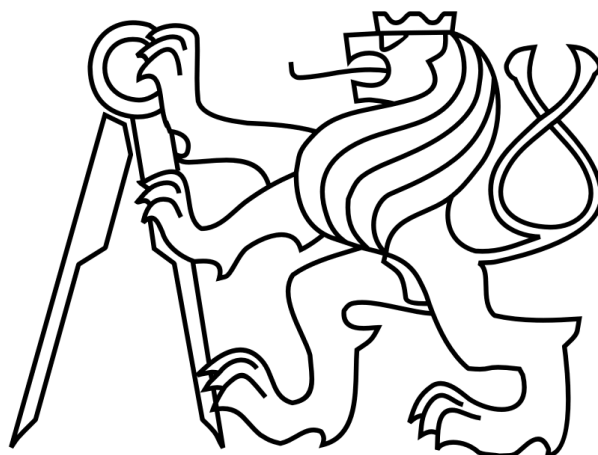


České vysoké učení technické v Praze

fakulta elektrotechnická

katedra telekomunikační techniky



Bakalářská práce

3D tiskárna s možností výměny tiskových hlav

3D Printer with Replaceable Printheads

Autor: Evgeny Khalafyan

Vedoucí práce: Ing. Lubor Jirásek, CSc.

2015

3D tiskárna

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra telekomunikační techniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Khalafyan Evgeny**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika
Obor: Síťové a informační technologie

Název tématu: **3D tiskárna s možností výměny tiskových hlav**

Pokyny pro vypracování:

1. Prostudujte dostupnou literaturu týkající se využití a konstrukcí 3D tiskáren.
2. Na základě bodu 1) navrhnete úpravy a odstraňte vady konstrukce stávající tiskárny vašeho předchůdce a navrhnete programové vybavení 3D tiskárny. Zařízení by mělo umožňovat výměnu tiskových hlav.
3. Navrhnete postup vhodný pro ověření funkce přístroje.
4. Provedte ověřovací měření na zařízení.
5. Zhodnoťte dosažené výsledky.
6. Navrhnete možné úpravy do budoucna.
7. Zařízení zůstane v majetku zadávajícího pracoviště.

Seznam odborné literatury:

- [1] Bečka: Cvičení CAD. ČVUT FS, Praha 2001. ISBN: 80-01-02426-1.
- [2] Reese, R.B.: Microprocessors: From Assembly Language to C Using The PIC18Fxx2, Da Vinci Engineering Press, Hingham Massachusetts 2005 Brian W. ISBN: 15-84-50378-5.
- [3] Vobecký, J. - Záhlava, V.: Elektronika. Grada, Praha 2005 a pozdější vydání. ISBN 80-247-1241-5.

Vedoucí: Ing. Lubor Jirásek, CSc.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2015/2016

prof. Ing. Boris Simák, CSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 12. 12. 2014

3D tiskárna

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou bakalářskou práci „3D tiskárna s možností výměny tiskových hlav“ s možností výměny tiskových hlav“ zpracoval sám s přispěním vedoucího práce a používal jsem pouze literaturu uvedenou na konci práce. Souhlasím se zapůjčováním práce a jejím zveřejňováním.

podpis

Evgeny Khalafyan

V Praze dne

3D tiskárna

Poděkování

Především bych chtěl poděkovat svému veducímu Ing. Luboru Jiráskovi, CSc. za příležitost pracovat na vytvoření 3D tiskárny, pomoc při realizace a cenné rady. Dále bych chtěl poděkovat svým rodičům a příbuzným za jejich podporu. Zvláštní poděkování všem těm lidem, kteří pomáhali při procesu stavby tiskárny

3D tiskárna

Abstrakt

Náplní této bakalářské práce je problematika 3D tisku. Budou zde stručně uvedeny možnosti realizace tiskáren, metody 3D tisku a materiály které se používají pro tištění. Cílem práce je realizace funkční tiskárny na základě metody FDM, zesílení její kostry, prozkoumání možnosti tisku různých materiálů a na základě získaných znalostí navrhnout vhodnou tiskací hlavu. Budou také rozebrány a porovnány mezi sebou metody realizace ohřívací podložky a předložena vlastní varianta. Práce obsahuje popis použitých součástek, konstrukce a programy sloužící k obsluze 3D tiskáren.

Klíčová slova

3D tiskárna, 3D tisk, Computer Aided Design, Řídicí jednotka, Krokový motor, Electron Beam Melting, Fused Deposition Modeling, Laminated Object Manufacturing, Acrylonitrile Butadiene Styrene, Stereolithography, Stereolithographie, Polylactic acid, Nylon.

Abstract

The bachelor thesis introduces the problems of 3D printing. It provides a brief description of 3D printer realization, as well as materials that can be suitably used for its creation. The main aim of the thesis is to assemble a functioning engine using the FDM technology, likewise to strengthen its frame, survey printing approaches of various kinds of materials and on the basis of the acquired knowledge to propose a suitable print-head. Also different methods of heating substrate realization are analyzed and compared and as the result of these studies, an offer of an own heating substrate version is made. Moreover, the thesis includes the characterization of utilized components, engine construction and the maintenance program description.

3D tiskárna

Key words

3D printer, 3D print, Computer Aided Design, Controller, Step motor, Electron Beam Melting, Fused Deposition Modeling, Laminated Object Manufacturing, Acrylonitrile Butadiene Styrene, Stereolithography, Stereolithographie, Polylactic acid, Nylon.

Obsah

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE.....	1
Seznam obrázků	6
1. Úvod.....	7
2. Druhy technologií 3D tisku	9
2.1. FDM.....	9
2.2. Polyjet	10
2.3. LOM.....	11
2.4. SLA	12
2.5. SLS.....	13
3. Materiály pro tisk metodou FDM.....	15
3.1. ABS	15
3.2. PLA	15
3.3. Nylon.....	15
3.4. LAYWOO-D3.....	16
3.5. Vodivé grafenové vlákno... ..	16
5. Ohřívací podložka	17
6. Zdroj napětí a proudu	21
7. Logická část	21
8. Sílová část	22
9. Krokové drivery	23
10. Extruder.....	25
10.1 Vlastní řešení	26

3D tiskárna

11.	Krokové motory	27
12.	Koncové spínače.....	29
13.	Částečně realizovaná konstrukce.....	30
14.	Programy pro řídicí jednotku.....	30
15.	Firmware.....	31
16.	Nastavení počátečních parametrů tiskárny.....	31
16.1	Výpočty základních parametrů.....	32
17.	Software pro řízení.....	33
18.	Slicery.....	34
19.	Závěr.....	35
20.	Přílohy.....	36
21.	Bibliografie.....	37

Seznam obrázků

1	Porovnání kvality tisku s využitím různých výšek jednotlivých vrstev	8
2	Statistika využití technologií 3D tisku	8
3	Proces tisku metodou FDM.....	10
4	Proces tisku metodou Polyjet	11
5	Proces tisku metodou LOM	12
6	Proces tisku metodou SLA.....	13
7	Proces tisku metodou SLS	14
8	Místa spojů do a po modifikaci	16
9	Stabilizační rám.....	16
10	Rozložení tepla na povrchu ohřívací desky MK2B	17
11	Rozložení tepla na povrchu polymidové folií.	20
12	Podložka udělana pomocí polymidové folií.....	20
13	Histogram rozložení tepla na povrchu polymidové folií.....	21
14	laboratorní zdroj MATRIX MPS-3003L-3	21

3D tiskárna

15	Shema zapojení Ramps 1.4	23
16	Zapojení ovladače v základním režimu celokroku.....	24
17	Schematický diagram krokového driveru A4988	25
18	Schema trysky	26
19	Tisková hlava	27
20	Rozměry krokového motoru	28
21	Schéma zapojení mechanického spínače	29
22	Částečně realizovaná konstrukce tiskárny	30
23	Testování zařízení	31
24	Ovládací panel programu Pronterface.....	33
25	Ovládací panel programu Sli3cr.....	34

1. Úvod

Za poměrně krátkou dobu technologie 3D tisku našla své uplatnění v mnoho oblastí. Můžeme se s ní setkat například v automobilovém průmyslu při výrobě buď modelů používaných pro prezentační účely, nebo prototypů. Pomocí 3D tiskárny inženýři dokážou relativně rychle z 3D modelu dostat hotový prototyp, oproti tomu, standardní metody by potřebovali vhodné zařízení a větší časový interval nutný pro výrobu, z toho plyne že 3D tisk šetří nejen čas ale i peníze. Ještě jednou velmi zajímavou oblastí přizpůsobení 3D tisku je medicína. Vědci z vysoké školy Feinstein Institute for Medical Research použili upravenou MakerBot 3D tiskárnu pro tisk lidské chrupavky k odstranění poškození průdušnice. Vědci vytiskli kostru z polymléčné kyseliny s buňkami chrupavky a kolagenem. Buňky přežili proces tisku a vytvořili vhodnou pro transplantace průdušnice. Mezi možnosti aplikace této technologií v medicíně taky patří výroba implatátů a protézů.

Hlavní nevýhodou 3D tisku je pozorovatelná drsnost povrchu vytištěného objektu, která je dána tím že objekt se skládá z jednotlivých vrstev. Je důležitý však uvést, že kvalita a hladkost povrchu ne vždy záleží jenom na výšce jednotlivých vrstev. Při tištění velmi tenkých vrstev, malé chyby v kalibraci způsobují významné poškození výsledného objektu.

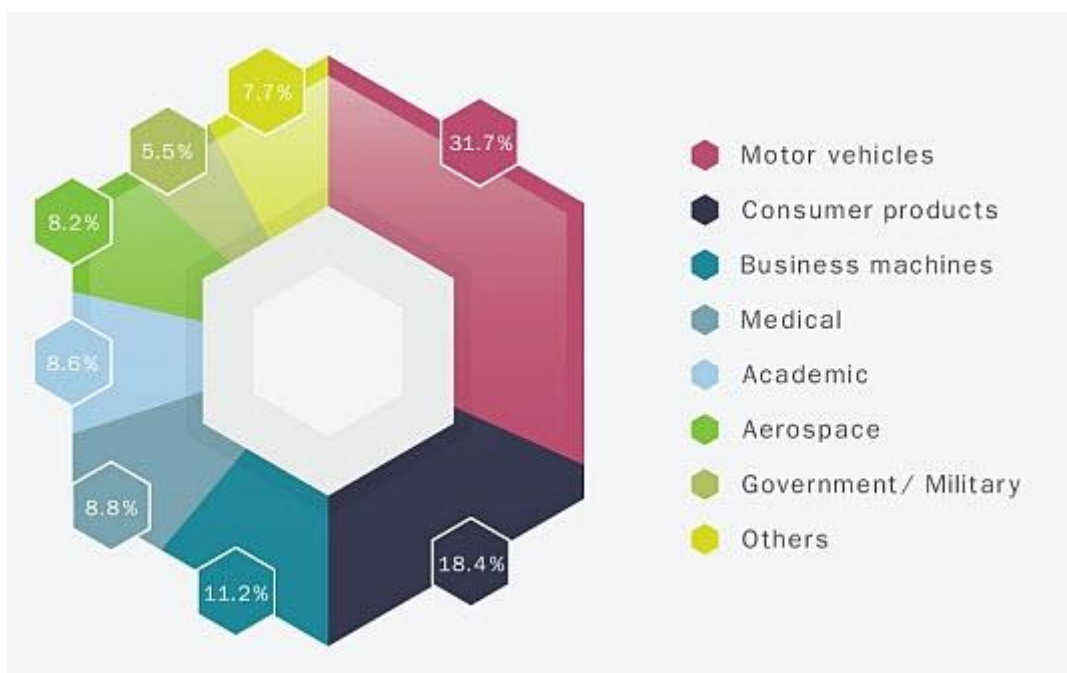
3D tiskárna



Obr. 1. Porovnání kvality tisku s využitím různých výšek jednotlivých vrstev (převzato z [1]).

Zásadní výhodou 3D tisku je docela malá náročnost na obsluhu tiskáren a nízké náklady při výrobě konečných produktů. Ve většině případů náklady na požadovaný objekt jsou nižší než u konvenčních metod. Za pomoci určitých technologií lze vytisknout skoro libovolný geometrický tvar.

Statistika využití technologií 3D tisku na 2014 rok je následující: automobilový průmysl (31,7 %), spotřební zboží (18,4 %), komerční stroje (11,2 %), zdravotní technika (8,8 %), akademická sféra (8,6 %), letecký průmysl (8,2 %), vláda a armáda (5,5 %), ostatní (7,7 %).



3D tiskárna

Obr.2: Statistika využití technologií 3D tisku (převzato z [2]).

Cílem této bakalářské práce je realizace funkčního prototypu 3D tiskárny s možností výměny tiskacích hlav pro tisk různých materiálů. Technologie podle které pracuje tiskárna je FDM (Fused Deposition Modeling). Důvodem proč byla vybraná tato technologie je poměrně nízká cena, jednoduchost konstrukce a možnost experimentů z druhy materiálů.

2. Druhy technologií 3D tisku

Proces jakéhokoli 3D tisku lze hrubě rozdělit na několik zásadních kroků: modelování objektu který bude vytištěn, převod do formátu STL (STereoLitography), odstranění chyb které vznikly při importování objektu do formátu STL, „slicování“ - rozdělení objektu do jednotlivých vrstev, vygenerování G-kódu, tisk objektu. Z toho plyne, že na rozdíl od klasického obrábění hmota se neubírá, ale naopak se po vrstvách přidává. Objekt je obvykle vytištěn na základní desce, v moment ukončení jedné vrstvy deska poklesne dolu o výšku této vrstvy, respektive stoupne nahoru tiskací hlava. Přestože základní postup tisku je v každém případě stejný, z momentu objevení 3D tisku vzniklo mnoho různých metod a technologií, mezi kterými jsou:

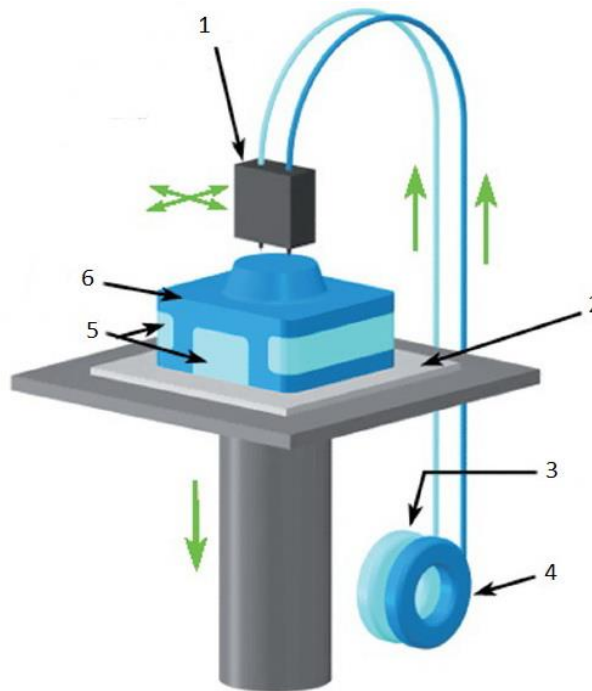
- **FDM (fused deposition modeling)** - vytvrzování vrstev tekutého polymeru
- **Polyjet** - tisk vrstev pomocí termopolymeru
- **LOM (laminated object manufacturing)** - vrstvení lepivého materiálu
- **SLA (Stereolithography)** - vytvrzování vrstev tekutého polymeru
- **SLS (Selective Laser Sintering)** - spékání práškového materiálu pomocí laseru
- **SGC (Solid Ground Curing)** - vytvrzování fotocitlivého polymeru

2.1 FDM

Pomocí extruderu se do trysky přivádí tiskový materiál- termoplast. Hlava tiskárny obsahuje zahřívací tepelně řízené elementy, které roztaví polymer. Roztavená hmota je pak vytlačena na tiskovou platformu. Celá soustava pohybuje nad podložkou a z vytlačovaného materiálu vrstva po vrstvě se tvoří výsledný objekt. Tiskací hlava umožňuje nanášení materiálu vrstvou s výškou v rozmezí od desítn milimetrů až do desítek mikronů. Jakmile plast opustí trysku, musí se hned spojit s předchozí vrstvou. V některých případech se používá tak zvaný podpurný materiál, sloužící

3D tiskárna

jako podpora v místech kde je těžko, respektive se vůbec nedá nanášet modelovací materiál. Podpurný materiál se pak odstraňuje mechanickým nebo chemickým způsobem. Termoplast obvyklé představuje vlákno namotané na cívku, zřídka je ve formě plastových kuliček. Pro velký počet tiskacích materiálů je nutně mít ohřívací podložku. Její úkolem je zabránění oddělení první nanesený vrstvy a další deformace celého modelu.



Obr. 3: Proces tisku metodou FDM (převzato [3]).

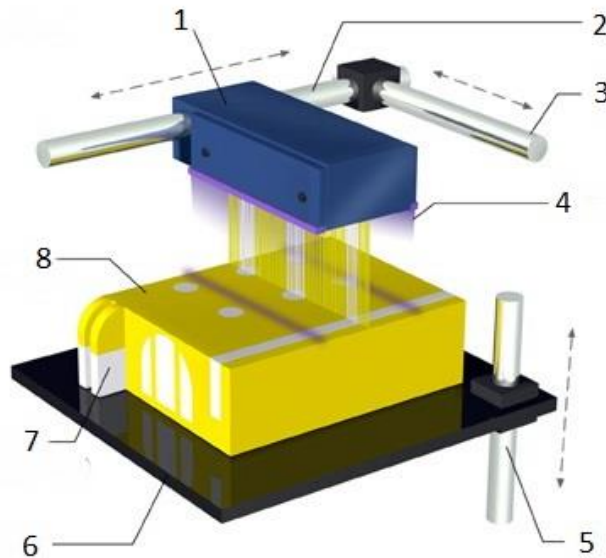
- 1- tisková hlava, 2- pěnová vrstva, 3- cívka s podpurným materiálem,
4- cívka s tiskovým materiálem, 5- podpurný materiál, 6- tiskový materiál,

2.2 Polyjet

Na tiskací stolek v souladu s programovým algoritmem se nanáší tekutý fotopolymer blokem tiskacích hlaviček. Jeden blok se skládá z osmi hlaviček, což je 768 trysek menšího průměru. Za jednu minutu se vytlačí kolem 16000000 kapek. Na tiskací hlavě jsou umístěny 2 UV lampy. Po nanášení materiál se polymeruje pod UV světla, a tím je ukončená první vrstva. Dale plocha se poklesne dolů o výšku jedné vrstvy a se vytvoří další. Tloušťka vrstvy je 16 či 30 mikronů. Metoda Polyjet umožňuje tisk dvou různých typů materiálů. Výsledkem může být produkt obsahující jak tvrdý tak i pružný materiál. Maximální rozměry modelů jsou 500 x 400 x 200 mm. Velkou výhodou

3D tiskárna

taký je vysoká rychlost v porovnání s technologií FDM. Opačnou stranou této technologií je to, že teplo okolního prostředí, vlhkost nebo sluneční záření může způsobit rozměrové změny, které mohou mít vliv na toleranci.



Obr. 4: Proces tisku metodou Polyjet (převzato [4]).

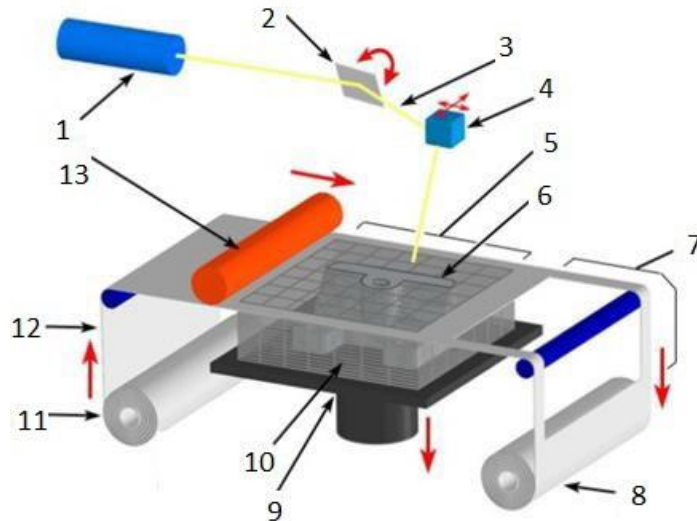
- 1-tisková hlava, 2- osa X, 3- osa Y, "
- 4-UV lampa,5- osa Z, 6- pracovní plocha,
- 7- podpůrný materiál,8- tiskový materiál.

2.3 LOM

LOM technologie vyvinutá společností Helisys Inc. Způsob zahrnuje postupné laminování plošného materiálu (papír, plast, kov, fólie), tak že jednotlivé vrstvy se formují pomocí laserového řezání. Laminování provádí vyhřívaný nerezový válec. Tento proces se používá v případě použití papíru jako tiskového materiálu. Aby proces mohl začít, musí být nejprve nanášena speciální vrstva na platformu (základová ocelová deska), ke které se přilepí první list papíru. Předměty vyrobené tímto způsobem musejí obvykle být dodatečně obráběné po tisku. Tloušťka vrstvy je závislá na tloušťce plechu použitého materiálu. Tiskový proces probíhá následujícím způsobem: Listový materiál s vrstvou lepidla se nanese na pracovní plochu (nebo spodní vrstvu modelu) pomocí vyhřívaného válce. Obvod vrstvy je vyřezán pomocí laseru. Přebytný materiál je krájen laserem

3D tiskárna

do malých sekce pro usnadnění odstranění. Platforma s hotovou vrstvou posouvá dolů. V pracovní komoru je dodán nový list materiálu. Platforma stoupá nahoru do styku s novým materiálem. Tento cyklus se opakuje až do ukončení výstavby modelu, pak přebytečný materiál se odstraní, a se provádí konečné obrábění produktu (vrtání, broušení, atd.).



Obr. 5: Proces tisku metodou LOM (převzato [5]).

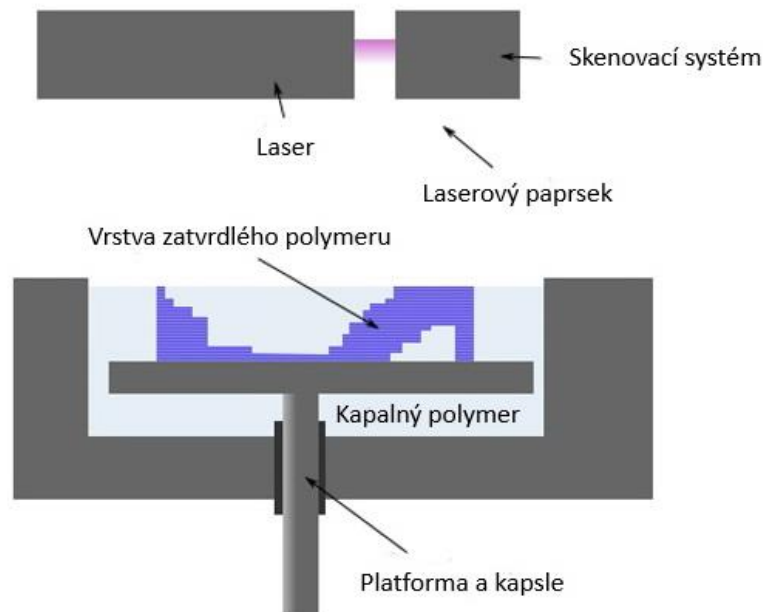
- 1- Laser, 2- zrcadlo, 3- laserový paprsek, 4- optická hlava,
- 5- aktuální vrstva, 6- vrstva prototypu, 7- předešlá vrstva,
- 8- role s použitým materiálem, 9- platforma, 10- podpurným material,
- 11- role s tiskovým materiálem, 12- list materiálu, 13- vyhřívaný válec.

2.4 SLA

Stereolitografie je první metoda 3D tisku a byla potetována už v roce 1986. Její vývojář Charles Hull, založil značku 3D Systems, která vyrobila první stroj objemného tisku Stereolithography Apparatus. První model tohoto stroje, který měl široký oběh, stal SLA-250, vyvinutý v roce 1988. Metoda je založena na ozařování kapalného foto-polymerní pryskyřice laseru pro vytvoření stabilního fyzikálních modelů. Model je postaven vrstvu po vrstvě. Každá vrstva je vynesena laserem podle údajů uložených v trojrozměrném digitálního modelu. Ozařování vede k polymeraci laseru (tj., tuhnutí) materiálu v místech kontaktu s paprskem. Stereolitografie umožňuje vytvářet modely s vysokým rozlišením. Po ukončení konstrukce obvodu pracovní plocha se ponoří do nádrže obsahující kapalnou pryskyřici ve vzdálenosti rovnající se tloušťce jedné vrstvy - typicky od 0,05

3D tiskárna

mm do 0,15 mm. Po vyrovnání povrchu kapalného materiálu, začíná proces vytváření další vrstvy. Tento cyklus se opakuje až do vybudování kompletního modelu. Po ukončení stavby, produkt se promyje za účelem odstranění zbytkového materiálu a, v případě potřeby, jsou zpracovány v peci až do ultrafialové vytvrzování fotopolymeru.



Obr. 6: Proces tisku metodou SLA (převzato [6]).

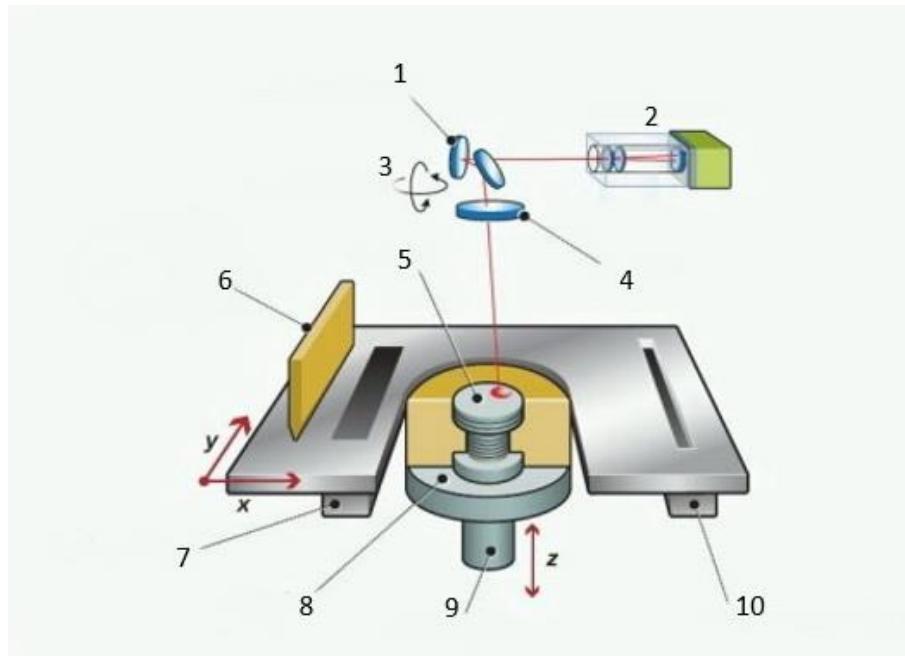
Tiskárny používající technologii SLA, mají nejvyšší rozlišení tisku mezi obdobnými zařízeními (minimální tloušťka vrstvy SLA tiskáren od 3D Systems přichází na 0,025 do 0,05 mm) a umožňují vytvářet hladký a odolný model, s pečlivým propracováním nejmenších detailů. Rozměry výrobků může dosahovat 75x75x75 cm, ale i sami tiskárny jsou velké, stroj pro tisk malých objektů (25x25x25 cm) má velikost skříně a váží asi půl tuny. Cena těchto tiskáren je také docela značná (např., Cena Viper SLA - 150.000 €) a rychlost tisku nepřesahuje několik milimetrů za hodinu (vertikální).

2.5 SLS

Technologie selektivního spékání laserem vyžaduje vysokovýkonný laser, pro spojení malých částic plastů, kovů, keramiky nebo skla. Všechny materiály jsou ve formě prášku, s požadovaným třídímenzionálním rozměrem částic. Stručný popis metody může být následující. Zařízení pro nanášení a vyrovnání prášku odstraní vrstvu prášku z podavače a rovnoměrnou vrstvou rozmístuje

3D tiskárna

ho na povrchu platformy. Poté laserový paprsek skenuje povrch dané vrstvy prášku a tavením nebo spékáním formuje produkt. Na konci skenování jedné vrstvy pracovní plocha poklesne dolů o výšku vrstvy, platforma s práškem stoupá nahoru a celý proces se opakuje. Po ukončení základní deska s hotovým produktem se zvedne a nepoužitý prášek se odstraní.



Obr. 7: Proces tisku metodou SLS (převzato [7]).

- 1-skenovací zrcadlo, 2- laser, 3- x-y vychýlení, 4- f-0 čočka,
5- natavená vrstva, 6- škrabadlo prášku, 7- kontejner s zásobou,
8- základní platforma, 9- platforma vybudování, 10 kontejner přebytku.

Jednou z hlavních částí SLS 3D tiskárny je laserový systém, který používá: CO₂, Nd:YAG, ytterbiové nebo vláknové lasery. Je zjištěno, že použití laserů s vlnovou délkou 1 až 1,1 μm je vhodné pro ohřev kovů a karbidů protože oni pohlcejí o 25-65% lip generované laserem světlo. Ve stejné době, použití CO₂ laseru o vlnové délce 10,64 mikronů se nejlépe hodí pro většinu materiálů, jako jsou oxidové keramiky a polymery. Kromě laseru jako zdroje ohřevu prášku může být použit usměrněný proud elektronů (EBM Electronic Beam Melting). Tato verze firma Arcam navrhlay a realizovala ve svých závodech v roce 1997. EBM tiskárna se vyznačuje absencí pohyblivých částí, protože elektronový paprsek je zaměřen a řízen pomocí magnetického pole a deflektorů, vytvoření vakua v komoře má pozitivní vliv na kvalitu výrobků. Jednou důležitou podmínkou pro SLS tisk je vytvoření ochranného prostředí, zabráňující oxidaci prášku. Pro splnění této podmínky se používá argon nebo dusík. Nicméně, použití dusíku jako ochranného plynu je omezeno tím, že existuje

3D tiskárna

možnost objevení nitridů (např., AlN, TiN při výrobě slitin z hliníku titanu), které vedou ke snížení tažnosti materiálu.

3. Materiály pro tisk metodou FDM

- **3.1 ABS (Acrylonitrile butadiene styrene)**- Jeden z nejvyžívanějších plastů pro 3D tisk. Je získán polymerací tří monomerů: akrylonitrilu (kapalina, bezbarvá), butadien (plyn, bezbarvý), styren (kapalina, bezbarvá). Je odolný a robustní materiál, používá se při výrobě automobilových nárazníků, kostek Lega, atd. Je potřeba mít opatrnost při tisku velkých objektů- má vysokou míru smrštění při ochlazování - materiál může zmenšit objem až na 0,8%. Relativně nízká „lepivost“ ABS potřebuje dodatečné prostředky pro spojení s pracovní plochou, jako polymidová folie nebo nanášení roztoku ABS plastu na platformu těsně před tiskem. Po vytištění, objekt se dá snadno brousit a barvit pomocí spreje nebo akrylových barev. Má následující vlastnosti: tepelná odolnost 110 stupňů, může vydržet nízké teploty až -40 stupňů, dává lesklý povrch, má dobrou chemickou odolnost, je nestabilní vůči UV záření, hustota 1,05 g/cm³, absorpce vlhkosti 0,2 až 0,4%, teplota extruze 215—250 °C, teplota samovznícení ~ 395 °C, teplota skelného přechodu 105 °C.
- **3.2 PLA plast**- Biologické rozložitelný a ekologický materiál. Rozkládá se v kompostu po dobu jednoho měsíce při relativní vlhkosti vzduchu 80% a teplotě 55 až 70 °C. Je tvrdší než ABS a roztavuje se při nižších teplotách 170 —180 °C. Teplota skelného přechodu 60—65 °C, což je docela nízká teplota, která předpokládá nutnost použití větráčku. Oproti ABS má velmi malou míru smrštění (objem se skoro nemění v průběhu chlazení) tzn. že deformace modelu je minimální. Obecně platí, že modely PLA nejsou určeny k funkčnímu použití. Mezi několika málo příklady praktického využití jsou obaly potravin, nádoby na léky a chirurgické stehy.
- **3.3 Nylon**- Nylon je dobrý jako materiál pro 3D tisk z důvodu vysoké odolnosti, dostupnosti, a vynikající skluznímu koeficientu. Má poměrně vysokou extruzní teplotu 235—260 °C, ale zároveň nízkou teplotu skelného přechodu 49,4—68,2 °C. Stejně jako

3D tiskárna

ABS nylon potřebuje ohřívací plochu, nelze ale dávat na povrch polimid, místo něj se používá maskovací páska.

- **3.4 LAYWOO-D3-** Materiál určený pro tisk, který připomíná dřevěné výrobky. Obsahuje 40% přírodních mikroskopických pilin a 60% spojovacího polymeru. Teplota vytlačování pohybuje v rozmezí od 185 do 230 °C. Laywoo-D3 je velmi nenáročný: není nutný klimatický kontrol nebo ohřívací plocha.
- **Vodivé grafenové vlákno-** Vlákno s vysokou vodivostí obsahuje Nano-Úhlikové částice ke zlepšení vlastností PLA termoplastu. Objemová rezistivita je 1 [Ω -cm]. Oblast použití tohoto materiálu je dost široká: digitalní klávesnice, ovladače pro hry, dotykové senzory, EMI a RF stínění a jiné. Vlákno je určeno pro nízkoproudové aplikace (maximální napětí 12 V, maximální proud 100 mA). Odpor jednoho metru 1,75mm vlákna je 4 k Ω .

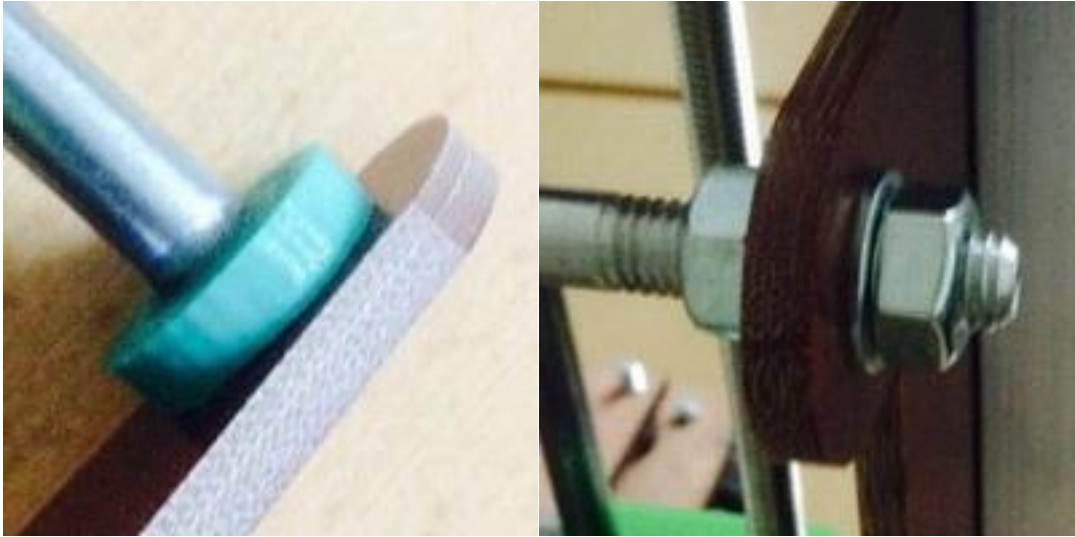
V dnešní době existuje velký počet materiálů vhodných pro tisk metodou FDM, mnou byli uvedené jenom některé z nich.

4. Konstrukce

Konstrukce tiskárny má velký vliv na proces tisku, její úkolem je zabezpečení dostatečné stability, rychlosti a tuhosti. V dnešní době v souladu s požadavky se nejčastěji používá obdélníková konstrukce, málokdy trojúhelníková. Typ konstrukčního materiálu se obvyklé volí podle požadované přesnosti tisku, na tiskárny typu RepRap nároky na přesnost zpravidla nepřesahují setin milimetrů, proto může být použito plexisklo, plast, překližka nebo dřevo.

Skutečným problémem tiskárny byla nedostatečná stabilita. Kovové tyče byly spojeny s kostrou jenom pomocí lepidla. Na koncích tyčí jsme udělali závitky pro matky, čím byla zvětšena pevnost konstrukce.

3D tiskárna



Obr. 8: Místa spojů do a po modifikaci.

O však to nestačilo a bylo rozhodnuto navrhnout stabilizační rám. První varianta rámu je nakreslena v programu AutoCad. Nicméně v souladu s názorem mechanika koneční varianta se změnila a má následující tvar:



Obr. 9: Stabilizační rám.

Úkolem rámu je upevnění a stabilizace celé konstrukce 3D tiskárny.

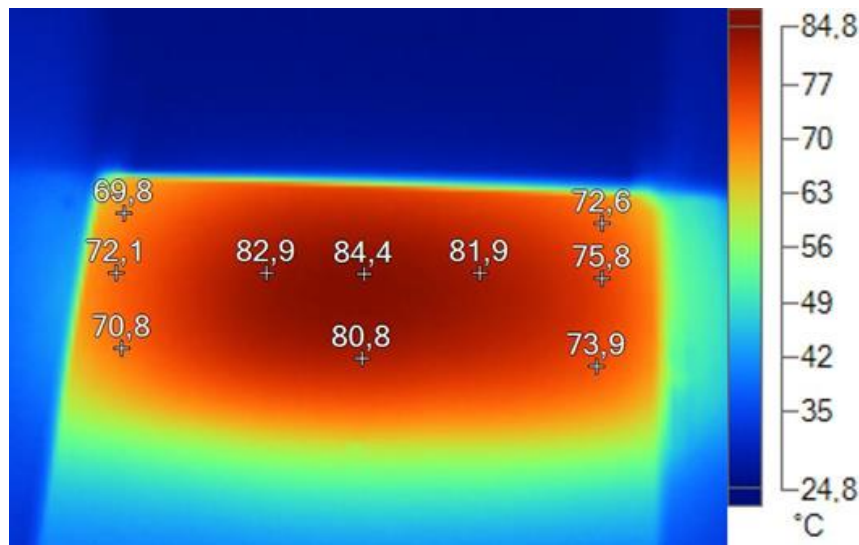
Vyměnili se tyče na kterých „jezdí“ tiskací hlava, důvodem bylo to, že po broušení se změnila jejich tloušťka.

3D tiskárna

5. Ohřivací podložka

Ohřev pracovní plochy je potřeba dělat pro některé polymery, mezi nimi je často používán v 3D tisku ABS. Důvodem proč se používá ohřivací platforma je zabránění deformaci prvních vrstev v průběhu chlazení, která pak vede k deformaci celého objektu. Typické prodávanou podložkou je plošný spoj s odporem kolem $1,2 \Omega$ v jednom vynutí.

Námi byla koupena vyhřívaná deska MK2B, která pracuje na 12 V, má odpor $1,2 \Omega$ na každém rezistoru (vynutí), a snáší proud do 10 A. Pro měření a řízení teploty se obvykle používá termistor.



Obr.10: Rozložení tepla na povrchu ohřivací desky MK2B.

Pozorování rozložení tepla pomocí termokamery za normálních podmínek ukázalo, že uprostřed teplota je nejvyšší a rozdíl mezi krajními body a středem je kolem 10 stupňů celsia.

Jako alternativní možnost realizace ohřívání desky námi byla vybraná polyimidová kaptonová folie s elektricky vodivou uhlíkovou vrstvou.

Elektricky vodivý povrch zajišťuje speciálně vytvořená odporová vrstva uhlíku s definovanou povrchovou rezistivitou nanesená na polyimidové (PI) folii. Tato elektricky vodivá vrstva nepraská ani se nedá setřít či snadno poškodit, jak se to občas stává u jiných povrchových vrstev či metalizací. Vrstva je nanášena oboustranně či jednostranně. Odporová filmová vrstva je odolná proti ozáření i stárnutí, pružná, chemicky stabilní, výborně vede teplo. Vyrábí se v rozsahu povrchových rezistivit 60 až $2000 \Omega \text{ cm}^2$. Používá se například k sušení pro teploty pod 260 °C a spotřebuje 70% elektrické energie ve srovnání běžným odporovým vodičem. Dá se snadno stříhat nůžkami či řezat.

(převzato z [18])

3D tiskárna

Specifická hmotnost [g/cm ³]	1,42
Tloušťka [μm]	50
Pevnost v tahu [Mpa]	110
Prodloužení [%]	>35
Trvalá pracovní teplota [°C]	<260
Rozsah pracovních teplot [°C]	-60 až + 200
Povrchová rezistivita [Ω/cm ³]	60-2000 (podle typu)
Opakované přeložení	>500000
Zatížení [W/cm ²]	6
Účinnost přeměna el. energie na tepelnou [%]	>99
Pracovní el. napětí[V]	>3 až 380
Maximální servisní teplota pro vzduch [°C]	>260

Tabulka 1: Vlastnosti HT polyimidové vodivé folie (převzato z [18])

Odpor na čtverec 100 Ωm, délka 260 cm, šířka 200 cm. Ze známé hodnoty odporu na čtverec byl vypočten celkový odpor fólií pomocí následujícího vzorce:

$$R_p \frac{L}{W} = 100 \frac{260}{200} = 130 \Omega$$

kde R_p – odpor na čtverec, L – délka, W – šířka .

Pro testování podložky byli na protilehlé strany nalepeny měděné samolepicí folie, potom podložka byla rozmístěna mezi dvěma skleněnými obdélníky a kontakty zapojeny do zdroje napětí.

Námi byly naměřené následující hodnoty:

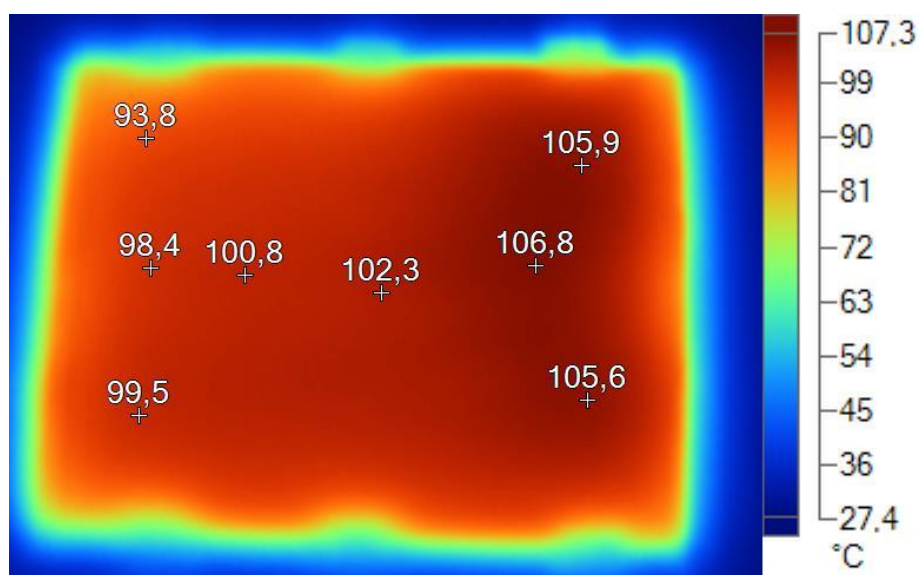
3D tiskárna

U [V]	I [mA]	P [W]	Teplota [°C]
50,3	377	19	45
74,8	563	42	62
90	685	61	83
100,2	761	76	87
110,1	837	93	107

Tabulka 2: Naměřené hodnoty

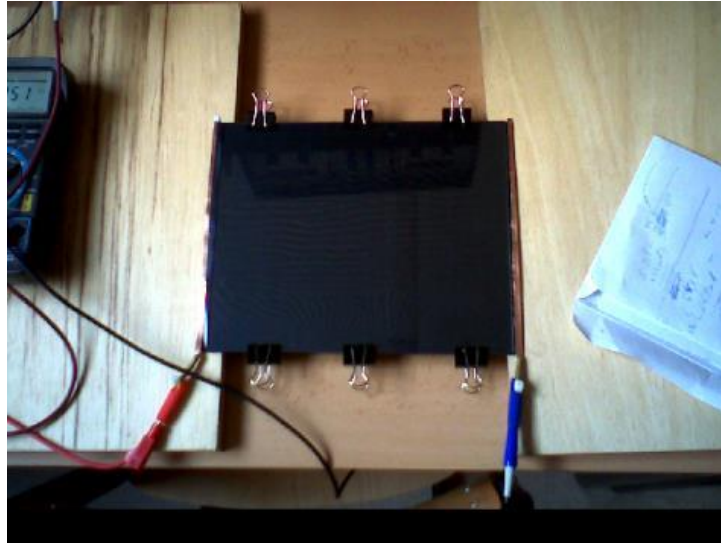
V průběhu ohřátí folie měla deformovaný povrch, což není dobře pro rozložení a odvod tepla. Doba náběhu tepla od okamžiku změny napětí trvala docela dlouho- až do 10 minut.

Při testování podložky se využila termokamera pro měření teploty a rozložení tepla. Je vidět, že jedná strana je chladnější, než druhá, důvodem by mohl být proud vzduchu v levé straně.

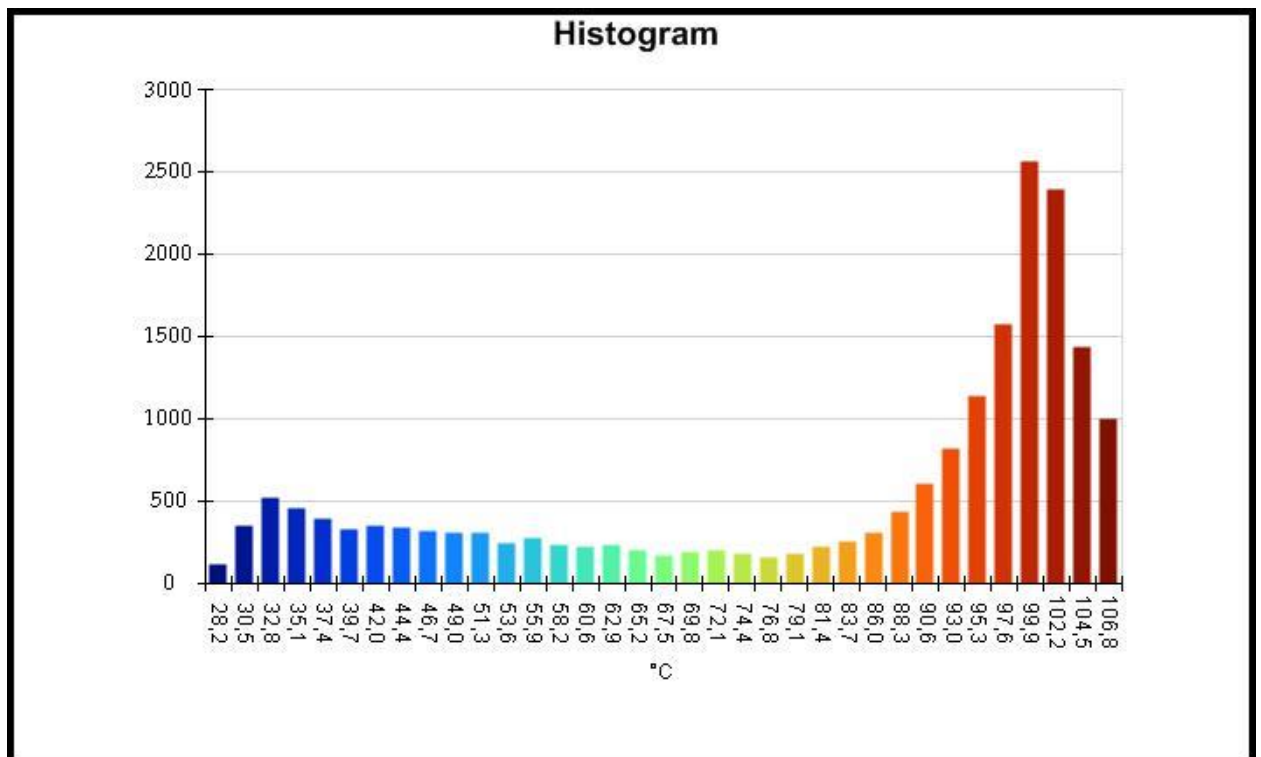


Obr.11: Rozložení tepla na povrchu polyimidové folií.

3D tiskárna



Obr.12: Podložka udělana pomocí polymidové folií.



Obr.13: Histogram rozložení tepla na povrchu polymidové folií.

6. Zdroj napětí a proudu

Zdrojem napětí a proudu pro testování 3D tiskárny sloužil laboratorní zdroj MATRIX MPS-3003L-3.

3D tiskárna



Obr.14: laboratorní zdroj MATRIX MPS-3003L-3 (převzato z [8]) .

7. Logická část

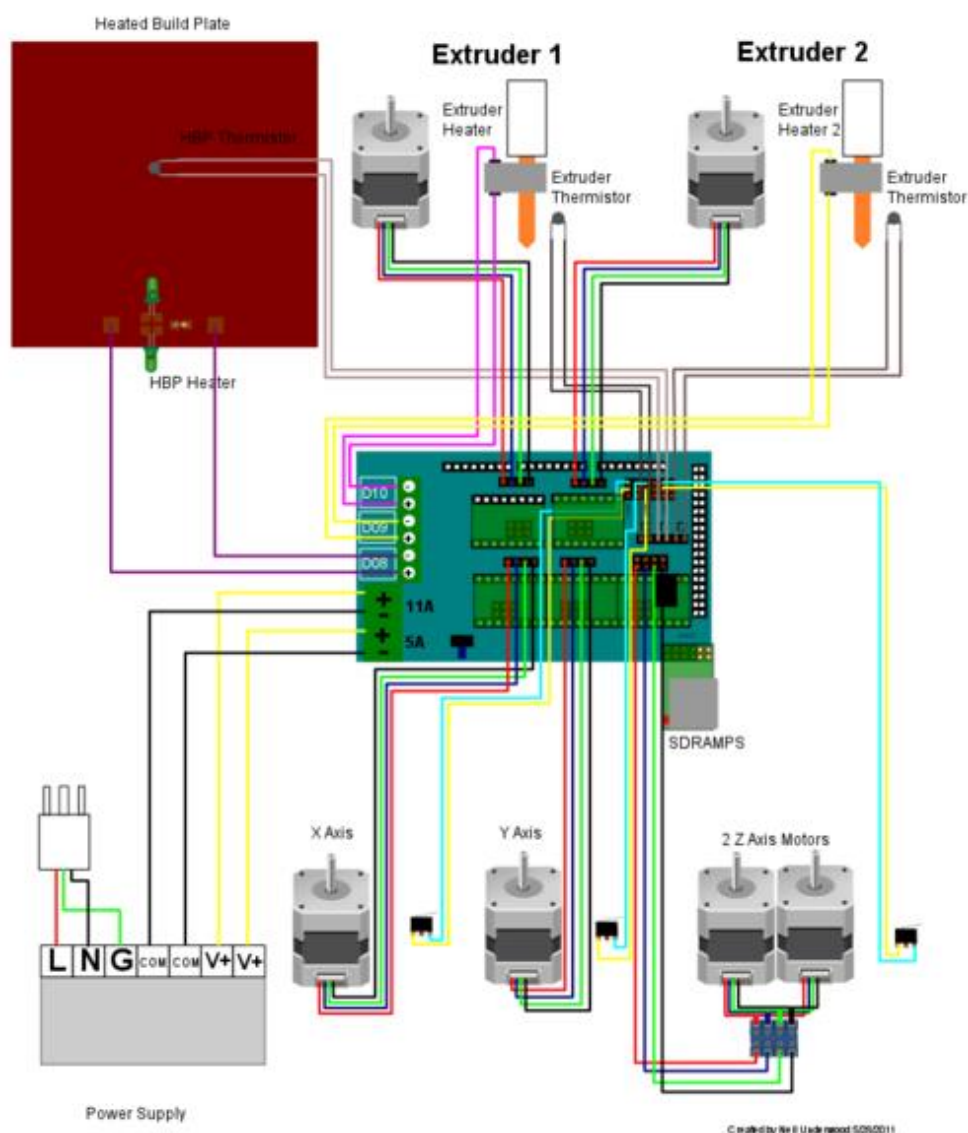
Jako logická část řídicí jednotky se použil Arduino Mega 2560 s mikrokontrolérem Atmega2650. Pracuje na frekvenci 16 MHz. Jeho hlavní výhodou je celkem logické a lehké ovládní vývojové prostředí. Programovací jazyk používaný pro ovládní Arduino je vytvořen na základě jazyku C++, ale s některými vlastnostmi které usnadňují psaní programů. Úkolem logické části je generování příslušných impulsů STEP a DIR pro krokové drivery, zpracování hodnot z termistorů, a následující řízení teplot platformy a extruderu. Pro tiskárny využívající Arduino je vytvořeno docela hodně firmwaru, což taky taky usnadňuje práci.

8. Sílová část

V případě využívání Arduino jako logické části se používá tak zvaný shield pro Arduino s názvem Ramps. Jeho funkce jsou v něčem podobné funkcím základní desky u počítačů. Právě k Rampsu se připojí zdroj napětí a proudu, krokové drivery, motory, termistory, mikrospínače a ostatní možné součástky. Námí použitá verze je Ramps 1.4. Deska je určena pro krokové drivery typu A4988. Vstupní napětí je omezeno maximálním napětím krokových driverů, což je 35 V, o však pro fungování tiskárny bohatě stačí 12 V. Minimální vstupní proud je 5 A potřebných k fungování motorů a tepelného tělíska extruderu, v případě použití ohřívací podložky ještě 11 navíc, celkem je to 16 A. V průběhu testování desky bylo zjištěno že konektor pro napájení zdroje proudu nebyl spolehlivý a byl námí vyměněn. Následující schema zobrazuje způsob zapojení součástek do Ramps 1.4.

3D tiskárna

RepRap Arduino Mega Pololu Shield 1.4



Obr.15: Shema zapojení Ramps 1.4 (převzato z [9]).

9. Krokové drivery

Ovladače krokových motorů se používají ke řízení rychlosti a směru otáčení jednoho bipolárního krokového motoru. Mají za úkol vytvořit posloupnost buzení fází a zajistit výkonové buzení. Obvyklé používané krokové motory mají velikost kroku $1,8^\circ$ (200 kroků na otáčku). Velikost jednoho kroku motoru určuje množství statorových a rotorových pólových nástavců. O

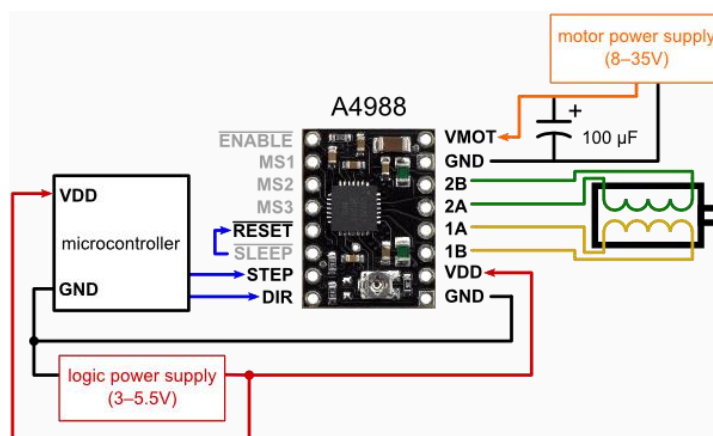
3D tiskárna

však výroba motorů s velkým počtem pólových nastavců je poměrně drahá. Proto se využívá mikrokrokování. Přesné nastavení kroků se řídí tím, že obě fáze motoru se napájí přesně řízeným proudem. Obvod A4988 má k dispozici několik režimů mikrokrokování s následujícími dělení kroků: 1/2, 1/4, 1/8 a 1/16. Rozlišení se řídí kombinací spínacích vstupů, podle následující tabulky:

MS1	MS2	MS3	Velikost kroku
GND	GND	GND	Celokrok (Full step)
VDD	GND	GND	1/2 základního kroku (Half step)
GND	VDD	GND	1/4 základního kroku (Quarter step)
VDD	VDD	GND	1/8 základního kroku (Eighth step)
VDD	VDD	VDD	1/16 základního (Sixteenth step)

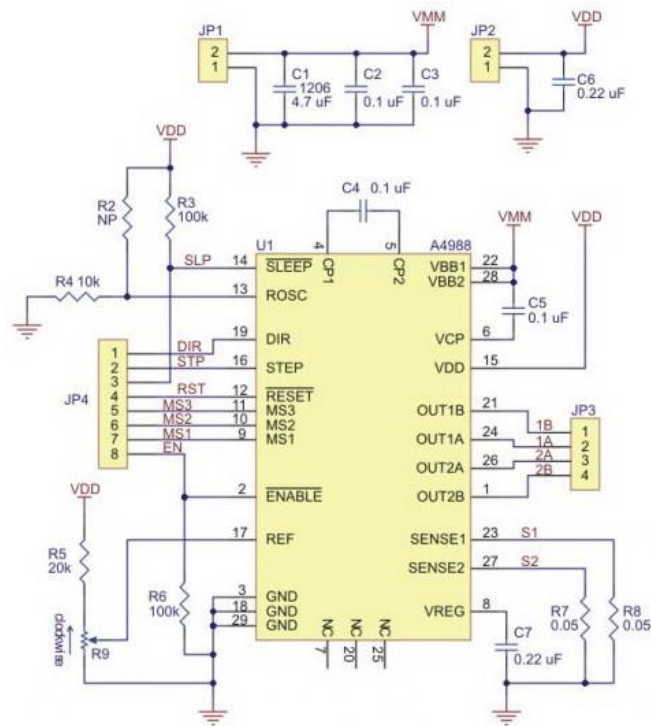
Tabulka 3: Nastavení mikrokrokování. (převzato z [17])

Námi byli koupené krokové drivery Pololu A4988 Black Edition, jejich hlavní odlišeni od standardních A4988 je čtyřvrstvý plošný spoj určený ke zlepšení odvodu tepla. Standardní driver propouští do 1 A bez chlazení, jeho analog Black Edition 1,2 A. Maximální jmenovitý proud 2 A pro jedno vinutí motoru. Drivery se napájí přímo na Ramps 1.4.



Obr.16: Zapojení ovladače v základním režimu celokroku (převzato z [10]).

3D tiskárna

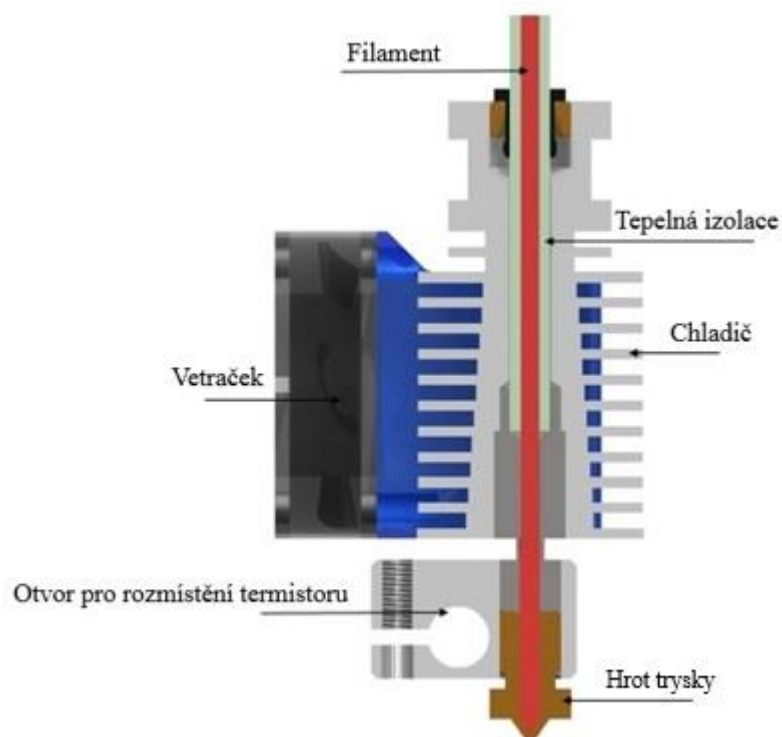


Obr.17: Schematický diagram krokového driveru A4988 (převzato z [11]).

10. Extruder

Tiskací hlava FDM tiskárny se nazývá extruderem (extrude- vytlačit), což odráží její princip: extruder vytváří objekt vrstva po vrstvě, tím že vytlačí změkly materiál přes trysku. Typický extruder pro tisk termoplastu se dělí na dvě základní části: blok se systémem pro podávání filamentu (cold-end- studený konec) a tryskou s ohřívачem (hot-end- horký konec). Podavač se skládá z ozubeného kola připojeného k elektromotoru (přímo nebo prostředstvím reduktoru) a upínacího mechanismu (nejčastěji válce). Jako celek to funguje následujícím způsobem: podávací kolo tím že se otáčí vytáhne vlákno ze cívky a předává ho do hot-endu, kde plast se taví kvůli velké teplotě a dále se vytlačí přes otvor trysky na pracovní plochu. "Horký konec" extruderu je vyroben z kovu s vysokou tepelnou vodivostí (hliník nebo mosaz). Topné těleso, je obvykle vytvořeno z jednoho nebo dvou odporů, nebo z cívky nichromového drátu. Pro monitorování a následné regulování teploty je připojen termistor. Hot-end se dost ohřívá během provozu, ale ostatní části tiskací hlavy by měli být studené, jinak vlákno se začíná tát příliš brzy. Proto, mezi "horkým" a "studeným" koncem je vložena tepelněizolační vložka (obvykle z teplovzdorného plastu PEEK). Pro chlazení se taky používá chladič a větráček.

3D tiskárna

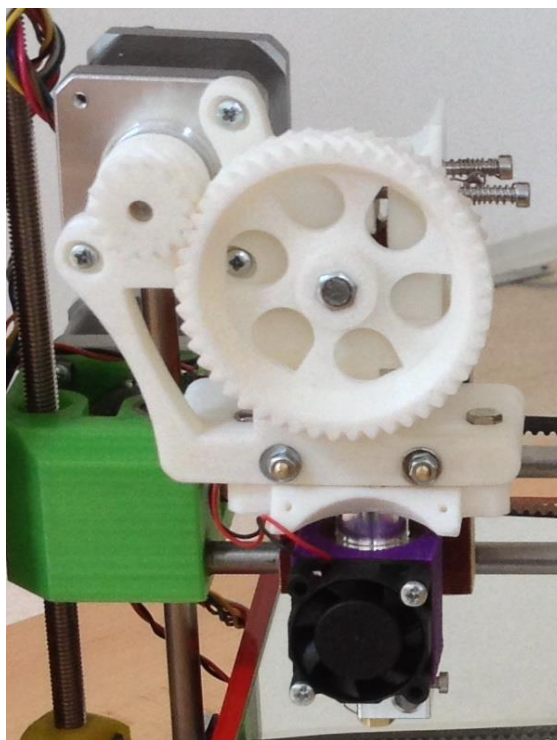


Obr.18: Schema trysky (převzato z [12]) .

10.1 Vlastní řešení

Pro realizace vlastní tiskací hlavy jsme využili konstrukci používanou u tiskárny RebelX. Její vlastnosti nejsou dokonalé ale stačí k oživení tiskárny a testování. Tryska je určena pro vlákno s průměrem 1,75 mm, má hrot o průměru 0,4 mm, hliníkový chladič který se ještě navíc chladí větráčkem. Povrch chladiče je lesklý což není dobře pro vyzařování tepla, ale ten nedostatek by mohl být částečně vykompenzován proudem větru zajištěn větráčkem. Součástí extruderu je taky topné tělísko s keramickým jádrem s pracovním napětím 12 V a výkonem 40W. Pro měření a řízení tepla se použil termistor EPCOS 100k.

3D tiskárna



Obr.19: Tisková hlava.

11. Krokové motory

Krokový motor představuje bezkomutátorový synchronní motor s několika vinutí, ve kterých proud při průchodu přes jedno z vinutí statoru, způsobí fixaci rotoru. Postupná aktivace vinutí motoru vyvolá diskretní úhlové pohyby (kroky) rotoru. Tento druh motorů má své uplatnění především ve sféře manipulační techniky a robotiky. Má několik zásadních výhod, které zajišťují jeho velké uplatnění při konstruování RepRap 3D tiskáren mezi kterými jsou: nízká cena, možnost docela přesně řídit počet otáček a plynulost chodu, velký rozběhový moment. Velkou nevýhodou nicméně je možnost straty chodu a přeskočení na jinou pozici při absenci zpětné vazby polohy rotoru. Z tohoto důvodu, krokové motory jsou obvykle používány v aplikacích, kde je zatížení konstantní, nebo alespoň vždy známo. V případě, že zatížení se významně mění v průběhu práce, může krokový motor zastavit nebo přeskočit požadovanou polohu. Je-li známo jak se mění zatížení, je možné zmenšit proud vinutí krokového motoru při nízkém zatížení, nebo naopak, značně zvýšit když zatížení je velké. Další nevýhodou je ohřev motorů, na to se dává pozor v případě že motorek je zabudován do plastových součástek.

Na tiskárnu už byli nainstalovaný motory firmy Microcon pod označením SX17-0905. Délka kroku je $1,8^\circ$, což dává 200 kroků na otáčku, toleranci kroku $0,1^\circ$, příruba NEMÁ17.

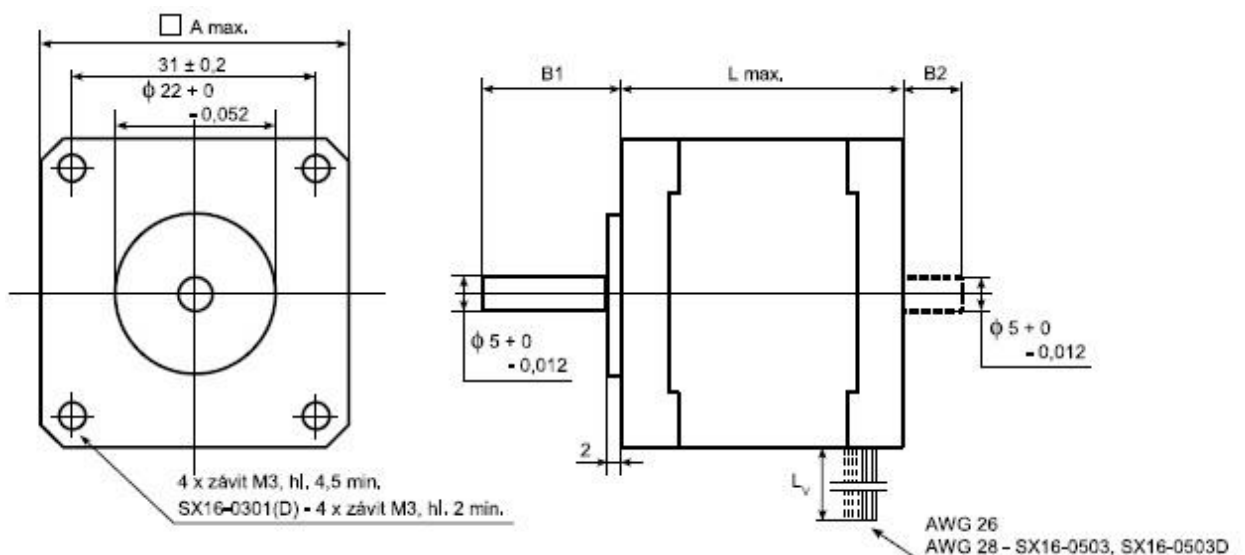
3D tiskárna

Mikrokrokováním bylo docíleno dělení kroku na 16 mikrokroků, výsledkem je 3200 kroků na otáčku.

O však po instalaci stabilizačního rámu se zjistilo že délka motoru SX17-0905 zamezuje pohyb tiskací hlavy podél osy Z. Bylo rozhodnuto použít motorek s menší délkou. Námí vybrána varianta SX17-1005LQEF.

Typ	Statický moment (Nm)	Jmenovitý proud (A)	Indukčnost (mH)	Odpor (Ω)	Zbytkový moment (Nm)	Hmotnost (kg)	L max. (mm)
SX16-0502	0,25	0,6	14	14,4	0,018	0,22	37
SX16-0503	0,3	0,5	40	24	0,018	0,24	38
SX17-0402-09	0,22	0,42	38,4	20	0,02	0,22	33
SX17-1005-09	0,45	1	16,8	5,5	0,022	0,3	40
SX17-1005	0,5	1	11,6	6	0,022	0,3	40
SX17-0905	0,55	0,88	12,8	8	0,026	0,38	48
SX17-1705	0,55	1,77	3,2	2	0,026	0,38	48

Tabulka 4: Technické parametry krokových motorů (převzato z [13])

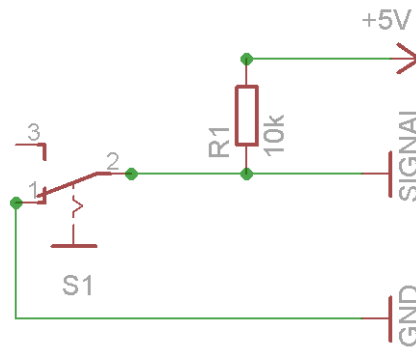


Obr.20: Rozměry krokového motoru (převzato z [14]).

3D tiskárna

12. Koncové spínače

Na tiskárně jsou nainstalovány mechanické koncové spínače, jeden pro každou osu. Hlavní výhodou tohoto druhu spínačů je malá cena a jednoduchost konstrukce. Jejich úkolem je zabezpečení ochrany tiskárny a krokových motorů před poškozením a kalibrace.

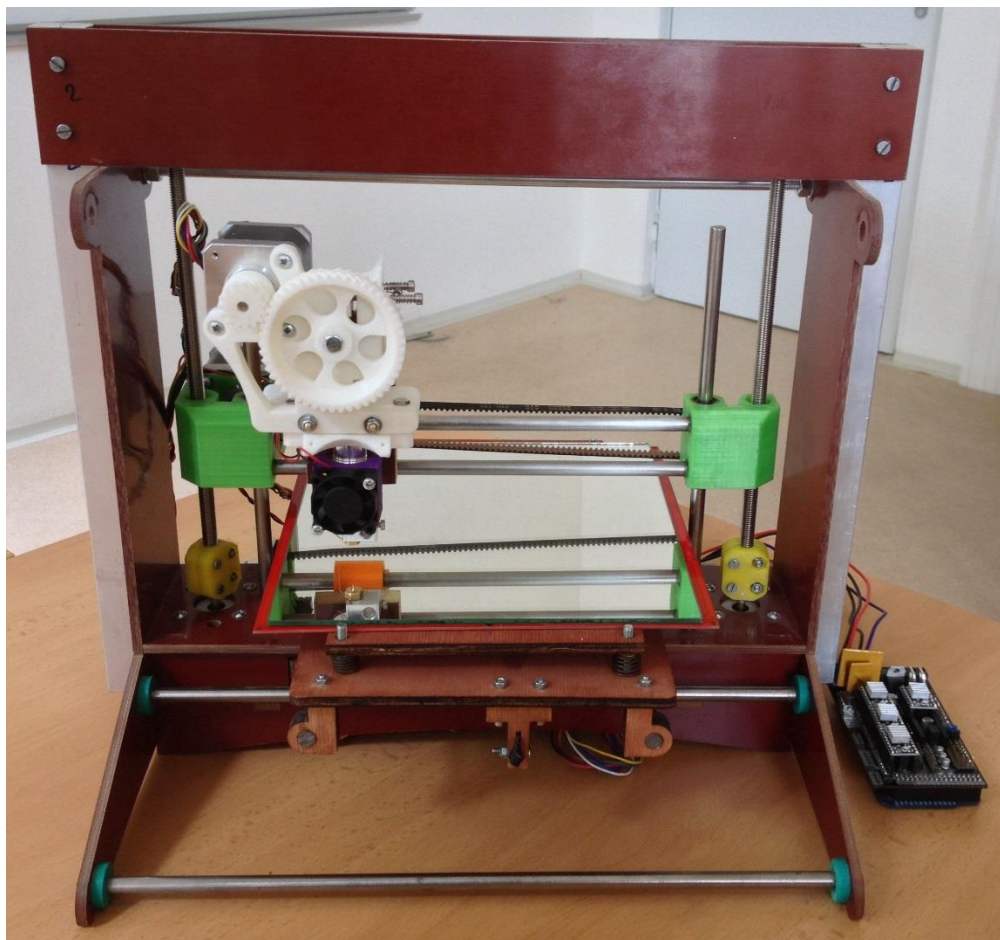


Obr. 20: Schéma zapojení mechanického spínače (převzato z [15]).



Obr. 21: Použitý mechanický mikrospínač (převzato z [16]).

13. Částečně realizovaná konstrukce

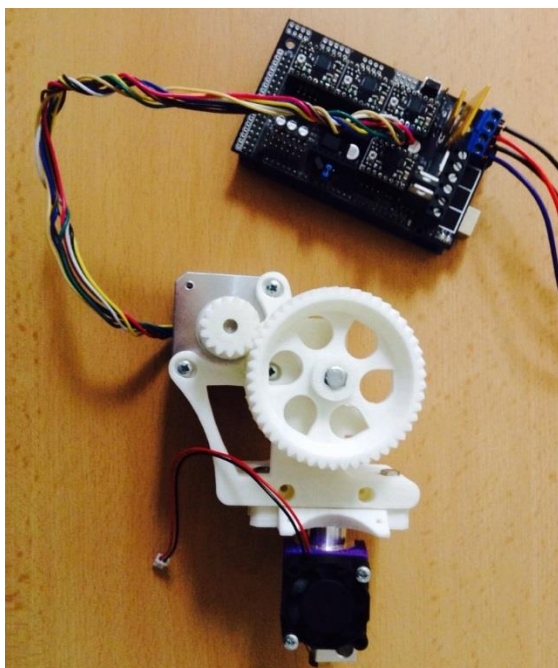


Obr. 22: Částečně realizovaná konstrukce tiskárny.

14. Programy pro řídicí jednotku

Pro psaní, upravení a nahrávání firmwaru do Arduino se používá Arduino Development Environment s příslušnými drivery, v něm je nutné správně vybrat druh desky Arduino a port přes který se koná komunikace s počítačem. K ověření fungování Arduino, Rampsu, krokových motorů, a především krokových driverů byl nahrán jednoduchý program. S důvodu vyřazení možnosti zničit vše drivery najednou, krokové drivery se testovali jeden po druhém. Ke konci testování se potvrdilo že všechno zařízení je funkční, byl taky omezen proud na vinutí motorů pomocí ořezávače na krokových driverů.

3D tiskárna



Obr.23: Testování zařízení.

15. Firmware

Vybrány námi firmware Marlin má otevřenou licenci a byl vytvořen na základě Sprinter. Hlavní rozdíl od Sprinteru je předháněný přepočít poryvů, bez kterého by se konala úplná brzda motorů a následná akcelerace v každém rohu. Programové vybavení se začátku je zkonfigurováno pro tiskárnu Ultimaker Original a je určeno pro takové zařízení, jako Ultimaker, Sanguinololu, Generation_6_Electronics a Ramps, který je nainstalován na naši tiskárnu. Možnosti Marlinu jsou docela flexibilní, umožňují takové věci jako LCD obrazovka, podpora SD karet a t.d. . Zřejmou nevýhodou jako u většiny otevřených firmwaru je nedostatečně propracovaná možnost tisku pomocí několika extruderů zároveň.

16. Nastavení počátečních parametrů tiskárny

Největší počet změn a úprav se prováděl v souboru s názvem Configuration.h. V něm je nutně správně vybrat použitý typ zařízení, nastavit výchozí parametry mezi kterými jsou maximální a minimální teplota extruderu a pracovní plochy, rychlost motorů atd.. Konfigurace parametrů, jako je například navigace v osách, nastavení kroků motorů vůči délce extrudovaného vlákna, bude mít velký vliv na práci celé tiskárny. Nastavitelné parametry odpovídají mechanickým a elektrickým vlastností použitých součástí. Nesprávné nastavení může způsobit přeskokování kroků krokového

3D tiskárna

motoru, příliš vysokou nebo nízkou rychlost vytlačování a mnoho dalších věcí, které mají vliv na tisk.

16.1 Výpočty základních parametrů

1. Vypočet kroků na jeden milimetr v osách X a Y kde je použit řemen tipu T2.5 (rozteč zubů 2,5 mm). Použité krokové motory mají delku kroku $1,8^\circ$ což dává 200 kroků na otačku.

$$\text{Počet kroků na 1 mm} = \frac{\text{Počet kroků na } 360^\circ \cdot \text{počet mikrokroků}}{\text{rozteč zubů řemene} \cdot \text{počet zubů řemenice}} = \frac{200 \cdot 16}{2,5 \cdot 18} = 71, (1)$$

2. Vypočet kroků na 1 milimetr v ose Z, kde je použita na pohon závitová tyč M8 (stoupání tyče 1,25 mm). Použité krokové motory mají delku kroku $1,8^\circ$ což dává 200 kroků na otačku.

$$\text{Počet kroků na 1 mm} = \frac{\text{Počet kroků na } 360^\circ \cdot \text{počet mikrokroků}}{\text{stoupání tyče}} = \frac{200 \cdot 16}{1,25} = 2560$$

3. Kalibrace hlavičky závisí na mnoha parametrech, zejména na reduktoru a šroubu na který je nasazeno ozubene kolečko. Konfigurace se prováděla následujícím způsobem: tiskárna se připravila na tisk, zkontrolovala se tryska na přítomnost plastu překážejícího extruzi a se nastavila teplota vhodná pro tisk ABS plastem. Potom na vyčnívací ze vstupu do tiskací hlavy vlakno byl umístěn marker, který je považován za referenční bod. Pomocí programu Printron se zadal příkaz vytlačit 30 mm plastu při relativně nízké rychlosti 50 mm/min. Dále se měří vo kolik se posunul referenční bod vůči počátečné pozici. Pokud posun je přesně 30 mm, hodnotu kroků na jeden milimetr vlakna není třeba měnit, pokud ne, hodnota musí být vypočítána.

V našem firmawaru byla nastavena hodnota 500 kroků na jeden milimetr plastu, což dává:

$$500 \cdot 30 = 15000 \text{ (kroků motoru na 30 mm).}$$

Skutečně naměřeny posun je 35 mm, v takovém případě-

$$15000/35 = 428,57$$

je hodnota potřebná na vytlačení 30 mm vlakna. Napočítanou hodnotu jsme dosadili do firmawaru a znovu provedli test, který ukázal že napočítaná hodnota odpovídá předpokladům.

3D tiskárna

Konečná verze konfigurace kroků na milimetr v osách X, Y, Z a extrudéru ve firmwaru tiskárny je následující:

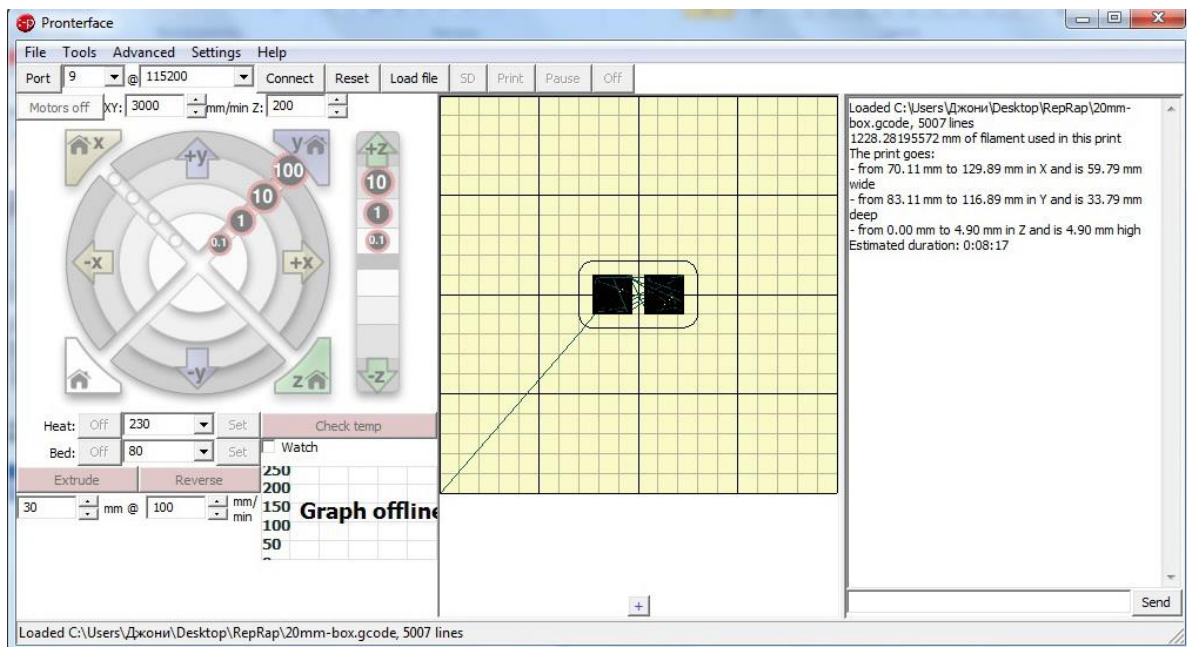
```
#define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT {3200/45,3200/45,2560,500}
```

17. Software pro řízení

V levém horním rohu jsou vyzváni k výběru připojení port a přenosovou rychlost. Níže je celá pro správu tiskárny s možností jít do nulové polohy ve všech možných osách, nebo řídit ručně. Dále podél ovládání teploty a extrudéru. Schopnost zmáčknout určité množství vláken, použité v kalibraci tiskové hlavy.

Ovládání tiskárny se provádí prostřednictvím sady aplikací pod společným názvem Print ran. Mezi nimi jsou programy pro sériové spojení mezi počítačem a tiskárnou, aplikace pro překlad z 3D formátu do G-kódu, programy odesílající kód přímo do tiskárny a řada pomocných skriptů.

. Pronterfeys je grafická aplikace pro posílání G-kódu tiskárny. Pomocí ni, se provádí spojení s počítačem, kalibrace a počáteční konfigurace pro tisk. Existuje také možnost zadávat G-kód příkazový přímo přes konzoli nebo měnit už vytvořený.



Obr.24: Ovládací panel programu Pronterface.

V levém horním rohu se nabízí výběr komunikačního portu a přenosovou rychlost. Níže je rozmístěno ovládání celé tiskárny s možností přejít do nulové polohy ve všech možných osách,

3D tiskárna

nebo řídit ručně. Dále jsou elementy pro řízení teploty a extrudéru. Schopnost vytlačit určité množství vlákna, byla použita při kalibraci tiskové hlavy. Ve středu je plocha s objektem tisku. Zprava jsou vypsané aktuální procesy v reálném čase v podobě textu.

18. Slicery

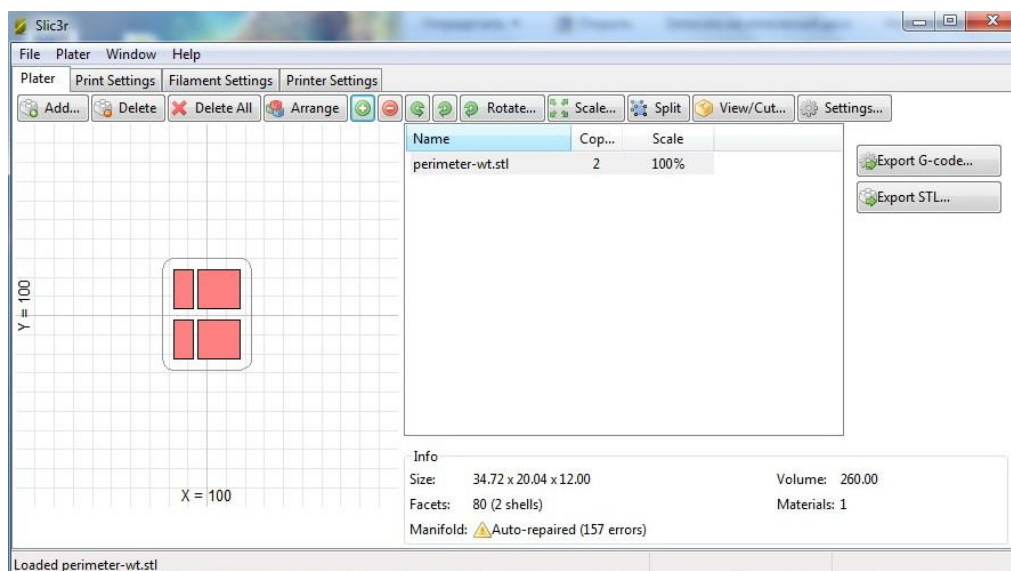
Všechny programy tohoto typu mají stejný úkol, a to je „rozřezání“ jednodílného 3D modelu na určité množství vrstev, generace trajektorií podle kterých se bude konat vyplnění, výpočet množství materiálu nutného pro tisk objektu, generace G-kódu. Téměř všechny programy jsou krosplatformní. Nejčastěji používané aplikace pro převod z formátu STL jsou:

Skeinforge- program nemá úplně dokonalý uživatelský interface. Přesto, má široký rozsah nastavení a schopen generovat komplexní kódy.

Cura- open-source program napsaný speciálně pro tiskárnu Ultimaker, může být použit i v jiných tiskárnách.

Kisslicer- nabízí velmi příjemné grafické rozhraní, snadno se ovládá, existuje možnost vytvořit podpůrné sloupy. Bezplatná verze má všechny funkce pro tisk s jedním extrudérem, v placené verzi umí pracovat i s dvěma.

Slic3r- Použitý námi slicer. Má velké množství flexibilních nastavení, možnost kopírování a sjednocení modelů. Podporuje téměř všechny tiskárny.



Obr.25: Ovládací panel programu Slic3r.

3D tiskárna

19. Závěr

Na začátku projektu bakalářské práce jsme prostudovali všelijaké technologie 3D tisku. Navrhnutá námi realizace prototypu 3D tiskárny předpokládá tisk metodou FDM. Dále byli analyzované materiály používané při tisku touto metodou. Zvláštní zájem vyvolal vodivý materiál, základem kterého je grafen. Po tom jsme rozebrali konstrukce tiskárny udělanou předchozím účastníkem tohoto projektu a navrhli způsoby její zlepšení. V programu AutoCAD byl vytvořen náčrt stabilizačního rámu, který pak se modifikoval v souladu s názorem pána mechanika. Změnili se také špatná místa spojů mezi kostrou a kovovými tyče.

Další část práce popisuje ohřívanou platformu potřebnou pro tisk pomocí různých polymerů, jako je ABS plast. Po prostudování již existujících variant byla navržena vlastní. Naše platforma má ve svém základu polimidovou folie, části složení které je uhlík. Experimenty ukázaly, že polimidová folie je schopna zajistit zcela homogenně ohřívání povrch. Velkým rozdílem od běžně používaných desek bylo pracovní napětí: v našem případě se dosahovalo 100 V, zatímco u standardních platform, to zřídka přesahuje 12 V. Nicméně, požadovaný výkon se téměř neliší a je kolem 100 W při teplotě 100 °C.

Poté byli prozkoumané a nakoupené zbývající komponenty 3D tiskárny. Testování součástek jsme udělali pomocí jednoduchého skriptu nahraného na Arduino. Kalibrace a nastavení zařízení se provedli ve firmwaru Marlin s využitím Arduino Development Environment. Konečná verze firmwaru byla nahraná do mikrokontroléru ATmega2560. Z technických důvodů pracovní prototyp tiskárny nebyl udělán.

V budoucnu budou provedeny změny řady součástek, které neodpovídají požadavkům stability a přesnosti. Udělané finální testování a ladění. Navržena varianta realizace rychlé vyměnitelných hlav tiskárny.

20. Přílohy

A Seznam tabulek

1	Vlastnosti HT polyimidové vodivé folie.....	19
2	Naměřené hodnoty.....	20
3	Nastavení mikrokrokování.....	24
4	Technické parametry krokových motorů.....	28

B Seznam použitých zkratk a symbolů

FDM- fused deposition modeling

LOM- laminated object manufacturing

SLA- Stereolithography

SLS- Selective Laser Sintering

SGC- Solid Ground Curing

EBM- Electronic Beam Melting

EMI- Electromagnetic interference

RF - radio frequency

PLA- Polylactic acid

3D tiskárna

21. Bibliografie

- [1] – Obrazek: *Comparison of a model using layer height as the variable* [online]. [cit. 21.5.2015]. Dostupný na WWW: <http://arduino11.blogspot.cz/2012/04/prusa-tips-tricks-why-layer-height.html>
- [2] – Obrazek: *Statistika využití technologií 3D tisku*. [online]. [cit. 21.5.2015]. Dostupný na WWW: <http://www.caxmix.cz/2012/10/18/infografika-kdy-se-stane-3d-tisk-dostupnym-stejne-jako-osobni-pocitace>
- [3] – Obrazek: *Proces tisku metodou FDM* [online]. [cit. 21.5.2015]. Dostupný na WWW: <http://www.printissima.ch/3d-drucker-druck-dir-dein-ding/>
- [4] – Obrazek: *Proces tisku metodou Polyjet* [online]. [cit. 21.5.2015]. Dostupný na WWW: <http://engineering.usask.ca/service-and-support/engineering-shops/facilities-equipment/index.php>
- [5] – Obrazek: *Proces tisku metodou LOM* [online]. [cit. 21.5.2015]. Dostupný na WWW: <http://www.custompartnet.com/wu/laminated-object-manufacturing>
- [6] – Obrazek: *Proces tisku metodou SLA* [online]. [cit. 21.5.2015]. Dostupný na WWW: <http://proto3000.com/stereolithography-sla-services-rapid-prototyping.php>
- [7] – Obrazek: *Proces tisku metodou SLS* [online]. [cit. 21.5.2015]. Dostupný na WWW: <http://www.vision-systems.com/articles/2011/10/near-infrared-camera-monitors-selective-laser-melting-process.html>
- [8] – Obrazek: *laboratorní zdroj MATRIX MPS-3003L-3* [online]. [cit. 21.5.2015]. Dostupný na WWW: <http://www.tme.eu/cz/details/gps-2303/vicekanalove-napajeci-zdroje/gw-instek/>
- [9] – Obrazek: *Shema zapojení Ramps 1.4* [online]. [cit. 21.5.2015]. Dostupný na WWW: http://www.reprap.org/wiki/RAMPS_1.4/ru
- [10] – Obrazek: *Zapojení ovladače v základním režimu celokroku* [online]. [cit. 21.5.2015]. Dostupný na WWW: <https://www.pololu.com/product/2128>
- [11] – Obrazek: *Schematický diagram krokového driveru A4988* [online]. [cit. 21.5.2015]. Dostupný na WWW: <https://www.pololu.com/product/1182>
- [12] – Obrazek: *Schema trysky* [online]. [cit. 21.5.2015]. Dostupný na WWW: http://e3d-online.com/index.php?route=extras/blog/getblog&blog_id=21
- [13] – Tabulka: *Technické parametry krokových motorů* [online]. [cit. 21.5.2015]. Dostupný na WWW: <http://www.microcon.cz/>
- [14] – Obrazek: *Rozměry krokového motoru* [online]. [cit. 21.5.2015]. Dostupný na WWW: <http://www.microcon.cz/>
- [15] – Obrazek: *Schéma zapojení mechanického spínače* [online]. [cit. 21.5.2015]. Dostupný na WWW: http://reprap.org/wiki/Gen7_Endstop_1.3.1
- [16] – Obrazek: *Použitý mechanický mikrospínač* [online]. [cit. 21.5.2015]. Dostupný na WWW: http://www.ebay.tv/sch/Electronic-Components-/4659/i.html?_sop=10&_nkw=micro+switch+lever
- [17] – Tabulka: *Nastavení mikrokrokování* [online]. [cit. 21.5.2015]. Dostupný na WWW: <https://www.pololu.com/product/1182>
- [18] – Tabulka: *Vlastnosti HT polyimidové vodivé folie* [online]. [cit. 21.5.2015]. Dostupný na WWW: <http://web.elchemco.cz/ht-polyimid-kapton-folie.php>