



SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
MATERIÁLOVOTECHNOLOGICKÁ FAKULTA SO SÍDLOM V TRNAVE

Ing. Ivan Molnár

Autoreferát dizertačnej práce

**Výskum návrhu a výroby ortopedickej pomôcky
s využitím aditívnej výroby**

na získanie akademického titulu: doktor (philosophiae doctor, PhD.

v doktorandskom študijnom programe: Strojárske technológie a materiály

v študijnom odbore: 5.2.7 Strojárstvo

Forma štúdia: denná

Miesto a dátum: V Trnave 31.5.2021



Dizertačná práca bola vypracovaná na Katedre obrábania a tvárnenia na Ústave výrobných technológií Materiálovotechnologickej fakulty so sídlom v Trnave Slovenskej technickej univerzity v Bratislave.

Predkladateľ: Ing. Ivan Molnár
Ústav výrobných technológií
Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave, Slovenská
technická univerzita v Bratislave
Jána Bottu 2781/25
917 24 Trnava

Školiteľ: doc. Ing. Ladislav Morovič, PhD.
Ústav výrobných technológií
Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave, Slovenská
technická univerzita v Bratislave
Jána Bottu 2781/25
917 24 Trnava

Oponenti:

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa:

na:

Prof. Ing. Miloš Čambál, CSc.
Dekan fakulty

OBSAH

ÚVOD	4
1 PRIESKUM SÚČASNÉHO STAVU RIEŠENEJ PROBLEMATIKY	5
1.1 3D digitalizácia a aditívna výroba pri návrhu a výrobe ortopedických pomôcok... 5	
1.1 Návrh a výroba individuálnych ortopedických pomôcok v súčasnosti	9
1.1.1 Návrh a výroba sadrovej ortopedickej pomôcky	11
1.1.2 Návrh a výroba „ľahkej sadrovej“ ortopedickej pomôcky.....	12
1.1.3 Návrh a výroba pomocou 3D digitalizácie a CNC frézovania	13
1.1.4 Návrh a výroba pomocou 3D digitalizácie a aditívnej výroby	15
2 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE	17
3 METODIKA CAD NÁVRHU A ADITÍVNEJ VÝROBY ORTOPEDICKEJ POMÔCKY.....	18
3.1 CAD návrh 3D modelu ortézy trupu	21
3.2 Voľba vhodného materiálu ortézy trupu.....	22
4 NÁVRH A VÝROBA JEDNOÚČELOVEJ 3D TLAČIARNE.....	23
5 NÁVRH, REALIZÁCIA A VYHODNOTENIE EXPERIMENTOV	25
5.1 Vplyv rýchlosti výrobného procesu FDM na tvarovú a rozmerovú presnosť	25
5.2 Vplyv vybraných parametrov procesu metódy FDM na výrobný čas.....	31
6 PRÍNOSY DIZERTAČNEJ PRÁCE	35
ZÁVER.....	37
ZOZNAM BIBLIOGRAFICKÝCH ODKAZOV	38
ZOZNAM PUBLIKAČNEJ ČINNOSTI	39

ÚVOD

V súčasnej dobe sa technológia aditívnej výroby stále viac využíva v rôznych odvetviach priemyslu, pričom stále rozsiahlejšie uplatnenie si utvára práve v oblasti zdravotníctva. Od začiatkov tejto technológie, teda od prvej výroby prototypov vo fáze vývoja budúcich produktov sa v súčasnosti dostávame do návrhu a výroby finálnych výrobkov, určených pre využitie v praxi. Toto je výsledkom stále sa rozvíjajúcej oblasti metód aditívnej technológie, v ktorých dochádza k zlepšeniu a teda k zvýšenej produktivite procesu výroby, parametrov výrobných zariadení ako aj vývoju nových druhov materiálov pre výrobu súčiastok. Vďaka tejto skutočnosti sa technológia aditívnej výroby stáva stále viac využívanou a rozširuje svoje uplatnenie v praxi.

Dizertačná práca sa zaoberá výskumom návrhu a výroby ortopedickej pomôcky využitím technológie aditívnej výroby. Teoretická časť práce pozostáva z prieskumu súčasného stavu riešenej problematiky. Vysvetľuje význam pojmov aditívnej výroby (Rapid Prototyping) a 3D digitalizácie, ich princípy a využitie v oblasti zdravotníctva. Ďalej práca pojednáva s metódami a materiálmi aditívnej výroby ako aj s metódami 3D digitalizácie využívanými v oblasti zdravotníctva. Skúmaná je problematika návrhu a výroby ortopedických pomôcok v lekárskej praxi na Slovensku a vo svete.

Cieľom dizertačnej práce je vytvorenie metodiky CAD návrhu a aditívnej výroby zvolenej lekárskej pomôcky. Výsledkom má byť jednoduchý, rýchly a teda efektívny proces CAD návrhu a aditívnej výroby zvolenej pomôcky s ohľadom na jej funkčnosť, vhodnosť na dané použitie a praktickú aplikáciu. Z daného dôvodu sa práca v praktickej časti zaoberá voľbou vhodných parametrov procesu aditívnej výroby prostredníctvom kombinácie týchto parametrov a ich vyhodnotením pomocou realizovaných experimentov.

Nakoľko je práca riešená v spolupráci so zdravotníckymi spoločnosťami zaoberajúcimi sa práve ortotikou a protetikou, týmto je zabezpečené aj následné využitie a aplikácia získaných poznatkov v zdravotníckej praxi. Jednotlivé návrhy a zhotovenia ortopedickej pomôcky v práci sú konzultované s odborníkmi v danej oblasti, ortopedickými technikmi, čo je prínosné pre zabezpečenie funkčnosti takto navrhutej pomôcky.

Vzhľadom na skutočnosť, že na samotnú dizertačnú prácu sa požaduje utajenie, tak autoreferát poskytuje iba stručné vysvetlenie problematiky, ktorou sa práca zaoberá, bez uvedenia konkrétnych výsledkov jednotlivých experimentov.

1 PRIESKUM SÚČASNÉHO STAVU RIEŠENEJ PROBLEMATIKY

Prvá kapitola pojednáva o prieskume súčasného stavu riešenej problematiky doma i v zahraničí. Bližšie popisuje oblasť návrhu a výroby ortopedických pomôcok využitím technológií **3D digitalizácie** a **aditívnej výroby** a následne aj samotné **postupy** jednotlivých spôsobov **návrhu** a **výroby** individuálnych ortopedických pomôcok v súčasnosti.

1.1 3D digitalizácia a aditívna výroba pri návrhu a výrobe ortopedických pomôcok

Ortopédia je odbor medicíny zaoberajúci sa na **pohybovým ústrojenstvom človeka**, konkrétne **diagnostikou, liečbou, prevenciou, výskumom a posudzovaním. Lieči ochorenia a zranenia svalov, kostí, kĺbov šliach a väzov.** Tento pojem vychádza z dvoch starých gréckych slov, ktorými sú orthos (priamy, rovný, bez deformácie) a paidos (dieťa). Ortopédia sa postupom času vyvinula tak, aby bola schopná riešiť diagnostiku a liečbu všetkých stavov a úrazov pohybového aparátu, medzi ktoré patria:

- degeneratívne ochorenia,
- traumy a zlomeniny,
- vrodené problémy,
- nádory,
- športové úrazy.

Zdravotnícky pracovníci, ktorý sa špecializujú na oblasť ortopédie sa nazývajú **ortopédi**. Používajú rôzne metódy liečby a rehabilitácie ako aj chirurgické zákroky. Liečba je zameraná na širokú škálu úrazov, ktorými sú napr.:

- zlomeniny a vyklbenia,
- natiahnuté väzivá,
- natiahnuté svaly,
- poranenia šliach,
- bolesti krížov, krku a chrbta,
- skolióza, artritída a osteoporóza,
- svalová dystrofia a detská mozgová obrna,
- odchýlky prstov na rukách a nohách,
- nerovnomerná dĺžka nôh a abnormality rastu.

Pri určovaní anamnézy zodpovedá pacient na všetky otázky ortopéda, ktoré sa môžu týkať jeho zdravotného stavu a spôsobovať zdravotné problémy, teda jeho zamestnanie alebo športové aktivity. Následne ortopéd preveruje symptómy a predchádzajúce lekárske záznamy pacienta, aby získal čo najpresnejšie informácie o jeho zdravotnom stave. Následne pristúpi k fyzikálnemu vyšetreniu, pri ktorom hodnotí držanie tela pacienta, rozsah jednotlivých pohybov (predklony, záklony, úklony do strán alebo drepy) ako aj rozsah pohybu jednotlivých kĺbov uchopením pacienta za končatiny a ich naťahovaním. Po takomto vyšetrení obvykle dochádza k diagnostike pacienta pomocou rôznych metód 3D digitalizácie ako CT, MRI alebo aktívna triangulácia využitím optického 3D skenera.

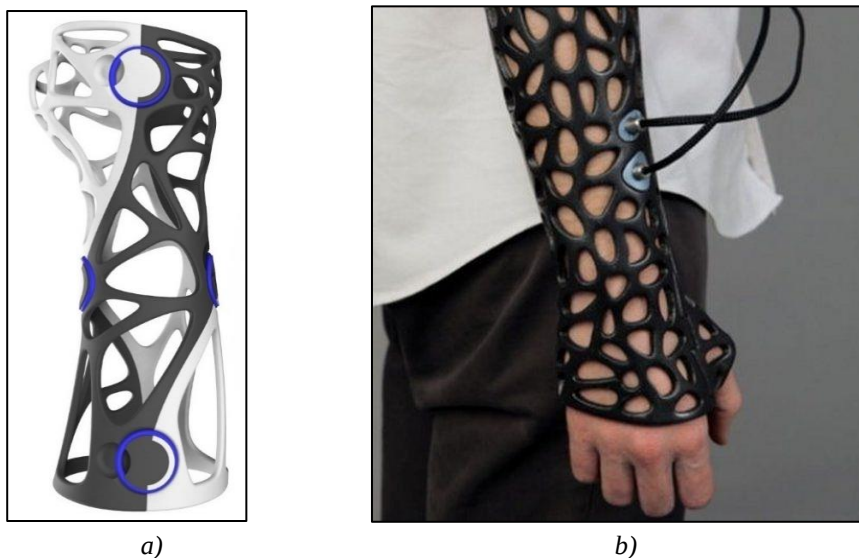
Ortopedické pomôcky sú jedným z najčastejších spôsobov **liečby** v oblasti ortopédie. Ide o zdravotnícke pomôcky, ktoré pomáhajú pri **liečbe** alebo **kompenzácii zranení, odchýlení** a získaných alebo vrodených deformácií **pohybového ústrojenstva**. Úlohou týchto pomôcok je zlepšenie pohyblivosti, zníženie bolesti a predchádzanie zhoršovaniu aktuálneho zdravotného stavu. Svojou funkciou zabezpečujú fixáciu, stabilizáciu alebo korekciu. Tieto pomôcky sú navrhované a vyrábané sériovo alebo na mieru (individuálne) konkrétneho pacienta. Výrobou týchto ortopedických pomôcok sa zaoberá **ortopedická technika** (Neoprot 2017).

V rámci návrhu a výroby využitím **3D digitalizácie** a **aditívnej výroby** individuálnych ortopedických pomôcok sa jedná o aditívnu výrobu ortéz prevažne na horné, dolné končatiny a trupu. Nejedná sa však o štandardizované postupy, ktoré by boli bežne v zdravotníctve využívané, práve naopak, jedná sa prevažne o výskum a vývoj v danej oblasti a návrh takých procesov a postupov, ktoré by boli jednoduché a efektívne so zohľadnením všetkých atribútov, ktoré táto technológia v danej oblasti ponúka predovšetkým samotným pacientom, ale v neposlednom rade aj lekárom.

Veľkou výhodou v aditívnej výrobe je možnosť výroby akéhokoľvek dizajnu a jeho rýchlej zmeny súvisiacej s okamžitým zahájením výroby. V súčasnej dobe je dopyt po takých ortopedických a protetických pomôckach, ktoré sú vhodnejšie pre pacienta nielen zo zdravotných dôvodov, pohodlia a funkčnosti, ale aj pre ich moderný vzhľad a jedinečnosť, čo sa prejavuje predovšetkým u detských pacientov (Mok et al. 2016).

Často aplikované ortopedické pomôcky sú ortézy hornej končatiny. Tieto sú vyrábané z dvoch častí pre pohodlné nasadenie na ruku užívateľa. Takéto ortézy (Obr. 1) majú mnoho výhod ako napr. vzdušnosť, vodeodolnosť, nízka hmotnosť a tým pohodlie pre užívateľa

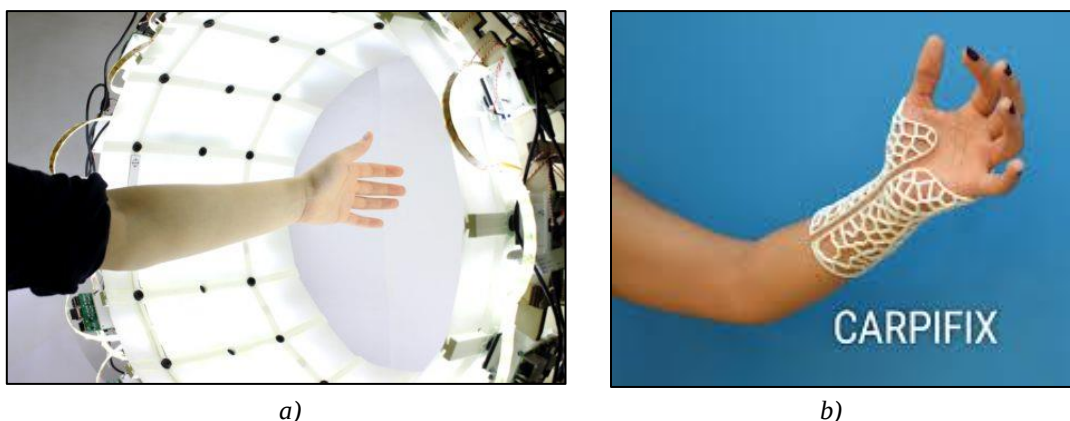
a pod. Postupne sa vyvíjajú nové dizajnové návrhy a výrobné postupy týchto pomôcok pričom sú spájané aj s prístrojmi ako ultrazvuk, ktorého pôsobením v určenom mieste dochádza k rýchlejšiemu hojeniu zlomeniny a tým sa urýchľuje proces hojenia a skracuje čas potrebný na nosenie ortopedickej pomôcky (Dodziuk 2016), (Mok et al. 2016).



Obr. 1 Ortopedické pomôcky:

a) 3D ortéza na ruku Xkelet (Xkelet 2018), b) 3D ortéza s ultrazvukom (Techbox 2014).

Medzi spoločnosti zaoberajúce sa vývojom v oblasti návrhu a výroby ortopedických pomôcok patrí Vectory3 (Obr. 2). Táto spoločnosť vyvinula v rámci projektu Curatio špeciálny kruhový skener, ktorý dokáže skenovať objekty v rozsahu 360° za niekoľko sekúnd, pričom využitie nachádza práve na skenovanie horných končatín pre získanie skenu pacientovej ruky, na základe ktorého je následne vyrobená ortéza pomocou aditívnej výroby (Dodziuk 2016).



Obr. 2 Projekt Curatio zahŕňa: a) 3D skener Curatio, b) 3D dlaha na ruku (Vectory3 2017).

Mexická spoločnosť MediPrint, ktorá sa zaoberá vývojom zdravotníckych potrieb a ich výrobou pomocou 3D tlače, navrhla ortézu hornej končatiny NovaCast. Jedná sa o ortézu hornej

končatiny vyrábanú aditívnou technológiou FDM (Fused Deposition Modeling), kde CAD návrh opäť pri skenovaní pacientovej ruky optickým skenerom a jeho následnou úpravou pomocou počítačového softvéru. Následne je možné upraviť tvar ortézy podľa ruky konkrétneho pacienta (3D Print 2016).

V rámci návrhu a výroby ortéz trupu sa zatiaľ prevažne vyvíjajú a navrhujú efektívne procesy návrhu a výroby daných pomôcok, tiež sa však nejedná o štandardné a zavedené postupy. Výroba týchto ortéz aditívnou technológiou môže nielen zjednodušiť výrobný proces, ale ho aj urýchliť. Ďalšou veľkou výhodou využitia CA systémov je rýchla editácia tvaru a rozmeru pomôcky ako aj následné zahájenie výroby bez potreby nástrojov či prípravkov (Eltorai et al. 2015, Dodziuk 2016).

Spoluprácou organizácie WASPmedical (Obr. 3) a lekára Lelia Leonciniho sa pracuje na výskume návrhu a výroby skoliotických ortéz. Tieto sú vyrábané technológiou FDM – Fused Deposition Modeling z materiálu s názvom Shogun filament. Jedná sa o špeciálne upravený PLA materiál, vlastnosťami podobný PE (Polyetylénu), ktorý sa v súčasnosti využíva na výrobu ortopedických pomôcok. Shogun filament je taktiež odolávajúci pomerne vysokým teplotám (WASP 2017).



Obr. 3 Skoliotický korzet vyrobený technológiou FDM (WASP 2016).

V ďalšom prípade v roku 2015 vytvoril tím čínskych výskumníkov zo spoločnosti Xia Feng Spinal Deformity prvú skoliotickú ortézu vyrobenú aditívnou technológiou v Číne. Na projekte pracovali výskumní pracovníci z národného výskumného centra pre rehabilitáciu v Pekingu, ktorý sa rozhodli vytvoriť 3D tlačnú pomôcku aditívnou technológiou práve kvôli mnohým výhodám, ktoré z takéhoto riešenia vyplývajú (3ders 2015).

Spoločnosť UNYQ špecializujúca sa na návrh a výrobu ortopedických a protetických pomôcok v spolupráci s technologickou spoločnosťou Intel vytvorili skoliotickú ortézu so zameraním na minimalizáciu spotreby materiálu pri zachovaní funkčnosti ortopedickej pomôcky. Táto obsahuje vstavané malé počítačové moduly, vyvinuté spoločnosťou Intel, ktoré zachytávajú určité dáta a zároveň poskytujú užívateľovi ich sledovanie pomocou mobilnej aplikácie. Ortéza trupu UNYQ Align™ (Obr. 4) spája lekárske, technologické a dizajnérske inovácie do jedného produktu, pričom tým prináša množstvo výhod ich užívateľom (Dezeen 2016).



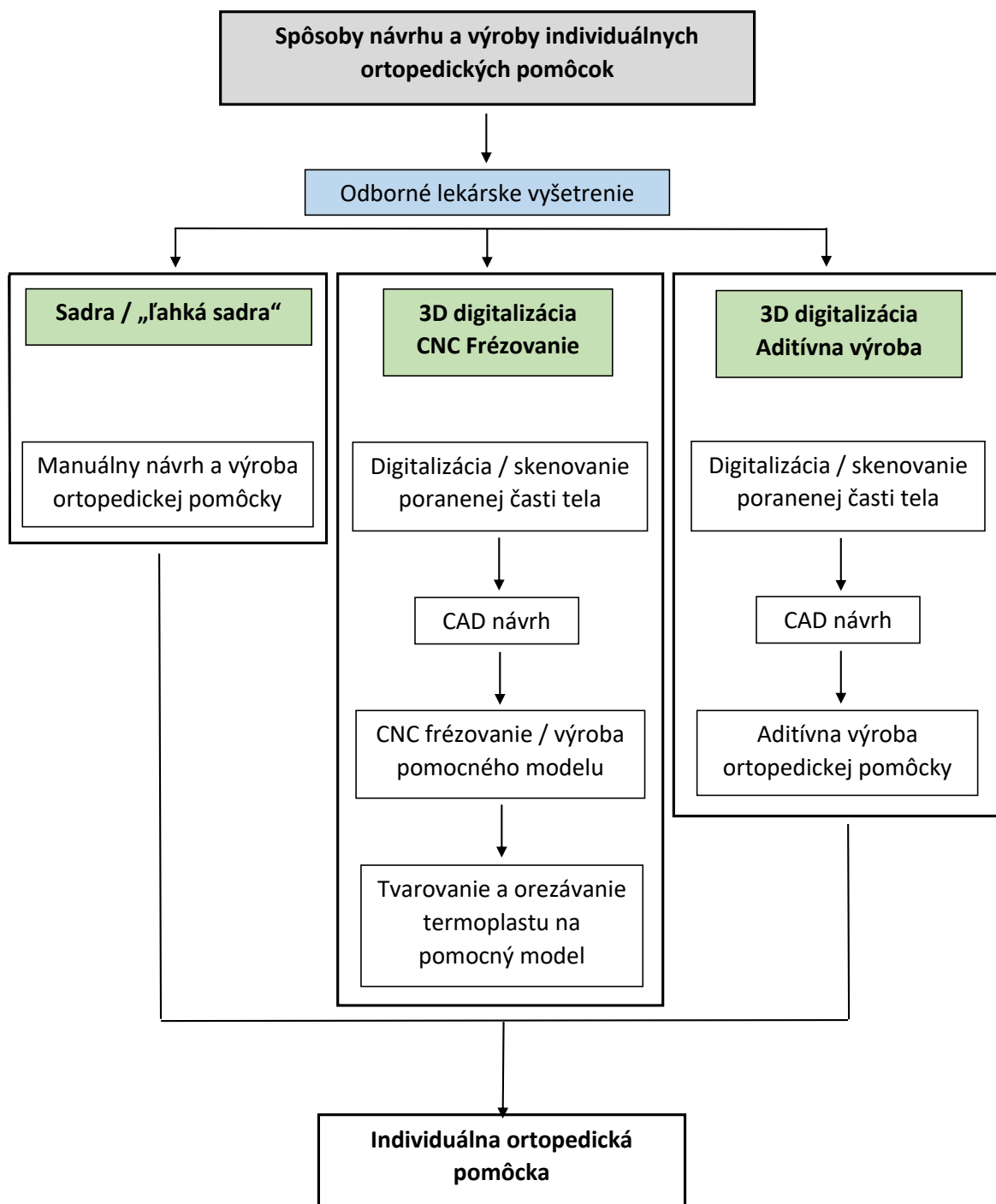
Obr. 4 Skoliotická ortéza spoločnosti UNYQ (UNYQ 2018).

1.1 Návrh a výroba individuálnych ortopedických pomôcok v súčasnosti

V súčasnosti existuje viacero možností návrhu a výroby individuálnych ortopedických pomôcok (Obr. 5), ktorých použitie závisí od zdravotného stavu pacienta, resp. stavu jeho poranenia, čoho dôsledkom je potreba používania určitej ortopedickej pomôcky. Aplikáciu konkrétneho typu individuálnej ortopedickej pomôcky stanoví ortopéd až po odbornom vyšetrení a zistení rozsahu poranenia, deformácie či inej abnormality.

Spôsoby návrhu a výroby individuálnych ortopedických pomôcok v súčasnosti:

- A. Návrh a výroba sadrovej / „ľahkej sadrovej“ ortopedickej pomôcky
- B. Návrh a výroba pomôcky využitím 3D digitalizácie a CNC frézovania
- C. Návrh a výroba pomôcky využitím 3D digitalizácie a aditívnej výroby



Obr.5 Spôsoby návrhu a výroby individuálnych ortopedických pomôcok.

1.1.1 Návrh a výroba sadrovej ortopedickej pomôcky

Pri tomto spôsobe sa jedná o **ručný spôsob** návrhu a výroby individuálnej ortopedickej pomôcky (Obr. 6) zo sadry. Postup je nasledovný:

1. odborné lekárske vyšetrenie (hmatom / RTG vyšetrenie),
2. umiestnenie navlhčeného bavlneného obväzu na požadované miesto,
3. umiestnenie fixačných prvkov/dlahy pre vytvorenie fixácie poranenej oblasti,
4. postupné nanášanie sadrových obväzov na poranenú časť tela a jeho tvarovanie,
5. individuálna sadrová ortopedická pomôcka.

Tento spôsob výroby ortopedických pomôcok sa používa pri zlomeninách a poraneniach rúk, nôh, krku, oblasti trupu a chrbtice. Jedná sa o štandardný ručný spôsob využívaný v zdravotníctve už niekoľko desiatok rokov, ktorého **výhodami** sú predovšetkým:

- nízka cena materiálu,
- aplikácia pri rôznych poraneniach a závažnosti poranení.

Nevýhody ortopedickej pomôcky:

- nepohodlie pre pacienta,
- vyššia hmotnosť,
- potenie pod sadrou,
- ručný a „pracný“ spôsob výroby,
- „špinavý“ spôsob výroby.



a)



b)

Obr. 6 Sadrové ortopedické pomôcky:

a) výroba sadrovej ortopedickej pomôcky, b) sadrová ortéza trupu (alamy 2017).

1.1.2 Návrh a výroba „ľahkej sadrovej“ ortopedickej pomôcky

Nasledovný spôsob výroby ortopedických pomôcok je taktiež **bez využitia CA technológií**, tak ako v predošlom prípade. Pri tomto spôsobe sa však jedná o výrobu z iného typu materiálu a to s využitím **živice**, ktorá sa po interakcii s vodou vytvrdzuje, čoho výsledkom je ortopedická pomôcka (Obr. 7). Postup výroby je nasledovný:

1. odborné lekárske vyšetrenie (hmatom / RTG vyšetrenie),
2. nanášanie obväzov s prímесou živice na postihnuté miesto, tvarovanie,
3. Navlhčenie vytvorenej fixačnej pomôcky vodou a tým jej vytvrdenie,
4. „ľahká sadrová“ individuálna ortopedická pomôcka.

Uvedený postup výroby ortopedických pomôcok sa využíva predovšetkým pre ľahké zlomeniny a poranenia v oblasti rúk a nôh. Nejedná sa o štandardný postup výroby a nie je poskytovaný v ktoromkoľvek zdravotníckom zariadení, ako je to v prípade sadrovej pomôcky.

Výhody ortopedickej pomôcky:

- nízka hmotnosť,
- v istých prípadoch možnosť styku s vodou (kúpanie),
- rôzne farby,

Nevýhodou takejto pomôcky je predovšetkým možnosť aplikácie iba v určitých prípadoch, a teda pri ľahkých zlomeninách a poraneniach rúk alebo nôh.



a)



b)

Obr. 7 Ortopedické pomôcky rúk a nôh:

a) „ľahká sadrová“ dlaha na ruku, b) „ľahká sadrová“ dlaha na nohu (3M 2018).

1.1.3 Návrh a výroba pomocou 3D digitalizácie a CNC frézovania

Tento spôsob návrhu a výroby ortopedických pomôcok, prevažne ortéz trupu, sa využíva v spoločnostiach **Neoprot spol. s.r.o.** (Bratislava) a **Reha-CARE s.r.o.** (Vrbové) v spolupráci s ktorou je vypracovávaná dizertačná práca. Postup je nasledovný:

1. odborné lekárske vyšetrenie (hmatom / RTG vyšetrenie),
2. 3D skenovanie poranenej časti tela pomocou aktívnej triangulácie,
3. úprava počítačového modelu,
4. výroba pomocného modelu z polyuretánu využitím CNC frézovania,
5. natiahnutie nahriateho termoplastu na model a jeho tvarovanie a orezávanie,
6. individuálna ortopedická pomôcka.

Miery na model ortopedickej pomôcky sú odoberané **bezkontaktné**, a to **ručným optickým 3D skenerom** alebo pomocou aplikácie pre iPad či iPhone. Pomôcku je takýmto spôsobom možné navrhnuť a zhotoviť presnejšie ako je to v štandardnom postupe výroby. Dôležitý je aj vzhľad pomôcky, najmä ak ju má pacient používať aj počas dňa. Zvlášť u detí môže pestrý vzor a vzhľad pomôcky prispieť k motivácii a ochote dodržiavať pokyny lekára a ortopedickú pomôcku pravidelne používať.

Na začiatku samotného procesu návrhu a výroby je vykonaná kontrola zdravotného stavu a indikovaný vhodný typ ortopedickej pomôcky. Lekár na základe rontgenového snímku určí akým spôsobom má pomôcka pôsobiť na telo pacienta tak, aby bol docielený požadovaný liečebný efekt. Samotné zhotovenie ortopedickej pomôcky začína odobratím mier pacienta pomocou optického 3D skenera (Obr. 8).



Obr. 8 Skenovanie trupu pacienta (Neoprot 2017).

Takto sa vytvára sken, ktorý sa ukladá do programového prostredia počítača. Týmto získavame digitálny model pacientovho tela, ako prvý krok k zhotoveniu individuálnej ortézy. **Ortopedický technik** tak následne môže upravovať model priamo v počítači pomocou sofistikovaného softvéru a všetky úpravy presne dokumentovať, čím sa vytvára presný model individuálnej ortopedickej pomôcky tak, aby bol docielený požadovaný liečebný efekt. Výsledok jeho práce je odoslaný do riadiacej jednotky **CNC frézovačky**, ktorá model automaticky a presne vyfrézuje. Takto vyfrézovaný model z polyuretánu ďalej slúži ako prípravok pre zhotovenie samotného modelu ortézy (Obr. 9).



Obr. 9 Vyfrézovaný model trupu z polyuretánu (Neoprot, 2017).

Nasledujúcim krokom je natiahnutie nahriateho termoplastického materiálu na pomocný model ortézy trupu (v znázornenom prípade), jeho **vytvarovanie** a **orezanie**. Po **vychladnutí** si tento materiál ponecháva **nový tvar** podľa modelu a týmto sa získava konečný produkt (Obr. 10), a to je individuálna ortopedická pomôcka (Neoprot 2017).



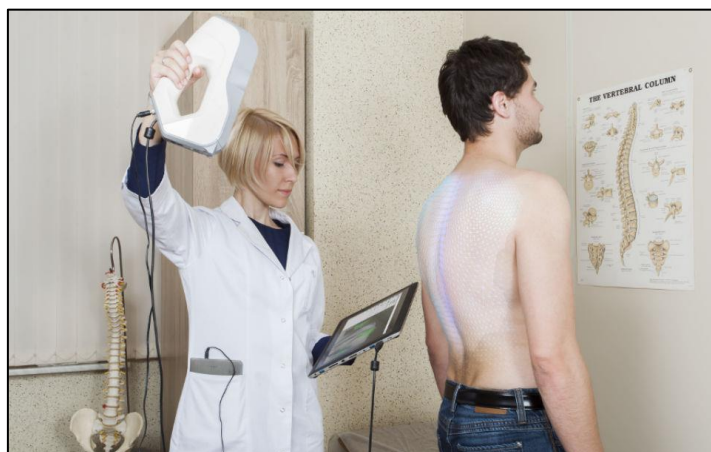
Obr. 10 Korekčná ortéza trupu (Neoprot 2020).

1.1.4 Návrh a výroba pomocou 3D digitalizácie a aditívnej výroby

Jedná sa o spôsob návrhu a výroby, ktorý je v súčasnej dobe síce najmenej využívaný v oblasti návrhu a výroby individuálnych ortopedických pomôcok, ale postupne sa ukazuje, že v danej oblasti ide o **efektívny** spôsob navrhovania a následnej výroby individuálnych ortopedických pomôcok. Postup spočíva v nasledovných krokoch:

1. odborné lekárske vyšetrenie (hmatom / RTG vyšetrenie),
2. skenovanie poranenej časti tela využitím aktívnej triangulácie,
3. úprava počítačového modelu – tvorba modelu ortézy zo skenu,
4. automatizovaná výroba využitím technológie aditívnej výroby,
5. individuálna ortopedická pomôcka.

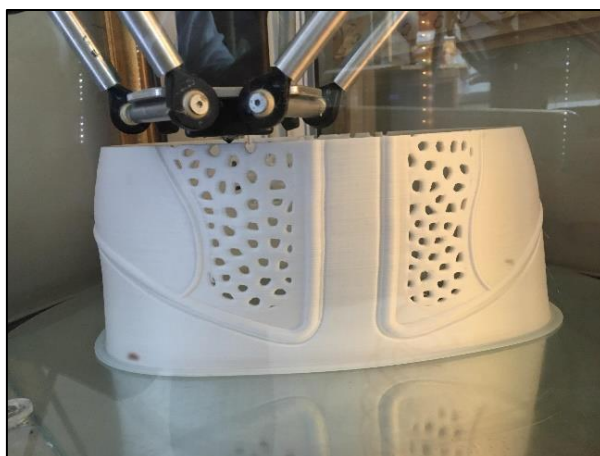
Sken časti tela, na ktorú je potrebné vyhotoviť individualizovanú ortopedickú pomôcku je získaný **3D skenerom** (Obr. 11) fungujúcim na princípe **aktívnej triangulácie**. Najčastejšie sa jedná opäť o ručné 3D skeneri, ktoré sú vyvinuté predovšetkým pre aplikácie a oblasti medicíny. Týmto spôsobom je teda získaný digitálny 3D model skenovanej časti tela pacienta.



Obr. 11 Skenovanie trupu pomocou optického 3D skenera (Artec 3D 2020).

Následne sa takto získaný digitálny model ďalej upravuje v prostredí **CAD softvéru**. Najčastejšie je na takto získaný model aplikovaný plošný model, ktorý sa následne upravuje podľa tvaru a rozmerov získaného skenu, následne je prevedený do objemového modelu s potrebnou hrúbkou a v poslednom kroku exportovaný vo formáte .STL (najčastejšie) . Ďalej je takto zhotovený model importovaný od **CAM softvéru** daného výrobného zariadenia aditívnej výroby. V tomto počítačovom prostredí sa nastaví všetky potrebné procesné

parametre, ktoré taktiež môžu byť vopred zvolené a uložené v danom softvéri. Ich zvolením sa vygeneruje výrobný program pre konkrétnu ortopedickú pomôcku. Nasleduje import takto vygenerovaného programu do samotného výrobného zariadenia, teda 3D tlačiarne. Po spustení programu sa začne automatizovaný spôsob výroby (Obr. 12), ktorý môže trvať aj niekoľko desiatok hodín. Celkový čas aditívnej výroby závisí od konkrétnych veľkosti a tvarovej zložitosti vyrábaného modelu, zvolenej aditívnej metódy, konštrukčných možností 3D tlačiarne a v neposlednom rade od zvolených hodnôt procesných parametrov aditívnej výroby.

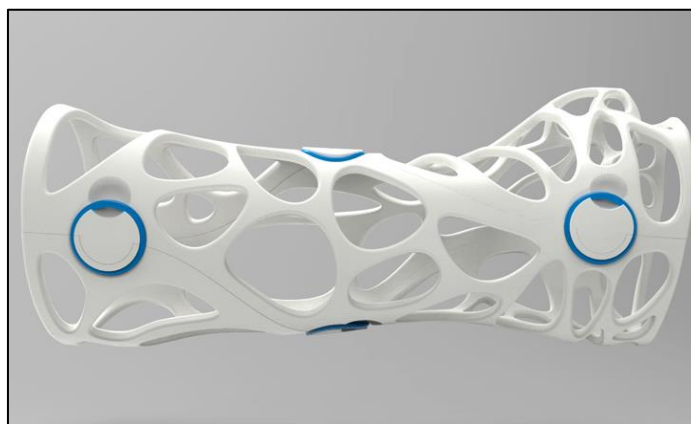


Obr. 12 Aditívna výroba ortopedickej pomôcky – ortézy trupu (3DWASP 2020).

Po skončení automatizovaného výrobného procesu je v prípade tvarovo zložitej pomôcky potrebné odstránenie podperného materiálu. V prípade, že pomôcka nepotrebuje pri výrobe podperný materiál, tak je potrební už iba jej odobratie z platformy zariadenia a je pripravená na aplikáciu. Na nasledujúcich obrázkoch (Obr. 13) sú zobrazené dve rôzne aditívne vyrobené ortopedické pomôcky.



a)



b)

Obr. 13 Individuálne ortopedické pomôcky:

a) skoliotická ortéza trupu (UNYQ 2017), b) ortopedická dlahu hornej končatiny (Xkelet 2018).

2 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

Na základe všetkých zistených poznatkov z danej oblasti a po konzultácií so spolupracujúcimi spoločnosťami z oblasti ortopédie je v práci zvolený **CAD návrh a aditívna výroba ortopedickej pomôcky** vo forme **tvarovateľnej platne**, konkrétne **napomínacia ortéza trupu**.

- **Rýchly a jednoduchý proces aplikácie** pacientovi, čo znamená výhodu a úsporu času ortopedického technika a rovnako výhodu aj pre samotného pacienta, ktorý nemusí znášať nepríjemnú a zdĺhavú aplikáciu ortopedickej pomôcky.
- **Úspora materiálu** v procese aplikácie pomôcky v porovnaní so súčasným spôsobom výroby frézovaním, prípadne orezávaním termoplastických platní z ktorých vyrábajú individuálne ortopedické pomôcky. Rovnako úspora materiálu v procese samotnej aditívnej výroby, nakoľko sa spotrebúva iba materiál potrebný na samotnú výrobu konkrétnej pomôcky (výroba platne) čím sa znižujú náklady na materiál a šetrí sa **životné prostredie**.
- Výhody pre pacientov v podobe **ľahkých, pohodlných, vzdušných a vizuálne príťažlivých** ortopedických pomôcok.
- **Zmenu dizajnu a výrobných parametrov** je možné veľmi rýchlo aplikovať do výrobného procesu, bez potreby zmeny nástrojov, prípravkov a pod..
- Z dôvodu veľmi **dobrej tvarovateľnosti** použitého materiálu je možné takto zhotovenú pomôcku ľahko a rýchlo dotvarovať, aby presne spĺňala požiadavky pacienta.

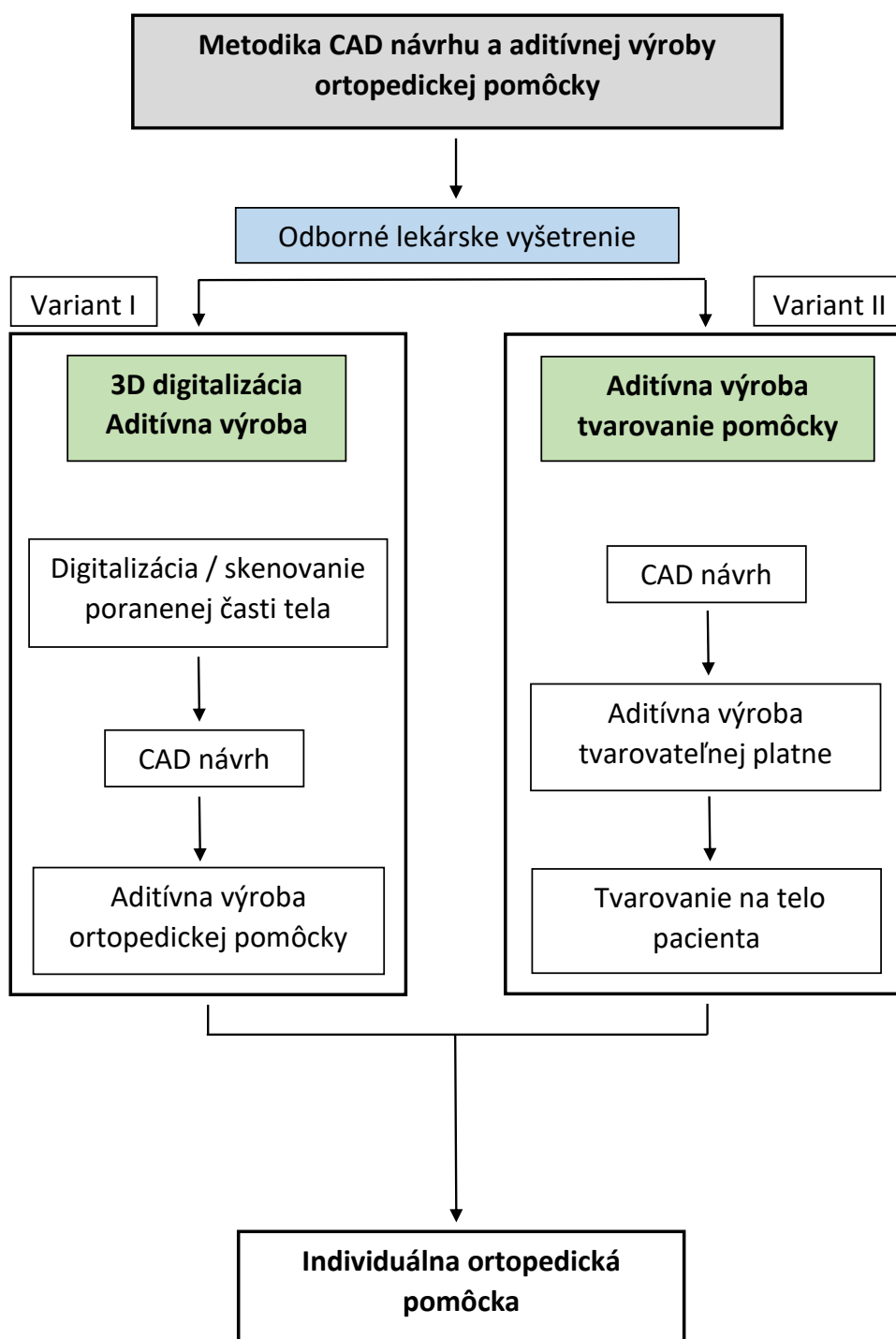
Stanovenie cieľov dizertačnej práce

Na základe vyššie uvedených skutočností sú definované ciele dizertačnej práce:

- **Metodika CAD návrhu a aditívnej výroby individuálnej ortopedickej pomôcky**
- **Návrh a výroba jednúčelovej 3D tlačiarne**
- **Vykonanie a vyhodnotenie navrhnutých experimentov**
 - Vplyv rýchlosti tlače na tvarovú a rozmerovú presnosť modelov vyrobených aditívnou metódou FDM
 - Vplyv parametrov hrúbky vrstvy, priemeru trysky a rýchlosti tlače výrobného procesu metódy FDM na výrobný čas modelov ortézy trupu

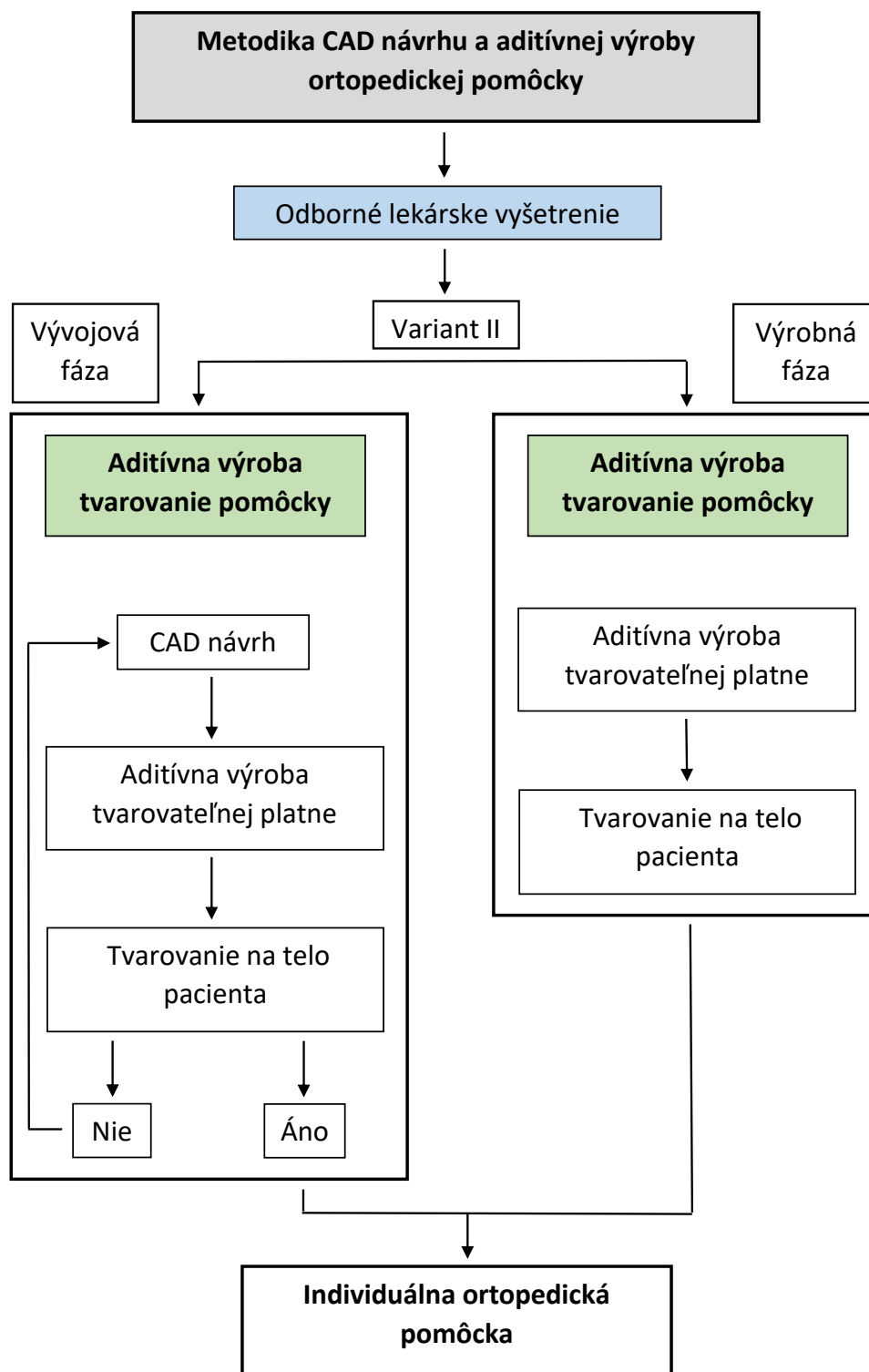
3 METODIKA CAD NÁVRHU A ADITÍVNEJ VÝROBY ORTOPEDICKEJ POMÔCKY

Tretia kapitola práce pojednáva o navrhutej **metodike CAD návrhu a aditívnej výroby** individuálnych ortopedických pomôcok pomocou dvoch stanovených variant (Obr. 14).



Obr. 14 Metodika CAD návrhu a aditívnej výroby individuálnych ortopedických pomôcok dvomi variantmi.

Nakoľko sa tieto dve varianty odlišujú postupom jednotlivých krokov ako aj funkčným využitím samotných ortéz, preto je v práci zvolený finálny - **variant II** (Obr. 15), ktorý je ďalej v práci spracovaný a popísaný.



Obr. 15 Metodika CAD návrhu a aditívnej výroby individuálnej ortopedickej pomôcky – variant II.

V porovnaní s variantou I, v ktorej je potrebné využitie technológie 3D digitalizácie pre získanie digitálneho 3D modelu / skenu oblasti, na ktorú je následne potrebné vyrobiť ortopedickú pomôcku, je práve **variant II** podstatne **jednoduchší, menej časovo náročný** a teda aj **efektívnejší** variant. Výhodami a dôvodom voľby daného **variantu II** sú nasledovné:

- **Kratší proces návrhu a výroby** individuálnych ortopedických pomôcok.

Proces zvolenej varianty II **neobsahuje** využitie technológie **3D digitalizácie** danej oblasti tela, na ktorú je následne potrebné ortopedickú pomôcku vyrobiť. Rovnako vo **fáze výroby neobsahuje** už ani samotný krok CAD návrhu, čo v konečnom dôsledku znamená iba využitie aditívnej technológie na **nepretržitú automatizovanú výrobu** navrhnutých modelov (v rámci vývojovej fázy v kroku CAD návrhu) v požadovaných tvaroch a veľkostiach.

Pri variante I je pri každom konkrétnom pacientovi potrebné vykonať proces 3D digitalizácie danej časti tela a následne sa venovať počítačovej úprave v rámci ďalšieho kroku, ktorým je CAD návrh modelu ortézy. Tu je potrebné vykonať úpravy samotného skenu (orezanie, vymazanie nepotrebných častí skenu a pod.) s následným vytvorením samotnej ortopedickej pomôcky.

- **Nižšia finančná nákladovosť** procesu návrhu a výroby.

Táto výhoda je dôsledkom vylúčenia krokov 3D digitalizácie a CAD návrhu (výrobná fáza) a následne je tým zabezpečená aj nižšia cena ortopedickej pomôcky pre samotného pacienta.

V rámci **varianty II** (návrh a výroba tvarovateľnej platne) je možné stanovenú metodiku rozdeliť do dvoch fáz, ktoré sú zobrazené na vyššie uvedenej schéme. Týmito fázami sú:

Vývojová fáza

V tejto fáze sa rieši CAD návrh 3D modelu ortopedickej pomôcky vo **forme platne** podľa definovaného **tvaru a rozmerov**. Stanovujú sa rozmery jednotlivých **veľkostí** ako aj ich **hrúbka**. Následne sa takto navrhnuté modely vyrábajú a testujú z hľadiska ich **funkčnosti, tvarovateľnosti**, schopnosti **fixácie** poranenej oblasti ako aj vhodnosti navrhnutých rozmerov jednotlivých veľkostí. Toto testovanie je realizované praktickou aplikáciou pomôcky na telo zdravotníckeho pracovníka výlučne ortopedickým technikom na základe čoho je možné zhodnotiť mieru tvarovateľnosti materiálu, časový interval tvarovateľnosti po nahriatí

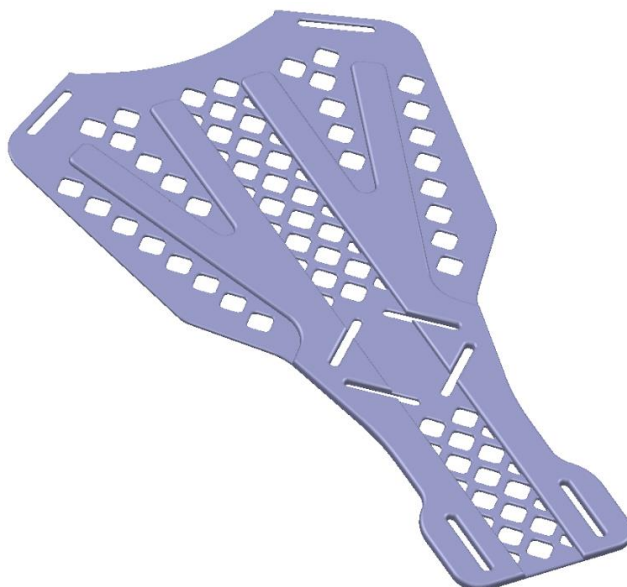
pomôcky, tvar a rozmery. Následne pri potrebe akejkolvek zmeny sa opäť dostávame do kroku CAD návrhu a celý postup sa opakuje.

Výrobná fáza

V tejto fáze je CAD model danej ortézy vhodne navrhnutý a teda je možná jeho nepretržitá **automatizovaná aditívna výroba** v jednotlivých veľkostiach pri vhodne zvolených parametroch výrobného procesu.

3.1 CAD návrh 3D modelu ortézy trupu

V tomto bode je popísaný presný postup CAD návrhu zvolenej ortopedickej pomôcky využitím **CAD softvéru Autodesk PowerSHAPE 2019**. V rámci samotného **CAD návrhu** bol postup modelovania pomerne **jednoduchý** a **rýchly**, čo bolo aj jednou z **dôležitých podmienok** v rámci hľadania spôsobu návrhu ortopedických individuálnych pomôcok. Samotný CAD návrh bol pomerne jednoduchý a rýchly z dôvodu, že nebolo potrebné získavať údaje 3D digitalizáciou konkrétnej časti tela pacienta, ale bolo možné vytvoriť CAD model (Obr. 16) na základe anatomického návrhu danej pomôcky pre konkrétnu časť tela. Toto bolo samozrejme možné vďaka spolupráci ortopedických technikov, ktorí poskytli prvotné návrhy v podobe 2D skice, ktoré sa následne použili pri návrhu pomocou už vyššie spomínaného CAD softvéru.



Obr. 16 3D model individuálnej napomínacej ortézy trupu.

3.2 Voľba vhodného materiálu ortézy trupu

Voľba materiálu pre zvolenú aditívnu metódu **FDM** bola realizovaná na základe požiadaviek na jeho tvarovateľnosť a zdravotnú nezávadnosť pre potreby použitia v zdravotníctve a tiež relatívne nízkej ceny a dostupnosti materiálu na trhu. Na základe toho bol zvolený materiál **PLA** (Polylactic Acid), ktorého technické parametre sú nižšie uvedené (Tab.1).

Tab. 1 Hlavné technické parametre termoplastického materiálu PLA (eko-plasty 2019).

Technické parametre materiálu PLA		
Hustota materiálu	1,24	[g/cm ³]
Pevnosť v ťahu	38 – 55	[MPa]
Teplota tavenia	170 – 210	[°C]
Teplota skleného prechodu	55	[°C]

Okrem uvedeného sú hlavné výhody daného materiálu popísané nižšie.

- **Zdravotne nezávadný** materiál, ktorý nespôsobuje zdravotné komplikácie pri kontakte s pokožkou. Jedná sa o biologicky prakticky inertný materiál (potvrdené bezpečnostným listom materiálu).
- **Dobrá tvarovateľnosť** materiálu po jeho nahriatí. Po vychladnutí si ponechá nový tvar, pričom je tvar možné opakovanie meniť opätovným nahriatím materiálu a ďalším tvarovaním pomôcky.
- Materiál je vyrábaný z **obnoviteľných prírodných zdrojov**, je **biodegradovateľný**, **kompostovateľný** a **recykl'ovateľný**. Je ho teda možné opätovne použiť vo výrobnom procese alebo po použití premeniť na biomasu. **Nezat'azuje životné prostredie** ako je to pri syntetických plastoch, ktoré svojím rozkladom znečisťujú životné prostredie.
- **Nízka cena** materiálu a dostupnosť na trhu.
- Počas procesu aditívnej výroby metódou FDM z daného materiálu takmer **nedochádza ku komplikáciám** spôsobeným vlastnosťami materiálu a s tým súvisiacimi podmienkami procesu výroby ako je vysoká teplota tavenia materiálu, vysoká teplota pracovnej platformy, zabezpečenie konštantnej teploty vyhrievanej komory a pod.
- Materiál **PLA** vyniká vlastnosťami, ktoré sú mimoriadne vhodné na dané použitie. Tento materiál je termoplastický biopolymér, ktorý sa v súčasnosti využíva na výrobu rôznych zdravotníckych pomôcok.

4 NÁVRH A VÝROBA JEDNOÚČELOVEJ 3D TLAČIARNE

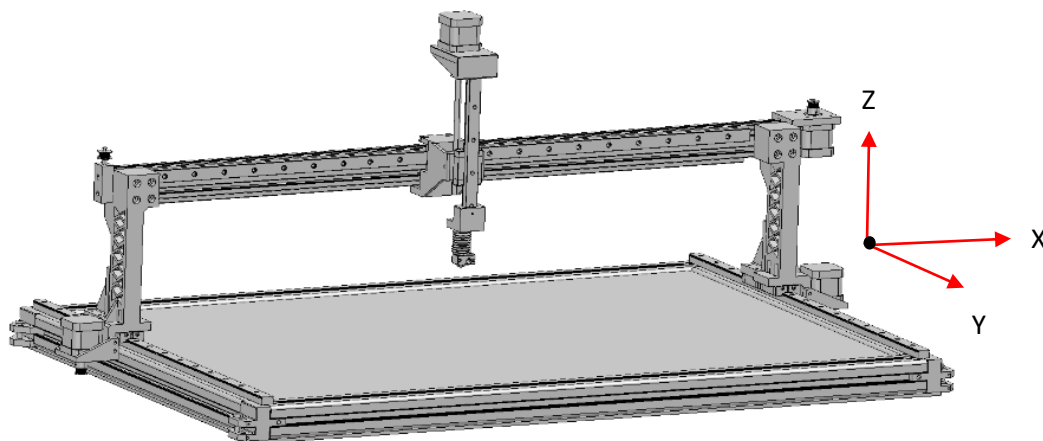
Nakoľko **praktická časť dizertačnej práce** a teda aj samotné **experimenty** sú **zamerané** na proces **aditívnej výroby**, tak bolo zhodnotené, že je potrebné navrhnuť a vyrobiť aj samotné výrobné zariadenie – 3D tlačiareň. Táto kapitola práce pojednáva o návrhu a výrobe jednoúčelového výrobného zariadenia na princípe aditívnej metódy FDM. **Dôvodov** vzniku daného zariadenia bolo niekoľko:

- **zníženie nákladov** súvisiacich s **obstaraním** výrobného zariadenia,
- **zníženie nákladov** spojených s **údržbou** a **výmenou náhradných dielov**,
- potreba **veľkej tlačovej platformy** kvôli rozmerom navrhnutého modelu,
- nutnosť **stabilnej a tuhej konštrukcie**,
- zvýšenie **rýchlosti tlače** pre **zabezpečenie produktívnej výroby**.

Na základe vyššie uvedených dôvodov bola navrhnutá 3D tlačiareň, ktorá by mala tieto podmienky spĺňať. Viaceré komponenty na zariadení boli navrhnuté špecificky pre toto výrobné zariadenie a boli vyrobené aditívnou metódou FDM z materiálu PET-G na zariadeniach spoločnosti Advanced Engineering s.r.o. v priestoroch MTF STU v Trnave.

Návrh CAD modelu 3D tlačiarne

V prvom kroku bolo potrebné vytvoriť CAD model (Obr. 17), ktorý by obsahoval všetky dôležité a funkčné prvky. Základný rám zariadenia je zhotovený z pevných hliníkových stavebnicových profilov s portálovou konštrukciou. Pevný a tuhý priečnik je zabezpečený taktiež využitím hliníkového profilu, ktorý je po oboch stranách zariadenia pevne spojený so stojinami.

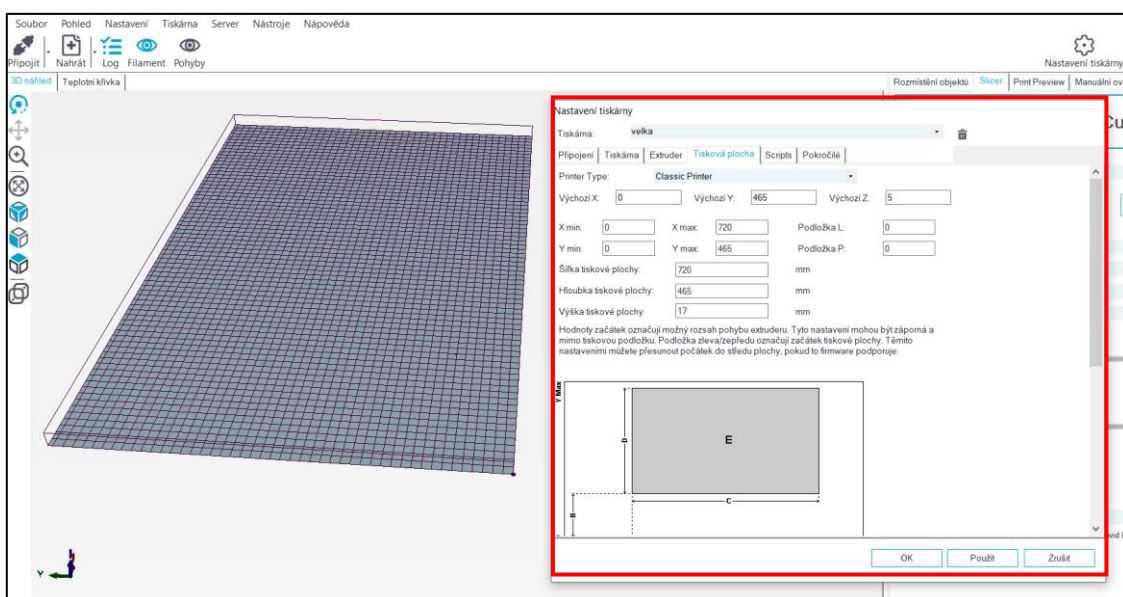


Obr. 17 Prvotný návrh CAD modelu jednoúčelovej 3D tlačiarne.

Dôvodom voľby uvedených **stavebnicových profilov** bol fakt, že ide o jednoduchý systém ich skladania a vytvárajú **pevnú rámovú** konštrukciu. Návrhom a použitím vlastných špecifických dielov bol návrh ako aj jeho realizácia jednoduchšia a rýchlejšia, keďže nebolo potrebné hľadať všetky diely u externých výrobcov a brať do úvahy rozmery takto zvolených komponentov. Toto riešenie sa výrazne prejavilo aj na nižšej cene samotného zariadenia.

Softvér zariadenia je zvolený na základe predchádzajúcich skúseností s týmto softvérom, jeho nastaveniami a možnosťami využitia. Týmto softvérom je **Repetier Host**. Jedná sa o **CAM softvér** určený pre nastavenie parametrov procesu aditívnej metódy FDM. Tento je prepojený s Repetier firmvérom, ktorý slúži ako spojovací článok medzi softvérom a hardvérom zariadenia. V rámci konfigurácie jednoúčelovej 3D tlačiarne bolo potrebné špecifikovať nasledovné parametre v softvéri Repetier Host. Následne bolo možné nastaviť parametre procesu výroby na danom zariadení (Obr. 18):

- počet krokov na 1mm,
- typ súradnicového systému,
- dĺžka jednotlivých osí,
- maximálne zrýchlenie v osiach X, Y a Z,
- maximálna rýchlosť v osiach X, Y a Z,
- definícia displeja a čítačky kariet,
- maximálna teplota vyhrievanej platformy.



Obr. 18 Prostredie CAM softvéru Repetier Host s vyznačeným nakonfigurovaným profilom jednoúčelovej 3D tlačiarne.

5 NÁVRH, REALIZÁCIA A VYHODNOTENIE EXPERIMENTOV

V piatej kapitole dizertačnej práce je definovaný **návrh, realizácia a vyhodnotenie experimentov**. Pri návrhu experimentov sa vychádzalo z definovaných **cieľov** práce ako aj odborných konzultácií a požiadaviek ortopedických pracovníkov, v spolupráci s ktorými sa dizertačná práca vypracovávala. Samotné experimenty sa zameriavajú na technológiu **aditívnej výroby – vplyv zvolených parametrov procesu metódy FDM na tvarovú a rozmerovú presnosť vyrobených modelov** ako aj na **výrobný čas**. Na základe vyhodnotených údajov bude následne možné aplikovať vhodné parametre do výrobného procesu.

5.1 Vplyv rýchlosti výrobného procesu FDM na tvarovú a rozmerovú presnosť

Experiment pojednáva o miere **vplyvu rýchlosti tlače na tvarovú a rozmerovú presnosť** vyrobených modelov v procese aditívnej metódy **FDM** z materiálu **PLA**. Podľa prieskumu literatúry v danej oblasti ako aj praktických skúseností s výrobou pomocou aditívnej metódy FDM z daného materiálu bolo zistené, že parameter **rýchlosti tlače** môže významne vplyvať na tvarovú a rozmerovú presnosť ako aj na samotnú kvalitu povrchu vyrobených modelov. Je jedným z hlavných parametrov významne ovplyvňujúcich proces aditívnej výroby a to vo vzťahu k času výroby ako aj k tvarovej a rozmerovej presnosti vyrobených modelov. Nakoľko však vplyv tohto parametra značne závisí aj od **konštrukčných možností** konkrétneho **výrobného zariadenia, tvaru a rozmerov** vyrábaného **modelu** a v neposlednom rade od konkrétne zvolených **parametrov** výrobného procesu metódy FDM, tak je potrebné určiť mieru vplyvu tohoto parametra v konkrétnom prípade, resp. aplikácií.

Návrh a realizácia experimentu

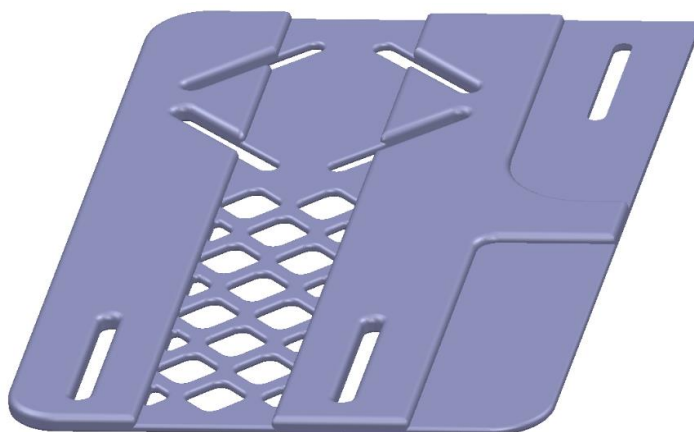
Cieľom experimentu je zistenie miery vplyvu parametra rýchlosti tlače na tvarovú a rozmerovú presnosť vyrobených vzoriek ako aj overenie funkčnosti a produktívnej výroby pomocou navrhnutého jednoúčelového zariadenia aditívnej výroby.

Vzhľadom k vyššie uvedenému, teda nutnosti overenia navrhnutého jednoúčelového výrobného zariadenia z pohľadu jeho funkčnosti a schopnosti produktívnej výroby, bolo samotná výroba realizovaná na dvoch výrobných zariadeniach (3D tlačiarňach) a to za účelom následného porovnania vyrobených vzoriek z pohľadu ich tvarovej a rozmerovej presnosti voči nominálnemu CAD modelu.

Pre účely porovnania výsledkov s jednoúčelovou 3D tlačiarňou bolo zvolené zariadenie **Creality CR-10S PRO**. Dôvody výberu daného zariadenia v porovnaní s jednoúčelovou 3D tlačiarňou:

- odlišný systém pohybu v osiach X a Y – **pohybový remeň**,
- pohyb **tlačovej platformy** v osi Z,
- podobná obstarávacía cena zariadení.

CAD model testovacej **vzorky** (Obr. 19) s rozmermi **145 x 220 mm** bol navrhnutý tak, aby obsahoval všetky **funkčné prvky** v **rovnakých tvaroch** a **rozmeroch**, ktoré sa nachádzajú aj na finálnom modeli **ortézy trupu**. Takto navrhnutá vzorka bola následne vyrobená pri nastavení rovnakých výrobných parametrov z rovnakého materiálu PLA na oboch uvedených 3D tlačiarňach. Jediný **meniaci** sa parameter bol **rýchlosť tlače**, ktorého vplyv sme sledovali. Hodnoty daného parametra boli zvolené na základe konštrukčných možností zvolených výrobných zariadení ako aj s ohľadom na zvolený materiál.



Obr. 19 CAD model testovacej vzorky.

3D Digitalizácia vyrobených vzoriek

Na zistenie odchýlok tvaru a rozmerov vyrobených vzoriek od nominálneho CAD modelu bolo potrebné vzorky **3D digitalizovať**, teda **previesť** reálne vyrobené modeli do **digitálnej podoby**. Na tieto účely bola použitá bezdotyková metóda 3D digitalizácie fungujúca na princípe aktívnej triangulácie. Zariadenie, ktoré sa použilo na digitalizáciu vzoriek je optický **3D skener GOM ATOS II TripleScan**. Zariadenie sa nachádza v Centre excelentnosti 5-osového obrábania na pôde MTF STU so sídlom v Trnave. Pred začatím samotnej 3D digitalizácie vzoriek bolo potrebné vyrobiť skenovací **prípravok** (Obr. 20), ktorý slúžil na

zaistenie presnej polohy skenovaného objektu na rotačnom stole skenovacieho zariadenia, tak aj na získanie referenčného rámika na ktorom na nachádzali nekódované referenčné body. Tieto museli byť umiestnené tak, aby spĺňali podmienku, že **2 skeny** nasledujúce po sebe musia mať rovnaké minimálne **3 referenčné body**, aby ich softvér mohol pospájať.



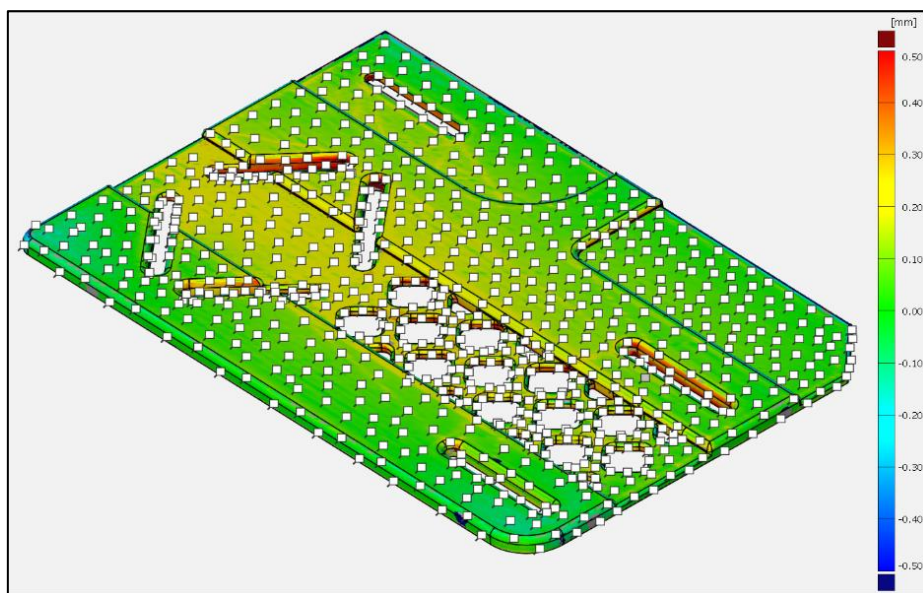
Obr. 20 Rámik slúžiaci na uchytenie vzoriek pri ich digitalizácii.

Nasledoval proces skenovania ktorý sa opakoval z oboch strán vzorky, teda prípravok sa otočil o 180° a skenovanie pokračovalo. Takto to prebiehalo pri každej vzorke, teda bolo vytvorených **24 snímok** z každej strany a **celkovo 48 snímok** v rámci skenovania **jednej vzorky**. Skenovaných bolo spolu **18 vzoriek**.

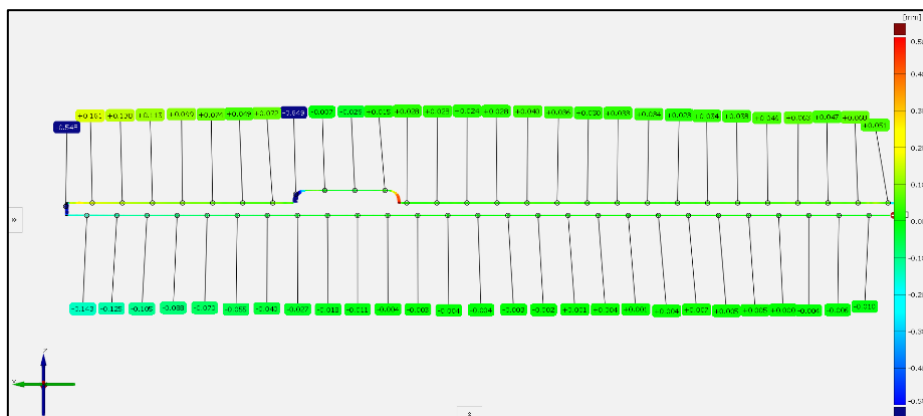
Spracovanie a vyhodnotenie nameraných údajov

Spracovanie získaných údajov spočívalo v aplikovaní **porovnávacej analýzy tvaru a rozmerov všetkých zdigitalizovaných vzoriek s nominálnym CAD modelom** vzorky, na základe ktorého boli vyrobené. Týmto porovnaním boli zistené **tvarové a rozmerové odchýlky** vyrobených modelov v porovnaní s nominálnym CAD modelom, na základe čoho sme následne mohli zhodnotiť **vplyv zmeny parametra rýchlosti tlače na tvarovú a rozmerovú presnosť** takto vyrobených modelov.

Pomocou softvéru **GOM Inspect 2020** bol vytvorený súbor do ktorého sa importovali všetky vzorky vo formáte **.STL**, ktoré boli zdigitalizované a zároveň bol importovaný aj nominálny CAD model. Následne bolo realizované porovnanie všetkých vzoriek s nominálnym CAD modelom prostredníctvom bodov aplikovaných na modeli v **celom povrchu** (Obr. 21) vzoriek ako aj v konkrétne zvolených **rezoch** (Obr. 22) v osiach X, Y a Z. Porovnávacia analýza následne vyhodnotila odchýlky medzi nominálnym CAD modelom a vzorkami v konkrétnych bodoch. Na základe týchto odchýlok bola vypočítaná priemerná aritmetická odchýlka.

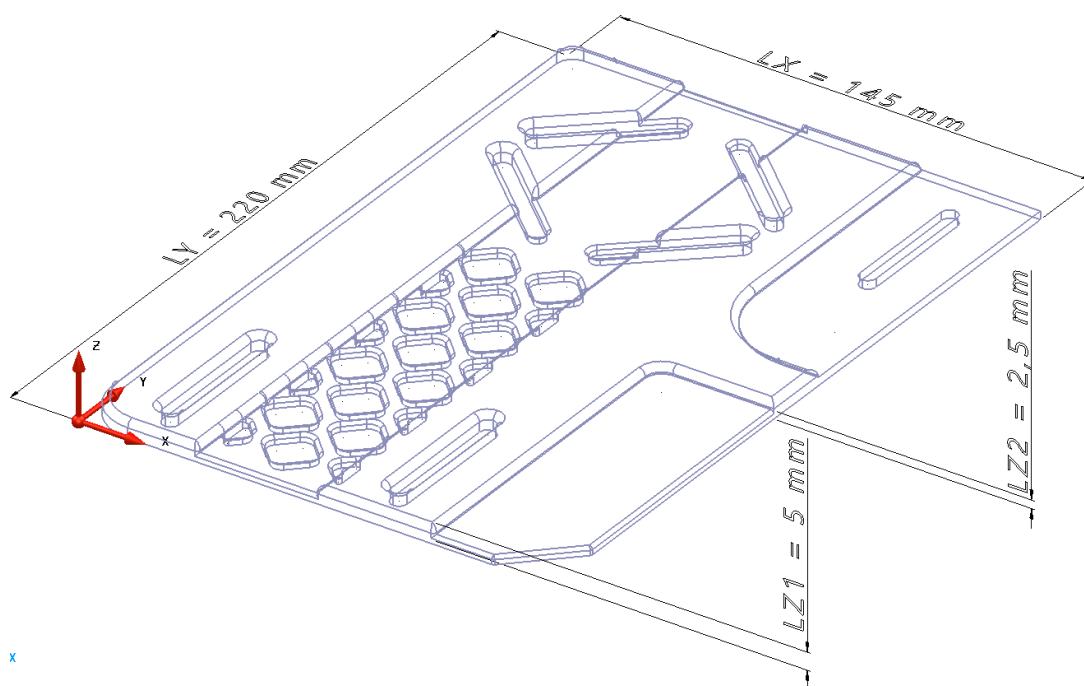


Obr. 21 Príklad získania údajov odchýlok v bodoch v celom povrchu vzorky.



Obr. 22 Príklad získania údajov odchýlok v bodoch aplikovaných v rezoch.

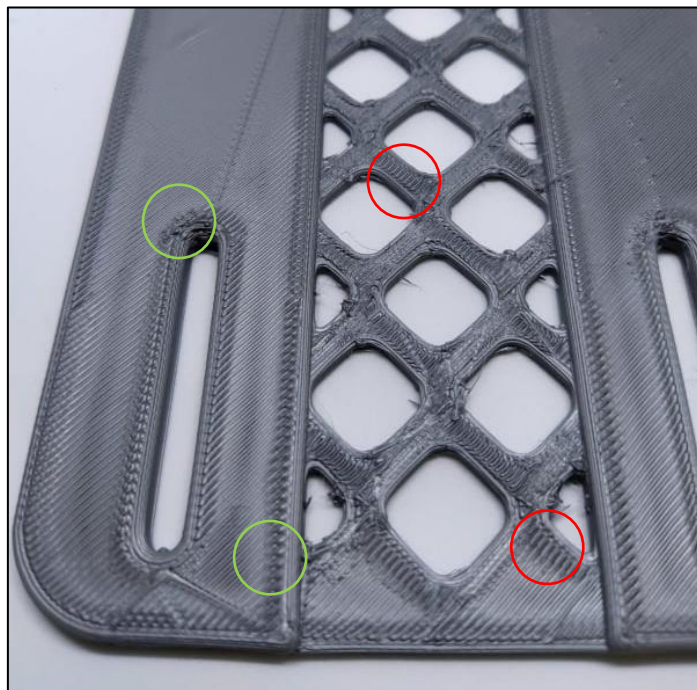
Pre získanie konkrétnych hodnôt rozmerových odchýlok jednotlivých vzoriek bola aplikovaná funkcia, ktorá na základe vytvorených plôch medzi časťami vzorky, ktoré bolo potrebné zmerať, vypočítala dĺžkový rozmer medzi týmito plochami. Meranie bolo realizované v 4 nominálnych rozmeroch, ktoré sú uvedené na obrázku nižšie (Obr. 23).



Obr. 23 Nominálne rozmery vzorky, ktoré boli merané a vyhodnotené.

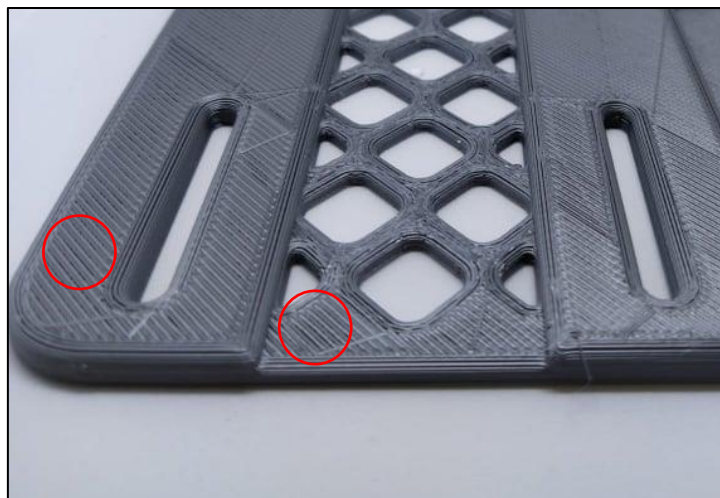
Rovnako aj v prípade vyhodnotenia rozmerových odchýlok vzoriek bol vypočítaný aritmetický priemer na základe vzorca uvedeného na predchádzajúcej strane.

Na základe vyhodnotených priemerných odchýlok tvarovej a rozmerovej presnosti meraných vzoriek je vidieť mieru vplyvu zmeny parametra **rýchlosti tlače** na výslednú **presnosť tvaru** a **rozmerov** vzoriek. Vo väčšine prípadov sa hodnoty **odchýlok zvyšovali** so **zvyšovaním** hodnoty parametra **rýchlosti tlače**, pričom priemerné odchýlky na zariadení **Creality CR-10S PRO** vykazovali vo všetkých meraniach výrazne **vyššie hodnoty** v porovnaní s **jednouúčelovým** zariadením aditívnej výroby. Na základe vyššie nameraných a vyhodnotených údajov je zrejmé, že **najväčšie odchýlky** boli zistené v miestach na vzorkách **v okolí otvorov** (Obr. 24) slúžiacich na odľahčenie, zabezpečenie vzdušnosti ako aj zlepšenie tvarovateľnosti finálnej pomôcky. V takýchto miestach sa nanášajú termoplastický materiál vo forme nataveného vlákna **nestihne** dostatočne rýchlo **ochladiť** pred nanosením ďalšieho vedľajšieho vlákna, čím dochádza k jeho zvlneniu, teda **deformácií**. Týmto sa na daných miestach vytváral **prebytok materiálu**.



Obr. 24 Nerovnosti povrchovej vrstvy pri rýchlosti tlače 95 mm/s na Creality CR-10S PRO s jasne viditeľným prebytkom materiálu v miestach medzi otvormi (červený krúžok) ako aj v obvodovej časti vzorky a okraji dier na prevlečenie popruhov (zelený krúžok).

Opačným efektom sa prejavil vplyv parametra rýchlosti pri najvyššej nastavenej hodnote **95 mm/s** na vzorkách vyrobených na **jednúčelovej 3D tlačiarňi**. V tomto prípade sa na vyrobených vzorkách prejavil **nedostatok pretláčaného materiálu** (Obr. 25), čo bolo spôsobené tým, že extrúder zariadenia nebol schopný pri danej rýchlosti dodávať potrebné množstvo materiálu do výrobného procesu. V dôsledku toho vznikali medzery medzi jednotlivými vrstvami.



Obr. 25 Nerovnosti povrchovej vrstvy pri rýchlosti tlače 95 mm/s na jednúčelovej 3D tlačiarňi s viditeľným nedostatkom materiálu po celom povrchu vzorky (červený krúžok).

5.2 Vplyv vybraných parametrov procesu metódy FDM na výrobný čas

Experiment pojednáva o miere vplyvu vybraných parametrov procesu metódy FDM na čas výroby modelu – napomínacej ortézy trupu z materiálu PLA. Boli zvolené také parametre, ktoré výrazne vplývajú na **čas výroby** modelu, čím zásadne ovplyvňujú produktivitu výroby. Týmito parametrami sú **hrúbka vrstvy, priemer trysky a rýchlosť tlače**. Vzhľadom k tomu, že dôležitou podmienkou aditívnej výroby zvoleného typu ortopedickej pomôcky bola jej produktívna výroba v rámci možností zvolenej metódy, bolo potrebné zvoliť také parametre, ktoré najviac vplývajú na výrobný čas pomôcky. Na základe uvedeného boli zvolené hodnoty parametrov tak, aby sme dosiahli čo možno najvyššiu produktivitu, teda najnižší výrobný čas pri výrobe 1ks modelu, avšak pri zachovaní požadovanej kvality povrchu ako aj presnosti tvaru a rozmerov. Kvalita vyrobených modelov pri rôznych parametroch bola konzultovaná s pracovníkmi spoločnosti Reha-CARE s.r.o., na základe čoho sme boli limitovaný v rámci maximálnych zvolených hodnôt jednotlivých parametrov.

Návrh a realizácia experimentu

Cieľom experimentu je zistenie vplyvu parametrov hrúbky vrstvy, priemeru trysky a rýchlosti tlače v procese aditívnej metódy FDM na výrobný čas modelu ortézy trupu pre stanovenie vhodných parametrov výroby, ktorými dosiahneme produktívnu výrobu so zachovaním potrebnej kvality vyrobených modelov.

Aditívna výroba modelov ortézy trupu bola realizovaná na navrhutej jednoúčelovej 3D tlačiarňi zo zvoleného materiálu PLA. Pre zistenie vplyvu zvolených parametrov (faktorov) na výrobný čas (sledovanú premennú) je potrebné zvoliť konkrétne hodnoty (úrovne) týchto faktorov a na základe všetkých vzájomných kombinácií týchto faktorov sa určí ich vplyv na sledovanú premennú. Jedná sa teda o úplný faktorový experiment. Faktory, teda vstupy daného procesu sú klasifikované ako ovplyvniteľné a ich konkrétne hodnoty sú stanovené na základe konštrukčných možností výrobného zariadenia ako aj znalostí danej problematiky. Pre každý zvolený faktor sú zvolené 3 úrovne, teda 3 faktory na 3 úrovniach (Tab. 19). Experiment bol teda zvolený $n = 3^3 = 27$ **vzájomných kombinácií** všetkých faktorov.

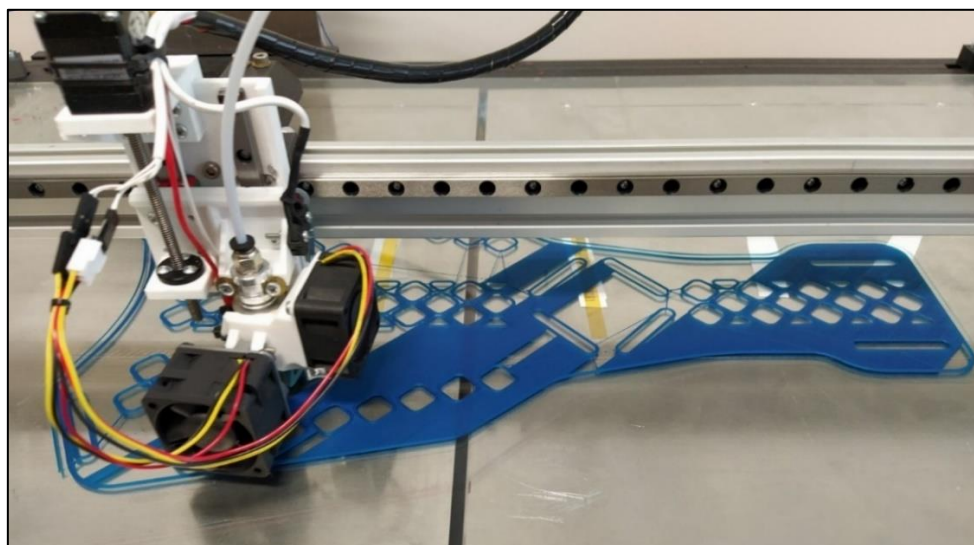
V danom experimente je zvoleným modelom – napomínacia ortéza trupu. Táto je navrhnutá a vyrábaná v 3 veľkostiach (S, M, L), pričom pre potreby experimentu sa vyrábal model vo veľkosti M. Modeli ortézy boli vyrábané v celkovom počte **81 ks**, nakoľko pri každej kombinácii parametrov boli vyrábané 3 ks. Celkový čas potrebný na výrobu (Obr. 26) všetkých kusov na jednom výrobnom zariadení bol cca **55 dní**.

Tab. 2 Nastavenie hlavných parametrov výrobného procesu metódy FDM.

Parametre metódy FDM		Hodnota
Hrúbka vrstvy	[mm]	0,2 / 0,25 / 0,3
Priemer trysky	[mm]	0,4 / 0,6 / 0,8
Vnútna výplň modelu	[%]	100
Počet perimetrov	[-]	3
Teplota tavenia materiálu	[°C]	210
Teplota platformy	[°C]	60

Tab. 3 Nastavenie viacerých typov parametra rýchlosti tlače procesu FDM.

Nastavenie rýchlosti metódy FDM		Hodnota		
Rýchlosť tlače	[mm/s]	55	65	75
Rýchlosť posuvu	[mm/s]	130		
Rýchlosť tlače prvej vrstvy	[%]	45	55	65
Rýchlosť tlače vonkajšieho perimetra	[mm/s]	45	55	75
Rýchlosť tlače vnútorného perimetra	[mm/s]	55	65	75
Rýchlosť tlače vnútornej výplne	[mm/s]	55	65	75



Obr. 26 Aditívna výroba ortézy trupu – nanášanie prvej vrstvy.

Nakoľko pri každej kombinácii parametrov boli vyrobené 3 ks modelov, teda namerané 3 hodnoty časov výroby, následne bola z týchto hodnôt vypočítaná aritmetická priemerná hodnota času výroby, ktorá sa ďalej použila pre spracovanie výsledkov.

Spracovanie získaných údajov bolo realizované pomocou štatistického softvéru **Minitab** v ktorom sa získali výsledky vo forme: grafické znázornenie **vplyvu hlavných efektov**, grafické znázornenie **vzájomných interakcií efektov**, grafické znázornenie **pravdepodobnostného normálového rozdelenia**, grafické znázornenie **početnosti výskytu** údajov pomocou histogramu.

Na základe nameraných a vyhodnotených údajov je zrejmé, že všetky zvolené faktory majú významný vplyv na sledovanú premennú, pričom **najväčší vplyv** má faktor **priemeru trysky**. Ako bolo predpokladané, tak pri všetkých 3 faktoroch je vidieť, že so **zvyšujúcou** sa hodnotou daného faktora sa významne **znižuje čas výroby** modelu. Faktory hrúbka vrstvy a rýchlosť tlače vykazujú veľmi podobnú mieru vplyvu na výrobný čas modelu ortézy trupu.

Hodnoty nameraných údajov času výroby sa nachádzajú v pomerne širokom rozsahu hodnôt, čo tiež ukazuje mieru vplyvu zvolených parametrov, pričom tento rozsah sa pohybuje od najkratšieho času výroby **3 hod. 25 min.** po hodnotu **13 hod. 12 min.** Časový rozdiel vo výrobe modelu ortopedickej pomôcky je teda **5 hod. 47 min.** So zreteľom na podmienku produktívnej výroby zvoleného modelu ortopedickej pomôcky je teda mimoriadne dôležité poznať konkrétne hodnoty výrobného času na základe rôznej kombinácie zvolených parametrov, nakoľko je následne na základe týchto hodnôt možné prepočítať produktivitu výroby na jednom alebo viacerých rovnakých zariadeniach aditívnej výroby.

V práci vytvorený **proces CAD návrhu a aditívnej výroby ortopedických pomôcok** vo forme tvarovateľnej platne je možné následne **prepojiť** s **metodikou FKM získavania 3D CAD modelov fyzických objektov využitím nízkonákladového 3D digitalizačného zariadenia**, ktoré boli navrhnuté v rámci dizertačnej práce doc. Ing. Ladislava Moroviča, PhD. s názvom *Návrh metodiky bezdotykového 3D skenovania tvarovo zložitých plôch* (Morovič 2007).

Využitie danej metodiky v kombinácii s nízkonákladovým 3D digitalizačným zariadením by bolo vhodné pre účely **získavania skenov** vyrobených modelov **ortopedických pomôcok**, na základe ktorých by bolo možné následne kontrolovať **kvalitu výroby** (z hľadiska merania tvarových a rozmerových odchýlok) a rovnako aj na vytvorenie **3D CAD modelov**

jednotlivých častí ľudského tela, na ktoré je možné aplikovať rôzne typy ortopedických pomôcok v tvare platne a týmto spôsobom **testovať** jednotlivé budúce návrhy daných pomôcok.



Obr. 25 Aplikácia individuálnej napomínacej ortézy trupu vytvarovaním podľa tvaru chrbta konkrétneho pacienta.

6 PRÍNOSY DIZERTAČNEJ PRÁCE

V oblasti **pedagogiky** poskytuje dizertačná práca nasledovné prínosy.

- **Metodika návrhu a výroby** ortopedických pomôcok využitím technológie aditívnej výroby, čo je možné využiť v rámci výučby študentov v predmetoch na:
 - prvom stupni vysokoškolského štúdia
 - *Úvod do počítačovej podpory výrobných technológií (študijný program: Počítačová podpora výrobných technológií),*
 - *Fundamentals of Computer Aided Production Technologies – Selected Chapters (študijný program: Počítačová podpora výrobných technológií),*
 - *CAD/CAM (študijný program: Výrobné technológie).*
 - druhom stupni vysokoškolského štúdia
 - *Ateliér počítačovej podpory návrhu a výroby I (študijný program: Počítačová podpora návrhu a výroby),*
 - *CA technológie a systémy (študijný program: Počítačová podpora návrhu a výroby; Výrobné technológie a výrobný manažment),*
 - *Reverzné inžinierstvo (študijný program: Obrábanie a tvárnenie).*

- Študentom sa poskytne praktický príklad **využitia vyučovaných technológií v praxi**, konkrétne v **oblasti zdravotníctva** a tým aj lepšie pochopenie **prepojenia jednotlivých vyučovaných technológií** do jedného celku v rámci návrhu a výroby konkrétnych komponentov.

- Zvýšenie povedomia študentov v oblasti širokých možností **aplikácie aditívnej výroby** v rôznych priemyselných odvetviach a konkrétnych procesoch.

- Možnosť vypracovania tematicky podobných záverečných prác aj na základe informácií uvedených v rámci dizertačnej práce.

V oblasti **vedy** a **výskumu** poskytuje dizertačná práca nasledovné prínosy:

- Spracovanie **prípadovej štúdie** použitia technológií aditívnej výroby, čo môže slúžiť ako východisko pre ďalší **výskum** v danej oblasti.
- Potenciál pre rozpracovanie danej problematiky a rozšírenie konkrétne témy návrhu a výroby zdravotníckych pomôcok.

V oblasti **praxe** poskytuje dizertačná práca nasledovné prínosy.

- Inovatívny spôsob CAD návrhu a aditívnej výroby individuálnych ortopedických pomôcok s uvedením konkrétneho spôsobu a parametrov výrobného procesu ortopedickej pomôcky – napomínacia ortéza trupu.
- Zavedenie aditívnej výroby do zdravotníckej praxe na Slovensku v doposiaľ nevyužitej oblasti aplikácie, teda pri návrhu a výrobe ortopedických a protetických zdravotníckych pomôcok.
- **Exkluzivita** na **Slovenskom** ako aj **zahraničnom trhu** využitím uvedeného postupu CAD návrhu a aditívnej výroby a tým rozšírenie portfólia poskytovaných služieb a ortopedických pomôcok.
- Poskytnutie mnohých výhod pacientov resp. užívateľom takto vyrobených ortopedických pomôcok v podobe **rýchlej aplikácie, vzdušnosti, nízkej hmotnosti** ako aj **štýlového vzhľadu** ortopedickej pomôcky.
- Zavedenie **automatického** a **bezodpadového procesu výroby** individuálnych zdravotníckych pomôcok v rámci výrobných procesov v spoločnosti a tým **zníženie nákladov** spojených s pracovnou silou a odpadmi vznikajúcimi štandardnými spôsobmi výroby.

ZÁVER

Námetom pre tému dizertačnej práce bol prieskum literatúry riešenej problematiky, podľa ktorého v súčasnej zdravotníckej praxi sa stále vo väčšej miere presadzuje využitie technológií 3D digitalizácie a aditívnej výroby. Aplikácia týchto technológií sa ukazuje ako efektívne riešenie procesov návrhu a výroby v rôznych oblastiach zdravotníctva.

Cieľmi dizertačnej práce boli vytvorenie **metodiky CAD návrhu a výroby ortopedickej pomôcky** využitím technológie **aditívnej výroby** so zreteľom na **jednoduchosť**, **rýchlosť**, **nízkú ekonomickú nákladovosť** a teda **efektivitu** daných procesov. Ďalším cieľom bol **návrh a výroba jednoúčelového výrobného zariadenia** (3D tlačiareň) na princípe aditívnej metódy FDM. Potreba daného zariadenia vyplývala zo zvoleného variantu metodiky CAD návrhu a aditívnej výroby individuálnych ortopedických pomôcok vo forme tvarovateľných platní v pomerne veľkých rozmeroch. Posledným cieľom bolo zistenie **vplyvu** zvoleného parametra **rýchlosti tlače** na **tvarovú a rozmerovú presnosť** modelov ako aj **vplyv** parametrov **hrúbky vrstvy, priemeru trysky a rýchlosti tlače** na **výrobný čas** konkrétne zvolenej ortopedickej pomôcky - **napomínacia ortéza trupu**.

V prvom kroku bol popísaný CAD návrh pomôcky využitím softvéru **Autodesk PowerSHAPE 2018** s popisom funkcií, ktorými sa dospelo k požadovanému 3D modelu. V tejto časti, CAD návrhu, bola splnená podmienka **jednoduchosti** a **rýchlosti** v procese získania modelu, potrebného na následnú aditívnu výrobu. Následne bol popísaný návrh a výroba jednoúčelového zariadenia. Toto bolo navrhnuté s ohľadom na jeho **jednoduchosť** v používaní, **funkčnosť** a **nízkú nákladovosť** ako pri samotnej výrobe zariadenia, tak aj v rámci jeho údržby a servisných úkonov.

Z výsledkov experimentov je možné tvrdiť, že **rýchlosť tlače** má **zásadný vplyv** na **tvarovú a rozmerovú presnosť** vyrábaných modelov v procese metódy **FDM** z materiálu **PLA**. Na jednoúčelovom zariadení sa potvrdil predpoklad, že aj pri vyšších hodnotách rýchlosti tlače bude schopné vyrábať modeli s vyššou mierou presnosti tvaru a rozmerov v porovnaní s druhým zvoleným zariadením Creality CR-10S PRO. Vo vyhodnotení vplyvu parametrov hrúbky vrstvy, priemeru trysky a rýchlosti tlače bolo vidieť výrazný vplyv týchto parametrov, čo vyplývalo už aj z nameraných hodnôt výrobného času. **Najväčší vplyv** na sledované premenné výrobného času mal parameter **priemeru trysky**, pričom ďalšie dva parametre – **hrúbka vrstvy a rýchlosť tlače** sa prejavili veľmi podobnou mierou vplyvu na daný výrobný proces.

ZOZNAM BIBLIOGRAFICKÝCH ODKAZOV

3ders, 2015: Chinese researchers treat Scoliosis with country's first customized 3D printed back brace [online]. [cit. 2018-03-02]. Dostupné na internete:

<http://www.3ders.org/articles/20150909-chinese-researchers-treat-scoliosis-with-country-first-customized-3d-printed-back-brace.html>

3DPRINT, 2016: UNYQ collaborates with Studio Bitonti for 3D printed align scoliosis brace-attractive, lightweight & smart [online]. [cit. 2018-03-15]. Dostupné na internete: <https://3dprint.com/149553/unyq-bitonti-studios-align/>

Dezeen, 2016: 3D printed back brace offers „fashionable“ solution for scoliosis sufferers [online]. [cit. 2018-02-15]. Dostupné na internete: <https://www.dezeen.com/2016/11/04/unyq-align-fashionable-3d-printed-back-brace-replaces-current-chunky-designs/>

DODZIUK, H., 2016. Applications of 3D printing in healthcare. *Kardiochirurgia i Torakochirurgia Polska*, 13 (3).s. 283-293.

ELTORAI, A. E. M., NGUYEN, E., DANIELS, A. H., 2015. Three-dimensional printing in orthopedic surgery. In: *Orthopedics*.

MOK, S. .W., NIZAK, R., FU, S. CH., KEVIN HO, K.W., QIN. L., SARIS, D. B. F., CHAN, K. M., MALDA, J., 2016. From 3D printer: Potential of three-dimensional printing for orthopaedic application. In: *Journal of orthopaedic translation* (2016) 6. s. 42-49.

MOLNÁR, I., HRUŠECKÝ, R., MOROVIČ, L., GÖRÖG, A., 2018. *Observation of shape and dimensional accuracy changing of parts in time intervals manufactured by additive method fused deposition modeling*. In: *Novel Trends in Production Devices and Systems IV (NTPDS IV) : Special topic volume with invited peer reviewed papers only*. 1. vyd. Zurich : Trans Tech Publications, 2018, S. 182-189. ISSN 0255-5476. ISBN 978-3-0357-1265-0. V databáze: DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.919.182 ; SCOPUS: 2-s2.0-85045434772

MOROVIČ, L., 2007. *Návrh metodiky bezdotykového 3D skenovania tvarovo zložitých plôch* [Dizertačná práca]. Trnava. Slovenská technická univerzita v Bratislave; Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave; Ústav výrobných technológií. Vedúci dizertačnej práce: prof. Dr. Ing. Jozef Peterka.

WASP. 2016: 3D Printing and the medical application: Lelio Leoncini's amazing creations using WASP 3D printers [online]. [cit. 2017-12-22]. Dostupné na internete: <http://www.wasproject.it/w/en/3d-printing-and-the-medical-application-lelio-leoncinis-amazing-creations-using-wasp-3d-printers/>

NEOPROT, 2017: Ortopedické a protetické zdravotnícke pomôcky [cit. 2017-11-16] Dostupné na internete: <http://www.neoprot.sk/>

ZOZNAM PUBLIKAČNEJ ČINNOSTI

ADF Vedecké práce v ostatných domácich časopisoch

- ADF01 MOLNÁR, Ivan - MOROVIČ, Ladislav. 3D digitization and additive manufacturing technologies in medicine. In *Vedecké práce MtF STU v Bratislave so sídlom v Trnave. Research papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology in Trnava*. Vol. 26, no. 42 (2018), s. 165-170. ISSN 1336-1589. V databáze: DOI: 10.2478/rput-2018-0020 ; INSPEC.

AEC Vedecké práce v zahraničných recenzovaných vedeckých zborníkoch, monografiách

- AEC01 LECKÝ, Šimon - VÁCLAV, Štefan - MICHAL, Dávid - HRUŠECKÝ, Róbert - KOŠTÁL, Peter - MOLNÁR, Ivan. Assembly tool manufacturing and optimization for polylactic acid additive manufacturing. In *Novel Trends in Production Devices and Systems V (NTPDS V) : Special topic volume with invited peer reviewed papers only*. 1. vyd. Zurich : Trans Tech Publications, 2019, S. 152-162. ISSN 0255-5476. ISBN 978-3-0357-1515-6. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85066279572.
- AEC02 MICHAL, Dávid - HRUŠECKÝ, Róbert - KOŠTÁL, Peter - MOLNÁR, Ivan. Analysis of shape and dimensional deformation of the model with a precision circular hole produced by digital light processing (DLP) additive technology. In *Novel Trends in Production Devices and Systems VI. NTPDS VI*. 1. vyd. Zürich : Trans Tech Publications, 2020, S. 213-220. ISSN 1662-9752. ISBN 978-3-0357-1726-6. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85086770104 ; DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.994.213.
- AEC03 MOLNÁR, Ivan - HRUŠECKÝ, Róbert - MOROVIČ, Ladislav - GÖRÖG, Augustín. Observation of shape and dimensional accuracy changing of parts in time intervals manufactured by additive method fused deposition modeling. In *Novel Trends in Production Devices and Systems IV (NTPDS IV) : Special topic volume with invited peer reviewed papers only*. 1. vyd. Zurich : Trans Tech Publications, 2018, S. 182-189. ISSN 0255-5476. ISBN 978-3-0357-1265-0. V databáze: DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.919.182 ; SCOPUS: 2-s2.0-85045434772.
- AEC04 MOLNÁR, Ivan - MOROVIČ, Ladislav - DELGADO SOBRINO, Daynier Rolando - LECKÝ, Šimon - MICHAL, Dávid. Medical applications of biomaterials: the case of design and manufacture of orthopedic corsets made of polylactic acid by additive manufacturing. In *Novel Trends in Production Devices and Systems V (NTPDS V) : Special topic volume with invited peer reviewed papers only*. 1. vyd. Zurich : Trans Tech Publications, 2019, S. 223-232. ISSN 0255-5476. ISBN 978-3-0357-1515-6. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85066244687.

AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

- AFC01 HRUŠECKÝ, Róbert - MOLNÁR, Ivan - GÖRÖG, Augustín - MICHAL, Dávid.
The influence of computed tomography detector resolution on measured values of shape and dimensional accuracy of component produced by material jetting process. In *Annals of DAAAM International Symposium 2019 [USB] : Proceedings of the 30th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation*, 20. - 27. 10. 2019, Zadar, Croatia. 1. vyd. Viedeň : DAAAM International, 2019, S. 1-7. ISSN 2304-1382. ISBN 978-3-902734-23-5. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85077861255.
- AFC02 MOLNÁR, Ivan - MOROVIČ, Ladislav. Design and manufacture of orthopedic corset using 3D digitization and additive manufacturing. In *International Conference on Manufacturing (Manufacturing 2018) [elektronický zdroj] : XXIII International Conference on Manufacturing 2018, 7. - 8. June 2018, Kecskemét, Hungary*. Vol.448, (2018), s. 1-7. ISSN 1757-8981. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85058401560 ; DOI: 10.1088/1757-899X/448/1/012058 ; WOS: 000467870800058.
- AFC03 MOLNÁR, Ivan - MICHAL, Dávid - ŠIMON, Štefan - MOROVIČ, Ladislav - KOŠTÁL, Peter. Design and manufacture of life size human model using material extrusion and vat photopolymerization additive processes. In *Modern Technologies in Manufacturing (MTeM 2019) : 14th International Conference, 09. - 12. October 2019, Cluj-Napoca, Romania*. 1. vyd. United Kingdom : EDP Sciences, 2019, S. 1-6. ISBN 978-2-7598-9083-5. V databáze: DOI: 10.1051/mateconf/201929901010 ; WOS: 000568128200010.

Štatistika: kategória publikačnej činnosti

ADF	Vedecké práce v ostatných domácich časopisoch	1
AEC	Vedecké práce v zahraničných recenzovaných vedeckých zborníkoch, monografiách	4
AFC	Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách	3
Súčet		8