné vidieť kontaktnú plochu modelu ortotickej masky. Model ortézy prejde nasledovne fázou postprocesing,

kde sa funkciami v kolónke *Sculp* upravuje povrch pomôcky do jej finálnej podoby a okraje modelu masky sa na záver vyhladia pomocou funkcie *Select – Deform – Smooth.* Parametre funkcie ostanú v prednastavených hodnotách, upraví sa iba *Smoothing type – Uniform triangles* (Obr. 67).



Obr. 67 Vyhladenie okraju ochrannej masky.

Ďalej je potrebné doplniť tento model o spony, na ktoré budú aplikované flexibilné popruhy, slúžiace na upevnenie masky na hlave subjektu. Spony v počte štyroch kusov je potrebné polohovať na laterálne strany masky, kde budú aplikované popruhy. Polohovanie úchytov sa vykonáva pomocou funkcie *Edit – Transform* (Obr. 68). Počas polohovania úchytov je dôležité dávať pozor na to, aby model úchytu nezachádzal hlboko do modelu ortézy, čím by vyčnieval z kontaktného povrchu danej pomôcky. Po uložení prvej spony je vhodné použiť funkciu *Edit – Duplicate*, aby sa na totožnom mieste vytvorila kópia tohto modelu a následne, funkciou *Transform* polohovať duplikát na ďalšom mieste.



Obr. 68 Polohovanie spôn na modely ochrannej masky.

Po polohovaní modelov spôn na model masky je nutné všetky modely zjednotiť (Obr. 69). Jednotlivé modely sa označia kombináciou klávesníc *Shift* a ľavom tlačidle myši a následne sa pomocou funkcie *Edit – Combine* zjednotia. Tým sa ale vytvoria jednotlivé povrchové skupiny (FaceGroups), ktoré sú na modely vyznačené rôznymi farbami. Na odstránenie daných skupín je nutné použiť funkciu *Select – Modify – Clear FaceGroup*. V poslednom kroku navrhovania pomôcky je vhodné skontrolovať, či 3D model masky má nejaké chyby vo svojom dizajne. Na to sa aktivuje *Inspector* v kolónke *Analysis*. Ak má dizajn ortézy nejaké chyby, táto funkcia ich identifikuje a pomocou nej sa chyby odstránia.



Obr. 69 Spájanie modelov spôn s modelom ochrannej masky.

Po finálnej kontrole 3D modelu ortézy a zhodnotení, že model je vhodný na výrobu aktuálnej ortézy, je potrebné exportovať model do formátu STL a ten je možné importovať do softvéru 3D tlačiarne (Obr. 70).



Obr. 70 Finálny model ochrannej ortotickej masky.

7 CAD NÁVRH INDIVIDUÁLNEHO PROTETICKÉHO LÔŽKA

Protetické lôžka dolných končatín sú kľúčové pre pohodlie a funkčnosť osôb po amputácii. Technológia CAD výrazne zlepšila prispôsobenie a presnosť návrhu transtibiálnych lôžok, čím umožňuje individuálne prispôsobenie podľa anatomických a funkčných potrieb. CAD dizajn využíva 3D modelovanie na zachytenie detailných anatomických údajov, čo zabezpečuje lepšie uchytenie a znižuje pôsobenie na tlakové body, čím zvyšuje pohodlie a predchádza problémom, ako sú odreniny alebo vredy.

Technológia CAD umožňuje presnú úpravu geometrie lôžok, optimalizovanú na zlepšenie zaťaženia, stability a prenosu energie pri chôdzi. To vedie k efektívnejšiemu zarovnaniu s zvyškovou končatinou a prirodzenejšej chôdzi. Rýchle úpravy 3D modelov na základe spätnej väzby pacienta zjednodušujú proces vývoja, čo zaručuje flexibilnejšie a rýchlejšie prispôsobenie sa meniacim sa potrebám pacientov.

Návrh individuálneho transtibiálneho CAD lôžka protézy DK (dolnej končatiny) v CAD softvéri Meshmixer [17] pozostáva z 2 krokov:

- Tvorba transtibiálneho 3D pozitívu,
- Návrh transtibiálneho CAD lôžka.

7.1 TVORBA TRANSTIBIÁLNEHO 3D POZITÍVU

Keďže CAD lôžko bude navrhované na individuálny 3D pozitív kýpťa, je potrebné upraviť daný model tak, aby jeho tvar povrchu zodpovedal vnútornej stene navrhovaného CAD lôžka (Obr. 71). V prvom kroku, ak je potrebné, je vhodné redukovať množstvo trojuholníkov, z ktorých je povrch 3D modelu zložený. Na to sa použije funkcia *Select – Edit – Reduce* a parametre funkcie sa nastavia podľa potreby. Nasledovne sa prostredníctvom funkcie *Edit – Plane cut* odstráni časť modelu 3D skenu kýpťa, ktorá je nepotrebná pre návrh CAD lôžka. Táto oblasť je v tomto prípade oblasť proximálne od kolenného kĺbu. Parameter funkcie *Cut Type* sa nastaví na *Cut (Discard half)*, aby sa nepotrebná oblasť úplne odstránila.



Obr. 71 Proces úpravy povrchu transtibiálneho 3D pozitívu.

Po počiatočnej úprave povrchu 3D modelu pozitívu je potrebné aplikovať globálnu a lokálnu kompresiu povrchu daného modelu, čím sa medzi budúcim CAD lôžkom a reálnym kýpťom užívateľa vytvorí podtlak, potrebný na korektné uchytenie lôžka. Na to sa použije funkcia *Edit – Transform* a kompresia sa vytvorí vo 2 krokoch:

- 1. <u>Globálna kompresia v transverzálnej rovine XZ</u>
- 2. Lokálna kompresia na distálnom konci modelu kýpťa v osi Y

Hodnota globálnej kompresie je 3-5%, ktorá sa individuálne nastavuje podľa tvaru pozitívu. Na vytvorenie tejto kompresie sa v parametroch funkcie *Transform* upravia hodnoty miery *Scale* v osiach X a Z na 0,95-0,97 (Obr. 72).



Obr. 72 Proces globálnej kompresie transtibiálneho 3D pozitívu.

Pri lokálnej kompresii je v prvom rade nutné separovať distálny koniec, na ktorý bude aplikovaná kompresia, od zvyšku 3D pozitívu (Obr. 73). Na to sa použije funkcia *Edit* – *Plane Cut* a *Cut Type* sa nastaví na *Slice (Keep both)*, aby sa časť modelu neodstránila. Výšku roviny rezu je nutné kontrolovať pomocou funkcie *Analysis* – *Measure*, pričom vzdialenosť rezu v transverzálnej rovine má byť 5-7 cm od distálneho konca. Následne sa oblasť distálneho konca odseparuje pomocou funkcie *Select* – *Edit* – *Separate*.



Obr. 73 Proces separácie distálneho konca transtibiálneho 3D pozitívu.

Na odseparovaný distálny koniec sa aplikuje kompresia v osi Y o hodnote 5% a v tej istej osi sa model posunie smerom ku zvyšku 3D pozitívu, aby vznikol prienik medzi týmito dvoma modelmi. Po tom je potrebné oba modely spojiť pomocou funkcie *Combine*, ktorá sa aktivuje po tom čo obe modely označím v tabuľke *Object Browser*. Nasledovne sa na spojený model použije funkcia *Edit – Make Solid*, čím sa 3D pozitív zjednotí (Obr. 74). Parametre danej funkcie môžu ostať v prednastavených hodnotách.



Obr. 74 Proces lokálnej kompresie distálneho konca transtibiálneho 3D pozitívu.

Na takto upravenom 3D modely pozitívu sa nasledovne vyznačia zaťažiteľné a nezaťažiteľné miesta (Obr. 75), ktoré sa prostredníctvom funkcie *Select – Edit – Extrude* vtlačia do povrchu alebo vytlačia z povrchu modelu pozitívu. Ako pomôcku vieme využiť naznačenie daných miest na 3D pozitíve, ktoré bolo vyznačené čiernym popisovačom priamo na 3D skenovaný kýpeť daného subjektu. Na vygenerovanie zaťažiteľných miest sa aplikuje vtlačenie na danú plochu o hodnote -3 mm a na nezaťažiteľné miesta vytlačenie danej plochy o hodnote +1,5 mm. Je dôležité, aby hranice týchto miest boli zahladené a mali plynulé prechody na nedeformované zóny pozitívu. Na vyhladenie celého povrchu pozitívu sa použije nástroj *Sculpt – Brushes – Shrink Smooth*. Parametre daného nastroja sa nastavia podľa potreby. Na záver sa 3D pozitív skontroluje a nasledovne je pripravený na návrh individuálneho CAD lôžka.



Obr. 75 Aplikácia zaťažiteľných a nezaťažiteľných miest na transtibiálnom 3D pozitíve.

7.2 NÁVRH TRANSTIBIÁLNEHO PODTLAKOVÉHO CAD LÔŽKA

V prvom kroku je najdôležitejšie korektne nakresliť orezovú líniu CAD lôžka na finálny 3D pozitív (Obr. 76). Ako pomôcku vieme využiť naznačenie danej línie na 3D pozitíve, ktoré bolo vyznačené čiernym popisovačom priamo na 3D skenovaný kýpeť daného subjektu. Línia sa načrtne pomocou funkcie *Select* a plocha, ktorá má reprezentovať vnútorný povrch lôžka, sa vyfarbí. Veľkosť nástroja sa nastaví podľa potreby. Nasledovne sa použije funkcia *Select – Modify – Optimize Boundary* a *Smooth Boundary* na optimalizáciu náčrtu orezovej línie lôžka. Takto označený optimalizovaný povrch sa extrahuje pomocou funkcie *Select – Edit – Extract*, s parametrom *Offset* rovným 0 mm čím sa získa kópia daného povrchu. Tento povrch sa chápe ako vnútorný povrch navrhovaného CAD lôžka.



Obr. 76 Náčrt kontaktného povrchu transtibiálneho CAD lôžka.

Vnútorný povrch CAD lôžka sa odseparuje od zvyšku 3D modelu pozitívu prostredníctvom funkcie *Select – Edit – Separate*. Týmto sa získa separátny 3D model daného povrchu, ktorý sa bude upravovať do finálnej podoby CAD lôžka. V tabuľke *Object Browser* sa 3D model pozitívu schová a práca pokračuje len na modely vnútorného povrchu lôžka. Tento povrch sa nasledovne externe vytlačí do priestoru pomocou funkcie *Select – Edit – Extrude* o hodnotu *Offset* rovnej 3 mm, čo reprezentuje hrúbku steny lôžka. Je dôležité, aby typ smeru vytlačenia povrchu *Direction* bol *Normal*. Tým sa vytvorí konštantná hrúbka steny po celom 3D modely CAD lôžka (Obr. 77).



Obr. 77 Tvorba 3D modelu transtibiálneho CAD lôžka.

V ďalšom kroku je vhodné aplikovať otvor na jednocestný ventil, ktorý sa umiestňuje posterio-mediálne na obvode distálneho konca 3D modelu lôžka (Obr. 78). Na to sa použije funkcia *Edit – Add Tube*. V nastaveniach funkcie sa musí zvoliť *Tube Type – Line (Inside)* a *Combine Mode – Boolean*. Polomer otvoru sa nastaví 10 mm (*Radius*) a *End Radius* na 13 mm, aby sa vytvoril kužeľovitý otvor na daný ventil. Na záver je dôležité vyhladiť hranu orezovej línie, ktorá sa vytvorila pri vytlačení vnútorného povrchu lôžka. Pomocou funkcie *Select* sa táto hrana označí (rozmer nástroja sa nastaví primerane) a následne funkciou *Select – Deform – Smooth* sa vnútorná a vonkajšia hrana vyhladí. Parametre danej funkcie sa nastavujú podľa potreby.

Obr. 78 Aplikácia otvoru na jednocestný ventil.

Po finálnej kontrole modelu podtlakového transtibiálneho CAD lôžka (Obr. 79) a zhodnotení, že model je vhodný na výrobu, je potrebné exportovať model do formátu STL a ten je možné importovať do softvéru 3D tlačiarne.

Obr. 79 Finálny 3D model transtibiálneho podtlakového CAD lôžka.

7.3 NÁVRH TRANSTIBIÁLNEHO CAD LÔŽKA S PIN-LOCK SYSTÉMOM

Postup pri návrhu transtibiálneho CAD lôžka s Pin-lock systémom je rovnaký ako pri návrhu podtlakového transtibiálneho lôžka. Rozdiel je ale v poslednej fáze dizajnu lôžka. Pri podtlakovom lôžku sa aplikuje otvor na jednocestný ventil, ale pri tomto type je nutné na distálny koniec aplikovať adaptér, na ktorý sa bude nasádzať rúrkový adaptér a skrz ktorí sa osádza "pin" na distálnom konci protetického návleku natiahnutom na kýpti.

Model adaptéru pin-lock systému (Obr. 80) je navrhovaný s softvéri SOLIDWORKS. Navrhovaný model je prototypom, čiže jeho stanovené rozmery nemusia zodpovedať reálnemu stavu. Daný prototyp je valcovitého tvaru s priemerom 73 mm a výškou 23 mm. Na anteriórnej strane je aplikovaný otvor s priemerom 65 mm, ktorý prechádza do hĺbky modelu, konkrétne o rozmer 19 mm. Do stredu posteriórnej steny je aplikovaný otvor s priemerom 16 mm a štyri menšie otvory s priemerom 7,5 mm, ktoré sú pravidelne rozmiestnené na myslenej kružnici so stredom vzdialeným 27,5 mm od stredu väčšieho otvoru. Model sa uloží vo formáte STL a importuje do rozhrania softvéru Meshmixer, kde je navrhnuté individuálne protetické lôžko.

Obr. 80 Model adaptéru pin-lock systému

Model adaptéru je nutné aplikovať na distálny koniec navrhnutého lôžka tak, aby vznikol prechod z modelu lôžka do modelu adaptéru (Obr. 81). To znamená, že je nutné vytvoriť otvor na distálnom konci lôžka, kde sa následne navrhne prechod z vnútornej plochy lôžka na vnútorný povrch adaptéru a druhý prechod z vonkajšej plochy lôžka na vonkajší povrch adaptéru. V prvom kroku je nutné vygenerovať povrchové skupiny na modely adaptéru. To sa vykoná pomocou funkcie *Edit – Generate FaceGroups*. Následne sa zvolí povrch na vrchu modelu, ktorý spája vonkajší a vnútorný povrch modelu a odstráni sa. Ďalej sa model adaptéru pomocou funkcie *Edit – Transform* umiestni distálne od modelu lôžka s primeranou vzdialenosťou a centruje sa. V ďalšom kroku sa odstráni distálny koniec modelu protetického lôžka. Na to je nutné použiť funkciu *Select* na označenie časti vonkajšej a vnútornej plochy.

Obr. 81 Úprava modelu adaptéru a jeho polohovanie voči modelu lôžka.

Obidva modely sa následne označia a spoja do jedného pomocou funkcie Edit – Combine. V ďalšom kroku sa môže začať spájanie jednotlivých povrchov modelov. Nástrojom *Select* s rozmerom "O" sa označí okraj vnútorného povrchu na distálnom konci lôžka a okraj vnútorného povrchu na adaptéri. Po označení oboch povrchov sa zvolí funkcia *Select – Edit – Join,* čím sa vygeneruje prechod medzi týmito dvoma povrchmi (Obr. 82). Rovnaký proces sa opakuje s vonkajšími povrchmi. Po tom sa označí povrch už celého 3D modelu lôžka a pomocou *Select – Modify – Clear FaceGroup* sa odstránia povrchové skupiny.

Obr. 82 Vytvorenie prepojenia medzi modelmi adaptéra a transtibiálneho lôžka.

Po finálnej kontrole modelu transtibiálneho CAD lôžka s pin-lock systémom (Obr. 83) a zhodnotení, že model je vhodný na výrobu, je potrebné exportovať model do formátu STL a ten je možné importovať do softvéru 3D tlačiarne.

Obr. 83 Finálny 3D model transtibiálneho pin-lock CAD lôžka.

8 PRÍPRAVA CAD MODELOV NA ADITÍVNU VÝROBU

Príprava CAD modelov na aditívnu výrobu spočíva v nahratí modelu do softvéru, určeného na nastavenie jednotlivých parametrov 3D tlače. Voľba softvéru závisí od využitej technológie aditívnej výroby. Keďže sú navrhnuté protetické a ortotické pomôcky určené na výrobu pomocou technológiou FDM (Fused Deposition Modelling), tak vhodným softvérom na nastavenie parametrov tlače je napríklad voľne stiahnuteľný PrusaSlicer (Prusa Research, Praha, Česká Republika).

Rozhranie tohto softvéru je jednoducho rozdelené na 3 základné časti: hlavné okno s pohľadom na virtuálnu pracovnú plochu 3D tlačiarne, horizontálnu lištu hore s funkciami na nastavenie parametrov tlače a vertikálnu lištu vpravo s výberom módu softvéru (jednoduchý, pokročilý, expert), trisky, tlačiarne, materiálu a hustoty výplne modelu (Obr. 84).

Obr. 84 Rozhranie softvéru PrusaSlicer.

V prvom kroku je potrebné si v pravej vertikálnej lište zvoliť mód softvéru (expert) typ tlačiarne použitej na výrobu 3D modelu, nastavenie presnosti tlače, typ filamentu použitého na výrobu objektu a hustotu výplne vyrábaného objektu. Po stanovaní týchto základných podmienok je potrebné do rozhrania softvéru importovať 3D model. To je možné vykonať cez kolónku *File – Import – Import STL*, alebo cez funkciu *Add* na pracovnej ploche (Obr. 85).

Obr. 85 Importovanie 3D modelu do rozhranie softvéru.

Po importovaní modelu pomôcky do rozhrania softvéru sa na pracovnej ploche softvéru aktivujú funkcie v ľavej spodnej, ľavej vertikálnej a hornej horizontálnej lište a v pravej lište softvéru sa objavia informácie o importovanom modeli, ako napríklad jeho rozmery a poloha (Obr. 86). Pomocou funkcií v ľavej lište je možné polohovať model na pracovnej ploche tlačiarne a v hornej lište sú funkcie na prácu s jedným, alebo viacerými modelmi. V ľavej lište sú funkcie:

- Move (hýbanie s modelom),
- Scale (zmeniť mierku modelu),
- Rotate (klopenie modelu),
- Place on face (výber spodnej plochy modelu),
- Cut (prerezanie modelu),
- Paint-on supports (kreslenie podporných štruktúr),
- Seam painting (kreslenie švov).

V hornej lište sú funkcie:

- Add, Delete a Delete all (importovanie alebo mazanie modelov),
- Arrange (rozloženie modelov na pracovnej ploche),
- Copy a Paste (kopírovanie a vkladanie modelov),
- Add a Remove instance (množenie a redukovanie modelov),
- Split to objects (rozdelenie celku na objekty),
- Split to parts (rozdelenie celku na súčasti),
- Search (vyhľadávanie),
- Variable layer height (variabilná výška vrstvy),
- Undo-Redo (krok späť-krok vpred).

V ľavej spodnej lište je možné zvoliť pohľad na model v nastaveniach alebo ako náhľad budúceho vytlačeného modelu. Po nastavení všetkých parametrov je pomocou náhľadu možné skontrolovať finálny stav objektu po vytlačení.

Obr. 86 Rozhranie softvéru PrusaSlicer s importovaným 3D modelom.

Po importovaní modelu je potrebné skontrolovať a poprípade prepísať nastavenia tlače v hornej horizontálnej lište softvéru. V kolónke *Print Settings* (Obr. 87) je možné zvoliť prednastavené parametre tlače modelu v *System Presets,* alebo manuálne nastaviť jednotlivé parametre tlače v nasledujúcich kolónkach:

- Layers and perimeters (nastavovanie výšky vrstvy, vertikálnych a horizontálnych škrupín modelu, kvality a pokročilých nastavení),
- Infill (nastavovanie výplne, žehlenia vrstiev, redukcie času tlače, a pokročilých nastavení),
- Skirt and brim (nastavenie okrajov),
- Support material (nastavenia podporných štruktúr),
- Speed (nastavenia rýchlosti a zrýchlení počas tlače),
- Multiple extruders (nastavenia jednotlivých trisiek tlačiarne a modelu tlačeného na čistenie daných trisiek),
- Advanced (nastavenia extrúzie filamentu, prietoku a vrstvenia),
- Output options (nastavenie možnosti výstupu),
- Notes (zápis poznámok),
- Dependencies (nastavenia závislosti).

🔒 0.05mm ULTRADETAIL @I	MK3 (modified) 🗸 🖉 🦓		
Layers and perimeters	Layer height		
Infill Skirt and brim	Layer height:	🔒 🔹 0.05 mm	
Support material Speed	First layer height:	🔒 🔹 0.2 mm or %	
Multiple Extruders Advanced	Vertical shells		
Output options Notes	Perimeters:	🔒 • 3 🔹 (minimum)	
Dependencies	Spiral vase:		
	Recommended object thin wall thick mm	ess for layer height 0.05 and 2 lines: 0.89 mm , 4 lines: 1.77 mm , 6 lines:	2.65
	Horizontal shells		
	Solid layers:	Top: 🔒 • 15 🚔 Bottom: 🔒 • 10	* *
	 Solid layers: Minimum shell thickness: 	Top: ■ 15 ■ Bottom: ■ 10 Top: ■ 0.7 mm Bottom: ■ 0.5	mm
	 Solid layers: Minimum shell thickness: Top shell is 0.75 mm thick for layer hi Bottom shell is 0.5 mm thick for layer 	Top: ● 15 ● Bottom: ● 10 Top: ● ● 0.7 mm Bottom: ● 0.5 ght 0.05 mm. height 0.05 mm.	mm
	 Solid layers: Minimum shell thickness: Top shell is 0.75 mm thick for layer he Bottom shell is 0.5 mm thick for laye Quality (slower slicing) 	Top:	mm
	 Solid layers: Minimum shell thickness: Top shell is 0.75 mm thick for layer he Bottom shell is 0.5 mm thick for layer Quality (slower slicing) Extra perimeters if needed: 	Top:	mm
	Solid layers: Minimum shell thickness: Top shell is 0.75 mm thick for layer h Bottom shell is 0.5 mm thick for laye Quality (slower slicing) Extra perimeters if needed: Ensure vertical shell thickness:	Top:	mm
	 Solid layers: Minimum shell thickness: Top shell is 0.75 mm thick for layer he Bottom shell is 0.5 mm thick for layer Bottom shell is 0.5 mm thick for layer Quality (slower slicing) Extra perimeters if needed: Ensure vertical shell thickness: Avoid crossing perimeters: 	Top:	mm
	 Solid layers: Minimum shell thickness: Top shell is 0.75 mm thick for layer he Bottom shell is 0.5 mm thick for layer Quality (slower slicing) Extra perimeters if needed: Ensure vertical shell thickness: Avoid crossing perimeters: Avoid crossing perimeters - Max detour length: 	Top:	mm
	 Solid layers: Minimum shell thickness: Top shell is 0.75 mm thick for layer he Bottom shell is 0.5 mm thick for layer Quality (slower slicing) Extra perimeters if needed: Ensure vertical shell thickness: Avoid crossing perimeters: Avoid crossing perimeters - Max detour length: Detect thin walls: 	Top:	mm
	 Solid layers: Minimum shell thickness: Top shell is 0.75 mm thick for layer he Bottom shell is 0.5 mm thick for layer Quality (slower slicing) Extra perimeters if needed: Ensure vertical shell thickness: Avoid crossing perimeters: Avoid crossing perimeters - Max detour length: Detect thin walls: Detect bridging perimeters: 	Top:	mm
	 Solid layers: Minimum shell thickness: Top shell is 0.75 mm thick for layer he Bottom shell is 0.5 mm thick for layer Quality (slower slicing) Extra perimeters if needed: Ensure vertical shell thickness: Avoid crossing perimeters: Avoid crossing perimeters: Avoid crossing perimeters: Detect thin walls: Detect bridging perimeters: Advanced 	Top:	mm
	 Solid layers: Minimum shell thickness: Top shell is 0.75 mm thick for layer he Bottom shell is 0.5 mm thick for layer Quality (slower slicing) Extra perimeters if needed: Ensure vertical shell thickness: Avoid crossing perimeters: Avoid crossing perimeters: Avoid crossing perimeters: Detect thin walls: Detect bridging perimeters: Advanced Seam position: 	Top:	mm

Obr. 87 Príklad možností nastavení v softvéri PrusaSlicer.

V kolónke *Filament Settings* sú možnosti nastavenia tlače filamentu, kde v prvej kolónke *System presets* je možné zvoliť konkrétny materiál, podľa ktorého sa automaticky nastavia ideálne parametre tlače daného materiálu. Parametre je možné manuálne prepísať. Medzi jednotlivé nastavenia patria:

- Filament (nastavenia filamentu a teplôt tlače),
- Cooling (nastavenia chladenia a fénov),
- Advanced (pokročilé nastavenia tlače filamentu),
- Filament overrides (nastavenia retrakcie filamentu),
- Custom G-code (kódovanie vlastného formátu),
- Notes (zápis poznámok),
- Dependencies (nastavenia závislosti).

Posledná kolónka je *Printer Settings*, kde je možné v *System presets* zvoliť konkrétny typ použitej 3D tlačiarne, alebo manuálne prepísať jednotlivé parametre a informácie o tlačiarni. Medzi jednotlivé nastavenia patria:

- General (nastavenia veľkostí, koordinácie a firmvéru),
- Custom G-code (kódovanie vlastného formátu),
- Machine limits (nastavenia rýchlosti a zrýchlení posunu materiálu),

- Extruder (nastavenia trisky, výšky vrstiev, pozície, retrakcie a náhľadu),
- Notes (zápis poznámok),
- Dependencies (nastavenia závislosti).

Tieto všetky nastavenia sú ale primárne určené pre pokročilých užívateľov a preto je vhodné použiť *Basic* mód softvéru so základnými nastaveniami tlače.

Po zvolení prednastavených profilov a definovaní všetkých potrebných parametrov tlače, filamentu a tlačiarne je vhodné korektne polohovať 3D model protetickej alebo ortotickej pomôcky. Polohovanie modelov na virtuálnu pracovnú platformu tlačiarne je veľmi dôležité z hľadiska efektívnosti tlače a kvality výstupu. Podľa toho ako je model polohovaný sa vygeneruje podporná štruktúra a taktiež sa stanoví orientácia vrstiev. Z toho hľadiska je dôležité polohovať pomôcky tak, aby sa na kontaktných plochách modelov nevytvárali podporné štruktúry. Podporné štruktúry môžu v týchto miestach ovplyvniť kvalitu povrchu, čím sa môže deformovať tvar kontaktnej plochy a tým sa negatívne ovplyvní celková kvalita vyhotovenia pomôcky. Orientácia vrstvenia je ale dôležitá z hľadiska pevnosti a kvality povrchu modelu. Pretože sa medzi jednotlivými vrstvami musí stále rátať s možnosťou vzniku lomu, je dôležité polohovať pomôcky tak, aby po pôsobení náhodných externých síl (hlavne na ohyb) na pomôcku nevznikli praskliny. Vrstvenie taktiež ovplyvňuje lokálnu kvalitu povrchu modelov. Keďže pri 3D tlači je presnosť vyššia v osiach X a Y, tak je povrch modelu presnejší na plochách orientovaných vertikálne ku pracovnej platforme.

Polohovanie 3D modelu ortézy palca

Pri polohovaní modelu ortézy palca je dôležité orientovať model tak, aby os palca (prsta) bola kolmá ku pracovnej platforme tlačiarne (Obr. 88). V tom prípade sa na vnútornej ploche ortézy nevygenerujú podporné štruktúry a vzhľadom na orientáciu vrstvenia bude kontaktná plocha kvalitnejšie vyrobená. Polohovanie modelu sa vykoná pomocou funkcií *Move a Rotate*.

Následne sa aktivuje funkcia *Preview*, aby sa vytvorila simulácia tlače a náhľad finálneho výtlačku s možnosťou kontroly priebehu celého procesu výroby modelu (jednotlivé vrstvy modelu a pohyby extrúderu). Taktiež sa vygeneruje tabuľka s informáciami ohľadom výroby každého komponentu finálneho modelu a celková dĺžka tlače, množstvo použitého materiálu a cenová kalkulácia.

Obr. 88 Polohovanie 3D modelu ortézy palca.

Polohovanie 3D modelu protézy palca

Keďže pri aditívnej výrobe protézy palca je dôležité, aby kvalita povrchu bola najväčšia na kontaktnej plochy lôžka pomôcky, tak je dôležité polohovať model tak, aby proximálny koniec pomôcky bol v kontakte s pracovnou platformou a steny lôžka orientované kolmo ku nej (Obr. 89). Týmto spôsobom sa na kontaktnej ploche lôžka nevygeneruje podporná štruktúra a model palca sa stavia bez podpory. Pri tomto polohovaní, vzhľadom na orientáciu vrstiev, nevzniknú oslabené miesta na ohyb, čím sa predíde vzniknutiu prasklín.

Obr. 89 Polohovanie 3D modelu protézy palca.

Polohovanie 3D modelu ortézy ruky a predlaktia

V prípade ortézy ruky a predlaktia s individuálnym dizajnom je polohovanie do ideálnej polohy komplikovanejšie, kvôli množstvom perforácií na povrchu pomôcky. V takom prípade je potrebné sa hlavne sústrediť na to, aby na kontaktnej ploche neboli vygenerované podporné štruktúry, aby orientácia vrstvenia šla v transverzálnej rovine a keďže sa jedná o veľký model, aby bolo na modely dostatočné množstvo podpornej štruktúry kvôli zabráneniu deformovania spôsobeného zmenou teploty stavebného materiálu. Z týchto dôvodov je potrebné polohovať model dlahy tak, aby dorzálny povrch ortézy bol polohovaný smerom ku pracovnej platforme a uhol, ktorý model zviera s platformou bol dostatočne veľký nato, aby sa splnila podmienka orientácie vrstvenia a množstva podporného materiálu (Obr. 90).

Obr. 90 Polohovanie 3D modelu ortézy ruky a predlaktia.

Polohovanie 3D modelu maxillo-faciálnej ortotickej masky

Pri polohovaní ochrannej maxillo-faciálnej masky je potrebné sa sústrediť na orientáciu vrstvenia modelu. Keďže má pomôcka chrániť oblasť tváre pred rázovými externými silami, je potrebné polohovať model pomôcky tak, aby vrstvenie bolo v transverzálnej rovine. Tým sa zabezpečí vyššia pevnosť pomôcky a predíde sa zlomeniu. Vzhľadom na polohovanie z hľadiska kvality a presnosti povrchu, je potrebné polohovať masku tak, aby sa na kontaktnej ploche pomôcky nevygenerovali podporné štruktúry. Ideálna poloha je teda, ak je superiórna časť masky v kontakte s pracovnou platformou a kontaktná plocha je orientovaná nahor, aby sa podporná štruktúra vygenerovala iba na frontálnej časti masky a keďže sa jedná o veľký model, tak jej musí byť dostatočné množstvo, aby sa zabránilo deformovaniu spôsobeného zmenou teploty stavebného materiálu (Obr. 91).

Obr. 91 Polohovanie 3D modelu maxillo-faciálnej ortotickej masky.

Polohovanie 3D modelu transtibiálneho protetického lôžka

Polohovanie transtibiálneho protetického lôžka dolnej končatiny je pomerne jednoduché. Vzhľadom na to, že model je škrupinovitého dizajnu a má na distálnom konci v transverzálnej rovine modelu rovnú plochu, tak sa na pracovnú plochu tlačiarne napolohuje práve na túto plochu. Okrem miesta otvoru na jednocestný ventil nie je potrebné v tejto polohe vygenerovať podporné štruktúry (Obr. 92).

Obr. 92 Polohovanie 3D modelu transtibiálneho protetického lôžka.

Po nastavení parametrov výroby a po dôkladnom polohovaní modelu na virtuálnej platforme je potrebné exportovať toto usporiadanie do súboru *G-code*, čo je súbor ktorý podporujú stolové 3D tlačiarne typu FDM. Ten sa nahrá do pamäte tlačiarne a na nej sa aktivuje výroba.
POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] Živčák, J. et al.: Individuálna ortotika horných končatín 1. ed. Košice. 2016. p. 179 s. ISBN 978-80-553-3110-2.
- [2] Bowers DM, Chui KK. Neurological and Neuromuscular Disease Implications for Orthotic Use. In: Orthotics and Prosthetics in Rehabilitation. 4th ed. 2020. p. 259-293. DOI: 10.1016/B978-0-323-60913-5.00010-6.
- [3] Lunsford TR, Contoyannis B. Materials Science. In: Atlas of Orthoses and Assistive Devices. 5th ed. Philadelphia. 2019. p. 7-41, DOI: 10.1016/B978-0-323-48323-0.00002-0.
- [4] Supan TJ. Principles of Fabrication. In: Atlas of Orthoses and Assistive Devices. 5th ed. Philadelphia. 2019. p. 42-48. DOI: 10.1016/B978-0-323-48323-0.00003-2.
- [5] Jorge M. Orthotics and Prosthetics in Rehabilitation: Multidisciplinary Approach. In: Orthotics and Prosthetics in Rehabilitation. 4th ed. 2020. p. 2-13. DOI: 10.1016/B978-0-323-60913-5.00001-5
- [6] International Organization for Standardization: Additive manufacturing [Interne]. Available at: https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-1:v1:en.
- [7] Mohammed, M.I. Pearse, F. Design and additive manufacturing of a patient specific polymer thumb splint concept. In: Solid Freeform Fabrication 2018: Proceedings of the 29th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference. November 2018.
- [8] Buonamici, F. et al.: A practical methodology for computer-aided design of custom 3D printable casts for wrist fractures. The Visual Computer, 36:375-390. DOI: https: 10.1007/s00371-018-01624-z.
- [9] Barios-Muriel, J.B. et al.: Advances in orthotic and prosthetic manufacturing: a technology review. Materials, 2020, 13:295. DOI: 10.3390/ma13020295.
- [10] Fitzpatrik, A. et al.: Design optimization of a thermoplastic splint. In: Solid Freeform Fabrication 2017: Proceedings of the 28th Annual International: Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference. 2017.
- [11] Chen, Y.J. et al.: Application of 3D-printed and patient-specific cast for the treatment of distal radius fractures: initial experience. 3D printing in medicine, 2017, 3:11:1-9. DOI: 10.1186/s41205-017-0019-y.
- [12] Li J. Tanaka H.: Rapid customization system for 3D-printed splint using programmable modeling technique – a practical approach. 3D printing in medicine, 2018, 4:5:1-21. DOI: 10.1186/s41205-018-0027-6.
- [13] Fernandez-Vincent, M. Chust, A.E. Conejero, A.: Low cost fabrication approach for thumb orthoses. Rapid prototyping journal, October 2017, 23:6:1020-1031. DOI: doi.org/10.1108/RPJ-12-2015-0187.

- [14] Redaelli, D.F. et al.: 3D printing orthopedic scoliosis braces: a test comparing FDM with thermoforming. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020:111:1707–1720. DOI: 10.1007/s00170-020-06181-1.
- [15] Hale, L. Linley, E. Kalaskar, D.M.: A digital workflow for design and fabrication of bespoke orthoses using 3D scanning and 3D printing, a patient-based case study. Scientific reports, 2020, 10:7028. DOI: 10.1038/s41598-020-63937-1.
- [16] Štefanovič B. et al.: Innovative approaches to designing and manufacturing a prosthetic thumb. Prosthetics and orthotics international. 2020. DOI:10.1177/0309364620949717.
- [17] Živčák J, Štefanovič, B.: Technologický vývoj protetických lôžok 1. ed. Košice: Technická univerzita v Košiciach, 2023. ISBN 978-80-553-4610-6.

Branko ŠTEFANOVIČ, Jozef ŽIVČÁK

MODELOVANIE PROTETICKÝCH A ORTOTICKÝCH PROSTRIEDKOV

Druhé prepracované vydanie

73 strán, 92 obrázkov

Rok vydania: 2024

Vydavateľ: Strojnícka fakulta Technickej univerzity v Košiciach

ISBN 978-80-553-4761-5



Impulz pre tvoju kariéru







Strojnícka fakulta TUKE



Strojnícka fakulta TUKE