

NÁVRH INDIVIDUÁLNEHO CHRÁNIČA UŠÍ PROSTREDNÍCTVOM CAD/CAM METÓDY

Branko Štefanovič¹, Bibiána Ondrejová¹, Lucia Bednarčíková¹, Jozef Živčák¹

¹Katedra biomedicínskeho inžinierstva a merania, Strojnícka fakulta, Technická univerzita v Košiciach, Letná 1/9, 04200, Košice, Slovensko

ABSTRAKT

Ušnica je časť ucha, ktorá môže byť fyzicky ovplyvnená rôznymi ochoreniami a mechanickými poškodeniami, ktoré môžu mať vplyv na kvalitu sluchu jedinca a kozmetický vzhľad. V súčasnosti existuje mnoho spôsobov, ako chrániť ušnicu pred vonkajšími vplyvmi, či už mechanických alebo akustickými. Prostredníctvom technológie aditívnej výroby a metódy CAD modelovania je vhodné navrhnúť a vyrobiť individuálny chránič uší pre ľudí, ktorí vykonávajú prácu alebo koníček, pri ktorom hrozí riziko traumy danej oblasti. Navrhnutá bola metodika CAD návrhu individuálneho chrániča uší, ktorý bude vyrábaný pomocou CAM technológií. Z výsledkov vyplýva, že daná metodika je praktická, presná a cenovo dostupná pre užívateľa.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

chránič uší, 3D skenovanie hlavy, CAD/CAM, Fused Deposition Modeling, Multi Jet Fusion

ÚVOD

Vďaka svojej anatómii a prominentnej polohe je ucho štruktúrou, ktorá sa bežne poškodzuje. Poranenia vonkajšieho ucha môžu byť otvorené alebo zatvorené, jednoduché a zložité tržné rany, ako aj rôzne avulzívne poranenia. Tupé poranenie vonkajšieho ucha môže spôsobiť hematóm (otohematóm) ušnice, ktorý, ak sa nelieči, môže mať za následok nekrózu chrupavky a chronické zjazvenie alebo ďalšiu tvorbu chrupavky a trvalú deformáciu („karfiolové ucho“) [1,2].

V literatúre sa ako hlavná priama komplikácia ucha karfiolu u zápasníkov uvádzajú kozmetické problémy vrátane protrúzie a deformácie ucha [3]. Okrem toho sa uvádza, že v prípadoch, keď deformácia uší pokračuje až do vonkajšieho kanála ucha, môže viesť k obštrukcii vonkajšieho kanála a možno očakávať stratu sluchu [4]. Deformácia vonkajšieho kanála ucha môže tiež viesť ku nepravidelnostiam v normálnom vylučovaní vosku, a tým zvýšiť mieru ušných infekcií [5]. Prevalencia straty sluchu hlásená zápasníkmi s karfiolovým uchom je výrazne vyššia ako táto miera medzi zápasníkmi bez karfiolového ucha [6]. Akákoľvek zmena veľkosti, tvaru, polohy a umiestnenia uší môže spôsobiť taktiež vážnu nerovnováhu v estetickej rovnováhe tváre. Samotná neprítomnosť ušnice spôsobuje závažnú nerovnováhu v kontúre tváre s dôležitými dôsledkami pre komfort pacienta. Získané ušné deformity môžu znížiť estetiku tváre a spôsobiť psychické utrpenie. Tieto zranenia sú často výsledkom traumy pracovných, voľnočasových aktivít ale najmä kontaktných športov, ako je rugby a wrestling.

V súčasnosti existuje mnoho spôsobov, ako chrániť ušnicu pred vonkajšími vplyvmi, či už mechanických alebo akustickými. Zároveň bolo vytvorených mnoho štúdií, ktoré sa venujú hodnotením efektivity chráničov uší [7-13]. Výskum je zameraný na návrh personalizovaného chrániča uší, ktorého použitie je vhodné ako pre profesionálnych športovcov, tak aj pre ľudí, ktorým hrozí riziko fyzického poranenia uší pri vykonávaní ich práce, športu, či voľnočasových aktivít. Tento návrh je založený na použití moderných technológií ako je 3D skenovanie, CAD modelovanie a aditívna výroba. Hlavným cieľom tohto výskumu vytvoriť personalizovanú pomôcku pre konkrétnu osobu, čím sa zabezpečí jej presnosť a tým aj efektívnosť pri užívaní.

MATERIÁLY A METÓDY

3D SKENOVANIE SUBJEKTU

Metodika návrhu personalizovaného chrániča pozostávala zo získania virtuálneho pozitívu hlavy a jeho následnej úpravy za účelom vytvorenia 3D modelu prototypu. Pozitív bol odobraný pomocou profesionálneho 3D skenera Artec Eva (Artec 3D, Luxembourg, Luxembourg) (Obrázok 1). Skener má rozlíšenie 0,5 mm a maximálnu presnosť 0,1 mm [14]. Subjekt sa zaznamenáva v reálnom čase v softvéri Artec Studio 13 Professional (Artec 3D, Luxembursko, Luxembursko). Subjekt mal počas skenovania na hlave nasadenú čiapku (plavecká čiapka), ktorá tesne priliehala k hlave, aby na získanom 3D skene neboli viditeľné vlasy. Prítomnosť vlasov na 3D modeli má výrazný vplyv na tvarové a rozmerové parametre hlavy. Počas skenovania subjekt sedel na stoličke, čo bolo dôležité pre udržanie stability subjektu. Skenovanie trvalo približne 4 minúty bez vykázania akejkoľvek chyby.

CAD NÁVRH INDIVIDUÁLNEHO CHRÁNIČU UŠÍ

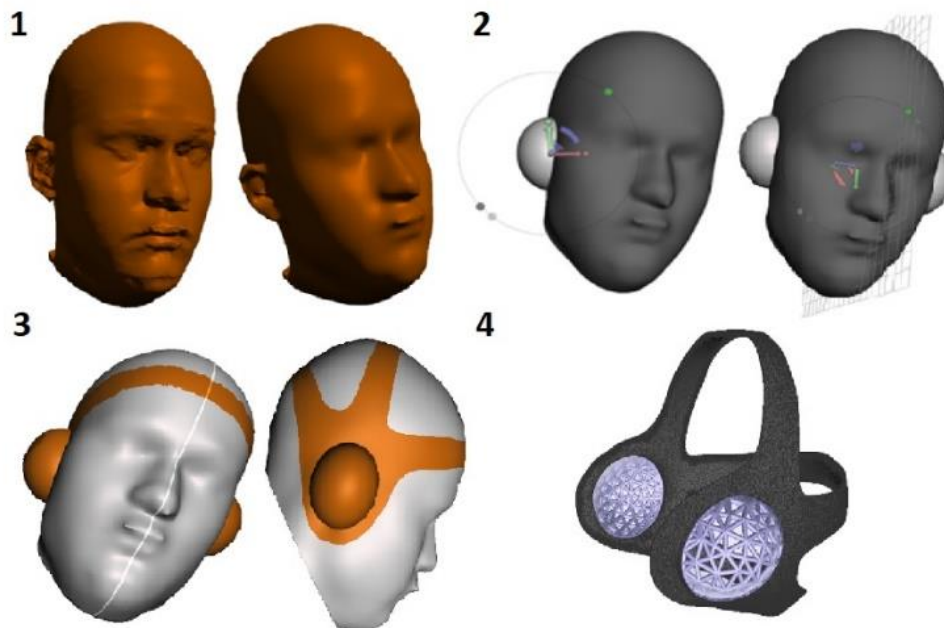
Na vytvorenie 3D modelu prototypu chrániča bol použitý CAD softvér Autodesk Meshmixer (Autodesk Inc., San Rafael, CA, USA). Virtuálny pozitív sa v prvom kroku vyhladil, nepotrebné oblasti boli odstránené a oblasti ušnic sa nahradili ovoidmi (Obrázok 1-1,2), keďže tieto boli považované za najvhodnejší tvar vonkajšej štruktúry chrániča pokrývajúceho ušnicu. Rozmery ovoida sú závislé od rozmerov a tvaru vonkajšieho ucha. Najväčší priemer ovoidu by nemal byť menší ako dĺžka ucha. Je tiež dôležité, aby najväčší priemer ovoidu nebol oveľa väčší ako dĺžka ucha, pretože potom sa samotný chránič zväčší, čo môže spôsobiť diskomfort a dislokáciu pri používaní.

Náčrt kontaktných plôch chrániča bol vytvorený priamo na virtuálnom pozitíve (Obrázok 1-3). Pre tento model chrániča boli zvolené 4 uchytania. Navrhli sa 3 pevné uchytania, ktoré sú priamou súčasťou modelu a to jedno vo frontálno-superiórnej (čelová kosť) oblasti hlavy a dva v dorzálnej oblasti hlavy (cez oblasť temennej kosti) a jedno uchytanie pre popruh vo frontálno-inferiórnej oblasti hlavy (v oblasti krku pod bradou). Šírka uchytania bola zvolená 3 cm, z dôvodu dostatočnej pevnosti chrániča a z dôvodu zväčšenia jej plochy, aby sa pôsobiaca sila rozložila rovnomerne. Zaoblenie medzi uchytaniami bolo aplikované na elimináciu koncentrácie napätí v rohoch modelu chrániča. Hrúbka steny modelu bola zvolená 3 mm.

Následovne sa upravila vonkajšia štruktúra ovoidov (Obrázok 1-4). Cieľom bolo vytvoriť perforovaný vzor čo zlepši ventiláciu a zároveň odľahčí model. Dizajn vzoru perforácií je možné prispôbiť potrebám užívateľa. Hrúbka vzoru bola zvolená 3 mm.

Ďalším krokom je pridanie uchytenia vo frontálno-inferiórnej oblasti hlavy, ktoré slúži na upevnenie remeňa. Tieto uchytenia boli navrhnuté v parametrickom CAD softvéri SOLIDWORKS (Dassault Systems, Waltham, USA) a importované do softvéru Meshmixer, kde boli spojené s modelom chrániča. Tieto upevňovacie prvky sú umiestnené v najnižšom bode chrániča, čo najbližšie ku brade. Remeň sa obvykle skladá z dlhého pásu látky alebo kože, ktorý sa môže regulovať pomocou kovového prackového mechanizmu. Remeň slúži na upevnenie chrániča na hlave, aby sa počas fyzickej aktivity subjektu nedislokoval. Šírka remeňa sa pohybuje medzi 1 - 2,5 cm.

Po finálnej vizuálnej kontrole modelu chrániča (Obrázok 3) sa 3D model exportuje do formátu STL kompatibilného so softvérimi vhodnými na prípravu 3D modelov pre aditívnu výrobu.



Obrázok 1 Návrh individuálneho chrániču uší: 1) úprava 3D pozitívu, 2) polohovanie ovoidov, 3) náčrt pomôcky, 4) aplikácia perforovaného dizajnu



Obrázok 2 Finálny model chrániču uší.

ADITÍVNA VÝROBA

Na výrobu daného chrániča boli zohľadnené 2 metódy aditívnej výroby: FDM (Fused Deposition Modeling) a MJF (Multi Jet Fusion) a 2 typy polymérov z mechanického hľadiska vhodných na výrobu

protetických a ortotických pomôcok: PA12 (polyamid) a PETG (polyetyléntereftalát). Pri výpočte nákladov na výrobu modelu je potrebné zohľadniť niekoľko faktorov vrátane veľkosti modelu, hustoty tlače, ceny za návrh a modelovanie, nákladov na materiál a režijných nákladov. V prípade upravenia skenu a modelovania chrániča, ktoré trvalo približne hodinu, bude cena za modelovanie tejto pomôcky približne 25 €. Objem výsledného modelu pri nastavenej 100% výplni dosahuje 115 cm³. Hmotnosť modelu a náklady na vytlačenie modelu súvisia s použitou technológiou tlače. V prípade MJF tlače s použitím materiálu PA12, ktorého cena sa pohybuje okolo 50 € za kilogram a hustota je 1,01 g/cm³, výsledná hmotnosť modelu dosahuje 116 gramov. Takže náklady na materiál sú približne 5,8 €. V prípade FDM tlače s použitím materiálu PETG, ktorého cena sa pohybuje okolo 25 € za kilogram a hustota je 1,27 g/cm³, výsledná hmotnosť modelu je 146 gramov. Takže náklady na materiál sú približne 3,65 €. Ak sa zohľadnia režijné náklady vo výške 20%, výsledná cena na výrobu a návrh modelu s použitím technológie HP MJF dosahuje 37 € a s použitím technológie FDM 34,4 € (Tabuľka 1).

Tabuľka 1 Cenová kalkulácia zvolených typov aditívnej výroby.

Typ tlače	MJF	FDM
Hodnota modelovania	25 €	
Cena materiálu za 1 kg	50 €	25 €
Hustota modelu	1,01 g/cm ³	1,27 g/cm ³
Objem výsledného modelu	115 cm ³	
Výsledná hmotnosť modelu	116 g	146 g
Náklady na materiál	5,8 €	3,65 €
Režijné náklady	20 %	
Výsledná suma	37 €	34,4 €

VÝSLEDKY

Hlavným zámerom tejto práce bolo navrhnuť individuálny chránič uší proti nárazom pomocou CAD softvéru, ktorý je možné vyrobiť technológiou 3D tlače. Výsledkom je vytvorený 3D model individuálneho chrániča uší, ktorý slúži na ochranu oblasti uší proti nárazom a iným externým fyzickým vplyvom. Tento návrh bol založený na použití moderných technológií, ako je 3D skenovanie, CAD modelovanie a 3D tlač. 3D skenovanie bolo vykonané pomocou profesionálneho 3D skenera Artec Eva. Viaceré štúdie boli robené na overenie povrchovej presnosti 3D modelov vygenerovaných týmto skenerom, kde výsledkom bolo, že tento skener je vhodný na odoberanie 3D pozitívov ľudského tela [15,16]. Chránič bol modelovaný v CAD softvéri Autodesk Meshmixer, ktorý je voľne stiahnuteľný, má funkcie vhodné na návrh individuálnych protetických a ortotických pomôcok zariadení a práca s ním je jednoduchá a intuitívna [17].

Na výrobu daného chrániča boli zohľadnené 2 metódy aditívnej výroby - FDM alebo MJF. FDM je metóda tlače, ktorá pracuje s termoplastickými materiálmi, ktoré sú zohrievané a následne nanášané na seba vrstva po vrstve. Tento proces umožňuje výrobu chráničov rýchlo a za relatívne nízke náklady, ale úroveň povrchovej presnosti a kvality povrchu môže byť nižšia v porovnaní s inými metódami tlače. MJF je technológia aditívnej výroby založená na polymérovej práškovej výrobe, ktorá používa kombináciu infračerveného žiarenia a špeciálneho atramentu ako spojiva na výrobu modelov. Využitím tejto technológie je možné vyrábať diely s komplikovanými štruktúrami a tvarmi, čo je schopnosť dôležitá na výrobu nami navrhnutého chrániču uší.

Cena chrániča bola stanovená na základe nákladov na materiál a modelovanie, pričom boli zohľadnené dva rôzne typy aditívnej výroby - MJF a FDM. Výsledná cena bola určená ako súčet ceny za materiál a cenu za CAD modelovanie, ktoré boli násobené režijnými nákladmi vo výške 20 %. V prípade použitia technológie MJF je výsledná cena 37 € a pri použití technológie FDM je výsledná cena nižšia a dosahuje 34,4 €.

Z výsledkov nami navrhnutej kalkulácie nákladov na výrobu daného modelu môžeme stanoviť, že z finančného hľadiska je výroba oboma technológiami približne rovnaká, avšak tieto hodnoty sa môžu líšiť napríklad vzhľadom na cenník oficiálneho dodávateľa, možný postprocessing modelov, či počtu vyrobených modelov. V poslednom prípade má oproti FDM výhodu technológia MJF, keďže táto technológia výroby je určená na sériovú 3D tlač a teda dokáže vyprodukovať viac modelov počas 1 procesu výroby.

ZÁVER

Hlavným prínosom tohto výskumu je, že táto pomôcka je vytvorená na mieru pre konkrétnu osobu, čím sa zabezpečí jej presnosť a tým aj efektívnosť. Vyrobenie tejto ortotickej pomôcky prostredníctvom technológie aditívnej výroby zaručuje rýchlu výrobu, povrchovú presnosť a zároveň nízke náklady na výrobu individuálnych modelov. Tento výskum je vhodné doplniť o FEM analýzu 3D modelu danej pomôcky, podľa ktorej by bol dizajn pomôcky topograficky optimalizovaný.

POĎAKOVANIE

Túto prácu podporila Agentúra na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-19-0290. Túto prácu podporila Agentúra na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-22-0340. Tento výskum bol podporený projektom KEGA 044TUKE-4/2022 Implementácia progresívnych technológií do protetického a ortotického vzdelávania a podpora integrácie s praxou. Tento výskum bol podporený projektom VEGA 1/0599/22 Návrh a biomechanická analýza personalizovaných nástrojov pre artroskopické aplikácie.

LITERATURA

- [1] NOJOUMI, Amir a Brian M. WOO. Management of Ear Trauma. *Oral and Maxillofacial Surgery Clinics of North America* [online]. 2021, 33(3), 305-315. ISSN 10423699. Dostupné z: doi:10.1016/j.coms.2021.04.001
- [2] KOLODZYNSKI, Michail N., Moshe KON, Silvan EGGER a Corstiaan C. BREUGEM. Mechanisms of ear trauma and reconstructive techniques in 105 consecutive patients. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology* [online]. 2017, 274(2), 723-728. ISSN 0937-4477. doi:10.1007/s00405-016-4299-4
- [3] JONES, Stephen EM a Suresh MAHENDRAN. Interventions for acute auricular haematoma. *Cochrane Database of Systematic Reviews* [online]. ISSN 14651858. doi:10.1002/14651858.CD004166.pub2
- [4] YOTSUYANAGI, Takatoshi, Ken YAMASHITA, Satoshi URUSHIDATE, Katsunori YOKOI, Yukimasa SAWADA a Souichiro MIYAZAKI. Surgical correction of cauliflower ear. *British Journal of Plastic Surgery* [online]. 2002, 55(5), 380-386. ISSN 00071226. doi:10.1054/bjps.2002.3854
- [5] MACDONALD, D J M. Case presentation: a novel way of treating acute cauliflower ear in a professional rugby player. *British Journal of Sports Medicine* [online]. 2005, 39(6), e29-e29. ISSN 0306-3674. doi:10.1136/bjism.2004.015115
- [6] NOORMOHAMMADPOUR, Pardis, Mohsen ROSTAMI, Ruhollah NOURIAN, Mohammad Ali MANSOURNIA, Saeed SAROUGH FARAHANI, Farzin FARAHBAKHSH a Ramin KORDI. Association Between Hearing Loss And Cauliflower Ear in Wrestlers, a Case Control Study Employing Hearing Tests. *Asian Journal of Sports Medicine* [online]. 2015, 6(2). ISSN 2008-000X. doi:10.5812/asjism.6(2)2015.25786

- [7] MARSHALL, S. W. Evaluation of protective equipment for prevention of injuries in rugby union. *International Journal of Epidemiology* [online]. 2004, 34(1), 113-118. ISSN 1464-3685. doi:10.1093/ije/dyh346
- [8] DANESHVAR, Daniel H., Christine M. BAUGH, Christopher J. NOWINSKI, Ann C. MCKEE, Robert A. STERN a Robert C. CANTU. Helmets and Mouth Guards: The Role of Personal Equipment in Preventing Sport-Related Concussions. *Clinics in Sports Medicine* [online]. 2011, 30(1), 145-163. ISSN 02785919. doi:10.1016/j.csm.2010.09.006
- [9] CECCHI, Nicholas J., Theophil J. OROS, Derek C. MONROE, Gianna M. FOTE, Wyatt X. MOSCOSO, James W. HICKS a David J. REINKENSMEYER. The Effectiveness of Protective Headgear in Attenuating Ball-to-Forehead Impacts in Water Polo. *Frontiers in Sports and Active Living* [online]. 2019, 1. ISSN 2624-9367. doi:10.3389/fspor.2019.00002
- [10] TJØNNDAL, Anne, Reinhard HAUDENHUYSE, Bas DE GEUS a Luk BUYSE. Concussions, cuts and cracked bones: A systematic literature review on protective headgear and head injury prevention in Olympic boxing. *European Journal of Sport Science* [online]. 2022, 22(3), 447-459. ISSN 1746-1391. doi:10.1080/17461391.2021.1872711
- [11] FRIZZELL, Erin R A, Graham P ARNOLD, Weijie WANG, Rami J ABBOUD a Tim S DREW. Comparison of branded rugby headguards on their effectiveness in reducing impact on the head. *BMJ Open Sport & Exercise Medicine* [online]. 2018, 4(1). ISSN 2055-7647. doi:10.1136/bmjsem-2018-000361
- [12] KWAK, Chanbeom a Woojae HAN. The Effectiveness of Hearing Protection Devices: A Systematic Review and Meta-Analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health* [online]. 2021, 18(21). ISSN 1660-4601. doi:10.3390/ijerph182111693
- [13] ZIAYI GHAHNAVIEH, Niloofar, Siamak POURABDIAN a Farhad FOROUHARMAJD. Protective earphones and human hearing system response to the received sound frequency signals. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control* [online]. 2018, 37(4), 1030-1036. ISSN 1461-3484. doi:10.1177/1461348418765958
- [14] STEFANOVIC, Branko, Monika MICHALIKOVA, Lucia BEDNARCIKOVA, Marianna TREBUNOVA a Radovan HUDAK. Arm and Forearm Scanning Methodology for the Development of an Orthotic Device for Tetraplegic Patients. In: *Proceedings of 3DBODY.TECH 2020 - 11th International Conference and Exhibition on 3D Body Scanning and Processing Technologies, Online/Virtual, 17-18 November 2020* [online]. Ascona, Switzerland: Hometrica Consulting - Dr. Nicola D'Apuzzo, 2020, 2020-11-17, - . ISBN 9783033082090. doi:10.15221/20.06
- [15] STEFANOVIC, Branko, Bibiana ONDREJOVA, Lucia BEDNARCIKOVA, Teodor TOTTH a Jozef ZIVCAK. Comparison of Optical Handheld 3D Scanners Suitable for Prosthetic and Orthotic Applications. In: *Proceedings of 3DBODY.TECH 2022 - 13th International Conference and Exhibition on 3D Body Scanning and Processing Technologies, Lugano, Switzerland, 25-26 October 2022* [online]. Ascona, Switzerland: Hometrica Consulting - Dr. Nicola D'Apuzzo, 2022, 2022-10-25, - . ISBN 9783033095205. doi:10.15221/22.06
- [16] ROSICKY, Jiri, Ales GRYGAR, Petr CHAPCAK, Tomas BOUMA a Jan ROSICKY. Application of 3D Scanning in Prosthetic and Orthotic Clinical Practice. In: *Proceedings of the 7th International Conference on 3D Body Scanning Technologies, Lugano, Switzerland, 30 Nov.-1 Dec. 2016* [online]. Ascona, Switzerland: Hometrica Consulting - Dr. Nicola D'Apuzzo, 2016, 2016-11-30, s. 88-97. ISBN 9783033059818. doi:10.15221/16.088
- [17] ŠTEFANOVIČ, Branko, Monika MICHALÍKOVÁ, Lucia BEDNARČÍKOVÁ, Marianna TREBUŇOVÁ a Jozef ŽIVČÁK. Innovative approaches to designing and manufacturing a prosthetic thumb. *Prosthetics & Orthotics International* [online]. 2021, 45(1), 81-84. ISSN 0309-3646. doi:10.1177/0309364620949717