

3D tlač epitetických náhrad častí ľudského tela

Norbert Ferencík, Viktória Rajtúková, Alena Findrik Balogová, Miroslav Kohan, Radovan Hudák

Katedra biomedicínskeho inžinierstva a merania, Strojnícka fakulta TUKE, Košice

Predkladaný článok je zameraný na vytvorenie prehľadu možností 3D tlače epitetických náhrad a obsahuje informácie aj o súčasnom stave výroby epitetických náhrad. Následne sa zameriava na stanovenie metodiky, ktorá pozostáva z výberu materiálov, z ktorých je možné vyrobiť epitézy priamou 3D tlačou a postupu pre výrobu pri využití 3D tlače. V článku sú spomenuté výhody a nevýhody štandardných postupov výroby epitéz porovnané s výrobou pomocou skenovania a následnej 3D tlače formy pre silikónový odliatok. Na záver sa porovnávali finančné aspekty výroby epitetických náhrad pre štandardné postupy a pre 3D tlač.

Kľúčové slová: Epitéza, 3D tlač silikónov, návrh epitéz, spracovanie dát, materiál na výrobu epitéz

Keywords: Epithesis, Silicone 3D printing, epitheses design, data processing, epithetic material

Úvod

Epitetické náhrady, inak nazývané epitézy alebo kozmetické protézy sú protézy, ktoré zakrývajú alebo nahrádzajú poškodené časti mäkkého tkaniva na ľudskom tele ako napríklad časti tváre, zmyslové orgány ako oči, uši, nos, končatiny a ich časti, ktoré boli spôsobené traumou počas života pacienta alebo ide o vrodené ochorenie. Kozmetické protézy však nenahrádzajú funkciu chýbajúcej alebo poškodenej časti ľudského tela, ale plnia iba kryciu funkciu. Výroba takýchto náhrad je náročná, pretože je nutné zabezpečiť čo najprirodzenejší vzhľad epitézy, pretože ak epitéza nevyzerá prirodzene, pacient sa môže cítiť nesebavedomo a menejcenný kvôli tomu, že by pútal pozornosť okolia. Na dosiahnutie prirodzeného vzhľadu epitézy je potrebné, aby mal protetický technik umelecké cítenie, dobre vyvinutú jemnú motoriku a dostatočnú prax. Práve kvôli tomu sa v súčasnosti čoraz viac začínajú používať progresívne technológie na odoberanie mier a vyrábanie epitetických náhrad.

Cieľom tohto článku je vytvoriť prehľad možností využitia 3D tlače na výrobu epitetických náhrad. Motiváciou na napísanie tohto článku bolo uľahčenie výroby epitéz a zabezpečenie komfortu pacienta, ktorý môže byť zaistený napríklad tým, že namiesto invazívnych metód, na odoberanie odtlačku alebo odoberanie mier poškodenej časti sa použije neinvazívna metóda ako je napríklad 3D skenovanie a 3D tlač. Výroba pomocou 3D tlače má na rozdiel od konvenčného spôsobu výroby viaceré výhody, napríklad presnosť, ekonomickosť a urýchlenie procesu výroby. V článku je vytvorený prehľad o aktuálnom stave a spôsobe výroby epitetických náhrad konvenčným spôsobom, výhody a nevýhody konvenčných metód, ale aj progresívnych metód, a ich začlenenie do procesu výroby.

Súčasný stav výroby epitetických náhrad

V súčasnosti sa na výrobu epitéz využívajú hlavne konvenčné metódy. Výskumníci sa ale čoraz viac zaoberajú

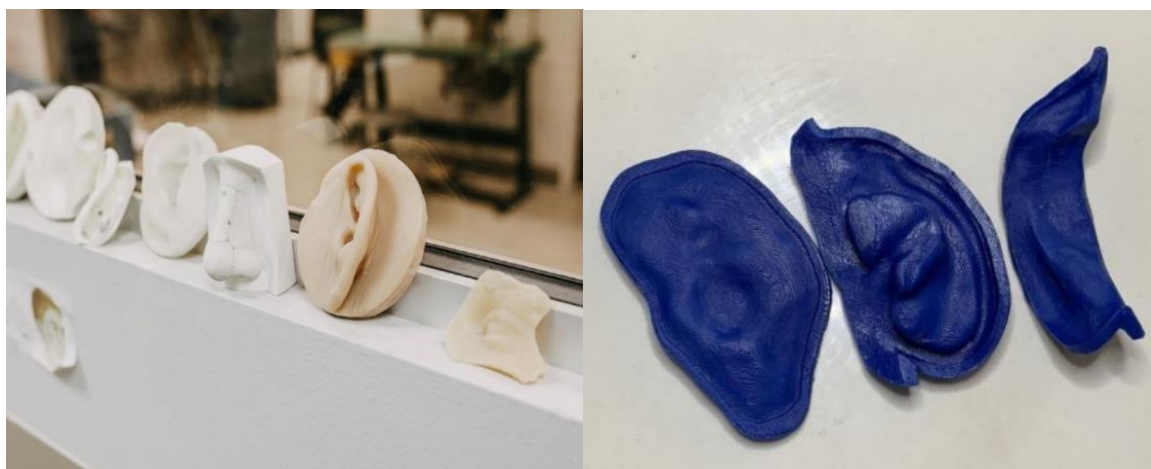
3D tlačou epitéz [6], ktorá má mnoho výhod. Hoci sa 3D tlač pri výrobe epitéz využíva na vytlačenie foriem, do ktorých sa vstrekuje silikón, stále sa pracuje na priamom vytlačení epitézy zo silikónu. Ide o zložitý proces, pretože je nutné pri výrobe zvážiť rôzne faktory, ako je napríklad teplota podložky 3D tlačiarne, teplota materiálu počas výroby, alebo aj priemer trysky, cez ktorú bude materiál dodávaný. Ďalším dôležitým faktorom je aj použitá technológia 3D tlače na výrobu epitézy, či je potrebné materiály zmiešať, aké vlastnosti má vytlačený materiál a v neposlednom rade aj to, či bol použitý biokompatibilný materiál [5]. Všetky spomínané vlastnosti je potrebné brať do úvahy, pretože majú výrazný vplyv na výslednú epitézu. Teplota silikónu ako aj teplota podložky sú kľúčové najmä kvôli tomu, že ak je teplota príliš vysoká alebo nedostatočná, je možné, že sa materiál roztečie a tým pádom výrobok nebude držať svoj stanovený tvar. Tento fakt komplikuje aj 3D tlač silikónu, a práve preto by vytlačená epitetická náhrada bola nepoužiteľná [2, 17, 18].

Tradičné epitetické náhrady sa vyrábajú z medicínskeho silikónu. Prvým krokom pri výrobe epitetických náhrad konvenčným spôsobom, je vytvorenie odtlačku časti tela, ktorú je potrebné nahradiť protézou, alebo vytvorenie odtlačku zdravej časti tela v prípade, ak je druhý bilaterálny orgán nepoškodený. Najčastejšie sa využívajú algináty, ktoré sa nanášajú na odoberanú oblasť. Po jeho vytvrdnutí sa sadra naleje do alginátového odtlačku a vznikne sadrový odliatok (obr. 1).

Po vytvrdnutí sadry sa forma alebo sadrový odliatok vyplní roztopeným voskom, z ktorého po stuhnutí vznikne prototyp zdravej alebo poškodenej časti, ktorý sa následne upravuje. Pri úprave prototypu sa prihliada na tvar epitézy. Ak sú dostupné fotografie pacienta z obdobia pred traumou, použijú sa na vytvorenie poškodenej časti tela. Ak ide o traumy, pri ktorej pacient prišiel o jeden z bilaterálnych orgánov (napr. ucho), obkreslí sa zdravé ucho na fóliu a náčrt slúži ako podklad pri modelovaní epitetickej náhrady. Prototyp sa aplikuje na pacienta, aby sa zistilo, či

sú nutné ďalšie úpravy a takisto na posúdenie komfortu alebo diskomfortu pacienta i pri nosení epitézy a či je spokojný s tvarom epitézy. Následne sa z upraveného prototypu vytvorí sadrový odliatok, ktorý slúži ako forma na epitetickú náhradu. Po vytvrdnutí sa pripraví silikón,

ktorý sa zmieša s farbivom, aby sa získal odtieň epitézy odpovedajúci odtieňu pokožky pacienta. Silikón sa potom postupne po vrstvách nanáša do vnútra odliatku tak, aby bola vrstva pri okrajoch tenšia ako v strednej časti epitetickej náhrady.



Obrázok 1 Sadrové pozitívy a epitéza vyrobená 3D tlačou.

Posledným krokom pri výrobe náhrady časti ľudského tela, sú povrchové úpravy, napríklad ručné domal'ovanie rôznych pigmentácií (pehy, znamienka, žilky, vrások), prilepenie chlpov, vlasov, mihalníc a podobne. Hotová epitetická náhrada sa nasadí pacientovi pomocou rôznych úchopov ako sú napríklad magnety, spony alebo sa využije schopnosť silikónu priľnúť k pokožke. Ak sa pacient obáva, že by mu epitetická náhrada počas dňa spadla, je možné použiť lepidlo určené pre takéto prípady. Ďalšou možnosťou uchytenia je osseointegrácia alebo pri epitézach nosa a okolia oka je možné epitézu pripevniť k okuliarom, tým pádom si pacient pri nasadení okuliarov nasadí aj epitézu [2, 12, 17].

Výroba epitéz pomocou 3D tlačiarne

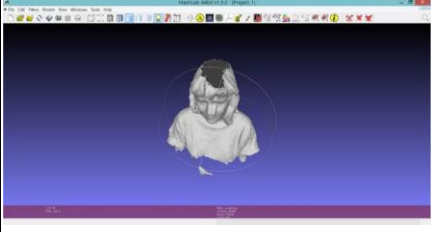
V súčasnosti sa čoraz častejšie namiesto vytvárania alginátového odtlačku využíva 3D skenovanie, ktoré umožní vytvoriť model epitézy v CAD/CAM programoch. 3D skenovanie je značne urýchl'uje tvorbu epitetickej náhrady. Pri diagnóze ako je mikrócia (čiastočná vrodená deformita ucha) alebo anócia (úplná absencia ucha) sa v súčasnosti na výrobu epitetickej náhrady ucha používa 3D alebo laserové skenovanie. [2, 12, 17, 18].

Výhodou 3D tlače pri výrobe epitéz je neinvazívnosť a bezdotyková metóda, pretože je možné naskenovať poškodenú časť tela 3D skenerom ako aj zdravú časť tela. Ďalšou výhodou je fakt, že pri 3D skenovaní nedochádza ku deformácii mäkkého tkaniva. Na zlepšenie presnosti epitetických náhrad a podobnosti končatiny pred traumou sa čoraz častejšie ako podkladové materiály na výrobu a návrh kozmetických protéz využívajú snímky z počítačo-

vej tomografie alebo magnetickej rezonancie [4, 10, 15, 19]. Následne sa získané dáta spracujú v softvéry, vyberie sa vhodný materiál ako aj 3D tlačiareň. V nasledujúcej časti predkladaného článku budú popísané jednotlivé kroky digitalizačného procesu výroby epitetickej náhrady.

Softvérová podpora návrhu epitéz

Spracovanie vstupných dát. Na zabezpečenie prirodzenej a presnej epitetickej náhrady protetický technici používajú ako podklad snímky z prístrojov ako je počítačová tomografia alebo magnetická rezonancia. Na prehliadanie a spracovanie získaných snímok sa používajú špeciálne softvéry, napr. OsiriX (Pixmeo, Švajčiarsko) alebo Mimics (Materialise, Belgicko) [1, 8]. Spracovanie skenu a vytvorenie digitálneho modelu epitetickej náhrady, tak aby bolo možné vyrobiť epitetickú náhradu pomocou 3D tlače, je potrebné spracovanie dát oblasti, ktorú je potrebné nahradiť, pretože pri skenovaní záujmovej oblasti mohli vzniknúť rôzne deformity alebo artefakty spôsobené napríklad rýchlym pohybom ruky pri skenovaní alebo zachytením rôznych objektov, nachádzajúcich sa v pozadí skenovaného objektu. Následne je možné upraviť povrch skenu na požadovaný počet trojuholníkov. Po úprave skenu nasleduje vytvorenie modelu epitetickej náhrady. V tab. 1 sú uvedené dostupné softvéry na trhu, ktoré sa využívajú pri digitalizačnom procese epitetickej náhrady. Po získaní 3D modelu z 2D alebo 3D snímok, úpravy skenu a namodelovanie epitézy je potrebné epitézu pripraviť na 3D tlač a nastaviť parametre 3D tlače (napr. rýchlosť nanášania, teplotu trysku, hrúbku vrstvy, vyhrievanie podložky) podľa zvoleného materiálu, z ktorého bude epitéza vyrobená.

Softvér	Aplikácia	Vizualizácia
ZBrush (Pixologic)	Digitálne modelovanie, vytvorenie textúry,	
MeshLab ((ISTI-CNR, Taliansko)	Úprava a spracovanie 3D objektov, spracovanie skenu	
3D Coat (Pilgrimage Studio, Ukrajina)	Tvorba 3D modelov, digitálne modelovanie, vytvorenie modelu epitézy	

Tabuľka 1 Prehľad softvérom na spracovanie skenov

Parametre 3D tlače	ABS-X	ABS -FX	Fiberflex 40D	HD PLA	PMMA
Teplota trysky [°C]	215 až 250	225 až 245	200 až 220	200 až 230	230 až 250
Teplota podložky [°C]	75 až 100	65 až 115	50 až 70	50 až 70	60
Hrúbka vrstvy [mm]	1,75 a 2,85	1,75 a 2,85	1,75 a 2,85	1,75 a 2,85	-

Tabuľka 2 Prehľad parametrov 3D tlače vybraných materiálov

AM technológia	Rozlíšenie [µm]	Rýchlosť tlače [mm/s]
FRE	30 až 700	2 až 20
Vytvrdzovanie UV žiarením a Ink – Jetting	100 až 400	Neuvádza sa
SLA – LOPP	Neuvádza sa	5
Extrúzia a vytvrdzovanie vlhkosťou	500 až 600	104

Tabuľka 3 Technológie 3D tlače silikónov

Tekuté silikónové živice (Liquid Silicone Resin/ LSR) sú využívané pri výrobe epitéz najmä kvôli ich vlastnostiam, ako je ich dostatočná kompresná sila, tvrdosť, elasticita a odolnosť voči tečeniu. Aby bolo možné silikónové živice využiť v oblasti medicíny, musia byť biokompatibilné a v prípade ak sú určené na výrobu implantátov, je potrebné, aby boli aj bioimplantovateľné. Takéto živice sa nazývajú aj tekuté silikónové živice medicínskej triedy alebo akosti. Základnými výhodami medicínskych silikónov voči ostatným elastomérom sú možnosť sterilizovať ich viacerými spôsobmi, ako gama žiarenie, elektrický lúč, Autoclave alebo ETO. Ďalej je to ich bioinertnosť v súlade s ISO 10993, ktorá sa zameriava na bezpečnosť materiálov používaných pri kontakte s ľudským telom, ich tepelná stabilita, (65C až 232C) a v neposlednom rade je to ich

flexibilita, elasticita a schopnosť rozmiestniť mechanickú silu v objeme pri extrémnych teplotách [9, 16]. V súčasnosti je čoraz viac dostupných 3D tlačiarň na výrobu silikónových modelov alebo celých produktov. V ďalšej časti predkladanej štúdie budú uvedené technológie 3D tlače silikónov (tab.3) a 3D tlačiarne vhodné na výrobu epitetických pomôcok zo silikónu.

Technológie 3D tlače silikónov

Freeform Reversible Embedding (FRE) je technológia ktorá funguje na princípe neschopnosti zmiešania sa hydrofóbných polydimetylsiloxánov (PDMS) a hydrofilnej podpory, vytvorenej z materiálu Carbopol. 3D tlač materiálu pomocou tejto technológie po vrstvách bez predprípravenej formy. Carbopol sa pri tejto technológii používa

najmä preto, že umožňuje ihle (tryske) pohybovať sa v ňom plynule, keďže je tekutý, avšak po extrúzii PDMS zatuhne. Výhody tejto technológie sú možnosť vytlačiť širokú škálu hydrofóbných biomateriálov za pomoci hydrofilnej podpory, vysoká kvalita a presnosť výtlakov, dlhá životnosť podpory z Carbopolu a taktiež nízke náklady, keďže softvéry a hardvéry využívajúci túto technológiu sú dostupné širokej verejnosti. Po ukončení 3D tlače je potrebné vytvrdzovanie výtlaku. Medzi nevýhody patrí aj fakt, že kvôli nízkemu modelu pružnosti PDMS, z nich nie je možné vytlačiť niektoré 3D tvary [10].

Vytvrdzovanie UV žiarením a Ink – Jetting je hybridný systém, ktorý sa skladá z troch piezoelektricko – pneumatických tlačových hláv pracujúcich na princípe atramentovej tlače (Ink – Jetting). Na naprogramovanie súradníc, po ktorých sa majú jednotlivé trysky pohybovať, sa používa program Slic3r. V tlačiarenskej hlavici sa nachádza chlopňa, ktorá je poväčšine otvorená, avšak pri zaznamenaní poháňacieho napätia sa zatvorí, čo zamedzí pretečeniu väčšieho množstva materiálu ako je potrebné. Hlavnými výhodami tejto hybridnej technológie sú rýchlosť tlače, ktorá je dvadsaťkrát rýchlejšia ako pri súčasných metódach využívajúcich princíp aditívnej výroby, potom je to skutočnosť, že oba systémy, aj vstrekovací a taktiež aj extrúzný, zaručujú kvalitnú tlač. Ďalšou výhodou je možnosť výroby komplexných modelov a možnosť použiť na 3D tlač materiály s rôznou viskozitou, s vysokou presnosťou a vysokou mierou priepustnosti [14].

Stereolitography – Low One – Photon Polymerization (SLA – LOPP) – kombinácia stereolitografie s jednofotónovou polymerizáciou. Technológia LOPP používa dvojzložkový silikón, ktorý je možné vytvrdzovať UV žiarením. Zložkami dvojzložkového silikónu sú silikónová živica a fotoiniciátor, ktorý je aktivovaný UV žiarením. Technológia LOPP umožňuje polymerizáciu v jednom bode pod povrchom silikónovej živice. Použitím jednofotónovej stereolitografie by to nebolo možné vykonať, pretože tá umožňuje polymerizáciu iba na povrchu živice. Výhodami tejto technológie sú schopnosť vytlačiť rôzne objemy

materiálu, možnosť nepretržitej 3D tlače navrhnutých objektov. Povrch finálneho modelu nie je potrebné po výrobe upravovať. Technológia LOPP umožňuje použiť široké spektrum materiálov, či už ide o bežné materiály alebo materiály určené na špecifický účel. Medzi nevýhody patrí zložitosť systému 3D tlačiarne, ktorá vyžaduje špeciálnu miestnosť pre 3D tlač [13].

Extrúzia a vytvrdzovanie vlhkosťou predstavuje kombinovaný systém s platformou kontrolujúcou pohyb, ďalej obsahuje kuželové trysky rôznych priemerov, uzatvárateľnú komoru, ktorá umožní udržať vlhkosť pri 3D tlači, a zvlhčovač. Zvlhčovač je potrebný na to, aby bolo vytvrdzovanie výtlaku rovnomerné. Princíp extrúzie silikónov je založený na materiálových vlastnostiach silikónu, jeho kinetickej energii vznikajúcej pri vystreknutí silikónu z trysky, ďalej závisí od oblasti modelu, na ktorú je materiál nanášaný a na výslednej hrane profilu prečnievajúcich línií vzniknutých pri extrúzii. Po nanesení materiálu vrstva po vrstve z trysky a vystavení výtlaku atmosférickej vlhkosti, sa silikón vytvrdí a stane sa pevnejším. Vďaka tvrdnutiu silikónu pri atmosférickej vlhkosti, silikónový výtlak nepotrebuje žiaden podporný materiál. Aby bolo možné odstrániť okolitý silikón a vyplniť tak medzery v plných výtlakoch, je potrebné použiť tlakovú silu. Výhodami tejto technológie 3D tlače silikónov sú fakty, že vytlačený objekt nepotrebuje podporný materiál, jednotlivé časti systému majú unikátne vlastnosti a tento systém nie je príliš chybový [19].

3D tlačiarne používané na výrobu epitéz

3D tlač epitetických náhrad sa stále rozvíja. V tejto kapitole sú uvedené 3D tlačiarne, ktoré boli použité pri priamej 3D tlači epitetických náhrad, ktoré boli použité v štúdiách alebo boli priamo poskytnuté pacientom (tab. 4). Išlo predovšetkým o kozmetické krytie defektov ako je mikrócia alebo anócia, chýbajúceho nosa, amputovanej hornej končatiny, maxillo – faciálnej deformity alebo výroba epitetickej náhrady oka.

3D tlačiareň/parametre	Technológia	Rozmery modelu [mm]	Rozlíšenie [µm]	Teplota pri tlači [°C]
3D kreator Motion (3DKREATOR, Poľsko)	FFF	200x200x190	60	15 až 35
MakerBot Replicator Z18 (MarekBot, USA)	FDM	49x56x86	100	15 až 24
DS131 (CARIMA, Korea)	DLP	130 x 73 x 130	-	20 až 30
Connex3 Objet500 (Staratasys, Izreal)	PolyJet	490 x 390 x 200	100	18 až 25
J750 (Staratasys, Izreal)	PolyJet	490 x 390 x 200	20 až 85	18 až 25
BitsfromBytes 3D Touch Printer (BitsfromBytes, USA)	FFF	18x27x20	120	-

Tabuľka 3 Technológia 3D tlače silikónov

3D Kreator Motion (3DKREATOR, Poľsko) pracuje na princípe FFF (Fused Filament Fabrication). Je to nízkonákladová 3D tlačiareň, ktorou je možné vytlačiť objekty vo vysokej kvalite. Pomocou tejto 3D tlačiarne je možné

vytlačiť výrobky z rôznych materiálov, napríklad ABS, PLA, Nylon, PET (polyetyléntereftalát), PETG (PET + modifikovaný glykol), TPU (termoplastický polyuretán, TPE (termoplastický elastomér), Laybrick, Lywood, copperFill,

Ninjabflex alebo iné kompozity. Cena 3D tlačiarne je približne \$1 900.

MakerBot Replicator Z18 (MakerBot, USA) funguje na princípe technológie FDM (Fused Deposition Modeling). MakerBot Replicator Z18 je kompatibilný s materiálmi od spoločnosti MakerBot ako napríklad MakerBot PLA – netoxická, ľahko tlačiteľná PLA, ktorá sa po vytlačení len málo ohýba a vlní, MakerBot Tough – trvácný materiál určený na vytváranie prototypov a rôzneho príslušenstva. Ďalej je kompatibilný s materiálmi od spoločnosti colorFabb – bronzeFill, copperFill a woodFill. Cena za 3D tlačiareň je \$5 499.

DS131 (CARIMA, Korea) funguje na princípe DLP (Digital Light Processing), čiže na vytvrdzovanie výtlačku využíva UV LED lampu. Pomocou 3D tlačiarne DS131 je možné tlačiť modely z rôznych fotopolymérnych živíc. Podporované typy súborov sú STL, OBJ, 3DS a AMF. 3D tlačiareň sa využíva najmä na tlač modelov zubov, foriem na odtlačky, bola použitá aj pri tlači náhrady oka počas štúdie v Soule [9].

Connex3 Objet500 (Stratasys, Izrael) funguje na princípe PolyJet. Poskytuje možnosť vytlačiť modely zložené z viacerých materiálov, aj biokompatibilných. Tlačený materiál musí byť vytvrditeľný UV svetlom. Taktiež je možné vytlačiť rôzne farebné kombinácie materiálov. Má využitie aj v protetike – epitetická náhrada ucha. Cena je okolo \$330 000.

J750 (Stratasys, Izrael) využíva technológiu PolyJet, Dokáže tlačiť termoplasty ako PLA, ABS, guma a podobne. Je možné na nej vytlačiť modely vo všetkých farbách zo vzorkovníka Pantone. Pomocou tejto tlačiarne je možné vytlačiť modely, ktoré sú zložené z viacerých materiálov, najviac však zo šiestich naraz. Je na nej možné vytlačiť aj gélovitý podporný materiál FullCure 705, ktorý je ľahko odstrániteľný. Najčastejšie sa používa v automobilovom priemysle, v medicíne pri výrobe modelov orgánov, v ortopedii a protetike alebo na vedecké účely. Bola použitá aj pri tlači epitézy nosa v Jordánsku. Cena 3D tlačiarne je približne \$250 000 [19].

BitsfromBytes 3D Touch Printer (BitsfromBytes, USA) je určená na tlač modelov a materiálov ako ABS a PLA. Pracuje na princípe FFF – Fused Filament Fabrication (v súčasnosti FDM). Cena tejto tlačiarne je približne \$3 999. Táto tlačiareň bola použitá pri tlači protetickej náhrady ucha v Mexiku [9].

Záver

V tomto článku je zhrnutý súčasný stav výroby epitetických náhrad. Výroba takýchto kozmetických protéz je časovo náročná, nákladná a namáhavá, pretože je potrebné, aby bola epitéza čo najviac detailná. Priemerný čas na výrobu epitetickej náhrady jedného ucha konvenčným spôsobom je približne pätnásť hodín. Zistilo sa, že sa v súčasnosti namiesto klasického invazívneho odoberania odtlačkov poškodenej časti ktorú je potrebné nahradiť

alebo odoberania odtlačkov zdravej časti ľudského tela v prípade bilaterálnych orgánov, ktoré by slúžili ako predloha pre epitézu, sa používa neinvazívne 3D skenovanie, či už pomocou povrchových 3D skenerov alebo pomocou prístrojov ako sú CT alebo MRI. V súčasnosti sú dostupné softvéry, v ktorých je možné spracovať dáta, upravovať, modelovať a exportovať do 3D tlačiarne. Predpokladá sa, že už v blízkej budúcnosti bude celý proces nahradený priamou 3D tlačou silikónového modelu pomocou 3D tlačiarne.

Summary

The present article provides information and possibilities of the using of 3D printing to produce epithetical prostheses, as well as it contains information on the current state of production 3D epithetical prostheses. Subsequently, the authors define software support for epithelial substitutions, where they characterize the programs enabling epithelial modeling. Sections describe the types of 3D printer technologies used in this area. They also deal with the selection of the materials from which epitheses can be made by direct 3D printing. The article provides necessary information that can be applied in the process of digitization in the production of epitheses. The content of the work is well processed and meets requirements for publication in the submitted journal.

Táto práca vznikla vďaka podpore v rámci Operačného programu Integrovaná infraštruktúra pre projekt: Centrum pre pokročilé terapie chronických zápalových ochorení pohybového aparátu (CPT ZOPA), kód ITMS2014+: 313011W410, v rámci Operačného programu Integrovaná infraštruktúra pre projekt: Otvorená vedecká komunita pre moderný interdisciplinárny výskum v medicíne (OPENMED), kód ITMS2014+: 313011V455, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja, podpore Ministerstvom školstva, vedy, výskumu a športu SR v rámci poskytnutých stimulov pre výskum a vývoj zo štátneho rozpočtu v zmysle zákona č.185/2009 Z. z. o stimuloch pre výskum a vývoj. Práca bola riešená za podpory projektu VEGA 1/0179/19, KEGA 040TUKE-4/2019 a KEGA 041TUKE-4/2019.

Literatúra

1. Bachelet, J. T. et al.: Place of 3D printing in facial epithesis. In: Journal of stomatology, oral and maxillofacial surgery. [Online]. September 2017, Vol. 118, Issue 4. s. 224 – 227. ISSN 2468-7855.
2. Bachelet, J. T., Jouan, R., Prade, V., Francisco, C., Jaby, P., & Gleizal, A. (2017). Place of 3D printing in facial epithesis. Journal of stomatology, oral and maxillofacial surgery, 118 (4), s. 224-227.
3. Cabibihan, J. J., et al.: A Method for 3 – D Printing Patient – Specific Prosthetic Arms With High Accuracy Shape and Size. In: IEEE Access. [Online]. 2018, Vol. 6. s. 25029 – 25039. ISSN 2169 – 3536.

4. Cruz, R. L., Ross, M. T., Skewes, J., Allenby, M. C., Powell, S. K., & Woodruff, M. A. (2020). An advanced prosthetic manufacturing framework for economic personalised ear prostheses. *Scientific Reports*, 10 (1), s. 1-12.
5. Folch, A., & Toner, M. (1998). Cellular micropatterns on bio-compatible materials. *Biotechnology progress*, 14 (3), s. 388-392.
6. Granström, G., Bergström, K., & Tjellström, A. (1993). The bone-anchored hearing aid and bone-anchored epithesis for congenital ear malformations. *Otolaryngology—Head and Neck Surgery*, 109 (1), s. 46-53.
7. Kim DS, Tai BL Hydrostatic support-free fabrication of three-1. dimensional soft structures. *Journal of Manufacturing Processes* 24, s. 391-396.
8. Ko, JaeSang et al.: Semi-automated fabrication of customized ocular prosthesis with three-dimensional printing and sublimation transfer printing technology. In: *Scientific Reports*. [Online]. 2019, Vol. 9. ISSN 2045-2322.
9. Liravi F, Toyserkani E: A hybrid Additive Manufacturing Method 3. for the Fabrication of Silicone Bio-structures: 3D Printing Optimization and Surface Characterization. *Materials and Design* 2017.
10. Luis, E., Liu, H., Song, J., & Yeong, W. Y. (2018). A review of medical silicone 3D printing technologies and clinical applications. *J. Orthop. Res. Ther*, 2018, s. 1-9.
11. Mohammed, M. I., Tatineni, J., Cadd, B., Peart, G., & Gibson, I. (2017, January). Advanced auricular prosthesis development by 3D modelling and multi-material printing. In *DesTech 2016: Proceedings of the International Conference on Design and Technology* (s. 37-43). Knowledge E.
12. Mussi, E., Furferi, R., Volpe, Y., Facchini, F., McGreevy, K. S., & Uccheddu, F. (2019). Ear reconstruction simulation: from handcrafting to 3D printing. *Bioengineering*, 6 (1), s. 14.
13. Nuiser, A. et al.: Direct 3D Printing of Flexible Nasal Prosthesis: Optimized Digital Workflow from Scan to Fit. In: *Journal of Prosthodontics*. [Online]. 2019, Vol. 28, Issue 1. s. 10 – 14. ISSN 1532-849X.
14. Plott J, Shih A (2017) The extrusion-based additive manufacturing of 2. moisture-cured silicone elastomer with minimal void for pneumatic actuators. *Additive Manufacturing* 17, s. 1-14.
15. Sohaib, A., Amano, K., Xiao, K., Yates, J. M., Whitford, C., & Wuerger, S. (2018). Colour quality of facial prostheses in additive manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96 (1-4), s. 881-894.
16. Suaste-Goméz, E. et al.: Developing an Ear Prosthesis Fabricated in Polyvinylidene Fluoride of Pressure and Temperature. In: *Sensors*. [Online]. 2016, Vol. 16, Issue 3. ISSN 1424-8220.
17. Watson, J., & Hatamleh, M. M. (2014). Complete integration of technology for improved reproduction of auricular prostheses. *The Journal of prosthetic dentistry*, 111 (5), s. 430-436.
18. Zardawi, F. M., Xiao, K., Van Noort, R., & Yates, J. M. (2015). Investigation of elastomer infiltration into 3D printed facial soft tissue prostheses. *Anaplastology*, 4 (139), s. 2161-1173.
19. Żmudzki, J., Burzyński, M., Chladek, G., & Krawczyk, C. (2017). CAD/CAM silicone auricular prosthesis with thermoformed stiffening insert. *Archives of Materials Science and Engineering*, 83 (1), s. 30-35.