



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

SPOLEHLIVOST HOBBY 3D TISKÁREN REP-RAP

A RELIABILITY OF A 3D REP-RAP PRINTERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Peter Lukačovič

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Kočiš

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student: **Peter Lukačovič**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Petr Kočiš**
Akademický rok: 2015/16

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:

Spolehlivost hobby 3D tiskáren Rep-rap

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Téma práce spadá do oblasti 3D tisku. Práce bude mít podobu odborné rešerše i řešení dílčího technického problému.

Cíle bakalářské práce:

Závěrečná práce bude obsahovat 2 části: teoretickou a praktickou.

Cíle teoretické části:

- podrobný popis mechanické části Rep-Rap tiskáren (druhy kinematiky)
- podrobný popis elektroniky a pohonů (různé druhy desek)
- přehled firmwarů a jejich možnosti

Cíle praktické části:

- zjištění hlavních příčin špatného tisku součástí
- realizace experimentů pro dosažení zlepšení spolehlivosti tisku

Seznam literatury:

Airtripper's 3D Printer and Arduino Blog,
<http://airtripper.com/1145/marlin-firmware-v1-basic-configuration-set-up-guide/>, přístup 25. listopadu 2015

CNC fórum, <http://www.c-n-c.cz/viewtopic.php?f=81&t=11416>, přístup 25. listopadu 2015

NEXTDAYREPRAP, <http://www.nextdayreprap.co.uk/>, přístup 25. listopadu 2015

REBEL 3D, <http://www.rebelove.org/portal.php>, přístup 25. listopadu 2015

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Táto bakalárska práca sa zaoberá opisom 3D tlačiarň z open-source programu RepRap, s cieľom priblížiť princípy ich fungovania spolu s hlavnými výhodami a nevýhodami. Ďalej práca rieši problémy s kvalitou výtlačku a snaží sa navrhnúť ich zlepšenie pomocou hardvérovej alebo softvérovej úpravy.

ABSTRACT

This bachelor thesis describes 3D printers of RepRap open-source system, in order to explain principles of operation with main advantages and disadvantages. The thesis also solves problems with printing quality and suggests some hardware and software improvements.

KĽÚČOVÉ SLOVÁ

Hobby 3D tlačiareň, program RepRap, kinematika 3D tlačiarň, firmaware 3D tlačiarň, krokové motory, kvalita 3D tlače

KEYWORDS

Hobby 3D printers, program RepRap, kinematics of 3D printers, firmware of 3D printers, stepper motors, quality of 3D print

BIBLIONGRAFICKÁ CITÁCIA

LUKAČOVIČ, P. *Spolehlivost hobby 3D tiskáren Rep-rap*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 50 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Kočíš.

POĎAKOVANIE

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce Ing. Petrovi Kočišovi za metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri riešení bakalárskej práce. Ďalej by som chcel poďakovať svojej rodine za podporu počas celej doby štúdia.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že táto práca je mojím pôvodným dielom, spracoval som ju samostatne pod vedením Ing. Petra Kočiša a s použitím literatúry uvedenej v zozname.

V Brne dňa 24.4.2016

.....

Peter Lukačovič

OBSAH

1	ÚVOD	10
2	MOTIVÁCIA.....	11
3	DRUHY KINEMATIKY	12
3.1	Karteziánsky typ kinematiky.....	12
3.2	Deltový typ kinematiky.....	13
3.3	Kinematika CoreXY a H-bot	14
3.4	Kinematika SCARA zariadení	16
3.5	Polárna kinematika	17
4	TYPY 3D TLAČE	18
4.1	Technológie Selective Laser Sintering a Selective Laser Melting (SLS a SLM).....	18
4.2	Fused deposition modelling (FDM)	19
4.3	Stereolitografia (SLA), Digital Light Processing (DLP)	20
4.4	Laminated Object Manufacturing (LOM)	21
5	ZÁKLADOVÉ DOSKY REPRAP	23
5.1	Ramps 1.4	23
5.2	RAMBo.....	24
5.3	Megatronics.....	25
5.4	Sanguinololu	26
5.5	Printrboard	27
5.6	Melzi	27
5.7	Generation 7 electronics	28
6	PRAKTICKÁ ČASŤ.....	30
6.1	Spôsoby zlepšenia kvality tlače	30
6.2	Najčastejšie problémy pri tlači na hobby tlačiarňach	31
6.3	Upchávajúce extrudéry	31
6.4	Zasekávajúce filamenty medzi vozíkom osi X a hotendom	33
6.5	Nedostatočné podávanie filamentu	33
6.6	Uchytenie vozíku osi Y na lineárne vedenie	34
6.7	Nedostatočné napnutie remeňov	34
6.8	Nadmerné opotrebenie na osi Z a nerovnomernosť pohybu	36
6.9	Nestále uloženie matice pre pohyb v smere osi Z.....	37
6.10	Nestabilná poloha vyhrievanej dosky na vozíku osi Y	38
6.11	Nastavenie kvality tlače pomocou sliceru [36].....	39
6.11.1	Nedostatočné a nadmerné vytlačovanie termoplastu z trysky.....	39

6.11.2	Zanechávanie tenkých vlákien plastu pri rýchlo posuve trysky.....	40
6.11.3	Prehrievanie filamentu	40
6.11.4	Zdvíhanie rohov modelu.....	41
6.11.5	Oddeľovanie vrstiev.....	42
6.11.6	Nedostatočná výplň modelu	43
6.11.7	Medzery medzi obrysami a výplňou.....	44
6.11.8	Vznik líní na boku výtlačku	45
6.11.9	Viditeľnosť vibrácií a vrúbkovania na výtlačku	45
7	ZÁVER.....	46
8	ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV	47
9	ZOZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKOV A TABULIEK.....	49
9.1	Zoznam tabuliek	49
9.2	Zoznam obrázkov	49
9.3	Zoznam pojmov a skratiek.....	50
10	ZOZNAM PRÍLOH.....	51

1 ÚVOD

V dnešných dňoch sa čoraz viac rozširuje fenomén s názvom „3D tlačiareň“. Slovné spojenie „3D tlačiareň“ sa čoraz viac objavuje na internete v rôznych článkoch a projektoch. Neustále počúvame o neobmedzených možnostiach, ktoré so sebou prinášajú. Postupne sa oboznamuje aj široká verejnosť s možnosťami a princípmi fungovania zariadení. Už aj menej zainteresovaní ľudia vedia, že tieto tlačiarne dokážu tlačiť predmety od minimálnych rozmerov vhodných len na dekoráciu až po veľké a funkčné predmety.

3D tlač sa dostávala do povedomia verejnosti až v posledných rokoch, aj keď sa vyvíjala už niekoľko rokov. Počiatky aditívnej výroby (Additive manufacturing), ako sa 3D tlač skôr nazývala, má počiatky už v roku 1984, kedy si Chuck Hull dal patentovať princíp stereolitografie. Postupom času sa táto technológia vyvíjala a k nej pribudlo množstvo iných technológií 3D tlače.

Dnes ľudom význam slova „3D tlač“ zväčša pripomína technológiu FDM (Fused Deposition Modelling). Je to technológia nanášania vrstvy plastového materiálu po vrstve. Táto technológia bola vyvinutá a uvedená na trh v roku 1990 S. Scottom Crumpom. Asi najväčšiu zásluhu na rozšírení tlačiarň s týmto typom tlače mal Adrian Bowyer, ktorý je zakladateľom open-source programu RepRap.

Program RepRap bol prvý krát predstavený verejnosti cez internet vo februári roku 2004. Slovo RepRap je skratka pre Replicating Rapid-prototyper, čo vo voľnom preklade znamená kopírovanie zariadenia pre rapid prototyping. Jedná sa o program, kde vytvorenie jedného zariadenia potrebujeme tlačené súčiastky z inej 3D tlačiarne. Program taktiež ponúka voľne šíriteľné návody na stavbu 3D tlačiarň z bežne dostupných materiálov a súčiastok. Týmto spôsobom docielili tvorcovia programu výrazné zníženie cenovej náročnosti na stavbu zariadenia a tým aj obľubu u neodbornej verejnosti. Obstarávacie náklady na zariadenia z tohto programu sú neporovnateľne nižšie ako zariadenia od komerčného výrobcu.

Aj vďaka pomoci programu RepRap sa 3D tlačiarne dostali do domácností a vznikla skupina hobby zariadení. Avšak s možnosťou vlastného zostavenia si 3D tlačiarne prichádza aj problematika presnosti a spoľahlivosti zariadenia. Aj pri dodržiavaní pokynov návodu môže prísť k nepresnosti na strane užívateľa. Prípadnú nepresnosť a pokles spoľahlivosti môže spôsobiť aj nekvalitný materiál za cenu zníženia celkových nákladov na stavbu zariadenia. Na druhej strane open-source licencia umožňuje komunitám upravovať pôvodne navrhnuté diely, prípadne vytvoriť celkom nové diely pre zvýšenie presnosti a kvality tlače. Tieto diely si je užívateľ schopný vyhľadať a voľne stiahnuť z rôznych fór a portálov.

2 MOTIVÁCIA

Primárnym cieľom bakalárskej práce je zhodnotenie najčastejších problémov spoľahlivosti hobby 3D tlačiarňí RepRap a návrh riešenia pre odstránenie týchto problémov. Sekundárny cieľom je popísať stavbu a štruktúru rôznych typov tlačiarní z programu RepRap.

V teoretickej časti bude práca zameraná na priblíženie 3D tlačiarní programu RepRap a ich architektúru. V práci bude uvedený prehľad rôznych typov 3D tlačiarní, podrobný popis fungovania a mechanizmu, popis elektronických častí a prehľad rôznych druhov firmwarov dostupných pre dané zariadenia.

Pri riešení problémov so spoľahlivosťou tlače na hobby 3D tlačiarní RepRap bude ako vzorový model použitá tlačiareň Prusa i3. Táto tlačiareň bude zhotovená podľa pokynov a materiálov uvedených na oficiálnej stránke RepRap. 3D tlačiareň bude následne kalibrovaná a nastavená pre tlač PLA termoplastu. Pri následných pokusných tlačeniach sa bude pozorovať priebeh tlače a budú sa zisťovať nedostatky, ktoré by mohli mať vplyv na kvalitu výsledného produktu. Po zistení nedostatkov daného typu zariadenia (časti zariadenia), bude navrhnuté experimentálne riešenie. Zmeny na mechanických častiach budú spracované v programe Solidworks 2016 a následne vytlačené. Všetky zmeny mechanických prípadne softwarových častí zariadenia budú podrobne popísané. Úpravy budú aplikované na 3D tlačiareň a bude porovnaný priebeh a výsledok tlače.

3 DRUHY KINEMATIKY

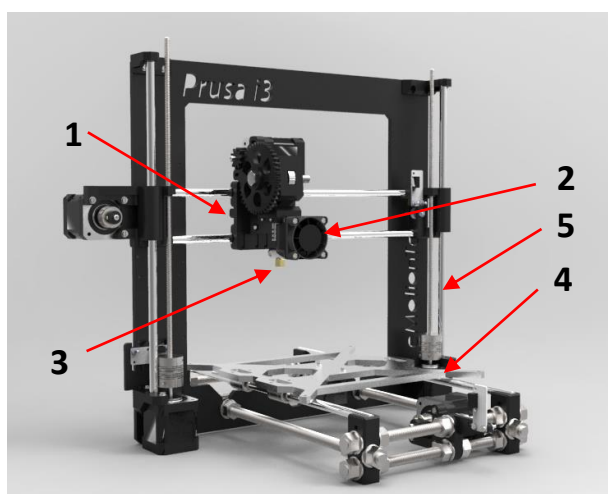
Moderné 3D tlačiarne využívajú rôzne typy kinematiky. Vzhľadom k tomu, že moderné tlačiarne majú zväčša tvar kocky, tak sa vo veľkej miere uplatňuje karteziánska alebo CoreXY kinematika. No v dnešných dňoch sa pomaly upúšťa od nastoleného trendu a začínajú sa na trhu objavovať tlačiarne valcového tvaru, ktoré využívajú zväčša deltovú kinematiku. Postupne sa vyvinuli aj iné typy kinematík, ako napr. SCARA alebo polárna kinematika, ktoré sa používajú v dnešných 3D tlačiarňach. Princípy fungovania a ich výhody sú uvedené nižšie.

3.1 Karteziánsky typ kinematiky

Karteziánsky typ tlačiarní je momentálne najrozšírenejším typom hobby 3D tlačiarní, a to nie len z programu RepRap. Tento typ tlačiarní pozostáva z pevného rámu, v ktorom sa tryska pohybuje podľa karteziánskych súradníc po osiach X,Y a Z. Dané osi sú vzájomné na seba kolmé. Pomocou kombinácie daných súradníc sa hlavica pohybuje po priestore. [1]

Typickým predstaviteľom karteziánskej tlačiarne z programu RepRap je tlačiareň Prusa i3 (obr. 1). Osa Z je orientovaná vo vertikálnom smere, ako to väčšinou pri tomto type tlačiarní býva. Osa X je orientovaná vo vodorovnom smere a pohybuje sa sprava doľava. V prípade osi Y sa jedná, taktiež, o vodorovný smer ale pohyb je spredu dozadu. [1]

Mechanizmus v strede 3D tlačiarne, pohybujúci sa po osi X, sa nazýva vozík osi X (X carriage). Na vozíku je upevnený extrudér (extruder). Extrudér, ako taký, pozostáva z niekoľkých častí. Prvou časťou extrudéru je posuvný mechanizmus. Tento mechanizmus slúži na posúvanie tlačovej struny (filament) do tela vyhrievacieho telesa (hot end), kde sa struna roztaví a je vytlačovaná cez mosadznú trysku (nozzle). Pohyb vozíka po osi X je zabezpečený jedným motorom (viď obr. 1) a ozubeným remeňom.



1. Vozík osi x
2. Extrudér
3. Hot end s tryskou
4. Platňa pohybu v osi Y
5. Vedenie osi

Obr. 1) Popis karteziánskeho typu [2]

O pohyb celého vozíku na osi X vo vertikálnom smere sa stará dvojica motorov. Mechanizmus pohybu v smere osi Z je tvorený motorom, spojkou a závitovou tyčou. Pri otáčaní motoru sa otáča aj závitová tyč, na ktorú je nasadený mechanizmus osi X. V spojení medzi osou X a Z je umiestnený závit, ktorý mení rotačný pohyb motora na pohyb posuvný celej sústavy pozdĺž osi Z. Tento mechanizmus býva zväčša umiestnený na oboch stranách rámu, čo umožňuje lepšiu kalibráciu celého zariadenia a plynulejší chod.

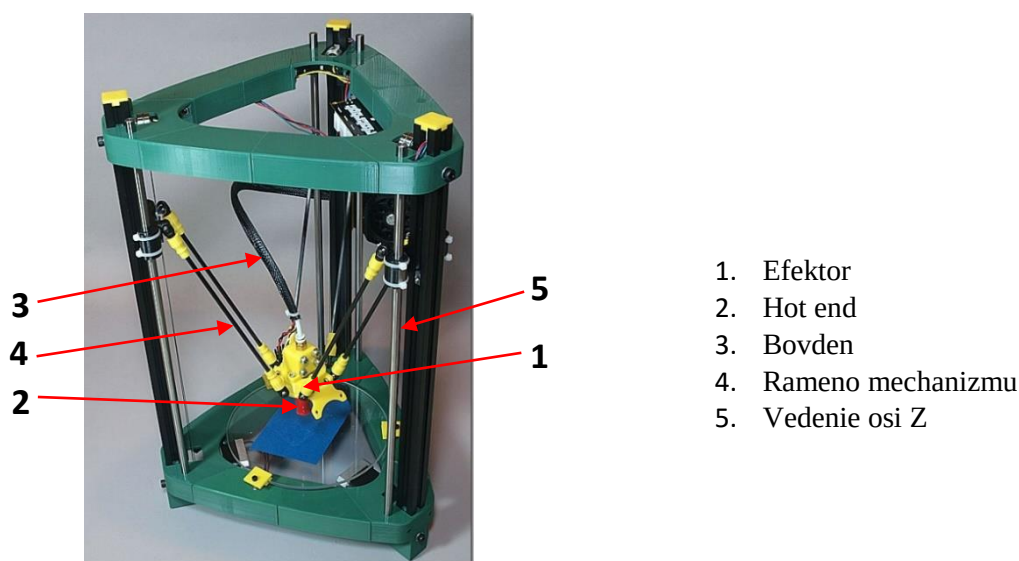
V spodnej časti tlačiarne je umiestnená štvorcová platforma s vyhrievacou platňou, určená pre vytlačenie daných 3D-predmetov. Pohyb tejto platformy je opäť zabezpečený jedným motorom a ozubeným remeňom. Celá platforma je položená na lineárnom vedení, čo zabezpečuje plynulý a voľný pohyb po osi Y. Lineárne vedenia bývajú nahradené lacnejšou variantnou v podobe lineárnych valivých ložísk a presných tyčiek.

3.2 Deltový typ kinematiky

Deltový typ tlačiarne je najčastejšou alternatívou ku karteziánskym 3D tlačiarňam. Vyvíjajú sa rovnako rýchlo ako karteziánske tlačiarne a vydobyli si svoje miesto na trhu. Za svoju obľúbenosť vďaka najmä netradičnému dizajnu a rýchlosti tlače.

Konštrukcia deltových tlačiarňí je tvorená zvislým vedením pre osu Z a tromi ramenami, ktoré zabezpečujú pohyb v rovine XY. Na koncoch ramien je uchytený malý trojuholníkový efektor, ku ktorému je prichytený extrudér. K extrudéru je väčšinou vedený bovden so strunou. Pohyby ramien a posuv po osi Z môže byť tvorený lineárnym (pomocou remeňa) alebo rotačným pohonom (pomocou závitovej tyče). [3]

Pohony daných ramien bývajú umiestnené v spodnej podstave tlačiarne. Takéto umiestnenie motorov umožňuje použitie ľahkých materiálov pre konštrukciu ramien. Pri nízkej hmotnosti ramien sa extrudér vie pohybovať vyššou rýchlosťou a zrýchlením ako iné typy tlačiarňí. Trojuholníkový tvar efektora v spojení s ľahkými ramenami dodáva zariadeniu robustnosť a tuhosť, čo má priaznivý výsledok na kvalitu tlače. Zariadenie je avšak náchylné na nepresnosť polohy efektora. Vzhľadom na dĺžku ramien aj malý pohyb závitovej tyče dokáže vyvolať veľký pohyb trysky. [3]



Obr. 2) Popis deltového typu [4]

Tlačiarne deltového tvaru majú omnoho viac výhod ako len rýchlosť tlače. Využívajú sa najmä pre tlač vysokých predmetov. Výška konštrukcie tlačiarne nie je takmer nijako obmedzená a môže byť kedykoľvek rýchlo a ľahko upravená podľa potrebných rozmerov.

Ďalšou nespornou výhodou tohto typu je možnosť samokalibrácie. V prvom kroku kalibrácie sa jednotlivé ramená nakalibrujú podľa maximálnej hodnoty na osi Z. Následne si zariadenie prostredníctvom kalibračného koncového snímača na extrúdere odmeria daný počet bodov na vyhrievanej platni. Pomocou týchto bodov program určí rovinu, na ktorú má tlačiť a podľa toho prispôsobí pohyb jednotlivých ramien.

3.3 Kinematika CoreXY a H-bot

Konštrukčné riešenie CoreXY a H-bot sú veľmi populárne riešenia pohybu efektora a to nie len u hobby 3D tlačiarňí. Tento typ riešenia využíva karteziánsky súradnicový systém, čím je používateľom prirodzený a jednoduchší na pochopenie. [5]

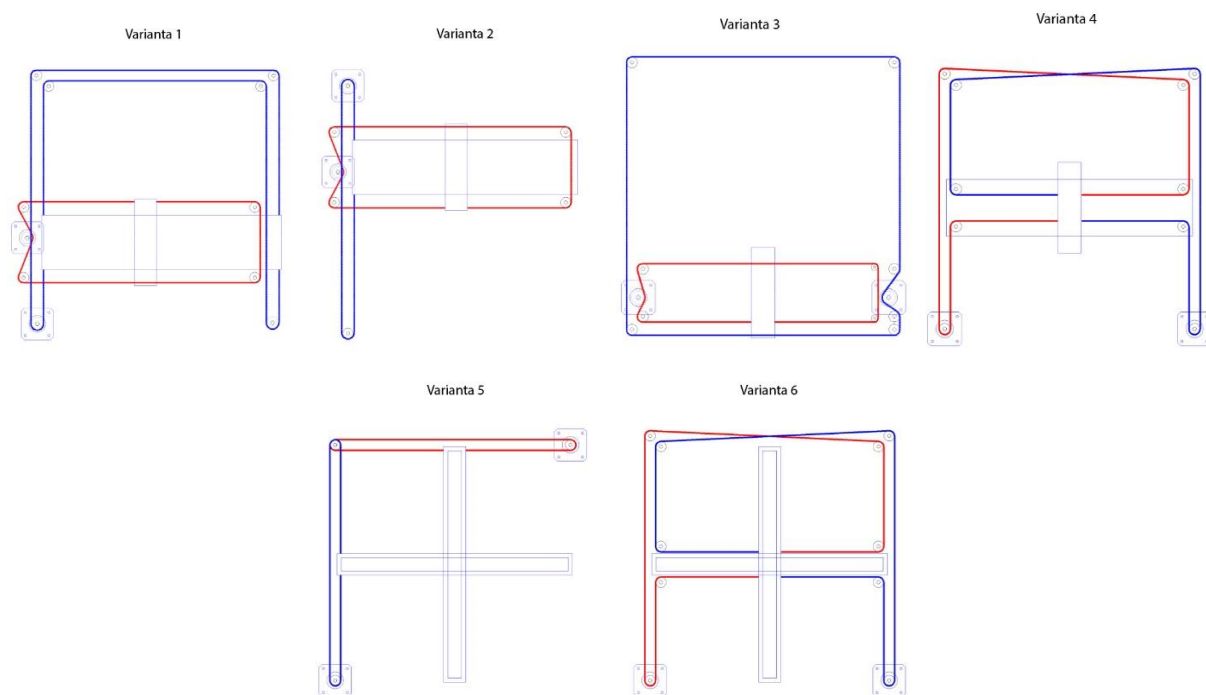
Riešenie CoreXY a H-bot majú mierne odlišné riešenie pohybu. No obe varianty sú založené na rovnakej podstate. Pohyb v osi Z nevykonáva extrudér ale vyhrievaná podstava pre 3D predmet. Pohyb v tomto smere je opäť riešený pomocou lineárnych vedení a jedného krokového motora. Rozdiel vo variantoch spočíva v usporiadaní pohybového ústrojenstva pre pohyb v rovine XY. [5]

Riešenie CoreXY a H-bot využíva pre pohyb v rovine XY lineárne vedenia, 2 krokové motory pripojené k dvom ozubeným remeňom a 8 alebo 10 remeníc. Remenice slúžia na prenos pohybu z motora na remeň a na zmenu smeru remeňa. Remene sú upevnené k efektoru v závislosti na variante rozloženia. Princíp pohybu je založený na sčítavaní vektorov pootočených o 45 stupňov oproti karteziánskemu súradnicovému systému. [6]

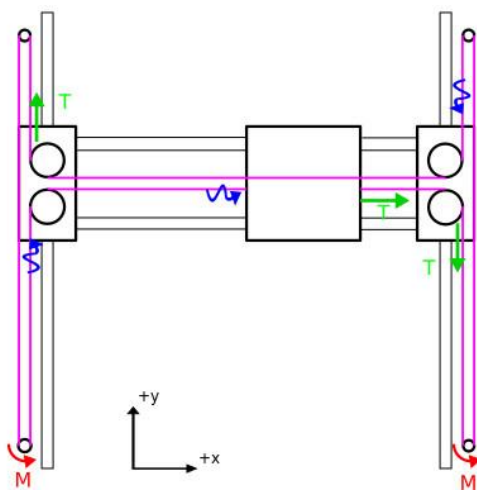
Rovnaký princíp sa využíva pri kladkových zdvihákoch alebo výtťahoch len s rozdielom pohybu v jednej osi a využitia jedného motoru. Pohyb motora je prenášaný na efektor v podobe polovičnej rýchlosti, no s dvojnásobnou silou. Takýto spôsob pohybu je veľmi efektívny. Jeho nevýhodou je nutná presná kalibrácia u riešenia H-bot. V prípade zlej kalibrácie zariadenia môžu vzniknúť odchýlky hlavne v smere osi X. [6]

Tento problém takmer úplne odpadáva u CoreXY. Bol vyriešený prekrížením remeňov v zadnej časti zariadenia. Jednotlivé konce remeňov sa upínajú k efektoru vždy z opačnej strany. Avšak takéto riešenie vyžaduje výrazné predĺženie remeňov, čo môže viesť ku chybám spôsobených napínaním a trvalou deformáciou remeňov spôsobenou cyklickým namáhaním. Riešením môže byť voľba väčšie remeňu, čo vedie k zvýšeniu energetickej náročnosti na pohyb alebo inštalácia napínacej kladky, ktorá udrží remeň trvale napnutý. [6]

Takéto tlačiarne sú výbornou voľbou pre presnú tlač v prípade dobrej kalibrácie. Rovnako sú vhodné na prestavbu na multifunkčné zariadenia ako napr. CNC fréza. Ich nevýhodou je náročná kalibrácia v prípade H-bot typu a vysoká hlučnosť v prípade CoreXY, ktorá je spôsobená krížením remeňov. Pri krížení remeňov nabieha remeň na remenicu pod uhlom, čo spôsobuje hluk a dodatočné trenie. [6]



Obr. 3) Varianty rozloženia remeňov [7]



Obr. 4) Rozloženie remeňov pre H-bot kinematiku [8]

3.4 Kinematika SCARA zariadení

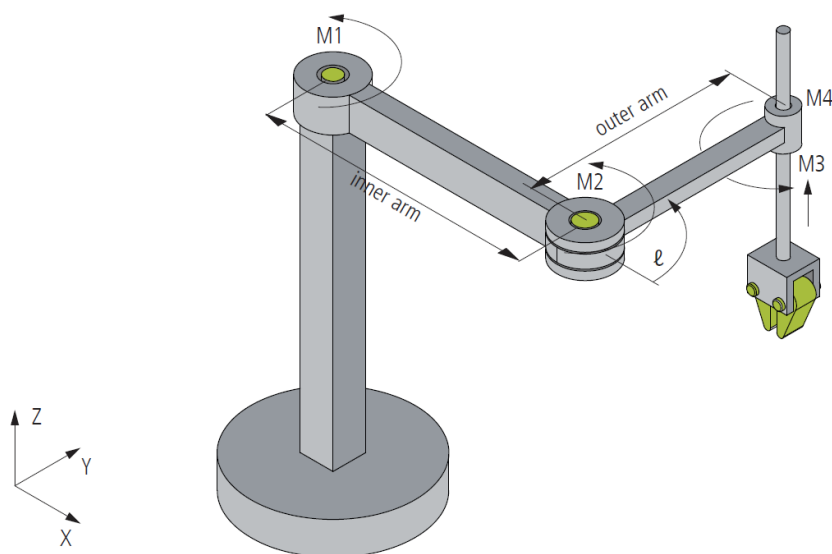
SCARA (*Selective Compliance Assembly Robot Arm*) je ďalším príkladom dizajnu primárne určeného pre priemyselné roboty, ktorý bol upravený na využitie v oblasti 3D tlače. Konštrukcia sa v dnešných dňoch u tohto typu tlačiarň mierne rôzni v počte pohybujúcich sa ramien. Pôvodné konštrukcie s využitím štyroch ramien sa už postupne nahrádzajú SCARA tlačiarňami s modernejším konštrukčným riešením pomocou dvoch ramien, ktoré svojím vzhľadom a pohybom pripomínajú ľudské rameno. [9]

Typicky má SCARA zariadenie 4 stupne voľnosti. Všetky osi sú navrhnuté ako sériové kinematické štruktúry, t.j. počiatok súradnicového systému daného ramena je závislý na polohe predchádzajúceho ramena. [9]

Pôvodná konštrukcia SCARA robotov bola poháňaná 3 motormi. Osa Z bola poháňaná jedným motorom a zvyšné dva poháňali ramená robota. Pomocou kombinácie natočení daných ramien je robot schopný pohybovať efektorom po vymedzenej ploche. Pohyb je však závislý od polohy všetkých 4 ramien, t.j. pohyb bol možný len po ploche tvaru obličky, ktorý sa líši v závislosti na konkrétnom prevedení. [9]

Moderné konštrukčné riešenie využíva rovnaký princíp vertikálneho posuvu no posuv ramien je odlišný. Po zredukovaní ramien na 2 kusy sa motory presunuli do kĺbu medzi ramenami a na miesto medzi ramenom a telesom tlačiarne. Takéto rozloženie ramien umožňuje jednoduchšiu manipuláciu s efektorom. Maximálny rozsah pohybu je určený dĺžkou ramien a má kruhový tvar. [9]

SCARA tlačiarne sú vhodné najmä na tlač plochých predmetov. Plocha, ktorú dokážu pokryť je limitovaná iba dĺžkou ramien. Obmedzeniami pri určovaní dĺžky ramien sú materiálové charakteristiky a vplyv zotrvačných síl. Pri použití dlhých ramien dochádza k priehybu ramien a k následnému zníženiu výšky nanášanej vrstvy. Rovnako tak pri väčších rozmeroch zariadenia sa prejaví vplyv zotrvačných síl čo vedie k nepresnosti pohybu pri tlači a nepresným výsledným modelom s rôznymi defektmi. [9]



Obr. 5) Schéma SCARA zariadenia [10]

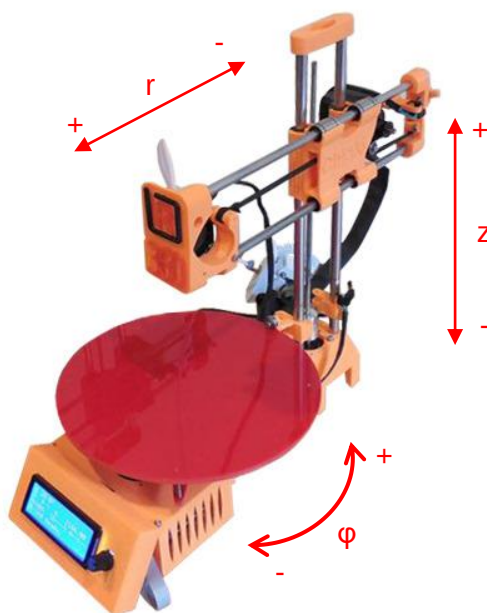
3.5 Polárna kinematika

Polárne tlačiarne patria medzi tie najjednoduchšie zariadenia, čo sa týka konštrukcie v porovnaní s ostatnými typmi tlačiarňí. Napríklad konštrukcia polárnej tlačiarne „R 360“ pozostáva iba z 21 tlačných súčastí a menej ako 100 netlačných. Na druhej strane je spôsob nanášania vrstiev v porovnaní s ostatnými typmi zložitejší. [11]

Už samotný názov typu tlačiarňí naznačuje spôsob nanášania vrstiev. Polárne tlačiarne využívajú systém polárnych súradníc. Polárny súradnicový systém určuje polohu daného bodu pomocou vzdialenosti (r) od počiatku súradnicového systému a uhlu φ . Uhol φ predstavuje uhol medzi spojnicou počiatku súradnicového systému a daným bodom a od začiatku zvolenej osi ležiacej v rovine. Tomuto súradnicovému systému je prispôbená celá konštrukcia zariadenia.

Konštrukcia sa skladá z 2 vedení. Vertikálne vedenie slúži na posuv v smere Z. Vodorovné vedenie reprezentuje zmenu zložky r (vpred a vzad) v polárnom súradnicovom systéme. Na konci vedenia je upevnený extrudér s tryskou. V spodnej časti zariadenia sa nachádza kruhová platňa schopná konať rotačný pohyb reprezentujúci zmenu uhla φ . [12]

Tento typ tlačiarňí je väčšinou iba v štádiu prototypov. Hlavná výhoda tohto typu tlačiarňí má byť ich jednoduchosť a plynulé nanášanie vrstiev. Pri takto jednoduchých konštrukciách sú náklady na stavbu konštrukcie zariadenia omnoho nižšie ako pri iných tlačiarniach. Ďalšou veľkou výhodou je časté využitie kruhovej podstavy ako základ pre 3D skener. Avšak pri rotačnom pohybe vzniká mnoho defektov a nepresností pri tlačení. Taktiež je problematická presná kalibrácia spodnej rotačnej platne a výroba vyhrievacej platne v tvare kruhu, ktorá je takmer nevyhnutná pre kvalitnú 3D tlač. [12]



Obr. 6) Zariadenie s polárnou kinematikou

4 TYPY 3D TLAČE

4.1 Technologické Selective Laser Sintering a Selective Laser Melting (SLS a SLM)

SLS metóda je technológia, ktorá využíva laser ako zdroj energie k spájaniu práškoveho materiálu, ktorý je postupne po vrstvách nanášaný. Väčšinou sa jedná o kov v podobe prášku. Laser je špecifický mierený na miesta určené 3D modelom, pri čom spája prášok na danom mieste do pevnej a súdržnej štruktúry. Technologické SLS a SLM sú si veľmi podobné. Princíp využívania laseru ako zdroja energie a kovového prášku zostáva zachovaný. Rozdiel spočíva vo forme spájania prášku. V prípade metódy SLS sa prášok spája na úrovni molekúl a pri metóde SLM sa jednotlivé zrná kovového prášku zlievajú dokopy. Tieto technológie sú relatívne nové a málo využívané. Využívajú sa najmä na rapid-prototyping a malosériovú výrobu tvarovo zložitých častí.

Týmito metódami môžeme okrem kovových produktov vyrábať aj predmety z plastu, keramiky či skla. K týmto metódam je potrebný najmä vysoko výkonný laser, ktorý spája jednotlivé čiastočky do jedného celku. Tlač prebieha postupne v dvoch cyklicky sa opakujúcich dejoch. Ako prvý krok sa naniesie tenká vrstva prášku (hrúbka vrstvy je približne 0,05 mm). Podložka, na ktorú sa prášok nanáša udržiava teplotu prášku tesne pod teplotou tavenia, čím umožňuje rýchlejšie ohriatie. Ako druhý krok prebehne spomínané spájanie prášku pomocou laseru. Tento krok je riadený pomocou počítača, ktorý definuje presnú polohu miesta použitia laseru. Spájanie prášku je sprevádzané jemnými zábleskami v mieste budúceho produktu. Následne sa tieto kroky opakujú až kým nie je vytvorený produkt. Pri dokončovaní sa musí kontrolovať teplota chladnutia materiálu až do úplného vychladnutia. Po dokončení 3D tlače sa odstráni nadbytočný prášok, ktorý je neskôr použitý na ďalšiu 3D tlač. [13,14]

V porovnaní s inými technológiami ako napríklad SLA technológia (stereolithography) alebo FDM technológia (fused deposition modeling), ktoré na správne vytvorenie modelu pri prevísajúcich tvaroch potrebujú podporný materiál, majú technológie SLS a SLM veľkú výhodu. Pri tvorbe modelu tvorí podporu samotný prášok, ktorý nebol spojený pomocou laseru a to v každom bode telesa a pri akýchkoľvek tvaroch. Ako hlavná nevýhoda týchto metód sa javí neschopnosť tlače uzavretých dutých telies. Z telies takéhoto tvaru by bez poškodenia nebolo možné odstrániť prebytočný prášok. [13,14]

Aj keď sa táto technológia pomerne rýchlo vyvíja, tak v prostredí hobby tlačiarň sa často nevyskytuje. Dôvodom je veľká energetická náročnosť a nutná presnosť pri prevádzkových teplotách. Teplota sa môže líšiť len v rozmedzí 2°C pri predohreve, spájaní kryštálov ako aj pri postupnom chladnutí. [14]

4.2 Fused deposition modelling (FDM)

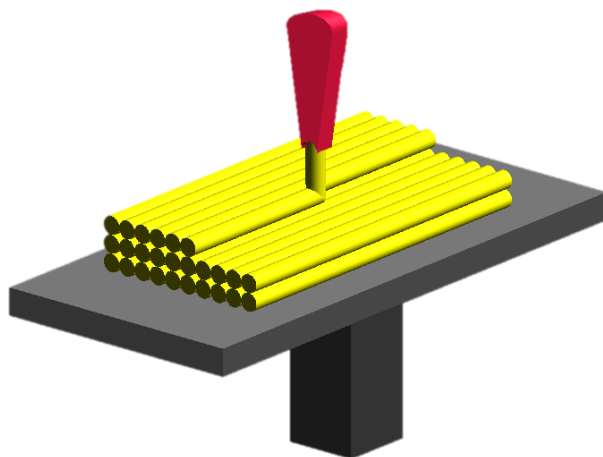
Technológia FDM je najrozšírenejšou technológiu v oblasti nie len hobby 3D tlačiarňí ale aj celkovo. Jej popularita spočíva v jednoduchosti princípu fungovania a v dostupnosti jak materiálov, tak zariadení.

Technológia bola vyvinutá v osemdesiatych rokoch 20. storočia. Vyvinul ju S. Scott Crump, ktorý ju neskôr v roku 1990 komercializoval. Slovné spojenie **fused deposition modelling** a skratka **FDM** sú registrované obchodné známky spoločnosti Stratasys. Táto metóda sa zvykne nazývať aj FFF (fused filament fabrication). Názov bol vytvorený tvorcami projektu RepRap, aby mohli legálne označovať typ tlače svojho zariadenia. [15]

Podstata technológie spočíva v natavovaní termoplastu tlačeneho do tavnej hlavice. Následne je hlavica posúvaná vo veľmi malej vzdialenosti nad podložkou, čím postupne tvorí vrstvu za vrstvou. Hlavica je riadená pomocou počítaču. Minimálna výška a teda aj maximálne rozlíšenie pri použití tejto technológie je 0,13 mm. Pri zväčšení veľkosti vrstvy dochádza k zrýchleniu tlače no zníženiu rozlíšenia. Na vzniknutom modeli bez nasledovnej úpravy je zreteľne vidieť postupne ukladané vrstvy. [16]

Pri FDM/FFF technológií sa na tvorbu modelu využíva množstvo rôznych termoplastov. Najpoužívanjšie sú ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) a PLA (Polylactic acid), no taktiež používané sú napríklad PC (Polycarbonate), PA (Polyamide), PS (Polystyrene) a iné. [16]

ABS je termoplast vyrábaný z ropy. Jeho vlastnosti sa dajú pozmeniť v procese výroby, no je charakteristický dobrou pevnosťou a malou ohybnosťou. Ďalej je pre ABS charakteristická pomerne vysoká teplota tavenia. Vzhľadom na jeho dobré mechanické vlastnosti sa používa u viac namáhaných súčiastok. Jeho nevýhodou je veľké zmršťovanie pri chladnutí. Je potreba dbať na pomalé ochladzovanie. Ďalšou nevýhodou je zlá priľnavosť k podložke. [17]



Obr. 7) Schematické znázornenie FDM tlače [18]

PLA je vyrábaný z kukurice, zemiakov alebo cukrovej repy. V porovnaní s ABS plastom má horšie mechanické vlastnosti a nižšiu teplotu topenia. Jeho výhodou je dokonalé spojenie jednotlivých vrstiev takmer bez rozoznania etáží. [19]

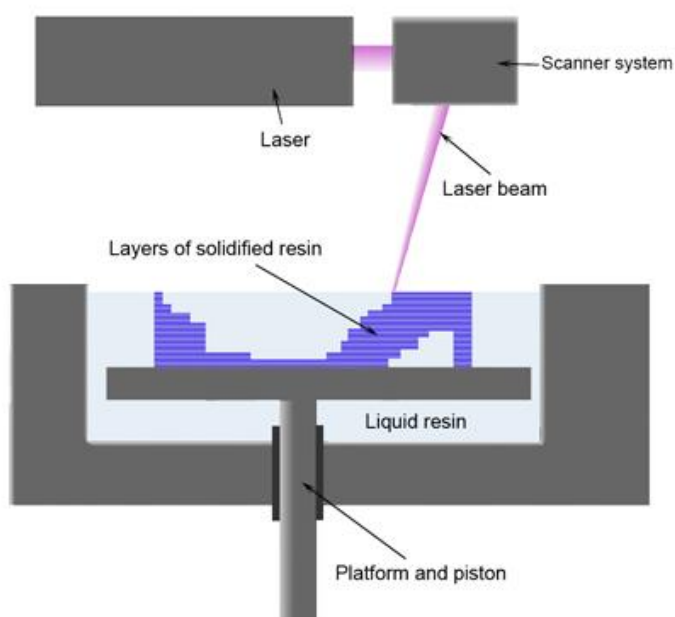
4.3 Stereolitografia (SLA), Digital Light Processing (DLP)

SLA je najstaršia technológia 3D tlače. Technológia bola uvedená na trh už v roku 1988 zakladateľom Charlesom (Chuck) W. Hullom. SLA technológia využíva nádobku naplnenú tekutým fotopolymérom, ktorý je postupne vytvrdzovaný ultrafialovým laserom do želanej podoby podľa 3D modelu.

Ultrafialový laser je smerovaný pomocou zrkadla ovládaného počítačom. Model je aj pri tejto technológii tvorený postupne po vrstvách. Laserový lúč sleduje dráhu určenú počítačom. V mieste presne určenom, polymér vytvrdne a tak vznikne vrstva modelu. Následne je celá podstava posunutá nižšie a proces prebehne znovu, až kým nie je 3D model hotový. [20]

Keď je 3D model hotový, podstava sa dvihne hore a prebytočný polymér je odčerpaný a skladovaný pre ďalšie použitie. Následne sa 3D model vyberie z tlačiarne, očistí sa od prebytočného materiálu a vloží sa do UV pece. V UV peci príde k úplnému vytvrdeniu a model je pripravený na určenú aplikáciu. [20]

DLP technológia je veľmi podobná SLA. Rovnako pracuje s účinkami svetla na fotopolymér. Hlavným rozdielom medzi technológiami je zdroj svetla. Zatiaľ čo pri SLA technológii je akčným členom laser, tak pri DLP technológii sa využíva bežný zdroj svetla. Často využívaný je DLP projektor alebo LCD displej. Táto technológia potrebuje na svoje fungovanie plytšiu banku na fotopolymér ako SLA, čo má za následok nižšie prevádzkové náklady. [20]



Obr. 8) Schematické znázornenie DLP tlače

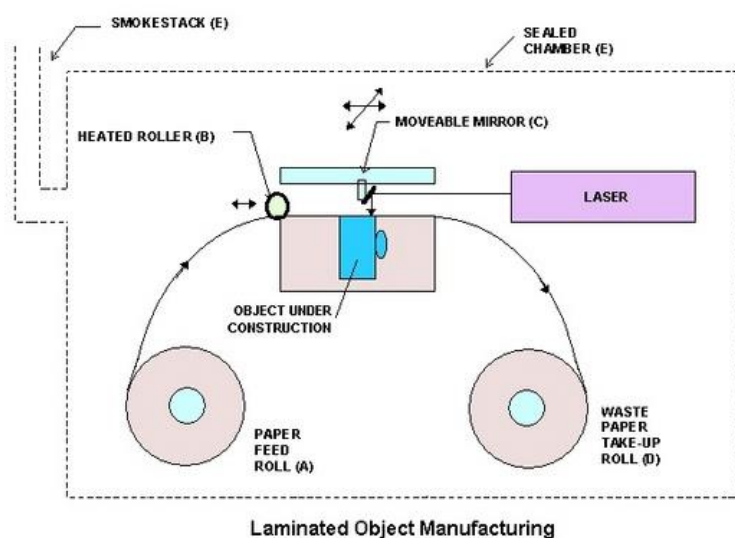
SLA a DLP technológie využívajú množstvo dostupných materiálov od rôznych výrobcov. Materiály sa odlišujú v hustote, vo farbe, v tepelnej vodivosti, v pevnosti a v iných mechanických vlastnostiach. Materiály sa predávajú v tekutej forme pri cene približne 65€ za liter. Známym výrobcom DLP tlačiarň v Českej republike je 3Dwarf s cenovkou približne 3700€. [21]

Hlavnou výhodou SLA a DLP technológií je ich presnosť a detailnosť. SLA a DLP sú najpresnejšie s pomedzi všetkých technológií. Jedna vrstva môže mať veľkosť len 5-10 mikrometrov. Veľkosť vrstvy u SLS závisí najmä na šírke UV lúča a na materiáli. Taktiež tvorba modelov je relatívne rýchla v porovnaní s ostatnými technológiami. Vytvorené modely sú ľahké a odolné. Veľkou výhodou oproti FDM technológií je možnosť následnej úpravy ako napr. vŕtanie. Nevýhodou SLA a DLP je krehkosť modelov a nevhodnosť pre tvorbu vertikálnych modelov bez podpôr. Ďalšou nevýhodou týchto technológií je nízka trvanlivosť 3D modelu. [22]

4.4 Laminated Object Manufacturing (LOM)

Technológia LOM pracuje na odlišnom princípe ako ostatné technológie. LOM využíva pre tvorbu modelov tenký súvislý pás materiálu (plast alebo papier), ktorý je vedený systémom valcov priamo ponad priestor určený na tvorbu modelu. [23]

Pri tvorbe modelu je pás natrený lepidlom a valcom predhriaty na teplo vhodnú na spájanie jednotlivých vrstiev. Po nalepení vrstvy na predošlú je potrebné dať jej požadovaný tvar. To je realizované počítačovo riadeným laserom alebo čepeľou. Po vytvorení jednej vrstvy sa platforma posunie o krok nižšie a proces sa zopakuje. Veľkosť kroku je vždy určená hrúbkou vrstvy použitého materiálu. Následne je opäť valcami dopravený ďalší materiál na tvorbu modelu. [23]



Obr. 9) Schematické znázornenie LOM [23]

Keď je tlač dokončená, model sa vyberie zo zariadenia a odstráni sa prebytočný materiál. Ďalej sa pokračuje podľa použitého materiálu. Ak sa jedná o papier, tak má model vlastnosti dreva a môže byť opracovaný podľa bežných postupov používaných pre drevené výrobky. [23]

Výhod LOM tlače spočíva v tlači bez využitia zmeny skupenstva materiálu alebo chemických reakcií. Ďalšími výhodami sú vhodnosť využitia pre veľké modely alebo nízko nákladová produkcia prototypov. Nevýhody pramenia z priebehu tlače technológiou LOM a výsledný model nie je presný tak ako u SLA alebo FDM modelov. [23]

Vzhľadom na nízku presnosť modelov sa táto technológia používa najmä pre dizajnérske alebo koncepčné účely. Na trhu s 3D tlačiarňami zastupuje LOM tlačiarne firma Solidmodel USA, ktorá predáva svoje zariadenie Solido SD300 Pro za 9 995 USD. Sadu PVC fólie a lepidla potrebného pre tlač ponúkajú za 345 USD. [24]

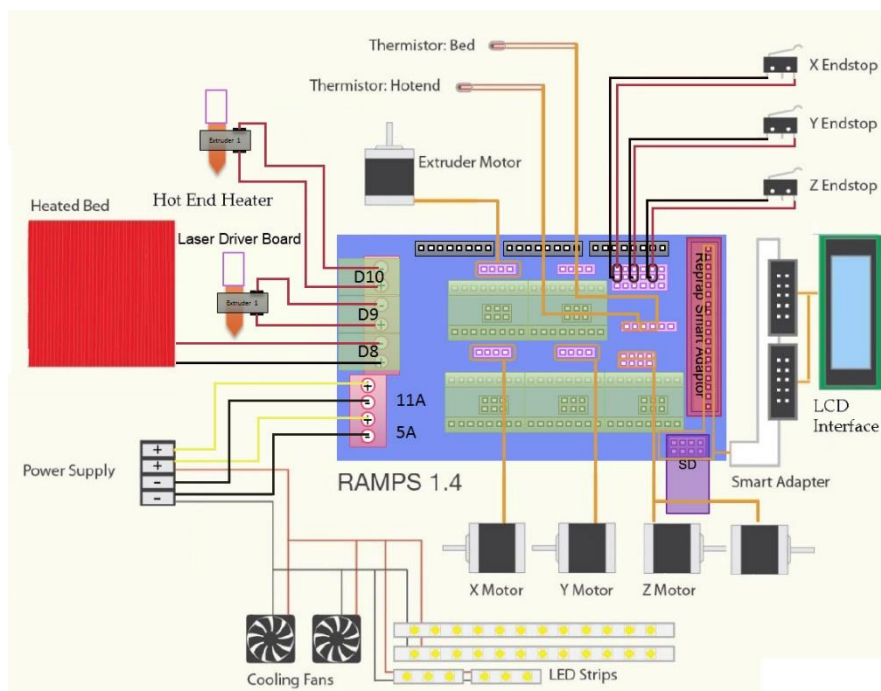
5 ZÁKLADOVÉ DOSKY REPRAP

5.1 Ramps 1.4

Najčastejšie používanou základovou doskou na hobby tlačiarňach je základová doska RAMPS. RAMPS je skratka pre *RepRap Arduino Mega Pololu Shield*. Je navrhnutá tak, aby spĺňala všetky potreby programu RepRap v oblasti konektivity a výkonnosti pri zachovaní nízkej zriaďovacej ceny. Modulárny dizajn umožňuje jednotlivo pripájať ovládače krokov jednotlivých krokových motor na dosku, jednoduché pripojenie termistorov alebo doplnkových zariadení ako napríklad LCD displej. Takáto konštrukcia základovej dosky má výhodu v jednoduchom servise pri poruche, ale pri rozširovaní možností zariadenia prídavnými zariadeniami. [25]

Základová doska pozostáva z konektorov pre 5 krokových motorov, 2 výhrevných telies, jedného konektora pre vyhrievanú platňu, konektory pre 3 termistorov, koncových snímačov pre jednotlivé osi a konektoru pre LCD panel a čítačku kariet SD. Zapojenie jednotlivých periférií je zobrazené na obr. 1. Zdroj elektrickej energie je pripájaný pomocou 4-pinového konektora. Zdroj musí produkovať minimálne 12V a 16A v prípade 3D tlačiarne, ktorá využíva vyhrievanú platňu. O ochranu základovej dosky sa starajú poistky zapojené priamo na doske. Vyhrievaná doska je chránená 11A poistkou a ostatná elektronika pomocou 5A poistky. [26]

Na trhu je viacero variant, z ktorých si môže užívateľ vybrať, no základná konfigurácia pokrýva potreby väčšiny komunity. Základná konfigurácia umožňuje kompletne ovládať 3D tlačiareň a jednoduchú údržbu pri minimálnych znalostiach elektroniky. Základové dosky sa na trhu často objavujú plne zostavené t.j. na doske sú osadené všetky ovládače krokov, základová doska Arduino Mega 2560, koncové snímače a termistory. V takom prípade výrobca otestuje funkčnosť celého setu, za funkčnosť ktorého aj následne ručí. [26]



Obr. 10) Schéma zapojenia periférií na RAMPS 1.4 [27]

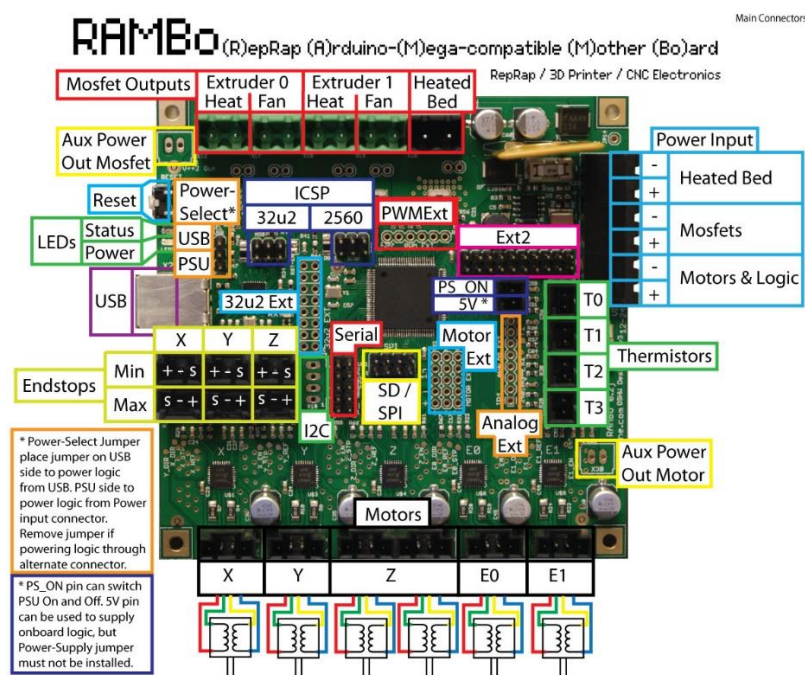
5.2 RAMBo

Základová doska RAMBo je v podstate iba vylepšená verzia RAMPS. Rovnako ako RAMPS tak aj RAMBo bola vytvorená firmou UltiMashine. Dizajn tejto dosky sa veľmi podobá doske Arduino Mega 2560. Hlavným rozdielom oproti RAMPS sú nové konektory pre pripojenie motorov, koncových spínačov a termistorov. Priamo na doske sú už od výroby umiestnené ovládače krokov s príslušnými tranzistormi a vstupmi pre termistory tak, aby bolo možné k doske pripojiť dvojité extrudér. [28]

Úpravy sa dotkli aj samotného riadenia krokov. Priamo pripojené ovládače krokov sú bežne používané ovládače s označením A4982. Avšak na ovládanie mikrokrokov používa doska RAMBo príslušný softvér. [28]

Pozmenený bol aj spôsob napájania. Doska obsahuje až 5 elektrických výstupov. Dva z výstupov majú limitovaný výstupný prúd a sú využívané pre napájanie ventilátorov. Základová doska RAMBo má až 3 vstupy pre napájanie, zatiaľ čo iné dosky majú iba 1 resp. 2 vstupy. Takéto usporiadanie napájacích vstupov má výhodu možnosti napájania motorov, hotendu a vyhrievanej platne vždy iným zdrojom pri rôznych napätiach a prúdoch. Rovnako, ako pri mikrokrokovani, tak aj pri nastavovaní napájacieho prúdu motorov sa všetko riadi softvérovo. Nastavenie softvérom umožňuje citlivejšie nastavenie motorov pre dosiahnutie minimálnej hlučnosti a elimináciu chýb pri strate krokov. Základová doska je chránená bežne dostupnými poistkami. Najviac namáhaná vetva, vetva pre napájanie vyhrievanej podložky, je chránená poistkou známou z automobilového priemyslu. Poistky sú zapojené v konektoroch, čo umožňuje, v prípade poruchy, rýchlu výmenu bez spájkovania. [28]

K základovej doske RAMBo je možné pripojiť 6 koncových snímačov a 4 termistory a pomocou voľných konektorov na doske pripojiť rôzne analógové a digitálne periférie ako napr. LCD displej alebo čítačku kariet SD. Doska využíva pre riadenie firmware Marlin, rovnako ako RAMPS. [28]



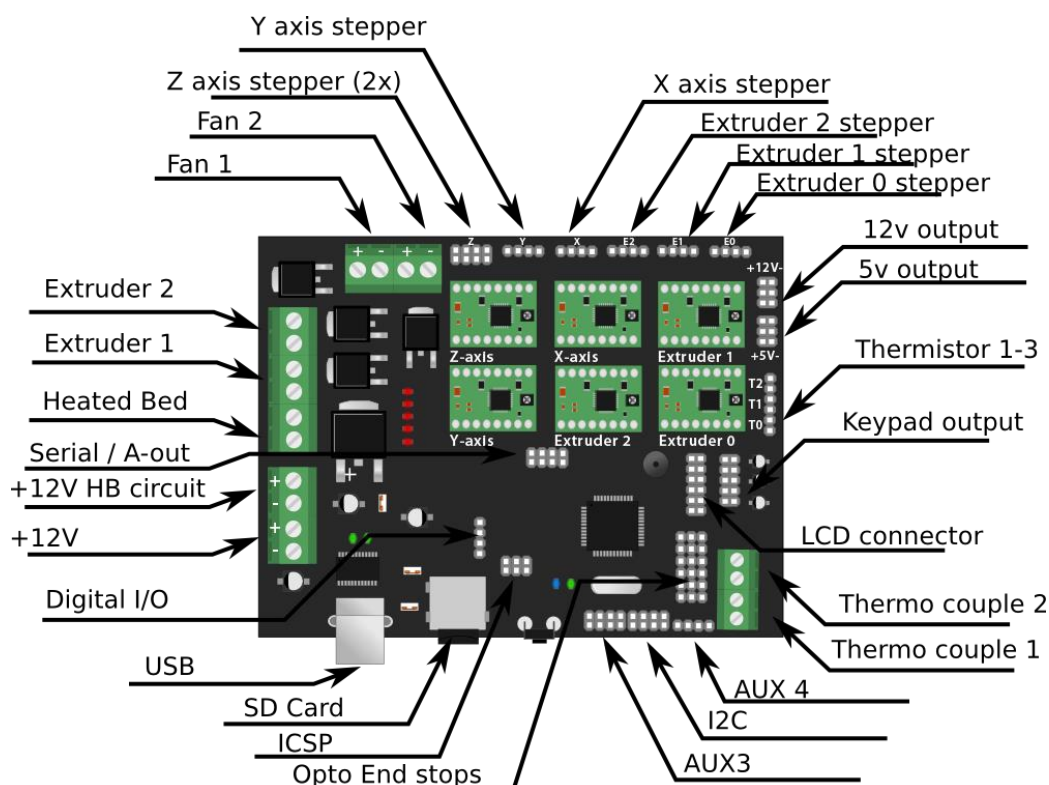
Obr. 11) Zapojenie periférií RAMBo [29]

5.3 Megatronics

Základová doska Megatronics bola navrhnutá na základe overených komponentov RepRap komunitou. Ako základ bola použitá doska Arduino Mega 2560, ktorá bola následne osadená rozhraním potrebným pre hobby 3D tlačiareň. Výsledkom je jednoduché, prehľadné a spoľahlivé riešenie s rozmermi len o málo väčšími ako je samotná doska Arduino Mega 2560.

Na základovej doske sú umiestnené 2 konektory pre zdroj elektrickej energie, 2 konektory pre extrudér, jeden konektor pre vyhrievanú platňu a dva konektory s jednosmerným prúdom pre napájanie ventilátorov. Všetky konektory sú osadené šiestimi mosfetmi (3 pre extrudéry, dva pre ventilátory a jeden pre obvod vyhrievacej platne) známymi z RAMPS. Základová doska je osadená ovládačmi krokov A4988 alebo Pololu boards, čo je bežný štandard pri RepRap hobby 3D zariadeniach, no podporujú aj najnovšie ovládače DRV8825, ktoré podporujú 1/32 mikrokrokovanie. Výhoda pri tejto doske spočíva taktiež v 6 konektoroch pre ovládače, čo umožňuje pripojenie až 3 extrudérov. Ďalší fakt, ktorým sa doska Megatronics odlišuje od najpoužívanejšej dosky RAMPS je umiestnenie slotu na microSD karty priamo na doske. [30]

Pôvod v doskách Arduino Mega 2560 a RAMPS priniesol výhodu dostupnosti mnohých periférií. Magatronics podporuje všetky bežne používané LCD displeje alebo klávesnice, čo umožňuje jednoduché ovládanie 3D tlačiarne aj bez nutnosti pripojenia k počítaču. [30]



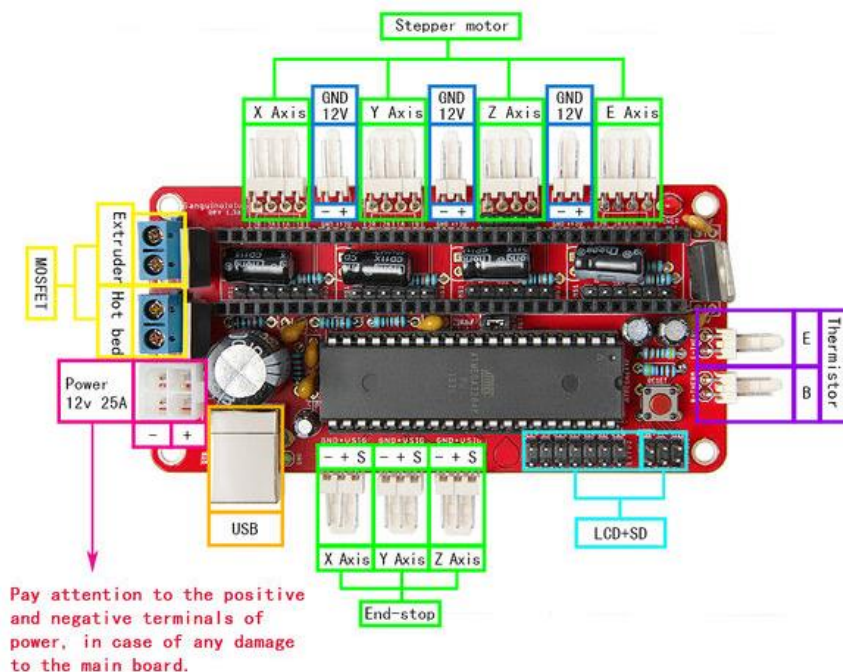
Obr. 12) Zapojenie periférií Megatronics [30]

5.4 Sanguinololu

Základová doska Sanguinololu je navrhnutá pre čo najmenšie rozmery a maximálne možnosti napájania. Posledná verzia 1.3a bola uvedená na trh v Júlí 2011. Táto verzia dosky je iba 100 mm dlhá a 50 mm široká. Sanguinololu rovnako ako RAMPS využíva rovnaký firmware, t.j. Marlin. Doska umožňuje pripojenie 4 krokových motorov, jedného výhrevného telesa, jednej výhrevnej platne, troch koncových spínačov a taktiež pripojenie LCD panelu s čítačkou SD kariet. Doska podporuje krokové ovládače A4988 a Pololu boards, ktoré sú štandardom pri hobby tlačiarňach. Pripojenie k počítaču je realizované pomocou USB.[31]

Táto základová doska je navrhnutá pre maximálnu flexibilitu napájania. Používateľ môže svoje zariadenie napájať jednoducho pomocou bežne dostupného ATX zdroja. Základová doska Sanguinololu umožňuje taktiež použiť regulátor napätia, s ktorým môže použiť akýkoľvek zdroj napätia v rozsahu 7V – 30V. Ďalšou výhodou tejto dosky je jej možnosť personalizácie konektivity. K doske je možné pripojiť 6 analógových a 8 digitálnych zariadení pre vývoj a vylepšenie svojho zariadenia. [32]

Nevýhoda základovej dosky Sanguinololu je nutnosť väčšej znalosti elektrotechnických zákonov. Táto základová doska sa na trhu zväčša vyskytuje len ako kit, ktorý si musí užívateľ pospájať sám. Vopred zostavené základové dosky majú omnoho vyššiu cenu. Taktiež sa neodporúča použiť túto dosku pre zariadenie, ktoré má vyhrievanú platňu. Pri potrebe dosiahnutia vyšších teplôt nemusí byť doska schopná operovať s dostatočne veľkým prúdom. [32]

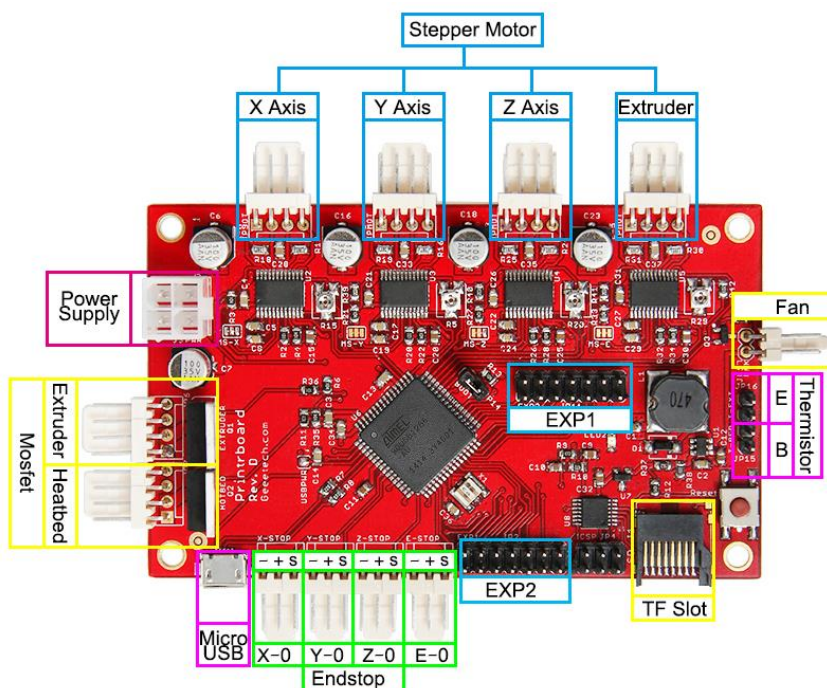


Obr. 13) Schéma zapojenia periférií na Sanguinololu [31]

5.5 Printrboard

Základová doska je pôvodne založená na jedenej z posledných verzií Sanguinololu. V porovnaní so Sanguinololu je Printrboard odlišný len v drobnostiach. Hlavný rozdiel je v spôsobe USB pripojenie. MicroUSB konektor je implementovaný priamo na doske na Rozdiel od Sanguinololu, kde je použitý iba FTDI UART (USB – serial) modul. Táto zmena pozitívne ovplyvnila rýchlosť dosky a skrátila doba nahrávania súborov pripravených na tlač. Na dosku bol rovnako integrovaný port pre microSD karty. [33]

Všetky konektory pre prívod energie, výstupy pre motory, extrudér, ventilátor, vyhrievanú platňu, termistory a koncové snímače sú rovnakého typu a sú umiestnené na rovnakej pozícii ako na pôvodnej Sanguinololu doske. Rovnako zhodné je aj priame pripojenie ovládačov krokov k základovej doske. [33]



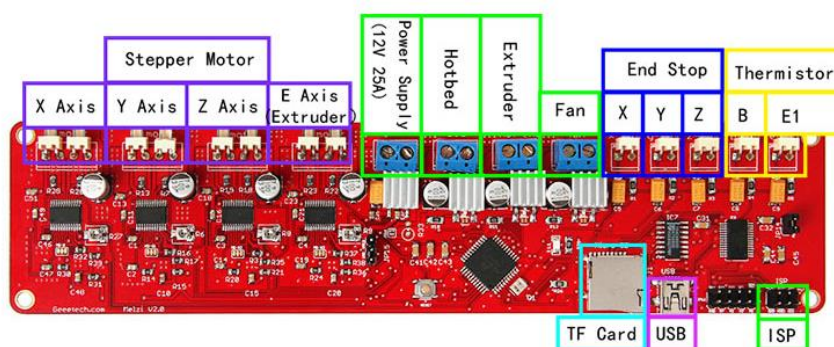
Obr. 14) Schéma zapojenia periférií na Printrboard [33]

5.6 Melzi

Základová doska Melzi je doska vytvorená pre program RepRap a navrhnutá so zreteľom na výrobné náklady, no schopná splniť požiadavky na 3D tlač potencionálnych zákazníkov. Melzi má základ v doske Sanguinololu, pričom už ona samotná je považovaná za lacnú verziu ovládania 3D tlačiarne. Melzi využíva tento fakt a navyše disponuje niektorými ďalšími funkciami ako napr. výstup pre vysokovýkonný ventilátor alebo slot na microSD kartu. [34]

Základová doska je osadená ovládačmi krokov A4988, ktoré sú prispájkované priamo na doske spolu s príslušnými kondenzátormi. Na doske sa nachádzajú 3 konektory pre koncové spínače a 2 pre termistory. Ďalší rozdiel oproti Sanguinololu je v počte použitých mosfetov. Melzi má navyše jeden mosfet pre extrudér a jeden pre vyhrievanú platňu. [34]

Snaha výrobcov vytvoriť čo najlacnejšiu dosku pre RepRap zariadenia bola na úkor kvality. Základová doska Melzi má výrazné problémy s kvalitou jednotlivých komponentov a to najmä mosfetov a rezistorov pre termistory. V prípade mosfetov výrobca deklaruje možnosť napájania pri napätí 60V a prúde 13A, avšak vzhľadom na vysoký odpor pri jednosmernom prúde spôsobí vyhorenie mosfetu už pri 3A. V prípade odporov pre termistory boli použité 10k pull-up rezistory na rozdiel od 4,7k pull-up rezistorov, ktoré umožňujú omnoho lepšie rozlíšenie pri vysokých teplotách a nižšiu spotrebu elektrickej energie. [34]



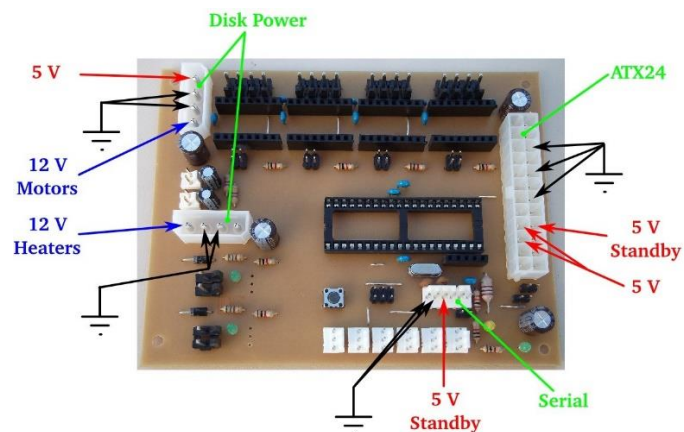
Obr. 15) Zapojenie periférií na Melzi [34]

5.7 Generation 7 electronics

Základová doska Generation 7 electronics je založená na princípe celého programu RepRap a to schopnosť vytvoriť na existujúcom zariadení jeden zo svojich komponentov. Generation 7 je kompletne svojpomocne zostaviteľná a replikovateľná doska. Plošné spoje je možné vytlačiť na zariadení z RepRap programu pomocou vzoru od vývojára dizajnu. Vývojárom tejto dosky je inžinier z Nemecka a jeden z hlavných administrátorov RepRap serveru známi ako Traumflug. Doska je veľmi podobná doskám RAMPS alebo Sanguinololu, avšak rýchlejšia vďaka 32 bitovému ARM procesoru.[35]

Vzhľadom na možnosť svojpomocného zostavenia dosky od základu nemá Generation 7 electronics pevne dané komponenty a ich rozloženie. No RepRap komunita poskytuje layout pre vytlačenie plošných spojov a odporúča použitie štyroch odnímateľných ovládačov krokov Polulu s možnosťou 1/32 mikrokrokovania. Rovnako sa odporúča použiť túto dosku pre zariadenie s jedným extrudérom a vyhrievanou platňou. Prívod elektrickej energie môže byť zabezpečený 20 alebo 24 pinovým ATX konektorom. Základová doska môže podporovať, rovnako ako iné bežne dostupné dosky, pripojenie slotu pre SD karty alebo LCD displej. [35]

Princíp voľného dizajnu prináša nové možnosti spotrebiteľom a priestor na vylepšenie svojho zariadenia avšak vyžaduje značnú znalosť elektrotechniky a jednotlivých komponentov. Nevýhodou je svojpomocné spájkovanie, pri ktorom sa môžu vyskytnúť nepresnosti a vady ako napr. chladné spoje. Takto vytvorená základová doska je v Európskej únii nepredajná, vzhľadom na to, že nemusí spĺňať príslušné normy a jej zostavenie je len na vlastné riziko. [35]



Obr. 16) Zapojenie periférií Gen. 7 electronics [35]

6 PRAKTICKÁ ČASŤ

Praktická časť tejto práce má poukázať na hlavné problémy hobby 3D tlačiarňí. Za hlavného zástupcu, na ktorom budú demonštrované všetky úpravy, bude považovaná tlačiareň z programu RepRap Prusa i3. Tlačiareň bola svojpomocne zostavená pre lepšie pochopenie problematiky. Pri stavbe zariadenia boli dodržiavané pokyny tvorcu zariadenia na stránke programu RepRap. Na stavbu boli použité súčiastky cenovo čo najdostupnejšie, čo mohlo naznačovať výrazne zhoršenú kvalitu oproti použitiu kvalitných originálnych dielov.

Samotná stavba prebiehala bez výraznejších problémov. Problémy nastali pri prvých skúšobných výtlakoch. Ako najzávažnejší problém sa javil problém upchávania trysky, čo je jeden z najčastejších problémov v komunite RepRap. Iné problémy so samotným zariadením neboli v tomto konkrétnom prípade spozorované. Ďalej bolo potrebné zariadenie nakalibrovat' a dosiahnuť stabilný chod zariadenia. Po mesačnom používaní sa prejavili najzávažnejšie konštrukčné nedostatky, ktoré táto práca rieši a tým prispieva k zlepšeniu kvality hotových výtlakov.

6.1 Spôsoby zlepšenia kvality tlače

Zlepšenie kvality tlače môže užívateľ docieľiť 2 spôsobmi. Softvérovou úpravou pri vytváraní G-kódu alebo konštrukčným vyladením zariadenia. Každý program na tvorbu G-kódu, tzv. slicer, má vo svojich nastaveniach preddefinované vlastnosti pre tlač. V týchto nastaveniach môže užívateľ upraviť všetky veličiny vplývajúce na 3D tlač ako napr. teplotu trysky alebo vyhrievanej platne, priemer tlačovej struny, výšku vrstvy, rýchlosť pohybu alebo spôsob a hustotu vnútornej výplne 3D modelu. Tieto nastavenia môžu dávať rôzne výsledky pri materiáloch od rôznych výrobcov, preto sa odporúča vyladiť si nastavenie vždy na materiál od daného výrobcu.

Na rozdiel od úprav softvérových, konštrukčné zmeny majú pozitívny efekt bez ohľadu na materiál alebo výrobcu. Pri dlhodobom používaní tlačiarne postavenej na základe pôvodného konceptu Jozefa Prúšu boli spozorované určité nedostatky, ktoré boli jednoducho odstránené. Medzi faktory najviac ovplyvňujúce kvalitu tlače patrili: uchytenie vozíku osi Y na lineárne vedenie, nedostatočné napnutie jednotlivých remeňov, nadmerné opotrebenie sa posuvu v osi Z, nestabilná poloha vyhrievanej dosky na vozíku osi Y.

6.2 Najčastejšie problémy pri tlači na hobby tlačiarňach

Pri snahe o tlač môže dochádzať rôznym problémom na extrudačnom systéme ako je upchávanie trysky, nesprávny pohyb trysky alebo nadmerné vibrácie. Tieto problémy sa môžu líšiť na základe použitých dielov a ich kvality. Pri pokusných výtlačkoch sa objavili problémy s nedostatočným podávaním struny (obr. 17) alebo so zasekávaním filamentu medzi vozíkom osi X a samotným hotendom (obr. 18).



Obr. 17) Nedostatočné podávanie filamentu

Typ problému	Problém	Frekvencia výskytu
Hardware	Upchávanie extrudéru	Časté
Hardware	Zasekávanie filamentu	Časté
Hardware / Software	Nedostatočné podávania filamentu	Zriedkavé
Hardware	Nedostatočné napnutie remeňov	Časté
Hardware	Opotrebovanie osi Z	Zriedkavé
Software	Zanechávanie vlákien pri tlači	Časté
Software	Prehrievanie filamentu	Časté
Software	Zdvíhanie rohov modelu	Časté
Software	Oddeľovanie vrstiev modelu	Časté
Software	Nedostatočná výplň modelu	Časté
Software	Medzery medzi obrysami a výplňou modelu	Zriedkavé
Software	Vznik línií na stene modelu	Zriedkavé
Software	Viditeľnosť vibrácií a vrúbkovania	Zriedkavé

Tab. 1) Prehľad najčastejších problémov hobby tlačiarní a ich riešení

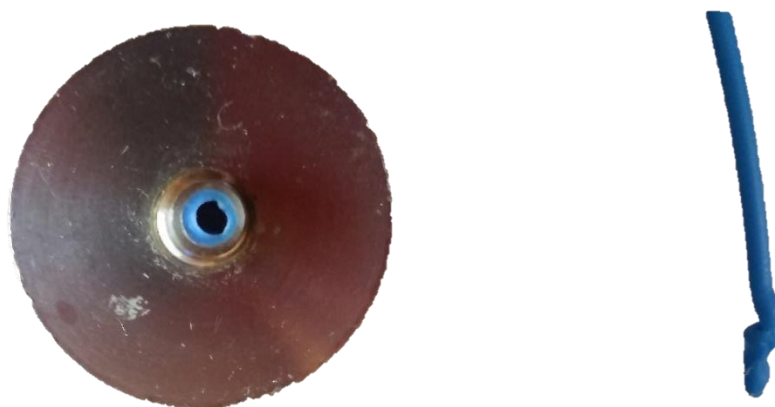
6.3 Upchávanie extrudéru

Upchávanie extrudéru je najčastejším problémom hobby 3D tlačiarní. Tryska sa upcháva aj napriek správne nastavenej teplote tavenia materiálu. Stretol sa s ním takmer každý člen komunity RepRap. Riešenia tohto problému môžu byť rôzne, vzhľadom na použité súčiastky.

Pri objavení sa tohto problému by mal užívateľ ako prvý krok skontrolovať výšku trysky od vyhrievanej podložky. Je to najzákladnejší a najjednoduchší krok, ktorý môže vyriešiť celý problém s upchávaním. Príznaky nesprávneho nastavenia výšky trysky môže užívateľ spozorovať jednoducho. V najhoršom prípade sa po spustení tlače tryska úplne dotýka dosky a tlačí ju smerom nadol. Tým pádom je celkom znemožnené filamentu cez trysku pretekať a dochádza k jej upchaniu. V miernejšom prípade je výška prvej vrstvy príliš malá. Prejavuje sa to plochým a rozotretým filamentom na vyhrievanej doske. Pri takomto nastavení dochádza k zhoršeniu prechodnosti trysky a k následnému upchaniu.

Pre odstránenie tohto problému je potrebné správne nastaviť zariadenie. Výška prvej vrstvy sa volí podľa priemeru trysky a požadovanej veľkosti vrstvy. Za použitia trysky s priemerom 0,3 mm, odporúča RepRap komunita použiť výšku vrstvy 0,2 mm. Nastavenie tejto výšky môžeme dosiahnuť pomocou použitia podkladacieho plechu o hrúbke práve 0,2 mm. Medzi trysku a vyhrievanú dosku vložíme plech a nastavujeme výšku dosky dovtedy, až kým sa nebudú všetky 3 časti vzájomne dotýkať. Treba dbať pozornosť na to aby sa dotýkali a nie tlačili jeden na druhého. Takéto nastavenie spravíme na viacerých miestach, aby sme zabezpečili rovnobežnosť dosky s pohybom extrudéru. V prípade, že užívateľ nemá dostupný vymedzovací plech môže použiť ako približnú náhradu list papiera. Postup nastavenia zostáva rovnaký.

Pri pretrvávajúcom problému s upchávaním aj po správnom nastavení výšky trysky sa odporúča pristúpiť úprave chladenia celého výhrevného systému. Príčinou upchávania filamentu vnútri hotendu môže byť zapríčinené nedostatočným chladením. Pri nedostatočnom chladení dochádza k postupnému zohriatiu aj iných častí hotendu ako k tomu predurčených, čo má za následok predčasné natavenie materiálu, zvýšenie koeficientu trenia a upchatie systému. Tento problém sa rieši jednoduchým osadením ventilátora na rebrovaný chladič hotendu.

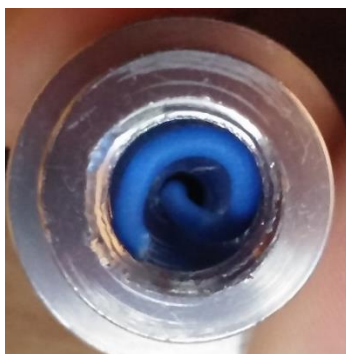


Obr. 18) Upchanie v mieste chladiča (vľavo), predčasné natavenie filamentu (vpravo)

Ak problém aj naďalej pretrváva užívateľ má možnosť výmeny alebo úpravy hotendu. Za predpokladu použitia hotendu s prírodnou rúrkou bez teflónového povrchu sa odporúča vymeniť ho za kus s teflónovým povrchom, prípadne si kus upraviť svojpomocne. Pre prípad použitia struny s priemerom 1,75 mm, treba vložiť do prírodnej rúrky teflónovú hadičku s vonkajším priemerom 4 mm a vnútorným 2 mm. Pri použití struny s priemerom 3 mm sa odporúča použitie teflónovej hadičky s vonkajším priemerom 6 mm a vnútorným 4 mm. Úprava prírodnej rúrky spočíva v jednoduchom prevítaní rúrky vrtákom príslušnej veľkosti a vsunutí teflónovej rúrky. Po znovu zmontovaní by mal byť problém s upchávaním vyriešený.

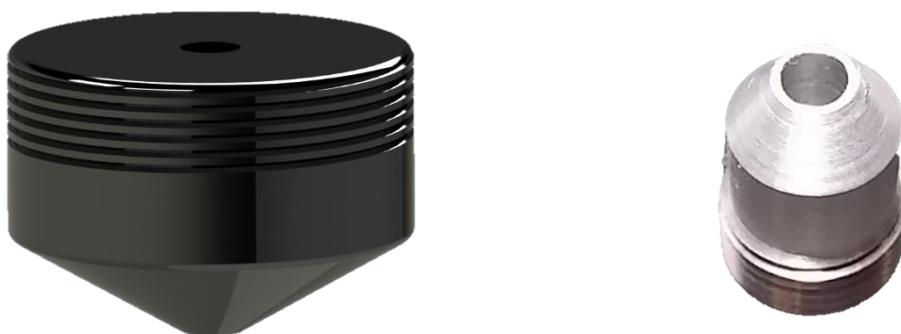
6.4 Zasekávání filamentu medzi vozíkom osi X a hotendom

Tento problém sa objavil až po nastavení výšky trysky a odladení vyššie spomenutých problémov. Spočiatku užívateľ nespozoruje žiadne problémy s tlačou. Po dvoch až troch minútach dochádza k zastaveniu podávania struny aj keď sa krokový motor určený na podávanie struny točí. Po rozobratí extrudéru užívateľ zbadá zvinutý filament v hornej časti extrudéru (viď obr. 19). Tento priestor je určený na naskrutkovanie koncovky bowdenu pre prípad externého podávania filamentu.



Obr. 19) Zaseknutie materiálu medzi vozíkom a hotendom

Problém so zvinutým filamentom bol vyriešený jednoduchým naskrutkovaním medzikusu (obr. 20), ktorý má za úlohu vyplniť medzeru medzi jednotlivými časťami systému a poskytnúť filamentu potrebnú oporu. Po naskrutkovaní bol problém odstránený.



Obr. 20) Model medzikusu (vľavo), vyrobený medzikus (vpravo)

6.5 Nedostatočné podávanie filamentu

Ťažkosti s podávaním filamentu je užívateľ schopný spozorovať v podstate okamžite. Prejavuje sa nedokonalým nanášaním vrstvy materiálu na model a tým dochádza k znehodnoteniu celej tlače. Tlač pri nedostatočnom podávaní tlačovej struny je zobrazená na obr. 18.

Tento problém môže mať 2 príčiny. Najčastejšou príčinou je prílišný odpor od kotúča so strunou. Nastáva najmä vtedy, keď užívateľ používa stojan na kotúč bez ložísk alebo stojan nepoužíva vôbec. Pri takom stave sa odporúča odvinúť z kotúča dĺžku struny potrebnú na tlač danej súčiastky alebo si zabezpečiť stojan, ktorý zabezpečí dostatočne nízky valivý odpor kotúča s filamentom.

Druhou častou príčinou je použitie nesprávny prítlačných pružín na extrudéry. Princíp podávania struny je založený na otáčajúcom sa drážkovanej skrutke, ku ktorej je pomocou tlačných pružín pritláčaný filament. Za použitia slabých prítlačných pružín dochádza k preklzávaniu medzi skrutkou a strunou, výsledkom čoho je nedostatočné podávanie filamentu a problémy s tlačou.

6.6 Uchytenie vozíku osi Y na lineárne vedenie

Podľa pôvodnej koncepcie bol rám vozíku osi Y uložený na troch lineárnych ložiskách LMUU8 a pritiahnutý sťahovacou páskou. Takéto riešenie spĺňalo predpoklad nízkych nákladov na stavbu zariadenia, no malo veľký vplyv na kvalitu tlače. Pevnosť spoja závisela na použitej sťahovacej páske a schopnosti užívateľa utiahnuť ju. Takýto spoj bol príliš pružný aj v prípade utiahnutia sťahovacej páske na maximálne napätie. Pri tlači boli prenášané a produkované výrazné vibrácie z remeňa na vozík osi Y, čo vyústilo do nerovnomerného nanášania vrstvy, tvorby vĺn a nepresnosti rozmerov v rovine XY.

Riešenie spočíva vo vytlačení modelu držiaka lineárneho ložiska (viď obr. 21) Takto navrhnutý držiak je užívateľ schopný pripevniť na vozíky osi Y pomocou skrutky a matky, prípadne samotnou skrutkou po narezaní závitu do vozíku. Následne je celý vozík upevnený na lineárne ložiská. Takéto riešenie spĺňa predpoklad programu RepRap o tlačení „samého seba“ a umožňuje viacnásobné použitie. Držiak predstavuje pevnejšie spojenie a eliminuje chyby tvorené nedostatočným utiahnutím páske. Pri meraní vonkajších rozmerov digitálnym posuvným meradlom bola zistená priemerná odchýlka o 0,04 mm menšia ako pri použití sťahovacej páske. Merania boli robené vždy na 5 testovacích vzorkách s rozmermi 20x20x8 mm (d×š×v).

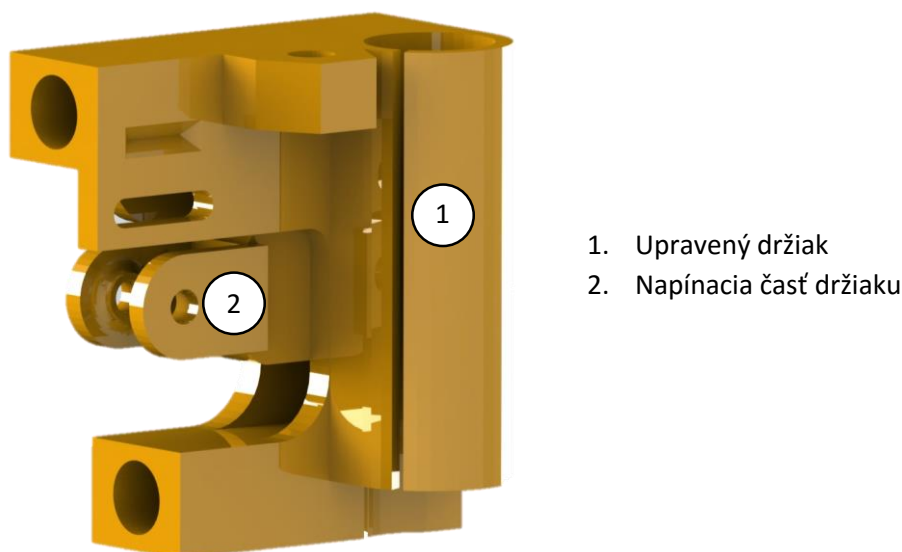


Obr. 21) Držiak lineárneho ložiska LMUU8

6.7 Nedostatočné napnutie remeňov

Pôvodná koncepcia tlačiarne Prusa I3 používa na pohyb vyhrievanej dosky v smere Y a na pohyb trysky v smere X nepriamy prevod pomocou ozubených remeňov. Na zmenu smeru remeňa sa používa malé ložisko pripevnené k pevnému rámu. Pri používaní zariadenia dochádza k postupnému predlžovaniu remeňa a nepresnosti pohybu v danej osi. Faktom, že užívateľ napína remeň len pri stavbe zariadenia a nemá možnosť dodatočného nastavenia pnutia, si všimla celá RepRap komunita a následne vyvinula konštrukčné úpravy, ktoré umožňujú dodatočné napínanie (viď obr. 22). Toto riešenie je najvhodnejšie a výrazne zlepšuje kvalitu tlače. Jej nevýhoda je nutnosť tlače celého držiaku. Pri tlači držiaku je spotrebované veľké množstvo

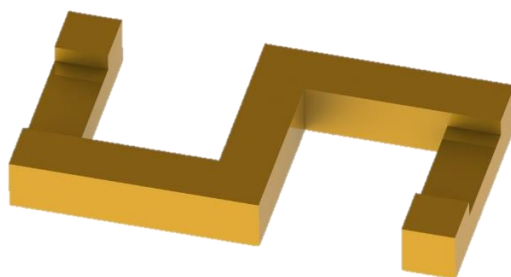
materiálu a jeho výmena je časovo náročná s rizikom poškodenia vodiacich častí alebo zmeny vzdialeností medzi nastaviteľnými časťami rámu. Po výmene držiaku je nutné opätovne nastaviť celé zariadenie do požadovanej presnosti.



1. Upravený držiak
2. Napínacia časť držiaku

Obr. 22) Držiak vedenia osi X s napínaním

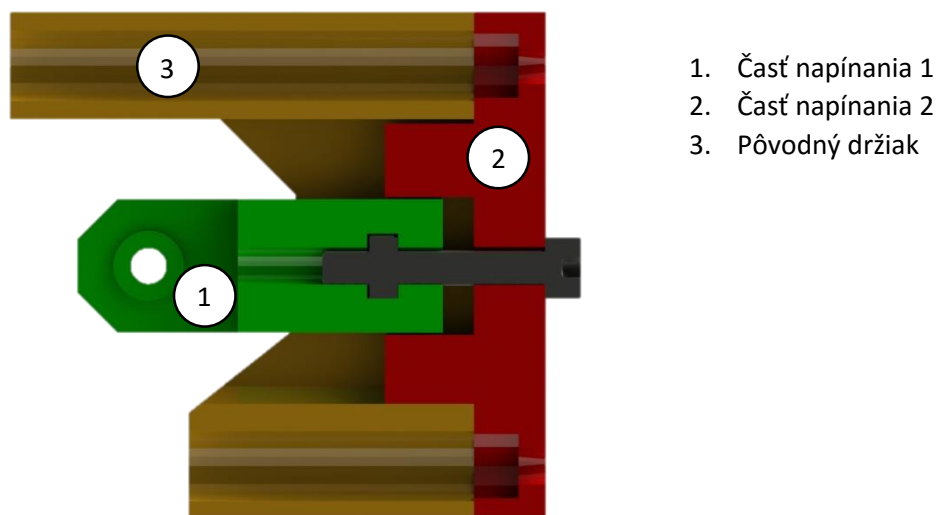
Ako jednoduchšie riešenie sa javí riešenie člena komunity thingiverse „Misguided“, ktorý vyvinul napínací profil. Jedná sa o profil tvaru písmena „S“ (viď obr. 23). Daný profil si môže užívateľ jednoducho upraviť na potrebné rozmery a jeho výroba nespotrebuje veľa materiálu. Dĺžka tlaču základného napínacieho prvku trvá približne 7 minút v závislosti na nastavení zariadenia. Užívateľ si vytlačí jeden základný profil, na ktorom otestuje svoje potreby na napínanie. V prípade, že potrebuje získať väčšie napätie vytlačí si profil s väčšou hrúbkou. V prípade, že potrebuje menšie pnutie, tak vytlačí model s menšou hrúbkou alebo s väčšími pozdĺžnymi rozmermi.



Obr. 23) Napínací S-profil

Takýto profil nevyžaduje rozoberanie zariadenia a dá sa okamžite aplikovať na zariadenie. Jeho nevýhoda spočíva v nepresnosti stupňa napnutia a využívania metódy „pokus-omyl“. V prípade stavby nového zariadenia sa odporúča použiť rovno držiak remeňa, ktorý umožňuje plynulé napínanie remeňa. V prípade, že je zariadenie pripravené na tlač a potrebuje iba doladiť, sa odporúča použitie S-profilu.

Výbornou kombináciou daných dvoch spôsobov napínania je dodatočný napínací mechanizmus „djvdplant“ z portálu thingiverse. Tento princíp spája výhody oboch vyššie uvedených spôsobov no je vhodný len pre napínanie v osi X. Mechanizmus ako celok sa montuje na existujúci držiak na osi Z. V porovnaní s tlačением celého držiaku spotrebuje iba 43% materiálu a účinok je rovnaký. Pomocou skrutky na konci mechanizmu je užívateľ schopný napínať remeň adekvátne k aktuálnej situácii. Všetky spomenuté modely sú voľne dostupné na stránke thingiverse.

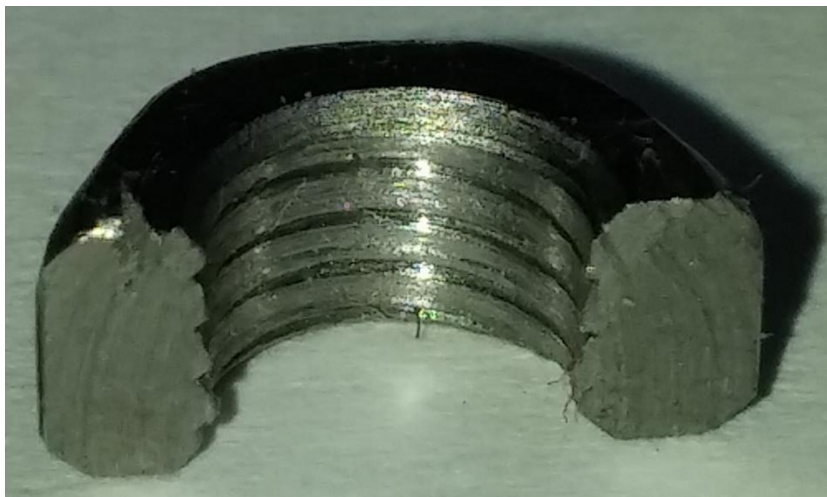


Obr. 24) Rez mechanizmom dodatočného napínania

6.8 Nadmerné opotrebenie na osi Z a nerovnomernosť pohybu

Pri testovaní jednotlivých vylepšení sa na zariadení po dobe 2 týždňov dostavil neželaný efekt opotrebenia posuvu po osi Z. V prípade zariadení Prusa I3 je posuv v smere osi Z tvorený lineárnym vedením a závitovou tyčou s príslušnou maticou. Na testovanom zariadení bola použitá závitová tyč o veľkosti M5 a z bežne dostupného materiálu z galvanicky pozinkovaným povrchom. Z počiatku sa pri tlači defekt prejavoval iba prostredníctvom občasného pískavého zvuku. Postupne sa na držiakoch na osi Z a na vonkajšom obale motorov pohybujúcich osou Z začali objavovať kokové piliny. Posledné štádium opotrebenia bolo možné spozorovať pri nastavovaní prvej výšky tlače. Pri pokuse o nastavenie 0,2 mm medzery medzi tryskou a vyhrievanou platňou bol posuv v osi Z nelineárny a nepredvídavý. Po bližšom preskúmaní bolo zistené nadmerné opotrebenie matice.

Riešenie daného problému nadmerného opotrebenia má 2 rôzne riešenia. Riešením je použitie závitovej tyče a matice s rozmermi M8, čo však zahŕňa kúpu novej spojky, úpravu držiaku na osi Z a v neposlednej rade úpravu firmwaru zariadenia. Ako vhodnejšie riešenie sa preto javí použitie spojovacej matice DIN 6334 veľkosti M5. Spojovacia matica má na svojej dĺžke omnoho viac styčných plôch ako bežná matica DIN 934. Pri použití tohto riešenia neboli po dobu 2 týždňov spozorované žiadne z vyššie uvedených príznakov opotrebenia.

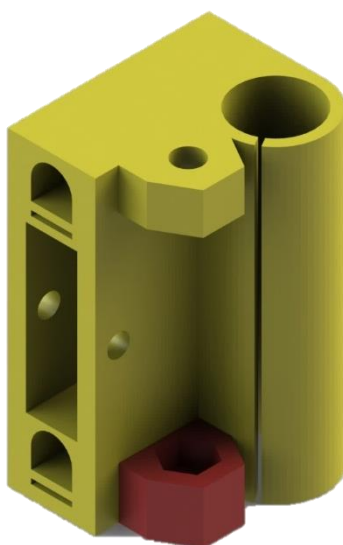


Obr. 25) Prierez opotrebovanou maticou

6.9 Nestále uloženie matice pre pohyb v smere osi Z

Pri pozorovaní opotrebenia vedenia na osi Z bol spozorovaný problém s nestálosťou uloženia matice pre pohyb v smere osi Z. Matica určená na transformáciu rotačného pohybu závitovej tyče na posuvný pohyb trysky v smere osi Z, je pôvodne iba vsunutý do šesťhrannej diery v držiaku na osi Z. V prípade, že tryska zavadí o vyhrievanú platňu alebo model samotný môže dôjsť k posunutiu alebo úplnému vysunutiu danej matice. Tým stráca zariadenie svoju presnosť a je nutné zariadenie kalibrovať znovu.

Návrh riešenia spočíval v použití druhej matice a dodatočne vytlačeného modelu držiaku matice. Držiak matice bol následne prilepený k dolnej časti držiaku osi X (viď obr. 26). Po aplikácii tejto úpravy bol držiak na osi Z dokonale upevnený so závitovou tyčou. Pri tejto úprave sa rovnako zdvojnásobila styčná plocha medzi maticou a závitovou tyčou, čím sa znovu zmenšilo opotrebenie matice.



Obr. 26) Model upraveného držiaku s maticami

6.10 Nestabilná poloha vyhrievanej dosky na vozíku osi Y

Základná koncepcia 3D tlačiarne Prusa I3 rieši upevnenie vyhrievanej dosky k vozíku osi Y pomocou štyroch skrutiek a štyroch tlačných pružín. Takéto uloženie umožňuje pomerne jednoduché i keď zdĺhavé nastavenie vyhrievanej platne v každom smere. Pri tomto zariadení je dôležitá najmä rovnobežnosť vyhrievanej s platne s rovinou pohybu trysky v rovine XY. Nevýhoda spočíva v tuhosti uloženia. Vzhľadom na použitie skrutiek M4×25, pružiny a matice M4 pre utiahnutie je výsledné veľmi labilné a vplyvom zotrvačnosti sa pohybu v rovine XY spolu s tlačným modelom. Táto nepresnosť sa prejavuje priamo úmerne rýchlosti tlače a pohybu zariadenia a taktiež vibráciami. Vo výsledku sa tento problém prejaví v presnosti tlače a v drsnosti celkového výtlačku.

Ako riešenie tohto problému boli vhodné 2 návrhy. Ako prvé riešenie bolo testované riešenie pomocou narezania závitu do vozíku a použitie skrutiek M5 pre upevnenie a matice pre zaistenie pozície. Skrutky držali svoju pozíciu a pohyb vyhrievanej podložky v rovine XY sa obmedzil na minimum, no vibrácie stále pretrvávali. Ako druhé riešenie bolo testované riešenie pomocou vloženia baliacej peny do priestoru medzi vyhrievanou platňou a vozíkom osi Y (viď obr. 27). Pena nijako neobmedzovala nastavovanie vyhrievanej platne a nevyžadovala žiadne úpravy na konštrukcii. Dosiahnutý výsledok bol uspokojivý. Vibráciám sa zamedzilo dostatočne a rovnako sa obmedzil pohyb vyhrievanej platne v rovine XY. Na základe testov sa ako najvhodnejšie riešenie javila kombinácia vyššie uvedených. Takéto riešenie ideálne obmedzuje vibrácie a pohyb vyhrievanej platne a ako druhotný pozitívny efekt sa prejavil fakt, že vložená baliaca pena plní funkciu tepelného izolantu. Užívateľ dokáže vyhrievanú platňu zohriať na vyššie teploty za kratší čas a za spotrebovania menšieho množstva energie.



Obr. 27) Podloženie vyhrievanej podložky baliacou penou

6.11 Nastavenie kvality tlače pomocou sliceru [36]

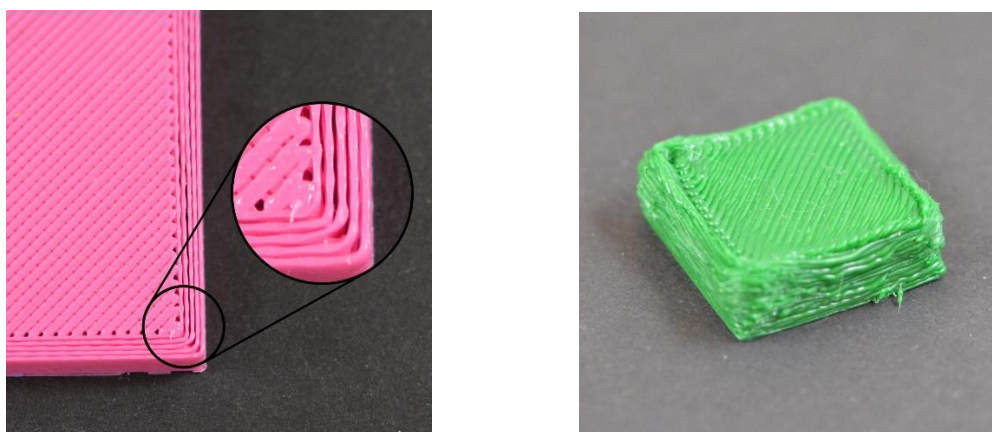
6.11.1 Nedostatočné a nadmerné vytlačanie termoplastu z trysky

V nastavení každého programu na prípravu 3D tlače si vie užívateľ prednastaviť koľko termoplastu a akou rýchlosťou má byť vytlačeného z trysky. Avšak väčšina 3D tlačiarňí neobsahuje žiadny snímač, ktorý by poskytoval spätnú väzbu o množstve vytlačeného materiálu tečúceho cez trysku. Z tohto dôvodu sa môže vyskytnúť problém s nedostatočným vytláčaním. Užívateľ môže tento defekt spozorovať už na začiatku tlače, keď tlač nie je konzistentná, medzi dráhami trysky vznikajú medzery a v krajnom prípade nie je ani tlač kontinuálna.

Najlepšou možnosťou otestovania správnosti je tlač 20 mm testovacej kocky s tromi obvodovými obrysmi. Na vrchu kocky užívateľ jednoducho skontroluje, či sú jednotlivé obrisy spojené alebo medzi nimi vznikla medzera. Ak medzi obrysmi vznikla medzera, tak došlo k nedostatočnému vytláčaniu materiálu.

Príčiny problému môžu byť dvojakého pôvodu. Ako menej častá príčina je nesprávne nastavenie priemeru tlačovej struny. V prípade, že užívateľ používa 1,75 mm tlačovú strunu a v programe má prednastavenú 3 mm tlačovú strunu, tak program určí menej otáčok motoru extrudéra na to, aby vytlačil daný model. V prípade správneho nastavenia priemeru struny no naďalej dochádza k nedostatočnému vytláčaniu, užívateľ by mal zmeniť nastavenie násobiča vytláčania (extrusion multiplier). Je nutné nájsť správnu hodnotu tohto násobiča. Zmeny sa pohybujú v rozmedzí 5% oproti pôvodnej hodnote. V prípade PLA termoplastu sa hodnota násobiča pohybuje na hodnote približne 0,9, zatiaľ čo pri ABS termoplaste je to hodnota približne 1,0.

Opačným problémom je nadmerné vytlačanie termoplastu. Princíp testovania je rovnaký ako v predchádzajúcom prípade, pomocou 20 mm testovacej kocky. Nadmerné vytlačanie sa prejaví presahom vytlačeného plastu cez hranu testovacej kocky, nesúmernosťou hrán alebo hrbolatým povrchom kocky. Pôvody problému môžu byť spôsobené taktiež nesprávnym nastavením priemeru tlačovej struny alebo nesprávnej hodnoty násobiča vytláčania. Spôsob nápravy je obdobný ako pri nedostatočnom vytláčaní avšak v opačnom smere, t.j. ak pri nedostatočnom vytláčaní bolo treba hodnotu násobiča zväčšiť, tak pri nadmernom vytláčaní ho treba naopak zmenšiť.



Obr. 28) Nedostatočné (vľavo) a nadmerné (vpravo) vytlačanie termoplastu

6.11.2 Zanechávanie tenkých vlákien plastu pri rýchlo posuve trysky

Zanechávanie zvyškov plastu pri rýchlo posuve trysky môže užívateľ spozorovať, ak počas tlače vznikajú za definovaným tvarom modelu vznikajú tenké vlákna plastu. Takéto zanechávanie vlákien je typické, ak sa počas pohybu trysky na novú pozíciu úplne nezastaví extrudácia plastu. Väčšina bežne používaných slicerov disponuje funkciou zatiahnutia (retraction). V prípade, že je táto funkcia zapnutá, tak extrudér posunie tlačovú strunu v opačnom smere vždy, keď je dokončená tlač danej sekcie. Následný posun trysky prebehne bez zanechania zvyškových vlákien termoplastu. V prípade tlače nasledujúcej sekcie, tlačová struna je pred samotnou tlačou posunutá do pôvodnej pozície a tryska je pripravená na extrudáciu.

Najdôležitejším faktorom pri nastavení funkcie zatiahnutia je nastavenie zatiahnutej vzdialenosti. Táto vzdialenosť určuje, koľko plastu je vtiahnutého späť do extrudéru. Pre prevedenie extrudéru s priamym podávaním je vhodné posunúť tlačovú strunu o 0,5 – 2,0 mm. V prípade extrudéru s bowdenom môže mať tento posuv hodnotu až v rozmedzí 12 – 15 mm z dôvodu väčšej dopravnej vzdialenosti od podávača k tryske. V prípade, že k zanechávaniu vlákien dochádza aj po nastavení odporúčaných hodnôt môže užívateľ tieto hodnoty postupne navyšovať v krokoch o veľkosti 1 mm až kým nepríde k správne mu priebehu tlače.

Druhým faktorom je nastavenie rýchlosti zatiahnutia. Toto nastavenie určuje, ako rýchlo je tlačová struna posunutá v reverznom smere. Ak je hodnota rýchlosti zatiahnutia príliš nízka, plast bude stále vytláčaný z trysky, aj keď v menšom množstve ako bez použitia funkcie zatiahnutia. Ak je hodnota zatiahnutia príliš rýchla dôjde k neželanému oddeleniu nataveného materiálu od tuhého alebo k prekročeniu maximálnej rýchlosti krokového motora a k strate krokov. Vhodná hodnota rýchlosti zatiahnutia sa pohybuje v rozmedzí 20-100 mm/s.



Obr. 29) Zvyšky tenkých vlákien

6.11.3 Prehrievanie filamentu

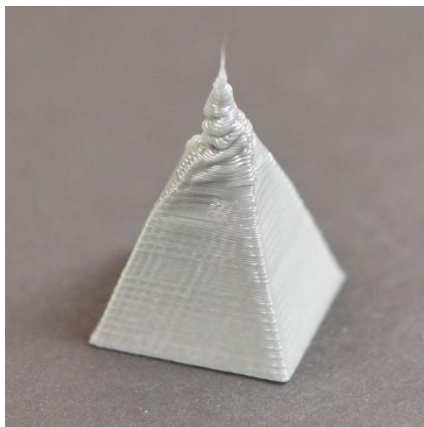
Každý termoplast má presne definovanú teplotu tavenia pre 3D tlač. Teplota tavenia bežných termoplastov sa pohybuje v rozmedzí od 190°C až do 240°C. Pri tejto teplote je termoplast poddajný a ľahko tvarovateľný do rôznych tvarov. No plasty používané pri 3D tlači rýchlo strácajú teplotu a tým aj menia svoju povahu na tuhú a nepoddajnú. Správna rovnováha medzi teplotou topenia a chladením má značný dopad na kvalitu 3D tlače. Pri správnej rovnováhe

týchto faktorov umožní jednoduchý prechod termoplastu tryskou no zároveň po vytlačení rýchlo zatuhne pre dodržanie správnych parametrov tlačeneho modelu. Pri nesprávnom nastavení dochádza k viditeľným problémom s kvalitou tlače, keď vzhľad modelu nedosahuje už na prvý pohľad požadovanú presnosť.

Najčastejším problémom prehrievania filamentu je nedostatočne rýchle chladenie. Pri nedostatočnom tuhnutí materiálu dochádza k samovoľnej zmene tvaru nanášaného termoplastu. Pre väčšinu materiálov je lepšie, ak tuhnú rýchlo a tak vytvárajú pevný základ pre nasledujúcu vrstvu. V prípade, že má užívateľ problém s pomalým tuhnutím materiálu, odporúča sa použitie ventilátoru na dodatočné chladenie. V prípade, že už je ventilátor použitý, tak je potreba vyšších otáčok ventilátora pre efektívnejšie chladenie.

Problém môže rovnako spočívať v nastavení teploty tavenia. Ak je pri tlači použitý ventilátor na maximálny výkon, chyba môže spočívať vo vysokej teplote tavenia. V takom prípade je doporučené znižovať teplotu trysky postupne v krokoch po 5°C. Po každej zmene teploty tavenia je potrebné kontrolovať priebeh tlače, či sa kvalita zlepšila a či zvolená teplota nie je príliš nízka, aby nedochádzalo k upchávaniu trysky.

Riešením problému môže byť aj zmena rýchlosti tlače. V prípade, že je tlač neadekvátne rýchla, vytlačená vrstva nestihne zatuhnúť a tým vytvorí pevnú podstavu pre tú nasledujúcu. Tento jav je pozorovateľný najmä pri tlači modelov malých rozmerov, kde na tlač jednej vrstvy je potrebný len niekoľko sekúnd. Aj za použitia ventilátoru vrstva nie je schopná zatuhnúť do požadovanej pevnosti. Väčšina slicerov zahŕňa možnosť nastavenia minimálnej dĺžky. Minimálna doba tlače jednej vrstvy sa môže meniť na základe použitého materiálu, no zásade ideálna doba tlače jednej vrstvy je približne 15 – 20 sekúnd. Ak je doba tlače jednej vrstvy pri zadanej rýchlosti kratšia ako preddefinovaná minimálna hodnota, program upraví rýchlosť tlače tak, aby táto hodnota bola dodržaná.



Obr. 30) Výsledok tlače pri prehrievaní filamentu

6.11.4 Zdvíhanie rohov modelu

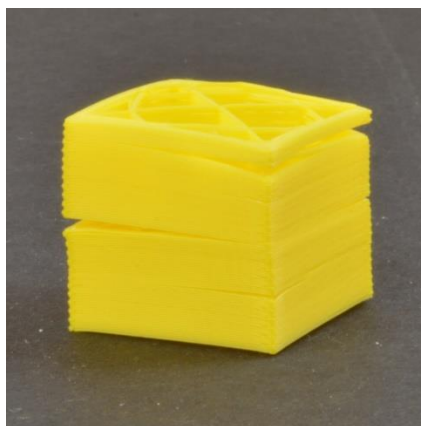
Častou chybou pri tlačených modeloch je oddeľovanie rohov obvodového profilu od podložky alebo zdvíhanie rohov pri samotnej tlači. Tento problém je typickým problémom prehrievania tlačeneho materiálu. Materiál je aj v tomto prípade tlačenej pri vysokej teplote a v čase mení svoj tvar. V prípade, ak sa rohy zdvíhajú už pri začiatku tlače, je potrebné zaistiť väčšiu adhéziu vyhrievanej podložky. Ak k zdvíhaniu rohov dochádza až počas tlače, tak je postup riešenia rovnaký ako v bode 6.11.3 Prehrievanie filamentu.

6.11.5 Oddelovanie vrstiev

3D tlač pomocou FDM typu spočíva, ako bolo vyššie uvedené, v nanášaní jednej vrstvy na druhú. Každá vrstva je nanáša na vrchnú časť tej predchádzajúcej až kým nie je hotový celý model. Avšak ak má byť finálny produkt pevný a mať požadovaný tvar, musí byť zabezpečené dokonalé spojenie sa dvoch po sebe nasledujúcich vrstiev. Ak vrstvy k sebe dostatočne nepriľnú, jednotlivé vrstvy sa pri chladnutí modelu od seba oddelia a dochádza k znehodnoteniu produktu ako je zobrazené na obrázku 31.

Pre dokonalý kontakt dvoch po sebe nasledujúcich vrstiev je rozhodujúca výška nanášanej vrstvy. Výšku vrstvy pri 3D tlači určuje priemer trysky. Väčšina trysiek používaných na 3D tlač má rozmer 0,3 – 0,5 mm. Materiál musí pretekať veľmi malým priestorom a vytvárať veľmi tenkú extrudáciu, aby bolo možné dosiahnuť maximálnu presnosť a detailnosť produktu. Práve priemer trysky je určujúci pre výšku vrstvy pri 3D tlači. Základným pravidlom pre nastavenie výšky vrstvy je zvolenie hodnoty výšky vrstvy o 20% menšej ako je priemer trysky. Na príklad ak je priemer trysky 0,4 mm, tak výška vrstvy by sa mala mať približne hodnotu 0,32 mm, inak sa materiál nemusí úplne spojiť. V prípade, že dochádza k oddelovaniu vrstiev je potrebné skontrolovať nastavenie tejto hodnoty, prípade túto hodnotu postupne znižovať po 0,05 mm. Avšak pri nastavení príliš nízkej výšky vrstvy, vo všeobecnosti pod hodnotu 1,5 mm, môže dochádzať k nedostatočnému prietoku tryskou a k jej upchávaniu.

Pri pretrvávajúcich problémoch s oddelovaním vrstiev aj po nastavení správnej výšky vrstvy, je možné že model je tlačенý pri nízkej teplote, a je potrebné túto teplotu zvýšiť aby bolo zaručené pevné spojenie dvoch vrstiev. Na príklad pri tlači modelu z ABS plastu o teplote 190°C môže ľahko dochádzať k oddelovaniu vrstiev. Ak k ním nepríde, tak model zostáva veľmi krehkým a k zlomeniu modelu príde aj pri minimálnom zaťažení v smere nanášaných vrstiev. Bežný ABS plast má odporúčanú teplotu tavenia 220 – 235°C čo zaručí správnu kvalitu modelu. Ak užívateľ nie je spokojný s výsledkom tlače pri použití odporúčaných teplôt výrobcom, je možné opäť zvyšovať teplotu postupne po 5°C a pozorovať zmeny na priebehu tlače až do okamihu dosiahnutia očakávaného výsledku.

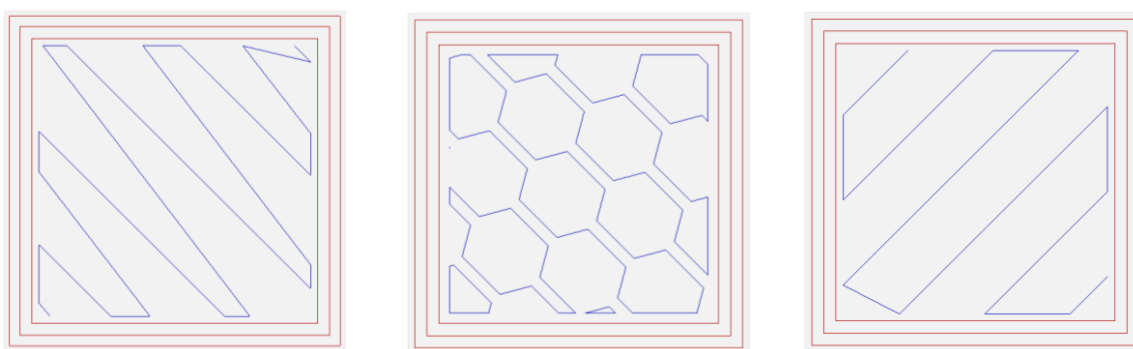


Obr. 31) Oddelovanie vrstiev modelu

6.11.6 Nedostatočná výplň modelu

Vnútoraná výplň modelu sa výrazne podpisuje na pevnosti celého produktu. Výplň spája vonkajšiu škrupinu modelu s telom a ostatnými časťami modelu. Rovnako spĺňa aj funkciu podpory najmä pri tlači vysokých a objemných modelov. Nastavenie výplne zahŕňa množstvo možností ako napr. nastavenie tvaru výplne alebo šírky tlačenej vlákna.

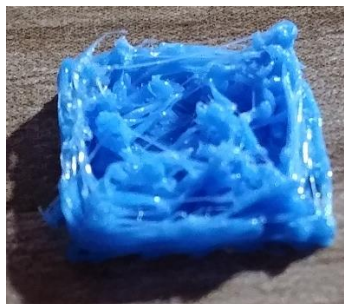
Pri nedostatočnej výplni modelu sa ako prvý krok odporúča úprava spôsobu výplne. Pri nastavení spôsobu výplne sa určuje vzor, podľa ktorého má byť model vyplňaný. Voľba použitého vzoru závisí na požiadavkách užívateľa na 3D tlač a výsledný model. Ak užívateľ kladie dôraz na pevnosť výsledného modelu, tak je odporúčané použiť mriežkový (Grid) alebo trojuholníkový (Triangular) vzor, vhodný je aj šesťuholníkový tvar včelieho plástu (Honeycomb). Pri požiadavke na minimalizáciu doby tlače sa odporúča použiť priamočiary (Rectilinear) typ výplne.



Obr. 32) Typy výplne (sprava) Grid, Honeycomb a Rectilinear

Vnútoraná výplň býva spravidla tlačená vo vyšších rýchlostiach ako vonkajšia škrupina modelu. Pri zvolení neúmerne vysokej rýchlosti tlače vnútornej výplne možnosťami tlačiarne, nastane jav nedostatočného vytlačenia materiálu z trysky, ktorý je popísaný vyššie. Nedostatočné vytlačenie materiálu vytvorí slabé miesta a tvorbu tenkých vlákien miesto kvalitnej štruktúry z dôvodu neschopnosti trysky dodať softvérom požadované množstvo materiálu. Pre vyriešenie takéhoto problému je nutné znižovať rýchlosť tlače vnútornej výplne v krokoch po 10% až do doby, kým nenastane kvalitná a rovnomerná tlač výplne.

Ak je nastavená adekvátne rýchlosť tlače výplne a problém pretrváva, užívateľ má možnosť nastaviť šírku nanášaného vlákna. Napríklad užívateľ má možnosť tlačiť škrupinu modelu veľmi jemnou štruktúrou s hrúbkou vlákna 0,4 mm, zatiaľ čo vnútoraná výplň môže byť tlačená s hrúbkou vlákna 8 mm. Takýto spôsob vytvorí pevnejšie steny výplne pri zachovaní vonkajšej detailnosti modelu. Zvolenie väčšej šírky vlákna ale vplýva na hustotu výplne. Ak užívateľ nastaví hodnotu šírky vlákna pre vnútornú výplň na 200%, tak bude výplň tlačená s použitím dvojnásobného množstva materiálu ako na iných miestach. Ak chce užívateľ zachovať hustotu výplne bude musieť zvoliť percento výplne s polovičnou hodnotou.



Obr. 33) Tlač modelu pri nedostatočnej výplni

6.11.7 Medzery medzi obrysmi a výplňou

Každý model tvorený na 3D tlačiarňi s FDM princípom je kombináciou obvodovej škrupiny a vnútornej výplne. Vonkajšia škrupina dáva modelu požadovaný tvar a presnosť. Vnútna výplň je určená na vyplnenie prázdneho miesta medzi jednotlivými časťami obvodovej škrupiny. Pre zaistenie správnych mechanických vlastností je nevyhnutné zabezpečiť dokonalé spojenie týchto dvoch častí pevným spojom.

Ak užívateľ spozoruje tvorbu medzier medzi vonkajšou štruktúrou modelu a vnútornou výplňou, model nemusí spĺňať požadované vlastnosti. Pre elimináciu vzniku medzier sa odporúča použiť nastavenie prekrývania spomínaných častí modelu. Funkcia prekrývania (overlap) vyžaduje percentuálnu hodnotu. V prípade ak užívateľ zadá hodnotu na príklad 20%, tak softvér dá pokyn zariadeniu na 20% prekrytie obvodového profilu vnútornou výplňou aby bol zaručene vytvorený pevný spoj. V prípade, že pri nastavenej hodnote medzery stále vznikajú odporúča sa postupne meniť hodnotu tejto funkcie po krokoch o veľkosti 5% a sledovať vplyv na celkovú tlač.

V situácií, keď k vzniku medzier dochádza aj pri zvýšení hodnoty prekrývania, chyba môže spočívať v rýchlosti tlače samotnej výplne. Ak je vnútorná výplň tlačaná príliš veľkou rýchlosťou, materiál určený na tvorbu výplne nedosadne na materiál vonkajšieho obrysu a nedôjde k požadovanému spojeniu. Správne nastavenie rýchlosti tlače vnútornej výplne je už popísané v bode 7.11.6 Nedostatočná výplň modelu.



Obr. 34) Nespojená vnútorná výplň s obvodovým profilom

6.11.8 Vznik líní na boku výtlačku

Bočné steny každého tlačeneého modelu na tomto type tlačiarne, pozostávajú zo stoviek vrstiev. Ak zariadenie pracuje správne, tieto vrstvy sú nerozpoznateľné a splynú do jedného jednoliateho kusu. Avšak, ak zariadenie nie je správne nastavené, môžu byť niektoré z vrstiev jasne rozpoznateľné. Tieto vyčnievajúce vrstvy môžu vyzeráť ako línie alebo ryhy na stene modelu. Takáto chyba sa môže na modely objavovať pravidelne napríklad s periódou opakovania 15 vrstiev.

Najčastejšou príčinou vzniku líní alebo rýh na bohu modelu je nedostatočná kvalita použitého materiálu. Ak tlačová struna nie je vyrobená s minimálnou toleranciou a minimálnymi odchýlkami, tak užívateľ môže spozorovať problémy tohto typu. Napríklad, ak sa priemer tlačovej struny mení o 5% pravidelne počas odvíjania celej kotúľky s materiálom, tak sa šírka plastu vytlačajúceho sa z trysky bude meniť v rozsahu až do 0,05 mm. Práve toto množstvo navyše vytlačeného materiálu zapríčini vznik vystupujúcich líní. Pre nápravu tohto typu problému je nutné použitie tlačovej struny s vyšším stupňom presnosti.

Inou príčinou vzniku líní je nestála teplota tlače. Väčšina 3D tlačiarň používa PID regulátor na reguláciu teploty trysky. Ak nie je PID regulátor správne nastavený, bude dochádzať k fluktuáciám teploty v čase. Na základe princípu fungovania PID regulátoru bude sa teplota meniť periodicky so sínusovým tvarom funkcie. Prietok termoplastu tryskou sa bude meniť v závislosti na amplitúde maxima či minima. Táto zmena teploty spôsobí tvorbu rýh a líní na bočnej stene tlačenej časti. Správne nastavené zariadenie by malo byť schopné udržať stálu teplotu s toleranciou $\pm 2^{\circ}\text{C}$. Pri výskyte týchto problémov je nutné aby užívateľ pomocou užívateľského prostredia v počítači kontroloval priebeh tlače. Ak sa hodnota teploty líši viac ako je doporučená tolerancia je nutná kalibrácia PID regulátora prípadne jeho výmena.

6.11.9 Viditeľnosť vibrácií a vrúbkovania na výtlačku

Vznik vln alebo vrúbkovania na povrchu modelu vzniká z dôvodu kývania alebo nadmerných vibrácií zariadenia. Užívateľ zvyčajne pozoruje vznik nepresnosti tohto druhu pri náhlej zmene smeru ako sú napríklad ostré rohy. Napríklad pri tlači 20 mm testovacej kocky extrudér náhle mení smer svojho pohybu vždy pri prechode na inú stenu kocky. Vplyvom zotrvačnosti extrudéru môžu vznikať tieto vibrácie viditeľné aj na samotnom modeli.

Obvyklou príčinou vzniku vrúbkovania modelu je snaha o minimálnu dobu tlače a tým pádom aj prílišne vysoká rýchlosť pohybu trysky. Keď tryska rýchlo zmení svoj smer, vznikajú veľké zotrvačné sily v smere predchádzajúceho pohybu, čo spôsobí vibrácie. Riešením je zníženie rýchlosti tlače. Niektoré programy na prípravu tlače obsahujú funkciu spomalenia rýchlosti tlače len pred zmenou smeru, čím sa doba tlače predlžuje iba minimálne ale množstvo vibrácií je zredukované na minimum.

Avšak množstvo dostupných slicerov s voľnou licenciou takúto funkciu nepodporuje. Možnosť zmeny akcelerácie pohybu je však zahrnutá vo firmwarovom rozhraní zariadenia. Nastavenie akcelerácie určuje ako rýchlo má daný motor akcelerovať a spomaľovať, čo má priamy vplyv na pohyb trysky. Detailné odladenie firmwaru má za následok redukciu vzniku vibrácií a presnejší výsledok tlače.

7 ZÁVER

Bakalárska práca pozostáva z dvoch častí. Teoretická časť oboznamuje so základnou problematikou hobby 3D tlačiarne a 3D tlačou ako takou. V praktickej časti sú popísané jednotlivé postupy 3D tlače, základné druhy kinematiky zariadení a najčastejšie používané základové dosky pre hobby tlačiarne. V práci sú ďalej popísané všetky výhody a nevýhody použitia daného typu kinematiky, postupu tlače alebo základovej dosky.

Praktická časť je venovaná úpravám konštrukcie hobby 3D tlačiarne Prusa I3. Pre lepšie pochopenie problematiky, bolo zariadenie od základu svojpomocne zostavené. Bol braný zreteľ na čo najnižšiu cenu zariadenia pri možnosti dosiahnuť čo najvyššiu kvalitu. Stavba zariadenia trvala 2 týždne a bola vykonaná podľa pokynov tvorca. Stavba bola jednoduchá, prebiehala plynulo a je vhodná aj pre mierne zručného užívateľa so základnými znalosťami mechaniky a elektrotechniky.

Pri prvých skúšobných výtlakoch boli pozorované chyby, na ktoré upozorňovala aj komunita užívateľov programu RepRap. Dochádzalo k upchávaniu trysky, nekonzistentnej tlači a nesprávnemu podávaniu tlačovej pružiny. Ďalej sa prejavili konštrukčné nedostatky ako napríklad uvoľňovanie skrutiek z dôvodu vibrácií alebo nestále uloženie matice pre pohyb v smere osi Z. Riešenie týchto problémov je popísané v bakalárskej práci. Po aplikovaní daných zmien bola dosiahnutá vysoká spoľahlivosť zariadenia, plynulý chod a nízka hladina hluku.

Po zabezpečení stálosti chodu a kontinuálnych podmienok bolo prístupné k návrhu riešenia bežných problémov vzniknutých pri 3D tlači. Jedná sa o nedostatočné alebo nadmerné vytlačanie materiálu z trysky, zanechávanie vlákien pri tlači, prehrievanie tlačovej struny, zdvíhanie rohov modelu pri tlači, oddeľovanie vrstiev modelu alebo vznik línií na stene modelu. Všetky tieto nedostatky objavujúce sa na tlačennom predmete boli riešené pomocou prednastavenia zariadenia.

Všetky vykonané zmeny mali priaznivý vplyv na kvalitu tlače a bola dosiahnutá presnosť zariadenia s maximálnou odchýlkou 0,11 mm. Merania presnosti boli robené na testovacím výtlaku tvaru kocky s hranou dlhou 20 mm. Boli vytlačené vždy 3 vzorky a zmeraná najväčšia odchýlka od presného rozmeru. Najväčší vplyv na výslednú kvalitu tlače mali hardvérové zmeny a to najmä aplikácia napínania remeňa a aplikácia baliacej peny pod vyhrievanú podložku. Ostatné úpravy zabezpečili stabilnú prevádzku zariadenia bez nutnosti nastavenia vždy pred tlačou, no kontrola správnosti sa odporúča.

8 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] Prusa I3. *RepRap.org* [online]. 2016 [cit. 2016-01-18]. Dostupné z: http://reprap.org/wiki/Prusa_i3
- [2] Visuel Prusa i3 Rework. *RepRap.org* [online]. 2016 [cit. 2016-01-18]. Dostupné z: http://reprap.org/mediawiki/images/c/c2/Visuel_Prusa_i3_Rework.png
- [3] Rostock. *RepRap.org* [online]. 2016 [cit. 2016-01-18]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/Rostock>
- [4] Rostock. *RepRap.org* [online]. 2016 [cit. 2016-01-18]. Dostupné z: http://www.socha.com/blogs/trains/3DR-Simple-Delta-Printer-Part-IV_869B/PB301811_500_thumb.jpg
- [5] CoreXY. *RepRap.org* [online]. 2016 [cit. 2016-01-18]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/CoreXY>
- [6] CoreXY theory. *Corexy.com* [online]. 2016 [cit. 2016-01-18]. Dostupné z: <http://corexy.com/theory.html>
- [7] Varianty rozloženia remeňov. *Fabtotum.com* [online]. 2014 [cit. 2016-01-18]. Dostupné z: <http://blog.fabtotum.com/blog/2014/04/04/belts-and-stuff-experiences-to-share/>
- [8] H-bot kinematika. *Doublejumelectric.com* [online]. 2014 [cit. 2016-01-18]. Dostupné z: http://www.doublejumelectric.com/projects/core_xy/pics/hbot.svg
- [9] Low-cost SCARA robotic arm for 3D printing. *3ders.org* [online]. 2014 [cit. 2016-01-22]. Dostupné z: <http://www.3ders.org/articles/20140917-flx-arm-low-cost-scara-robotic-arm-for-3d-printing.html>
- [10] SCARA. *Beckhoff.com* [online]. 2016 [cit. 2016-01-22]. Dostupné z: https://infosis.beckhoff.com/content/1031/tckintransformation/Images/png/1232566667__Web.png
- [11] R 360. *RepRap.org* [online]. 2016 [cit. 2016-01-24]. Dostupné z: http://reprap.org/wiki/R_360
- [12] Polar. *RepRap.org* [online]. 2016 [cit. 2016-01-24]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/Polar>
- [13] SLM:3D Printing Metal. *Sculpteo.com* [online]. 2016 [cit. 2016-01-24]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/en/glossary/selective-laser-melting-definition/>
- [14] Design rules and detail resolution for SLS 3D printing. *Shapeways.com* [online]. 2016 [cit. 2016-01-31]. Dostupné z: http://www.shapeways.com/tutorials/design_rules_for_3d_printing
- [15] FDM Technology. *Stratasys.com* [online]. 2016 [cit. 2016-01-31]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/3d-printers/technologies/fdm-technology>
- [16] Frequently Asked Questions FDM Technology. *Stratasys.com* [online]. 2016 [cit. 2016-01-31]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/3d-printers/technologies/fdm-technology/faqs>
- [17] ABS (Tecaran®). *Plasticsintl.com* [online]. 2016 [cit. 2016-01-31]. Dostupné z: <http://www.plasticsintl.com/abs.htm>
- [18] Fused deposition modelling. *Wikimedia.org* [online]. 2016 [cit. 2016-01-31]. Dostupné z: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/42/FDM_by_Zureks.png
- [19] PLA. *RepRap.org* [online]. 2016 [cit. 2016-01-31]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/PLA>

- [20] BUDEL, Tristram. DIY high resolution 3D DLP printer. *Instructables.com* [online]. 2014 [cit. 2016-02-14]. Dostupné z: <http://www.instructables.com/id/DIY-high-resolution-3D-DLP-printer-3D-printer/>
- [21] GRAUER JR., Mike. DLP tiskárna DWARF. *3dwarf.net* [online]. 2014 [cit. 2016-02-14]. Dostupné z: <http://www.3dwarf.net/dlp-tiskarna-dwarf>
- [22] GRAUER JR., Mike. Battle of 3D Printers: SLA vs. DLP. *Inside3dp.com* [online]. 2014 [cit. 2016-02-14]. Dostupné z: <http://www.inside3dp.com/battle-3d-printers-sla-vs-dlp/>
- [23] PALERMO, Elizabeth. DIY high resolution 3D DLP printer. *Livescience.com* [online]. 2013 [cit. 2016-02-14]. Dostupné z: <http://www.livescience.com/40310-laminated-object-manufacturing.html>
- [24] PALERMO, Elizabeth. Solido SD300 Pro 3D Printer: Desktop Rapid Prototyping for Quality CAD Models. *Solidmodelusa.com* [online]. 2013 [cit. 2016-02-14]. Dostupné z: <http://www.solidmodelusa.com/products/solido-sd300-pro-3d-printer>
- [25] Ramps 1.4. *RepRap.org* [online]. 2016 [cit. 2016-02-20]. Dostupné z: http://reprap.org/wiki/RAMPS_1.4
- [26] Ramps 1.4. *Geeetech.com* [online]. 2015 [cit. 2016-02-20]. Dostupné z: <http://www.geeetech.com/wiki/index.php/Ramps1.4>
- [27] Interface layout. *Geeetech.com* [online]. 2015 [cit. 2016-02-20]. Dostupné z: <http://www.geeetech.com/wiki/images/f/f9/%E7%BA%BF%E8%B7%AF%E5%9B%B> E.jpg
- [28] Rambo 1.1B Controller with accessories. *Reprapelectro.com* [online]. 2016 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <https://reprapelectro.com/product/rambo/>
- [29] Rambo connections. *Reprap.org* [online]. 2016 [cit. 2016-02-21]. Dostupné z: <http://reprap.org/mediawiki/images/5/5c/Rambo-conn-all.jpg>
- [30] MEIJER, Bart. *MEGATRONICS v3.1 DATASHEET* [online]. 2016 [cit. 2016-02-21]. Dostupné z: <http://reprapworld.com/documentation/datasheet%20megatronicsv3.pdf>
- [31] Sanguinololu. *Geeetech.com* [online]. [cit. 2016-03-11]. Dostupné z: <http://www.geeetech.com/wiki/index.php/Sanguinololu>
- [32] SainSmart Rev. 1.3 Atmega1284p Reprap Electronics 3D Printer For Sanguinololu. *Sainsmart.com* [online]. [cit. 2016-03-11]. Dostupné z: <http://www.sainsmart.com/3d-printing/controller-boards/sainsmart-rev-1-3-atmega1284p-reprap-electronics-3d-printer-for-sanguinololu.html>
- [33] Printrboard. *Geeetech.com* [online]. [cit. 2016-03-11]. Dostupné z: <http://www.geeetech.com/wiki/index.php/Printrboard>
- [34] Melzi V2.0. *Geeetech.com* [online]. [cit. 2016-03-11]. Dostupné z: http://www.geeetech.com/wiki/index.php/Melzi_V2.0
- [35] Gen7 Board 1.3.1. *Reprap.org* [online]. [cit. 2016-03-11]. Dostupné z: http://reprap.org/wiki/Gen7_Board_1.3.1
- [36] Print Quality Troubleshooting Guide. *Simplify3d.com* [online]. [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/print-quality-troubleshooting/>

9 ZOZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKOV A TABULIEK

9.1 Zoznam tabuliek

Tab 1)	Prehľad najčastejších problémov hobby tlačiarní a ich riešení	28
--------	---	----

9.2 Zoznam obrázkov

Obr. 1)	Popis karteziánskeho typu.....	9
Obr. 2)	Popis deltového typu.....	10
Obr. 3)	Varianty rozloženia remeňov.....	12
Obr. 4)	Rozloženie remeňov pre H-bot kinematiku.....	12
Obr. 5)	Schéma SCARA zariadenia.....	13
Obr. 6)	Zariadenie s polárnou kinematikou.....	14
Obr. 7)	Schematické znázornenie FDM tlače.....	16
Obr. 8)	Schematické znázornenie DLP tlače.....	17
Obr. 9)	Schematické znázornenie LOM.....	18
Obr. 10)	Schéma zapojenia periférií na RAMPS 1.4.....	20
Obr. 11)	Zapojenie periférií RAMBo.....	21
Obr. 12)	Zapojenie periférií Megatronics.....	22
Obr. 13)	Schéma zapojenia periférií na Sanguinololu.....	23
Obr. 14)	Schéma zapojenia periférií na Printrboard.....	24
Obr. 15)	Zapojenie periférií na Melzi.....	25
Obr. 16)	Zapojenie periférií Gen 7 electronics.....	26
Obr. 17)	Nedostatočné podávanie filamentu.....	28
Obr. 18)	Upchanie v mieste chladiča, predčasné natavenie filamentu.....	29
Obr. 19)	Zaseknutie materiálu medzi vozíkom a hotendom.....	30
Obr. 20)	Model medzikusu, vyrobený medzikus.....	30
Obr. 21)	Držiak lineárneho ložiska LMUU8.....	31
Obr. 22)	Držiak vedenia osi X s napínaním.....	32
Obr. 23)	Napínací S-profil.....	32
Obr. 24)	Rez mechanizmom dodatočného napínania.....	33
Obr. 25)	Prierez opotrebovanou maticou.....	34
Obr. 26)	Model upraveného držiaku s maticami.....	34
Obr. 27)	Podloženie vyhrievanej podložky baliacou penou.....	35
Obr. 28)	Nedostatočné a nadmerné vytlačanie termoplastu.....	36
Obr. 29)	Zvyšky tenkých vlákien.....	37
Obr. 30)	Výsledok tlače pri prehrievaní filamentu.....	38
Obr. 31)	Oddelovanie vrstiev modelu.....	39
Obr. 32)	Typy výplne Grid, Honeycomb a Rectilinear.....	40
Obr. 33)	Tlač modelu pri nedostatočnej výplni.....	41
Obr. 34)	Nespojená vnútorná výplň s obvodovým profilom.....	41

9.3 Zoznam pojmov a skratiek

Označenie	Názov
FDM	Fused deposition modeling
PLA	Polylactic acid
SCARA	Selective Compliance Assembly Robot Arm
CNC	Computer numerical control
SLS	Selective laser sintering
SLM	Selective laser melting
FFF	Fused filament fabrication
ABS	Acrylonitrile butadiene styrene
PC	Polycarbonate
PA	Polyamide
PS	Polystyrene
UV	Ultraviolet
SLA	Stereolitografia
DLP	Digital Light Processing
LCD	Liquid-crystal display
LOM	Laminated object manufacturing
USA	United States of America
USD	United States dollar
PVC	Polyvinyl chloride
RAMPS	RepRap Arduino Mega Pololu Shield
SD	Secure Digital
USB	Universal Serial Bus
ATX	Advanced Technology eXtended
ARM	Acorn RISC Machine
PID	Proportional–integral–derivative controller
RepRap	Replicating Rapid-prototyper
3D	3 dimensional

10 ZOZNAM PRÍLOH

CD-ROM

- | | |
|---|--------------|
| • Elektronická verzia bakalárskej práce | *.pdf súbor |
| • 3D model testovacej kocky | *.step súbor |
| • 3D model medzikusu hotendu | *.step súbor |
| • 3D model držiaku LMUU ložiska | *.step súbor |
| • 3D model upraveného napínania remeňa | *.step súbor |
| • 3D model napínacieho S-profilu | *.step súbor |
| • 3D model upraveného držiaku osi X | *.step súbor |