



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA PROTOTYPU DRŽADLA SKŘÍNKY AUTOINTERIÉRU NA 3D FDM TISKÁRNĚ

PRODUCTION OF GLOVEBOX HANDLE ON 3D FDM PRINTER

BAKALÁRSKA PRÁCA
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

David ŠURANSKÝ

VEDÚCI PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Oskar ZEMČÍK, Ph.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2014/15

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): David Šuranský

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303R002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Výroba prototypu držadla skřínky autointeriéru na 3D FDM tiskárně

v anglickém jazyce:

Production of glovebox handle on FDM 3D printer

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Autor provede rešerši zvolené problematiky, včetně funkce a požadovaných vlastností prototypu. Navrhne několik variant tvaru a způsobu výroby zvoleného dílu na 3D FDM tiskárně. Následně bude realizována výroba a technicko ekonomické zhodnocení.

Cíle bakalářské práce:

- rešerše zvolené problematiky
- vyhodnocení požadovaných parametrů součástí
- návrh a tvorba modelů součástí ve zvolené CAD aplikaci
- výroba prototypů
- technicko-ekonomické zhodnocení

Seznam odborné literatury:


1. BILÍK, Oldřich a Martin VRABEC. Vrabec Martin Technologie obrábění s využitím CAD/CAM systémů. Ostrava: Vysoká škola báňská-Technická univ., 2002, 128 s. ISBN 80-248-0034-9.
2. FOŘT, Petr a Jaroslav KLETEČKA. Autodesk Inventor. Brno: Computer Press, 2007, 296 s. ISBN 978-80-251-1773-6.
3. CHANG, Tien-Chien, Richard WYSK a Hsu-Pin WANG. Computer-Aided Manufacturing. 3. vyd. New Jersey: Prentice Hall, 2005, 684 s. ISBN 0-13-142919-1.
4. CHUA, C.K., K.F. LEONG a C.S. LIM. Rapid Prototyping: Principles and Applications. 3. vyd. Singapore: World Scientific Publishing Co., 2010, 512 s. ISBN 978-981-277-897-0.
5. PÍŠKA, Miroslav et al. Speciální technologie obrábění. 1. vyd. Brno: CERM, 2009, 246 s. ISBN 978-80-214-4025-8.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/15.

V Brně, dne 24.11.2014





prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.
Ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan

ABSTRAKT

Bakalárska práca sa zaoberá výrobou prototypu kľučky autointeriéru, ktorého konštrukcia je mierne poupravená oproti originálu. Obsahuje návrh niekoľkých konštrukčných variánt, výber najvhodnejšej z nich, úpravu pre potreby 3D tlače a samotnú výrobu súčasti na FDM tlačiarni z materiálu ABS. Na záver sú zhrnuté dokončovacie operácie a zhodnotenie z technického aj ekonomického hľadiska.

Kľúčové slová

ABS, FDM, 3D tlač, modelovanie

ABSTRACT

The bachelor thesis analyzes car interior handle production, whose design was slightly modified compared to the original part. It consists of few design drafts, selection of the most suitable one, modification for 3D printing purposes and the part production of ABS material on a FDM printer. Post-processing operations and technical as well as economical conclusions are mentioned at the end of the thesis.

Key words

ABS, FDM, 3D printing, modeling

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

ŠURANSKÝ, David. *Výroba prototypu držadla skříňky autointeriéru na 3D FDM tiskárně*. Brno 2015.. Bakalárska práca . Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 33 s. Vedoucí práce Ing. Oskar Zemčík, Ph.D

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som bakalársku prácu na tému Výroba prototypu držadla skřínky autointeriéru na 3D FDM tiskárně vypracoval samotatne s použitím odbornej literatúry a prameňov, uvedených na zozname, ktorý tvorí prílohu tejto práce.

Dátum

David Šuranský

POĎAKOVANIE

Týmto by som sa chcel poďakovať Ing. Oskarovi Zemčíkovi za cenné rady, usmernenie pri vypracovaní tejto bakalárskej práce a výrobu modelov.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PREHLÁSENIE.....	5
POĎAKOVANIE	6
OBSAH.....	7
1 FUNKCIA VYRÁBANEJ SÚČASTI	9
2 VOLBA TECHNOLOGIE PRE VÝROBU	10
2.1 Metóda 3D FDM tlače	10
2.1.1 Materiály 3D FDM tlače.....	11
2.1.2 Výhody a nevýhody FDM	15
2.2 Vstrekovanie do foriem	15
3 MODELOVANIE SÚČASTI V 3D CAD SYSTÉME.....	19
3.1 Použitý software	19
3.2 Autodesk Inventor Professional 2015.....	19
3.2.1 Postup modelovania	19
3.3 Konštrukcia a požadované vlastnosti.....	20
3.3.1 Prvá varianta	20
3.3.1 Druhá varianta.....	21
3.3.3 Tretia varianta	21
3.4 Výber finálnej varianty	22
4 TECHNOLOGIČNOSŤ VÝROBKU.....	23
4.1 Výber materiálu	23
4.2 Orientácia na základni	23
4.3 Technologické podpory pri výrobe.....	24
5 VÝROBA SÚČASTI.....	25
5.1 Tlač na 3D FDM zariadení	25
5.2 Dokončovacie operácie	26
6 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOTENIE.....	27
6.1 Vlastnosti výrobku.....	27
6.2 Ekonomické zhodnotenie	27
5.2.1 Porovnanie s dielom dostupným na trhu.....	29
ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV	31
ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK.....	33

ÚVOD

Automobily sú v dnešnej dobe významnou súčasťou života pre väčšinu spoločnosti. Tak ako aj vela zariadení v domácnosti a spotrebnej elektroniky, aj autá obsahujú vela plastových dielov, ktoré podliehajú únave a lomu. Napriek tomu, že mnohé z týchto dielov priamo neovplyvňujú funkciu automobilu, je ich výmena žiadaná z estetického hľadiska a z hľadiska komfortu pasažierov. Takéto diely sú často na trhu nedostupné alebo dostupné len s ťažkosťami a často stoja vela peňazí.

Táto bakalárska práca sa zaoberá výrobou kluky otvárania skrinky spolujazdca v automobile Volkswagen Passat B5. Vyrobená bude metódou 3D FDM tlače, ktorá umožňuje rýchlu výrobu prototypu s relatívne nízkymi nákladmi.

1 FUNKCIA VYRÁBANEJ SÚČATI

Súčasť, ktorá je predmetom bakalárskej práce je kľučkou skrinky spolujazdca v automobile Volkswagen Passat B5. Táto kľučka plní funkciu otvárania skrinky a taktiež sa na nej nachádza zámok skrinky, ktorý je v kľučke umiestnený nerozoberateľne. Otváranie skrinky je riešené rotačným pohybom okolo 2 čapov a následným zatlačením konca kluky na západkový mechanizmus umiestnený vo dverách skrinky. Súčasť taktiež plní estetickú funkciu nakoľko jej tvar zapadá do zakriveného tvaru dverí skrinky a spolu dotvárajú jednoliaty dojem interiéru auta. Pre zjednodušenie konštrukcie a pre problémy spojené s montážou zámku (nerozoberateľný spoj) bude kľučka konštruovaná bez osadenia tohto zámku. Absencia zámku je v tomto prípade bezpredmetná nakoľko počas dlhoročného používania auta zámok nebol používaný.

K poškodeniu súčati došlo opotrebením kedy sa pri otváraní dverí odtrhli obe uloženia na ktorých kľučka držala v dvierkach skrine – viz. obr. 1 a 2.



Obr. 1 Kľučka s odlomenými uloženiami.



Obr. 2 Detail odlomeného uloženia.

Hmotnosť súčasti je rádovo v desiatkach gramov a vzhľadom na celkovú hmotnosť vozidla nemá prakticky žiadny vplyv preto sa pri konštrukcii takejto súčasti výslednou hmotnosťou riadiť nemusíme. Lom, ktorý na súčasti nastal má únavový charakter. Pre zosilnenie pevnosti budú pri modelovaní zväčšené hrúbky materiálov najmä v oblasti odtrhnutých čapov.

2 VOLBA TECHNOLOGIE PRE VÝROBU

Metódu výroby treba zvoliť najmä s ohľadom na vyrábané množstvo či sériu, dosiahnuteľné mechanické a estetické vlastnosti a v neposlednom rade taktiež cenu. Smerodatným údajom v tomto prípade bude počet kusov. Vyrobené budú rádovo jednotky kusov, ktoré sa budú líšiť drobnými zmenami v konštrukcii. Pôvodná súčasť je vyrobená z materiálu ABS-PC, ktorý je bežným plastom používaným pri výrobe od malých až po rozmernejšie výrobky (vonkajšie aj vnútorné prvky áut, kryty a obaly počítačových komponentov a pod.). Technológie, ktoré používajú materiál ABS-PC sú napríklad vstrekovanie do kovovej formy ale taktiež metódy 3D tlače ako napr. Fused Deposition Modeling, Selective Laser Sintering, Selective Heat sintering a pod. [27].

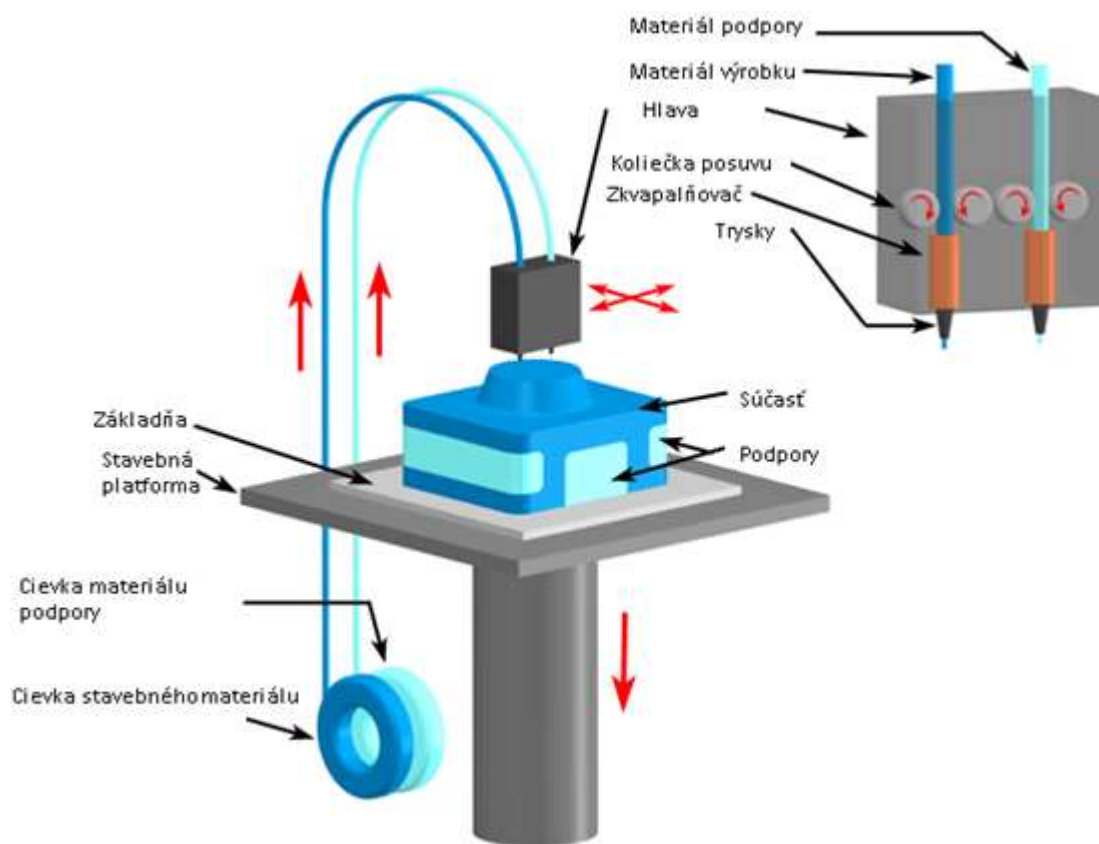
2.1 Metóda 3D FDM tlače

Súbor procesov používajúcich dáta CAD za účelom rýchlej výroby modelu alebo prototypu daného výrobku sa nazýva Rapid Prototyping (RP). Výstupom RP môže byť finálny výrobok, avšak z dôvodu nízkych mechanických vlastností a horšej presnosti je toto použitie obmedzené. Významnú aplikáciu majú tieto výrobky pri vývoji prototypov, testovaní napr. v aerodynamickom tuneli alebo pri výrobe foriem pre výrobu reálnych funkčných výrobkov. Technológiu Fused Deposition Modeling vyvinul Scott Crump v roku 1988 [2,3].

Metóda Fused Deposition Modeling, ďalej len FDM, je jednou z najrozšírenejších metód 3D tlače. Ako vstupný materiál používa plast vo forme drótu. Funguje na princípe trysky, ktorá natavuje plastový drôt a pohybuje sa po osiach XYZ (viz. obr. 4). Tryska obsahuje odporový ohrev, ktorý ju drží tesne nad teplotou tavenia použitého materiálu. Model je vyrábaný po horizontálnych vrstvách, ktorých hrúbka sa pohybuje v rozmedzí približne 0,13 – 0,25mm podľa kontrétneho zariadenia a zvolených parametrov. Velkou výhodou technológie FDM je možnosť výroby takmer ľubovoľného tvaru (previsnuté časti, zložité tvary v dutinách a pod.). Pre výrobu týchto tvarov je použitá podpora, ktorá je vytlačená z iného materiálu a dá sa jednoducho odstrániť odlomením, poprípade odleptaním podľa potreby a podľa tvaru modelu. FDM taktiež umožňuje tlač farebných modelov(viz. obr. 3) [1,4].



Obr. 3 Ukážka výrobkov vyrobených na 3D FDM tlačiarni od spoločnosti Stratasys [5].



Obr. 4 Schematický popis FDM zariadenia [4].

2.1.1 Materiály 3D FDM tlače

Východným materiálom v pre 3D FDM tlač bol v minulosti materiál ABS. V uplynulých rokoch však bolo vyvinutých mnoho materiálov s lepšími vlastnosťami čím sa zvýšila univerzálnosť použitia FDM tlačiarní a rozširuje sa ich uplatnenie. Súčasti môžu byť vyrobené zo širokej škály termoplastov s rôznymi mechanickými a chemickými vlastnosťami. Výrobky vyrobené 3D tlačou z materiálu ABS však dosahujú nižšie mechanické vlastnosti, približne 80 % pevnosti, ako výrobky vyrobené vstrekovaním do foriem z rovnakého materiálu. Tento rozdiel v pevnosti je spôsobený hlavne nedokonalým spájaním jednotlivých vrstiev modelu a defektami. Rovnakej alebo vyššej pevnosti ako pri vstrekovaní do formy je možné použitím materiálov s vyššími mechanickými vlastnosťami.

Technológia FDM používa širokú škálu termoplastov, ktoré dokážu splniť požiadavky pre rôzne aplikácie. Tieto materiály disponujú vyššou pevnosťou ale aj inými vlastnosťami ako napríklad odolnosť voči vysokým teplotám, odolnosť voči chemikáliám (oleje, benzín, kyseliny), biokompatibilita – plasty použiteľné ako obalové materiály pre potraviny a medicínske potreby, ďalej plasty, ktoré môžu byť sterilizované v autokláve alebo pomocou gamma žiarenia. Taktiež je možné dokončovanie bez potreby manuálnej práce kedy je materiál podpory rozpustený vo vode alebo inom rozpúšťadle a ostane iba hotový výrobok [6,7].

ABS – Celosvetovo najrozšírenejší a najpoužívanejší materiál pre technológiu FDM. Má široké využitie od modelov a prototypov, cez nástroje až po finálne výrobky. [7].

ABSplus – Termoplast až o 40 % pevnejší než ABS. Jeho použitím je možné dosiahnuť výrobky s kvalitnejším povrchom a vyššími mechanickými vlastnosťami. Tento materiál je možné dostať v širokej škále farieb [34].

ABS ESD7 – Tento materiál sa od ostatných líši schopnosťou prevencie proti vzniku statickej elektriny. Preto je vhodný pre použitie v oblastiach kde statická elektrina môže ovplyvniť činnosť výrobku, poškodiť ho, spôsobiť výbuch a podobne (viz. obr. 5). Absencia statickej elektriny taktiež zabraňuje priťahovaniu malých častíc ako je prach alebo iné látky rozptýlené v ovzduší, ktorých usádzanie môže ovplyvniť funkciu výrobku. Mechanické vlastnosti sú s toleranciou 5 % rovnaké ako má ABS M30 [28].



Obr. 5 Držiak pevného disku vyrobený z ABS ESD7. [28]

ABS M30i – Biokompatibilný materiál sterilizovateľný pomocou gamma žiarenia alebo etylénoxidom, vďaka čomu môže byť použitý na výrobu manipulačných zariadení pre farmaceutický medicínsky a potravinársky priemysel (viz. obr. 6) [32].



Obr. 6 Nástroj používaný v medicínskom prostredí vyrobený z ABS M30i.[32]

ABSi – Ďalšou modifikáciou ABS je ABSi, ktorý sa od ostatných materiálov líši priehľadnosťou. Aj keď má podobné mechanické vlastnosti ako ABS je používaný najmä v svetelných aplikáciách a ďalej vo výrobkoch, ktoré slúžia na monitorovanie hladiny sypkých či tekutých materiálov. Je dodávaný vo viacerých farbách [32].

PC – Polykarbonát je najrozšírenejším priemyslom využívaným termoplastom. Súčasti vyrobené z tohto materiálu vynikajú presnosťou, stabilitou a vysokou odolnosťou. Má vysokú pevnosť a je tepelne odolný do 138 °C, čo je druhá najvyššia teplota spomedzi materiálov používaných pre FDM. Polykarbonát je materiálom pre odolné výrobky ako sú nástroje, testovacie prototypy a hotové funkčné výrobky. Na obr.7 je znázornená možnosť použitia pre výrobu formy na vyfukovanie plastov [30].



Obr. 7 Forma pre vyfukovanie plastov z materiálu PC [30].

PC-ABS - Kombinácia týchto dvoch materiálov prináša vysoké mechanické vlastnosti a tepelnú odolnosť a zároveň pružnosť, dobrú definíciu tvarov a kvalitu povrchu [29].



Obr. 8 Rúčka motorovej píly z PC-ABS.[29]

PC-ISO – Ďalší biokompatibilný materiál, ktorý je sterilizovateľný gamma žiarením alebo etylénoxidom. Odlišuje sa vyššími mechanickými vlastnosťami, ktoré sú o 33-59 % vyššie ako tie pri ABS-M30i [7].

Ultem 9085 – Vysoko odolný materiál, ktorý spĺňa bezpečnostné požiadavky pre letectvo a vesmírne aplikácie. V predajnosti je to najrýchlejšie rastúci materiál. Príklad viz. obr. 9 [33].



Obr. 9 Násada lopaty na sneh z materiálu Ultem 9085.[33]

PPSF/PPSU - Polyphenylsulfone – Bol prvým vysokoodolným termoplastom použiteľným pre FDM. Má vysokú tepelnú a chemickú odolnosť (189 °C). Jeho uplatnenie je v súčiastkach do motorov, kde iné termoplasty podliehajú vysokým teplotám. Je odolný voči olejom, benzínu, kyselinám a iným chemikáliám. Taktiež je sterilizovateľný a vďaka vysokej tepelnej odolnosti je možné použiť iné metódy sterilizácie, napr. autokláv, plazma, chemické a radiačné metódy [7].

Nylon 12 – Prvý z rady nylonových materiálov. Vyniká vysokou únavovou odolnosťou. Má až o 100-300 % vyššiu ťažnosť ako akýkoľvek iný materiál používaný v FDM technológii. Využitie nachádza v súčiastkach, ktoré sú opakovane namáhané ako napríklad rôzne zacvakávacie zatvárania, koncovky káblov a podobne (viz. obr. 10) [31].



Obr. 10 Krabica so zacvakávacím zatváraním z materiálu Nylon 12 [31].

ULTEM 1010 – Materiál s najvyššou teplotnou a chemickou odolnosťou a taktiež najvyššou pevnosťou v ťahu spomedzi všetkých termoplastov používaných v FDM technológii. Taktiež má ako jediný certifikáciu NSF 51 pre styk s potravinami. Jeho využitie siaha od medicínskych výrobkov sterilizovateľných v autokláve až po aplikácie v leteckom priemysle a to aj na vonkajšej strane lietadiel. Príklad je na obr. 11 [26].



Obr. 11 Komponent vyrobený z materiálu Ultem 1010.[26]

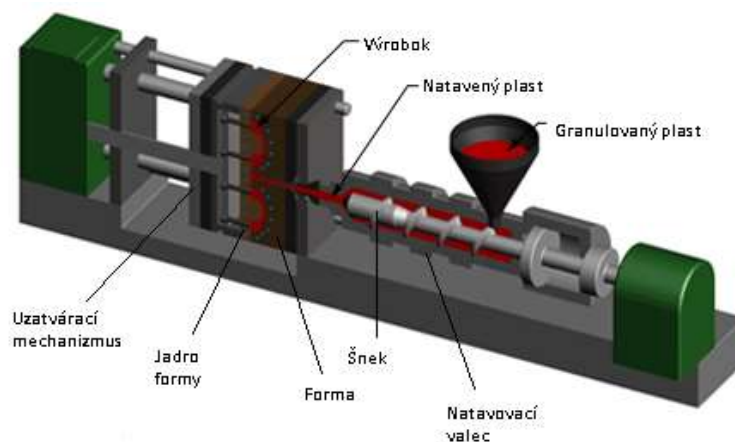
2.1.2 Výhody a nevýhody FDM

- Výhody:**
- možnosť vyrobiť rentabilne výrobky už od 1 kusu,
 - možnosť rýchlych zmien modelu pomocou CAD systému,
 - možnosť vyrobiť prakticky akýkoľvek tvar,
 - možnosť vyrobiť hotovú súčasť bez potreby nástrojov špecializovaných pre konkrétny výrobok,
 - nízka cena [8].
- Nevýhody:**
- nevhodné pre veľké série, čas pre výrobu jedného kusu je neporovnateľne dlhší oproti konvenčným technológiám pre výrobu plastových dielov,
 - viditeľnosť jednotlivých vrstiev a nízka kvalita povrchu,
 - znížená pevnosť v ose Z [8].

2.2 Vstrekovanie do foriem

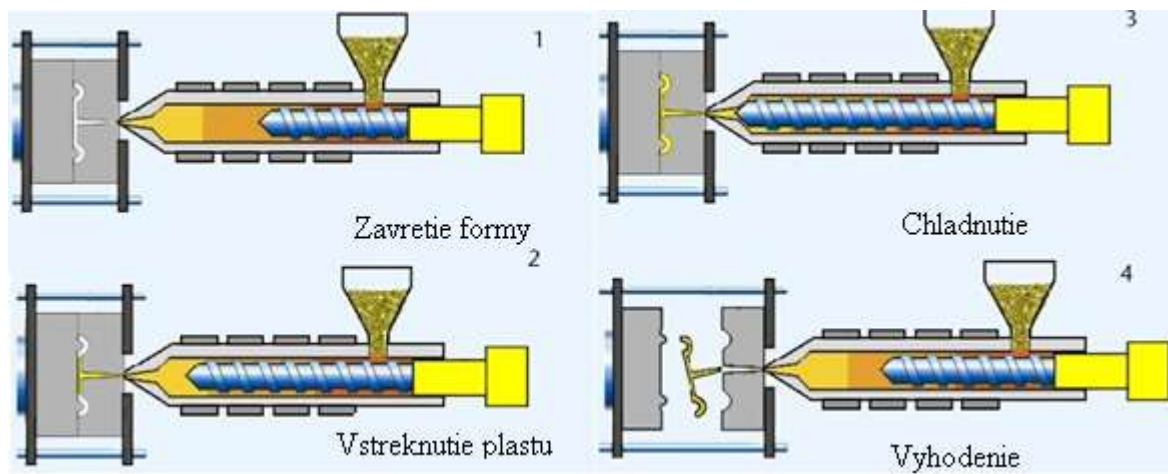
Ďalšou technológiou, používanou pre výrobu plastových dielov je technológia vstrekovania plastu do formy, ktorá je celosvetovo najpoužívanejšou technológiou pre výrobu plastových dielov. Táto konvenčná technológia používa kovovú formu a materiál dodávaný vo forme granúl, ktoré sú natavované a pod tlakom vstrekované do formy. Technológia umožňuje výrobu komplexných tvarov a veľmi rýchlu produkciu súčastí, častými tvarmi vyrábaných súčastí sú schránky, krabice a kryty a pod. s rebrovaním alebo bez. Rozmanitosť výrobkov vyrábaných vstrekaním do foriem je však veľmi široká. Schematicky znázorený stroj je na obr. 12 [9].

Pre výrobu je možné použiť väčšinu polymérov, vrátane všetkých termoplastov a je taktiež možné použiť aj niektoré reaktoplasty(termosety) a elastoméry. Celkovo je možné použiť veľmi širokú škálu materiálov, z ktorých je možné vybrať najvhodnejší pre danú aplikáciu. Pri výbere materiálu je potrebné brať ohľad ako na funkciu výrobku, tak aj na technologické vlastnosti materiálu pri procese vstrekovania. Fenolické a epoxidické živice sú typickým príkladom používaných reaktoplastov, zatiaľ čo nylon, polyetylén a polystyrén sú zastupiteľmi skupiny termoplastov.[10]



Obr. 12 Schematický popis častí vstrekovacieho zariadenia [9].

Dĺžka procesu je rádovo v sekundách až jednotkách minút. Proces pozostáva zo 4 krokov (viz. obr. 13):



Obr. 13 Schematicky znázornené 4 kroky vstrekovania plastov [25].

1. Zovretie formy

Jedna z foriem je pevne upevnená v stroji a druhá sa hydraulicky posúva po vodiacich tyčiach, pričom hydraulika zabezpečuje dostatočný tlak aby sa forma pri vstreknutí plastu neotvorila [9].

2. Vstreknutie plastu

Granulovaný plast je natavený a pod tlakom vstreknutý do formy, naakumulovaný tlak udrží materiál vo forme po dobu potrebnú na stuhnutie materiálu [9].

3. Chladnutie

Materiál začína tuhnúť okamžite ako príde do kontaktu so stenou formy, pričom začne znižovať svoj objem. Vznikúci tlak dotlačí ďalší materiál do formy a tým zníži sťahovanie výrobku. Čas potrebný na zatuhnutie sa dá vypočítať z termodynamických vlastností materiálu a najhrubšej steny výrobku [9].

4. Vyhodenie

Po uplynutí doby potrebnej na stuhnutie je forma otvorená a výrobok je vyhodený z formy. V dôsledku stiahnutia výrobku pri tuhnutí a jeho prilnutiu k forme je potrebné vynaložiť silu na jeho vyhodenie. Pre uľahčenie vyberania výrobku je možné na formu pred jej uzavretím naniest' nástrek, ktorý zníži príľnavosť výrobku na formu. Po vybratí výrobku sa forma opäť uzavrie a proces sa opakuje [9].

Faktory určujúce výslednú cenu výrobku sú predovšetkým materiál, cena prevádzky stroja a náklady na nástroje – formu. Stroje sa vo všeobecnosti delia podľa maximálneho záverného tlaku formy. Sila potrebná na roztvorenie formy sa vypočíta z tlaku vo forme a plochy výrobku. Navýšením roztváracie sily o určitý bezpečnostný koeficient získame uzatváraciu silu, ktorou kontrolujeme či je stroj pre daný výrobok dostatočne výkonný. V prípade

prekročenia maximálnej zvieracej sily stroja môže dôjsť k defektu – výronku plastu po obvode výrobku v deliacej rovine. Stroj pre vstrekovanie plastov je zpravidla veľkou investíciou a jeho prevádzka je taktiež nákladná, preto je vhodný hlavne pre výrobu veľkých sérií [9,11].

Formy pre vstrekovanie plastov musia odolávať vysokým tlakom a zároveň poskytovať presné rozmery výrobkov. Výroba takejto formy je zložitá a náročná ako finančne tak aj vedomostne. Pri malých výrobkoch sa používajú tzv. viacnásobné formy (viz obr. 14). V takýchto formách je na jeden cyklus vyrobených zpravidla 2-8 výrobkov. Ďalej sa formy delia podľa konštrukcie a spôsobu zaformovania a podľa smeru vstrekovania materiálu. Pre optimálne chladnutie výrobku bývajú formy opatrené vnútorným chladením s chladiacim médiom. Vyhadzovací mechanizmus formy umožňuje spustiť ďalší cyklus formy bez potreby ručného vyberania výrobku z dutiny formy. Najodolnejším bežne používaným materiálom pre výrobu formy je ocel triedy 19, ktorá je tepelne spracovaná až na 50-60 HRC. Takéto formy vydržia naväčšie výrobné série, zároveň je ich výroba veľmi nákladná. Ďalšími materiálmi používanými pre výrobu foriem sú hliník, nikel, zliatiny berýlia a medi [11,12,13].



Obr. 14 Príklad formy na 1 výrobok (hore) a dvojnásobnej formy (dole) [14].

Zaujímavou kombináciou dvoch zmienovaných technológií je výroba foriem pre vstrekovanie plastov pomocou 3D tlače. Formy sú vyrábané z plastových materiálov ako napríklad epoxid. Formy vyrobené touto technológiou vydržia rádovo desiatky až stovky cyklov, pri vstrekaní termosetov môže byť vďaka nižšiemu tlaku životnosť formy až v tisíckach cyklov. Aditívna výroba sa používa taktiež pre výrobu kovových vstrekovacích foriem, ktoré sa vyrábajú technológiou SLS (Selective laser sintering) z kovových práškov. Veľkou výhodou tejto technológie je možnosť výroby optimálnych chladiacich kanálov vo forme. Príklad formy vyrobenej touto technológiou je na obr. 15 [16].



Obr. 15 Jadro formy vyrobenej technológiou PolyJet z materiálu Digital ABS [15].

3 MODELOVANIE SÚČASTI V 3D CAD SYSTÉME

3.1 Použitý software

V dnešnej dobe je možné vyberať si z celej rady aplikácií, ktoré umožňujú pracovať v 3D prostredí. Medzi voľne dostupné programy patria napríklad Google SketchUp, FreeCad, 3DCrafter, 3DTin, Blender a podobne. Komerčné programy s platenými licenciami ponúkajú širšie možnosti a online podporu. Jeden z najznámejších a najpredávanejších programov vôbec je Inventor od firmy Autodesk. Ďalej sú to programy ako Solidworks, Rhino3D, Catia, 3DS Max [20].

3.2 Autodesk Inventor Professional 2015

Pre modelovanie zadanej súčasti bola použitá študentská verzia programu od americkej firmy Autodesk, Inventor Professional 2015. Táto je dostupná zadarmo na oficiálnych web stránkach firmy Autodesk pre študentov vysokých škôl. Inventor je parametrický software, ktorý umožňuje vývoj, dizajn, simuláciu a výkresovú dokumentáciu nielen strojárskych modelov. Umožňuje parametrické modelovanie objemových súčastí a taktiež plechov, analýzu fyzikálnych vlastností, freeform modelovanie, modelovanie potrubí, kabeláže, modelovanie nástrojov a foriem a ďalšie operácie. Parametrické modelovanie znamená, že zmenou jedného rozmeru sa upraví celý model a toto znamená rýchlu modifikáciu a tvorby rôznych verzií jedného výrobku za krátky čas. Základná cena programu sa pohybuje na úrovni 4700 USD, verzia Professional, ktorá umožňuje simulácie stojí podľa doplnkov okolo 8000 USD [19,21].

3.2.1 Postup modelovania

Rozmery výrobku boli odmerané pomocou uhlomeru a posuvného meradla. Prvky, ktoré držali zámok na svojom mieste boli nahradené tak aby zastúpili ich funkciu v tuhosti celej súčasti a odpovedali aj rozmerovo.

Súčasti sú modelované pomocou náčrtkov (sketch), od ktorých je ďalej odvodená geometria pomocou základných funkcií. Vymodelované súčasti môžu byť ďalej viazané do zostáv a taktiež je možné vytvoriť výkresovú dokumentáciu. Výkresy sú previazané s modelmi a zostavou čo znamená že pri zmene tvaru alebo rozmeru súčasti sa automaticky upraví aj daná kóta na výkrese, poprípade sa upraví kusovník, v ktorom sa automaticky dopočítava hmotnosť súčasti a podobne. Všetky použité príkazy sú zaznamenané v „strome“, kde ich môžeme upravovať, potlačiť, vymazať a podobne.

HLAVNÉ POUŽITÉ FUNKCIE:

- | | |
|------------------------------|--|
| Šablonovanie (Loft) | - z dvoch alebo viacerých náčrtov je vytvorený ich prechodový tvar s možnosťou pridania vodiacej krivky . |
| Zrkadlenie (Mirror) | - vytvorí zrkadlovú kópiu prvku (vytiahnutia, diery a pod.) podľa zvolenej roviny zrkadlenia. |
| Vytiahnutie (Extrude) | - podľa zadaného náčrtu vytvorí trojrozmerný objekt vytiahnutí obrysu po tretej ose, taktiež je touto funkciou možné materiál odobrať. |
| Rozdelenie (Split) | - rozdelí model na dve časti podľa zadanie deliacej roviny. |

Zaoblenie (Fillet)

- zaoblí hrany so zvoleným polomerom zaoblenia, taktiež je možné zvoliť druh zaoblenia (tangenciálne, G2).

Rebro (Rib)

- nástroj pre zjednodušenie vytvárania rebrovania, na výber je rebro kolmé k rovine nákresu alebo paralelné.

3.3 Konštrukcia a požadované vlastnosti

Prioritou pri modelovaní bolo zosilíť konštrukciu uložení, ktoré boli odtrhnuté. Taktiež treba brať do úvahy nižšiu pevnosť materiálu vytlačeného technológiou FDM vplyvom nedokonalého previazania jednotlivých vrstiev, preto bude väčšina prvkov na vnútornej strane mohutnejšia. Uloženie kluky v skrinke umožňuje pridávať materiál a taktiež ním nemusíme šetriť keďže sa jedná o kusovú výrobu a cena materiálu sa pohybuje rádovo v jednotkách korún za cm^3 . Navrhnuté boli tri konštrukčné riešenia zosílenia čapov. V prvom je zväčšený objem materiálu po celom obvode. V druhom bolo pridané rebro v smere pôvodného lomu. Tretie riešenie ráta s priechodnou dierou do ktorej bude umiestnená kovová trubička [22].

3.3.1 Prvá varianta

V prvej variante bol pridaný objem materiálu po celom obvode uloženia (viz. obr. 16). Vonkajší priemer z pôvodných 7 mm zväčšený na 10 mm. Taktiež je zosílený prechod medzi rukoväťou, kde bol pridaný materiál ako kompenzácia absencie zámku. Táto varianta váži približne o 10 g viac ako varianta druhá. Hmotnosť bola určená taktiež pomocou študentskej verzie programu Inventor Professional 2015.



Obr. 16 Prvá varianta konštrukcie.

3.3.1 Druhá varianta

V druhej variante bolo použité rebro s hrúbkou 4 mm a výškou 6 mm. Rebro je orientované v smere pôvodného lomu. Celková konštrukcia súčasti je odľahčená oproti prvej variante a viac kopíruje pôvodný dizajn súčasti. Druhá varianta je zobrazená na obr. 17.



Obr. 17 Druhá varianta konštrukcie.

3.3.3 Tretia varianta

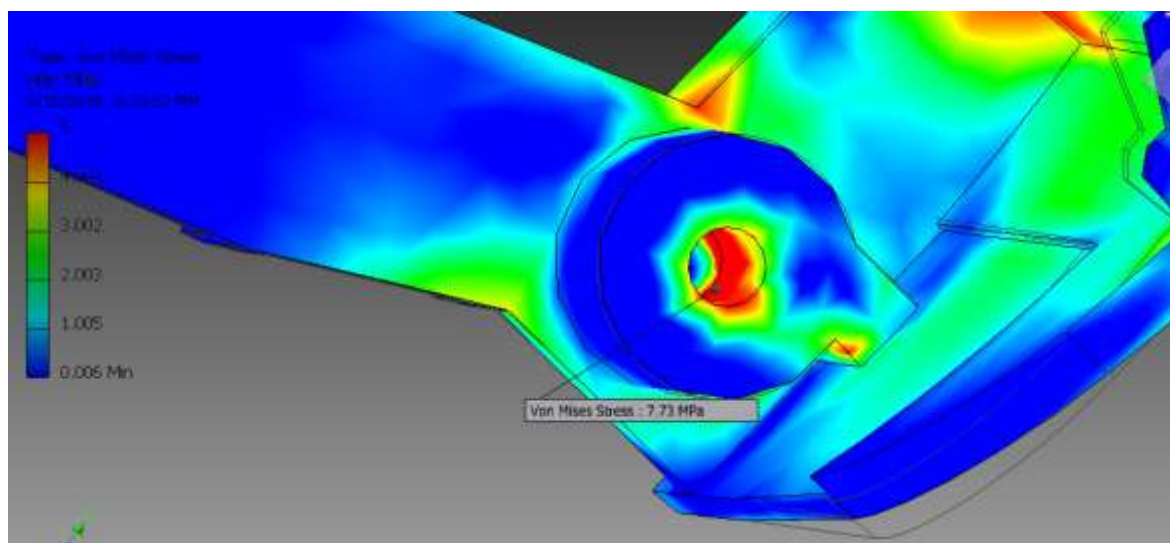
Tretia varianta zachováva pôvodný tvar a rozmery čapov a pre zosílenie konštrukcie bude použitá tenká kovová trubička vložená do priechodzej diery v čapoch (viz. obr. 18). Pre minimalizovanie vrubového efektu, ktorý vytvorí priechodzia diera je vyplnený priestor medzi čapmi doplna materiálom na rozdiel od prvej a druhej varianty kde je tento priestor prázdny.



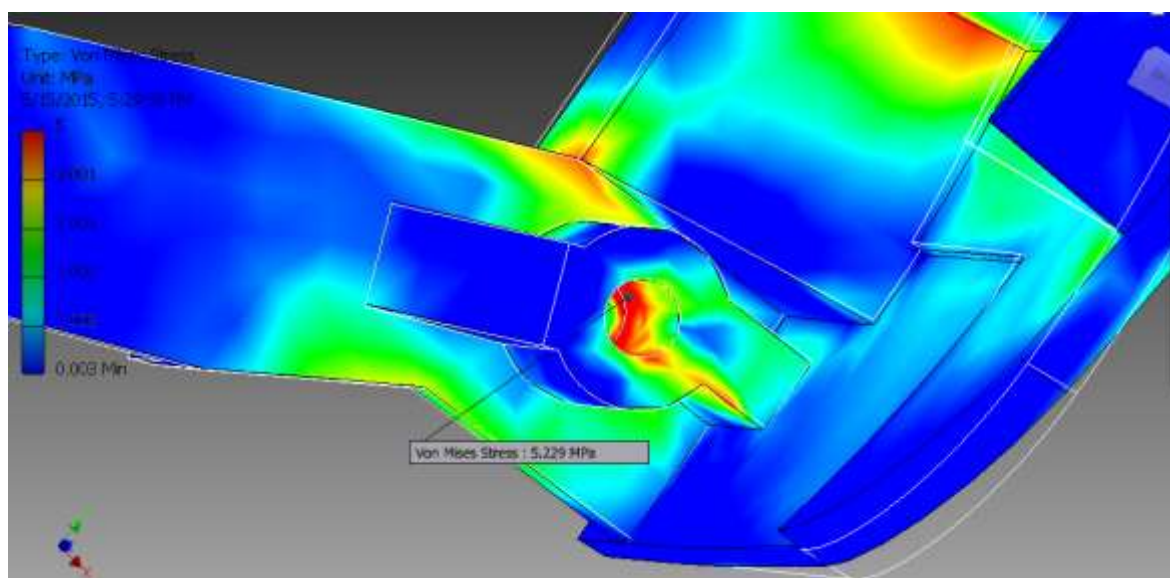
Obr. 18 Tretia varianta zobrazená v reze v reze a izometrickom pohľade.

3.4 Výber finálnej varianty

Z navrhnutých konštrukčných riešení bolo potrebné vybrať práve jedno, ktoré bude aj vyrobené ako prototyp. V študentskej verzii programu Autodesk Inventor Professional 2015 bola uskutočnená zjednodušená simulácia s rovnakými záťažovými parametrami aby bolo možné porovnať vzniknúce napätie na variantách 1 a 2 (viz obr. 19 a 20). Pre finálnu výrobu bola na základe zjednodušenej simulácie zvolená varianta s rebrom, ktorá vykazovala menšie namáhanie ako varianta so zväčšenými čapmi pri rovnakom zaťažení. Nakoľko sa táto práca zaoberá technológiou FDM, bola tretia varianta s kovovou trubičkou ponechaná iba ako teoretická možnosť a ďalej nebude uvažovaná.



Obr. 19 Výsledok simulácie 1.varianty.



Obr. 20 Výsledok simulácie 2.varianty.

4 TECHNOLOGIČNOSŤ VÝROBKU

Technologičnosť výrobku určujú vlastnosti technicko-ekonomického charakteru, ktoré majú zaistiť optimálne podmienky z hľadiska funkcie, životnosti a spoľahlivosti výrobku a jeho jednotlivých súčastí avšak musíš taktiež v plnej miere rešpektovať efektívnosť výroby. Technologičnosť je relatívna pretože sa vždy riadi konkrétnymi podmienkami výrobného procesu. Správna koštrukcia musí brať ohľad na koštrukčné, prevádzkové a technologické zásady [23].

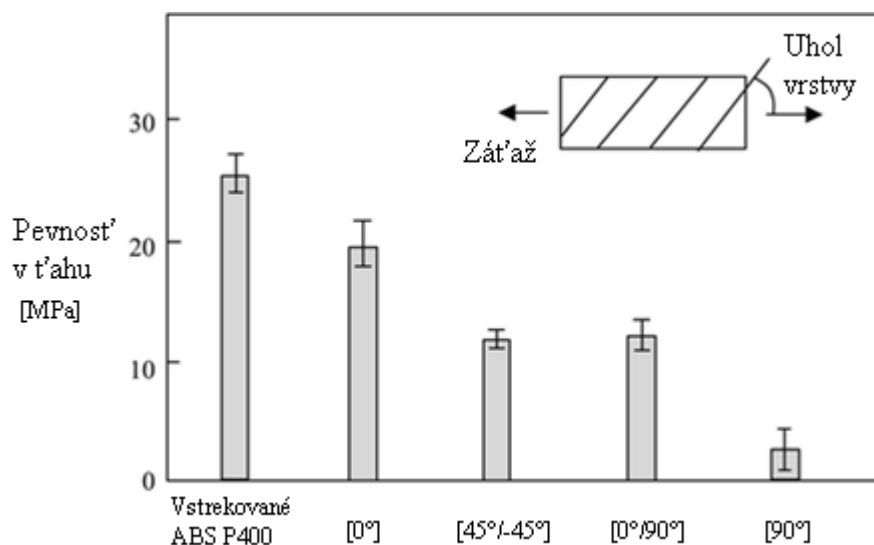
Technológia FDM umožňuje výrobu prakticky akéhokolvek tvaru avšak aj tu je nutné prihliadnuť na určité faktory ovplyvňujúce výrobný proces. Časti koštrukcie, ktoré sa odkláňajú od zvislého smeru pod príliš veľkým uhlom musia byť podporené podporným materiálom čo predlžuje čas výroby. Taktiež musí byť pridaný podporný materiál pre prvky modelu ktoré „visia vo vzduchu“.

4.1 Výber materiálu

Volba materiálu významne ovplyvňuje konečné vlastnosti výrobku, ako vlastnosti mechanické tak aj cenu výrobku. V tomto prípade bude použitý materiál ABS. Ide o všestranný, tvrdý a pevný termoplast, ktorý sa dá po vytlačení ľahko opracovať brúsením a taktiež nafarbiť nástrekom farby. Degradácia plastu vplyvom UV žiarenia nemá na zadanú súčasť vplyv nakoľko sa nachádza v interiéri automobilu.

4.2 Orientácia na základni

Jedným z významných faktorov 3D FDM technológie, na ktorý je potrebné brať ohľad je znížená pevnosť v osi Z, ktorá je spôsobená nedokonalým spojením jednotlivých vrstiev modelu (viz obr. 21). Pevnosť v tlaku je týmto ovplyvnená menej ako pevnosť v ťahu. V tomto prípade znížená pevnosť v osi Z znamená, že aby sme sa vyhli zníženej pevnosti na čapoch v smere lomu, budú musieť byť prototypy vytlačené vo vertikálnej polohe [24].



Obr. 21 Graf výsledkov testu pevnosti v ťahu pre rôzne orientácie vrstiev [24].

4.3 Technologické podpory pri výrobe

Materiál, ktorý sa odkláňa od zvislého smeru musí byť pri tlači podopretý dočasnou podporou aby sa zabránilo roztečeniu materiálu a defektom. Maximálny uhol odklonu od zvislej osy, ktorý môže byť vyrobený bez podpory je 45° . Materiál podpory je potrebné po vytlačení odstrániť. Odstránenie je možné mechanicky, odlomením, rezaním, brúsením a podobne alebo chemicky, odleptaním alebo rozpustením materiálu podpory v špeciálnom roztoku. V tomto prípade bude materiál podpory rovnaký ako materiál, z ktorého bude vytlačený samotný výrobok, preto sa podpory budú odstraňovať mechanickou cestou. Podpory, ktoré začínajú už na základni tlače sú odstrániteľné relatívne jednoducho. Komplikácie môžu nastať pri odstraňovaní podpory z uzavretých priestorov, ktoré majú tvar krabice a všeobecne z priestorov so zlým prístupom. Na tento fakt treba prihliadnuť pri konštrukcii modelu a konštruovať čo možno najmenej previsnutých prvkov. Tieto opatrenia vedú ku skráteniu výrobného času a taktiež ku zjednodušeniu odtráňania materiálu podpor pri dokončovacích operáciách.

Množstvo podpôr taktiež závisí od orientácie výrobku v pracovnom priestore FDM zaradenia. Ideálne je výrobok orientovať tak, aby ležal na svojej rovnej ploche, ktorá je dostatočne veľká na to, aby podopierala výrobok počas tlače. V tomto prípade takú plochu nemáme k dispozícii. Výrobok bude pre porovnanie vytlačený vo vodorovnej aj vertikálnej polohe. Pri vytlačení vo vodorovnej polohe dojde ku skráteniu výrobného času vďaka zníženiu množstva podpory, avšak tieto budú umiestnené na zahnutej vonkajšej ploche výrobku a tým výrazne spomalia dokončovanie a negatívne ovplyvnia výslednú kvalitu povrchu.

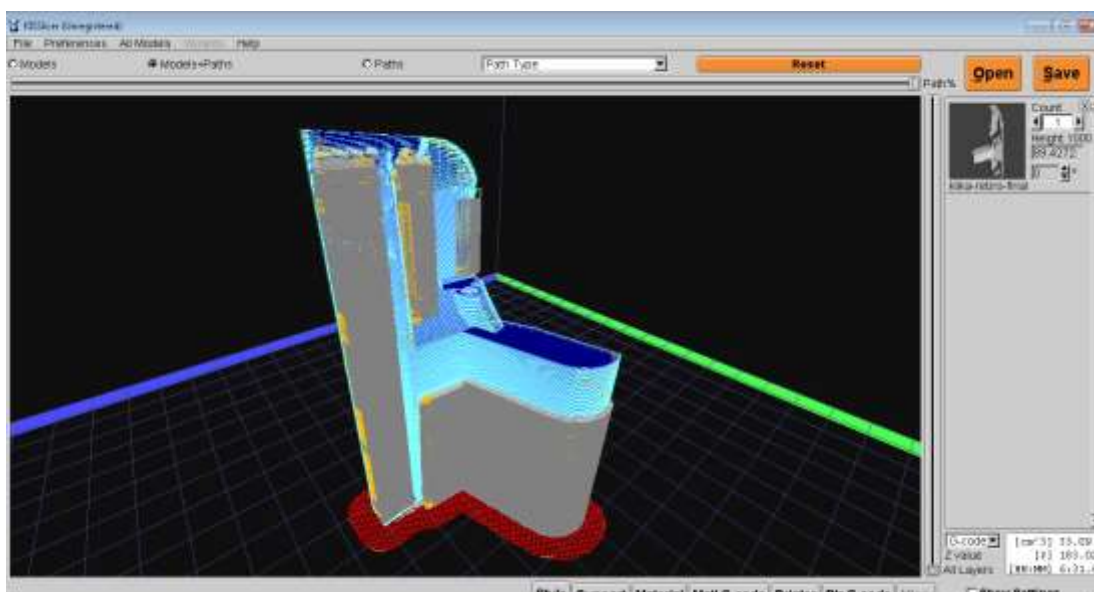
Pre minimalizovanie potreby podpor pri výrobe boli doplnené na model úkosy pod uhlom 45° pod previsnutými prvkami. Ďalej boli vyplnené duté časti modelu čo jednak viedlo ku zvýšeniu pevnosti výrobku a taktiež znížilo obtiažnosť pri odstraňovaní podporného materiálu.

5 VÝROBA SÚČASTI

Samotnú výrobu možno rozdeliť na 2 kľúčové časti. Prvou bolo vytlačenie súčasti, druhou dokončovacie operácie na odstránenie podporného materiálu, vyhladenie povrchu a nástrek čiernou farbou.

5.1 Tlač na 3D FDM zariadení

3D model bol vo formáte STL naimportovaný do programu KISSlicer (viz obr. 22), v ktorom boli nastavené parametre tlače ako hrúbka vrstvy, rýchlosť tlače, orientácie modelu na základni a taktiež množstvo technologických podpor. Následne bola súčasť vytlačená na RepRap zariadení Mendel Prusa. Hrúbka vrstvy bola pre všetky modely 0,25 mm.



Obr. 22 Uživatelské prostredie programu KISSlicer – zobrazenie modelu s podporami.

Na prvých dvoch vytlačených prototypoch sa vykytli výrazné defekty na zaoblení hrany a na jednom z úkosov, čo bolo z časti spôsobené malou hrúbkou steny a z časti taktiež nedostatočným množstvom materiálu podpory – obr. 23. Prejavila sa aj veľmi nízka pevnosť v osi Z, kedy sa už pri odstraňovaní podpory nalomil materiál na najtenšom prvku modelu. Tento prvok bol pre ďalšiu výrobu predmodelovaný na hrubší.



Obr. 23 Prvý vytlačený prototyp s viditeľnými defektami.



Obr. 24 Finálny model vytlačený vo vertikálnej aj vodorovnej polohe s podporami.

Finálna verzia bola pre porovnanie vytlačená vo vertikálnej aj horizontálnej polohe – obr. 24. V tomto prípade bola podpora nastavená na všetky prvky ktoré sa od zvislej osy odkláňajú pod uhlom väčším ako 30° . Toto nastavenie zamedzilo vzniku akýchkoľvek defektov až na malý kúsok zdeformovaného materiálu, ktorý je však na podpore a súčasť tým nebude ovplyvnená. Nevýhodou veľkého množstva podpory je predĺženie času tlače a času pri dokončovacích operáciách.

5.2 Dokončovacie operácie

Po vytlačení bolo potrebné odstrániť podpory a vyhladiť povrch. Podpory bolo možné odstrániť relatívne jednoducho, opatrne rukou poprípade kliešťami. Následne bol povrch vybrúsený brúsnym papierom niekoľkých drsností. Po vyhladení povrchu bol na súčasť nanesený čierny sprej – obr. 25. Dokončenie modelu bolo relatívne rýchle a nezabralo viac než 30 minút práce jedného človeka.



Obr. 25 Dokončený prototyp.

6 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOTENIE

6.1 Vlastnosti výrobku

Pri porovnaní výsledného výrobku s produkčným originálom je na prvý pohľad zjavné, že má horšiu kvalitu povrchu ako súčasť vyrobená vstrekom plastu do formy. Taktiež sa vyrobená súčasť odlišuje materiálom. Zatiaľ čo pôvodná bola vyrobená z materiálu ABS-PC, súčasť vyrobená na FDM tlačiarňi je z materiálu ABS. Prítomný je aj relatívne veľký výskyt defektov, čo je spôsobené zčasti nastavením podpor a hrúbky vrstvy ale taktiež polohou, v ktorej bol model vytlačený. Najmä nedokonalé spojenie vrstiev v okolí odlomených čapov značne znižuje mechanické vlastnosti. Tieto nedostatky je možné do určitej miery odstrániť nastavením parametrov tlače, čo by však prispelo ku zvýšenému času a teda nákladov na výrobu. Taktiež je možné určité prvky premodelovať a tým zjednodušiť dráhy, po ktorých sa pohybuje tryska tlačiarne. Toto riešenie je však nevhodné nakoľko potrebujeme zachovať funkčnosť a do ča možno najvyššej miery aj dizajn súčasti.

Vo všeobecnosti môžeme zhodnotiť technológiu FDM ako výbornú pre výrobu prototypov, nakoľko zmena akéhokolvek tvaru alebo rozmeru môže byť otázkou pár minút práce v 3D CAD systéme a nový protyp je následne vyrobený v priebehu desiatok minút až hodín. Na druhú stranu pre výrobu väčších sérií sa ako z hľadiska časového tak aj z hľadiska mechanického stále javí technológia vstrekovania plastu do kovovej formy ako lepšie riešenie.

Pre porovnanie bol vytlačený prototyp toho istého modelu aj v horizontálnej polohe. Model vyrobený v tejto polohe má síce na pohľad omnoho lepšiu kvalitu v okolí čapov, avšak defekt podobného charakteru sa objavil na inom tenkom prvku. Orientácia vrstiev spôsobuje najnižšiu pevnosť práve v smere namáhania a povrchová úprava tohto modelu je náročnejšia, pretože je opatrený podporami na celej spodnej ploche, ktorá je zaoblená a je potrebné ich odbrúsiť ručne do požadovaného tvaru.

6.2 Ekonomické zhodnotenie

Cena súčasti vyrobenej na FDM tlačiarňi sa odvíja najmä od množstva a druhu použitého materiálu a taktiež od času potrebného pre jej vytlačenie. Ďalšia položka, ktorá nie je zanedbateľná sú náklady na dokončovacie operácie. Toto zahŕňa najmä úpravu povrchu a odstránenie podporného materiálu a na záver podľa požiadavky farbenie súčasti.

Náklady na materiál môžeme rozdeliť na materiál samotnej súčasti a materiál podpory. Materiál podpory je taktiež ABS a po vytlačení bude odstránený a zahodený. Pre úsporu nákladov sú podpory vždy tlačené s menším vyplnením ako samotná súčasť.

Cena materiálu

$$N_{Mc} = n_m \cdot V \quad (1)$$

Kde:

N_{Mc}	Celkové náklady na materiál	[Kč]
n_m	Cena za 1 cm ³ materiálu	[Kč]
V	Objem vytlačeného modelu s podporami	[Kč]

Cena dokončenia

Náklady na post-processing zahŕňajú náklady na brúsny papier a nástrek farbou. Ako nástrek bol použitý čierny sprej. Pri stanovení týchto nákladov budeme uvažovať iba pomernú čiastku z ceny spreju a brúsneho papiera nakoľko obe tieto položky stačia na dokončenie omnoho viac než len jednej súčasti.

$$N_{PC} = N_F + N_P \quad (2)$$

Kde:

N_{PC}	Celkové náklady na post-processing	[Kč]
N_F	Cena farby	[Kč]
N_P	Cena brúsneho papiera	[Kč]

$$N_{PC} = 10 + 5 = 15 \text{ Kč}$$

Prevádzka stroja

Náklady na prevádzku stroja sú 25 Kč/hod. Údaj o čase potrebnom na vytlačenie danej súčasti nám poskytol program KISSlicer.

$$N_S = T \cdot n_s \quad (3)$$

Kde:

N_S	Náklady na prevádzku stroja	[Kč]
n_s	Cena prevádzky za hodinu	[Kč]
T	Čas výroby modelu	[hod]

Vertikálne vytlačený model

$$N_{Mc1} = 0,60.33 = 19,8 \text{ Kč}$$

$$N_{S1} = 3,28 \cdot 25 = 82 \text{ Kč}$$

Horizontálne vytlačený model

$$N_{Mc2} = 0,60.21 = 12,6 \text{ Kč}$$

$$N_{S2} = 1,83 \cdot 25 = 45,75 \text{ Kč}$$

Tab 1. Porovnanie nákladov pre vertikálnu a horizontálnu verziu tlače.

MODEL	Vertikálny	Horizontálny
CENA MATERIÁLU	20 Kč	13 Kč
POST-PROCESSING	15 Kč	15 Kč
PREVÁDZKA STROJA	82 Kč	46 Kč
CELKOVÉ NÁKLADY	117 Kč	74 Kč

Celkové náklady na obe varianty sú pre porovnanie vynesené v tabulke 1. Do výrobných nákladov neboli započítané náklady na mzdu obsluhy a mzdu pre pracovníka vykonávajúceho dokončovacie operácie.

5.2.1 Porovnanie s dielom dostupným na trhu

Kluku, ktorá je predmetom tejto práce je možné samostatne zakúpiť iba z vrakoviska a inzerátov, ktoré rozpredávajú autá na diely. Jej cena sa pohybuje okolo 10 €, čo je približne 270 Kč. Alternatívou je zakúpenie originálneho dielu celých dverí skrinky, ktoré sa dajú zakúpiť za 2700 Kč.

ZÁVER

Táto bakalárska práca sa zaoberá návrhom a výrobou prototypu súčasti na 3D FDM tlačiarni. Vyrábaná súčasť je zlomená kľučka autointeriéru, ktorá podľahla únavovému lomu.

V prvej časti práce je popísaná funkcia vyrábanej súčasti, spôsob jej uloženia a poškodenia. Nasleduje rozbor možných variánt pre výrobu zadaného prototypu.

Praktickú časť tvorí vymodelovanie niekoľkých konštrukčných variánt súčasti v študentskej verzii programu Autodesk Inventor Profesional 2015 a ich následná simulácia, na základe ktorej bola vybratá jedna varianta. Táto varianta bola upravená podľa technologických požiadavkov a vytlačená na RepRap tlačiarni v celkovom počte 4 ks. Následne bola dokončená obrúsením a nástrekom farby.

Technicko-ekonomické zhodnotenie ukázalo, že napriek nižším mechanickým a estetickým vlastnostiam sa podarilo vyrobiť súčasť s úsporou 57 % z ceny dielu zakúpiteľného na šrotovisku alebo cez inzerciu. Pokiaľ by sme brali do úvahy kúpu celej zostavy dverí s kľučkou od originálneho výrobcu, úspora by činila až 95 %.

Pre budúcu výrobu by určite bolo vhodné ďalej upraviť dizajn súčasti a taktiež možné implementovať uloženie zámku. V prípade výroby väčšej série je určite vhodné uvažovať o inej technológii ako je napríklad vstrekovanie do foriem.

Technológia FDM sa v dnešnej dobe javí ako veľmi perspektívna hlavne pre kusovú a prototypovú výrobu. Aj tu je však potrebné brať ohľad na technologické požiadavky pri modelovaní súčasti aby bol minimalizovaný vznik defektov a optimalizovaný ako čas výroby, tak aj čas dokončovacích operácií a tým minimalizované náklady na výrobu.

ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

1. FDM: Technical specifications. 2015. *Materialise* [online]. [cit. 2015-05-15]. Dostupné z: <http://manufacturing.materialise.com/fdm-technical-specifications-0>
2. Highlights of Fused Deposition Modeling. *Efunda* [online]. [cit. 2015-05-15]. Dostupné z: http://www.efunda.com/processes/rapid_prototyping/fdm.cfm
3. Introduction. *Efunda* [online]. [cit. 2015-05-15]. Dostupné z: http://www.efunda.com/processes/rapid_prototyping/intro.cfm
4. Fused Deposition Modeling (FDM). *CUSTOMPART.NET* [online]. [cit. 2015-05-15]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>
5. 3D Printing With ABSplus. *Stratasys* [online]. [cit. 2015-05-15]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/materials/fdm/absplus#content-slider-16>.
6. FDM: Materials & datasheets. *Materialise* [online]. [cit. 2015-05-15]. Dostupné z: <http://manufacturing.materialise.com/fdm-materials-datasheets-0>
7. Thermoplastics. 2014. In: *Stratasys* [online]. [cit. 2015-04-12]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/~media/Main/Secure/White%20Papers/Rebranded/SSYS-WP-Thermoplastics-03-13.pdf>
8. What are the pros and cons of Polyjet and FDM 3D printing? *PartSnap* [online]. [cit. 2015-05-15]. Dostupné z: <http://www.partsnap.com/partsnap-faq/what-are-the-pros-and-cons-of-polyjet-and-fdm-3d-printing/9>.
9. Injection Molding. 2009. *CUSTOMPART.NET* [online]. [cit. 2015-05-15]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/InjectionMolding>
10. Basics of Injection Molding Design. 2013. *3DSYSTEMS* [online]. [cit. 2015-05-15]. Dostupné z: <http://www.3dsystems.com/quickparts/learning-center/injection-molding-basics#polymers>
11. LENFELD, Petr. 2005. *Technologie II: Vstřikování plastů*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci. ISBN 978-807-3720-377. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/uvod.htm
12. Custom Plastic Injection Molding. *Stratasys* [online]. [cit. 2015-05-15]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/solutions/additive-manufacturing/injection-molding>
13. DSW Plastic&Mould. *Mold & Die Knowledge* [online]. [cit. 2015-05-15]. Dostupné z: <http://www.dswmould.com/injection-mold-die-tooling.html>
14. *Custom Mold Tooling and Repairs* [online]. 2013. [cit. 2015-05-15]. Dostupné z: <http://www.crosstech.us/moldMachine.htm>
15. Custom Plastic Injection Molding. 2015. *Stratasys* [online]. [cit. 2015-05-15]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/solutions-applications/digital-manufacturing/injection-molding>
16. SACHS, Emanuel, Edward WYLONIS, Samuel ALLEN, Michael CIMA a Honglin GUO. 2000. Production of injection molding tooling with conformal cooling channels using the three dimensional printing process. *Polymer Engineering*. **40**(5): 1232-1247. DOI: 10.1002/pen.11251. ISSN 0032-3888. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/pen.11251>
17. ROSOCHOWSKI, A a MATUSZAK. 2000. Rapid tooling: the state of the art. *Journal of Materials Processing Technology*. **106**(1-3): 191-198. DOI: 10.1016/S0924-0136(00)00613-0. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013600006130>
18. The Difference Between Machined and 3D Printed Metal Injection Molds. 2014. FRICK, Lindsey. *Machine Design* [online]. [cit. 2015-05-15]. Dostupné z: <http://machinedesign.com/3d-printing/difference-between-machined-and-3d-printed-metal-injection-molds>
19. Inventor: Overview. 2015. *Autodesk* [online]. [cit. 2015-05-15]. Dostupné z: <http://www.autodesk.com/products/inventor/overview>

20. List of 3D Software. 2015. *3ders.org* [online]. [cit. 2015-05-15]. Dostupné z: <http://www.3ders.org/3d-software/3d-software-list.html>
21. Inventor Features. 2015. *Autodesk* [online]. [cit. 2015-05-15]. Dostupné z: <http://www.autodesk.com/products/inventor/features/all/gallery-view>
22. *FUTUR3D* [online]. [cit. 2015-05-15]. Dostupné z: <http://eshop.futur3d.net/en/>
23. ZEMČÍK, Oskar. TECHNOLOGICKÉ PROCESY: část obrábění. *Vysoké učení technické v Brně* [online]. Brno, 2007 [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TechnProcesy.pdf>
24. AHN, Sung-Hoon, Michael MONTERO, Dan ODELL, Shad ROUNDY a Paul K. WRIGHT. 2002. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid Prototyping Journal*.**8**(4): 248-257. DOI: 10.1108/13552540210441166. ISSN 1355-2546. Dostupné z: <http://www.emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/13552540210441166>
25. XIE, Lei, Longjiang SHEN a Bingyan JIANG. 2011. Modelling and Simulation for Micro Injection Molding Process. *Computational Fluid Dynamics Technologies and Applications*. InTech. DOI: 10.5772/16283. ISBN 978-953-307-169-5. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/computational-fluid-dynamics-technologies-and-applications/modelling-and-simulation-for-micro-injection-molding-process>
26. 3D Printing With ULTEM 1010. 2015. *Stratasys* [online]. [cit. 2015-05-15]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/materials/fdm/ultem-1010>
27. Plastics for Injection Molding: Plastic properties. *Xcentric Mold & Engineering* [online]. [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://www.xcentricmold.com/plastics.php>
28. ABS-ESD7. *Stratasys* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/materials/fdm/abs-esd7>
29. PC-ABS FDM Thermoplastic material. *Stratasys* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/materials/fdm/pc-abs>
30. PC FDM Thermoplastic material. *Stratasys* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/materials/fdm/pc>
31. NYLON 12 FDM Thermoplastic material. *Stratasys* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/materials/fdm/nylon>
32. ABS M30i FDM Thermoplastic material. *Stratasys* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/materials/fdm/abs-m30i>
33. ULTEM 9085 FDM Thermoplastic material. *Stratasys* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/materials/fdm/ultem-9085>
34. ABSplus. *MatWeb* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://www.matweb.com/search/datasheettext.aspx?matguid=14193b776a7b4c1ca6d4ecf86497204b>

ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

Skratka	Jednotka	Popis
ABS		Akrylonitrilbutadiénstyrén
CAD		Computer aided design
FDM		Fused deposition modeling
SLS		Selective laser sintering
UV		Ultraviolet

Symbol	Jednotka	Popis
N_F	[Kč]	Cena farby
N_{Mc}	[Kč]	Celkové náklady na materiál
N_P	[Kč]	Cena brúsneho papiera
N_{PC}	[Kč]	Celkové náklady na post-processing
N_S	[Kč]	Náklady na prevádzku stroja
T	[h]	Čas potrebný na vytlačenie modelu
V	[cm ³]	Objem vytlačeného modelu s podporami
n_s	[Kč/hod]	Cena prevádzky stroja za hodinu
n_m	[Kč/cm ³]	Cena za 1 cm ³ materiálu

