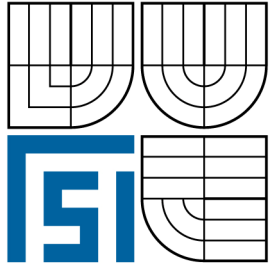


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

POSTUP TVORBY PROTOTYPOVÉHO DIELU „RADIACEJ HLAVICE“ S VYUŽITÍM MODERNÉHO SOFTVÉRU A TECHNOLOGIÍ

BAKALÁRSKA PRÁCA
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

PETER KRISTEL

VEDÚCI PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JOSEF SEDLÁK, Ph.D.

ABSTRAKT

Práca je zameraná na tvorbu prototypového dielu radiacej hlavice. Pri návrhu bola zohľadnená ergonómia tejto súčasti pre pohodlnú manipuláciu a kontakt s užívateľom. Model prototypu bol doplnený o dizajnové prvky, ktoré mu dodávajú mimoriadny výraz. Produkcia a úpravy modelu boli realizované parametrickým CAD systémom. Zdrojom dát bol pôvodný anatomický model naskenovaný 3D optickým skenovacím zariadením ATOS. Funkcia finálneho prototypu bola overená komerčne dostupnou technológiou rapid prototypingu Fused Deposition Modeling.

Kľúčové slová

Reverzné inžinierstvo, optický 3D skener, CAD, rapid prototyping, fused deposition modeling, radaica hlavica.

ABSTRACT

Target of this thesis is focused to production a prototype part shift lever head. Project was created with ergonomic elements for better and comfortable manipulation and use. Model of a prototype was filled by design components, which evoked remarkable expression. Production and editing was realized in parametric CAD system. Source data was used from scanning primary body of shift lever head with use a reverse engineering method, 3D scanning using ATOS system. The function of final prototype was verified by commercial available rapid prototyping method Fused Deposition Modeling.

Key words

Reverse engineering, potical 3D scanner, CAD, rapid prototyping, fused deposition modeling, shift lever head.

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

KRISTEL, P. *Postup tvorby prototypového dielu „radiacej hlavice“ s využitím moderného softvéru a technológií*. Brno: Vysoké učení technické v Brne, Fakulta strojného inžinierstva, 2010. 56 s. Vedúci bakalárskej práce Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

Prehlásenie

Prehlasujem, že som bakalársku prácu na tému Postup tvorby prototypového dielu „radiacej hlavice“ s využitím moderného softvéru a technológií vypracoval samostatne s použitím odbornej literatúry a prameňov, uvedených na zozname, ktorý tvorí prílohu tejto práce.

Dátum: 13.5.2010

Meno a priezvisko: **Peter Kristel**

.....

Podpis bakalára

Pod'akovanie

Ďakujem týmto Ing. Josefui Sedlákov, Ph.D, Ing. Martinu Slanému, prof. Ing. Miroslavu Píškovi, CSc., Ing. Aleši Polzerovi, Ph.D., za cenné pripomienky a rady pri vypracovávaní bakalárskej práce.

OBSAH

Abstrakt	4
Prehlásenie.....	5
Podakovanie	6
Obsah.....	7
1 Teoretický úvod	9
2 Metóda tvorby master modelu.....	11
2.1 Úvod do reverzného inžinierstva	11
2.2 Reverzné inžinierstvo v praxi.....	12
2.2.1 Využitie reverzného inžinierstva	12
2.2.2 Dizajn v reverznom inžinierstve.....	14
2.2.3 Aktualizácia CAD modelu.....	14
2.2.4 Kooperácia s metódami Rapid Prototyping	14
2.2.5 Tuning	14
3 Popis a postup digitalizácie prototypového dielu	16
3.1 Digitalizácia modelu.....	16
3.1.1 3D Skenovacie zariadenia.....	16
3.1.2 Optické 3D skenery	17
3.1.3 ATOS „Advanced Topometric Sensor“	18
3.1.4 Iné technológie 3D optického skenovania – skenovací systém.....	19
FARO.....	19
3.1.5 Proces skenovania s využitím technológie ATOS	19
3.2 Tvorba radiacej hlavice.....	24
3.2.1 Prevod .stl súboru na 3D objemový model.....	24
3.2.2 Konštrukcia modelu v prostredí Autodesk Inventor	26
4 Verifikácia metódou FDM.....	33
4.1 Úvod do Rapid prototypingu	33
4.1.1 Pojem rapid prototyping	33
4.1.2 Vstupné dáta	34
4.1.3 Tvorba modelu	35
4.2 Komerčne dostupné technológie Rapid Prototyping.....	36
4.2.1 Rozdelenie metód Rapid Prototyping	36
4.2.2 Stereolitografia – SLA	37
4.2.3 Solid Ground Curing – SGC	38
4.2.4 Selective Laser Sintering – SLS.....	38
4.2.5 Direct Metal Laser Sintering – DMLS	39
4.2.6 Laminated Object Manufacturing – LOM.....	40
4.2.7 Multi Jet Modelling – MJM.....	40
4.3 Fused Deposition Modeling – FDM	41
4.3.1 Popis technológie FDM	41
4.3.2 Aplikácie metódy FDM	42
4.3.3 Výroba prototypu krytky.....	43
4.4 Výroba radiacej hlavice metódou FDM.....	44
4.4.1 Príprava tlače v programe CatalystEX	44

4.4.2 Proces stavby modelu radiacej hlavice:	48
4.4.3 Postprocesing vyrobeného modelu	49
5 Záver	53
Zoznam použitých zdrojov	54
Zoznam použitých skratiek a symbolov	56
Zoznam príloh	57

1 TEORETICKÝ ÚVOD

Trendy v modernej dobe si vyžadujú stále vyššie nároky na dizajnovú prepracovanosť produktu, preto sa práve dizajn stáva jedným z hlavných oblastí záujmu zákazníka. Ten vyžaduje pri požadovanej kvalite, ktorá sa stáva nutným štandardom, stále komplikovanejší a prepracovanejší vzhľad. Presne ten je pre neho dôležitý a vydobýja si na trhu stále vyšší dôraz na ergonómiu a celkovú prvotnú príťažlivosť produktu. V strojárске oblasti sa vynakladá na túto tému veľké množstvo prostriedkov, či už finančných, alebo akýchkoľvek iných, pretože ľudia neznalí problematiky kupujú produkty z veľkej miery na základe prvotného pocitu, na ktorom hrá dizajn nezanedbateľnú úlohu.

Napríklad automobilové spoločnosti reagujú na tieto požiadavky stále efektnejším prepracovaným dizajnom, ktorý dokáže laika upútať a tak zvýšiť šance daného produktu záujmu na zrealizovanie obchodu. Predovšetkým na dizajnérske skupiny je vyvíjaný tlak spoločnosti. Každý výrobca sa snaží presadiť svoj sortiment a tým vzniká zdravá konkurencia, ktorá pomáha niekedy aj umelo zvyšovať úroveň a prepracovanosť poskytovaných produktov týchto spoločností. Tieto kladú dôraz aj na diverzifikáciu výrobkov, pretože prístup jednotlivých odberateľov je veľmi individuálny a každý má iný názor o ideálnej predstave produktu, ktorej sa snažia dizajnérske štúdiá maximálne priblížiť. Každý jednotlivec má potom príležitosť si so širokého sortimentu vybrať ten, pre neho najpriateľnejší.

V minulosti, kedy ešte zákazník nebol taký náročný na výber sa snahy upierali predovšetkým na funkčnosť a praktickosť, zatiaľ čo o dizajne nemohla byť v podstate žiadna reč. Dnes by šli len funkčné a praktické, dizajnovo zastarané produkty na odbyt len veľmi málo, ak vôbec. Napríklad karoséria automobilu, ktorá je myslím si výborným predstaviteľom vysokých dizajnových požiadaviek. Ťažko si predstaviť moderného kupujúceho, ktorý by sa rozhodoval o investovaní značných prostriedkov len na základe zmieňovaných faktorov bez toho, aby kládol nemalý nárok na dizajnovú stránku produktu.

Pre zvýšenie efektivity tvorby stále novších modelov, ktoré dokážu vyhovieť väčšiemu počtu klientov sa významné spoločnosti rozhodli zvoliť účinný postup, ktorý zabezpečí vyššie šance a konkurencieschopnosť vydávaného produktu na trhu. Reč nie je o ničom inom, ako o technológií reverzného inžinierstva. Jedným z hlavných prínosov tejto technológie je, že dokáže vyjadriť daný prototypový diel „v pravom svetle“, tým je myslené hlavne reálne zobrazenie skutočných rozmerov, možnosť dotyku, manipulácie, zobrazenie s rôznych uhlov atď. V porovnaní s teoretickým modelom vytvoreným grafickým rozhraním je možné oveľa lepšie odhadnúť nedostatky prvotného návrhu, ako len v zobrazení na 2D projekcií, ktorá nikdy neposkytne potrebné množstvo informácií o danom výrobku. Tento námet sa v skutočných rozmeroch následne upravuje, odstraňujú sa nedostatky, vylepšujú jednotlivé línie, ohraničenia a nes počet ďalších detailov, ktoré pri súlade tvoria spomínaný príťažlivý efekt. Názov technológie je odvodený od sledu operácií, ktoré nadväzujú v opačnom poradí, ako pri bežnej tvorbe nového produktu, kde vytváram koncový model priamo z teoretickej platformy vypracovanej na softwarovej základni.

Pri použití postupu reverzného inžinierstva sa nami editovaný skutočný prvotný diel, vytvorený prevažne polyuretánovou formou klasickým obrábaním s dodatočným precíznym doladením, skenovaním prevedie späť do digitálnej podoby, kde prebieha jeho ďalšie spracovanie. O takejto súčasti máme reálnu priestorovú predstavu, ktorá pre ňu znamená veľkú výhodu. Klasickými metódami vytvorený model totiž niekedy vôbec nezodpovedá očakávaným výsledkom. Postup reverzie je logický, pretože nemožno predpokladať zhotovenie ideálneho návrhu na prvý krát. Táto metóda prvotne pôsobí nelogicky a zbytočne zložito, ale v konečnom dôsledku je neporovnateľne efektívnejšia. Je využívaná renomovanými nielen automobilovými koncernami, pretože uplatnenie metódy je veľmi široké od veľkých súčastí spomínaných karosérií po miniaturizovaný dizajn malých komponent. Tie taktiež vystupujú na scénu s čoraz sugestívnejším podmanivým vzhlľadom. Do tejto triedy spadajú aj napríklad čoraz populárnejšie pamäťové „flash“ disky. Kapacita pri nich prestáva byť relevantná, pretože sa pohybuje v hodnotách, ktoré už dokážu vyhovieť aj najnáročnejším zákazníkom. Tu vstupuje úloha dizajnu, pretože tieto produkty sa stávajú viac ako pamäťovým médium skôr módnym doplnkom. Preto je práca zameraná na aktuálnu problematiku, a to dizajnovú stránku v strojárскеj výrobe.

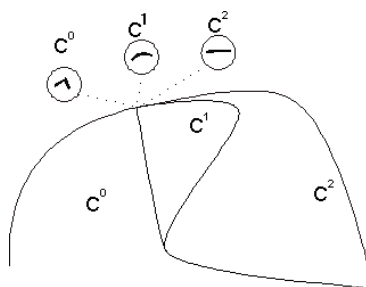
Táto práca sa zaoberá konkrétne tvorbou riadiacej hlavice osobného automobilu. Ide o ovládací prvok, takže produkt bude v priamom kontakte s užívateľom. Takáto súhra si okrem na dotyk príjemných materiálov vyžaduje tvarovo prispôsobené ergonomické prevedenie. Jedná sa o prvok nadštandardnej výbavy, možno ho zaradiť medzi „tuningové“ úpravy, z toho dôvodu bude konštrukcia zameraná popri samozrejmej funkčnosti hlavne na príťažlivý dizajn. Ten má za úlohu splňať funkciu doplnkovej výbavy obohatenej o nesymetrické tvary. Zaujímavou pridanou hodnotou prototypu je odklápacia vrchná časť hlavice, pod ktorou bude montované tlačidlo pre štart motoru.

Tvorba je koncipovaná na niekoľko základných operácií. Prvým krokom bola tvorba plastelínového modelu na štandardnú sériovo vyrábanú riadiacu hlavicu. Takýto postup priblížil nami požadovaný tvar. Modelovanie spočívalo z vtlačenia odtlačku ruky do adaptabilnej plastelínovej formy, čím sa zabezpečil jej ergonomický tvar. Model bol po upravení a vyhladení plôch naskenovaný optickým skenovacím zariadením. Naskenovaný povrch tvoril plochu, ktorá sa v grafickom softvéri previedla na 3D model. Takýto naskenovaný profil bol upravovaný a interpoláciou plôch vytvorených vo viacerých rovinách, prevedený na základný tvar. Do tohto tvaru boli následne pridávané jednotlivé prvky, vrátane odklápacieho mechanizmu tlačidla, doladenie ergonomických požiadaviek a doplnkové dizajnérske úpravy. Po viacerých úpravách bol výsledný model fyzicky vytvorený metódou rapid prototyping. Podrobnejší popis jednotlivých krokov je popísaný v nižšie uvedených kapitolách.

2 METÓDA TVORBY MASTER MODELU

2.1 Úvod do reverzného inžinierstva^{2,7}

Pojem reverzné inžinierstvo označuje moderný postup výroby, ktorý zabezpečuje skrátenie doby vývoja nových technológií, garantuje zníženie chybovosti konečného návrhu. Vyznačuje sa opačným sledom činností voči klasickému výrobnému procesu. Zatiaľ čo pri klasickom procese konštruktér vytvorí v 3D modelári za pomoci podkladov CAD návrh, ktorý sa stáva predlohou pre fyzické súčasti vyrábané priamou metódou použitím napríklad CNC frézky, postup reverzného inžinierstva využíva ako zdroj informácií fyzický model, ktorý je skenovaním prevedený do podoby digitálnych dát. Získaný model konštruktér následne upraví do požadovanej podoby v CAD systéme. Skenovaním, digitalizáciou sa rozumie proces prevodu fyzickej súčasti na softvérové dáta. Je realizovaná použitím 3D skenerov. Skenovacích technológií je niekoľko, rozlišujú sa presnosťou, rýchlosťou skenovania i veľkosťou prevedenia. Výsledkom skenovania bývajú najčastejšie požadované plošné, eventuálne objemové modely. Jednotlivé druhy modelov sa môžu líšiť napojením, hladkosťou povrchu, ktorá je závislá na zvolenom stupni polynómu krivky. Vyšší stupeň znamená vyššiu zložitosť, ale aj hladkosť krivky. Krivky môžu dosahovať rôznu spojitosť. Parametrickú od najjednoduchšej C^0 po najzložitejšiu C^2 Obr. 2.1, pričom krivka je hladká, ak sú vo všetkých jej bodoch spojitý aj jej prvé derivácie. Pre vyššie derivácie vravíme, že krivka má spojitosť druhého, tretieho a obecné n -tého radu. Spojitosť poznáme aj geometrickú a to pozičnú, dotyčnicovú a krivo stnú, označenie $G0$ až $G4$.



Obr. 2.1 Napojenia kriviek¹¹.

Reverzné inžinierstvo sa používalo počas vojny na kopírovanie konkurenčných technológií a táto idea sa preniesla aj na súčasný vek. Cieľom je odкрыť princíp fungovania skúmaného predmetu. Väčšinou za účelom zostavenia ekvivalentnej, niekedy kvalitatívne slabšej, avšak lacnejšej kópie originálu. Technológia je často využívaná lacnejšími dodávateľmi karosárskych komponent.

Využitelnosť Tab. 2.1 nachádza aj pri hľadaní efektívnejších spôsobov výroby danej súčiastky za súčasnej minimalizácie nákladov. Výsledkom sú často kvalitnejšie a trvácnejšie výrobky.

Tab.2.1 Postup reverzného inžinierstva².



Výhody reverzného inžinierstva:

- prezentácia produktu pred jeho sériovou výrobou,
- predčasné odstránenie chýb, nežiaducich faktorov,
- obnova stratených výrobných parametrov,
- rozbor výrobku,
- rekonštrukcia poškodených výrobkov,
- znižovanie nákladov,
- priblíženie k optimálnej variante výrobku, výroby,
- možnosť rýchlej opravy výrobku,
- získavanie konkurenčných technológií,
- akademické účely,
- vývoj súčasti, použitie totožnej technológie s využitím inovácie,
- pri softvéroch odstraňovanie ochrany proti kopírovaniu, obchádzanie hesiel, atď.

V matematickom vyjadrení proces reverzného inžinierstva zodpovedá dedukcií, teda odvodzovaniu, zatiaľ čo klasický výrobný postup reprezentuje indukcia.

2.2 Reverzné inžinierstvo v praxi

2.2.1 Využitie reverzného inžinierstva^{6,7,8,11}

Dôvodov, prečo využívať technológie reverzného inžinierstva (ďalej len RE) je niekoľko. Základným kritériom je absencia 3D digitálneho modelu. Máme teda k dispozícii len výkresy, alebo reálnu súčiastku. RE môžeme tiež nazvať modelovaním 3D modelu na základe výkresových podkladov, prípadne na základe digitalizácie skenovacími zariadeniami. RE sa zaoberá predovšetkým tvorbou 3D modelu na základe fyzickej súčasti.

Využitie nájde napríklad pre digitalizáciu súčasti, ktorá bola pôvodne vyrobená na základe výkresovej dokumentácie a jej výroba je stále aktuálna. Získaný 3D model využijeme k prípadnej modifikácii súčasti, alebo k zavedeniu nasledovnej výroby CAD/CAM technológiou. 3D model umožní na súčasti prevádzať dodatočné analýzy, ktoré môžu prispieť k zdokonaleniu výroby. Taktiež je technológia využiteľná pri rekonštrukcii poškodených súčastí, ku ktorým neexistuje pôvodná výkresová dokumentácia.

V modernom priemyslovom odvetví, akým je napríklad automobilový priemysel sa RE využíva pri kontrole dizajnového návrhu karosérie automobilu. V prvej fáze dizajnér navrhne tvary, ktoré modeluje na reálnom hlinenom modeli. Tento model, vyrábaný pre názornosť v skutočnej veľkosti, sa digitalizáciou prevedie do 3D súčasti. Takto vytvorený model sa za použitia CAD/CAM technológie použije na výrobu skúšobnej série plechov, ktoré sa opäť naskenujú. V jednej z posledných fáz sa porovná sa porovná zhoda medzi návrhom dizajnéra a vyrobenou vzorkou. Prípadné úpravy sú realizované na vstupnom 3D modeli.

Bez použitia technológie RE by nebolo prakticky možné kontrolovať niektoré zložité dizajnérske kreácie, akými môžu byť napríklad zložité priestorové krivky. Iným príkladom využitia je kontrola časovo náročných, avšak nezložitých výrobkov.

2.2.2 Dizajn v reverznom inžinierstve^{8,9}

Reverzné inžinierstvo je veľkým prínosom najmä pre dizajnérov, ktorí vytvárajú reálne modely z hlíny, dreva, modelárskych pien apod. I keď sa takéto navrhovanie dizajnu môže zdať zastaraným, v niektorých prípadoch je afektívnejšie, ako počítačové modelovanie, pretože dizajnér nie je závislý od nastavovania jednotlivých parametrov a môže sa sústrediť predovšetkým na samotný dizajn, čo môže mať v konečnom dôsledku lepší konečný efekt. Následný sken prevedie prácu na dáta, ktoré podliehajú ďalšej úprave do tzv. „*High – Quality Surfaces*“, teda vysoko kvalitných povrchov, alebo u zložitejších modelov pomocou vyhladenia plôch na polygonálny model.

2.2.3 Aktualizácia CAD modelu^{2,7}

Príkladné použitie napríklad pri renovácii foriem v lisovniach plechov apod. Problém sa prejaví nepresnými výrobkami, eventuálne výrobkami s chybami. V takýchto prípadoch sa forma ručne doladzuje a upravuje, aby sa znížila chybovosť. Ak má byť forma použitá v sériovej výrobe, je potrebné aktualizovať CAD model a vyrobiť novú formu.

Pri malých zmenách je možné model aktualizovať s nezmeneným rozložením a návaznosťou plôch. Pri zmenách väčších sa rekonštruujú celé plochy. Alebo vyrába nový polygonálny model, ktorý je výhodnejší, pretože moderný CAD/CAM softvér dokáže obrábať aj kombinované CAD modely zložené z plôch, polygónov či mraku bodov.

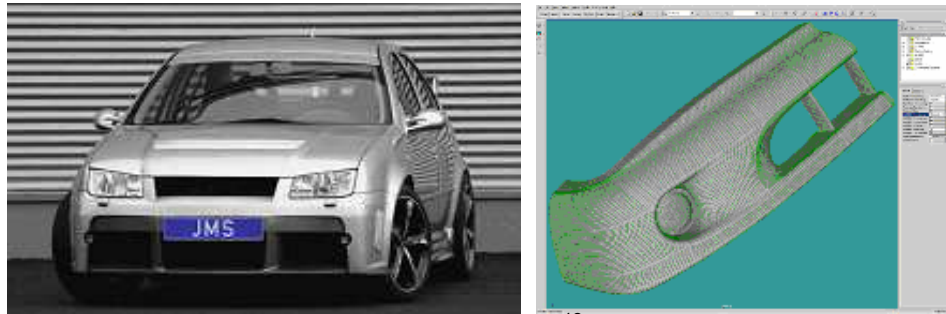
2.2.4 Kooperácia s metódami Rapid Prototyping^{2,8,18}

Ak napríklad existuje návrh z absenciou 3D modelu a je potrebné ho vyrobiť či prezentovať, je možné za pomoci kooperácie metódy reverzného inžinierstva a rapid prototypingu rýchlo vytvoriť ďalší model, aby nedošlo k poškodeniu originálu. Tieto metódy vyžadujú polygonálny model, ktorý je však pomocou 3D skenera a postprocesingu jednoduché vytvoriť. Kompletný proces výroby od digitalizácie cez výrobu formou rapid prototypingu môže byť urýchlený až na niekoľko dní, či dokonca hodín. Vo vývoji výrobku je takto možné po zmenách tvaru modelu veľmi rýchlo vyrobiť nové aktuálne modely. Čas uvedenia výrobku na trh sa potom výrazne skrátí.

2.2.5 Tuning^{7,8,12}

Tuning je obľúbený hlavne medzi mladšími nadšencami pre motorizmus, ktorý sú ochotný pre vylepšenie celkového vzhľadu svojho automobilu investovať nemalé finančné prostriedky. Výsledný efekt však pri troche predstavivosti smerovanej správnym smerom stojí za to. Doladovanie stojí mnohokrát na detailoch, akými sú „spoilery“, „mračítka“, atď. Obr. 2.3. Pokiaľ sa daná tuningová úprava venuje vytypovanému automobilu, musia byť známe všetky rozmery a tvary súvisiacich súčastí, napríklad pre výrobu mračítka na predný svetlomet je potrebné získať požadované rozmery a tvary svetlometu, rovnaké pravidlá platia aj pre spomínané spoilery, kde je dôležitá návaznosť jednotlivých laminátových častí pre vytvorenie spojitého efektu, zahŕňajúceho predný a zadný upravený laminátový nárazník prepojený príslušnými prahmi.

Nesprávne napojenie línií by potom pokazilo výsledný efekt, ktorý je práve cieľom tuningu vylepšiť od pôvodného sériového konceptu.



Obr. 2.3 a) upravený model Volkswagen Bora ¹², b) model predného spojleru ⁷.

Automobilky však tuningovým firmám svoje CAD modely neposkytujú, preto sú odkázané na technológiu reverzného inžinierstva, kde je daný diel skenovaný, prevedený na CAD model z ktorého sú potom odvodzované rozmery pre návrh daného tuningového dielu tak, aby súčasť po namontovaní tvarovo a rozmerovo korešpondovala s tvarmi na vozidle.

3 POPIS A POSTUP DIGITALIZÁCIE PROTOTYPOVÉHO DIELU

3.1 Digitalizácia modelu

3.1.1 3D Skenovacie zariadenia^{2,8,9,11}

3D skener je zariadenie, ktoré rôznymi technológiami analyzuje skutočný objekt a je schopné previesť štruktúru jeho povrchu do siete bodov, ktorú software využije k tvorbe 3D modelov. Tieto zariadenia sú v značnej miere používané v zábavnom priemysle, pri tvorbe filmov, videohier, alebo napríklad dokumentácie kultúrnych artefaktov.

Nás ale zaujíma predovšetkým využitie týchto technológií v strojárskom priemysle. Uplatnenie majú najmä v oblastiach priemyslového dizajnu, reverzného inžinierstva a v problematike prototypingu. V technológií reverzného inžinierstva majú skenery nezastupiteľnú úlohu. Možnosť editácie, rekonštrukcie opotrebených plôch, prípadnej korekcie rozmerov sa stáva čoraz populárnejšou. Prudký nárast hardvérových výkonov výpočtových systémov priniesol do celej CAD branže možnosť spracovania obrovského kvanta dát v krátkom čase, čo spôsobilo v časovom horizonte niekoľkých posledných rokov doslova technologický „boom“. V prípade skenovacích zariadení to viedlo k nárastu komfortu a rýchlosti skenovacích procedúr, ale predovšetkým k zvýšeniu použiteľného rozlíšenia. Z toho vyplýva aj vyššia výsledná presnosť merania a tým pádom možnosť uplatnenia v širšom spektre. Aj v prípadoch, kde donedávna preferované technológie výkonovo zďaleka nepostačovali.

Skenery môžu pracovať na najrozličnejších metódach a s použitím širokého spektra technológií. Ich prioritné delenie môžeme zúžiť na skenery dotykové a bezdotykové.

Mechanické sú založené na dotyku sondy s povrchom výrobku, preto ich zaraďujeme k dotykovým.

Radarové sú využiteľné pre diaľkový veľkoplošný sken, napríklad topografický prieskum povrchu planéty. Na daný rozsah niekoľkých kilometrov štvorcových disponujú postačujúcim rozlíšením.

Magnetické využívajú efektu magnetickej rezonancie, uplatňujú sa najmä v oblasti medicíny, lekárstve a výskumnej oblasti.

Ultrazvukové podobne ako magnetické, ktoré samotným názvom ktoré samotným názvom evokujú sféru použitia. Okrem lekárstva nachádzajú široké uplatnenie v defektoskopii, čo je oblasť zaoberajúca sa detekciou mikro aj makroskopických porúch v materiáloch a konštrukciách.

Röntgenové skenery využívajú gama žiarenia k „presvecovaniu“ materiálu a tým odhaľujú chyby v konštrukciách.

3.1.2 **Optické 3D skenery**^{2,6,9,11}

Predmetom záujmu tejto práce sú ale predovšetkým optické skenovacie technológie. V nasledujúcich kapitolách sa preto budeme venovať zariadeniam pracujúcim na princípe optického snímania.

Optické skenery môžeme rozdeliť do dvoch základných skupín. A to skenery optické – pasívne a optické – aktívne.

Pasívne 3D skenery sú založené na analýze obrazu z pohybujúcej sa kamery, alebo slúžiace k rekonštrukcii 3D povrchu z viacerých 2D obrazov. Pracujú na podobných princípoch, ako optické kamery. Celkovo sa princípy špeciálnych kamier, nazývaných „*Motion Capture Systems*“ objavujú v kombinácii s optickými 3D skenermi, kde slúžia k vzájomnému určeniu polohy skeneru a skenovaného objektu.

Za optické – aktívne sú označované 3D skenery, ktoré aktívne ožarujú snímaný objekt a z deformácie reflektovaného svetelného odrazu rekonštruujú 3D povrch.

Optické skenery sa vyznačujú voči príbuzným technológiám niekoľkými výhodami. Medzi hlavné patrí, že si dokážu poradiť s opticky komplikovanejšími plochami, ako sú vlasy alebo chlpy, ktoré laserové systémy nedokážu spracovať. Ich výhodou je aj veľká rýchlosť skenovania, dokážu zachytiť až 50 shellov za sekundu, čo je dostatočná rýchlosť napríklad pre scan mimiky. Shellom sa rozumie 3D povrch zabratý jednou skenovacou operáciou. Výsledkom skenovania na týchto prístrojoch býva označenie „mrak bodov“, ktoré kompatibilný softvér prevedie na 3D plochu. Optické skenery sa v priemyselnej praxi využívajú od konca 90. rokov, stávajú sa stále rozšírenejšími v oblasti strojárkej výroby. Voči dotykovým sa vyznačujú principiálnou výhodou, že dokážu skenovať celý povrch na jedenkrát, zatiaľ čo mechanické rastrujú po povrchu dotykovou sondou.

Presnosť dosahujú priemernú, ktorá nie je vždy dostačujúca. Naskenovaný obraz prevedený do formátu .stl je software schopný porovnať s navrhnutým CAD modelom a zaznamenané odchýlky zobrazíť do formy farebných máp. Problém nastáva aj pri skenovaní vysoko leštených, zrkadlových plôch s vysokou odrazivosťou, alebo transparentných materiálov. V takomto prípade využívame alternatívnych variant.

3.1.3 ATOS „Advanced Topometric Sensor“^{2,9,11}



Obr. 3.4 Optické skenovacie zariadenie ATOS.

V ďalšom texte je popísaný optický skenovací systém ATOS Obr. 3.4, ktorý bol využitý pri tvorbe riadiacej hlavice. Skenovacia hlava pozostáva z dvoch zrkadlovo orientovaných CCD kamier a projektora. CCD kamery nezávisle snímajú projektorom premietané pruhy svetla na skenovaný predmet s rozličnou šírkou a ohniskovou vzdialenosťou. Software integrovaný vo výpočtovom centre za pomoci triangulačnej metódy vytvorí 3D sieť bodov. Z jedného merania CCD kamery zaznamenajú vyše 4 milióny bodov. Vo vysokom rozlíšení predstavuje 1 snímok 400 000 pixlov. Triangulačná metóda definuje danú skenovanú oblasť troma bodmi, ktoré tvoria jednoznačne definovanú plochu a normálou, ktorá určuje priestorovou orientáciu plochy. Metóda umožňuje vypočítať nezávisle 3D súradnice pre každý pixel CCD kamery. Detekcia modelu a priestorová náväznosť jednotlivých skenovaných plôch je zabezpečená referenčnými značkami, nalepenými na povrch skenovaného predmetu. Predmet sa skenuje z rôznych uhlov tak, aby mal softvér vždy k dispozícii minimálne 3 referenčné body z predošlej expozície. Značky pomáhajú softvéru s napájaním snímku pri tvorbe 3D plochy. Správne skalibrovaný stroj dokáže snímať s presnosťou 50 μm , čo je hodnota porovnateľná s presnosťou mechanických snímacích hláv. Skener ATOS je vyrábaný v 3 veľkostných prevedeniach.

Súčasťou dodávky je stojan zabezpečujúci požadovanú stabilitu a tuhosť sústavy a 64 bitový výpočtový člen. Softvérové vybavenie exportuje získaný mrak bodov do zvoleného formátu, štandardne .stl. Jednoduché „user friendly“ prostredie kladie na užívateľa minimálne požiadavky. Pri skenovaní nie je potrebné dodržiavať rovnaké uhly natočenia objektu, značky slúžia na určenie presnej pozície objektu v priestore. Softvér dokáže porovnať CAD model s nameranými hodnotami a vytvorí farebnú mapu určujúcu intenzitu odchýlky v danom mieste. Pre potrebu opakovaného merania je k dispozícii nadštandardná výbava, softvérovo ovládaný rotačný stôl, alebo možnosť pripojenia skenovacieho zariadenia na priemyselný robot.

3.1.4 Iné technológie 3D optického skenovania – skenovací systém

FARO^{2,9,13,}

Triangulačný skenovací systém FARO využíva pre meranie laserovú technológiu Obr. 3.5. Systém FARO je na trhu dostupný v 3 verziách a to *Quantum*, *Platinum* a *Fusion*. Nepresnosť tejto technológie sa pohybuje max. na úrovni 0,006 mm. Upínanie prístroja je realizované formou otočného kĺbového ramena. Systém FARO má vstavaný člen kompenzácie teploty, ktorá eliminuje nežiaduce faktory prostredia. Prehľadný software CAM2 s ramenom FARO a notebookom predstavuje v prevedení *Platinum* plne mobilný merací systém. Mobilitu systému zabezpečuje Li-ion batéria s výdržou 8 hodín. Prevedenie *Quantum* predstavuje najnovšie technológie dosahujúce vyššiu presnosť. Nadštandardnou výbavou je nový typ rýchlo upínača a bezdrôtové *Bluetooth* rozhranie. Táto skenovacia technológia dokáže snímať s rýchlosťou až 19 000 bodov za sekundu, preto ju zaraďujeme do „high – tech“ oblasti.



Obr. 3.5 Meracie rameno Faro¹³.

3.1.5 Proces skenovania s využitím technológie ATOS

Do praktickej časti zaoberajúcej sa problematikou reverzného inžinierstva pri postupe tvorby prototypu riadiacej hlavice sú zaradené operácie modelovania ergonomických prvkov hlavice do požadovanej podoby Obr. 3.6. Na vytvorenie nami požadovaného tvaru bolo využité poddajnej a ľahko tvarovateľnej plastelínovej hmoty. Modelovanie prebiehalo postupným nanášaním tvarovacej hmoty na podklad, ktorý tvorila štandardná, sériovo vyrábaná riadiaca hlavica s automobilu Škoda Felícia. Vytvorený model kopíroval ergonomické požiadavky užívateľa, čo bolo cieľom jeho tvorby. Takto adaptovaný model bol pripravený na skenovanie.



Obr. 3.6 Skenovaný model.

Na digitalizáciu bolo využité optického skenovacieho zariadenia ATOS, ktorého popis a funkcia sú samostatne uvedené v kapitole 1.3.3.

Dôležitá bola správna kalibrácia stroja pred skenovaním, ktorá je nevyhnutná pre správnu funkciu skenera. Zároveň znižuje odchýlku merania.

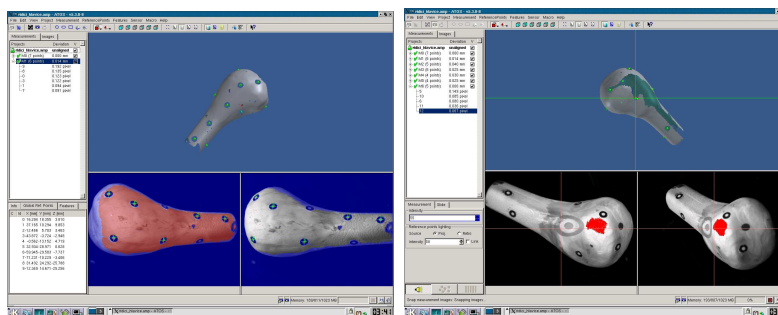
Dôležitým úkonom bolo nalepenie referenčných značiek, ktorých funkcia spočíva v detekcii pevných bodov na súčasti z dôvodu správnej orientácie a návaznosti jednotlivých plôch pri výslednom výstupnom mraku bodov, pretože skener ATOS neumožňuje nasnímanie celej súčasti na jeden sken, ale týchto skenov je potrebné previesť niekoľko. Pri skenovaní nasledujúcej časti povrchu je vždy potrebné detegovať minimálne 3 referenčné body za pomoci preprocesingu v pridruženom softvéri ATOS.

Pred skenovaním aplikujeme na povrch predmetu špeciálny nános bielej farby. Po vyschnutí vytvorí na povrchu biely prášok, ktorý pomáha skeneru zachytiť odrazené svetlo dopadajúce z projektora. Biela farba má schopnosť najvyššej odrazivosti, čo je dôvod aplikácie spreja. Po nanosení je dôležité očistiť referenčné značky, pretože nános bieleho prášku bráni systému pri detekcii jednotlivých referenčných bodov. Takto pripravená súčasť je zobrazená na obrázkoch Obr. 3.7.

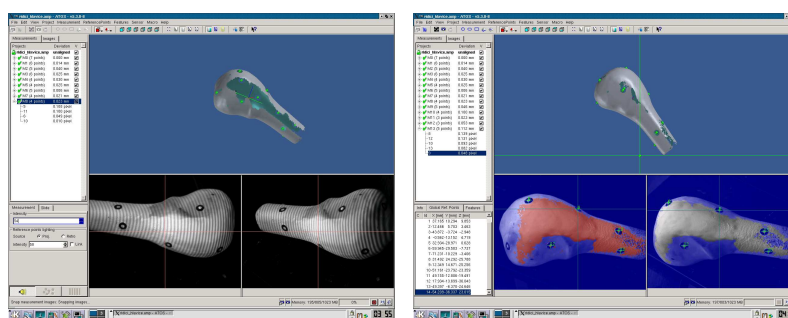


Obr.3.7 Súčasť pripravená na skenovanie – nalepené referenčné značky.

Postupným otáčaním a napájaním plôch sa naskenoval celý povrch komponenty. Pridružené fotografie zobrazujú jednotlivé skeny z procesu digitalizácie Obr. 3.8. Fotografie sú informatívne, v plnom rozlíšení sú k dispozícii v prílohe.

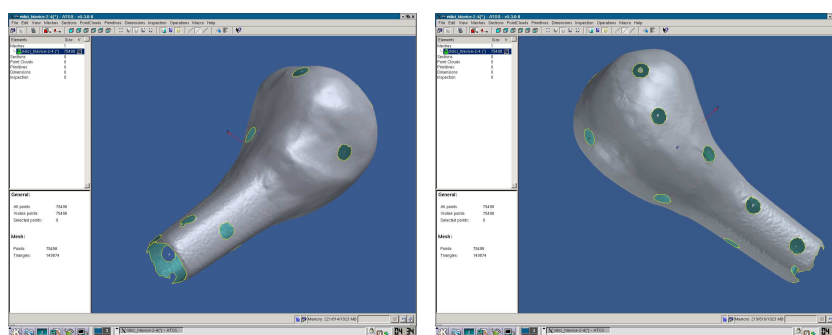


Obr. 3.8 Proces skenovania.



Obr. 3.9 Proces skenovania.

Na niektorých obrázkoch je zachytený proces premietania pruhov svetla na skenovanú súčasť. Z obrázkov je možné vidieť postupnú kompletizáciu modelu spájaním jednotlivých skenov Obr. 3.9.

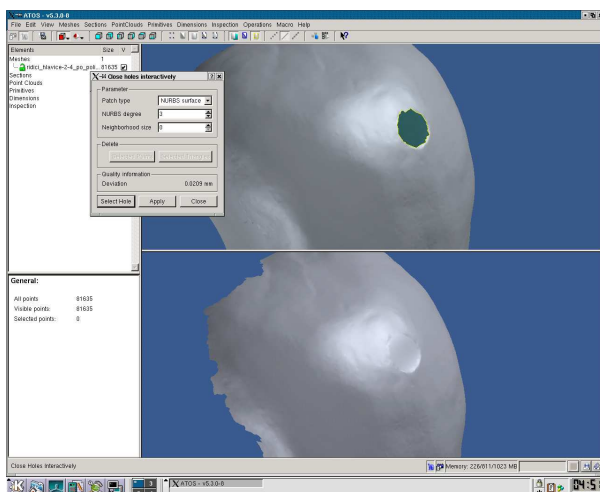


Obr. 3.10 Kompletný 3D povrch s dierami.

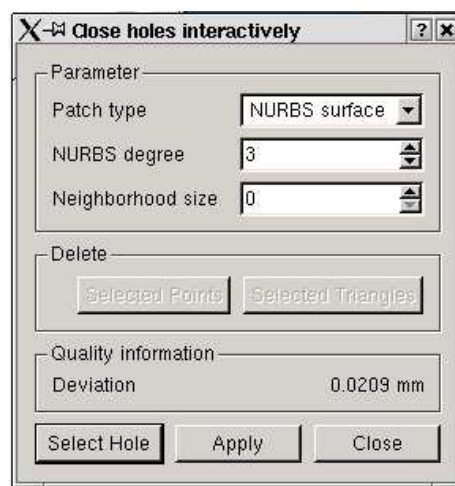
Následným krokom bolo v postprocesingu „zalepiť“ diery Obr. 3.10 v modeli spôsobené nalepenými referenčnými značkami. Zalepovanie prebiehalo v totožnom programe ATOS. Pri procese zalepovania dier bolo možné dosiahnuť maximálneho priblíženia tvaru okolitej oblasti pomocou viacerých parametrov, ktorých zmenou sa dala sledovať automaticky vypočítavaná odchýlka, ktorá bola priebežne po každej zmene parametra zobrazovaná Tab. 3.2. Užívateľ mal preto vždy prehľad o aktuálnej interpolácii plochy a mohol tak nastaviť najideálnejšiu variantu zalepenia jednotlivých dier tak, aby čo najlepšie splyvala z okolitým prostredím.

Parametrami určujúcimi zmenu interpolácie boli:

- typ interpolácie (patch type): v našom prípade bolo využité NURBS krivkovej interpolácie, čo znamená Neuniformná Racionálna B – Spline krivka často využívaná pri B – spline aproximačných krivkách pri 3D priestorových operáciách,
- druhým voliteľným parametrom bolo pri zvolení prvej varianty NURBS povrchu stupeň polynómu danej NURBS krivky,
- tretím doplnkovým nastavitelným parametrom bolo nastavenie veľkosti okolia aproximácie do okolitého tvaru



Obr. 3.11 Zalepovanie dier na modeli.

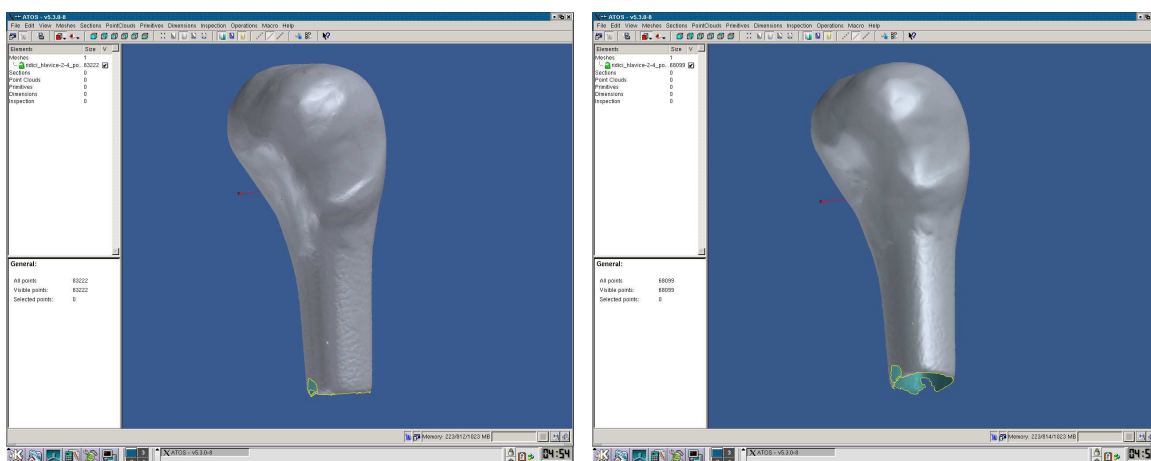


Tab. 3.2 Interpolčná tabuľka.

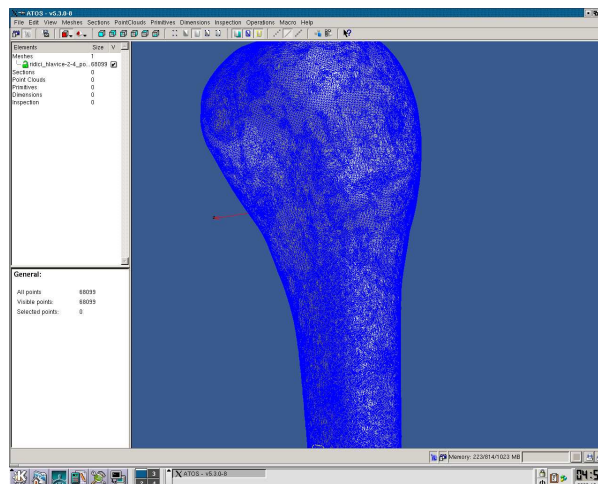
Ekvivalentným postupom boli zalepené všetky diery vždy s individuálnym nastavením parametrov pre každú dieru tak, aby došlo k minimalizácii narušenia naskenovaného tvaru Obr. 3.10. Výsledkom bol spojený 3D povrch odpovedajúci skenovanej súčasti. Nasledovalo vyhladenie modelu, ktoré značne zjednoduší výpočet pri procese triangulácie, resp. prevodu do formátu .stl.

Po aplikácii nástroja vyhladenia povrchu je pozorovateľný viditeľne jemnejší povrch plochy Obr. 3.11. Taktiež sa zložitosť vo forme počtu renderovaných sekcií znížila v porovnaní s počtom pred a po vyhladení z 83 222 na 68 099, čo je výhodou z hľadiska kapacitného i konštrukčného, pretože povrch bude poskytovať informácie interpolované do matematického modelu. Využitie informácie budú veľkosť a ergonomické tvarovanie plôch vytvorených odtlačením ruky do plastelínového podkladu.

Na nižšie uvedených obrázkoch je zobrazený povrch pred a po vyhladení. Detailnejší pohľad na rozdiel oboch obrázkov poskytne príloha vo vyššom rozlíšení, v texte plnia obrázky ilustračnú úlohu.



Obr. 3.12 Vytvorená 3D plocha pred a po vyhladení.



Obr. 3.13 Triangulovaný model.

Poslednú operáciu predstavovala triangulácia plochy, teda prevod modelu do trojuholníkovej siete, teda transmisia do formátu .stl Obr. 3.12. Takto definovaný model je potom jednoducho čitateľný v 3D prostredí programu SolidWorks, ktorý bude využitý pri ďalšom spracovaní modelu.

Systém ATOS nám výsledné dáta opticky zaznamenal na CD nosič. Záznam obsahoval jednotlivé merania, výstupný .stl súbor a nami vytvorené fotografie merania, ktoré sú ideálnym prostriedkom k vizualizácii danej problematiky.

Nasledujúcou operáciou bolo prevedenie .stl súboru vo forme 3D plochy na 3D objemové teleso, s ktorým sa bude ďalej operovať v 3D prostredí SolidWorks a AutoCAD Inventor 2010.

3.2 Tvorba riadiacej hlavice

3.2.1 *Prevod .stl súboru na 3D objemový model*^{1,8,11}

Prevod výstupného súboru so skeneru (.stl) na objemové teleso bol realizovaný v prostredí programu SolidWorks. Proces mohol byť realizovaný len vďaka implementácii nástroja ScanTo3D, ktorý SolidWorks verzia 2009 obsahuje.

ScanTo3D – nastavba programu SolidWorks¹¹.

Hlavné vlastnosti programu pre reverzné inžinierstvo je schopnosť práce s nasnímanými dátami. Nástroje pre tvorbu plôch sú len jednou časťou, druhú časť tvoria príkazy pre úpravu mraku bodov, alebo polygónovej siete. Výstupom je potom CAD model vo formáte od polygónovej siete po 3D krivky, alebo priamo vytvorená 3D plocha. Pri práci vychádzame z mraku bodov, alebo v našom prípade z polygónovej siete získanej skenovaním. Vytvorenú polygónovú sieť je možné opraviť, vyhladiť, zalepiť diery v programe SolidWorks. V našom prípade bol krok realizovaný priamo v prostredí softvéru skenovacieho zariadenia ATOS. Takto upravená polygónová sieť je pripravená pre tvorbu plôch. ScanTo3D umožňuje rýchle vytváranie presných a následne modifikovateľných CAD modelov z 3D naskenovaných dát.

Pokročilé nástroje v module umožňujú vyhladzovať mračná bodov, vytvárať z nich polygónovú sieť a následne plochy. Nástroje umožňujú aj prípadnú analýzu kvality vytvorenej geometrie, t.j. odchýlky vytvorených plôch od pôvodne nasnímaných bodov, alebo polygónovej siete. ScanTo3D prináša nástroje pre skutočne komplexnú tvorbu reverzných modelov.

Ako vstupný formát dát sa používa buď súbor s mrakom bodov, alebo polygónovou sieťou. Aplikácia ScanTo3D umožňuje v rozhraní SolidWorks načítať veľké množstvo týchto súborov:

- súbory siete: *.stl, *.3ds, *.obj, *.nrm, *.scn, *.wrl, *.ply, *.ply2,
- súbory mraku bodov: *.ibl, *.xyz, *.txt, *.asc, *.vda, *.igs.

Priame použitie polygónovej siete

Tvorba plôch z nasnímaných dát je komplexná problematika, ktorej spôsob závisí na ďalšom použití dát a spôsobe snímania. Základnou možnosťou tvorby plôch z nasnímaných dát je priame použitie polygónovej siete, v našom prípade priame použitie výstupného .stl súboru skenera. Polygónová sieť sa ďalej použije ako skelet, riadiaci model pre ďalšie modelovanie. Na základe polygónovej siete je možné vytvoriť 2D (náčrty) a 3D entity Obr. 3.13. Pomocou prvkov, ako napríklad spojenie profilov, alebo hraničný povrch je možné z kriviek vytvoriť plochy. Takto vzniknutý profil je parametrický a iba sa odkazuje k polygonálnej sieti. Spôsob tvorby plôch je blízky štandardnému 3D CAD modelovaniu, len riadiacim modelom sú v tomto prípade skenované dáta. Nastavbový modul ScanTo3D rozširuje schopnosti programu SolidWorks a umožňuje dizajnérom použiť naskenované dáta ako podklad pre ďalšie modelovanie.

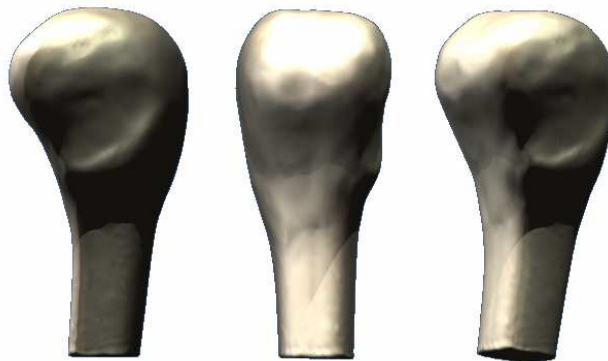


Obr. 3.14 Plocha vytvorená prepojením profilov ¹¹.

V našom prípade bol program SolidWorks použitý výhradne pre načítanie .stl súboru a tvorbu objemového modelu Obr. 3.14. Projekt bol následne uložený pod štandardným formátom programu SolidWorks (.sldprt). Ďalšie úpravy takto spracovaného prvotného 3D modelu Obr. 3.15 prebiehali v prostredí programu Auto CAD Inventor 2010.



Obr. 3.15 Polygonálna sieť načítaná programom SolidWorks.

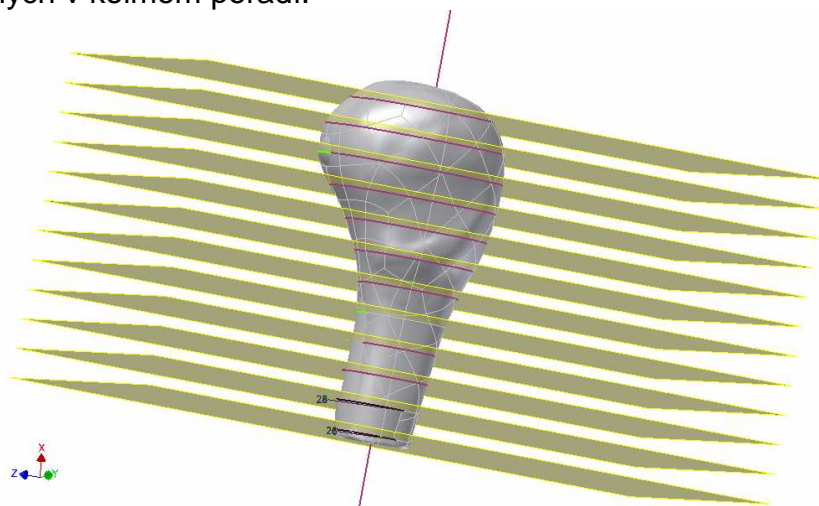


Obr. 3.16 Vytvorený objemový model.

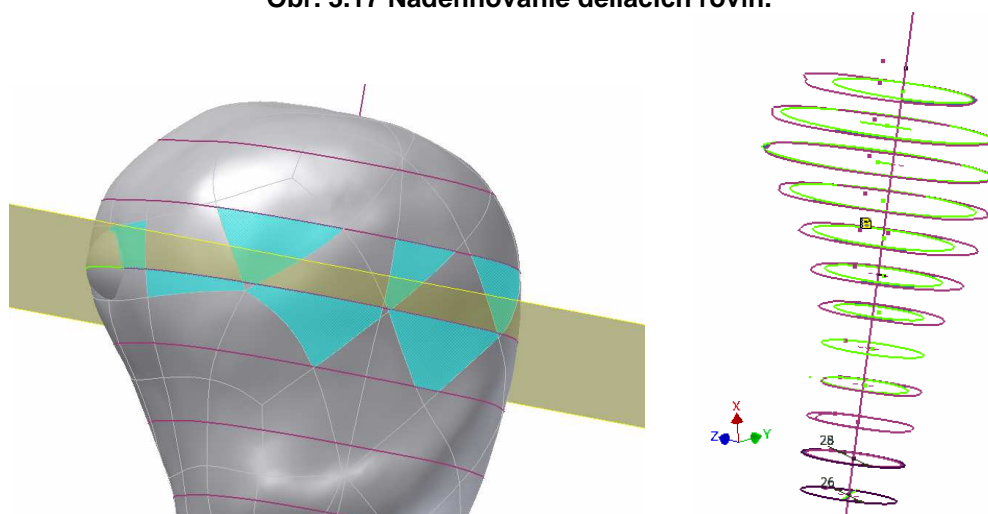
3.2.2 Konštrukcia modelu v prostredí Autodesk Inventor

Tvorba modelu bola vykonávaná v prostredí príjemného softvéru Autodesk Inventor Professional 2010. Výber tohto softvéru bol založený na intuitívnosti jeho konštrukčných prvkov, jednoduchosti a rýchlosti výpočtov. V Inventore prebiehala kompletná konštrukcia prototypu od importovania objemového telesa z programu SolidWorks až po finálnu verziu, ktorá bola po dôkladnej kontrole jednoducho prevedená priamo v programe Inventor na .stl súbor, ktorý bol ďalej spracovaný v prostredí *CatalystEX*, čo je program určený pre definovanie parametrov 3D výroby formou FDM metódy Rapid Prototypingu.

Prvým krokom v prostredí Inventor bolo určenie základných rovín, ktoré boli nevyhnutné pre orientáciu a následné úpravy. K takto zorientovanému modelu bolo možné nadefinovať 12 vzájomne 100 mm odsadených rovnobežných rovín Obr. 3.16. Za pomoci funkcie „rozdeliť“, anglicky „*split*“ sme použili každú rovinu na rozdelenie modelu, ktoré umožňovalo v danom reze vytvoriť „skicu“ Obr. 3.17. Výsledkom týchto počítačových operácií bol vznik 12 nezávislých skíc usporiadaných v kolmom poradí.

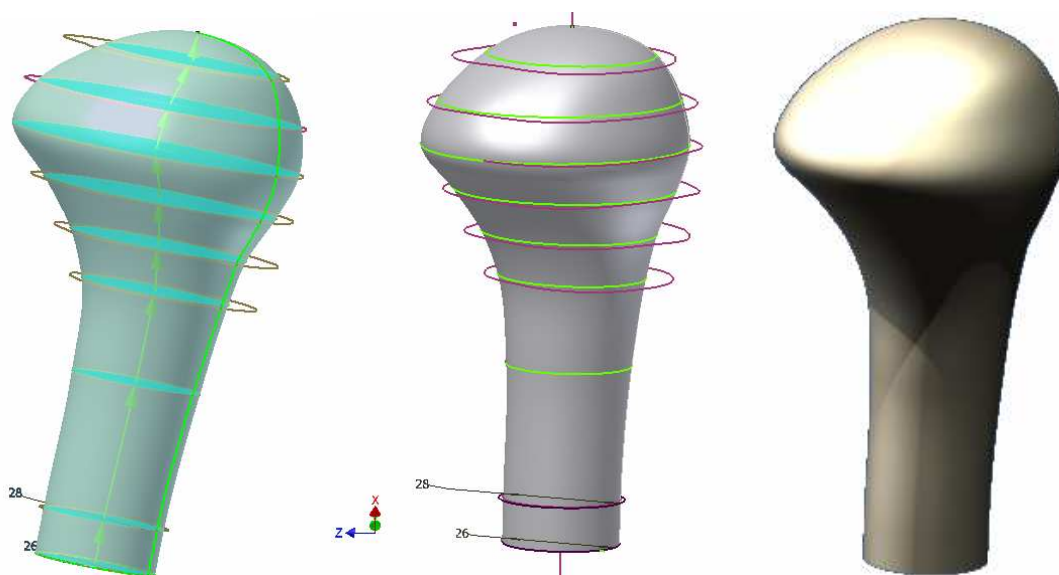


Obr. 3.17 Nadefinovanie deliacich rovín.



Obr. 3.18 a) rozdelenie modelu rovinou, b) pole interpolovaných náčrtov.

Jednotlivé 2D skice boli získané premietnutou geometriou 3D hlavice na dvojrozmerné zobrazenie skice v danej rovine reku. Obr. 3.17b. Takýto postup bol aplikovaný nezávisle pre všetky pracovné roviny. Výsledkom bol vznik 12 samostatných skíc, potrebných pre ďalší postup. Skice boli využité k manuálnej interpolácii do geometricky definovaných tvarov. V prípade spodných dvoch skíc bola interpolácia prevedená formou kružníc o pevne definovanom polomere. Interpolácia ďalších skíc bola realizovaná formou elíps. Skice predstavovali náčrty, ktoré poslúžili ako hraničné oblasti pri následnej tvorbe telesa. Týmto vytvorenými náčrtmi sme viedli pomocou funkcie „šablónovanie – loft“ priestorové teleso Obr. 3.18, ktoré je základom vzniknutého tvaru. Funkcia „šablónovanie“ je určená na aplikáciu tvorby tvarovo zložitých súčastí, pričom vygeneruje hladký spojitý povrch, ktorý je vedený nadefinovanými hraničnými 2D uzavretými profilmi. Vytvorený tvar je teda exaktným matematickým produktom naskenovaných dát.



Obr. 3.19 a) postup tvorby primárneho tvaru hlavice, b) vyrenderovaný model.

Ďalším prvkom bolo modelovanie ergonomického prvku palca. Základom pre tento prvok bol náčrt vytvorený na prvotnom modeli so skenera, kde jeho pozícia zodpovedala skutočnej pozícií palca na fyzickom modeli. Po naskenovaní bolo preto možné použiť tieto údaje pre presnú definíciu tohto prvku. Následne bola odstránená časť modelu funkciou „vysunúť – extrude“ a tým vznikol požadovaný tvar Obr. 3.19. Unikátnosť a zároveň odľahčenie dodáva modelu dizajnerský prvok v podobe vybrania na zadnej časti hlavice. Námet bol vzatý z funkčnej, komerčne dostupnej hlavice, ktorá slúžila ako dizajnerska predloha pre tento projekt Obr. 3.20.



Obr. 3.20 a) tvorba doplnkových tvarov, b) vyrenderovaný model.

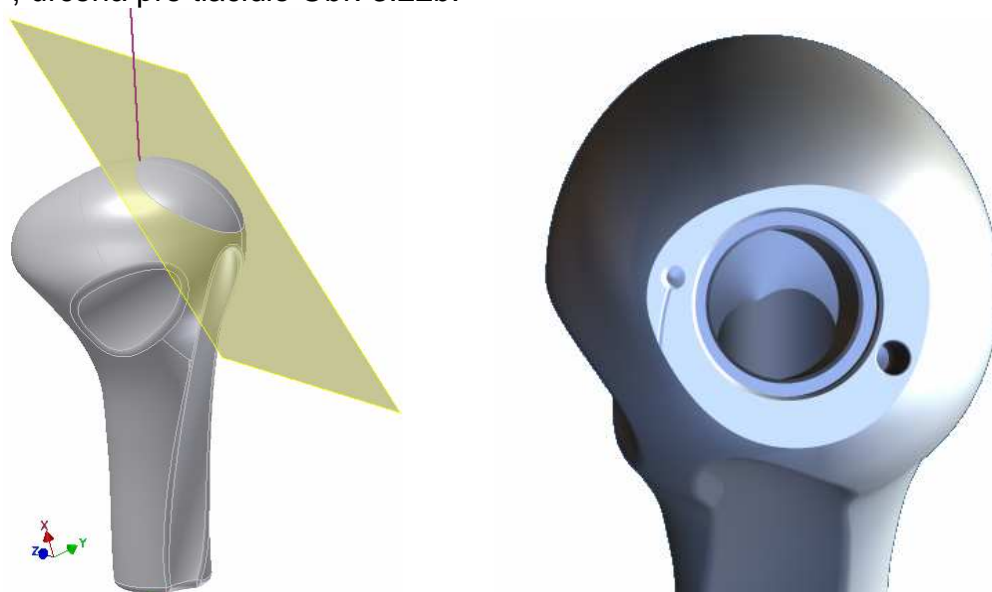


Obr. 3.21 Sériovo vyrábaná dizajnérska predloha¹⁴.

Plochy odoberané vznikli totožným nástrojom, ako vznik základného telesa, akurát jeho reverznou funkciou, teda nie tvorbou objemového telesa vybranými krivkami, ale naopak odstránením objemu v tvare definovanom dvoma krivkami, rovnako ako pri tvorbe základného telesa, elipsami. Na ostré hrany vytvorené imaginárnym odoberaním materiálu boli aplikované zaoblenia rovnomenným nástrojom „zaoblenie“ na polomer 2 mm, v prípade plochy pre palec z ergonomických dôvodov na polomer 3 mm. Tvar tak získal príťažlivý efekt a hlavica teda spĺňa funkciu výstrednej dizajnérskej súčasti.

Nasledujúca úprava spočívala v nadefinovaní pracovnej roviny pre tvorbu priestoru zmieňovanému tlačidlu Obr. 3.22a. Rovinou bola súčasť rozdelená na 2 nezávislé časti, z ktorých horná, označovaná ako „vrcholík“ bude tvoriť vrchnú časť odklápacieho mechanizmu tlačidla.

Do dolnej časti bol vytvorený náčrt, ktorým bola aplikovaná funkcia „diera – hole“, určená pre tlačidlo Obr. 3.22b.



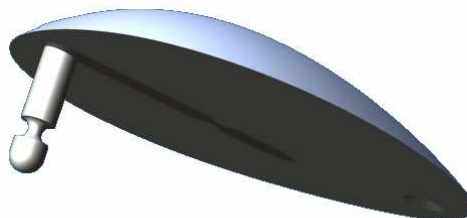
Obr. 3.22 a) nadefinovaná rovina pre tvorbu tlačidla, b) detail priestoru pre tlačidlo.



Obr. 3.23 Model tlačidla ovládania motoru.

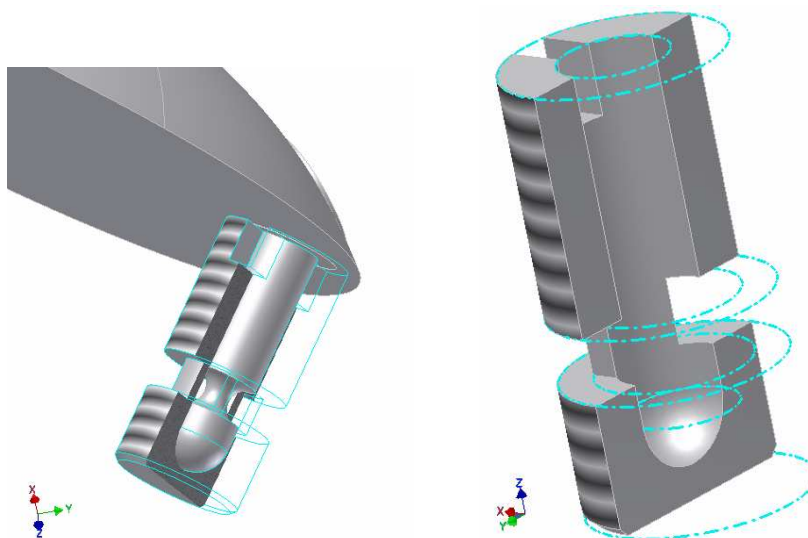
Uloženie tlačidlo – hlavica bude nerozoberateľný spoj s presahom H7/r6, pretože tlačidlo Obr. 3.23 bude po zapojení elektronických prvkov umiestnené v hlavici natrvalo. Pre prístup elektroniky k tlačidlu a zároveň z upínacích dôvodov bola do modelu vyvŕtaná diera so spodnej časti s charakteristikami: $\text{Ø}15 \times 90$. Ako je možné vidieť na renderovanom obrázku Obr. 3.22b, dolná diera tvorí prienik s dierou na osadenie tlačidla, čo umožňuje jeho prípadnú demontáž v prípade potreby. Kontaktný profil je vybavený funkčnou drážkou, ktorá vedie vrchnú odklápaciu časť smerom do fixovanej polohy. Tá je zabezpečená kruhovým otvorom, do ktorého je v proti kuse umiestnená guľôčka fixujúca odklopnú časť v základnej polohe a zabraňuje nechcenému odkrytiu tlačidla počas jazdy. Opačná strana je opatrená závitom M5x0,8. Do závitom opatrenej diery bude skrutkovaný medzi kus určený na zvýšenie tuhosti rotačného spoja Obr. 3.25b. Medzi kus je opatrený vybráním na hornej časti, ktoré slúži na zaskrutkovanie medzi kusu do pripraveného závitú na tele hlavice. Do medzi kusu bude nasunutý proti kus, pevne spojený s vrchnou časťou odklápacieho mechanizmu hlavice. Sústava medzi kus – proti kus bude fixovaná drôtvou formou zaističovania. Bude použitý drôt priemeru $\text{Ø} 1,5 \text{ mm}$.

Drôtový zaisťovací člen chráni vrchný čap od vyskočenia z drážky. Takto bude dosiahnuté dostatočne tuhého spojenia vrchnej a spodnej časti, ktoré dokáže zvládnuť opakované rotačné zaťaženie v radiálnom i axiálnom smere. Oska bude na vrcholík pripevnená dodatočne, pretože možnosti technológie rapid prototypingu nie sú pre túto aplikáciu postačujúce.



Obr. 3.24 Upínací mechanizmus vrcholíka – vyrobený dodatočne.

Vrchná časť odklápacieho mechanizmu hlavice bude opatrená kovovým „proti kusovým“ čapom Obr. 3.24. Jeho spodná časť je konštruovaná tak, aby presne zasadla na miesto na spodnej časti medzi kusu umiestneného v tele hlavice. Systém upnutia je znázornený na obrázku Obr. 3.25.



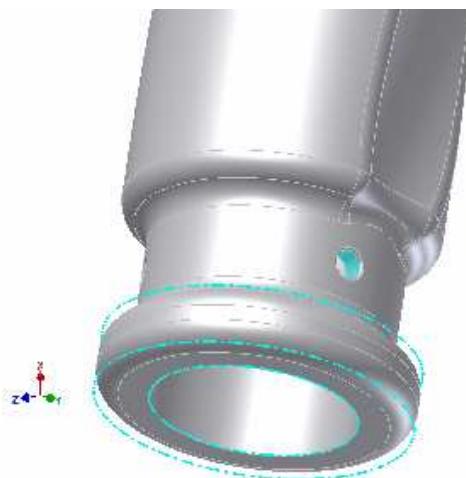
Obr. 3.25 a) systém upínania vrcholíka, b) detail prierezu protikusú so závitom.

Aretácia, teda zaistenie hornej a dolnej časti rotačného mechanizmu bude zabezpečená drôtovým vymedzovacím článkom.

Ako jedna z posledných operácií bola tvorba spodnej časti hlavice, ktorá slúži k upnutiu hlavice. Pre vystuženie hlavice, ktorá bude silno axiálne aj radiálne namáhaná bola zväčšená spodná diera na limitný priemer $\varnothing 17$ mm. Väčší priemer diery by viedol k rozpadu modelu. Do diery $\varnothing 17$ mm bude umiestnená oceľová výstuha v podobe tenkostennej trubky, ktorá zvýši odolnosť prototypu voči zlomeniu či krúteniu.

V dolnej časti prototypu hlavice Obr. 3.26, ktorá bude zakrytá koženým poťahom sú tiež vyborené upínacie otvory $3 \times \varnothing 2,4$. Do týchto otvorov bude po vyrobení navŕtaný závit, ktorý bude zamedzovať rotácií a plniť upínaciu funkciu v automobile.

Po zaoblení ostrých hrán a aplikácii dier pre závit M3x0,5 bol prototyp teoreticky kompletný.



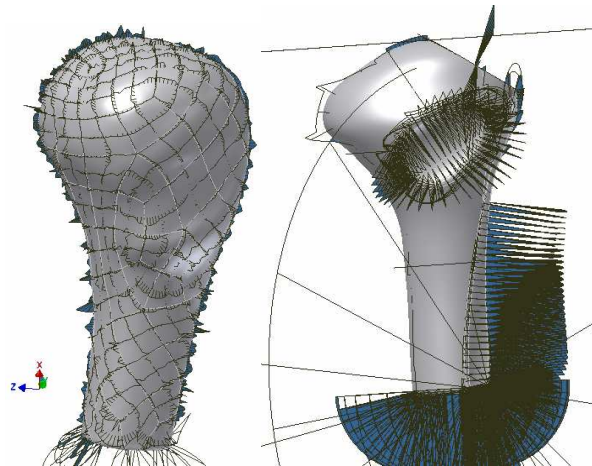
Obr. 3.26 Detail spodnej časti hlavice – upínacia časť.

Zobrazenie hotového modelu pripraveného na overenie formou Rapid Prototypingu dokazuje požadovanú dizajnersku výstrednosť, čo v oblasti „tuningových“ dielov nie je nič nezvyčajné. Vyrenderované obrázky finálnej verzie zostavy radiacej hlavice Obr. 3.27 pomôžu pri vizualizácii prototypu a jeho porovnaní s prakticky vyrobeným dielom. Na plochu hlavice bo aplikovaný materiál lešteného hliníka a vrcholík bol vyrenderovaný transparentne pre zvýraznenie estetické výnimočnosti projektu. Tlačidlo je zobrazené zámerne vykreslené odlišnou farbou, aby boli zrejmé tvary samotného predmetu práce, radiacej hlavice.



Obr. 3.27 Vyrenderovaný finálny model zostavy hlavice s tlačítkom.

Pre ilustráciu a ako dôvod voľby tvorby interpolovaného modelu bola na pôvodný 3D model pred úpravou a tiež na interpolovaný matematický náprotivok aplikovaná analýza krivosti Obr. 3.28, ktorá graficky zobrazuje krivosť jednotlivých segmentov na matematickom modeli a na pôvodnom modeli prakticky na jeho celej ploche, pretože je celá pokrytá nerovnomernými krivkami s rôznymi normálami.



Obr. 3.28 Analýza krivosti prvotného a konečného modelu.

Ďalšie zobrazenie ukazuje rozdiel medzi pôvodným a interpolovaným modelom Obr. 3.29, teda potvrdzuje správnosť výberu varianty interpolácie, pretože výsledný model pôsobí uhladenejším a geometrickejším dojmom, na rozdiel od nevkusne pôsobiaceho pôvodného modelu, ktorý skôr pripomína kosť, ako radiaci prvok v automobile. Zobrazená zostava Obr. 3.30 vykresľuje použitie hlavice v praxi, namontovanú na radiacu kulisu automobilu.



Obr. 3.29 Porovnanie prvotného výstupu so skeneru a hotového prototypu.



Obr. 3.30 Zostava hlavice na radiacej kulise.

4 VERIFIKÁCIA METÓDOU FDM

4.1 Úvod do Rapid prototypingu

4.1.1 Pojem rapid prototyping^{2,3,4,5,10,11,18}



Obr. 4.31 Efektné farebné prevedenie prototypu¹⁵.

Technológia rapid prototyping popisuje rýchlu a efektívnu výrobu fyzických súčastí využívanú najmä na výrobu prototypových modelov Obr. 4.31. Je známa od konca 80. rokov, kedy vznikla metóda stereo litografie. Litografia je technológia výroby odtlačkov za pomoci negatívnych foriem. Stereo litografiou sa rozumie metóda tvorby „odtlačkov“ v troch dimenziách, kde výsledkom tohto procesu je hotová 3D súčasť. Rapid Prototyping (ďalej len RP) je metóda tvorby prototypov po vrstvách, postupným pridávaním materiálu Obr. 4.32 rôzneho druhu v závislosti na používanej technológii, na rozdiel od konvenčných technológií, akými je napríklad CNC obrábanie, kde je materiál naopak obrábacím nástrojom odobieraný.

Zdrojom dát pre takúto výrobu súčastí, alebo zostáv je priamo objemový, alebo plošný CAD model prevedený do triangulačného .stl formátu. Hlavnou výhodou metódy RP je rýchlosť a pružnosť pri výrobe prototypových súčastí. Čas produkcie výrobku je značne redukovaný, čo znižuje aj náklady na jeho výrobu. Touto nekonvenčnou metódou možno získať behom krátkeho času ľubovoľne zložitý tvar, ktorý je funkčný a pri správnej voľbe technológie RP zodpovedá pevnostným požiadavkám. Veľké úsilie je venované zdokonaleniu hardvérových i hardvérových technológií, pretože potrebou súčasných dizajnérov a konštruktérov je pracovať s fyzickým modelom, na ktorom sa dá jednoducho meniť dizajn, odstraňovať prípadné chyby, prevádzať kontroly funkčnosti či zmontovateľnosti, alebo ergonomické úpravy. Všetky zmieňované výhody fyzického modelu majú vo finálnej fáze za následok veľké zrýchlenie celého procesu vývoja výrobku, zatiaľ čo výroba prototypov klasickými technológiami je veľmi náročná a zdĺhavá.

Najvhodnejšou cestou sa teda javí technológia RP, pre jej rýchlosť a možnosť priamej väzby na vývojové CAD/CAM prostredie, pretože pri výrobe odpadá nutnosť práce s technickou dokumentáciou, pretože počítačové modelovanie umožňuje nie len konštrukciu virtuálnych prototypov, ale aj rýchle zdieľanie dát v rámci kooperácie prostredníctvom médií, resp. internetového spojenia. Zhotovené súčasti možno testovať, prípadne merať modernými technológiami reverzného inžinierstva, či už pre porovnanie s CAD modelom za účelom kontroly presnosti metódy, alebo prípadnej editácie modelu. Táto technológia podlieha neustálemu vývoju a je nápomocná hlavne pri výrobe prototypových súčastí. Táto progresívna technológia stále zrýchľuje svoje metódy a vylepšuje používané materiály, čo má za následok stále širší rozsah uplatnenia.



Obr. 4.32 Prototyp vystavaný postupným vytvrdzovaním vrstiev materiálu¹¹.

Technológia je často využívaná automobilovým, leteckým či kozmickým priemyslom. Stále dochádza k znižovaniu nákladov a skracovaniu výrobných časov so súčasným zvyšovaním kvality výrobkov. V kombinácii so zlievarenskými metódami presného liatia kovu sa dosahuje najvyššej úspory výrobných časov a maximalizácie efektívnosti výroby.

4.1.2 Vstupné dáta^{2,10,11}

Počiatok vstupu je realizovaný konštrukciou nákresu, v ideálnom prípade priamo trojdimenzionálneho. Pre úspešnú tvorbu modelu je nutné vo vstupe zdefinovať úplnú informáciu o geometrii telesa. Ideálnou možnosťou je tvorba modelu na základe objemových entít, kde konštrukčný softvér zodpovedá za úplnosť a minimálnu chybovosť vytváranej komponenty. Tiež zodpovedá za uzavretie profilu povrchu, čo je podmienkou k úspešnej triangulácii modelu v následnom kroku. Aproximácia do triangulácie je zabezpečovaná preprocesingovým softvérom zvolenej technológie rapid prototyping. Parametre triangulácie ovplyvňujú výslednú presnosť modelu, kde prvou nastaviteľnou položkou je „Chord Height“, čo je maximálna prístupná tangenciálna chyba v mm. Druhým parametrom je „Angle Control“, ktorý určuje maximálny prípustný uhol medzi susednými trojuholníkmi.

Po triangulácii nasleduje prevod do formátu, ktorý je kompatibilný s technológiou RP, štandardne používaným normalizovaným formátom je .stl, inými môžu byť .iges, alebo iné, menej používané. V nami používaných CAD softvéroch je priamo implementovaná funkcia prevodu modelu do .stl súboru kompatibilného s technológiami RP.

Takto pripravené dáta sú v závislosti na konkrétnej metóde RP upravené softvérom pre konkrétny typ výroby. Model je „rozrezaný“ na jednotlivé vrstvy aplikované postupnými krokmi výroby metódou RP. Takto definovaná geometria rozrezaná na jednotlivé priečne rezy je vo formáte .sli a býva označovaná ako Slicen. Obvyklá výška vrstiev, samozrejme závislá na zvolenej technológii, sa pohybuje v hodnotách 0,1 až 0,2 mm. V tomto softvéri je tiež nutné nadefinovať priestorovú orientáciu súčastí pre výrobu, alebo stanovenie mierky výroby, jej prípadnú korekciu v závislosti na rozsahu využívaného zariadenia.



Obr. 4.33 Kompletný 3D systém rýchlej konštrukcie prototypových súčastí ¹¹.

Tento softvér potom automaticky navrhne podporný materiál, ktorý udrží nepodopreté časti v rovine operácie nanášania a tým umožní vznik prakticky neobmedzene zložitej súčasti. Podpora bude po vytvorení odstránená fyzicky, alebo chemicky, čo umožňuje materiál podpory, ktorý sa po použití chemických prostriedkov na rozdiel od stavebného materiálu po ponorení do špeciálneho roztoku rozpustí. Takto nadefinované dáta sú pripravené na priamy vstup do 3D produkčného zariadenia.

4.1.3 *Tvorba modelu* ^{4,8,11}

Technológiou RP je model vytváraný exaktne na základe CAD dát, kde je príslušným softvérom rozdelený na geometrické dáta jednotlivých vrstiev. Tieto dáta je potom prototypový stroj schopný znovu vrstvu po vrstve zostaviť z príslušného materiálu. Takýto postup umožňuje výrobu súčastí štandardným obrábaním nevyrobiteľných. Technológia je schopná tvoriť neuveriteľne efektné a zložité fyzické prototypy. Problémové sú najmä vnútorné otvory, rôzne rebrá apod.

V priebehu rokov sa presadilo niekoľko technológií, ktoré pracujú na princípe modelovania pomocou postupného pridávania Obr. 4.32, alebo vytvrdzovania jednotlivých vrstiev materiálu. Medzi tieto technológie, ktoré súhrne označuje pojem Rapid prototyping sú zaradené funkčné postupy s využitím rôzneho materiálu vo forme prášku, fólií, zvitkov drôtov a iných.

4.2 Komerčne dostupné technológie Rapid Prototyping

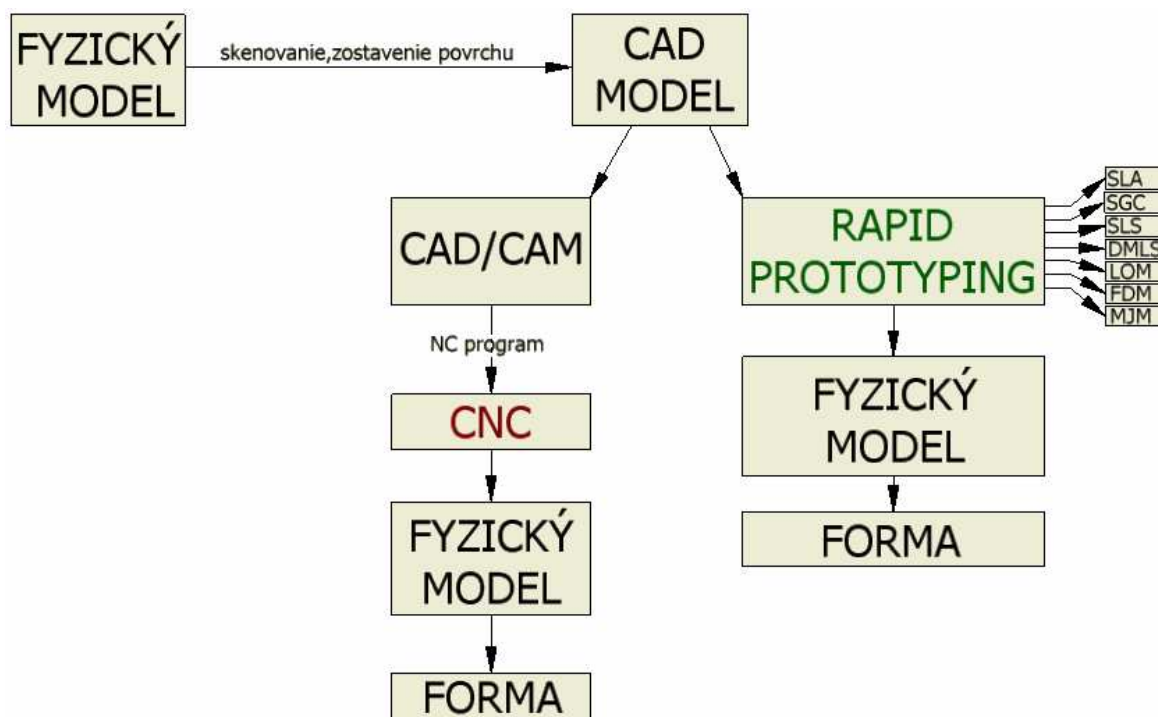
4.2.1 Rozdelenie metód Rapid Prototyping^{2,5}.

Prehľadné usporiadanie jednotlivých metód RP z ohľadom na použitý materiál Tab. 4.3.

Tab. 4.3 Rozdelenie metód rapid prototyping².

TECHNOLÓGIA	ZNAK	MATERIÁL
Stereolitografia	SLA	fotopolymér
Solid Ground Curing	SGC	fotopolymér, nylon
Selective Laser Sintering	SLS	polyamid, nylon, kov
Direct Metal Laser Sintering	DMLS	kovové prášky
Laminated Object Manufact.	LOM	spojivý papier
Fused Deposition Modeling	FDM	ABS, vosk, polykarbonát
Multi Jet Modeling	MJM	termo a fotopolymér

Technológie výroby súčastí formou reverzného inžinierstva. Z obrázku je zrejmé, že za použitia technológie RP je možné dosiahnuť konečný efekt v oveľa kratšom časovom horizonte, ako za použitia konvenčných CNC technológií Obr. 4.34.



Obr. 4.34 Schéma začlenenia rapid prototypingu do výrobného procesu.

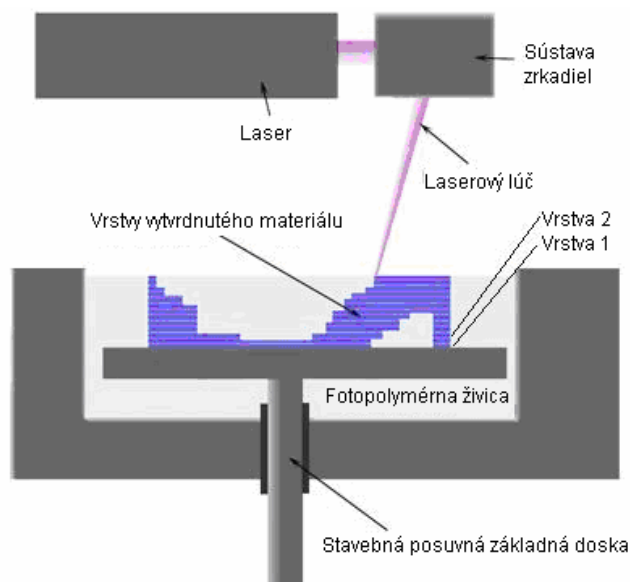
4.2.2 Stereolitografia – SLA ^{2,10,16,17}



Obr. 4.35 Výrobok presnej stereolitografickej metódy – lampa ¹⁶.

Technológia býva niekedy označovaná skráteno SL. Model Obr. 4.35 je stavaný pod hladinou kvapalnej živice, kde dochádza laserom k vytvrdzovaniu jednotlivých vrstiev Obr. 4.36. Po vytvrdení vrstvy sa materiál posunie o vzdialenosť vrstvy a dochádza k vytvrdeniu ďalšej vrstvy, až kým sa nedosiahne vytvrdenia celého prototypu. Nepoužitá živica je odvedená a model môže byť použitý pre ďalšie operácie.

Stereolitografia je najstaršou známou metódou RP, v súčasnosti sa radí aj medzi najpresnejšie.



Obr. 4.36 Princíp metódy SLA. ¹⁷

Požívaná prevažne v automobilovom priemysle na výroby foriem, modelom s malými otvormi, presnými detailmi, pri výrobe modelov áut, kde sú testované rôzne technologické prípravky, nástroje atď.

Nastavenie parametrov pre 3D „tlač“ je realizované v softvéri, kde hlavnými premennými sú použitý materiál, výpočet najvhodnejšej orientácie polohy modelu z dôvodu dokončovacích operácií, mierka modelu, alebo napríklad voľba geometrie podpôr, ktorá prebieha automaticky. Materiál podpory a výrobku je pri použití tejto technológie totožný, orientácia prebieha tak, aby bolo možné podporu po dokončení prototypu jednoducho odstrániť.

4.2.3 Solid Ground Curing – SGC^{2,10,11}

Podobný princíp tvorby modelu zdieľa aj táto metóda s rozdielom, že dochádza k vytvrdeniu celej aktuálnej vrstvy naraz. Vytvrdzovanie je založené na ožarovaní vysoko výkonnou UV lampou, ktorá žiari na povrch cez šablónovú dosku. Vytvrdenie vrstvy je v závislosti na vysokom výkone UV lampy, ktorý dosahuje hodnoty 4kW, pomerne rýchle. Nanesený povlak živice je vždy väčší, ako je výsledná hrúbka vytvrzenej vrstvy. Okolité nevytvrdené materiály budú po odstránení šablóny vákuovo odsaté. Miesta, z ktorých bola nevytvrdená hmota odobratá sú zaliate roztaveným výplňovým voskom, ktorý tvorí funkciu podpory pre naniesenie ďalšej vrstvy a zároveň vytvára vodorovnú plochu, ktorá je potrebná pri odfrézovaní voskovej vrstvy. Tak je dosiahnuté rovného živicového povrchu, pripraveného na naniesenie novej vrstvy. Takýmto spôsobom je vytvrdený celý objem prototypu. Podporný materiál je chemicky odstránený. Touto technológiou je dosahované dobrej štruktúry a stability modelu. Uplatňuje sa v strojárskom priemysle, tiež v medicíne napr. pre výrobu chirurgických pomôcok pacientovi na mieru, výrobu zákazkových protéz atď.

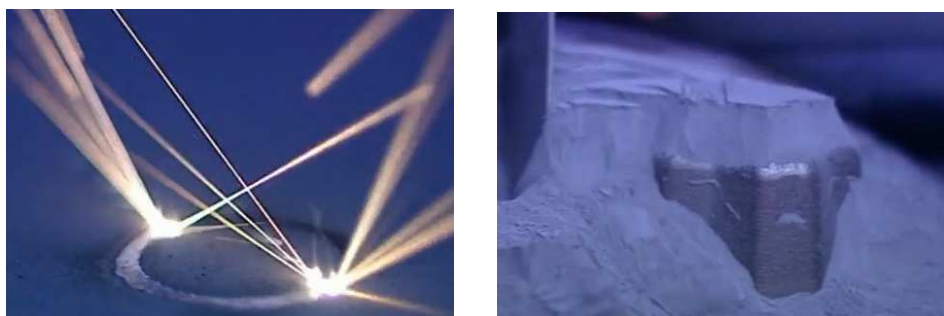
4.2.4 Selective Laser Sintering – SLS^{2,10,11}

Modely vytvorené touto technikou sú v porovnaní s predošlými veľmi pevné. Materiál použitý v tomto prípade môže tvoriť jemný zlievarenský piesok, plastový, alebo kovový prášok. Tvorba modelu je zabezpečovaná po vrstvách postupným natavovaním práškového materiálu, ktorý je zahrievaný plynovým CO₂ laserom. Pracovná komora je z dôvodu zamedzenia oxidácie vyplnená inertným plynom, obyčajne dusíkom. Posuv je, ako pri predošlých technológiách, zabezpečovaný nosnou doskou vo vertikálnom smere

Na počiatku procesu je na nosnú dosku nanosená vrstva prášku, ktorá je v požadovaných miestach spečená CO₂ laserom. Okolité nespečené materiály je zanechané a plní funkciu podpory pre ďalšie vrstvy. Doska je posunutá o parameter šírky vrstvy smerom nadol a proces sa opakuje

Uplatnenie v oblasti výroby foriem a nástrojov pre výrobu plastových, keramických, alebo kovových výrobkov. Súčasti tvorené metódou SLS vynikajú veľkou pevnosťou, ktorá dovoľuje vyrábať funkčné prototypy z veľkého množstva materiálov. Súčasti nepotrebujú podpory a vyžadujú len minimálny postprocesing, ktorý je však nutný, pretože modely majú drsný povrch, ktorý je dôsledkom vstupného materiálu.

4.2.5 *Direct Metal Laser Sintering – DMLS*^{2,6,10,11,18}



Obr. 4.37 a) napaľovanie vrstiev prášku, b) odstránenie nespečeného materiálu⁶.

DMLS je technológia založená na laserovom napaľovaní veľmi jemného kovového prášku Obr. 4.37. Vyznačuje sa výbornými mechanickými vlastnosťami, ktoré v niektorých prípadoch môžu dosahovať hodnoty vyššie, ako pri súčiastiach vyrábaných technológiami kovaním, alebo liatím.

Obslužný softvér je veľmi jednoduchý, vyžaduje nastavenie ekvivalentné predošlým technológiám, teda mierku, orientáciu, typ podpôr, alebo nastavenie hrúbky vrstvy, čo sa prejaví na konečnej kvalite i čase výroby, pričom vyššia kvalita si vyžaduje vrstvy minimálne, čo sa prejaví na čase potrebnom pre tvorbu takéhoto kvalitatívne vysoko postaveného výrobku. Zariadenie EOSINT M270 Obr. 4.38a je schopné pracovať s hrúbkou vrstiev v rozmedzí 0,02 až 0,04 mm, čo napovedá, že sa jedná o nesmierne precíznu a kvalitnú tvorbu prototypov.

Technológia svojou rýchlosťou, presnosťou a mechanickými vlastnosťami prototypov zaujíma na trhu stále silnejšie postavenie. Uplatniteľná je v zdravotníctve pre výrobu zákazkových na mieru vyrábaných implantátov Obr. 4.38b, ktorých výroba je taktiež závislá aj na technike reverzného inžinierstva. Automobilový, elektrotechnický, medicínsky a iné odvetvia odhaľujú pozadie tohto typu rapid prototypingu čoraz viac, pretože spoločnosti si začínajú uvedomovať prakticky neobmedzené možnosti tejto technológie, ktoré vedú po úspešnej aplikácii k zvyšovaniu efektivity produkcie v širokom spektre vnímania.



Obr. 4.38 a) zariadenie DMLS EOSINT M270, b) výrobok – kolenný implantát⁶.

4.2.6 *Laminated Object Manufacturing – LOM*^{2,5,6,10}

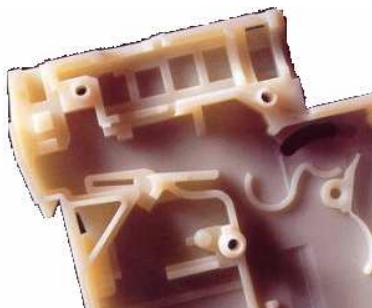
Časovo najnenáročnejšia metodika spočíva, ako samotný názov navráva, v postupnom laminovaní jednotlivých vrstiev papieru, alebo fólií, ktoré sú jednostranne opatrené lepivým materiálom. Do každej fólie je po zalaminovaní laserom vyrezaný požadovaný tvar. Laminovanie je zabezpečené „laminovacím valcom“, ktorý svojím vyhrievaným povrchom aktivuje tepelne reaktívnu vrstvu na spodnej časti každej vrstvy, a spoločne s prítlakom zabezpečí správne prepojenie novo nanesej a podkladovej vrstvy.

Teplota valca dosahuje cirka 350 °C, čo je dostatočná teplota pre pevné trvalé spojenie dvoch dotyčných vrstiev. Takto pokračuje vrstvenie, až kým nie je postavený celý prototyp.

Podporný materiál je stavaný zároveň s modelom, ktorý je potrebné po skončení procesu obrábacími metódami odstrániť.

4.2.7 *Multi Jet Modelling – MJM*^{2,10}

Princíp veľmi podobný nižšie uvedenej FDM technológií, spočíva v nanášaní materiálu po vrstvách za pomoci vyhrievanej dýzovej hlavy s 96 dýzami. Tie sú ovládané riadiacim softvérom, ktorý koriguje množstvo nanášaného materiálu v závislosti na nastavení hrúbky vrstvy apod. Každá dýza je ovládaná podľa potreby samostatne, čo značne skraca výrobný čas prototypu Obr. 4.39, pretože pri menších súčiastiach je možné vyhotoviť celú vrstvu na jeden krát. Najnovšie prevedenie disponuje až 352 dýzami na jednej hlave.



Obr. 4.39 Súčasť vyrobená MJM zariadením¹⁰.

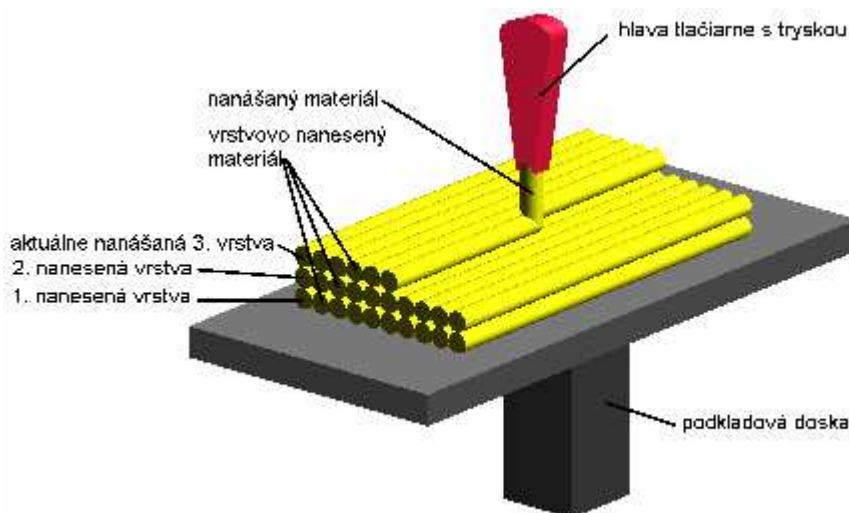
Nanášaný materiál tvorený termopolymérom tuhne takmer okamžite po kontakte s podkladom, čo predstavuje pri použití nového druhu dýzy obrovskú rýchlosť stavby prototypu.

4.3 Fused Deposition Modeling – FDM

4.3.1 Popis technológie FDM^{2,10,17,18}

Táto technológia sa odlišuje systémom nanášania vrstiev, ktorý je na rozdiel od predošlých zabezpečený priamym nanášaním materiálu tenkou dýzou Obr. 4.40. V predošlých princípoch stavania modelu bolo taktiež využívané postupné vrstvenie, pri tomto postupe tomu nie je inak, avšak materiál nie je napaľovaný laserom, ani vytvrdzovaný UV lampou. Model je tvorený aplikáciou materiálu „ABS dýzou“. Toto pomenovanie vychádza z faktu, že stavebnou hmotou je materiál ABS, ktorý je podávaný formou navinutého drôtu zvoleného priemeru, vzhľadom na nastavenie šírky vrstvy. Pohyb dýzy je riadený v dvoch osách X a Y, čo je spôsob riadenia ekvivalentný s vedením jednoduchého CNC zariadenia. Os Z je riadená posuvom nosnej dosky, na ktorej je usadený model, pričom riadenie prebieha o zníženie nosnej dosky o nastavenú hrúbku nanášanej vrstvy, ktoré sa uskutoční po kompletom nanesení vrstvy.

Materiál je podávaný do dýzy sústavou kladiek, podobne ako pri podávaní kovového drôtu do hubice pri metóde zvarovania MIG-MAG. Natavenie, ktoré je nevyhnutné pre správne spojenie podávaného a podkladového materiálu, je zabezpečované vyhrievaním dýzy. Materiál je dýzou nahrievaný vždy na teplotu o 1°C vyššiu, ako je teplota topenia príslušného materiálu, čo zabezpečuje právne pevné spojenie s podkladom tvoreným identickým materiálom. Pri styku s povrchom stavanej súčasti sa vlákna okamžitým stuhnutím vzájomne prepoja za vzniku pevného spoja. Možností voľby materiálu je viac, mimo klasicky preferovaných ABS a ABS+ materiálov možno použiť plast, elastomer, vosk či polykarbonát. Stavba podpôr je nevyhnutná, na jej stavbu je využívaný odlišný materiál, ktorý sa po vystavení modelu jednoducho chemickou, alebo mechanickou cestou odstráni. Pri voľbe chemického odstránenia je súčasť ponorená do roztoku kyseliny, ktorá podporu rozloží bez poškodenia modelu.



Obr. 4.40 Schematické zobrazenie funkcie technológie FDM. ¹⁷

4.3.2 Aplikácie metódy FDM^{2,5,10,18}

Prijateľnosť tejto technológie spočíva v jej nenáročnosti, ekonomickej výhodnosti. Prijemnou vlastnosťou je tichý automatický chod 3D tlačiarne s obchodným názvom Dimension Obr. 4.41, ktorý je možné zahájiť diaľkovým prenosom dát. Prepojenie zabezpečuje Ethernet LAN spojenie. Kompaktnosť metódy, spolu s jednoduchosťou a ďalšími výhodami zapríčinila, že väčšina 3D tlačiarní pracuje práve na patente FDM metódy rapid prototypingu.

Model skonštruovaný CAD systémom je vo forme štandardného *.stl súboru prenesený do 3D zariadenia, kde je ďalej spracovaný v prostredí softvéru *CatalystEX* firmy *Stratasys* pre potreby prípravy tlače. Tá spočíva v nastavení hrúbky vrstvy, typ podpory, spôsob vyplnenia objemu, mierka tlače či orientácia modelu pri postupe nanášania vrstiev materiálu. Softvér prevedie rozrezanie modelu pre získanie hraníc jednotlivých vrstiev, ktoré sú potrebné k precíznemu riadeniu dýzy. Vystavaný model nie je potrebné ďalej upravovať, po ukončení tlače je odňatý od podložky a po vyplavení podpory pripravený k použitiu.



Obr. 4.41 Zariadenie Dimension U print BST 1200².

Materiál je navinutý na cievkach v spodnej časti zariadenia, ktoré je vybavené dvoma slotmi pre dva zvolené druhy materiálu, ktoré sú aktuálne využívané. Jeden materiál tvorí stavebná ABS hmota, na druhej cievke je materiál potrebný na stavbu podpôr. Pre tvorbu radiacej hlavice bol využitý kvalitnejší *ABSplus* materiál. Skratka ABS predstavuje Akrylonitril butadién styren, jedná sa o amorfný termoplastický kopolymér, ktorý je odolný voči mechanickému poškodeniu a môže byť využívaný pri teplotách $-25^{\circ}\text{C} - 60^{\circ}\text{C}$. Materiál ABS je plne necyklovateľný, má dobré mechanické vlastnosti Tab. 4.4, jeho chemický vzorec je $(\text{C}_8\text{H}_8 \cdot \text{C}_4\text{H}_6\text{C}_3\text{H}_3\text{N})_n$. Chemická odolnosť voči kyselinám, zásadám, neorganickým soliam, vode je relatívne dobrá, avšak ABS nie je odolný voči aldehydom, ketónom a esterom, v ktorých sa rozpúšťa.

Tab. 4.4 Mechanické vlastnosti materiálov ABS².

Mechanické vlastnosti	ABS	ABSplus
Pevnosť v ťahu	22MPa	37MPa
Modul pružnosti v ťahu	1,627MPa	1,915MPa
Pomerné predĺženie	6%	3,1%
Pevnosť v ohybe	41MPa	61MPa
Modul pružnosti v ohybe	1,834MPa	1,820MPa

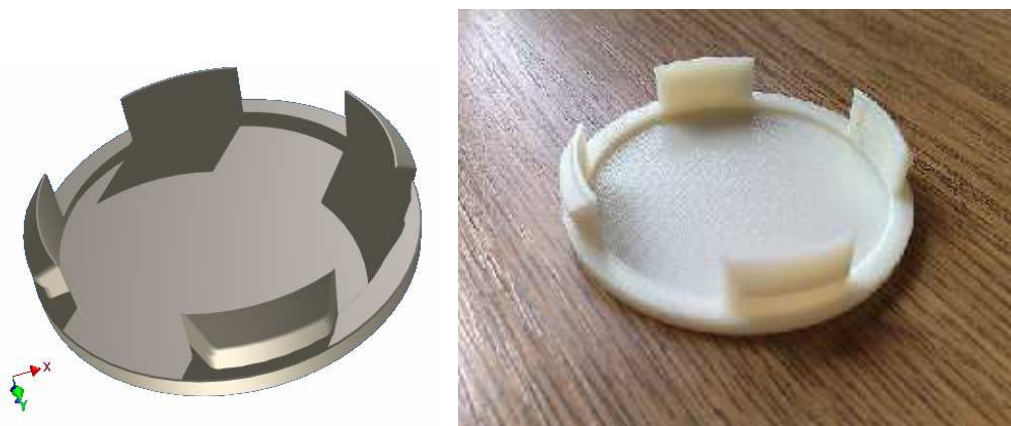
Netoxické materiály a kompaktnosť umožňujú metóde FDM využitie aj v kancelárskych priestoroch, na rozdiel od napríklad metódy laminovania, ktorá vyžaduje dielenské priestory. Zariadenie je veľmi sofistikované, pri prípadnom nedostatku materiálu stavba modelu nezlyhá, zariadenie tvorbu pozastaví a počká na doplnenie chýbajúcej kazety s materiálom, potom samostatne akciu spustí a bez problémov pokračuje v procese vytvárania prototypu. Vytvorené modely metódkou FDM sú využívané pri testoch funkčnosti, zmontovateľnosti či dizajnových požiadaviek budúceho, sériovo vyrábaného modelu.

Zaregistrované chyby modelu je možné odstrániť ešte pred tvorbou nástrojov na ich tvorbu, čo zabezpečí vždy výrobu aktuálne požadovaného tvaru. Kvalita výsledného produktu je závislá na priereze a vlastnostiach materiálu, a priemerom výstupnej trysky. Pri konštrukcii je tiež potrebné počítať so zmrštením modelu, ktoré je možné čiastočne redukovať správnym nastavením v softvéri. Pri použití vybraných materiálov majú vyrobené súčasti schopnosť reálnej funkcie, materiálové charakteristiky však na niektoré aplikácie nepostačujú. V takýchto prípadoch je rozumné siahnuť po inej technológii. V rukách skúseného konštruktéra či dizajnéra je zariadenie Dimension veľmi efektívnym nástrojom pre rýchlu tvorbu prototypových súčastí.

Tejto technológii je využité pre výstavbu modelu riadiacej hlavice, preto bola technológii FDM venovaná zvýšená pozornosť. Popis tvorby hlavice je vysvetlený a popísaný v praktickej časti práce, zameranej na verifikáciu funkčnosti modelu formou rýchlej výroby prototypov.

4.3.3 Výroba prototypu krytky

Z ilustračných dôvodov a dôvodov potreby bola FDM formou rapid prototypingu vyrobená súčasť „krytka“ Obr. 4.42, ktorá plní ochrannú funkciu pred nepriaznivými podmienkami vlhkého prostredia v daždivom počasí. Jedná sa o krytku kolesa osobného automobilu. Došlo k strate jednej so štyroch krytiiek, preto je aj tento príklad uvedený, ako využitie metódy rapid prototypingu s využitím reverzného inžinierstva, pretože rozmery boli namerané na základe ekvivalentnej fyzickej súčasti, bol vytvorený model v prostredí Autodesk Inventor, ktorý bol prevedený na *.stl súbor a následne vyrobený metódkou FDM.



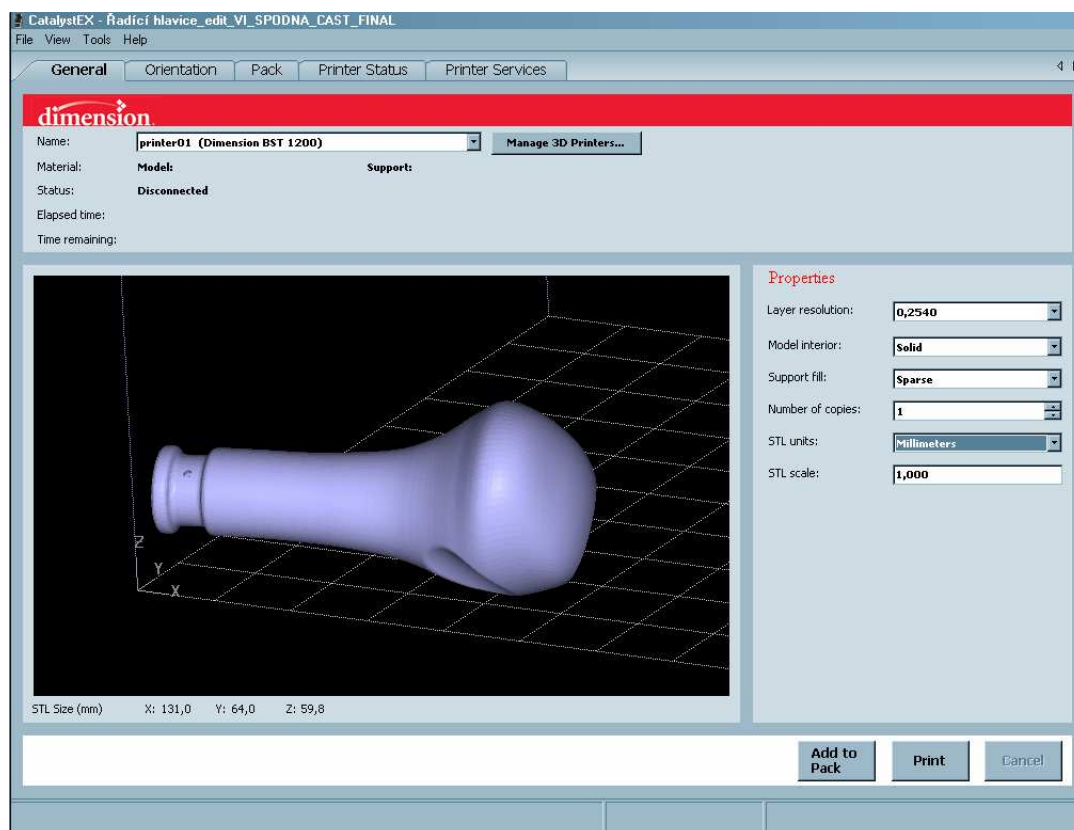
Obr. 4.42 a) CAD model krytky, b) krytka vyrobená FDM technológiiu.

4.4 Výroba radiacej hlavice metódou FDM

4.4.1 Príprava tlače v programe CatalystEX

K zariadeniu Dimension U Print je dodávané softvérové vybavenie v podobe softvéru *CatalystEX* Obr. 4.43, ktoré slúži na nastavenie preprocesingu samotnej výroby prototypu. Softvér je štandardne koncipovaný na vstupný formát *.stl.

Po naimportovaní *.stl súboru sme mali k dispozícii množstvo nastavení slúžiacich k špecifikácii výroby pre konkrétnu súčasť.



Obr. 4.43 Nastavenie tlače v prostredí CatalystEX.

V nastaveniach je potrebné vybrať výstupné zariadenie, v ktorom bude realizovaná stavba súčasti, v našom prípade sa jedná o zariadenie Dimension BST 1200.

Ďalšie voľby Obr. 4.44 slúžia na nastavenie parametrov 3D tlače.

Properties

Layer resolution:	<input type="text" value="0,2540"/>	- nastavenie hrúbky vrstvy v [mm] (závislé na voľbe zariadenia)
Model interior:	<input type="text" value="Solid"/>	- nastavenie stavby interiéru modelu
Support fill:	<input type="text" value="Sparse"/>	- nastavenie stavby podpory
Number of copies:	<input type="text" value="1"/>	- nastavenie počtu kópií
STL units:	<input type="text" value="Millimeters"/>	- nastavenie menovitých jednotiek
STL scale:	<input type="text" value="1,000"/>	- nastavenie mierky prototypu

Obr. 4.44 Predvoľby tlače.

Nastavenie výšky nanášaných vrstiev:

Prvým nastavením je hrúbka vrstvy, predstavuje výšku každej vrstvy naneseného materiálu pri stavbe modelu. Softvér podporuje možnosti 0,178; 0,254, čo je nami využívaná výška vrstvy, alebo 0,330 mm. Zvolené rozlíšenie sa prejaví na kvalite povrchu a stavebnom čase prototypu. Jemnejší povrch vyžaduje vyššie rozlíšenie, čo predstavuje vyššiu časovú náročnosť.

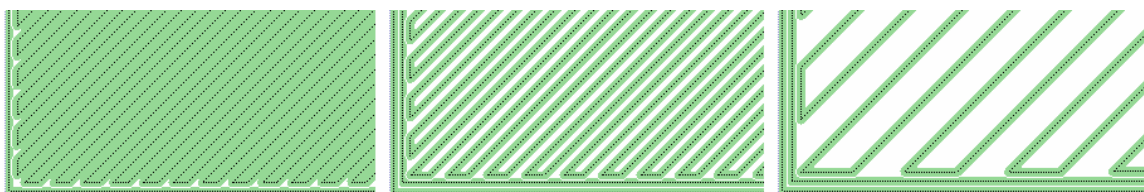
Voľba stavby interiéru modelu:

Druhá voľba predstavuje nastavenie stavby interiéru modelu, určuje spôsob vyplnenia modelu. V určitých aplikáciách je vystavaný model určený na prezentáciu povrchovej vrstvy, nie je použitý ako funkčná súčasť, preto interiér modelu nie je nutné realizovať vyplnením stavebným materiálom formou plnej súčasti, ale vystavať interiér tzv. „sparse“ metódou, čo v preklade znamená riedky, alebo rozptýlený objem materiálu. Je možné si ho predstaviť ako zriedenú stavebnú štruktúru interiéru Obr. 4.45b,c z dôvodu zníženia spotreby materiálu a výslednej hmotnosti v prípade, kedy nie je potrebná plná vnútorná výplň materiálu. V prípade radiacej hlavice je samozrejme z dôvodu požadovanej tuhosti funkčného prototypu využité stavby modelu metódou „solid“, teda plný vnútorný materiál. Softvér ponúka 3 preddefinované varianty tvorby interiéru modelu.

Prvou je spomínaný „solid“ Obr. 4.45a, používaný pre potreby silného a odolného prototypu. Touto metódou je spotrebované rádovo väčšie množstvo materiálu a operácia stavby je časovo najnáročnejšia.

S využitím voľby „sparse – high density“ Obr. 4.45b v preklade riedky interiér s vysokou hustotou je model vystavaný s priemernou odolnosťou a veľmi priaznivou rýchlosťou tvorby modelu. Túto funkciu podporujú zariadenia Elite, 1200es, u Print 3D tlačiarne. Pre stavbu nefunkčných prototypov slúžiacich na prezentačné účely je táto metóda vysoko odporúčaná. Spotreba materiálu je rapídne znížená, čo zvyšuje ekonomickú výhodnosť technológie FDM.

Pre veľkoobjemové modely, akým je napríklad model kolenného kĺbu v skutočnej veľkosti je možné využiť nastavenie položky interiér modelu na hodnotu „sparse – low density“ Obr. 4.45c, ktorá predstavuje minimalizovanú podpornú interiérovú výplň prototypu. Ten bude vyhotovený prevedením „včelí plást“, čo zníži spotrebovaný materiál a čas potrebný na stavbu modelu na minimum.



Obr. 4.45 Vyplnenie interiéru modelu a) solid, b) sparse – high density, c) sparse – low density.

Nastavenie aplikácie podporného materiálu:

Voľba aplikácie podpory je realizovaná pomocou poľa „Support fill“. Podporný materiál je používaný pre podporu vystavaných vrstiev, zabraňuje zrúteniu modelu počas jeho stavby. Podporný materiál je po dokončení súčasti chemicky odstránený. Voľba výplne podpory ovplyvní jej pevnosť a tiež čas stavby modelu.

„Basic“ – základné nastavenie podpory je využívané v drvivej väčšine aplikácií. Používa rovnaký odstup medzi podporou a rastrom naneseného ABS materiálu.

„Sparse“ – čiastočne minimalizuje rozsah podporného materiálu. Aplikuje väčšie odstupy medzi rastrom stavebného a podporného materiálu. Jedná sa o optimalizované nanášanie podpory za zníženia použitého materiálu bez výraznej zmeny stability modelu.

„Minimal“ – využiteľná len pre malé súčastky, podpora je nanášaná len na nevyhnutných miestach a plní len stavebnú funkciu. Použiteľné pri malých samonosných prototypoch. Podpora je nanášaná s ohľadom na rýchle odstránenie. Metóda nie je aplikovateľná na veľké súčasti alebo členité súčasti, pretože nedostatočná podpora by viedla k ich zrúteniu.

„Break – away“ – podobná ako Sparse, avšak bez uzavretej obvodovej krivky nanášania podporného materiálu. Preto je oveľa jednoduchšia na odstránenie v porovnaní s ostatnými podpornými metódami. Je však časovo náročnejšia v porovnaní s metódou Sparse, taktiež nie je dostupná pre všetky zariadenia.

„Surround“ – celý model je obklopený podporným materiálom. Typické využitie pre vysoké, tenké či úzke prototypy.

Pre potrebu vystavania Radiacej hlavice bolo využité podporného materiálu s nastaveným parametrom „Sparse“, čo zabezpečilo dostatočnú nosnú funkciu hlavice a zároveň čiastočne zvýšila ekonomickosť projektu úsporou podporného materiálu.

Počet kusov predstavovala ďalšia možnosť, ktorá určuje počet vyhotovených kusov prototypov v nasledovnom procese tvorby. Počet simultánne stavaných modelov je limitovaný veľkosťou základnej platformy, na ktorú budú aplikované vrstvy stavebného materiálu.

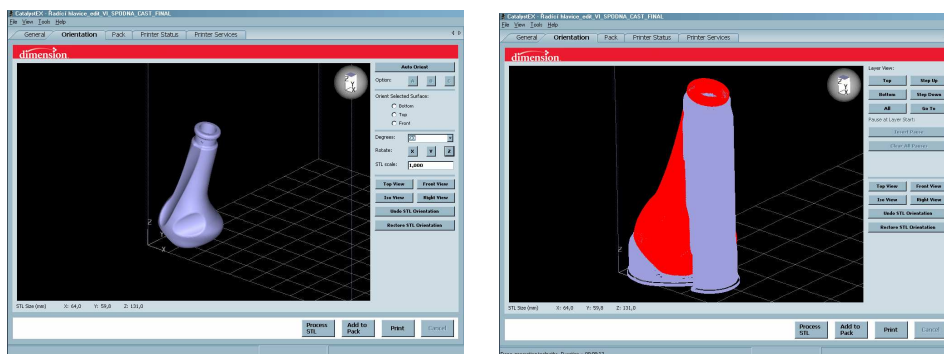
Nastavenie STL jednotiek podporuje prepočet na hodnoty v metrickej a anglosaskej sústave. Pre našu aplikáciu bola táto hodnota nastavená na metrickú sústavu, pretože v prípade použitia anglosaskej sústavy by bol vyrobený prototyp vystavaný v rozmeroch rôznych od rozmerov CAD modelu, ktorý bol konštruovaný s využitím metrickej sústavy.

Nasledovný parameter určoval mierku, ktorá bude aplikovaná na výstavbu prototypu. Je možné zmeniť veľkosť výstupného modelu bez zmeny CAD dát.

Pri tvorbe hlavice bol tento parameter samozrejme nastavený na hodnotu 1, čo zodpovedá mierke v skutočnej veľkosti, teda 1:1.

Orientácia modelu:

V záložke „*Orientation*“ bola k dispozícii ľubovoľná manipulácia s načítaným STL modelom. Radiaca hlavica bola v stavebnom priestore umiestnená vertikálne Obr. 4.46a. Horizontálna orientácia by neumožnila stavbu zložitých ergonomických prvkov v požadovanej kvalite a stabilite. Model by sa pri takejto voľbe uloženia po odstránení podpory zrútil.



Obr. 4.46 a) orientovaný model, b) vygenerovaná podpora.

Po správnej orientácii bola na model aplikovaná funkcia „*Add to Pack*“. V tejto operácii softvér rozdelil model v závislosti na nastaveniach na jednotlivé vrstvy, bola vygenerovaná podpora Obr. 4.46b a dráhy nástroja pre nanášanie stavebného a podporného materiálu.

Súčasť je pripravená na tlač. V záložke *Pack* bola súčasť s aplikovanou podporou umiestnená na základnú dosku. Pred samotnou tlačou systém *Catalyst* zobrazil čas a objem materiálu požadovaný na stavbu modelu Obr. 4.47.

Tlačidlom „*Print*“ bola zahájená stavba súčasti. Softvér *Catalyst* vygeneroval použitý materiál samostatne pre stavbu súčasti a podpory, tiež čas potrebný na stavbu modelu.

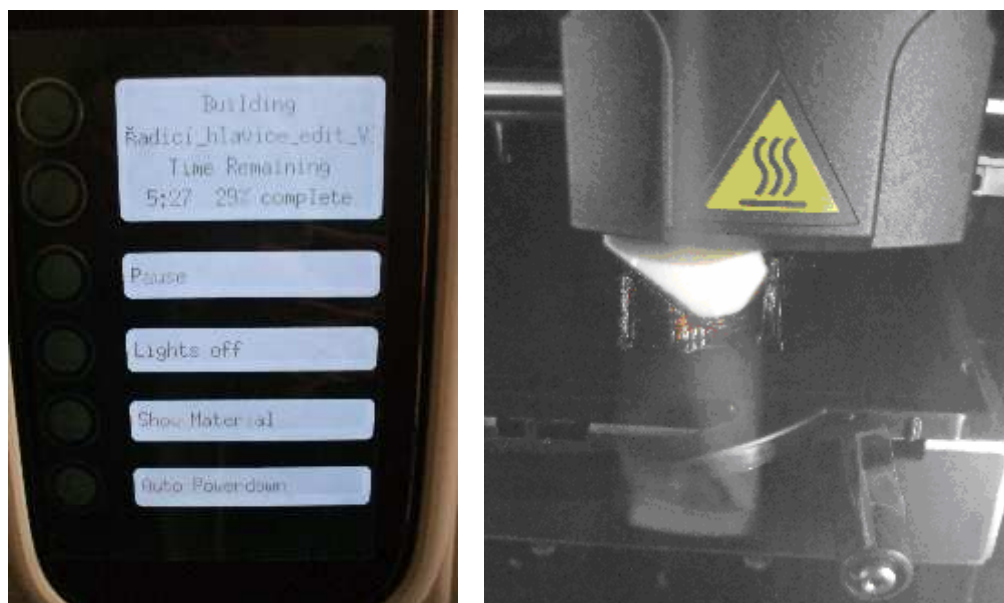
Pack Details	
Name:	Řadící_hlavice_edit_VI_
Model Material:	104,94 cm ³
Support Material:	23,58 cm ³
Time:	8:14

Obr. 4.47 Použitý materiál a čas potrebný pre stavbu modelu.

4.4.2 Proces stavby modelu radiacej hlavice:

Po odoslaní príkazu „Print“ bolo zariadenie Dimension pripravené na tlač. Jednoduchým stlačením tlačidla Print na zariadení Dimension bola zahájená stavba modelu Obr. 4.48b.

Prvých niekoľko vrstiev bol položený podporný materiál, ktorý tvoril stabilnú základňu pre nanášanie stavebného ABS*plus* materiálu. Ďalší postup tvorby prebiehal plne automaticky, po uplynutí odhadovaného času bola súčasť Obr. 4.49 vyrobená.

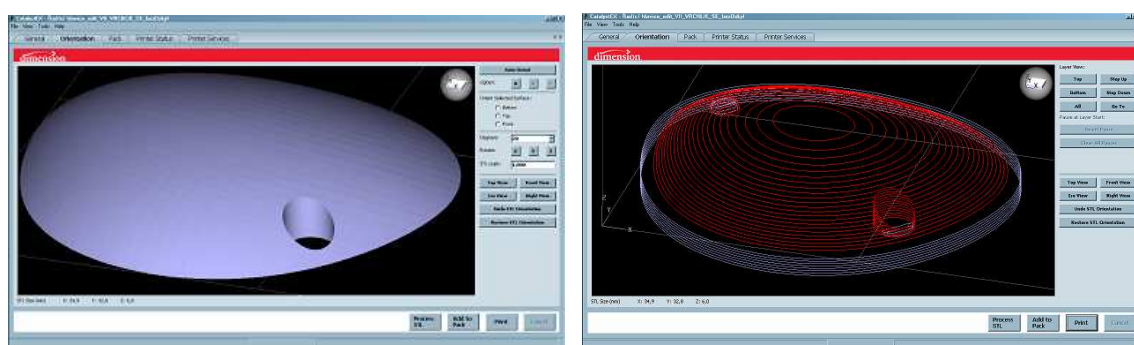


Obr. 4.48 a) displej zariadenia Dimension, b) stavba modelu.



Obr. 4.49 Vystavaný model.

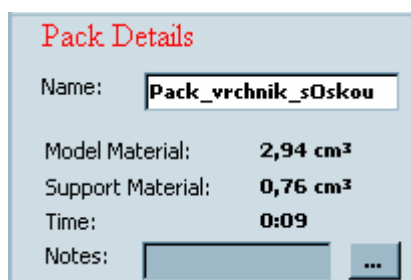
Identickým spôsobom prebiehala aj výroba odklopného vrcholíka radiacej hlavice Obr. 4.50. Nastavenie preprocesingu tlače prebiehalo za použitia totožných parametrov.



Obr. 4.50 a) orientácia vrcholíka pri tlači, b) nadefinovaná podpora.

Umiestnenie prvku v priestore komory zariadenia Dimension bolo prevedené funkciou „Auto orient“, ktorá umiestnila vrcholík spôsobom vyžadujúcim minimálnu podporu s maximálnou tuhosťou modelu počas jeho stavby.

Vrcholík bol z konštrukčných dôvodov vyrobený bez osky, ktorá zabezpečuje rotačný pohyb vrcholíka, pretože bude vyrobená dodatočne s využitím pevnejšieho kovového materiálu, aby dokázala plniť funkciu rotácie s dostatočnou tuhosťou. Softvér *Catalyst* vypočítal čas a materiál potrebný na stavbu vrcholíka radiacej hlavice Obr. 4.51.



Obr. 4.51 Materiálová a časová náročnosť stavby vrcholíka.

4.4.3 Postprocesing vyrobeného modelu

Všetky vyrobené 3D modely s využitím dostupných metód Rapid Prototyping možno ďalej z estetického hľadiska obrábať, tmeliť, brúsiť, leštiť, farbiť atď. za účelom vyššej presnosti, lepšieho povrchu, ľahšej zmontovateľnosti, vizualizácie prípadne väčšej ostrosti farieb.

Po dokončení výroby hlavice metódou *Fused Deposition Modeling* nasledovali ďalšie postprocesingové operácie, medzi ktoré možno zaradiť odstránenie podporného materiálu chemicko–mechanickým spôsobom s využitím ultrazvukovej pračky „*Digital Ultrasonic Cleaner*“, aplikácia leptacích Obr. 4.52b a brúsnych chemikálií zabezpečujúcich homogénny hladký povrch prototypu či farbenie modelu.



Obr. 4.52 a) chemický prípravok na odstránenie podpory, b) leptadlo povrchu, c) plnič – príprava podkladu pre farebný nános.

Odstránenie podporného materiálu:

Proces odstraňovania podporného materiálu Obr. 4.53 bol zabezpečený vodným roztokom chemikálie spoločnosti Stratasys. Jedná sa o koncentrát žieravej látky vo forme prášku Obr. 4.52a, ktorý je odporúčané riediť v pomere 1 balenia na 42 vody, čo pre použitie v ultrazvukovej čističke s objemom 2l predstavuje množstvo 60 gramov. Ultrazvuková čistička „Digital Ultrasonic Cleaner“ je napájaná štandardným sieťovým napätím ~230V. Zaradenie ultrazvukovej čističky do postprocesingu značne zníži čas potrebný na odstránenie podpory. Ultrazvuková čistička je koncipovaná na pracovnú teplotu v rozsahu 50 – 70°C, chemické čistiadlo pracuje ideálne vo výrobcom stanovenom tepelnom rozsahu 65°C. S použitím chemikálií a ultrazvukovej čističky bola podpora úplne odstránená behom 4 hodín.



Obr. 4.53 Takmer ukončený proces odstraňovania podpory v ultrazvukovej čističke.

Vyhladzovanie povrchu:

Pre získanie hladkého povrchu Obr. 4.54 bolo využité leptadlo Etyl(Metyl)Ketónu Obr. 4.52b. Aplikácia na povrch hlavice bola zabezpečená štetcom. Povrch prototypu Obr. 4.54 bol po nanosení a zaschnutí leptadla evidentne hladší, model bol pripravený na aplikáciu plniča.



Obr. 4.554 Naleptaný model s výrazne hladším povrchom.

Aplikácia plniča:

Na hlavicu bol v niekoľkých vrstvách nanosený tenký film plniča „Eurospray – FILLER“ Obr. 4.52c, ktorý plnil funkciu prekrytia a vyplnenia povrchových nedostatkov na prototyp, vzniknutých pri nanášaní jednotlivých vrstiev materiálu *ABSplus*. Plničom boli vyplnené všetky trhliny, póry či iné nežiadané nerovnosti povrchu. Model bol následne ručne brúsený šmirgľovým papierom zrnitosti 400 a 800 keramických brúsnych zŕn na 1 cm² spolu s vodou metódou vodného brúsenia pre zvýšenie akosti povrchu. Výsledkom bola požadovaná hladká a jemná štruktúra povrchu pripravená na farbenie Obr. 4.55.



Obr. 4.55 Plničom ošetrovaný vyhladený model hlavice a vrcholíka.

Farbenie a dokončovacie úpravy:

Takto vyhladený model bol pripravený na aplikáciu konečnej vrstvy farby a laku. Hlavica bude nalakovaná červeným farebným odtieňom Obr. 4.56 z dôvodu dizajnového ladenia interiéru s exteriérom, ktorý tvorí totožný odtieň červenej farby.



Obr. 4.56 Nalakovaný model hlavice.

Poslednou úpravou v postupe tvorby radiacej hlavice bolo nalepenie kožených doplnkových výstrižkov na miesta ergonomických a dizajnerských prvkov z dôvodu maximalizácie výstrednosti modelu. Konečná úprava modelu je zobrazená na obrázku Obr. 4.57.



Obr. 4.57 Hotový model hlavice.

5 ZÁVER

Práca bola primárne zameraná na tvorbu reálnej prototypovej súčasti s využitím progresívnych technológií. Reverzné inžinierstvo patrí medzi inovatívne technologické postupy v strojárskvej výrobe, využitie nachádza pri výrobe a editácii súčastí s priamou nadväznosťou na predchádzajúci model, pričom dôjde len k jeho úprave na rozdiel od možného nákladného vývoja kompletne novej súčasti. Takto je možné zachovať cenné informácie získané z predošlého modelu a tak pred pripraviť nový výrobok na dosiahnutie vyšších mechanických vlastností opravením či nahradením slabých konštrukčných miest predošlého modelu. Reverzného inžinierstva bolo pri produkcii radiacej hlavice využité v postupe výroby. Požadované ergonomické nároky boli na modeli uplatnené technológiou reverzného inžinierstva a to naskenovaním prvotného fyzického modelu s cennými informáciami potrebnými pre dosiahnutie požadovaného ergonomického efektu. Naskenované dáta v podobe .stl súboru boli následne upravované parametrickým CAD systémom. Prevod naskenovaných dát v podobe 3D povrchu bol realizovaný v prostredí CAD systému SolidWorks. Týmto postupom bolo získané trojdimenzionálne objemového modelu súčasti. Takýto postup nám umožní skutočnú reálnu predstavu o rozmerových charakteristikách modelu, čo predstavuje obrovskú výhodu, pretože práve absencia rozmerovej predstavivosti patrí medzi hlavné nedostatky konštrukčných CAD systémov.

Objemový model bol ďalej upravovaný parametrickým CAD systémom Autodesk Inventor. S využitím cenných informácií získaných skenovaním bola realizovaná interpolácia prvotného nerovnomerného modelu na matematický. Interpolácia bola realizovaná dotyčnicovým prepojením náčrtov konštruovaných v 11 rovnobežných rovinách. Výsledkom tejto operácie bol vyhladený objemový model základného tvaru hlavice. Tento bol editovaný o množstvo prvkov ergonomických, funkčných či dizajnových. Ergonomické prvky vychádzali z naskenovaných dát. Medzi funkčné prvky možno zaradiť vytvorený rez hlavice pre vloženie tlačidla pre štart motoru, ktoré dodáva hlavici nadštandardný status.

Záver práce sa zaoberá verifikáciou modelu využitím progresívnej technológie rapid prototyping s využitím metódy FDM. Rapid prototyping predstavuje technológiu tvorby súčastí určených nie len k prezentácií, ale aj k reálnemu použitiu, čoho dôkazom bude aj skutočné využitie prototypu radiacej hlavice v automobile. Hlavnou výhodou tejto techniky výroby je prakticky neobmedzená zložitosť vystavaných prototypov, čo potvrdzuje aj obrázok lampy Obr. 4.35 vytvorenej metódou stereo litografie.

Radiaca hlavica bola po vyrobení podrobená niekoľkým postprocesingovým úpravám, odstráneniu podporného materiálu chemicko-chemickým spôsobom s využitím ultrazvukovej čističky a chemikálie spoločnosti Stratasys určenej výhradne pre tento účel, zjemneniu povrchu chemickým prípravkom, vyplneniu nerovností povrchu plničom s následným brúsením šmirgľovým papierom. Poslednou operáciou bolo lakovanie súčasti a nalepenie doplnkových kožených prvkov.

Vyrobený prototyp spĺňa požiadavky nadštandardnej výbavy integráciou ergonomických či dizajnových požiadaviek, čo bolo cieľom tejto bakalárskej práce.

ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

1. VLÁČILOVÁ, H., VILÍMKOVÁ, M., HENCL, L. Základy práce v CAD systému SolidWorks. 1. vyd. Brno: Computer Press, a.s., 2006. 319 s. ISBN 80-251-1314-0.
2. MIROSLAV PÍŠKA A KOLEKTIV: Speciální technologie obrábění, Aditivní technologie, reverzní inženýrství, 1. vyd, 2009. Brno: VUT, 2009. s.246, ISBN 978-80-214-4025-8.
3. JACOBSON, D. M., RENNIE, A. E. W., BOCKING C. E. In Proceedings of the 5th National Conference on Rapid Design, Prototyping, and Manufacture. Professional Engineering Publishing, 2004, pp.112. ISBN 1860584659.
4. TMS (The Minerals, Metals & Materials Society): Rapid Prototyping of Materials. The Minerals, Metals & Materials Society. 2002, pp. 615. ISBN 0873395301.
5. PÍŠA, Z., KEJDA, P., GÁLOVÁ, D.: Rapid Prototyping in Mechanical Engineering. In Proceedings of the Abstracts 12th International Scientific Conference CO-MA-TECH 2004. Bratislava: STU, 2004. s. 160. ISBN 80-227-2121-2.
6. GOM mbH. Germany: Industrial 3D measuring techniques – for digitizing and deformation measurement [online]. Květen 2005. [cit. 20. Marca 2010]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.gom.com>>.
7. NAVRÁTIL, R.: Reverse Engineering - teorie [online]. Jún 2000. [cit. 26. Marca 2010]. Dostupné na World Wide Web: <<http://robo.hyperlink.cz/re-teorie/index.html>>.
8. NAVRÁTIL, R.: Reverse Engineering v praxi [online]. Jún 2000. [cit. 27. Marca 2010]. Dostupné na World Wide Web: <<http://robo.hyperlink.cz/re-praxe/index.html>>.
9. NAVRÁTIL, R.: 3D skenery. [online]. Leden 2000. [cit. 23. Marca 2009]. Dostupné na World Wide Web: <<http://robo.hyperlink.cz/3dskenery/index.html>>.
10. NAVRÁTIL, R.: Rapid prototyping. [online]. Leden 2000. [cit. 26. marca 2010]. Dostupné na World Wide Web: <<http://robo.hyperlink.cz/rapid/index.html>>.
11. MCAE Systems s.r.o. Česká republika. FDM TECHNOLOGIE pro rychlou výrobu modelů, prototypů a forem. [online]. [cit. 15. Apríla 2010]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.mcae.cz/iecz.html>>.

12. ATUNING.ORG: VW Bora. [online]. [cit. 22. Apríla 2010] Dostupné na World Wide Web: <<http://atuning.org/page/3>>.
13. FARO®: Product Overview. [online]. Oktober 2009 [15.marca.2010]. Dostupné na World Wide Web: <http://products.faro.com/product-overview/?ext_cid=ef.aw.ge.me.nl.mp.ap >.
14. SPEEDPRO: OPM SUN: anatomická hlavice řadící páky. [online]. [cit. 14. marec 2010]. Dostupné na World Wide Web: <<http://speedpro.cz/anatomicka-hlavice-radici-paky-pi-4310.html>>.
15. Z CORPORATION: Products: ZPrinter® 450. [online]. [cit. 23 marec 2010]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.zcorp.com/en/Products/3D-Printers/ZPrinter-450/spage.aspx>>.
16. BATHSHEBA GROSSMANN: Lamp bulit with 3D laser printing [online]. 23. Október 2008. [cit. 16. marec 2010]. Dostupné na World Wide Web: <<http://technabob.com/blog/2008/10/23/cosmically-cool-lamp-3d-laser-printing/>>.
17. 4ISP spol. s.r.o: Technologie 3D tisku [online]. Januar 2010 [cit. 21. apríl 2010]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.easycnc.cz/inpage/informace-o-technologiich-3d-tisku/>>.
18. SEDLÁK J., PÍŠA Z.: Rapid prototyping master modelů pomocí CAD/CAM systémů. In *Mezinárodní vědecká konference 2005*. Ostrava: VŠB TU Ostrava, Fakulta strojní, 07.09.2005-09.09.2005. 30 s. ISBN: 80-248-0895-1.

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV

<i>Skratka/Symbol</i>	<i>Jednotka</i>	<i>Popis</i>
ABS	[-]	Akrylonitril butadién styren
ATOS	[-]	Advanced Topometric Sensor
Bit	[b]	Základná jednotka informácie
Bluetooth	[-]	Bezdrôtový prenos informácií
CAD	[-]	Computer Aided Design
CAM	[-]	Computer Aided Manufacturing
CCD	[-]	Charge-coupled device
CNC	[-]	Computer Numeric Control
DMLS	[-]	Direct Metal Laser Sintering
FDM	[-]	Fused Deposition Modeling
LAN	[-]	Local Area Network
LOM	[-]	Laminated Object Manufact.
Mikrometer	[μm]	$1 \mu\text{m} = 10^{-6}\text{m}$
Milimeter	[mm]	$1\text{mm} = 10^{-3}\text{m}$
Milimeter kubický	[mm^3]	šírka x výška x dĺžka
Milimeter štvorcový	[mm^2]	výška x dĺžka
MJM	[-]	Milti Jet Modeling
RE	[-]	Reverzné Inžinierstvo
RP	[-]	Rapid Prototyping
SGC	[-]	Solid Ground Curing
SLA (SL)	[-]	Stereolitografia
SLS	[-]	Selective Laser Sintering

ZOZNAM PRÍLOH

Príloha 1	ATOS – proces skenovania – referenčné značky
Príloha 2	ATOS – proces skenovania – zaostrenie modelu
Príloha 3	ATOS – proces skenovania – skenovanie
Príloha 4	ATOS – proces skenovania – nevyhladený model
Príloha 5	ATOS – proces skenovania – vyhladený model
Príloha 6	ATOS – proces skenovania – detail triangulovaného modelu
Príloha 7	INVENTOR – zostava hlavica – vrcholík – tlačidlo
Príloha 8	INVENTOR – zostava hlavica – kulisa
Príloha 9	Fotografia hotového prototypu radiacej hlavice

