



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**NÁVRH A VÝROBA DÍLŮ PODVOZKU MODELU  
AUTOMOBILU S VYUŽITÍM 3D FDM TISKU**

DESIGN AND PRODUCTION OF CAR MODEL CHASSIS PARTS USING FDM 3D PRINTING

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Petra Výbohová**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.**

**BRNO 2019**

## Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Studentka: **Petra Výbohová**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.**  
Akademický rok: 2018/19

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:

### **Návrh a výroba dílů podvozku modelu automobilu s využitím 3D FDM tisku**

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Autor v první části provede rešerši zvolené problematiky. Následně navrhne funkční díly podvozku modelu automobilu a vyrobí je. Součástí bude jak konstrukční návrh tak volba vhodného materiálu a posouzení výsledných funkčních vlastností modelu.

#### **Cíle bakalářské práce:**

- rešerše zvolené problematiky
- konstrukce dílů modelu
- volba materiálu a posouzení technologičnosti konstrukce
- výroba funkčních vzorků
- technicko-ekonomické posouzení

#### **Seznam doporučené literatury:**

BUDMEN, Isaac a Anthony ROTOLO. The book on 3D printing. 1. Lexington, KY: CreateSpace, 2013. ISBN 9781489529442.

FOŘT, Petr a Jaroslav KLETEČKA. Autodesk Inventor. Brno: Computer Press, 2007. 296 s. ISBN 978-80-251-1773-6.

LAWRENCE, Kent L. ANSYS workbench tutorial: structural. Mission: SDC Publications, 2012. 1 sv. (různé stránkování). Tickoo-CADCIM series. ISBN 978-1-58503-754-4.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19.

V Brně, dne 12. 10. 2018

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Objektom skúmania mojej bakalárskej práce je Fused Deposition Modeling metóda 3D tlače. Cieľom záverečnej práce bolo navrhnuť a vyrobiť diely podvozku modelu auta na diaľkové ovládanie. Práca je rozdelená do 5 kapitol. Obsahuje 42 obrázkov, 4 tabuľky a 10 príloh. Prvá časť práce je venovaná teoretickej rešerši FDM tlače a tlačiarne. Druhá obsahuje realizáciu vybranej aplikácie a jej technologicko – ekonomické zhodnotenie.

### **Kľúčové slova**

3D tlač, FDM, ABS, model

## **ABSTRACT**

The object of reserach of my bachelor thesis is Fused Deposition Modeling 3D printing method. The aim of the final thesis was to design and manufacture parts of the car model chassis with remote control. The work is divided into 5 chapters. It contains 42 pictures, 4 tables and 10 attachments. The first part is dedicated to theoretical research of FDM 3D printing and FDM 3D printer. The second includes the realization of the chosen application and its technological – economic evaluation.

### **Key words**

3D print, FDM, ABS, model

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA**

VÝBOHOVÁ, Petra. *Návrh a výroba dílů podvozku modelu automobilu s využitím 3D FDM tisku*. Brno, 2019. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 49s. 10 příloh. Vedoucí bakalářské práce Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

## **PREHLÁSENIE**

Prehlasujem, že som bakalársku prácu na tému **Návrh a výroba dílů podvozku modelu automobilu s využitím 3D FDM tisku** vypracovala samostatne s použitím odbornej literatúry a prameňov uvedených na zozname, ktorý tvorí prílohu tejto práce.

---

Datum

---

Petra Výbohová

## **POĎAKOVANIE**

Týmto chcem poďakovať môjmu vedúcemu práce, Ing. Oskarovi Zemčíkovi Ph.D., za jeho konštruktívnu spätnú väzbu počas tvorby práce, cenný strávený čas pri optimalizácii technologicnosti. Ďalej ďakujem svojim rodičom za podporu počas štúdia.

**OBSAH**

ABSTRAKT .....	3
PREHLÁSENIE.....	5
POĎAKOVANIE .....	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	9
<b>1. REŠERŠ ZVOLENEJ PROBLEMATIKY .....</b>	<b>10</b>
1.1 Princíp metody FDM .....	10
1.1.1 Faktory vplývajúce na 3D tlač .....	11
1.1.2 Priľnavosť vrstiev .....	13
1.1.3 Stavba podpory .....	14
1.1.4 Dokončovacie operácie.....	14
1.1.5 Odporúčania nastavení pri tlači .....	15
1.2 Konštrukcia 3D FDM tlačiarne.....	16
1.2.1 Projekt RepRap .....	16
1.2.2 Komponenty 3D tlačiarne .....	16
1.3 Výhody a nevýhody FDM metody .....	19
1.4 Materiály používané FDM metódou.....	20
1.4.1 Management vlastností súčasti .....	22
1.5 Ďalší vývoj technológie FDM.....	22
1.5.1 Continuous Filament Fabrication.....	22
1.5.2 Voxel 8DK.....	23
1.5.3 Fast FFF .....	24
1.6 Výroba modelov automobilov .....	25
1.6.1 Injekčné vstrekovanie plastov.....	25
1.6.2 Pretlačovanie plastov – extrúzia .....	26
<b>2. KONŠTRUKCIA DIELOV MODELU .....</b>	<b>27</b>
2.1 Popis dielov.....	27
2.2 Návrhový proces .....	28
<b>3.VOĽBA MATERIÁLU A POSÚDENIE TECHNOLOGIČNOSTI</b>	
<b>KONŠTRUKCIE .....</b>	<b>31</b>
3.1 Voľba materiálu .....	31
3.2 Technologičnosť .....	32
<b>4.VÝROBA FUNKČNÝCH DIELOV .....</b>	<b>35</b>
<b>5.TECHNICKO-EKONOMICKÉ POSÚDENIE .....</b>	<b>38</b>
5.1 Technické posúdenie.....	38



ZÁVER .....	41
ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV .....	42
ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	48
ZOZNAM PRÍLOH.....	49

## ÚVOD

Technológia 3D tlače prešla v posledných desaťročiach rozsiahlym vývojom. Dnes neustále napreduje do nových aplikačných možností, zlepšuje sa na presnosti, využití väčšej škály materiálov. 3D tlač dnes prenikla do širokého množstva odvetví: priemyslu, medicíny, vzdelávania až po výskum v spomenutých oblastiach. Architekti, dizajnéri, umelci, lekári, technici, menšie podniky so sériovou výrobou až po hromadnú výrobu využívajú 3D tlač v profesnej praxi, a to hlavne v oblasti vývoja nových produktov.

V oblasti strojového inžinierstva je 3D tlač využívaná v návrhovom procese, a to tvorbe prototypov. Dokážeme tak v krátkom čase vymodelovať a zhotoviť vybranú súčasť za nízku nákladnú cenu bez limitácii dostupnosti nástroja ako pri konvenčnej produkcii. Komerčná sféra 3D tlačiarňí, kde zásadne dominuje metóda FDM, si získala širokú komunitu aj vďaka projektu RepRap. V projekte nadšenci 3D tlače združujú a svoje výrobky a diely do RepRap tlačiarní zdieľajú ich a neustále vylepšujú. Zásadne tak klesla obstarávacia cena 3D tlačiarne a záujem o technológiu rastie. V rámci VUT sa 3D tlač využíva v oblastiach vývoja aj v NETME centre, kde tím aditívne technológie pracuje na optickej digitalizácii, ale aj rapid phototyping (ďalej „RP“) tj. tvorby funkčných prototypov pre oblasti leteckého priemyslu alebo protetiky z polymérnych aj kovových materiálov.

Cieľom práce je zhotoviť vybranú aplikáciu, čo je v našom prípade model podvozku, pomocou FDM metódy 3D tlače. Osobne nás zaujalo toto praktické téma bakalárskej práce a možnosť si vybrať špecifickú aplikáciu podľa vlastného záujmu. V záverečnej práci sme spojili hobby z detstva – auto na diaľkové ovládanie a použila som ho ako priamu aplikáciu FDM tlače. Pre našu bakalársku prácu sme zvolili model jeepu od firmy XX s celkovými rozmermi z dôvodu optimálnej veľkosti vzhľadom na maximálny objem 3D tlačiarne. Auto je ovládané diaľkovo pomocou pohonu motora na 3x AA (1,5 V) batérie. Zaoberáme sa výrobou jednotlivých dielov, kde je uložené ovládanie a spojená náprava jeepu. Navrhnuté diely boli technologicky upravené, zhotovené na FDM tlačiarňi a na záver posúdené z technologicko – ekonomického hľadiska.

## 1. REŠERŠ ZVOLENÉ PROBLEMATIKY

### 1.1 Princíp metódy FDM

FDM metóda, z anglického názvu „Fused Deposition Modeling“ voľne preložené ako fúzne depozičné modelovanie je technológia 3D tlače, ktorá patrí medzi nekonvenčné metódy obrábania. Je registrovanou značkou firmy Stratasys so začiatkom vývoja v rokoch 1988-1991 [1]. V dnešnej dobe sa touto metódou zhotovujú diely so širokým spektrom aplikačných oblastí: od technologicky upravených súčastí leteckého priemyslu, cez aplikácie vo farmaceutickom priemysle vid' Obr. 1.1 až bunkové aplikácie do priečného prierezu do 100  $\mu\text{m}$  [3]. Zriedkavejšie sa FDM metóda uplatní v medicínskych chirurgických aplikáciách, z dôvodu nízkej teploty počas 3D tlače, ktorá je potrebná v sterilnom medicínskom prostredí [4].



Obr. 1.1 Aplikácia 3D tisku vo výrobe modelovej zbrane a helmy [1].

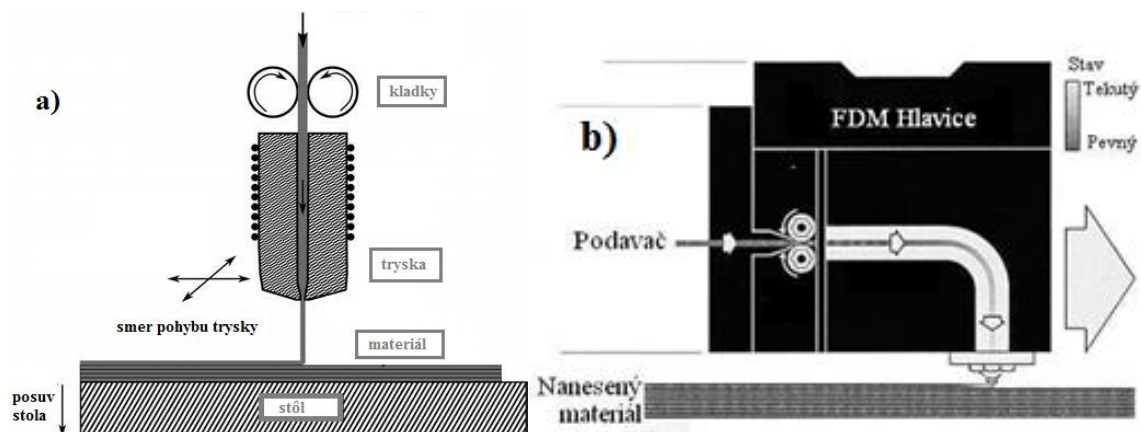
Princíp metódy je kategorizovaný už samotným anglickým názvom metódy „Fused Deposition Modeling“. Všeobecne sa technológia definuje ako Fused Filament Fabrication (FFF). Názov FDM je ochrannou značkou v komerčných firmách, zaoberajúcich sa 3D tlačou. [5].

Zásoba materiálu je zo zásobnej cievky vedená systémom kladiek do tavnej trysky. Metóda využíva extrúziu (tavbu) materiálu z termoplastu. Zásobník taví materiál pri teplotách priemerne 210 – 250  $^{\circ}\text{C}$  [6]. Pre ABS plasty je teplota okolo 80  $^{\circ}\text{C}$  [9]. Táto teplota musí byť nad teplotou tavenia o 0,5 – 1 $^{\circ}\text{C}$ , z dôvodu zaistenia plynulého chodu materiálu. Zo zásobníka dopadá roztavený filament na presne definované miesto<sup>1</sup> na povrchu stola. Roztavený materiál tuhne po nanosení na povrch stola alebo na predchádzajúcu vrstvu za približne 0,1s po nanosení tryskou na povrch [11]. Tvorba vrstiev prebieha v rovine XY. Po dokončení každej vrstvy modelu tryskou sa stôl posunie nadol v zápornom smere osy Z.

Hrúbka jednej vrstvy materiálu sa odlišuje podľa typu tlačiarne a priemeru trysky. Dosahuje parametre od najužších 0,15 cez typické rozmery v okolí 0,3 – 0,4 mm [7]. Jednotlivé vrstvy môžu byť od seba vzdialené s rozstupom medzi vrstvami na vzdialenosť 0,1 mm podľa typu tlačiarne a aplikácie [10]. Doterajší princíp metódy vysvetľoval nanášanie tryskou, ktorá je celým prierezom kolmá na povrch.

<sup>1</sup> ktoré je určené vygenerovaným G-kódom tlačenej súčasti,

Druhým variantom ako nanášať roztavený materiál je technológia nazývaná „Ballistic Particle Manufacturing“ voľne preložené výroba „produkcia balistickou časticou“ znázornená na Obr. 1.2. spolu s bežnejšie používanou metódou. Stavba súčasti je realizovaná nanášaním kvapiek vosku na povrch stola.



Obr. 1.2: Princíp aditívnej technológie obrábania a) všeobecne [5], b) Ballistic Particle Manufacturing metóda [12].

Počas 3D tlače okrem hotového výrobku vzniká v jeho bezprostrednom okolí podporná štruktúra, ktorá je odstraňovaná v dokončovacích operáciách [7]. Objem maximálneho výtlačku sa líši s použitím „kancelárskej“ alebo priemyselnej tlačiarne, ale aj s výberom materiálu pre tlač. Medzi tlačiarne pre malé aplikácie využívajúce metódu FDM<sup>2</sup> patrí The Makerbot Replicator Mini+ od firmy Markerbot s maximálnym objemom pre tlač 101×126×126 mm. Na druhej strane profesionálna tlačiareň typu delta Deltazilla výrobkom firmy Zilla3D company dosahuje maximálny objem pre FDM tlač až 750 × 750 × 1168 mm [42]. V prípade zhotovovania nadrozmerných dielov väčších ako maximálne rozmery tlačiarne sa celky rozdelia na niekoľko menších súčastí a po tlači nastáva lepenie do výsledných rozmerov [13].

### 1.1.1 Faktory vplývajúce na 3D tlač

Veľkým vplyvom pri používaní technológii FDM tlače je samotná stratégia smeru nanášania materiálu v rámci vrstiev. Základnými možnosťami stratégie, ktorými popisujeme smer nanášania sú raster a offset. Offset nanáša materiál kopírovaním súčasti podľa hrany obrysu. Naopak raster neberie do úvahy tvar súčasti a nanáša materiál v jednom smere [12]. Pri samotnej 3D tlači pri orientácii súčasti berieme do úvahy [14]:

- čas výroby – súčasti orientované v rámci roviny XY majú kratší čas výroby,
- využitie podpor – čas výroby rastie dvojnásobne s použitím podporného materiálu,
- kvalita povrchu – súčasti v ose Z majú vyššiu kvalitu povrchu oproti smeru XY, kde priamo na kvalitu povrchu vplýva nanášanie vrstiev,

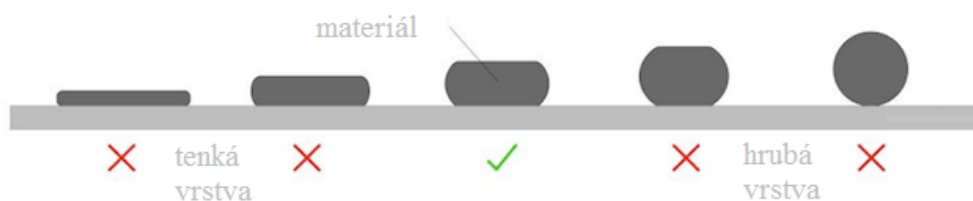
<sup>2</sup> tlačiarne, ktoré využívajú iné metódy RP ako FDM dosahujú aj menšie maximálne objemy ako napríklad tlačiareň PLUTO od firmy 3Devised využívajúca Stereolitografiu (SLA) s maximálnym objemom 85.4 x 48 x 130 mm [42].

- pevnosť súčasti – súčasť nebude dostatočne pevná pri orientácii vrstiev v smere orientácie ťahovej skúšky (viď. Obr.1.6),
- teplota podložky – zásadný vplyv na kvalitu tlače má teplota tlačovej dosky. Na trhu existujú tzv. „heated built platform (HBP), ktoré pre špecifické materiály udržujú konštantnú teplotu dosky.

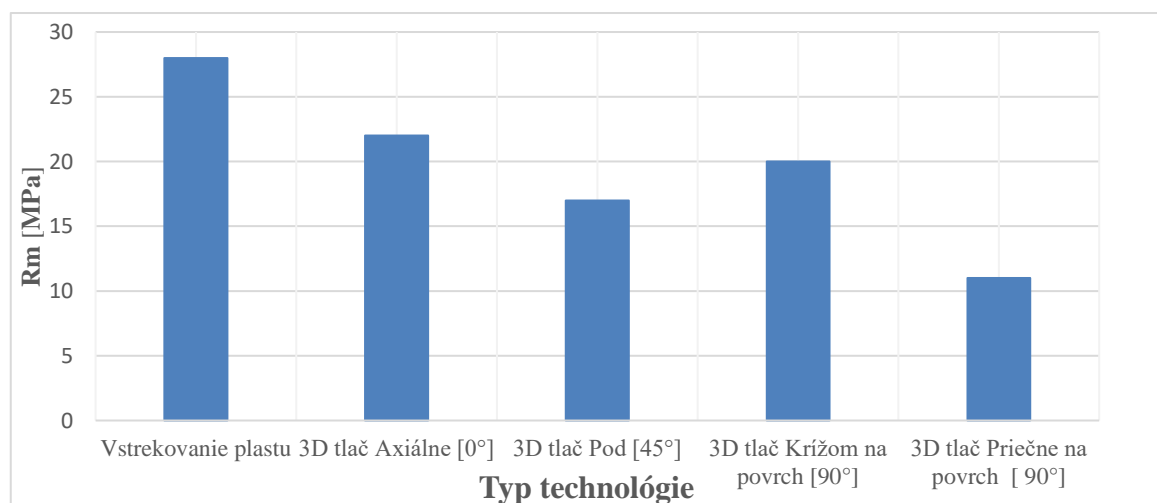
Ďalšou možnosťou ako zlepšiť podmienky tlače využitie produktov firmy Stratasys a teda použitie vyhrievanej komory tzv. „High temperature modeling apparatus“. Tento patent obmedzuje všetky derivácie projektu RepRap (kap. 1.2.1), aby modifikovali svoje tlačiarne s použitím vyhrievanej komory patentovanej od 2004-4-20 do dátumu 2021-02.27 [43].

Výsledné mechanické vlastnosti sú závislé na orientácií vlákien pri tvorbe súčasti. Sledovaným parametrom bude vzdialenosť medzi jednotlivými „vláknami“ v rámci jednej vrstvy znázornené na Obr 1.8. Hodnoty pevnosti materiálu rastú, ale zhoršuje sa kvalita povrchu a predlžuje sa čas výroby [12].

V prípade kladných hodnôt vzdialenosti medzi filamentmi klesajú pevnostné charakteristiky materiálu a dochádza k rozpadu materiálu na niekoľko menších častí. Výhodné nastavenia, prekrývajú jednotlivé vrstvy materiálu odporúčane na 0,05 mm. Porovnanie vrstiev je znázornené na Obr. 1.3. Pre názornosť závislosti prikladám výsledky porovnania konvenčnej metódy výroby plastov vstrekaním plastov a 3D tlačou s rôznymi sklonmi filamentov (viď. Obr.1.4).



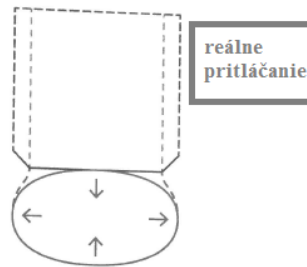
Obr.1.3 Vhodné nastavenie hrúbky materiálu pri tlači [15].



Obr. 1.4 Grafické porovnanie pevnosti materiálu ABS P300 pri dvoch rôznych technológiách a premenným uhlom rastru, spracované podľa [12].

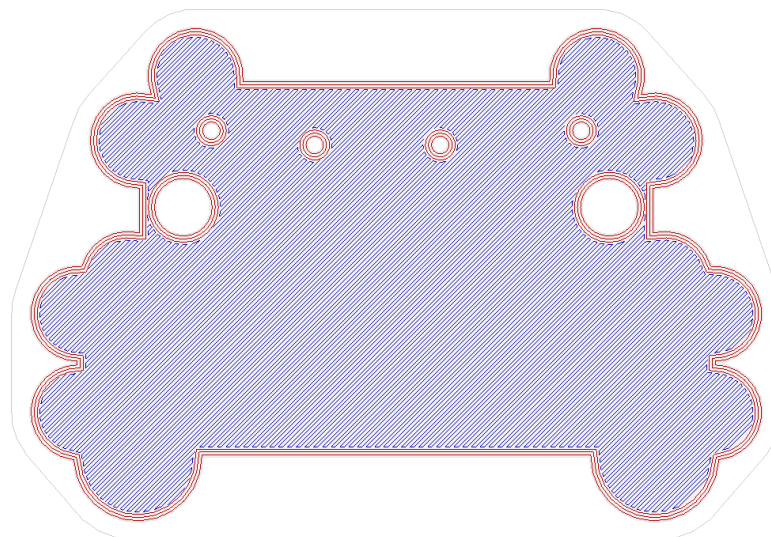
### 1.1.2 Priľnavosť vrstiev

Aby na seba jednotlivé vrstvy materiálu priľnuli, filament je pritláčaný na predchádzajúce vrstvy (znázornený na Obr. 1.5). Najnovšia vrstva materiálu znova ohrieva predchádzajúce vrstvy. Reálny tvar pritláčania vrstiev filamentu je oválny spôsobený silovým pôsobením trysky, čo neskôr vytvára koncentrátoory napätia na súčasti. Hromadenie napätia vedie k trhline materiálu a anizotropnému chovaniu štruktúry spojenou s nekvalitou povrchu.



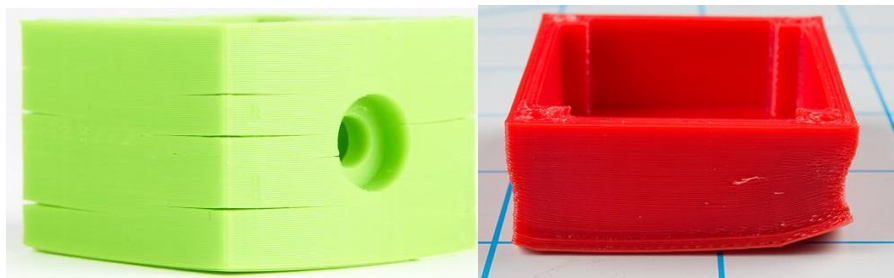
Obr. 1.5 Pritláčanie jednotlivých vrstiev filamentov [13].

Anizotropné materiály majú rozdielne vlastnosti v rôznych smeroch ako napríklad drevo. Je oveľa ľahšie ho rozseknúť ho v smere rastu pletív tj. cievnych zväzkov ako kolmo na tento smer. Materiály pre FDM tlač sa správajú v princípe podobne. Do situácie nám vstupuje aj adhézia medzi vrstvami tlačenej komponenty, ktorá definuje silu súčasti viac ako nami zvolený materiál. Adhézia závisí na kalibrácii našej tlačiarne a nastavení parametrov tlače. Súčiastka preto vydrží väčšie namáhanie na ťah, ak sú vlákna rovnobežné so smerom ťahu. V prílohe č.2 je porovnanie namáhania na ťah pre súčiastku tlačenú na výšku a na šírku. Horizontálne tlačená súčiastka znáša 2× väčšiu záťaž pri 100% výplni ako súčiastka tlačená na výšku. Počas tlače je dôležitý aj uhol ukladania vrstiev.



Obr. 1.6 Znázornenie uhlu rastru vlákien dielu v programe Slic3r. materiálu s výsledným namáhaním pre danú aplikáciu [9].

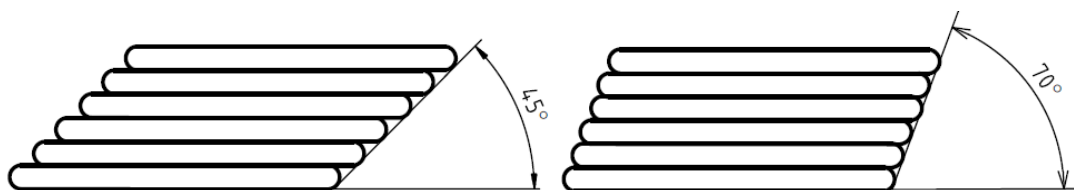
Pri tlači metódou FFF môže vzniknúť defekt príľnavosti vrstiev – deformácia smerom k tryske. Tento jav je spôsobený rozdielnym časom chladnutia vrstvy materiálu. Ako dôsledok vznikajú vnútorné napätia, ktoré môžu viesť k trhlinám. Zníženie výskytu javu sa docieľi ohrievanou tlačovou doskou, ukotvenie časti na povrchu a dobrou adhéziou k doske [13].



Obr. 1.7 Deformovanie vrstiev filamentu [44, 45].

### 1.1.3 Stavba podpory

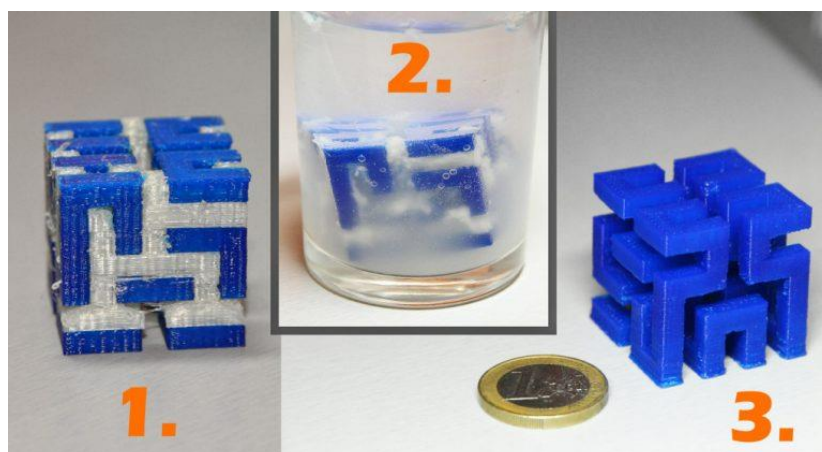
Tvorba podpory nie je obmedzená len na materiál výrobku, ale podľa typu extrúderu je možné zvoliť druhý materiál len na stavbu podpor tak, aby sa po dokončení tlače ľahko odstránil v dokončovacích operáciách. Dokončovacie operácie zahŕňajú odstraňovanie podpor manuálne alebo použitím špeciálnych oplachovacích zariadení, ktoré pri precíznom spracovaní vedie k presnej súčasti [9]. Pri prevysoch materiálu nad  $45^\circ$ , znázornených na Obr. 1.8, sa odporúča použiť podporný materiál pri tlači, aby sa zaistil bezpečnú tlač bez bortenia materiálu. V závislosti na rôznych aplikáciách, materiáloch aj type tlačiarne je možné tlačiť súčasti až do  $70^\circ$  previsu bez použitia podpory [46].



Obr. 1.8 Grafické znázornenie previsu. Znázornené pomocou AutoCADu podľa [46].

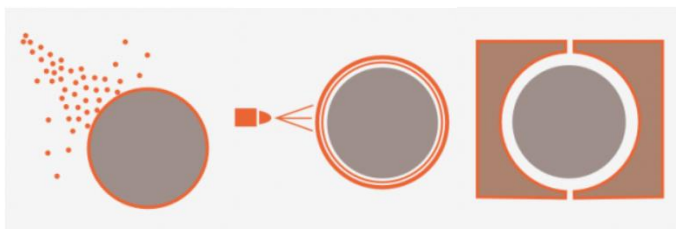
### 1.1.4 Dokončovacie operácie

Po dokončení 3D tlače nasleduje jediná povinná dokončovacia operácia – odstránenie podpory vyrezávaním alebo odlomením. Ak požadujeme hladký povrch súčasti, tak po odstránení podpor je nutné brúsenie. Zrná papiera majú rôznu zrnitosť a pri výbere sa orientujeme podľa normy ISO 525-75 (FEPA 42-D84). V prípade použitia 2 rôznych materiálov, tj. použitie duálneho extrúderu pre súčasť a podporu, je odstraňovanie podpory v rozpúšťadle daného materiálu ako pre polystyrén HIPS je to voda (znázornené na Obr. 1.9). Ďalšou dokončovacou metódou je vyplňovanie medzier epoxidovou živicom do nerovností povrchu a následným prebrúsením na finálny povrch. Ak náš finálny celok počas tlače musíme rozdeliť na menšie časti, väčšinou z dôvodu maximálneho objemu výtlaku na danej tlačiarne. Metóda tzv. „cold welding“, pretože acetónom lepíme nanesené povrchy ABS plastu. Vzniká nám pevný nerozoberateľný spoj a na záver znova prebrúsime povrch [18].



Obr. 1.9 Aplikácia vytlačená pomocou duálneho extrúderu, pričom súčasť je z PVA materiálu a podporný materiál je z húževnatého polystyrénu (HIPS) rozpustného vo vode [51].

Poslednou kategóriou sú estetické úpravy povrchu ako dokončovacie metódy a ich ukážka je na Obr.10. Prvá metóda prebieha po brúsení, kedy povrch leštíme čisto pre estetickosť. Najpoužívanejšou metódou je nanášanie povrchov a farieb po brúsení. Najskôr komponent opatríme dvomi primárnymi nátermi tzv. „primer“ a následne môžeme aplikovať farbu v spreji. Ak je našim cieľom priblížiť sa ku oceľovým a kovovým povrchom, tak môžeme aplikovať tradičnú formu povrchových úprav [13]. V poslednej rade môžeme povrch vylepšiť dokončovacími metódami zjemňovaním povrchu parou z chemických látok, kedy na určitý čas (minúty – hodiny) materiál z ABS plastu vystavíme acetónovej pare [18]. Špeciálne trysky sú znázornené na Obr. 1.11.



Obr. 1.10 Ukážka dokončovacích operácie pieskovanie (vľavo), nástrek farby na povrch (stred) a chemické naparovanie chemickými zlúčeninami (vpravo) [18].

### 1.1.5 Odporúčania nastavení pri tlači

Skúsenosťou dosahované hodnoty pre určité profily tlačene metódou FDM [13]:

- hrúbka steny jednej vrstvy je podľa priemeru trysky tlačiarne,
- tvary, ktoré majú uhol sklonu s podložkou viac ako 45° často potrebujú podporný materiál,
- diery menšie ako  $\varnothing 2$  mm, sú zhotovené alebo dokončované na presný rozmer technológiou vŕtania,
- kolíky tlačene vertikálne je odporúčané navrhovať väčšie ako  $\varnothing 3$  mm,
- členité časti súčasti bez podpory, by mali mať odporúčane dĺžku 3 mm.





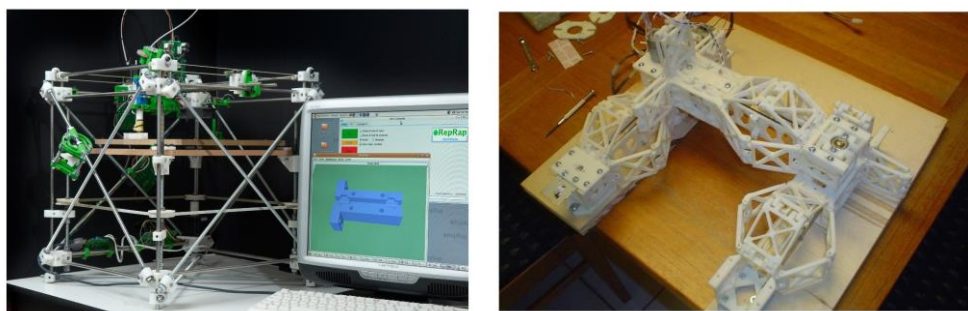
Obr. 1.11 (vpravo) trysky s priemerom 0,4 mm od firmy Olsson z mosadze a špička trysky s  $Al_2O_3$  [47], (vľavo) sada trysiek rôznych priemerov a materiálov od  $\varnothing$  0,25 – 0,8 mm [48].

## 1.2 Konštrukcia 3D FDM tlačiarne

### 1.2.1 Projekt RepRap

Vývoj a nárast spotrebiteľských 3D tlačiarňí do výraznej miery ovplyvnil projekt „RepRap“. Termín pochádza z anglického slova „Replicating Rapid Prototyper“. Zakladateľom projektu je v roku 2005 je Adrianem Bowyerem na University of Bath. Projekt združuje komunitu ľudí zaoberajúcich sa problematikou 3D tlače: hardwaru aj softwaru 3D tlačiarňí. Ich cieľom je popularizovať túto technológiu širokej verejnosti. Ďalším pozitívom pre záujemcov je „open source“ typu „open GL licencia“ a to znamená, že ak vylepšia tlačiareň či už po hardwarovej alebo softwarovej stránke, musia tieto dáta vrátiť naspäť komunite [19]. Výber prototypov je na Obr 1.12.

Samotná tlačiareň funguje na princípe replikácie jednotlivých dielov. Prevažne sa jedná o plastové súčiastky, ale členovia projektu experimentujú s keramikou, silikónovou gumou či hlinou. V pokročilom štádiu vývoja sú takisto kovy s nízkym bodom topenia. Aktuálne sa takto dokáže vyrobiť približne 70 % súčastí. Ďalším krokom vo fáze experimentov je výroba elektrických obvodov, čím sa zvýši produktivita tlačiarne. Obstarávací cena na celkový materiál sa pohybuje približne 200 – 350<sup>3</sup> €, čo pred spustením projektu RepRap bolo v komerčnej sfére tlačiarňí až od sumy 30 000 € [20].



Obr. 1.12 Modely RepRap: (vľavo) RepRap Version I "Darwin", (vpravo) model vytvorený členmi komunity s cieľom maximalizovať súčasti z 3D tlače [20].

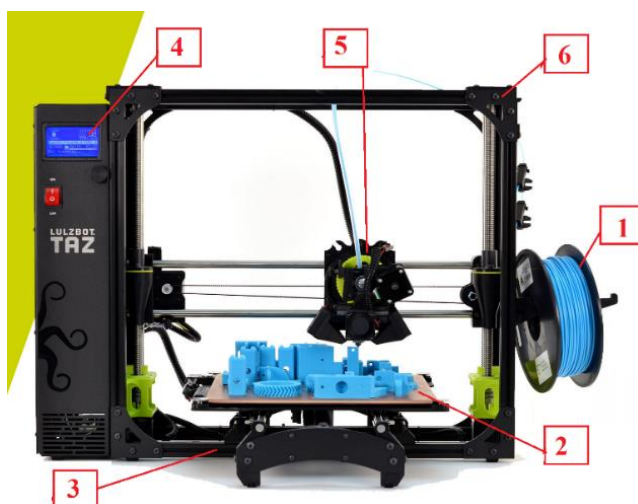
### 1.2.2 Komponenty 3D tlačiarne

<sup>3</sup> 350 € v prípade kúpy celej „stavebnice“ t.j. všetkých dielov tlačiarne

Na trhu sa môžeme dostať k 3D tlačiarňi zakúpením rôznym spôsobom. Prvým z nich kúpa kompletnej zmontovanej jednotky, ktorá bude funkčná hneď po zapojení do elektrického zdroja. Vplyvom už spomínaného projektu RepRap sa na trhu objavila možnosť si diely kupovať samostatne alebo treťou možnosťou je kúpa sady komponentov tzv. „kit“ a ďalej sa postupuje podľa priloženého návodu od dodávateľa [23].

Tlačiarne typu FDM majú tieto základné komponenty ako na Obr. 1.13 [22]:

- cievku s materiálom – nesie filament o hmotnosti štandardne 1 kg,
- extrudér – je sústava súčiastok, ktoré podávajú materiál do topného bloku a následne sa roztavený dostáva cez tryskovú hlavu na tlačovú dosku,
- hot end – časť extrudéru, zahrieva materiál na požadovanú teplotu ,
- ventilátor – nachádza sa v tesnej blízkosti extrudéru, riadi tuhnutie a ukladanie všetkých vrstiev materiálu,
- tlačová doska – rovná a plochá doska, kde sa ukladajú vrstvy 3D tlače,
- rám – tvorí kostru 3D tlačiarne väčšinou z kovu alebo preglejky,
- komponenty lineárneho pohybu,
- krokové motory, remeň – pohyb pásov a extrudéru počas 3D tlače,
- chladenie,
- základňa,
- dotyková/bezdotyková sonda – nachádza sa v tesnej blízkosti trysky, ale obsahujú ju len niektoré modely,
- elektrické komponenty – základná doska, zdroj, slot na SD karty, riadiace jednotky kroku, ovládací panel pre užívateľov.



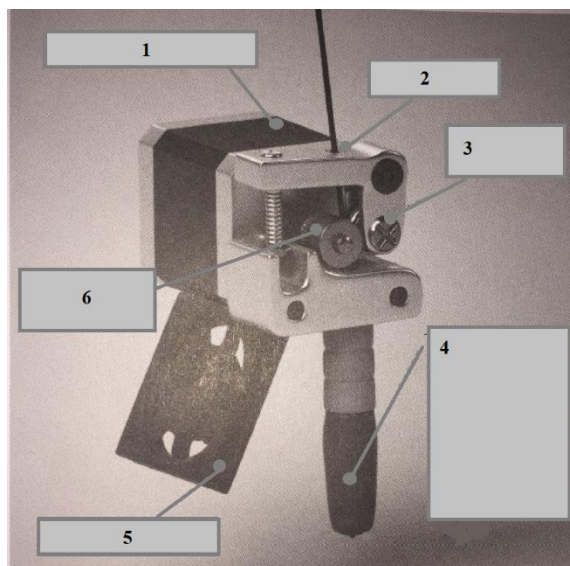
Obr. č. 1.13 FDM tlačiareň LulzBot TAZ 6 s časťami: 1) cievka s filamentom materiálu, 2) tlačová doska, 3) základňa, 4) ovládací panel, 5) extrúder s ventilátorom, 6) rám [24].

Tlačová hlava ako sada súčastí je tvorená niekoľkými dielmi so špecifickými funkciami v procese rapid prototyping (ďalej „RP“). Jednotlivá realizácia sa líši u každého

výrobcu buď na skrytú vymeniteľnú jednotku alebo modulárnu stavbu, pri ktorej môžeme kompaktnejšie vymieňať jednotlivé diely. Súčasti tlačovej hlavy môžu byť vyrobené konvenčnými metódami alebo využitím projektu RepRap môžeme nahradiť niektoré strojné súčasti 3D tlačnými dielmi [23]. Nanášanie vrstiev materiálu podpory alebo súčasti by bez extrúderu nebolo možné. Extrúder môžeme definovať ako sériu súčastí, ktoré sú zodpovedné za pohyb a spracovávanie plastového materiálu. Dva základné elementy, do ktorých môžeme extrúder rozdeliť sú tzv. „hot end“ a tzv. „cold end“, čo vo voľnom preklade z angličtiny znamená horúci a studený koniec. Cold end je časť pozostávajúca z motoru extrúderu, prevodu typicky na ráme alebo tlačovej hlave a filament sa tam nezahrieva.

Základná stavba tlačovej hlavy je tvorená topnom bloku, pojazdu pre extrúder a krokového motorčeka. Úloha motorčeka spočíva v pohybu materiálu z cievky ďalej do extrúderu spolu s páčkou prítlaču na nastavenie neprekľzavania materiálu počas tlače. Podávanie materiálu môže byť priame – motorček podáva materiál priamo nad „hot end“ časťou a nepriame tzv. „s bowdermom“ – materiál sa nachádza uložený mimo tlačovej hlavy na ráme tlačiarne a je vedený pomocou bowderu [25].

Sústava extrúderu je tvorená nasledovnými dielmi: pohonný mechanizmus – drží vlákno v jednej polohe, hnací motor extrúderu – posuv vlákna, vodiaci kanál vlákna – vedenie a tlak vlákna na pohonný mechanizmus, chladiaci ventilátor a tryska – tavba materiálu a prietok na povrch tlačovej dosky. Znárodné na Obr. 1.14.



Obr. 1.14 Grafické znázornenie extrúderu: 1) hnací motor extrúderu; 2) vedenie vlákna; 3) ložisko vodiacej kladky; 4) topný blok zložený z: izolačného obalu, kazety topného tela, topného bloku, trysky; 5) chladiaci ventilátor; 6) pohonný mechanizmus [21].

### 1.3 Výhody a nevýhody FDM metody

Výhody metody:

- **skrácená doba vývoja produktov** – kratší čas výroby a optimalizácie je spôsobený kombinovaním funkčných častí na jednu súčasť, zároveň sa oproti klasickému obrábaniu sa nemusí minimalizovať počet súčastí pre náročný prístup alebo zníženiu tvorby triesky), tým sa zníži čas potrebný na kontrolu tolerancií, detailnú výrobu dier a výkresy zostáv sú jednoduchšie [28],
- **tvorba funkčných prototypov** – použitím vhodného materiálu napr. ABS alebo ABS plus FDM konkuruje technológii injekčného vstrekovania plastov [13],
- **minimálny odpad** – z princípu metódy tavby sa materiál nanáša priamo na požadovanú polohu a jediným odpadom je materiál podpor [26],
- **cena materiálu** – pre bežné aplikácie je cena materiálu prijateľná aj vďaka projektu RepRap (kap. 1.2.1) [13],
- **veľký priestor pre tlač** – FDM tlačiarne dokážu tvoriť súčiastky veľkých rozmerov pre predstavu tlačiarne Fortus 900mc 1000×1000×1000 mm, [27],
- **dopĺňanie materiálu** – ľahká manipulácia s cievkami materiálu, ktoré sa dajú meniť počas tlače, čím sa zachováva ľahký chod tlačiarne [28],
- **ľahké odstránenie podpor** – jednoduché dokončovacie procesy založené na použití vody, odstránia nadbytočné podpory [27],

Nevýhody metódy:

- **rýchlosť výroby** – filament je nanášaný v pohybe extrúderu, kde zároveň prebieha jeho tavba v topnom bloku a preto nemôže byť tlačová hlava posúvaná rovnakou rýchlosťou ako pri metódach tavby laserom. Počas tlače majú vrstvy vysokú viskozitu, takže nemôžeme urýchliť proces [23],
- **deformácia vrstiev** – chladnutie jednotlivých vrstiev prebieha s rapídnu rýchlosťou z tryskovej hlavy po stôl alebo predchádzajúcu vrstvu a môžu nastať tepelné kontrakcie, anizotropia materiálu a vznikajú koncentrátoary napätia na okrajoch vrstiev. Skúsenosťou vieme kompenzovať tento vplyv optimalizáciou nastavenia. Detailnejší popis správania materiálu v napätíovom stave vid' podkapitoly 1.1.1 a 1.1.2 [27],
- **čas výroby** – väčšina 3D tlačiarň pracuje s 20% materiálu ako výplň, pri vyšších percentách máme síce lepšie mechanické vlastnosti, ale zvyšuje sa čas a cena produkcie [13],
- **presnosť výroby** – keďže prebieha tavenie filamentu o určitom priereze pre danú trysku, tak to tvorí limitnú hranicu pre vhodnosť materiálu na výrobu, ale novšie tlačiarne sú vybavené lepšími riadiacim strediskom pre kontrolu prierezu a dokážu identifikovať nevhodný rozmer prierezu filamentu [13],
- **obťažná výroba ostrých hrán** – pri použití kruhového prierezu trysky [11].

#### 1.4 Materiály používané FDM metódou

Výroba materiálu pre 3D tlačiarne vyžaduje vysokú presnosť rozmerov  $\pm 0,5$  mm. V prípade nedodržaných rozmerov sa materiál môže zaseknúť v tlačovej hlave alebo bude spôsobovať v materiáli defekty z dôvodu nedostatočného a nerovnomerného prísunu materiálu. Dnes sa pri kontrole výroby používa počítačové videnie. Princíp metódy funguje na základe počítačovej analýzy videa zaznamenávanom v reálnom čase výroby z jednej alebo viacerých kamier. Rýchlosť výroby strún sa pohybuje okolo 1 m/s. V prípade nedodržaných parametrov je informácia vyslaná zvukovou signalizáciou na výrobnú halu, ale takisto aj na ovládací panel. Systém v poslednom rade uchováva históriu kontrol podľa evidencie daného výrobku [26].

Výrobcovia dodávajú materiál navinutý na cievke o hmotnosti 1 kg s priemerom filamentu medzi 1,75 – 2,85<sup>4</sup> mm pričom cena za kus sa pohybuje podľa dosahovaných vlastností filamentov od 17,6 – 200€ (vyššie sumy sú pri materiáloch firmy Stratasys)<sup>5</sup>. Všeobecné pravidlo pri termoplastických materiáloch je: pri lepších mechanických vlastnostiach a stúpajúcej teplote tavenia stúpa obtiažnosť výroby komponent, z dôvodu tvorby vyšších vnútorných pnutí [13].

Pre FDM tlač sa používajú termoplastické materiály ako napríklad ABS, PLA alebo špeciálne materiály pre medicínske aplikácie. Spolu s rôznymi druhmi materiálov je taktiež dostupná široká paleta farieb bez vplyvu na mechanické vlastnosti. Vzhľadom na to, že farba je viazaná ku jednotlivým vláknam, tak výsledná farba produktu sa zhoduje s farbou polotovaru. FDM tlačiarne typu „The Fortus 400“ a „The Fortus 900“ od firmy Stratasys patria medzi stroje, ktoré ako prvé dokázali zvládnuť vysokoteplotné termoplastické materiály – polyfenilsulfány<sup>6</sup> [9].

V praxi sa najviac používajú vlákna s priemerom priečného prierezu 1,75 mm. V porovnaní s hrubším vláknom, si tenšie vyžaduje šesťkrát menšiu silu pri tlačení, preto sa používajú ľahšie motory pre pohyb tlačovej hlavy s ľahšou hmotnosťou hlavy. Spotrebiteľské tlačiarne FDM metódy majú najširší výber dostupných materiálov [29]. Dizajnéri majú tak možnosť výberu materiálu pre každú etapu vývoja nového produktu od cenovo dostupných pre modelové koncepty až po realistické a funkčné prototypy certifikovane testované výrobcom.

Prehľadné spracovanie materiálov a ich vlastností je v Prílohách 1 a 3. V Prílohe 1 je spracovanie výhod a nevýhodných vlastností vybraných termoplastov používaných pri tlači FDM metódou 3D tlače. Príloha 3 obsahuje rozmedzia mechanických vlastností a ich správanie sa vo vyšších teplotách. Hodnoty skúšky tvrdosti podľa Rockwella sú normované (ČSN EN ISO 6508) podľa nameranej stupnice tvrdosti prístroja, ale aj použitia vnikajúceho nástroja (indentoru). Napr. HRA je použitie diamantového kužeľa zaťaženého 60 kg závažím [49].

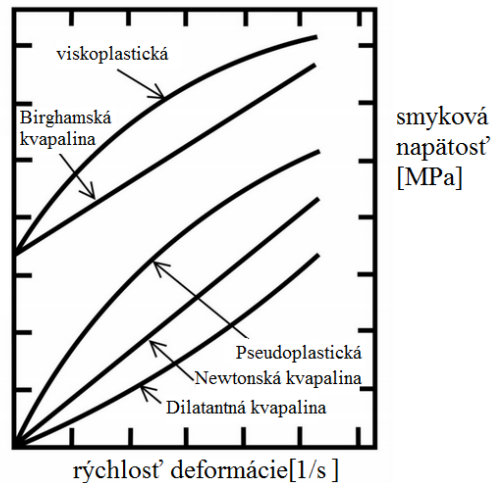
Viskozita polymérov, vid' Obr. 1.15, úzko súvisí s ich spracovaním v tekutom alebo vysokoplastickom stave. Termoplastické polyméry sú pri nízkych teplotách v pevnom stave a pri zvýšených teplotách sa najskôr premenia do jemného gumového materiálu a následne do hustého tekutého stavu. Ak teplota bude ďalej rásť, tak viskozita začne klesať ako napríklad pre polyetylén (LDPE), ktorý ma pri teplote 151 °C viskozitu 115 Pa·s, pri

<sup>4</sup> niekedy sa predáva pod označením 3 mm [47].

<sup>5</sup> špeciálnemateriály s maximálnou cenou za 1kg /441 € [47].

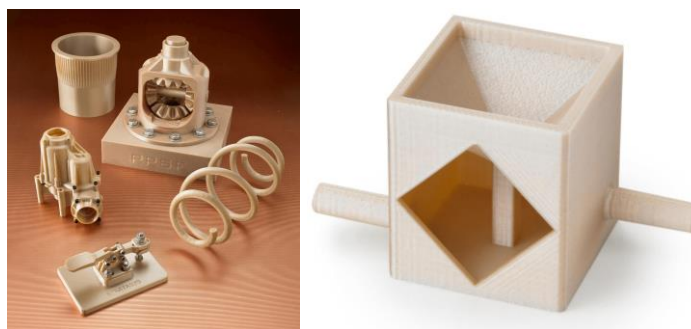
<sup>6</sup> označované ako PPSF/PPSU [9].

teplote 205 °C viskozitu 55 Pa·s a pri najvyššej uvádzanej tabuľkovej hodnote 260 °C má viskozitu len 28 Pa·s. Pri polymérnych látkach zároveň viskozita závisí aj na rýchlosti prietoku a viskozita je nelineárna. Správa sa ako tzv. pseudoplastická tekutina, čo je vo viskóznom ponímaní exponenciálna závislosť šmykového napätia na šmykovej rýchlosti.



Obr. 1.15 Rozdelenie tekutín podľa viskozity Obr. modifikovaný podľa zdroja [50].

Materiál ABS môže okrem štandardného vzhľadu drevenej štruktúry tzv. „woodfill PLA“, alebo kovovú štruktúru (oceľ, bronz, meď) tzv. „metalfill PLA“, ktoré mu dodajú drevený alebo metalický povrch. Materiál ABS dominuje medzi ostatnými, preto sa často označuje ako materiál pre sériovú výrobu [29]. Ak tlačíme súčasť z dvoch materiálov odlišných pre súčasť a podporu, teda máme tlačiareň s dvomi extrúdermi, tak bežnými materiálmi pre stavbu podpor sú: PVA a impaktový polystyrén (HIPS) [21]. Súčasti z materiálu PPSF, druhý názov PPS – polypropylén sulfid, zabezpečujú vysokú chemickú odolnosť do 200 °C a mechanickú odolnosť. PPS môžeme využiť pri automobilových aplikáciách, chemickom priemysle či elektrotechnike [33]. Vybrané diely sú predstavené na Obr. 1.16.



Obr. 1.16 Ukážka produktov z materiálu PPSF firmy Stratasys [33].

Ďalším materiálom, ktorý má viacero variant prevedenia pre rôzne požiadavky je nylón. Štandardný nylon (PA12) má vysokú pevnosť a je vhodný pre tvorbu prototypov.

Ďalšie PA materiály sú [14]:

- uhlíkom obohatený PA – prítomné vlákna uhlíku alebo grafitu, ktoré spôsobia vyššiu pevnosť a tepelnú odolnosť,

- PA so sklenými vláknami – prítomnosť sklenených vlákien rovnako zlepšuje mechanické vlastnosti ale aj odolnosť voči oterom,
- PA obohatené hliníkom – ľahšie opracovanie, lepšie mechanické vlastnosti a metalický povrch finálneho komponentu,
- PA 11 – vyššia odolnosť voči vplyvom prostredia, ale horšie mechanické vlastnosti,
- ohňuvzdorný PA – certifikované PA pre náročné aplikácie napr. letectvo.

#### 1.4.1 Management vlastností súčasti

Proces výroby vyžaduje kompenzáciu nevhodného anizotropného chovania materiálu už vo fáze návrhu dizajnu a nastavenia parametrov pre tlač. Pre vhodné nastavenie je nutné poznať smerové rozdiely a detailné vlastností materiálov. V značnom množstve prípadov je presný výpočet správania materiálu pri stavbe v osách XY a Z neznámy a pracuje sa na základe skúseností s materiálom. Za týmto účelom vytvorila firma EOS systematickú databázu nazývanú management vlastností súčasti z anglického spojenia „Part Property Management“ (PPM).

Jedná sa o špeciálnu databázu materiálov nazývané profily vlastností materiálov z anglického spojenia „part property profiles“ (PPPs), kde sú správanie jednotlivých materiálov pre stavbu v XY a takisto v Z [31].

Pre získanie prototypu ako celkového obrazu alebo funkčného prototypu začneme selekciou „at the end“. V prvom rade zvolíme materiál a technológiu AM. Nasleduje proces zhodovania materiálu s procesom výroby a prenos 3D dát súčasti. Ako výsledok získame 3D dáta alebo prototyp súčasti.

Dôležitým elementom je profil súčasti management kvality. Používateľ definuje hrúbku vrstvy v piatich nastaveniach v rozmedzí (60 – 180  $\mu m$ ) a materiál. Profil poskytuje informácie o pevnosti vlákien a elasticite. Vlastnosti spolu s anizotropiou sú k dispozícii pre užívateľa v rovine XY ale aj v ose Z sa berú do úvahy. Systém taktiež zahŕňa pravidlá konštrukcie, dizajnu súčasti pre ľahkú údržbu a ekonomickú optimalizáciu. Všetky dáta a verzie optimalizácii sú k dispozícii pre užívateľov a audity podniku. V budúcnosti je na rade štandardizovanie podpor a ich zahrnutie v PPM databáze [9].

### 1.5 Ďalší vývoj technológie FDM

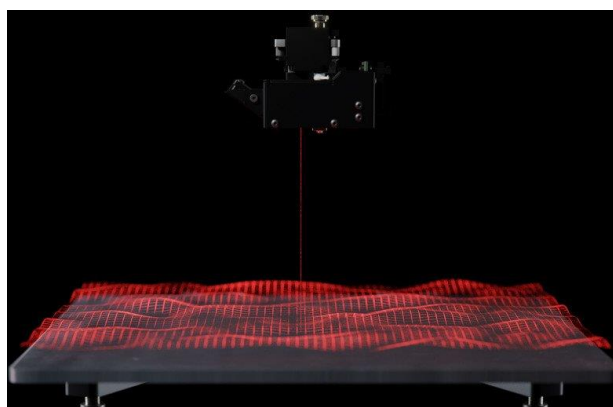
#### 1.5.1 Continuous Filament Fabrication

Táto technológia v preklade z anglického spojenia „Continuous Filament Fabrication“ znamená vo voľnom preklade neustálu tvorbu materiálu, (ďalej CSF). Na rozdiel od FFF metódy máme k dispozícii 2 materiály. Je to ideálne na oddelenie materiálu súčasti a podpor. Pridaním druhej trysky v rámci jedného extrúdera je pôvodný materiál pretkaný vláknami uhlíka, kevlaru<sup>7</sup> alebo sklenených vlákien v priebehu procesu. Výsledkom sú funkčné prototypy s vyššími hodnotami pevnosti [21].

---

<sup>7</sup> Para-aramidové vlákno s vysokou pevnosťou a nízkou hmotnosťou, ktoré vyvinula spoločnosť DuPont pôvodne slúžilo ako náhrada oceľových výstuží v profesionálnych pneumatikách, v nepriestrených vestách či v kanoe [30].

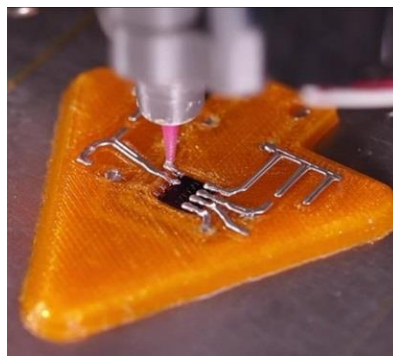
Spomínané modifikované filamenty a technológie ich spracovania má patentované firma Marforced<sup>8</sup> a na trhu má niekoľko nových produktov v tomto smere. Najznámejšou tlačiarnou je produkt s názvom X3. Konštrukcia schránky je tvorená hliníkom a súčasťou konštrukčného riešenia je tryska so senzorickým navigačným softvérom, laserom a kalibráciou pre presné navigácie motora a presnosti výtlačku ako je na Obr. 1.17. Maximálny objem súčasti je 330×270×200 mm a výška vrstvy filamentu dosahuje 50  $\mu\text{m}$ . Presnosť tlače je vďaka laseru kontúrovaná mapa povrchu s topológiou na presnosť udávanú výrobcom 1  $\mu\text{m}$ . Výplň je rôznych geometrických tvarov od plnej výplne cez trojuholníkovú a štvorcovú až po hexagonálne vzory výplne. Dodanie softwaru zaisťuje spoločnosťou cez cloudové úložiská, ale ponúka odbornú pomoc pri inštalácii a spustení tlačiarní vo výrobe [36].



Obr. 1.17 Náčrt kontinuálnej FDM tlače pomocou dvojitej tryskovej hlavy a ukážka laserovej mapy tlačiarnie X3 Markforced [36].

### 1.5.2 Voxel 8DK

Voxel 8DK je špecifický model 3D tlačiarnie, ktorý rozkladá materiálovú „pastu“ s obsahom kovu a druhú z klasického termoplastického polyméru. Jej využitie je v elektronických komponentoch. S využitím viacerých materiálov sa produkujú obvody alebo integrované batérie [21]. Tryska Voxelu 8DK má  $\varnothing 250 \mu\text{m}$ , čo zapríčiňuje možnosť tlače termoplastického materiálu súčasne s vodivými spojmi elektronických obvodov, vid'. Obr. 1.18. Hodnoty elektrickej rezistivity dosahujú hodnôt  $5 \times 10^{-7} \Omega \times \text{m}$ , čo je v porovnaní s termoplastickými materiálmi plnené vodivými materiálom o 20 000× viac a 5000× viac ako termoplastické materiály plnené grafitom [37].



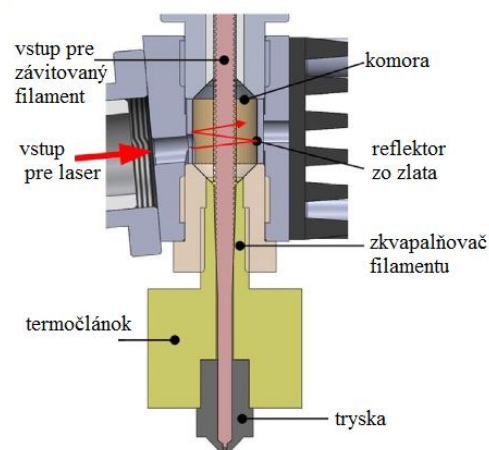
Obr. 1.18 Tlačiareň Voxel 8DK a tlač elektronickej súčasti [37].

<sup>8</sup> Názov patentu US9,156,205 B2: Three dimensional printer with composite filament fabrication



### 1.5.3 Fast FFF

Ďalším rozvojom metódy FFF je rýchlosť tlače, vid'. Obr. 1.19. V roku 2017 vedci z Massachusetts Institute of Technology (MIT) publikovali článok o ich „vylepšenom“ modeli 3D tlače extrúziou tzv. „fast fused filament fabrication“ (Fast FFF). Z konštrukčného hľadiska metóda využíva matice na pohyb extrúderu, špeciálny laser na tavbu polyméru je pridaný na tlačovej hlave (laser – heated polymer liquefier), riadenie servomotormi, špecifické ohrievanie filamentu s vrúbkami na na okraji a portálový pohyb tlače a to za cieľom dosiahnutia vyšších síl extrúzií [52, 54].

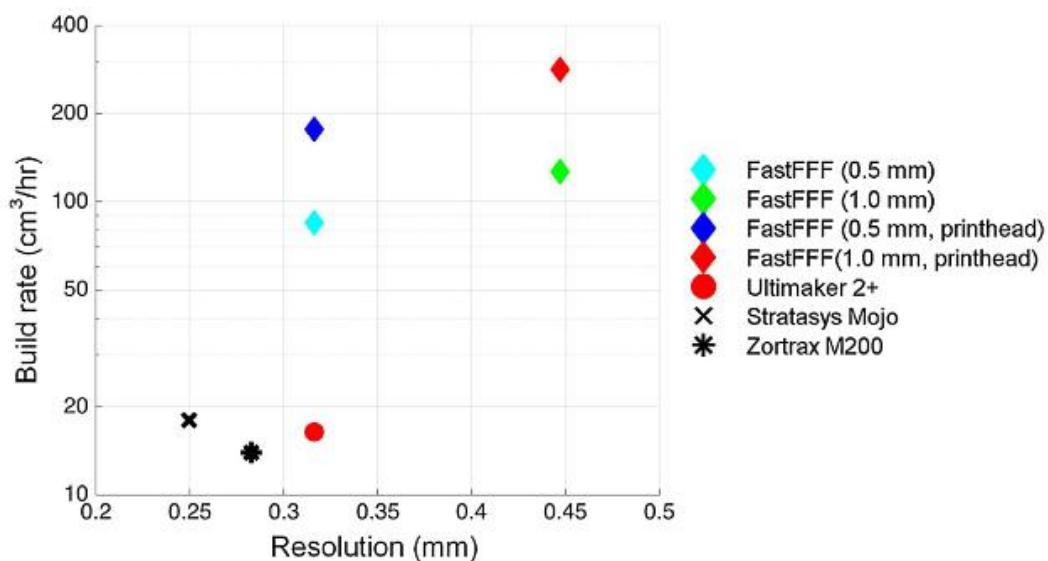


Obr. 1.19 prierez časťou extrúderu [53].

Mechanizmus na ohrev a extrúziu je v tlačovej hlave spolu s diódovým laserom, ktorá dostáva zo skrutkového podávača materiál na tlač. Fast FFF tlač dosahuje objem  $850 \text{ mm}^3/\text{hod}$ , čo je v porovnaní s tlačiarňou Strasys Mojo, ktorá vytlačí  $180 \text{ mm}^3/\text{hod}$  zvýšenie rýchlosti 4,7krát. Doposiaľ maximálny objem fast FFF je limitovaný kompaktnou tlačovou hlavou a pohonmi. Kvôli spomínaným dôvodom operuje technológia pomocou špeciálneho mechanizmu (pinch wheel mechanism), ktorý má malý pomer medzi rotačným pomerom kola a výstupnou rýchlosťou filamentu.

Nevýhody metódy sú: značná redukcia filamentu v tryske, nízka kontrola extrúzneho procesu a požadovaná presnosť a kvalita výslednej komponenty. Pre ďalšie zlepšenie času tlače je potrebné vylepšiť trasovanie tlačovej hlavy v algoritmoch cez pohybovú a extrúznú dynamiku systému. Vedci z MIT skupiny odporúčajú používať termoplasty s vyššími teplotami tavenia alebo termoplasty obohatené špeciálnymi vláknami (vid'. kap. 1.5) [52].

Druhá skupina vedcov zaoberajúcich sa metódou Fast FFF je z University of Michigan. Zaoberali sa vylepšovaním trackovacieho softwaru využitím špeciálnej numerickej metódy – „filtered basis function“ voľne preloženú z angličtiny ako filtrujúcu bázičnú funkciu, ktorá umožňuje sledovanie lineárneho systému. Využíva predpoklad, že danú trajektóriu poznáme, ale je rozdelená do niekoľkých častí popísaných bázičnými funkciami s neznámymi parametrami. Tie sú ďalej filtrované za účelom minimalizovania chýb v pohybe. Testovaný model Kapitoly vo Washingtone D.C, ktorý mal na šírku približne 47 mm, vytlačila tlačiareň za 2 hodiny a 42 sekúnd, čo je oproti modelu rovnakých parametrov, ale pracujúcich len štandardnou FFF metódou trvalo okolo 4 hodín. Pre porovnanie sa používal model tlačiarne HICTOP Prusa i3 na Obr 1.20 [55].



Obr. 1.20 Rozdiely v dosahovaných objemoch tlače za hodinu medzi tlačiarňami FastFFF s rôznym priemerom trysk a klasickými stolnými FDM tlačiarňami [52].

## 1.6 Výroba modelov automobilov

Už v podkapitole 1.5 sme charakterizovali vlastnosti materiálov využívaných pre technológiu FFF. Spomínané materiály sú charakteristickými zástupcami materiálovej rodiny polymérov. V porovnaní s kovmi majú nižšie moduly, ale môžu takisto dosahovať vlastnosti blížiacich sa ku kovom. Ich vlastnosti sú závislé na teplotách a radikálne sa menia s jej zmenou z flexibilných do creepových vlastností, až po krehké. Niektoré polyméry sú čiastočne kryštalické, zatiaľ čo iné s transparentným vzhľadom tvoria amorfné štruktúry [33].

V technológii FDM tlače, ale aj pri výrobe plastových modelov sa využíva podkategória polymérov – termoplasty. V spracovávaní tejto podkategórie plastov je proces nasledovný: ohrejeme ich na vyššie teploty, formujeme do požadovaného stavu a následne ochladíme. Materiál si zanecháva svoj nový tvar bez značnej zmeny materiálových vlastností. Z atomárneho hľadiska termoplasty tvoria dlhé reťazce, kde sú atómy uhlíku spojené kovalentnou väzbou. Ako prímiesy sa používajú prvky:  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $S_2$ , ktoré sú vedľajšími kovalentnými väzbami viazané na hlavný uhlíkový reťazec. Dlhé molekulové reťazce termoplastov sú navzájom spojené sekundárnymi väzbami [34].

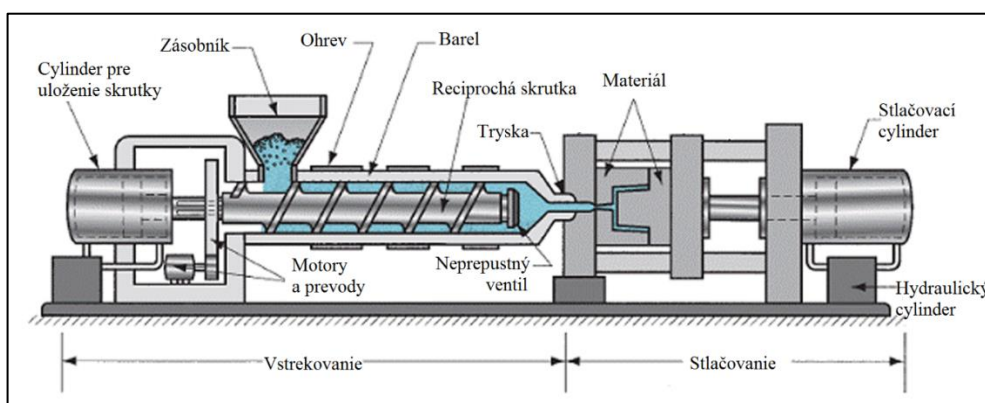
Konvenčné technológie akými sa granulový polotovár dostane do požadovaného tvaru sú pre termoplasty a reaktoplasty rozdielne. V našom prípade termoplasty, sú tvarované práve počas ohrevu tromi základnými procesmi.

### 1.6.1 Injekčné vstrekovanie plastov

Moderný proces vstrekovania funguje na princípe recipročného skrutkového mechanizmu pre tavbu plastu, na Obr. 1.21. Nasleduje vstrekovanie roztaveného materiálu do kavitovej formy. V starších strojoch pre vstrekovanie sa miesto skrutky používali lisy a tým sa taval granulát, a to v porovnaní s modernou metódou, je nehomogénny proces tavby materiálu [34].

Proces vstrekovania začína v zásobníku materiálu, ktorý je zdrojom granulátu. Jeho cylindrický tvar posúva granulát priamo na skrutku pod ním. Rotačným pohybom skrutky

kolmo na zásobník sa neustále posúva vstupný materiál dopredu. Skrutka je z vonkajšej strany obalená výhrevnými pruhmi. Tie v spolupráci s kompresiou vďaka vyšším teplotám a prítomnému treniu tavia granulát. Materiál v plastickom stave sa zhromažďuje v zásobníku na presné množstvo materiálu. Hriadeľ skrutky sa zastaví a „vystrelí“ zplastizovaný materiál do kavitovej formy. Na krátky čas je tu roztavený materiál ponechaný pod tlakom (tuhne) a zároveň je chladený vodou. Kavitová forma sa následne otvorí a z formy vypadne niekoľko hotových súčastí. Po ukončení sa forma uzavrie a je pripravená na ďalší cyklus. Pri termoplastických materiáloch je čas tvrdnutia materiálu takmer okamžitý 10 – 30 s. Reaktoplasty majú vyššie nároky na tuhnutie, preto je doba cyklu dlhšia aj výroba komplikovanejšia. Proces výroby reaktoplastov je Reaction Injection Molding (RIM) [35].

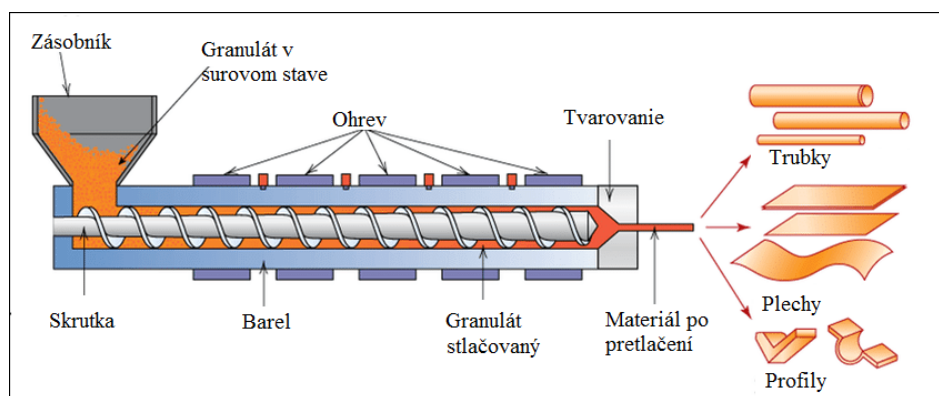


Obr. 1.21 Prierez strojom pre injekčné vstrekovanie plastov [38].

### 1.6.2 Pretlačovanie plastov – extrúzia

Materiály a tvary spracované sú kontinuálne výrobné procesy: trubiek, tyčí, dosiek, ale aj rôznych tvarových komponentov. Inými slovami je určená pre súčasti s konštantným pričným prierezom. Stroj je okrem iného používaný na výrobu materiálov surových tvarov ako sú palety a znovu využitie odpadu termoplastického materiálu

Princíp metódy, na Obr. 1.22, spočíva v pretlačovaní termoplastickej živice do vyhrievaného cylindra, kde materiál tavieme a navyše „otvárame“ rotovaním cylindra. Po dosiahnutí finálneho tvaru súčast' chladíme vzduchom alebo vodou, pod teplotu skleneného prechodu na zaistenie požadovaných vlastností produktu [34]. Metoda je všeobecne porovnateľná so vstrekovaním plastov, okrem finálneho tvarovania roztavenej súčasti čo je buď v tvarovom lise alebo v kavitovej forme [35].

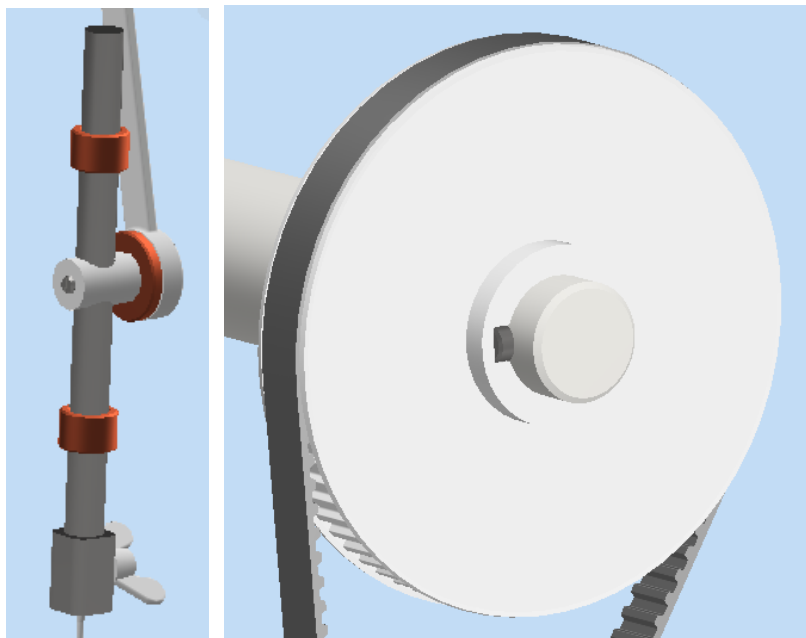


Obr. 1.22 Prierez strojom pre pretlačovanie plastov [39].

## 2. KOŠTRUKCIA DIELOV MODELU

V súčasnosti je na trhu široká škála 3D Computer Aided Design (ďalej CAD), voľne preložené z angličtiny ako „počítačom podporovaný návrh“ pre priame návrhy dielov a súčastí. Jednotlivé licencie sa líšia v prvom rade, či sa jedná o 2D alebo 3D objekty, ďalej podľa možnosti spolupráce sú buď pre 1 používateľa alebo pre tímové projekty. Ďalej ich môžeme deliť aj podľa toho aký typ modelu dostaneme: drôtený model, 3D modely len z povrchov až po plné 3D modely [56].

V praxi sú často využívané 3D programy ako napríklad: SOLIDWORKS, CATIA, PRO ENGINEER. Pre študentov sú voľne k dispozícii licencie firmy AUTODESK, ktoré poskytujú možnosti tvorby priamo výkresovej dokumentácie v 2D drôtených modeloch – AutoCAD znázornené v Prílohe 4 uvedenej na konci práce alebo 3D modelovanie – INVENTOR na Obr. 1.23. V našom návrhu sme pracovali na návrhoch v programe AUTODESK Inventor Professional 2017.



Obr. 1.23 ukážky 3D plných modelov v programe Inventor: (**vľavo**) uloženie vodiacej tyče a ihly šijacieho stroja, (**vpravo**) hnaná remenica uložená na hlavnom hriadeli šjaicieho stroja. Oba modely sú vlastné z projektu predmetu Konstruování a CAD (4KC).

### 2.1 Popis dielov

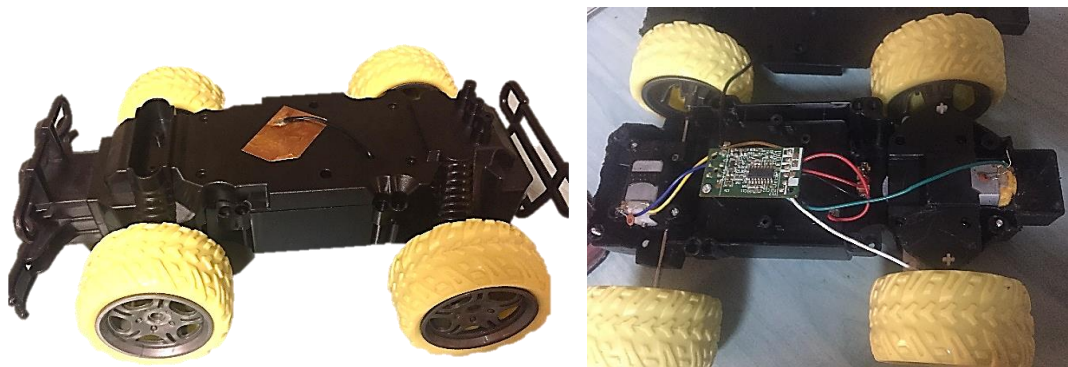
Nami zvolená aplikácia sú diely podvozku modelu jeepu R/C 1:20 MONSTER TRUCK JEEP od firmy Otto Simon B.V, vid'. Obr. 1.24. Obsahuje 3 hlavné diely, v ktorých sú uložené: kryt na baterky s kabelážou, malý motor ktorý poháňa nápravu s identifikačným číslom G-03B3, základná doska, spínač. Okrem podvozku celkový model tvorí:

- karoséria jeepu s interiérom, nákladným priestorom, blatníkmi,
- kolesá s nápravou,
- predný a zadný nárazník,
- diaľkové ovládanie.



Obr 1.24 (vľavo) model v krabici od výrobcu [57], (vpravo) pohľad spredu na model jeepu.

Predmetom práce je konštrukcia troch dielov podvozku, (Obr. 1.25), z ohľadom na technologické požiadavky 3D FDM tlače. Prvý diel je horný kryt podvozku, druhý je kryt spodný a medzi nimi sa pre poistenie nápravy nachádza malý ochranný diel.



Obr. 1.25 (vľavo) Model podvozku s nápravou nárazníkmi, (vpravo) spodný diel podvozku s ovládaním náprav a zadným náhonom kolies.

## 2.2 Návrhový proces

Všetky tri diely boli na začiatku modelovania zmerané uhlomerom a digitálnym posuvným meradlom Qiim M9 od predajcu Monika Vaňková, Milovice na Obr 1.26.



Obr. 1.26 Digitálne posuvné meradlo.

Parameter	Údaj
Rozsah merania	0-150 mm
Rozlíšenie	0,01 mm
Presnosť	0,03 mm
Napájanie	1x 1,5 V, SR 44
Pracovná teplota	5 – 40 °C
Relatívna vlhkosť vzduchu	0 – 80 %

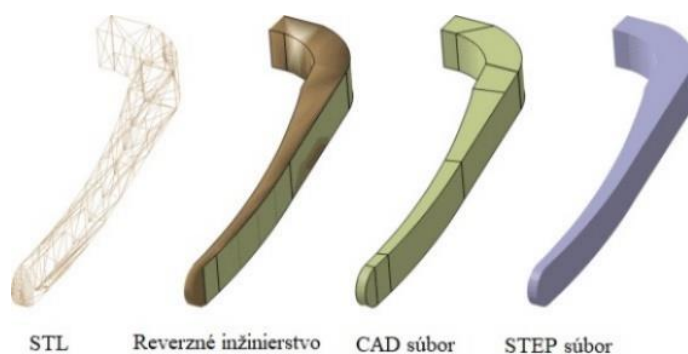
Tab. 1 technické údaje uvedené výrobcom [58].

Diely sme následne modelovali v programe Inventor Professional 2017. Využili sme základné náčrty (scetch) a 3D funkcie ako:

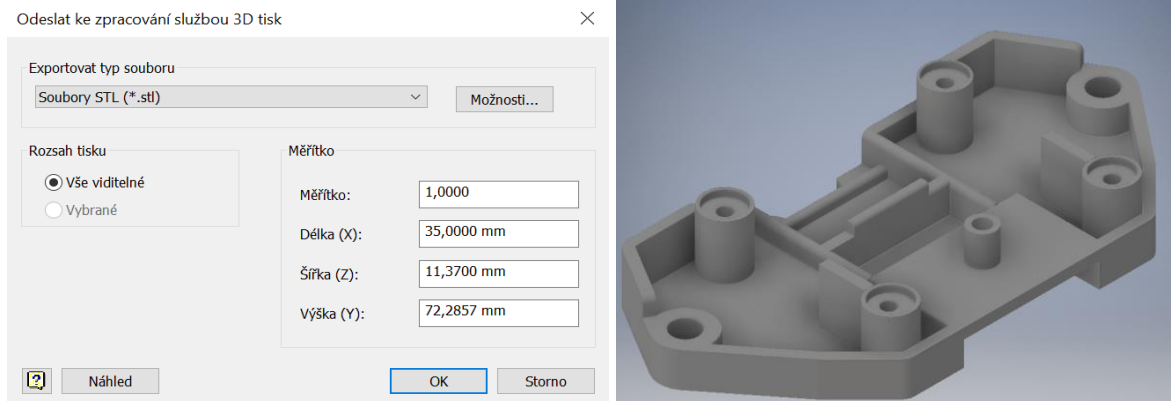
- vysunúť (extrude) pre jednoduché náčrty a tvary,
- šablónovanie (loft) pre prechodové krivky a zložité tvary,
- ťahanie (sweep) pre vytvorenie 3D modelu po zvolenej 3D trajektórii,
- zaoblenie a skosenie rovín,
- odsad'ovanie nových pracovných rovín,
- pre 2D náčrty boli okrem štandardných geometrických prvkov, čiar a kriviek využívané funkcie: priemet geometrie, zrkadlenie, predĺženie, skrátenie, orezanie, odsadenie, vytvorenie polí a v poslednej rade režim kót a väzieb.

Malý ochranný diel je vizualizovaný v Prílohe 5 a horný model podvozku je vizualizovaný v Prílohe 6. Posedný diel bol vytvorený na základe horného dielu, vďaka rovnakým rozdielom a bol priamo rozdelený na menšie diely pre 3D FDM tlačiareň.

Program Inventor ukladá súčasti vo formáte .ipt ako 3D objekt. Ten sme následne exportovali do formátu .stl, ako je na Obr. 1.30, ktorý slúži k ďalšiemu spracovaniu rapid prototyping, 3D tlačou, ale aj v oblasti Computer aided Machining (CAM), voľne preložené z angličtiny ako „počítačom podporované obrábanie“. Súčasť je rozdelená do trojuholníkov a sú využívané jednotkové normálové vektory a vrcholy trojuholníkov v 3D kartézkej sústave. Metóda má viacero interpretácií, my sme zvolili Standard Triangle Language (STL), čo vo voľnom preklade z angličtiny znamená „štandardná trojuholníková metóda“ na Obr. 1.27 [59].

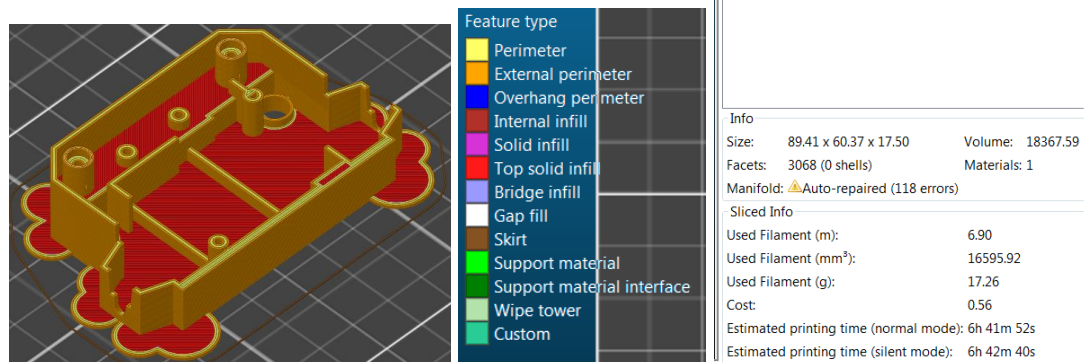


Obr. 1.27 Porovnanie vzhľadu rôznych formátov súborov využívaných v 3D tlači [60].



Obr. 1.29 (vľavo) Export do formátu .stl a (vpravo) vizualizácia formátu .stl.

Program ďalej otvoríme v programe Slic3r, ktorý otvorí súbor vo formát .stl a transformuje ho do G-kódu. Zároveň tu nastavujeme percento výplne, orientáciu na podložke a vidíme celkový čas výroby. Pri exporte z Inventoru do programu Slic3r zmení mierku z mm na cm, takže to nastavíme v správnom pomere. Výhodou programu je, že je voľne dostupný pod GNU Affero General Public licenciou. Autorom programu je Corey Daniels a jeho vznik je vďaka projektu RepRap [61]. Na Obr. 1.30 je znázornený jeden z modelov podvozku a jeho základné informácie.



Obr. 1.30 (vľavo) jednotlivé vrstvy a 50% výplň, (stred) legenda významu vrstiev materiálu, (vpravo) základné údaje o súčasti.

### 3. VOĽBA MATERIÁLU A POSÚDENIE TECHNOLOGIČNOSTI KONŠTRUKCIE

Výrobnú cenu hotového dielu výrazne ovplyvňuje jej konštrukčný návrh. Pri 3D tlači to môže znamenať rozdiel medzi zrnkovým výrobkom, ktorý z dôvodu neresného modelu je nevytlačiteľný alebo vytlačiteľný s chybami. Správna technologičnosť má ekonomicko – hospodársky význam a znižuje náklady na produkciu dielov.

Správne technologické poňatie je také, kedy konštruktér pristupuje k návrhu tak, aby jednotlivé súčasti boli funkčné z hľadiska ich výroby. V praxi rozlišujeme stupne technologičnosti konštrukcie a z pravidla posudzujeme nasledujúce parametre [62]:

- zníženie spotreby materiálu,
- zmenšenie pracnosti výroby,
- pokles nákladov na výrobu.

#### 3.1 Voľba materiálu

V realizačnej fáze sme v prvom rade vytlačili najmenší diel – Príloha 5 na 2 rôzne východzie materiály – ABS a PETG.

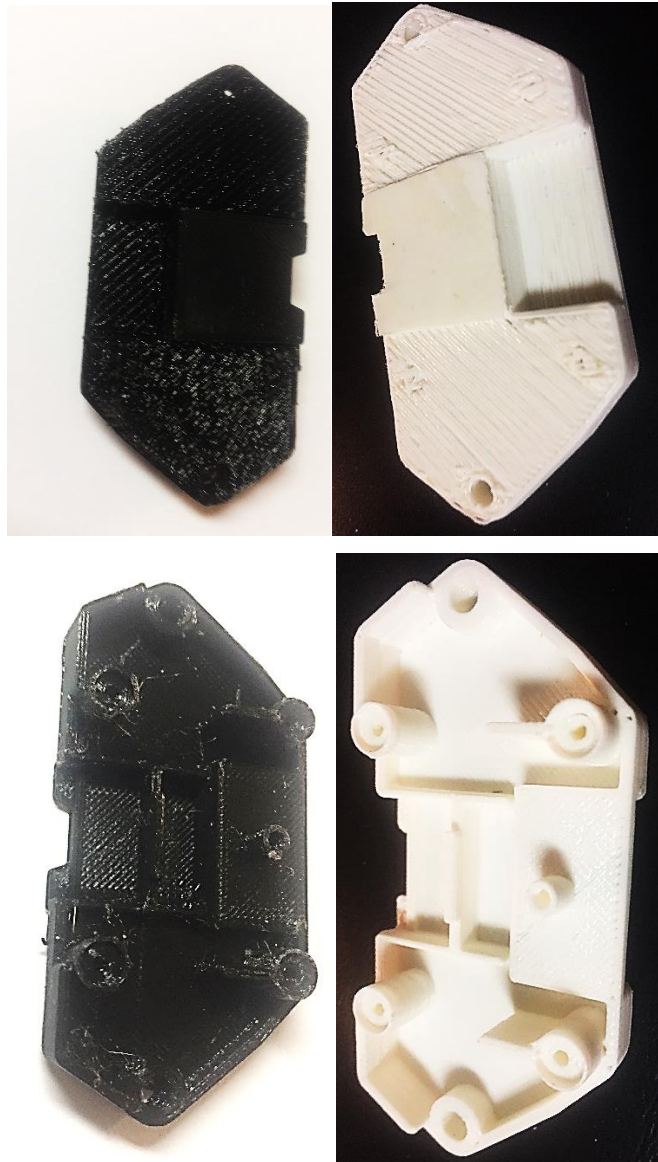
Materiál ABS je detailne popísaný v kapitole o materiále 1.5 a v Prílohách 1,3. Ide o termoplast s mierne vyššou pevnosťou ako PLA, ktorý je cenovo dostupný oproti komplikovanejšiemu materiálom napríklad so sklenenými vláknami. Využíva sa na výrobu funkčných prototypov aj v každodennej praxi. Ako materiál 3D tlače je náročný na zmrštenie počas tlače vyšších hrúbok (viacero vrstiev). Je ľahko opracovateľný a po výrobe a nehrozí jeho splastizovanie.

Na druhej strane PET-G. Materiál je modifikovaný glykol je detailne popísaný v kapitole o materiále 1.45 aj v Prílohe 1. Kombinuje vlastnosti ABS a PLA, adhézia medzi vrstvami je na vysokej úrovni, ale dochádza k výraznému zmršteniu. Vyžaduje pokročilé nastavenie pri samotnej tlači a pre optimálne parametre je nutné experimentovať viac ako pri napr. ABS. PET-G je náročnejší na dokončovacie operácie, nie je ľahko brúsiteľný, ale na druhej strane nám zabezpečí väčšiu dĺžku dielov ako pri materiáli ABS.

Vzhľadom na náročnú stupňovitú aplikáciu jednotlivých dielov, kde bude nutné použitie podpor a takisto na základe vytlačeného modelu z oboch materiálov sme sa rozhodli pre ABS materiál, čo pre nás znamenalo diely čo najviac „rozsekať“ z pôvodných 2, ktoré tvorili hlavnú kostru na: 8 dielov spodný kryt a 6 dielov horný kryt. Počet dielov teda predstavuje nárast o 700%, ale celková manipulácia pri tlači, opracovávanie aj množstvo materiálu, ktoré by sa pri pôvodnom tvare tlačilo spolu našim dielom kleslo.

Ďalšou charakteristikou pre ABS plastové diely je potreba technologických prvkov na spodnej časti výrobku, ktorý je v priamom styku s podložkou. Hovorovo medzi nadšencami 3D tlače sa im hovorí „packy“ pre ich kruhovitý priemer. Mali by sa nachádzať v každom rohu výrobku ale takisto aj v prechodoch medzi rovným a krivkovým tvarom súčasti ako sú rôzne kružnice, krivky, polkružnice, diery a pod. Tieto technologické prídavky majú zväčša hrúbku do 0,8 mm, aby boli ľahšie odstrániteľné v dokončovacích operáciách. Ich priemer je zväčša 12-16 mm.





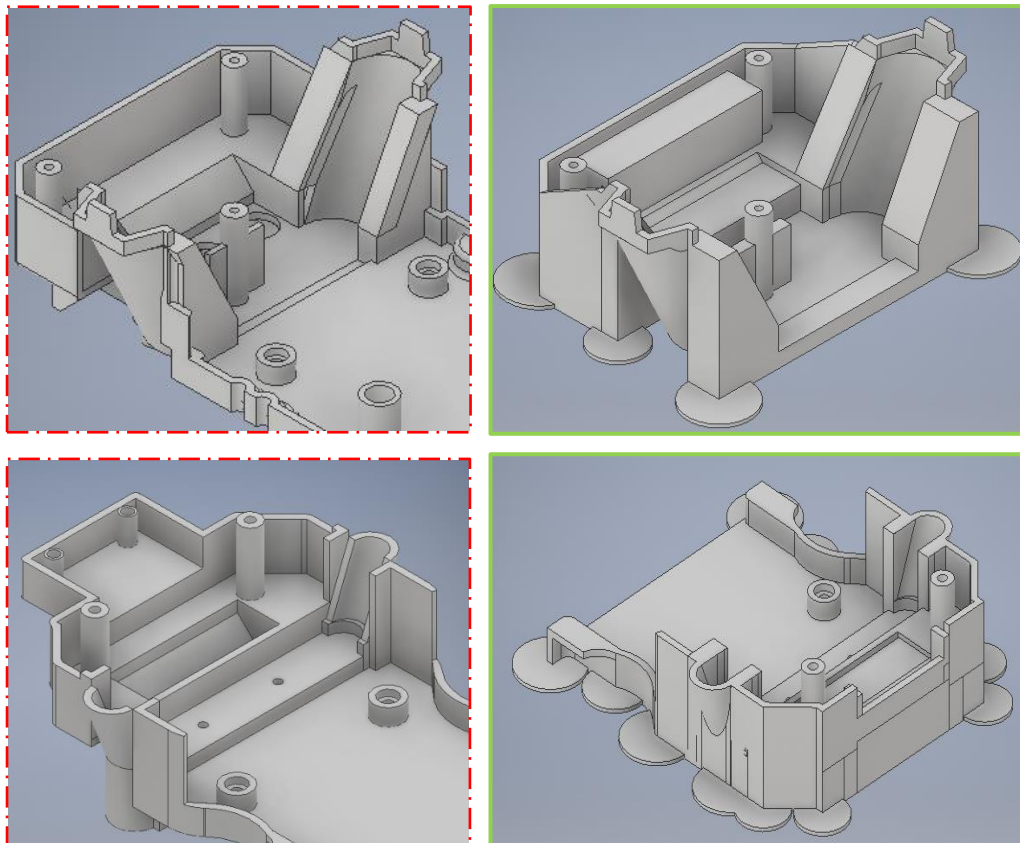
Obr. 1.31 stredný diel spredu a zozadu: (vľavo) PET-G materiál, (vpravo) materiál ABS.

### 3.2 Technologičnosť

Pri návrhu dielov sme vychádzali z existujúcich dielov, ktoré boli konvenčnou metódou výroby plastov pravdepodobne vyhotovené metódou vstrekovania plastov, ktorá je opísaná v kapitole 1.7. Konštrukčné riešenie a dizajn pre 3D tlač a všeobecne nekonvenčné metódy obrábania je zásadne špecifický. Pri 3D tlači vo všeobecnosti platí zásada: robiť jednoduché tvary tzv. „kocky“, ktoré sa po vytlačení obrúsia, zahľadia a prípadne zalakujú. Ak tvoria väčšie diely, tie sa ľahko spoja použitím vhodného rozpúšťadla daného materiálu.

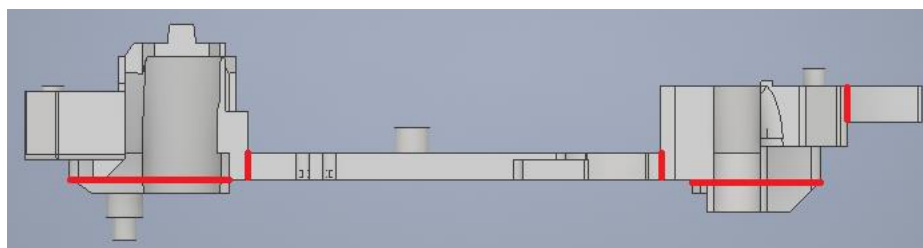
V našom prípade sme z pôvodne navrhnutého dielu zhotovili jednoduchší model. Nefunkčné plochy, ktoré predtým len simulovali niektoré prvky reálneho Jeepu, ale nemali funkčnosť, boli odstránené. Ďalej boli odstránené aj niektoré detaily vo vnútri horného a dolného dielu, ktoré tiež mali len estetickú funkciu.

Porovnanie dielov pred a po optimalizácii nájdeme v porovnaní Príloh 5, 6 s reálnymi dielmi z dvoch materiálov PET-G a ABS na Obr 1.31. V prípade stredného dielu je zjednodušovanie v najmenšom rozsahu. Väčší rozsah môžeme pozorovať práve pri hornom dieli (Obr. 1.32), kde prebehla redukcia estetických prvkov a boli ponechané len funkčné plochy. Na Obr. 1.32 je možné vidieť, že výstupný výčnelok (vľavo dole), bol odstránený z hlavného dielu horného dielu (vpravo dole). Počas tlače bol zhotovovaný osobitne a po tlači boli funkčné plochy zlepené. Síce podobnými úpravami rastie počet dielov, ale šetríme na množstve použitého materiálu na stavbu podpor, urýchľuje sa čas výroby dielu a znižuje náročnosť na opracovanie po tlači.



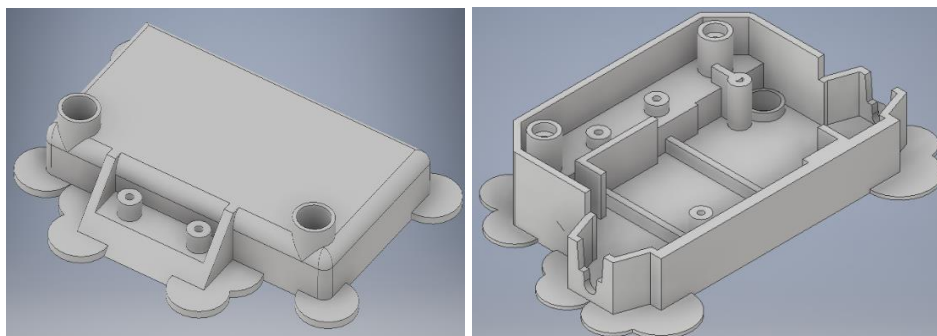
Obr. 1.32 Porovnanie dielov pred (vľavo) a po úprave (vpravo).

Medzi ďalšie úpravy patrilo aj rozdelenie komplikovaných súčastí, tak aby základnú vrstvu tvorila celistvá súčasť bez výstupkov. Rozdelenie dielov je demonštrované na hornom dieli, kedy sme 1 kus delili na 6 menších dielov znázornené na Obr. 1.33.



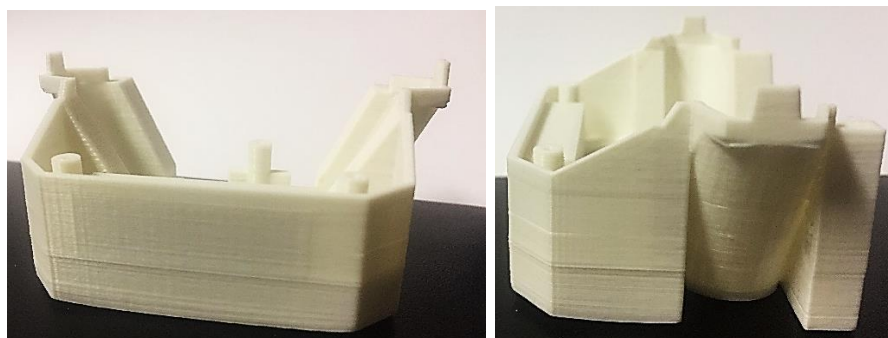
Obr. 1.33 Myslené rezy rovinami pre zjednodušenie dielov pri tlači.

Priamo rozdelený diel z celkového vrchného dielu podvozku môžeme vidieť na Obr. 1.34, ktorý bol rozdelený na 2 časti z dôvodu stupňovitosti plôch, ktoré môžeme zreteľne vidieť na Obr. 1.33. V procese návrhu dolného dielu sme postupovali tak, že pomyslený celok sme si rozdělili na menšie diely a tie sme rovno modelovali ako jednotlivé diely. Zjednodušil sa tak aj proces návrhu, pretože diely sú jednoduchšie.



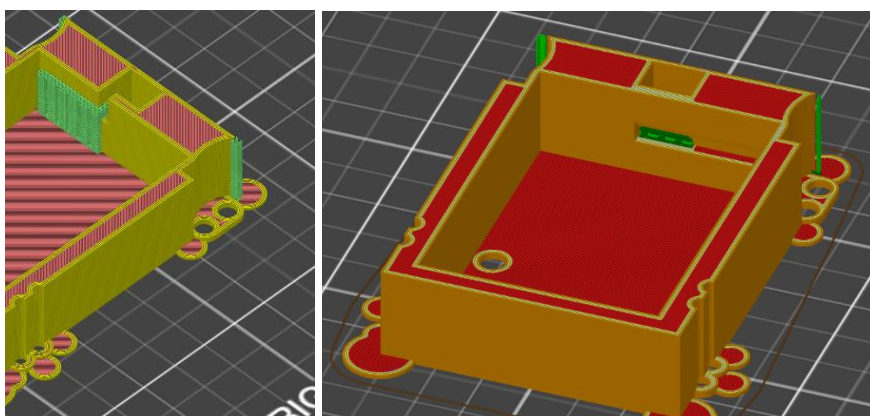
Obr. 1.34 Rozdelený diel (**vľavo**) spodná časť (**vpravo**) horná schránka dielu.

Ďalšie technologické úpravy, ktoré sme pred tlačou urobili bolo pridanie malých technologických kruhových prídavkov. Vďaka zvolenému materiálu ABS, sú diely náchylné na zmrštenie a deformáciu a vtedy si nezachovávajú rovné steny. Diel bez technologických prídavkov vyššej výšky je technologicky nefunkčný a ich porovnanie je na Obr. 1.35.



Obr. 1.35 Deformácia základnej hrany a jej ohyb pri tlači bez technologických prídavkov.

Ďalšie úpravy minimalizovali podpory. Pridanie prídavného zrazenia hornej hrany pre vyvedenie metalických káblov kategórie Cat.5 zo skrinky na batérie (Obr. 1.36).



Obr. 1.36: Tvorba podpor na dieli (**vľavo**) bez zrazenia (**vpravo**) so zrazením.

## 4.VÝROBA FUNKČNÝCH DIELOV

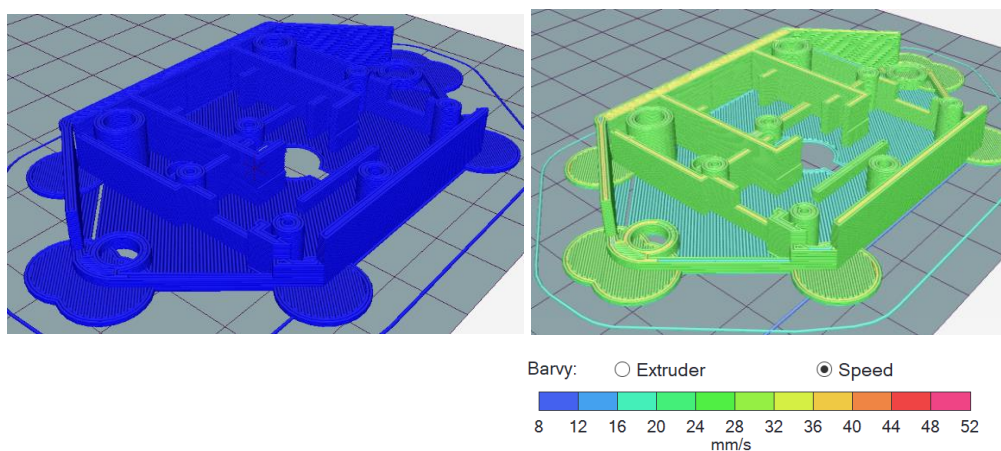
Po skompletizovaní všetkých dielov, pripravených pre 3D tlač v G - kóde sme mohli diely otvoriť v ovládacom programe pre tlačiareň. Na trhu ich existuje mnoho, pre názornosť uvádzame program Repetier Host 2.1.3. Každý program pre tvorbu G - kódu môže jednotlivé dráhy vytvoriť inak a program sa môže líšiť, preto nie sú všetky G - kódy kompatibilné vo všetkých programoch, ktoré využívajú súbory v tomto formáte. Programy Slic3r a Repetier Host sú kompatibilné a nie je problém s načítaním súboru.

Pre porovnanie oba programy zobrazujú dráhy a vieme si načítať aktuálnu želanú dráhu. Rozdiel je v kvalite prevedenia. Slic3r dokáže jednotlivé vrstvy materiálu farebne rozlíšiť podľa toho či sú podpora, výplň alebo vrstva materiálu (viď. Obr. 1.30). Repetier zobrazuje objekt jednou farbou a názornosť je pre užívateľa menšia. Pre nás je však užitočný, keď máme len G-kód a chceme zistiť všetky potrebné nastavenia tlačiarne alebo čas výroby dielu. Treba však podotknúť, že časy počítané softwarom sú odlišné od reálneho času, za ktorý je diel vytlačený. Ak si otvoríme 1 G- kód v textovom editore a v programe Repetier, tak, je čas výroby 52 min, 47s. Čas výroby v programe Repetier je 54 min, 29s. Rozdiel 2 minút medzi programami vieme odôvodniť:

- nastavením tlačiarne,
- pohyb trysky je nekonštantný = má určité zrýchlenie,
- tvarom súčasti – rýchlosť po priamkach je rýchlejšia,

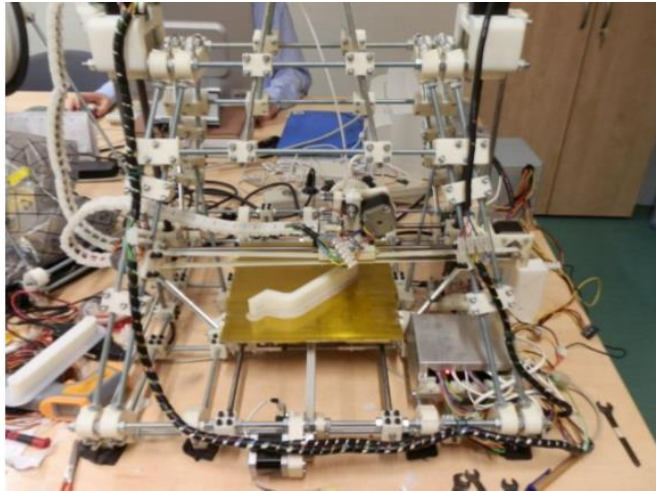
Rozdiel časov vieme nájsť pri všetkých súčastiach a ďalej bude náplňou 5. kapitoly práce. Náplňou práce nie je porovnávať tieto hodnoty, ale túto skutočnosť zohľadniť.

Zaujímavosťou v programe Repetier je farebné rozlíšenie. Prvá možnosť pre užívateľov je zobrazenie dráh extrúdera – to predstavuje modrá farba bez rozlíšenia farby podpor. Druhá možnosť je zobrazenie rýchlosti tlače extrúdera spolu s legendou. Obe varianty sú znázornené na Obr. 1.37. Rýchlosť pri tlačení spodnej vrstvy súčasti je nižšia ako 16-20 mm/s a pri tlači stien a tvarov, kedy extrúder vykonáva lineárne alebo pravidelné kruhové trajektórie je rýchlosť vyššia až do 28 mm/s, pretože tlač prebieha na menšej ploche ako pri tlačení celého spodného povrchu súčasti.



Obr. 1.37 (vľavo) zobrazenie dráh extrúdera, (vpravo) rýchlosť pohybu extrúdera s legendou.

Diely boli tlačené na 3D tlačiarňach pána Ing. Oskara Zemčíka, PhD. Typ tlačiarne je upravený RepRap, Rebel 2 na VUT FSI v Brne, z materiálu ABS.

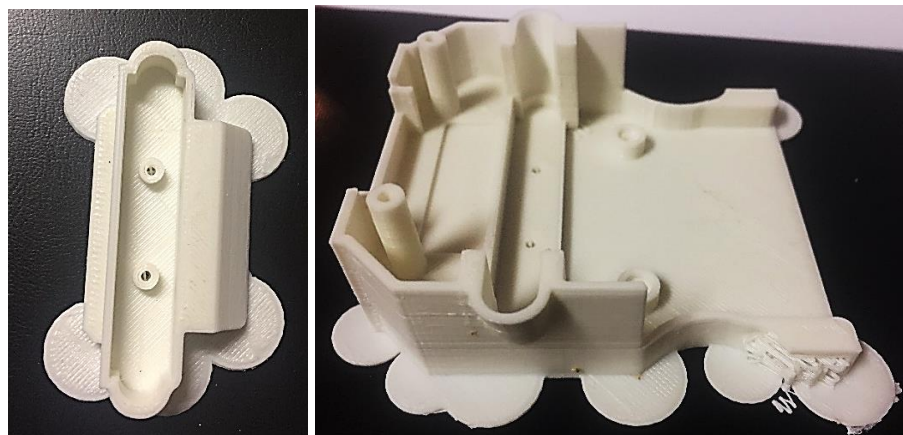


Obr. 1.38 RepRap 3D tlačiareň [63].

Parametre z G-kódu podľa, ktorých sa tlačili diely:

- šírka extrudovaného materiálu, výplňového materiálu = 0.45mm,
- pevná výplň = 0.45mm,
- vrchná vrstva výplne = 0.40mm,
- šírka extrudovaného materiálu pre podpory = 0.40mm,
- šírka extrudovaného materiálu v prvej vrstve = 0.52mm.

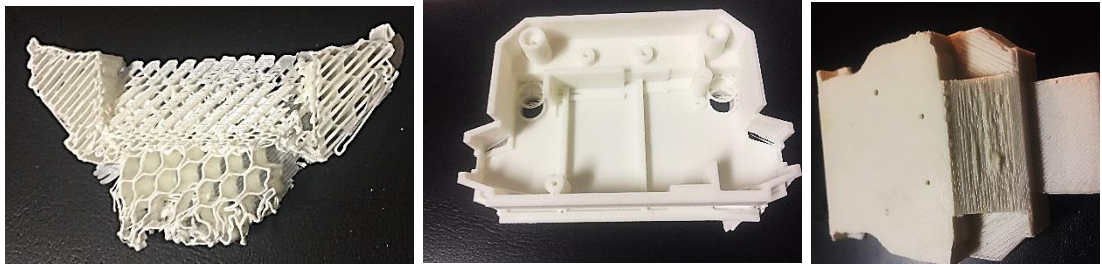
Každá tlač pomocou 3D tlačiarny by sa dala rozdeliť na 2 základné časti: tlač, (ukážka dielu po tlači je na Obr. 1.39), a dokončovacie operácie. V našom prípade sme v dokončovacích operáciách odstraňovali technologické prídavky, zahladzovali hrany modelárskymi pilníkmi a lepili jednotlivé diely do celku. Potom nastalo kompletovanie dielov s nápravou, nárazníkmi a ostatnými časťami Jeepu. Detailná fotodokumentácia zostavy tlačенých dielov a hotových dielov je predmetom Príloh 6 – 9.



Obr. 1.39 Ukážka vytlačených dielov dokončovacími operáciami (**vľavo**) bez podpor (**vpravo**) s podporami.

Počas realizácie sme využívali technologické úpravy vid'. Prílohy 6 – 9. Skoky medzi rovinami boli doplnené podporným materiálom. V súčasnosti existuje niekoľko druhov štruktúry podpor a na Obr. 1.40 môžete vidieť podporu v tvare včelích plástov v anglickom

jazyku tzv. „Honeycomb“. Ďalej je nutné počítať aj s vplyvmi prostredia. V našom prípade pri tlači jedného dielu prestala fungovať elektrina a pri jej opätovnom zapojení sa štruktúra posunula a vznikol tak neželaný „skok“ (vid'. Obr.1.40). Celý diel bol tým pádom zmätkový a výroba sa musela zrealizovať znova. Počas optimalizácie dielu, kde pôvodne boli veľké „schody“ tlačiareň spolu so softwarom vygenerovala podporu, tak že po jej odstránení bol prototyp zmätkový a jednotlivé podpory, ktoré tlačil „do vzduchu“ sa po určitom množstve vrstiev vplyvom deformácie ohli. Príklad súčasti nájdeme na Obr.1.40 dole.



Obr. 1.40 (vľavo) ukážka podpory, (stred) výpadok elektriny počas tlače, (vpravo) deformovaný diel.

Okrem 14 tlačených dielov sme na stavbu Jeepu využili ďalšie hotové súčasti zobrazené na Obr. 1.41. Schránku na baterky sme zaobstarali z internetového obchodu.



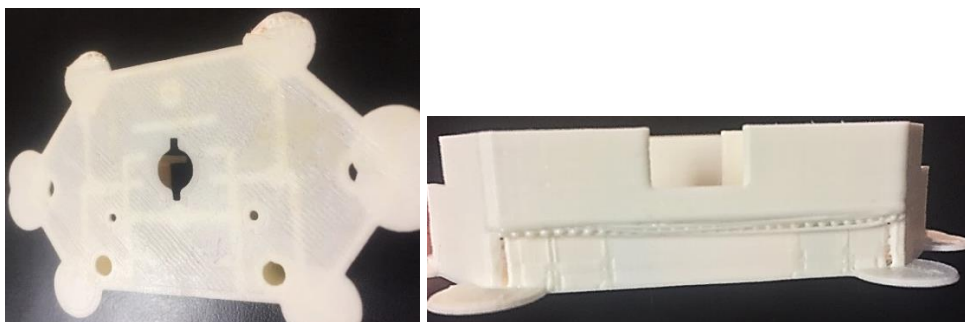
Obr. 1.41 Hotové diely modelu jeepu: (horná rada zľava) motor a zadná náprava, spojovací materiál, zadný blatník, predný blatník; (dolná rada zľava) schránka na baterky, karoséria, predné kolesá a prvky nápravy.

## 5. TECHNICKO – EKONOMICKÉ POSOUZENÍ

### 5.1 Technické posúdenie

Celkovo sa pri realizácii vytlačilo 14 dobrých dielov a 5 zmätkových dielov a 2 duplicitné diely. Výrobky považujeme za pevné, hrúbka steny základu dielu je 2,5 mm a hrúbka obvodových stien dosahuje 1,5 mm. Parametre jednotlivých dielov sú navrhnuté tak, aby v realizácii, pre každú vrstvu diery, boli aspoň 2 ideálne 3 dráhy materiálu (priemerne 2 – 3 mm).

Súčasti boli zhotovené z materiálu ABS, preto vyžadovali „rozsekanie“ na malé diely. ABS materiál má problém pri tlači veľkorozmerných dielov. Zároveň sa takto mohli tlačiť aj viaceré diely naraz, čo znížilo čas venovaný realizácii. V modeloch sa vyskytovalo pomerné množstvo defektov a chýb, ktoré automaticky odstraňovali použité programy. V prípade zlyhania programu bolo nutné vymyslieť nové konštrukčné riešenie. Ukážka nedostatočnej hrúbky povrchu a zároveň nevhodného sklonu, pre ktorý diel mohol vykazovať značné problémy je na Obr. 1.42.



Obr. 1.42 Chybný diel – nedostatočná hrúbka stien a previs dielu.

Všeobecne môžeme tvrdiť, že výroba prototypov v malých množstvách ako náhradné diely je časovo rýchlejšia ako výroba konvenčným spôsobom. Orientácia modelu na tlačovej doske môže taktiež urýchliť výrobu a skrátiť tento čas. Počas výroby je nutné počítať s dokončovacími operáciami – brúsením modelárskymi pilníkmi a lepením, ak sa jedná o zložitejšie aplikácie. V Prílohách 6 – 9 sú priložené diely: porovnania modelov s vytlačenými dielmi z 3D tlačiarne.

### 5.2 Ekonomické posúdenie

V ekonomickom zhodnotení využijeme ceny jednotlivých nákladov pre samotnú tlačiareň a tisk spolu s náročnosťou výroby jednotlivých výrobkov FDM 3D tlačou. Ekonomičnosť celej technológie ovplyvňuje niekoľko faktorov ako sú napr.: voľba materiálu a jeho cena, typ tlačiarne, technologičnosť navrhnutých dielov, ich počet, množství použitých podpor pri výrobe a v poslednom rade typ 3D tlačiarne.

Prototypy majú miestami podpory, ktoré boli odstránené v dokončovacích operáciách, preto náklady nemôžeme zanedbať. Estetickú úpravu povrchu sme síce nevykonávali, ale všetkých 14 dielov bolo lepených do funkčných dielov a tieto náklady sú tiež započítané v položkách ďalších nákladov spojených s realizáciou (Tab. 4).

Výpočet vychádza z tlačiarne pána Ing. Oskara Zemčíka, Ph.D. kde cena na prevádzku jeho tlačiarne, keď tlačiarne tlačí pravidelne, vychádzajú nasledujúce vstupy:

**Prevádzka tlačiarne: 25 Kč/ 1 hod**

**CENA ZA 1KG ABS, 1,75MM: 550 Kč**

**1cm<sup>3</sup> materiálu: 0,6 Kč**

Porovnanie ceny materiálu ABS (1kg, 1,75 mm) od rôznych predajcov je znázornené v Tab.2. Doba tlače a celkový objem je sčítaný z jednotlivých G-kódov. Je treba mať na pamäti, že počítame s teoretickými hodnotami, ktoré sa od reálneho času tlače môžu líšiť.

POROVNANIE CIEN ABS (1kg, 1,75 mm)	
Obchod	Cena [Kč]
MaterialPro3d.cz	599
czc.cz	339
3DJAKE.com	559
MaterialPro3d.cz	495
Profi-filaments.sk	429
Amazon.com	1108
vertex3dprinter.eu	516
reprapworld.com	517
alza.cz	389
PRIEMER [Kč]	550,11

Tab. 2 Porovnanie cien ABS materiálu u rôznych predajcov.

Časy výroby dielov a objem materiálu			
		čas [s]	objem [cm <sup>3</sup> ]
1	<i>maly diel</i>	3 239,00	6,50
2	<i>DS-PS-main1.1</i>	3 167,00	6,80
3	<i>DS-PS-main1.2</i>	4 175,00	7,90
4	<i>DS-middle - bottom</i>	4 315,00	9,10
5	<i>DS-middle - main</i>	12 209,00	25,80
6	<i>DS-PS-bottom</i>	6 878,00	5,34
7	<i>DS-LS-main</i>	21 936,00	13,55
8	<i>DS-LS-bottom</i>	10 444,00	7,97
9	<i>HD-LS-main1.1</i>	13 480,00	9,33
10	<i>HD-LS-main1.2</i>	32 220,00	19,09
11	<i>HD-PS-bottom</i>	8 460,00	5,53
12	<i>HD-PS-main 1.1</i>	26 520,00	17,89
13	<i>HD-PS-main 1.2</i>	2 798,00	1,69
14	<i>HD- LS-bottom</i>	6 249,00	3,96
SPOLU		156 090,00	140,45

Tab.3 Výpočet celkového času a objemu výroby.

### Výpočty nákladov



Náklady na prevádzku tlačiarnie:

$$N_p = t_t \cdot N_{hp} \quad (1)$$

$$N_p = t_t \cdot N_{hp} = 43,36 \cdot 25 = 1084 \text{ Kč}$$

Náklady na spotrebovaný materiál:

$$N_m = V_m \cdot N_{mcm} \quad (2)$$

$$N_m = V_m \cdot N_{mcm} = 140,45 \cdot 0,6 = 84,27 \text{ Kč}$$

Celkové náklady pro 3D tlač:

$$N_c = N_p + N_m \quad (3)$$

$$N_c = N_p + N_m = 1084 + 84,27 = 1168,27 \text{ Kč}$$

Počas merania dielov jeepu až do samotnej montáže dielov vznikali aj vedľajšie výdavky, kedy sme museli zaobstarat' potrebnú položku. Prehľadný zoznam položiek s predajcom a cenou v Kč je v Tab.4.

Ďalšie výdaje spojené s realizáciou		
Věc	Predajca	Cena [Kč]
Skrinka na batérie	laskaarduino.cz	36
Acetón	levne-barvy.cz	51
Digitálne posuvné meradlo	pocitivityeshop.cz	272
Ochranné pomôcky (rúška, gumené rukavice)	BAUHAUS	70
Kliešte	BAUHAUS	250
Modelárske pilníky	kamody.cz	132
Brúsny papier, sada BOSH	kamody.cz	55
<b>SPOLU [Kč]</b>		866

Tab 4. Ďalšie realizačné výdaje

Celkové náklady na realizáciu:

$$N_{tot} = N_c + N_o \quad (4)$$

$$N_{tot} = N_c + N_o = 1168,27 + 866 = 2034,27 \text{ Kč}$$

Celkové náklady na kúpu nového modelu:

$$N_k = 490,10 \text{ Kč}$$

Z celkových cien vyplýva že tvorba dielov podvozku je v celkových nákladoch o 415,71% vyššia ako kúpa nového modelu jeepu

## ZÁVER

Metóda výroby dielov 3D FDM tlačou patrí medzi bežné nekonvenčné metódy a už od svojho vzniku sa neustále zdokonaľuje a vylepšuje. Rápidny vývoj podporil hlavne projekt RepRap, ktorý umožnil lacnejšiu obstarávaciu cenu 3D tlačiarní.

Bakalárska práca bola zameraná na popis základných princípov FDM metódy, dielov 3D tlačiarne a ich výhod a nevýhod, zhrnutie použitých materiálov a porovnanie s konvenčnými technológiami výroby plastových dielov. Z teoretickej rešerše a praktickej výroby dielov vyplynulo, že:

- modely sú určené na manipuláciu v normálnych fyzikálnych podmienkach 101 325 Pa a teplotách 10 – 40 °C;
- pre tvorbu dielov bol zvolený materiál AB v bielej farbe;
- celková tvorba dielov trvala 43,36 hod a spolu tvorí objem 140,45 cm<sup>3</sup>;
- technologičnosť výrobkov znásobila počet dielov z 3 na 14 dielov, tj. o 700%;
- celkové náklady na výrobu zahrňujúce náklady na prevádzku 3D tlačiarne a materiál ABS sú 1168,27 Kč, čo je nárast o 238,38% v porovnaní s novým modelom;
- celkové náklady na výrobu zahrňujúce náklady na prevádzku 3D tlačiarne a materiál ABS a sprievodné náklady sú 2034,27 Kč, čo je nárast o 238,37% v porovnaní s novým modelom;
- realizácia zostavy potvrdila, že je výhodnejšie kúpiť nový diel jeepu ako tvoriť náhradné komponenty pre celý podvozok jeepu;
- cena za materiál ABS v nami vybraných predajcov sa pohybuje od 339 – 1108 Kč;
- medzi teoretickými hodnotami v programe Repetier Host a otvorením G-kódu v poznámkovom bloku sú rozdiely približne 2 min a oba údaje neodpovedajú reálnemu času tlačiarne, pretože nezahŕňajú nelinearitu pohybu trysky.

**ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV**

1. PRŮŠA, Jozef a Michal PRŮŠA. *Základy 3D tisku* [online]. , 12 [cit. 2019-02-17]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/wp-content/uploads/zaklady-3d-tisku.pdf>
2. *Konstruktér : CAD - CAM - PLM - obrábění - 3D tisk - výroba - automatizace*. Praha: Springwinter, 2015, **1**(4). ISSN 1805-8590.
3. SALENTIJN, Gert IJ., Pieter E. OOMEN, Maciej GRAJEWSKI a Elisabeth VERPOORTE. Fused Deposition Modeling 3D Printing for (Bio)analytical Device Fabrication: Procedures, Materials, and Applications. *Analytical Chemistry* [online]. 2017, **89**(13), 7053-7061 [cit. 2019-02-17]. DOI: 10.1021/acs.analchem.7b00828. ISSN 0003-2700. Dostupné z: <http://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.analchem.7b00828>
4. MALIK, Hammad H., Alastair R.J. DARWOOD, Priyantha KULATILAKE, Abdulrahman A. L-HILLY, Omar MULKI a Aroon BASKARADAS. Three-dimensional printing in surgery: a review of current surgical applications. *Journal of Surgical Research* [online]. 2016, **199**(2), 11 [cit. 2019-02-17]. DOI: 10.1016/j.jss.2015.06.051. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022480415007295?via%3Dihub>
5. Brian N. Turner, Robert Strong, Scott A. Gold, (2014) "A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling", *Rapid Prototyping Journal* [online]. 2013, **20**(3), pp.192-204 [cit. 2019-02-17]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1108/RPJ-01-2013-0012>
6. *Starter Temperatures & Printing Guide* [online]. 23.1.2015 [cit. 2019-02-20]. Dostupné z: <https://filaments.ca/pages/temperature-guide>
7. Fused Deposition Modeling (FDM). *Custompartnet* [online]. [cit. 2019-02-17]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>
8. Fused Deposition Modeling (FDM). *Materialise* [online]. [cit. 2019-02-17]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/cs/manufacturing/technologie-materialy-a-dokoncovaci-upravy/fused-deposition-modeling-fdm>
9. GEBHARDT, Andreas. *Understanding additive manufacturing: rapid prototyping - rapid tooling - rapid manufacturing*. Munich: Hanser, c2012. ISBN 978-1-56990-507-4.
10. GEARY, Jeff a Dave RENSHAW. *3D printing & laser cutting: a railway modelling companion*. Addlestone: Ian Allan Publishing, 2016, 192 stran : barevné ilustrace. ISBN 978-0-7110-3841-7.
11. GROOVER, Mikell P. *Principles of modern manufacturing: SI version*. 5th ed. Singapore: John Wiley, c2013. ISBN 978-1-118-47420-4.

12. 3D tisk–metody. *I4220* [online]. 1.5.2013 [cit. 2019-02-20]. Dostupné z: <http://www.14220.cz/technologie/3d-tisk-metody/>
13. REDWOOD, Ben, Filemon SCHÖFFER a Brian GARRET. *The 3D printing handbook: technologies, design and applications*. Amsterdam: 3D Hubs, [2017]. ISBN 978-90-827485-0-5.
14. 3D printing best practices: Part orientation. *GRABCAD* [online]. 3.8.2019 [cit. 2019-02-20]. Dostupné z: <https://help.grabcad.com/article/205-3d-printing-best-practices?locale=en#orientation>
15. PRŮŠA, Jozef a Tomáš CHVALINA. *First layer calibration and Live adjust Z* [online]. 2018 [cit. 2019-02-20]. Dostupné z: <https://help.prusa3d.com/article/ZhBIGFD9Ah-live-adjust-z>
16. HUDSON, Ben. How to design parts for FDM 3D Printing. *3D Hubs* [online]. [cit. 2019-03-02]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/how-design-parts-fdm-3d-printing>
17. DVOŘÁK, Jan. *Technologické možnosti aditivních technologií Praha 2017*. Praha, 2017. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Liboru Beránkovi, Ing., Ph.D.
18. DUL, Sithiprumnea, Haaron MAHMOOD, Luca FAMBRI a Alessandro PEGORETTI. GRAPHENE-ABS NANOCOMPOSITES FOR FUSED DEPOSITION MODELLING. *ECCM17 - 17th European Conference on Composite Materials*. Mníchov, 2016, , 8.
19. MOŠNER, Ladislav. *Vlastní 3D tiskárna*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta informačních technologií, 2015.
20. The 3D printer that prints itself. *RepRap* [online]. 19.10.2018 [cit. 2019-02-20]. Dostupné z: <https://reprap.org/wiki/About>
21. KLOSKI, Liza Wallach a Nick KLOSKI. *Začínáme s 3D tiskem*. Brno: Computer Press, 2017, 211 stran : ilustrace. ISBN 978-80-251-4876-1
22. Anatomy of a 3D Printer: How Does a 3D Printer Work?. *MatterHackers* [online]. 4.2.2016 [cit. 2019-02-22]. Dostupné z: <https://www.matterhackers.com/articles/anatomy-of-a-3d-printer>
23. GEBHARDT, Andreas. *Understanding additive manufacturing: rapid prototyping - rapid tooling - rapid manufacturing*. Munich: Hanser, c2012. ISBN 978-1-56990-507-4.
24. LulzBot TAZ 6. *NORDE* [online]. [cit. 2019-02-22]. Dostupné z: <https://norde.com.ph/product/lulzbot-taz-6/>

25. KUTIL, Jaroslav. Vliv průměru trysky na kvalitu tisku 3D tiskárny. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 69s. Vedoucí diplo-mové práce Ing. Oskar Zemčík, Ph.D
26. REDWOOD, Ben, Filemon SCHÖFFER a Brian GARRET. *The 3D printing handbook: technologies, design and applications*. Amsterdam: 3D Hubs, [2017]. ISBN 978-90-827485-0-5.
27. REDWOOD, Ben, Filemon SCHÖFFER a Brian GARRET. *The 3D printing handbook: technologies, design and applications*. Amsterdam: 3D Hubs, [2017]. ISBN 978-90-827485-0-5.
28. CHUA, Chee Kai a Kah Fai LEONG. 3D printing and additive manufacturing: principles and applications. Fifth edition of Rapid prototyping. New Jersey: World Scientific, 2017, 426 stran : ilustrace. ISBN 978-981-3146-76-1.
29. GROOVER, Mikell P. *Principles of modern manufacturing: SI version*. 5th ed. Singapore: John Wiley, c2013. ISBN 978-1-118-47420-4.
30. Better, Stronger and Safer with Kevlar® Fiber. *DuPont* [online]. [cit. 2019-03-01]. Dostupné z: <http://www.dupont.com/products-and-services/fabrics-fibers-nonwovens/fibers/brands/kevlar.html>
31. 3D printing best practices: Part orientation. *GRABCAD* [online]. 3.8.2019 [cit. 2019-02-20]. Dostupné z: <https://help.grabcad.com/article/205-3d-printing-best-practices?locale=en#orientation>
32. SHER, Davide. *EOS introduces one million diode LaserProFusion AM technology for polymers* [online]. 8.11.2018 [cit. 2019-03-01]. Dostupné z: <https://www.3dprintingmedia.network/eos-one-million-diode-laserprofusion/>
33. ASHBY, M. F. *Materials selection in mechanical design*. Fifth edition. Amsterdam: Elsevier, [2017]. ISBN 978-0-08-100599-6.
34. SMITH, William F. a Javad HASHEMI. *Foundations of materials science and engineering*. 5th ed. Boston: McGraw-Hill, c2010. ISBN 978-0-07-352924-0.
35. ALLISTER, William D. a David G RETHWISCH. *Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach*. 4th ed. Hoboken, N.J: John Wiley, 2012, [21]v, 910 s. : il. ; 27 cm. ISBN 978-1-118-06160-2.
36. Markforged. In: *Markforged* [online]. 2019 [cit. 2019-03-12]. Dostupné z: <https://markforged.com/x3/>
37. *Printed Electronics world: Bringing functional materials to 3D printing* [online]. In: . 3.4.2015 [cit. 2019-03-12]. Dostupné z: <https://www.printedelectronicsworld.com/articles/7637/bringing-functional-materials-to-3d-printing>

38. Injection Molding Process. In: *Xcentric Mold and Engineering* [online]. 2019 [cit. 2019-03-12]. Dostupné z: <https://www.xcentricmold.com/injection-molding-process/>
39. *Researchgate: Overview of a plastic extrusion machine* [online]. In: . 2017 [cit. 2019-03-12]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/Overview-of-a-plastic-extrusion-machine-with-the-plasticizing-component-in-evidence-The\\_fig1\\_321597264](https://www.researchgate.net/figure/Overview-of-a-plastic-extrusion-machine-with-the-plasticizing-component-in-evidence-The_fig1_321597264)
40. EVRARD, ALAIN. *Installation for blow molding thermoplastic polymer containers: Espacenet (European Patent Office)*. Francúzsko. US2004202747 (A1). Uděleno 6.2.2007.
41. GOYANES, Alvaro, Jie WANG, Asma BUANZ, Ramón MARTÍNEZ-PACHECO, Richard TELFORD, Simon GAISFORD a Abdul W. BASIT. 3D Printing of Medicines: Engineering Novel Oral Devices with Unique Design and Drug Release Characteristics. *American Chemical Society: molecular pharmaceutics*. 2015, **12**(11), 4077–4084. DOI: 10.1021/acs.molpharmaceut.5b00510.
42. PAPAGEORGIOU, Marianna. Very small and very large 3D printers: The best on the market. *Sculpteo* [online]. 21.2.2018 [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/blog/2018/02/21/very-small-and-very-large-3d-printers-the-best-on-the-market/>
43. SWANSON, William J., Patrick W. TURLEY, Paul J. LEAVITT, Peter J. KARWOSKI, Joseph E. LABOSSIERE a Robert L. SKUBIC. *High temperature modeling apparatus*. USA. US6722872B1. Uděleno 20.4.2004.
44. RICHA. *Troubleshooting: Stop your Print Layers from Splitting* [online]. In: . 7.2.2018 [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: <http://www.geeetech.com/blog/2018/02/troubleshooting-stop-your-print-layers-from-splitting/>
45. LOWRY, Steve. *How to stop 3D prints from warping* [online]. In: . 15.5.2018 [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: <https://www.gearbest.com/blog/how-to/how-to-stop-3d-prints-from-warping-2647>
46. ZEMČÍK, Oskar. Konzultácia práce [ústní rozhovor]. 18.3.2019.
47. Olsson Ruby Nozzle Bundle - 1.75mm. In: *Matterhackers* [online]. [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: <https://www.matterhackers.com/store/l/olsson-ruby-nozzle-bundle-175mm/sk/MJOGCUGT>
48. E3D v6 Extra Nozzle Fun Pack 1.75mm. In: *Matterhackers* [online]. [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: <https://www.matterhackers.com/store/printer-accessories/e3d-v6-extra-nozzle-fun-pack-1.75mm>

49. SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard Gordon BUDYNAS. *Konstruování strojních součástí*. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0
50. RUDOLF, Pavel. Hydromechanika – Hydrostatika, VUT,FSI. [prednáška 3]. 25.2.2019. Brno. [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: [https://drive.google.com/drive/u/3/folders/1eRZc6fU4KS\\_kWwo9BVj7rvzcWH43B3vC](https://drive.google.com/drive/u/3/folders/1eRZc6fU4KS_kWwo9BVj7rvzcWH43B3vC)
51. CHARKAVORTY, Dibya. Dissolvable 3D printing support structures. In: *All3DP* [online]. 17.1.2019 [cit. 2019-03-24]. Dostupné z: [https://i.all3dp.com/wp-content/uploads/2018/04/26153053/dissolvable\\_support-1.jpg](https://i.all3dp.com/wp-content/uploads/2018/04/26153053/dissolvable_support-1.jpg)
52. GO, Jamison a A. john HART. Fast Desktop-Scale Extrusion Additive Manufacturing. *Additive Manufacturing* [online]. Elsevier B.V, 2017, **18**(C), 276-284 [cit. 2019-03-25]. DOI: 10.1016/j.addma.2017.10.016. ISSN 2214-8604.
53. JACKSON, Beau. MIT develops FastFFF – the speediest desktop 3D printer to date. *3D printing industry* [online]. 24.10.2018 [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/mit-develops-fastfff-speediest-desktop-3d-printer-date-125283/>
54. JAVUREK, Karel. Nová 3D tiskárna. *VTM* [online]. 9.12.2018 [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: <https://vtm.zive.cz/clanky/nova-3d-tiskarna-je-10-rychlejsi-nez-soucasne-modely-pro-domaci-i-komerčni-trh/sc-870-a-196291/default.aspx>
55. SHAHRAIN, Mahmood, Talamona DIDIER, Goh kheng LIM a A.j. QURESHI. Fast Deviation Simulation for ‘Fused Deposition Modeling’ Process. *Procedia CIRP* [online]. Elsevier B.V, 2016, **43**, 327-332 [cit. 2019-04-05]. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.004. ISSN 2212-8271.
56. Types of CAD Software. DesignTech CAD (Training) Academy [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.designtechcadacademy.com/knowledge-base/cad-software-types>
57. R/C Monster Truck Jeep. In: *Hetspeelhuys* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://i1.wp.com/hetspeelhuys.nl/wp-content/uploads/2019/04/r.c-monster-truck-jeep.jpg?zoom=1.5&fit=1024%2C1024&ssl=1>
58. VAŇKOVÁ, Monika. Digitální posuvné meraldo: Příručka k obsluze. Milovice, Česká Republika. Milovice, 2009.
59. The StL Format. Fabbers [online]. Ennex Corporation [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: [http://www.fabbers.com/tech/STL\\_Format](http://www.fabbers.com/tech/STL_Format)

60. Convert Stl Into Editable Cad File. In: Fiverr [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: [https://fiverr-res.cloudinary.com/images/t\\_main1,q\\_auto,f\\_auto/gigs2/12908514/original/3c1ccacdee1286931a2949836d4aba1508318996/convert-stl-into-the-editable-cad-file.jpg](https://fiverr-res.cloudinary.com/images/t_main1,q_auto,f_auto/gigs2/12908514/original/3c1ccacdee1286931a2949836d4aba1508318996/convert-stl-into-the-editable-cad-file.jpg)
61. About Slic3r. Slic3r [online]. 2011 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://slic3r.org/about/>
62. KUŽELA, Zdeněk. Technická příprava výroy (TPV)-Technologičnost konstrukce strojních součástí SŠ -COPT Uherský Brod. [odborový výklad]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: [dumy.cz/stahnout/115353](http://dumy.cz/stahnout/115353)



**ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK****ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

Skratka	Význam
2D	Dvojrozmerný
3D	Trojrozmerný
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
ADAM	Atomic Diffusion Additive Manufacturing
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Machining
CFF	Continuous Filament Fabrication
G- kód	Názov typu súboru pre 3D tlač
FDM	Fused deposition modeling
FFF	Fused filament fabrication
PLA	Polyaktid
PPM	Part Property Management
PPPs	part property profiles
RP	Rapid Prototyping
RepRap	Replicating Rapid Phototyper
STL	Standard Triangle Language

Symbol	Jednotka	Popis
$N_p$	[Kč]	náklady na prevádzku tlačiarne
$N_{tot}$	[Kč]	$N_{tot}$ celkové výdaje na realizáciu
$N_{hp}$	[Kč.hod <sup>-1</sup> ]	náklady na hodinovú prevádzku
$N_m$	[Kč]	náklady na spotrebovaný materiál
$N_o$	[Kč]	ostatné výdaje
$N_{mcm}$	[Kč.cm <sup>-3</sup> ]	náklady na 1 cm <sup>3</sup> materiálu
$N_c$	[Kč]	celkové náklady na tlač
$N_p$	[Kč]	náklady na prevádzku tlačiarne
$N_m$	[Kč]	náklady na spotrebovaný materiál
$t_t$	[hod]	celkový čas tlače
$V_m$	[cm <sup>3</sup> ]	objem použitého materiálu

**ZOZNAM PRÍLOH**

Príloha 1	Vybrané materiály používané pre FDM tlač a ich vlastnosti
Príloha 2	Porovnanie mechanických vlastností spčastí tlačených vertikálne a horizontálne
Príloha 3	Materiálové charakteristiky vybraných termoplastov
Príloha 4	Ukážka Drôteného modelu v programe AUTODESK AutoCAD 2017.
Príloha 5	3D vizualizácia horného dielu v programe AUTODESK Inventor Professional 2017.
Príloha 6	3D vizualizácia a realizácia 1. - 4. diel
Príloha 7	3D vizualizácia a realizácia 5. - 8. diel
Príloha 8	3D vizualizácia a realizácia 9. - 12. diel
Príloha 9	3D vizualizácia a realizácia 13. - 14. diel
Príloha 10	Zostava dielov podvozku

