



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VLIV TEPLoty VZDUCHU NA FDM 3D TISK

EFFECT OF AIR TEMPERATURE ON FDM 3D PRINTING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Hrdlička

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

| | |
|-------------------|--|
| Ústav: | Ústav strojírenské technologie |
| Student: | Bc. Martin Hrdlička |
| Studijní program: | Strojní inženýrství |
| Studijní obor: | Strojírenská technologie a průmyslový management |
| Vedoucí práce: | Ing. Oskar Zemčík, Ph.D. |
| Akademický rok: | 2016/17 |

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 diplomové práce:

Vliv teploty vzduchu na FDM 3D tisk

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Součástí práce je návrh, výroba a stavba temperované komory (případně její dostupnost pro autora). Autor provede testování vlivu teploty atmosféry v tiskovém prostoru na parametry výsledného tisku. K tomuto účelu zvolí jak vhodné zařízení, tak testované materiály a parametry tisku. Výsledkem budou doporučené parametry teplot atmosféry pro 3D FDM tisk.

Cíle diplomové práce:

- rešerše problematiky,
- návrh vyhřívané komory,
- volba materiálů a testů,
- experimentální měření,
- vyhodnocení měření a doporučení.

Seznam doporučené literatury:

NORTON, Robert L. Cam design and manufacturing handbook. New York: Industrial Press, 2002, 610 s. ISBN 0-8311-3122-5.

MOAVENI, Saeed. Finite element analysis: theory and application with ANSYS. 3rd ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2008, xv, 861 s. Pearson education international. ISBN 978-0--3-241651-1.

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

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

WANG, Wego. Reverse Engineering: Technology of Reinvention. 1. vyd. Boca Raton, Florida: Taylor & Francis Group, 2011, 322 s. ISBN 978-1-4398-0630-2.

CHUA, Chee Kai., Kah Fai. LEONG a Chu Sing. LIM. Rapid Prototyping: Principles and Applications. 3. vyd. Singapore: World Scientific Publishing Co., 2010, 512 s. ISBN 978-981-277-897-0.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Práce se zabývá problematikou 3D tisku metodou FDM a vlivem teploty okolí na kvalitu tisku. Práce popisuje princip tisku metodou FDM a vznik chyb, způsobených vlivem okolní teploty. Cílem práce je návrh vyhřívané komory pro tiskárnu typu RepRap Prusa i3, její stavba a následné testování vlivu teploty okolí na kvalitu tisku. Pro testování vzniku popsanych chyb jsou v práci zvoleny konkrétní testy a materiály. Výsledkem této práce jsou doporučené teploty okolí ve vyhřívané komoře pro kvalitnější tisk metodou FDM.

Klíčová slova

FDM, 3D tiskárna, vyhřívaná komora, vliv teploty, parametry tisku, testování materiálů

ABSTRACT

The thesis deals with 3D printing by the FDM and ambient temperature on print quality. The thesis describes the principle of printing by the FDM method and the occurrence of errors caused by the influence of ambient temperature. The aim of the thesis is to design a heated chamber for RepRap Prusa i3 printer, its construction and subsequent testing of ambient temperature influence on print quality. To test the occurrence of the described errors, specific tests and materials are selected in the work. The result of this work is the recommended ambient temperature in the heated chamber for improved FDM printing.

Key words

FDM, 3D printer, heated chamber, temperature influence, printing parameters, materials testing

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HRDLIČKA, M. *Vliv teploty vzduchu na FDM 3D tisk*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 57 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Oskar Zemčík, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Vliv teploty vzduchu na FDM 3D tisk** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
Datum

.....
Bc. Martin Hrdlička

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Oskaru Zemčíkovi, Ph.D., za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování diplomové práce.

Dále bych rád poděkoval společnosti NovaTech CZ s.r.o. za prostor, který mi poskytla pro vypracování diplomové práce.

OBSAH

| | |
|---|----|
| ÚVOD..... | 10 |
| 1 RAPID PROTOTYPING..... | 11 |
| 1.1 Základní technologie rapid prototyping | 12 |
| 2 TECHNOLOGIE 3D TISKU METODOU FDM | 15 |
| 2.1 Proces tisku metodou FDM | 15 |
| 2.1.1 Před-produkční fáze | 15 |
| 2.1.2 Produkční fáze | 16 |
| 2.1.3 Post-produkční fáze | 16 |
| 2.2 Typy konstrukcí 3D FDM tiskáren..... | 17 |
| 2.2.1 Tiskárna s kartézským souřadným systémem..... | 17 |
| 2.2.2 Tiskárna s paralelní kinematickou strukturou | 18 |
| 2.2.3 Tiskárna typu polar..... | 18 |
| 2.3 RepRap tiskárny | 19 |
| 2.3.1 Vývoj RepRap | 19 |
| 2.4 Materiály pro FDM 3D tisk | 21 |
| 2.4.1 ABS (akrylonitrilbutadienstyren) | 22 |
| 2.4.2 PLA (polylactid acid) | 23 |
| 2.4.3 PETG (polyethylentereftalátglykol)..... | 23 |
| 2.5 Parametry tisku..... | 23 |
| 2.5.1 Stavební parametry | 23 |
| 2.5.2 Parametry ovlivňující průtok materiálu tryskou..... | 24 |
| 2.5.2.1 Výška vrstvy a šířka extruze..... | 25 |
| 2.5.2.2 Rychlost | 25 |
| 2.5.3 Teplota | 26 |
| 2.6 Proces nanášení vrstev | 26 |
| 2.6.1 Spojování vláken a vrstev | 26 |
| 2.6.2 Smrštění a deformace | 28 |
| 3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE | 32 |
| 3.1 Analýza problému | 32 |
| 3.2 Cíl práce | 32 |
| 4 KONSTRUKCE VYHŘÍVANÉ KOMORY | 33 |
| 4.1 Návrh konstrukce..... | 33 |
| 4.1.1 Výhřev komory | 35 |
| 4.1.2 Seznam materiálu | 36 |

| | | |
|-------|---|----|
| 4.2 | Stavba vyhřívané komory | 37 |
| 4.2.1 | Úprava tiskárny | 38 |
| 5 | EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ | 39 |
| 5.1 | Vliv teploty okolí na chyby v tisku | 39 |
| 5.1.1 | Prohnutí dílu neboli warp..... | 39 |
| 5.1.2 | Delaminace | 41 |
| 5.1.3 | Deformace spodních vrstev..... | 43 |
| 5.2 | Vliv teploty vzduchu na pevnost výtisku v tahu | 45 |
| 5.2.1 | Výsledky tahové zkoušky | 46 |
| 6 | DISKUSE | 47 |
| 6.1 | Shrnutí dosažených výsledků | 47 |
| 6.2 | Ekonomický a časový rozbor stavby vyhřívané komory..... | 48 |
| 6.3 | Návrh alternativního řešení..... | 48 |
| | ZÁVĚR..... | 49 |
| | SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ | 50 |
| | SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK..... | 53 |
| | SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN | 54 |
| | SEZNAM OBRÁZKŮ..... | 55 |
| | SEZNAM TABULEK..... | 57 |

ÚVOD

Aditivní technologie výroby se začaly objevovat v 80. letech 20. století. Na rozdíl od konvekčních metod výroby, které jsou založeny na úběru materiálu, aditivní technologie materiál nanáší a tím vytváří vyráběný objekt.

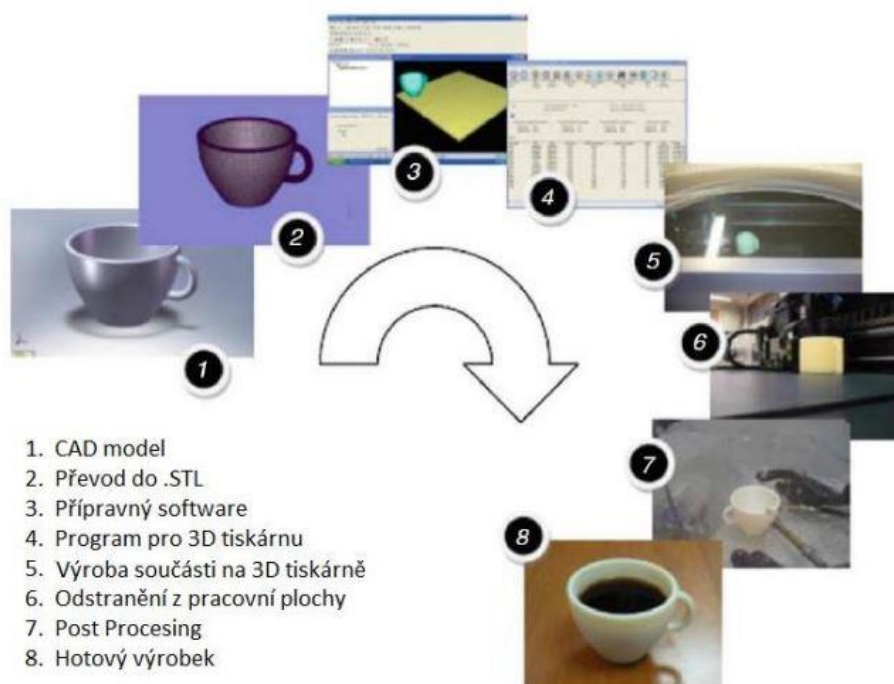
Jednou z nejdostupnějších metod aditivních technologií výroby je metoda FDM. V roce 2005 došlo k uplynutí lhůty prvních patentů této technologie a začaly se objevovat první pokusy o zkonstruování domácí tiskárny z volně dostupných materiálů. V roce 2008 se povedlo zkonstruovat tiskárnu, která byla schopná vytisknout většinu dílů ze kterých byla postavena a takto umožnila stavbu své kopie. Takové stroje se nazývají RepRap. Tímto se tato aditivní technologie začala masivně rozšiřovat mezi domácí kutily a vzniklá komunita postupně vyvíjela a stále vyvíjí další tiskárny, jejich vylepšení a technologické parametry tisku. I přesto, že má komerční sféra náskok více jak 20 let, se domácí 3D tiskárny kvalitou tisku blíží komerčním drahým strojům.

Většina tiskáren typu RepRap má otevřenou konstrukci a teplota okolního vzduchu není nijak řízená. Proto dochází při tisku z některých materiálů k různým deformacím tisknutých dílů.

Tato práce se věnuje vlivu teploty vzduchu na kvalitu 3D tisku. Součástí práce je návrh a stavba vyhřívané komory, provedení testů vlivu teploty vzduchu jejichž výsledkem jsou doporučené teploty pro tisk vybraných materiálů.

1 RAPID PROTOTYPING

Cílem technologie rapid prototyping je rychle převést digitální model z CAD programu do reálné součásti. Tato rychlá výroba prototypových součástí umožňuje již během procesu kontrolovat funkci vyvíjeného výrobku. Tím pomáhá vyhnout se slepým uličkám ve vývoji a urychluje proces vývoje. Jednotlivé fáze této technologie jsou zobrazeny na obrázku 1-1. [1, 2]



Obr. 1-1 Fáze výroby součásti pomocí rapid prototyping. [3]

Některé technologie rapid prototyping se využívají i pro výrobu součástí, které jsou těžko vyrobitelné konvenčními technologiemi. Všechny technologie rapid prototyping mají stejný princip tvorby součástí. Jedná se o opakované nanášení materiálu po vrstvách konstantní tloušťky. [1, 2]

Technologie rapid prototyping má počátky v 80. letech 20. století, jedná se tedy o poměrně novou oblast strojírenství. Jako první metoda byla vynalezena Stereolitografie. Z počátku byly díly vyrobeny touto metodou velmi křehké a sloužily pouze k vizualizaci. Ale během vývoje této metody byly křehké materiály nahrazeny pevnějšími a tím bylo možné vyrobit funkční prototyp pro testování. Tento způsob výroby prototypů se rychle rozšířil a se zvyšujícími nároky na tuto technologii docházelo k vývoji nových metod rapid prototyping. Dostupné metody, jejich zkratky, stavební materiály a rok vzniku jsou uvedeny v tabulce 1-1. [2]

Tab. 1-1 Dostupné technologie rapid prototyping. [1, 2]

| Technologie rapid prototyping | Zkratka | Stavební materiál | Rok vzniku |
|--------------------------------|---------|--------------------------------------|------------|
| Stereolitografie | SLA | Fotopolymer | 1986 |
| Solid Ground Cutting | SGC | Fotopolymer, nylon | 1987 |
| Laminated Object Manufacturing | LOM | Papír s jednostranným pojivem | 1987 |
| Fused Deposition Modeling | FDM | Termoplast | 1989 |
| Selective Laser Sintering | SLS | Polyamid, nylon, vosk, kovové prášky | 1991 |
| Multi Jet Modeling | MJM | Termopolymer, akrylátový fotopolymer | 1994 |
| Direct Metal Laser Sintering | DMLS | Kovové prášky | 1995 |

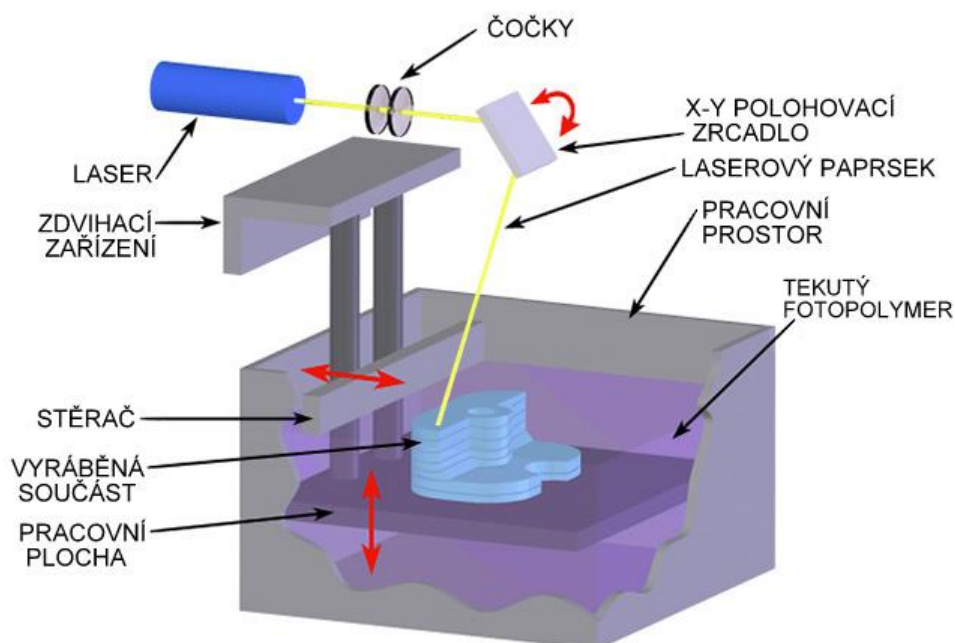
1.1 Základní technologie rapid prototyping

Jednotlivé technologie rapid prototyping lze rozdělit podle podoby použitého materiálu:

- na bázi fotopolymerů (SLA),
- na bázi práškových materiálů (SLS),
- na bázi tuhých materiálů (FDM). [1]

Stereolitografie - SLA

Stereolitografie je nejstarší metodou výroby prototypových součástí pomocí technologie rapid prototyping. Tato metoda se používá především v automobilovém průmyslu. Princip stereolitografie je zobrazen na obrázku 1-2.[1, 4]



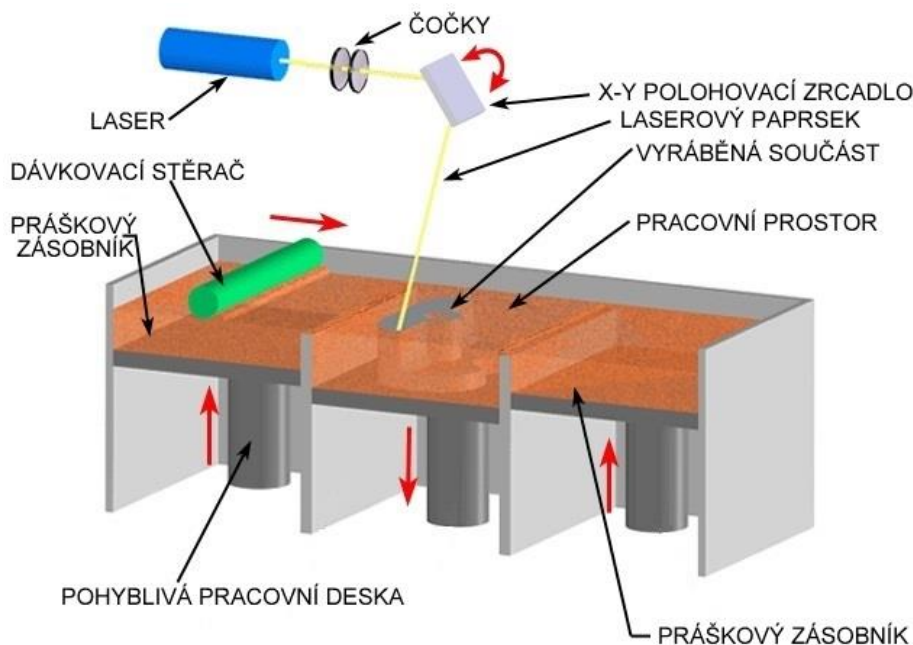
Obr. 1-2 Princip stereolitografie. [4]

Pracovní komora je naplněná epoxidovou pryskyřicí, ve které se pohybuje nosná deska konající pohyb ve směru osy Z. Nad hladinou se pohybuje laserový paprsek vedený pomocí soustavy čoček a zrcadel v ose X a Y. Stavba modelu probíhá vytvrzováním epoxidové pryskyřice v podobě 2D vrstev. Po každém vytvrzení se nosná deska sníží o tloušťku vrstvy a pomocí čepele se nanosená vrstva zarovná. Tento proces pokračuje až do vytvoření celé součásti. Součást se poté vloží do UV komory, kde se součásti dodá požadovaná integrita povrchu barva a další vlastnosti. [1, 4]

Výhodou této technologie je v možnost tisku objemnějších modelů, její přesnost a široký výběr materiálů. Nevýhodou je, že model je po tisku nutno povrchově upravovat a součást následně sušit. [1]

Selective Laser Sintering – SLS

Tato metoda používá materiál ve formě jemného prášku (částice 20 až 100 μm), který je ve vrstvách nanášen na pracovní plochu a jednotlivé vrstvy jsou natavovány teplem generovaným CO₂ laserem. Princip této metody je popsán na obrázku 1-2. [1]



Obr. 1-3 Princip metody SLS. [5]

Na počátku je na podkladovou desku nanášena první vrstva prášku, kterou následně laser nataví. Laser je řízen systémem, který zaručí, aby byl materiál spečen pouze v požadovaném místě. Po spečení první vrstvy se pracovní plocha posune v ose Z o tloušťku vrstvy dolů a následuje nanášení nové vrstvy speciálním válečkovým mechanismem. Takto se proces opakuje. Nenatavený materiál slouží jako podpora a po dokončení součásti je odstraněn. Kvůli zamezení oxidace je pracovní prostor vyplněn inertním plynem. [1, 5]

Výhodou této metody je výroba součástí s vynikající pevností, výroba dílů bez podpor a velké množství dostupných použitelných materiálů. Nevýhodou je prostorově a energeticky náročné zařízení a závislost kvality povrchu na velikosti zrn použitého prášku. [1]

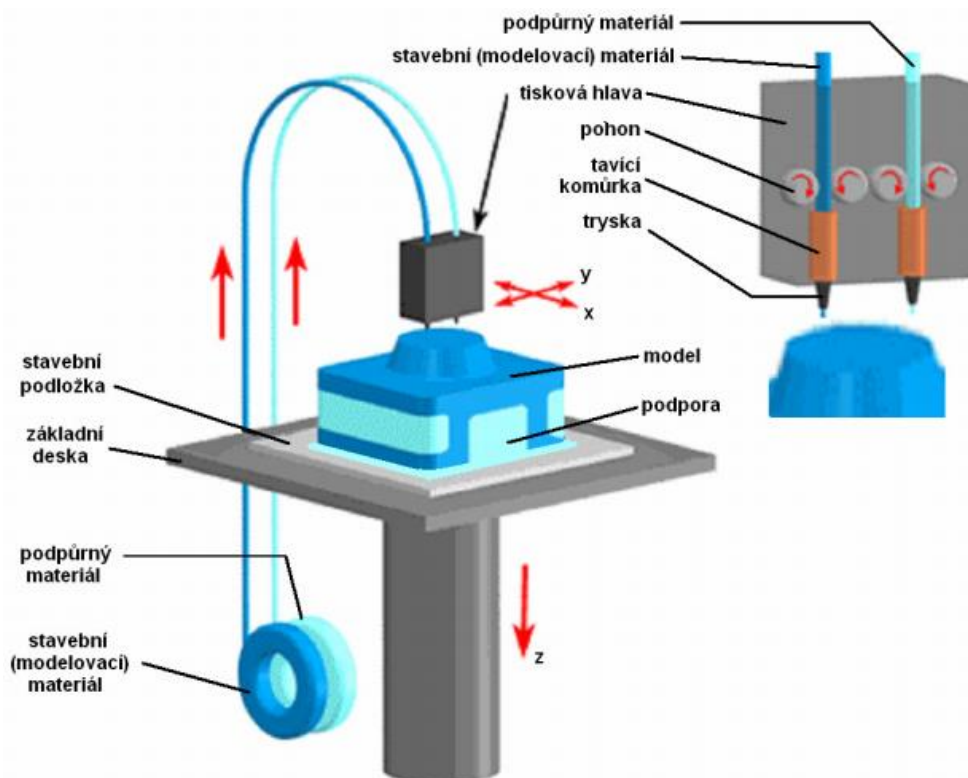
Fused deposition modeling – FDM

FDM je metoda založena na natavování termoplastického materiálu tryskou, který je následně nanášen v jednotlivých vrstvách na tiskový stůl. Tato metoda je podrobně rozebrána v následující kapitole [1].

2 TECHNOLOGIE 3D TISKU METODOU FDM

Metoda Fused Deposition Modeling byla patentována v roce 1989 zakladatelem a vlastníkem ochranné známky společnosti Stratasys, Inc. S. Scottem Crumpem. Po expiraci patentu v roce 2009 došlo k velkému rozšíření této technologie mezi běžné uživatele. [6]

Je to aditivní metoda, jejímž principem je protlačování termoplastického vlákna tryskou s daným průměrem. Materiál je v trysce roztaven a následně tryskou nanesen v podobě tenké horizontální vrstvy na tiskovou podložku. Po dokončení jedné vrstvy se tryska nebo tisková podložka vertikálně posune a dojde k nanesení další vrstvy. Takto se na sebe vrstvy nanášejí až do podoby tisknutého objektu. Princip této metody tisku je zobrazen na obrázku 2-1. [1, 6, 7]



Obr. 2-1 Princip 3D tisku metodou FDM. [8]

2.1 Proces tisku metodou FDM

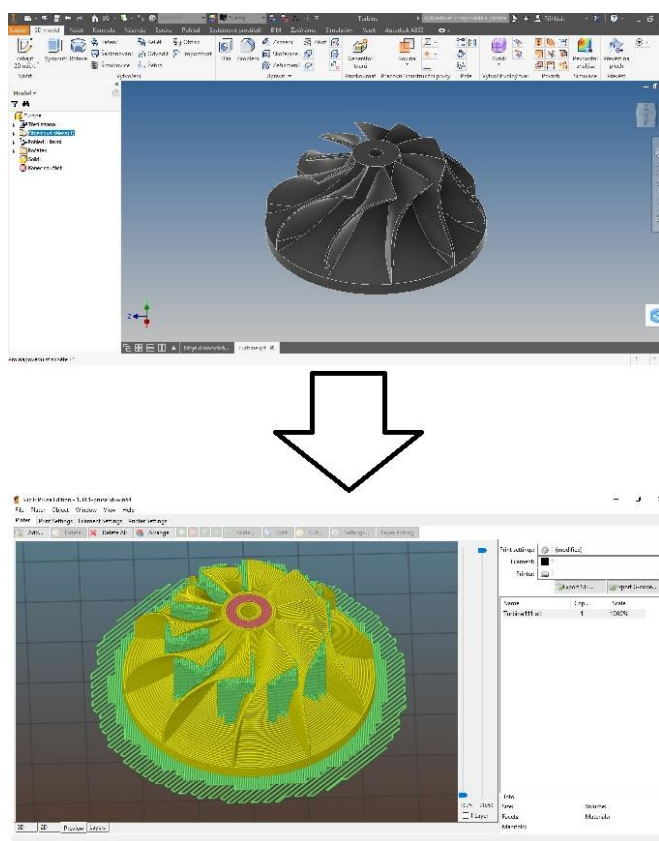
Proces tisku lze rozdělit do 3 fází:

- před-produkční fáze – příprava dat,
- produkční fáze – vlastní tisk,
- post-produkční fáze – úprava a oprava vytisknutého dílu. [6]

2.1.1 Před-produkční fáze

V této fázi je vytvořen požadovaný model v CAD programu a jeho příprava pro tisk. Při tvorbě modelu je třeba uvažovat nad možnostmi technologie FDM tisku a nad možnostmi použité tiskárny. Je třeba dbát na správnou orientaci dílu pro tisk, případně uvážit, zda nelze složitější díl splet z více jednodušších částí, které budou jednodušeji tisknutelné. Správně vytvořený CAD model s ohledem na použitou technologii má velký vliv na výslednou kvalitu a ušetří mnoho času i peněz. Vytvořený CAD model uložený nejčastěji ve formátu *.stl se nahraje do tzv. sliceru. Slicer je program, který

na základě zadaných parametrů rozkrájí CAD model na vrstvy, vypočítá dráhy pro trysku, určí dávkování materiálu a v případě potřeby vygeneruje podpory, Tyto informace uloží do G-kódu pro řízení tiskárny, viz obrázek 2-2. [1, 6, 7]



Obr. 2-2 Převod 3D modelu na G-kód.

2.1.2 Produkční fáze

V produkční fázi je tiskárna ovládána vygenerovaným G-kódem v před-produkční fázi. Připravená pracovní plocha a blok s tryskou, který je součástí extruderu, se zahřeje na nastavenou teplotu podle tisknutého materiálu. Po dosažení požadované teploty se tiskárna řídí vygenerovaným G-kódem. Materiál je v podobě drátu podáván do extruderu, kde je kontinuálně nataven do polotekutého stavu, a vytlačován pod tlakem dalšího ještě nenataveného materiálu. Tvar vrstvenému materiálu dává tryska, rychlost vytlačování, rychlost pohybu trysky a vzdálenost od pracovní plochy nebo předchozí vrstvy, na kterou je vytlačovaný materiál nanášen. Po nanesení první vrstvy následuje přesun trysky ve vertikální ose o nastavenou tloušťku vrstvy nahoru nebo přesun stolu tiskárny dolů podle konstrukce tiskárny. Toto se opakuje až do vytisknutí celé součásti. [1, 6, 7]

2.1.3 Post-produkční fáze

Tato fáze je dokončovací. Vytisknutý díl se oddělí od pracovní plochy tiskárny, případně se odstraní podpory. Podpory lze odstranit dvěma způsoby:

- a) chemicky, v případě tisknutí podpor z materiálu, který je na rozdíl od základního materiálu rozpustný v určité chemické látce či vodě,

- b) mechanicky, při tisknutí podpor ze základního materiálu. Podpory lze lehce odloupnout nebo odříznout. Stavění podpor ze základního materiálu nelze použít při tisku dutého dílu.

Po odstranění podpor lze povrch dílu upravovat do požadované podoby. Hladšího povrchu lze dosáhnout broušením, otryskáním nebo leptáním. [1, 6, 7]

2.2 Typy konstrukcí 3D FDM tiskáren

3D FDM tiskáren je několik typů. Liší se hlavně konstrukcí a použitým souřadným systémem.

2.2.1 Tiskárna s kartézským souřadným systémem

Nejrozšířenějším typem tiskárny je tiskárna s kartézským souřadným systémem, viz obrázek 2-3.



Obr. 2-3 3D tiskárna s kartézským souřadným systémem Ultimaker. [34]

Extruder a stůl se pohybuje po třech lineárních osách v různých kombinacích. Nejčastěji se extruder pohybuje ve dvou a stůl v jedné ose. Většina tiskáren této konstrukce má čtvercový či obdélníkový tvar. [9]

2.2.2 Tiskárna s paralelní kinematickou strukturou

Dalším typem konstrukce je delta tiskárna, viz obrázek 2-4.

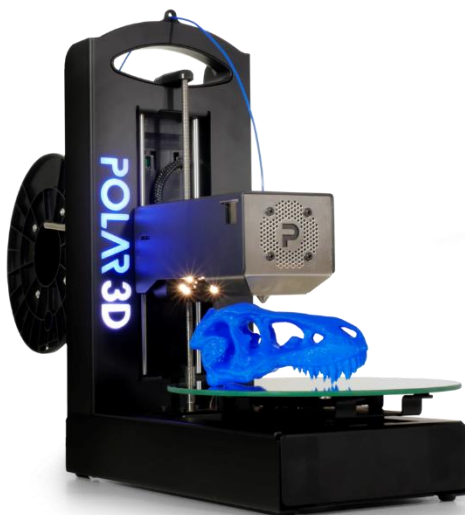


Obr. 2-4 Delta tiskárna Tripodmaker. [10]

Tiskárna pro pohyb extruderu využívá paralelní kinematickou strukturu. Pro pohyb extruderu je nutná součinnost všech tří motorů. Každý motor ovládá jedno ze 3 ramen, která jsou spojena extruderem. Delta tiskárny mají vyšší tiskový prostor a mohou pracovat rychleji. Konstrukce tohoto typu je složitější na sestavení a na kalibraci. Rovněž software na ovládání tiskárny je složitější [9].

2.2.3 Tiskárna typu polar

Tiskárna typu polar je zobrazená na obrázku 2-5.



Obr. 2-5 Tiskárna typu polar Polar 3D. [11]

Využívá polární souřadnicový systém. Extruder se pohybuje ve dvou osách a tiskne na rotační podložku. Tento systém je méně běžný, protože je složitější na ovládání a není mnoho slicerů, které umí generovat G-kód pro tento typ tiskárny. Výhodou této tiskárny je její velikost. [9]

2.3 RepRap tiskárny

RepRap je zkratka anglických slov replicating rapid prototyper, což ve volném překladu označuje stroj, který dokáže vytvářet díly k sestavení své kopie. Většina těchto tiskáren pracuje na principu FDM 3D tisku. Konstrukční RepRap tiskáren se snaží nahradit co nejvíce nakupovaných dílů, díly tištěnými na tiskárně. Model projektu RepRap navíc spadá pod licenci open source, z čehož plyne, že lidé mezi sebou mohou sdílet data, návrhy a informace k dílům či celým konstrukcím tiskáren. V praxi to znamená, že si kdokoli může z webu stáhnout data modelů k některé z RepRap tiskáren, může si je vytisknout, a tiskárnu si sestavit. Konstrukce RepRap tiskáren jsou podobné jako u komerčních modelů. Výhodou těchto tiskáren je jejich cena. Nejrozšířenější modely tiskáren jsou zobrazeny na obrázku 2-6. [9]



Obr. 2-6 Nejrozšířenější modely RepRap 3D tiskáren. [9, 12, 13]

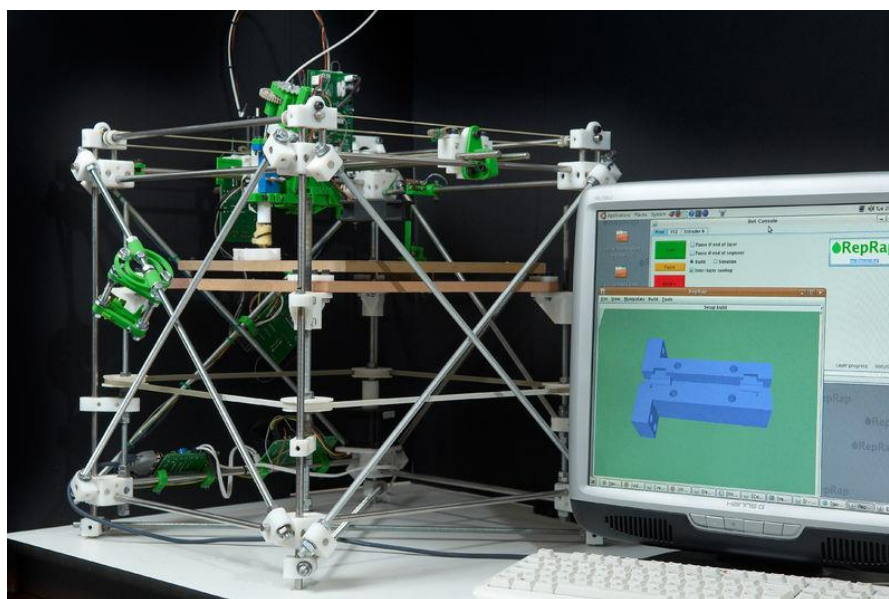
2.3.1 Vývoj RepRap

Myšlenka modelu RepRap pochází z university v Bathu ve Velké Británii. V roce 2005, kdy došlo k uplynutí doby platnosti prvních patentů technologie FDM, nastínil tento projekt Dr. Bowyer. Následně se mu podařilo v roce 2007 postavit první funkční RepRap tiskárnu nazvanou Darwin a v květnu roku 2008 se podařilo pomocí této tiskárny vytisknout další. Na konci roku již bylo 100 takto replikovaných tiskáren. V České republice se jako jeden z prvních o projekt RepRap začal zajímat Josef Průša, který v roce 2011 modifikoval model Mendel a v roce 2012 navrhl svůj nový model tiskárny Prusa i3, který je dnes nejrozšířenější RepRap tiskárnou na světě. [14,15]

Darwin

Jedná se o první model RepRap tiskárny, postavený v roce 2007. Byl symbolicky pojmenován po zakladateli evoluční teorie. Nosná konstrukce je tvořena ze závitových tyčí, které jsou spojené tištěnými díly. Tiskárna pracuje v kartézském souřadném systému. Pracovní deska se pomocí krokového motoru a závitových tyčí pohybuje

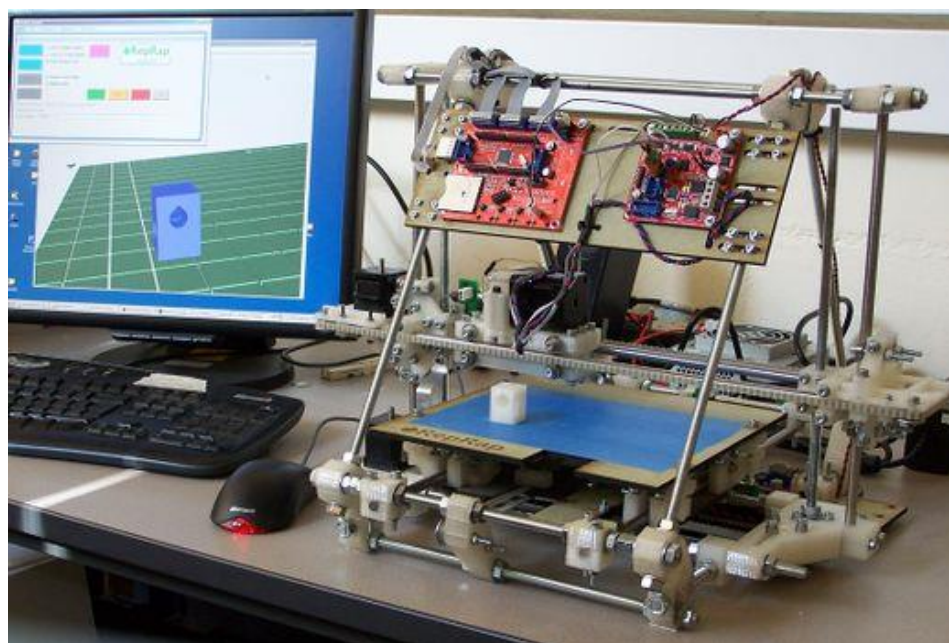
nahoru a dolů v ose Z. Další dva krokové motory se starají o pohyb tiskové hlavy v osách X a Y. Z obrázku 2-7 je zřejmá rozměrnost tohoto stroje. [16]



Obr. 2-7 Tiskárna Darwin. [17]

Mendel

Tato tiskárna je druhou generací projektu RepRap. Opět pracuje v kartézském souřadném systému a její konstrukce je převážně ze závitových tyčí. Oproti předchozímu modelu Darwin je ale kompaktnější, má větší pracovní prostor a větší počet tisknutelných dílů. To vše díky změně konstrukce, kdy se pracovní stůl pohybuje v ose Y a tisková hlava v osách X a Z. Tento model existuje v mnoha verzích. Originál je zobrazen na obrázku 2-8. [18]



Obr. 2-8 Tiskárna Mendel. [18]

Prusa i3

V současnosti je tiskárna Prusa i3 (Obr.2-9) nejrozšířenější na světě. Navrhl ji český konstruktér Josef Průša. Inspiroval se modelem Mendel, kde vertikální konstrukci ze závitových tyčí nahradil obrobeným plátem hliníkového plechu. Díky RepRap se objevují i tiskárny, které mají místo hliníkového plechu například plát z plexiskla nebo ze dřeva. Průša dále celou konstrukci zpevnil a sestavení této tiskárny co nejvíce zjednodušil. Díky podrobnému návodu je stavba tiskárny poměrně snadná a díky tomu je tato tiskárna tak masivně rozšířená. [19]



Obr. 2-9 Tiskárna Prusa i3. [19]

2.4 Materiály pro FDM 3D tisk

Používané materiály pro 3D tisk metodou FDM jsou:

- ABS (akrylonitributadienstyren),
- PLA (polylactid acid),
- PETG (polyethylentereftalátglykol),
- PC (polykarbonát),
- PEI či ULTEM (polyetherimid),
- PA neboli NYLON (polyamid),
- ASA (akrylonitril-styren-akryl),
- PVA (polyvinyl alkohol),
- HIPS (houževnatý polystyren).

Z těchto materiálů jsou nejpoužívanější ABS, PLA a PETG. Tyto materiály jsou popsány v následujících kapitolách. Porovnání vlastností výše uvedených materiálů je v tabulce 2-1. Tyto hodnoty jsou pouze orientační. Vlastnosti filamentů od různých výrobců se mohou mírně lišit.

Každý materiál je specifický svými vlastnostmi a vhodností jeho použití. Důležité materiálové charakteristiky z hlediska tisknutelnosti jsou:

- teplota tavení T_m ,
- teplota skelného přechodu T_g ,
- koeficient lineární roztažnosti α_L .

Na základě těchto charakteristik vybraného materiálu je nutné nastavit parametry tisku pro dosažení kvalitního výtisku. Pro tisk jsou doporučovány materiály s nízkou teplotou skelného přechodu a s nízkým koeficientem lineární roztažnosti.

Tab. 2-1 Přehled základních vlastností materiálů. [20, 21, 22]

| Materiál | Teplota tavení T_m [°C] | Skelný přechod T_g [°C] | Pevnost v tahu [MPa] | Pevnost v ohybu [MPa] | Koeficient lineární roztažnosti α_L [$10^{-6} \cdot K^{-1}$] |
|----------|---------------------------|---------------------------|----------------------|-----------------------|---|
| ABS | 230 | 85 | 43 | 65 | 73,8 |
| PLA | 210 | 65 | 53 | 56 | 30 |
| PETG | 245 | 80 | 53 | 77 | 51 |
| PC | 280 | 161 | 68 | 104 | 70,2 |
| PEI | 310 | 186 | 71,6 | 115 | 54 |
| PA | 178 | 75 | 44 | 59 | 72 |
| ASA | 240 | 108 | 33 | 60 | 8,79 |
| PVA | 210 | 68 | 65 | 68 | 55 |
| HIPS | 215 | 73 | 16 | 50 | 70 |

Mechanické vlastnosti materiálů udávají výrobci v materiálových listech i s příslušnými zkušebními normami a mezi různými výrobci se tyto hodnoty mohou lišit. Bohužel někteří výrobci provádějí testy mechanických vlastností na vzorcích vyrobených metodou vstřikování. Takovým hodnotám se lze tiskem metodou FDM pouze přiblížit. Důvodem je nedokonalé spojení jednotlivých tisknutých vláken a vrstev.

2.4.1 ABS (akrylonitrilbutadienstyren)

Jedná se o termoplast, který je ve 3D FDM tisku spolu s PLA nejvíce rozšířen. Je zdravotně nezávadný. Odolává vyšším a nižším teplotám a chemikáliím (kyseliny, uhlovodíky, oleje). Teplota skelného přechodu je okolo 100°C. Další jeho výhodou je jeho houževnatost. Díly vytisknuté z materiálu ABS je možné lepit rozpouštědly nebo polyakrylátovými lepidly. [23, 24]

Mezi nevýhody tohoto materiálu patří vyšší teplota tavení, která se pohybuje kolem 230 °C, oproti materiálu PLA je tisk energeticky náročnější. Také ho je nutné tisknout na vyhřívaný stolek o teplotě kolem 100°C a zamezit proudění studeného vzduchu kolem tisknutého dílu. Materiál ABS má vyšší koeficient roztažnosti a proto je náchylný na deformace během tisku. Tisk tohoto materiálu je obvykle doprovázen nepříjemným zápachem a také se při tisku tohoto materiálu uvolňuje větší množství ultra jemných částic, které mohou být zdraví škodlivé. Proto se doporučuje tisknout v dobře odvětrávaném prostoru a bez trvalého pobytu osob. [23, 24, 25]

2.4.2 PLA (polylactid acid)

PLA je termoplast vyráběný z kukuřičného nebo bramborového škrobu. Díky tomu je biologicky odbouratelný. Neodolává vyšším teplotám, jeho teplota skelného přechodu se pohybuje již kolem 60°C a při této teplotě měkne. Teplota tavení tohoto materiálu je kolem 180°C. Díky nízkému koeficientu roztažnosti není tolik náchylný na deformace během tisku. Díly z PLA jsou proti ABS méně pružné a povrch dosahuje vyššího lesku. [26, 27]

2.4.3 PETG (polyethylentereftalátglykol)

Materiál PETG je glykolem modifikovaný PET (polyethylentereftalát). Jeho přednost je vynikající průhlednost. Teplota skelného přechodu se pohybuje kolem 80 °C a teplota tavení je 245 °C. Tento materiál má lepší pevnost než ABS, ale díky nižšímu koeficientu roztažnosti se během tisku tolik nedeformuje. [28, 29]

2.5 Parametry tisku

Parametry tisku se nastavují s ohledem na vybavení a možnostech použité 3D FDM tiskárny. Jedná se především o průměr trysky, topná tělesa (vyhřívaný stolek a topné těleso pro trysku), konstrukci pohon tiskárny.

Nastavení se provádí v programu tzv. sliceru, který podle nastavených hodnot rozkrájí model součásti na jednotlivé vrstvy a vygeneruje G-kód pro řízení tiskárny. V průběhu tisku lze provádět pouze drobné úpravy některých parametrů. Například rychlost tisku, průtok materiálu, teplotu a otáčky ventilátoru chlazení tisku.

Správné nastavení parametrů ovlivňuje vizuální podobu výtisku, jeho pevnost a zároveň čas tisku. Parametry se nastavují v závislosti na použitém materiálu pro tisk a požadovaných vlastností tištěného dílu.

Tyto parametry lze rozdělit do tří základních skupin, které jsou vzájemně provázané:

- stavební parametry,
- parametry ovlivňující průtok materiálu tryskou,
- teplotní parametry.

Toto rozdělení by mělo dopomoci k pochopení provázanosti všech parametrů.

2.5.1 Stavební parametry

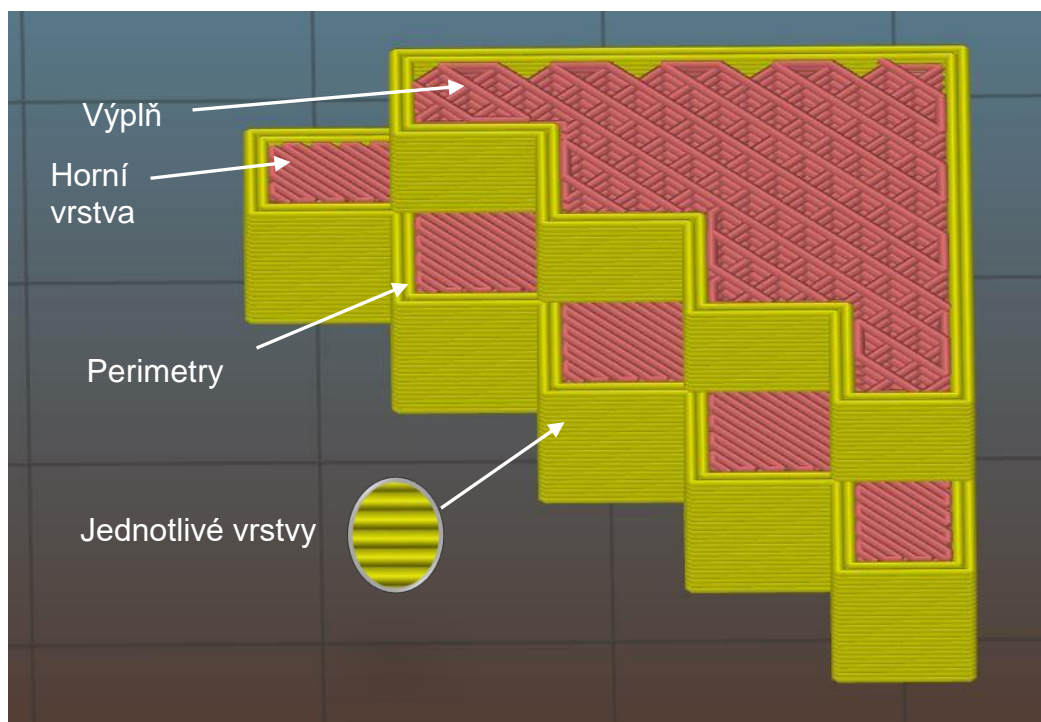
Tyto parametry ovlivňují, jakým stylem má být objekt stavěn a jak moc má být vyplněn. Volí se s ohledem na požadovanou pevnost výtisku a jeho tvarovou složitost. Mezi tyto parametry patří počet perimetrů, počet vyplněných spodních a horních vrstev, vzor a hustota výplně.

Počtem perimetrů se rozumí počet obvodových vláken, které tvoří vertikální stěnu dílu. Tato hodnota má velký vliv na pevnost dílu, stejně jako počet vyplněných spodních a horních vrstev.

Počet vyplněných spodních a horních vrstev určuje, kolik vrstev bude tvořit základnu dílu a kolik vrstev bude uzavírat výplň dílu ze shora. Zejména při nastavování počtu horních vrstev je třeba brát ohled na velikost plochy vrstvy a hustotu výplně z důvodu dokonalého uzavření výplně.

Tvar a hustota výplně především ovlivňuje pevnost dílu. V softwarech pro tvorbu G-kódu je na výběr z několika tvarů výplní. Hustotu výplně lze volit procentuálně vůči objemu dílu od dutého dílu, tvořeného pouze perimetry až po úplné vyplnění.

Jednotlivé stavební prvky jsou znázorněny na obrázku 2-10.



Obr. 2-10 Stavební prvky.

2.5.2 Parametry ovlivňující průtok materiálu tryskou

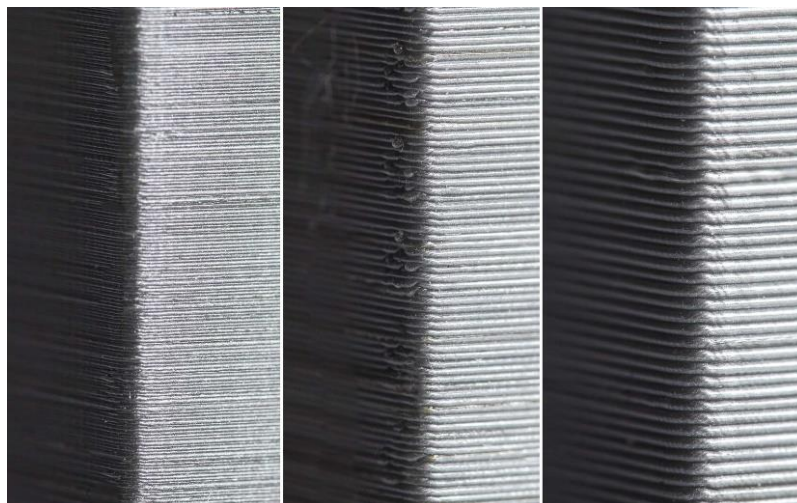
Tyto parametry jsou spolu s vnitřním průměrem trysky a průměrem filamentu vstupují pro výpočet dávkování materiálu do trysky. Maximální průtok je stanoven množstvím materiálu, který tryska dokáže za daný okamžik roztavit a schopností podávacího mechanismu toto množství do trysky dodat. Proto je nutné tyto parametry volit s ohledem na průměr použité trysky.

Parametry ovlivňující průtok materiálu tryskou jsou:

- výška vrstvy,
- šířka extruze,
- rychlost tisku.

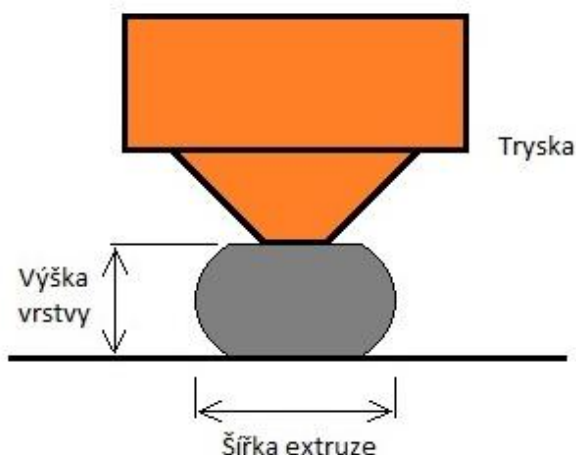
2.5.2.1 Výška vrstvy a šířka extruze

Výška vrstvy je parametr, který zásadně ovlivňuje kvalitu a dobu tisku. Tato hodnota určuje výšku nanášené vrstvy, tedy velikost posuvu mezi tiskovou podložkou a tryskou v ose Z. Obvykle se nastavuje v rozmezí 0,1 až 0,4 mm v závislosti na průměru trysky. Snížením výšky vrstvy stoupá kvalita povrch dílu, ale také se navyšuje počet vrstev a tím se zásadně prodlouží doba tisku. Rozdíl v kvalitě povrchu při různé výšce vrstvy lze vidět na obrázku 2-11.



Obr. 2-11 Závislost kvality povrchu na výšce vrstvy, zleva výška vrstvy 0,05 mm, 0,2 mm, 0,3 mm. [29]

Šířka extruze určuje šířku pokládaného vlákna a lze ji nastavit pro jednotlivé stavební prvky zvlášť. Je možné ji zadat pevně nebo procentuálně vůči výšce vrstvy. Větší šířka extruze umožňuje lepší propojení vrstev, ale má za následek horší rozměrovou přesnost. Výška vrstvy a šířka extruze je zobrazena na obrázku 2-12.



Obr. 2-12 Výška vrstvy a šířka extruze.

2.5.2.2 Rychlost

Rychlost tisku lze nastavit pro jednotlivé stavební prvky zvlášť. Například nastavením nižší rychlosti tisku perimetrů lze dosáhnout lepší rozměrové přesnosti a kvality povrchu a zároveň nastavením vyšší rychlosti tisku výplně se zkrátí doba tisku.

Při nastavování rychlosti tisku je nutné brát ohled na velikost tisknutého objektu, respektive na dobu tisku jedné vrstvy. Podkladová vrstva musí dostatečně zchladnout,

aby se při nanášení vrstvy nové nezbortila a nedocházelo k deformacím tisknutého objektu.

Změnou nastavení rychlosti tisku se mění průtok materiálu tryskou. Toto je třeba zohlednit při nastavování teploty trysky.

2.5.3 Teplota

Pro tisk se nastavuje teplota tavné trysky, teplota vyhřívané podložky a v případě uzavřeného vyhřívání tiskového prostoru teplota okolí.

Teplota tavné trysky se nastavuje podle teploty tavení použitého materiálu. Tuto hodnotu uvádí výrobce na balení filamentu a je pouze orientační. Nastavuje se s ohledem na velikost průtoku materiálu tryskou. Při vyšších průtocích by nemusela tryska dostatečně natavovat materiál a tím by mohlo dojít k nedostatečnému propojení vrstev nebo dokonce i k ucpaní trysky a zastavení tisku.

Teplota vyhřívané podložky má vliv na správné přilnutí první vrstvy k podložce a na pomalejšímu chladnutí tisknutého dílu. Opět se nastavuje s ohledem na použitý materiál.

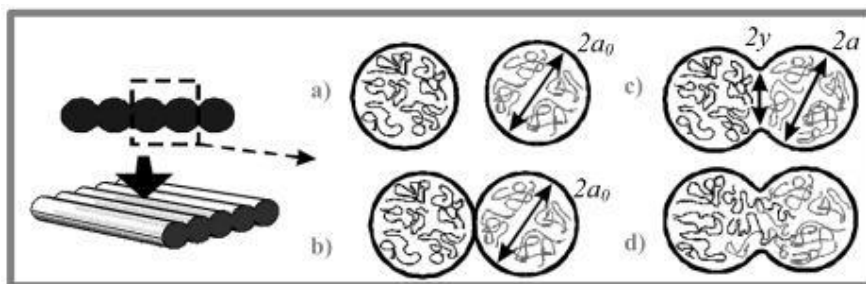
Teplota okolí by se měla ideálně pohybovat pod oblastí skelného přechodu. Materiál by měl při této teplotě dostatečně zchladnout, aby se při nanášení nové vrstvy podkladová vrstva nezbortila. Stabilní teplota v okolí tisknutého dílu zaručí rovnoměrné chladnutí vrstev a omezí se tím deformace a delaminace.

2.6 Proces nanášení vrstev

Proces tisku se skládá z nanášení vláken do jednotlivých vrstev, ze kterých je složen tisknutý objekt. Cílem je vytisknout díl, který se bude svými mechanickými vlastnostmi blížit dílu vyrobenému ze stejného materiálu metodou přímého vstřikování. K tomuto stavu se lze přiblížit ideálním spojením vláken a vrstev správně nastavenými parametry tisku.

2.6.1 Spojování vláken a vrstev

Při nanášení roztaveného vlákna může dojít ke čtyřem případům zobrazených na obrázku 2-13.



Obr. 2-13 Případy spojení vláken

a) bez kontaktu; b) povrchový kontakt; c) spojení krčků; d) spojení molekulární difúzí. [30]

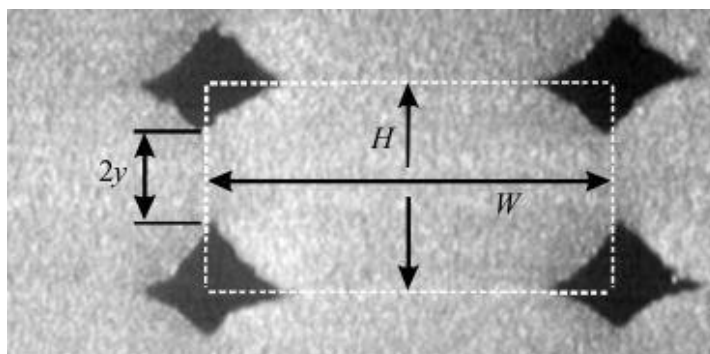
Tyto případy vznikají v závislosti na velikosti hodnoty překrytí nanášených vláken. Díky tomuto překrytí dochází k prolnutí vláken. Software, který generuje G-kód, vypočítá ze zadané šířky extruze počet vláken ve vrstvě a z tohoto počtu a výšky vrstvy dále vygeneruje průtok materiálu tryskou. Pokud se reálný průtok tryskou neshoduje s vygenerovaným průtokem v G-kódu, nedojde k správnému prolnutí

vláken (Obr. 2-13a a Obr. 2-13b) nebo naopak dojde k přeplňování vrstev. Tento jev způsobuje špatně nakalibrovaný extruder tiskárny. Případnou korekci překrytí, respektive průtoku, lze provést ve sliceru. Pokud je dosaženo správného překrytí, ale teplota vláken je nižší než teplota skelného přechodu daného materiálu, dojde k tzv. studenému spoji, který je nežádoucí (Obr. 2-13c). V opačném případě, kdy je teplota vláken vyšší než teplota skelného přechodu materiálu, dojde k inicializaci molekulární difuze a tím k vytvoření pevného krčku (Obr. 2-13 d). [30]

Kvalita spojení vláken určuje mechanické vlastnosti celku. Podmínkami, které ovlivňují kvalitu spojení vláken, se ve své práci zabývá Q. Sun a kol. [30]. Ve svém výzkumu dokázal, že kvalita spojení vláken závisí na historii jejich teploty. Pro popsání této závislosti zavedl 3 parametry:

- šířku vlákna W ,
- výšku vlákna H ,
- délku krčku $2y$.

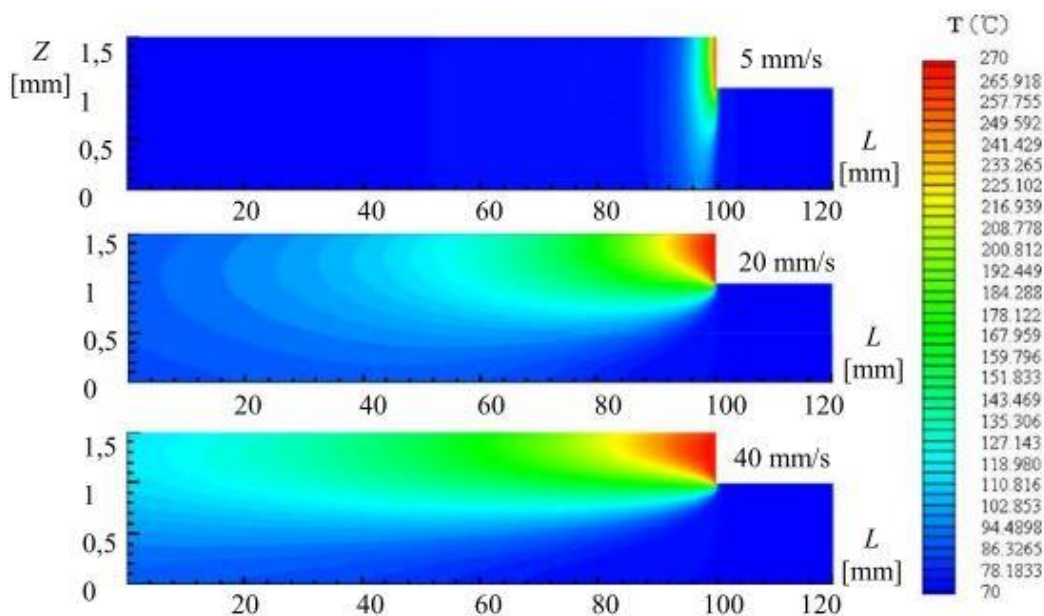
Tyto parametry charakterizují velikost a tvar spojovaných vláken (Obr. 2-14). [30].



Obr. 2-14 Mikrofotografie spojených vláken
 W -šířka vlákna, H -výška vlákna, $2y$ -délka krčku. [30]

Cílem jeho experimentu bylo zjištění průběhu teploty již nanesených vrstev při nanášení vrstvy nové. Materiál použitý v experimentu byl ABS o teplotě tavení $T_m = 270 \text{ }^\circ\text{C}$, protlačovaný tryskou o průměru 0,3 mm. Výška vrstvy byla nastavena na $H = 0,254 \text{ mm}$ a šířka na $W = 0,508 \text{ mm}$. Experiment probíhal při okolní teplotě vzduchu $T_e = 70 \text{ }^\circ\text{C}$. I přes dodržení teploty tavení se pohybovala teplota vlákna na výstupu trysky mezi 235-245 $^\circ\text{C}$. Při experimentu prokázal, že teplota na rozhraní podkladové a pokládané vrstvy roste nad teplotu skelného přechodu a během 3 sekund opět klesne pod tuto teplotu. [30]

Simulaci tohoto procesu provedl T. Wang a kol. [31], který zkoumal přenos tepla z nanášeného vlákna na předchozí vrstvy za různých rychlostí. Tato simulace, zobrazená na obrázku 2-15, simuluje tisk vrstev s výškou 0,5 mm o délce 120 mm metodou konečných prvků. Závěrem jeho experimentu je, že při nekonstantní rychlosti tisku vznikají rozdíly v teplotách a době chlazení jednotlivých vrstev. To přispívá ke vzniku nežádoucího napětí. [31, 32]

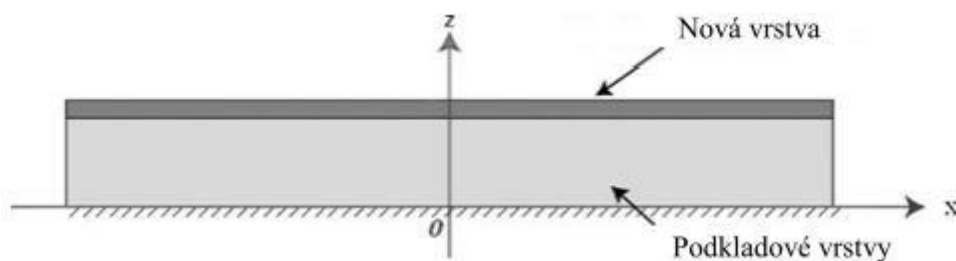


Obr. 2-15 Simulace průběhu teploty při různých rychlostech tisku. [31, 32]

2.6.2 Smrštění a deformace

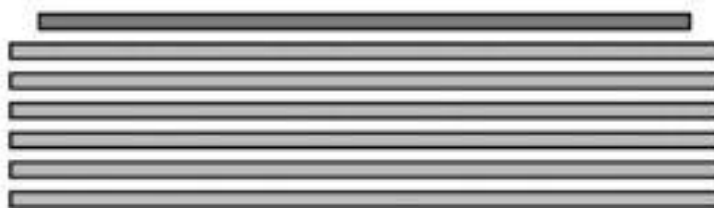
V předchozí kapitole bylo popsáno spojování a chladnutí jednotlivých vrstev při tisku. Chladnutí doprovází smrštění materiálu a důsledkem toho vznikají nejčastější chyby, které se při tisku metodou FDM projevují. Všechny tyto chyby mají stejného jmenovatele a tím je nerovnoměrné chladnutí vrstev.

T. Wang a kol. [31] ve svém výzkumu uvádí jako příčinu těchto deformací uvolnění vnitřního napětí, které se kumuluje v tisknutém objektu. Vnitřní napětí je důsledkem smrštění materiálu během chladnutí, které je charakterizováno koeficientem lineární roztažnosti nanášených vláken. Bezprostředně po vytlačení vlákna tryskou, kdy se teplota vlákna pohybuje mezi teplotou tavení T_m a teplotou skelného přechodu T_g , mohou být vlákna podrobena kontrakci bez následků. Ke kumulaci vnitřního napětí dochází až při chladnutí z teploty skelného přechodu na teplotu okolí T_e . T. Wang v tomto výzkumu předpokládal ideální nanášení nové vrstvy na vrstvu stávající a jejich ideální spojení, viz obrázek 2-16. [31]



Obr. 2-16 Nanesená nová vrstva, za předpokladu ideálního přilnutí. [31, 32]

Dále objekt rozdělil na jednotlivé horizontální vrstvy, jako je na obrázku 2-17 a za ideálních předpokladů nechal vychladnout. Během chladnutí z teploty T_g na teplotu T_e dojde k lineárnímu smrštění poslední vrstvy o hodnotu ε_L . [31, 32]



Obr. 2-17 Volné ochlazení vrstev bez vzniku napětí. [31]

Deformace ε_L a napětí σ kumulované při chladnutí, jsou vyjádřeny:

$$\begin{aligned}\sigma &= 0 \text{ [MPa]}, \\ \varepsilon_L &= \alpha_L \Delta T \text{ [mm]},\end{aligned}\quad (1)$$

kde:

σ [MPa] - napětí,

ε_L [mm] - deformace,

α_L [K⁻¹] - koeficient lineární roztažnosti,

ΔT [K] - změna teploty při chladnutí. [31]

Po ochlazení poslední vrstvy na teplotu T_e provedl T. Wang [31] natažení této vrstvy do původní délky, viz obrázek 2-18. [31]



Obr. 2-18 Natažení vrstvy do původní délky. [31]

Natažením dojde ke vzniku napětí σ a deformaci ε_L :

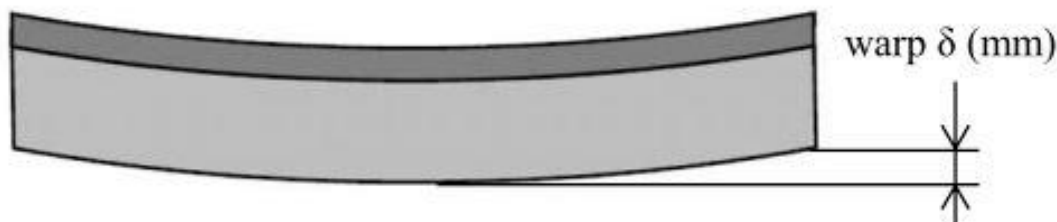
$$\sigma = -E\alpha_L\Delta T \text{ [MPa]}, \quad (2)$$

$$\varepsilon_L = -\alpha_L\Delta T \text{ [mm]}, \quad (3)$$

kde:

E [MPa] - modul pružnosti v tahu. [31]

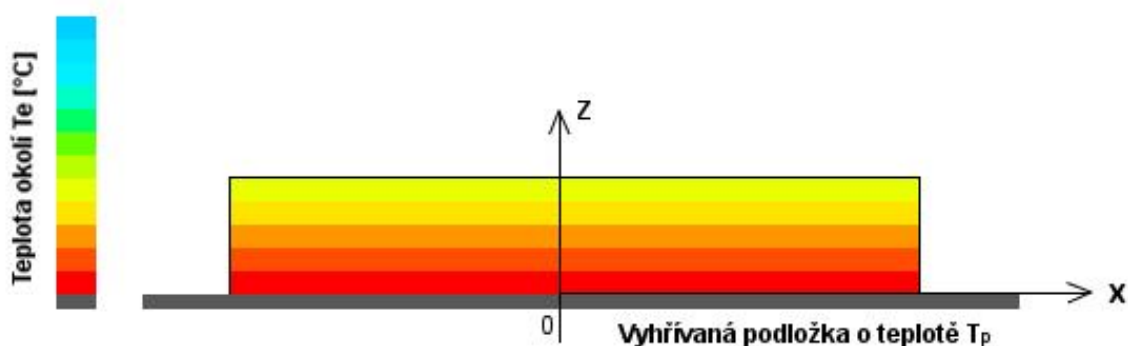
Po opětovném spojení vrstev v jeden celek vzniklé napětí vyvolá silové účinky, působící na spodní vrstvy objektu. Po vyrovnání působících sil vzniká vlivem deformace ε_L celková deformace objektu, která je zobrazená na obrázku 2-19. Je to výsledná deformace, skládající se ze zvlnění, zprohýbání a zkroucení objektu vlivem lineárního smrštění. Tato chyba se označuje jako warp. [31]



Obr. 2-19 Výsledná deformace objektu. [31]

J. Rodriguez [33] ve svém výzkumu spočítal, že při použití trysky o výstupním průměru 0,254 mm, okolní teploty 70 °C a použitém materiálu ABS P400, je doba vychladnutí vlákna z teploty $T_m = 270$ °C na teplotu $T_g = 85$ °C rovna 0,55 s. Z teploty T_g na teplotu $T_e = 70$ °C dalších 1,2 s. Pro většinu tiskových hlav je ovšem čas dokončení jedné vrstvy mnohem delší, než je čas chladnutí extrudovaného vlákna, a tudíž je teplota nanášené vrstvy brána jako ekvivalentní teplotě okolí. [33]

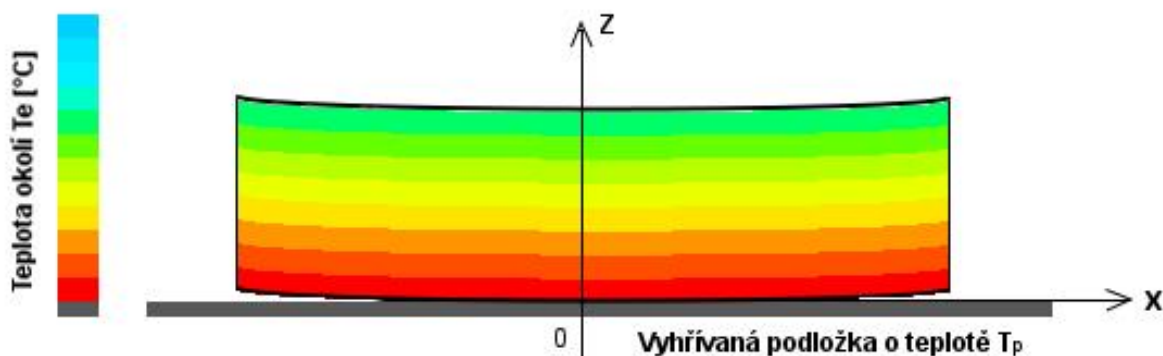
V případě otevřených RepRap tiskáren je jediný zdroj ohřevu okolního vzduchu vyhřívání tisková podložka. Teplo vydávané podložkou je šířeno prouděním neboli konvekcí. Vlivem toho teplota okolí klesá s rostoucí vzdáleností v ose Z od podložky, a to v rozmezí teploty podložky až teploty vzduchu v místnosti, kde je tiskárna umístěna. Pokud bude dodržena dostatečná prodleva mezi pokládáním nové vrstvy na podkladovou vrstvu, lze uvažovat teplotu vrstev rovnu teplotě okolí T_e , jak uvádí J. Rodriguez [33] ve svém experimentu. Za tohoto předpokladu bude teplota vrstev s rostoucí vzdáleností od podložky klesat, viz obrázek 2-20. V tomto modelu není uvažován vliv proudění vzduchu v místnosti. [30, 31, 33]



Obr. 2-20 Závislost teploty vzduchu a vrstev tisku na vzdálenosti od vyhřívání podložky.

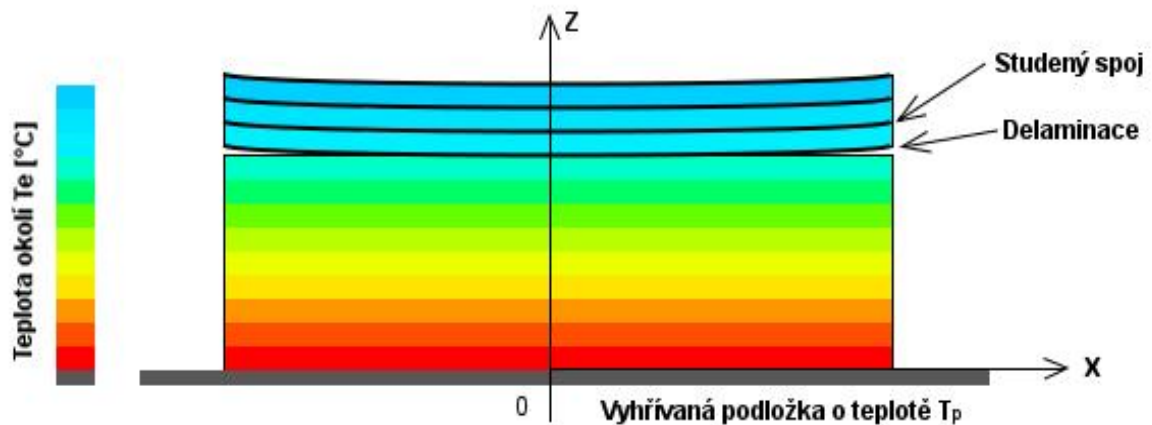
V případě zobrazeném na obrázku je uvažován takový rozdíl teplot vrstev, který není dostatečně velký na to, aby lineární smrštění vrstev a tím vzniklé kumulované vnitřní napětí deformovalo díl a odlepilo ho od podložky.

Při nanášení dalších vrstev dosáhne díl určité výšky o určité teplotě okolí. Spodní vrstva bude mít teplotu blízkou vyhřívání podložce a smrštění této vrstvy bude minimální oproti vrstvě horní. Tento rozdíl smrštění způsobí velké vnitřní napětí, které díl zdeformuje a odlepí ho od podložky. Tento děj popisuje obrázek 2-21.



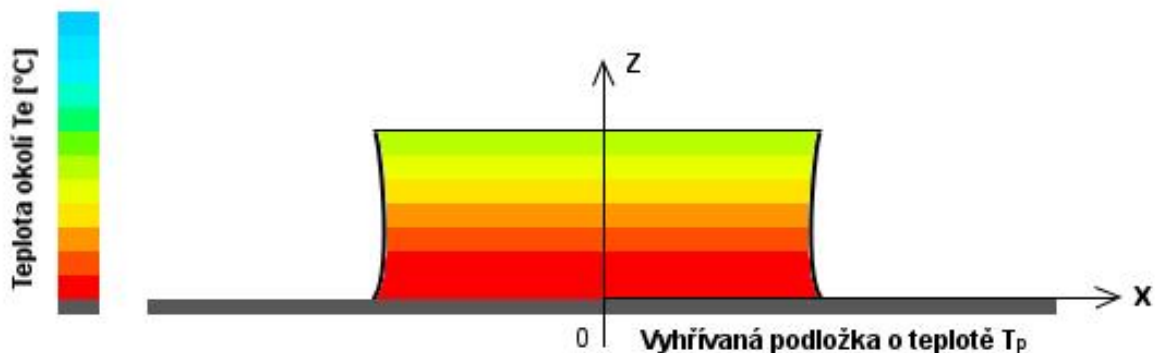
Obr. 2-21 Zdeformovaný díl vlivem vnitřního napětí.

Pokud nedojde ke kumulaci dostatečně velkého vnitřního napětí (např. vlivem velikosti dílu), nedojde ani k deformaci a odlepení dílu od podložky. Za tohoto předpokladu bude tisk pokračovat a v určité výšce bude teplota okolí natolik nízká, že nedojde během pokládání nové vrstvy k zahřátí podkladové vrstvy nad teplotu skelného přechodu T_g a vznikne tzv. studený spoj. Při pokládání dalších vrstev dojde opět ke kumulaci vnitřního napětí a ve studeném spoji vznikne prasklina. Nad touto prasklinou je díl křehký a vrstvy se rozpadají. Toto oddělení vrstev se nazývá delaminace, která je zobrazena na obrázku 2-22. Při tisku často dochází i ke kombinaci odlepování od podložky a delaminaci.



Obr. 2-22 Delaminace.

Posledním nejčastějším problémem při tisku je lokální deformace spodních vrstev. K tomuto dochází při tisku malých objektů neúměrnou rychlostí. Několik spodních vrstev nestihne zchladnout na teplotu skelného přechodu, tedy ani na teplotu okolí. Tím tyto vrstvy nejsou schopny odolávat kontrakcím, způsobeným smršťováním nových vrstev, které již na teplotu okolí zchladnou. Tento jev je zobrazený na obrázku 2-23.



Obr. 2-23 Deformace spodních vrstev.

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

Rešeršní část práce vysvětluje princip 3D tisku metodou FDM a vliv nastavení parametrů tisku na kvalitu výtisku. Popisuje nejpoužívanější materiály a jejich vlastnosti a podmínky pro tisk. Jedním z hlavních parametrů je teplota, přesněji teplota trysky, vyhřívané podložky a teplota vzduchu v prostoru tisku. Tyto parametry se nastavují v závislosti na teplotě tavení a teplotě skelného přechodu daného materiálu.

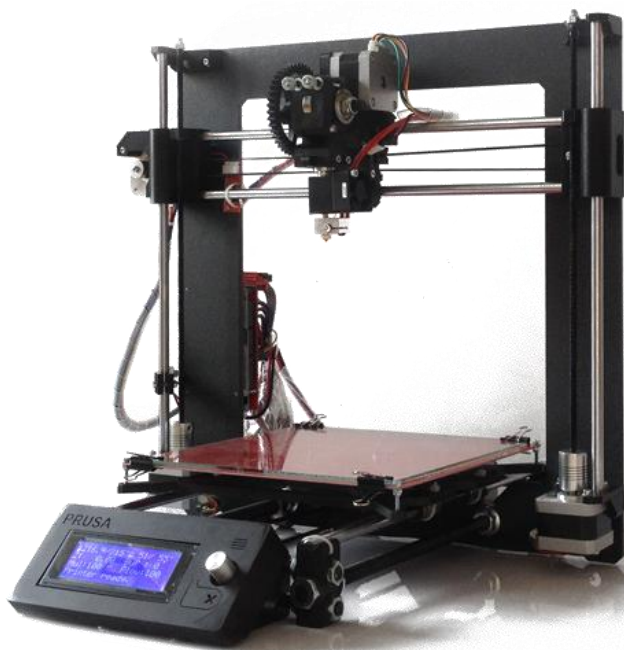
V práci je také popsán typ RepRap 3D tiskáren, které se vyznačují nízkou cenou a jednoduchou konstrukcí. Tyto tiskárny jsou volně šiřitelné, a proto jsou mezi širokou veřejností hojně rozšířené. U tohoto typu tiskáren, stejně jako u komerčních typů, je teplota trysky a vyhřívané podložky snadno ovlivnitelná a nastavuje se v softwaru pro ovládání tiskárny. Ale konstrukce těchto tiskáren je, až na výjimky, otevřená a tím je teplota okolního vzduchu jen těžko ovlivnitelná. Toto omezení především ovlivňuje mechanické vlastnosti výtisku a na výtiscích vzniká mnoho chyb, které se projevují především při tisku materiálů s vyšší lineární roztažností a vyšší teplotou skelného přechodu. Mezi běžně používané materiály s těmito vlastnostmi patří materiál ABS a PETG.

3.2 Cíl práce

Cílem práce je návrh a stavba vyhřívané komory pro RepRap 3D tiskárnu s otevřenou konstrukcí a stanovit doporučené teploty vzduchu pro kvalitnější tisk dílů z materiálů ABS a PETG. Model tiskárny, pro kterou bude vyhřívaná komora konstruována, je RepRap Prusa i3.

4 KONSTRUKCE VYHŘÍVANÉ KOMORY

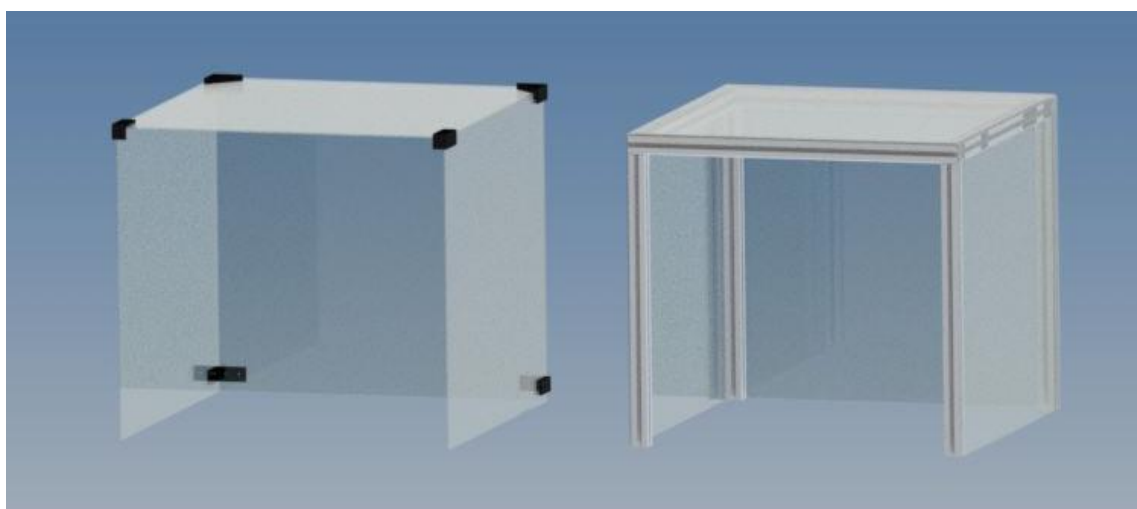
V této kapitole jsou popsány možnosti konstrukčních řešení vyhřívané komory. Při návrhu konstrukce je brán ohled na to, že vyhřívaná komora je určena pro tiskárnu typu RepRap s konstrukcí Prusa i3 (Obr 4-1). Proto by její konstrukce měla být jednoduchá, levná a použité materiály by měly být volně dostupné na trhu. U tohoto typu tiskáren se doporučuje, z důvodu bezpečnosti, nenechávat tiskárnu během tisku bez dozoru, proto by komora neměla bránit v pohledu na tiskárnu. Také by měla umožnit dostatečnou manipulaci v tiskovém prostoru.



Obr. 4-1 RepRap tiskárna Průša i3. [35]

4.1 Návrh konstrukce

Z výše uvedených důvodů by měly být stěny tvořeny z průhledného materiálu ve formě desek. Způsob spojení těchto desek je možný pomocí spojovacích dílů (Obr. 4 - 2a) nebo lze desky připevnit ke konstrukci z hliníkových profilů (Obr 4-2b).



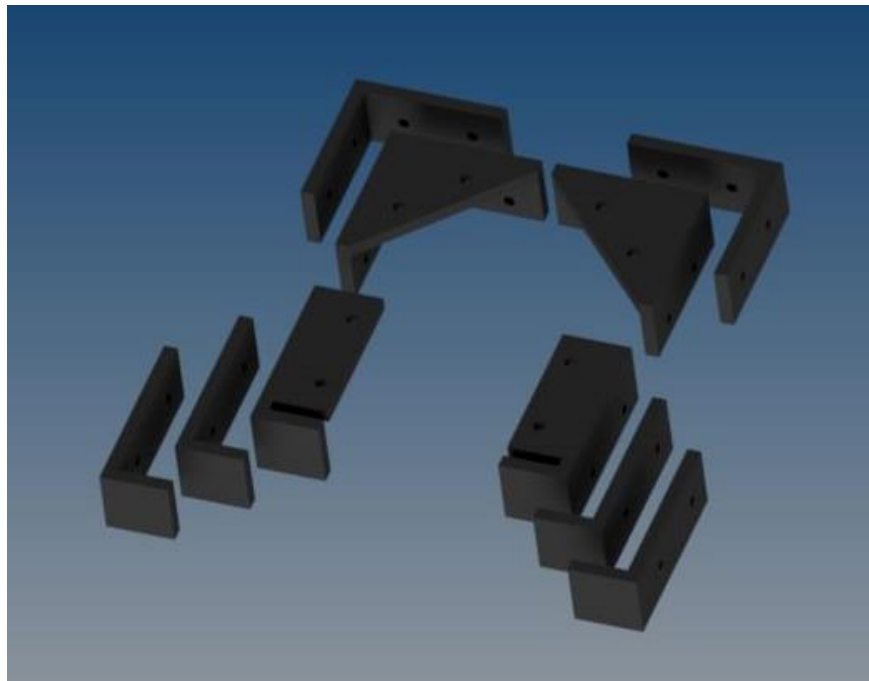
Obr. 4-2 a) konstrukce bez rámu, b) konstrukce s rámem.

Komora nebude nijak silově zatěžována, její funkcí je pouze zabránit velkému úniku tepla a zabránit ochlazení prostoru tisku vlivem proudění chladného vzduchu v místnosti. Proto je z těchto dvou řešení vhodnější bezrámová konstrukce. Ta také zároveň odpovídá požadovaným nízkým nákladům. Pro bezproblémový přístup k tiskovému prostoru a manipulaci v něm by měl být vstupní otvor co největší. Vstup do boxu bude řešen vysunutím celé přední stěny boxu.

Spolu s tiskárnou bude uvnitř komory umístěna i cívka s filamentem, to zjednoduší dopravu filamentu k extruderu a také to splní podmínku nižší vlhkosti vzduchu pro skladování filamentu. Tomuto faktu je třeba velikost komory přizpůsobit. Navrhnuté půdorysné rozměry vyhřívané komory jsou 60 x 60 cm s výškou 50 cm.

Desky budou z průhledného polykarbonátu o tloušťce 3 mm. Důvodem pro volbu tohoto materiálu je výborná průhlednost, dobrá obrobiteľnosť, tepelná odolnosť a odolnosť vůči nárazům. Rozhodující je také třída reakce na oheň podle normy ČSN EN 13501-1 B, s1, d0. Což znamená, že materiál je nesnadno hořlavý a nevykazuje celkové vzplanutí.

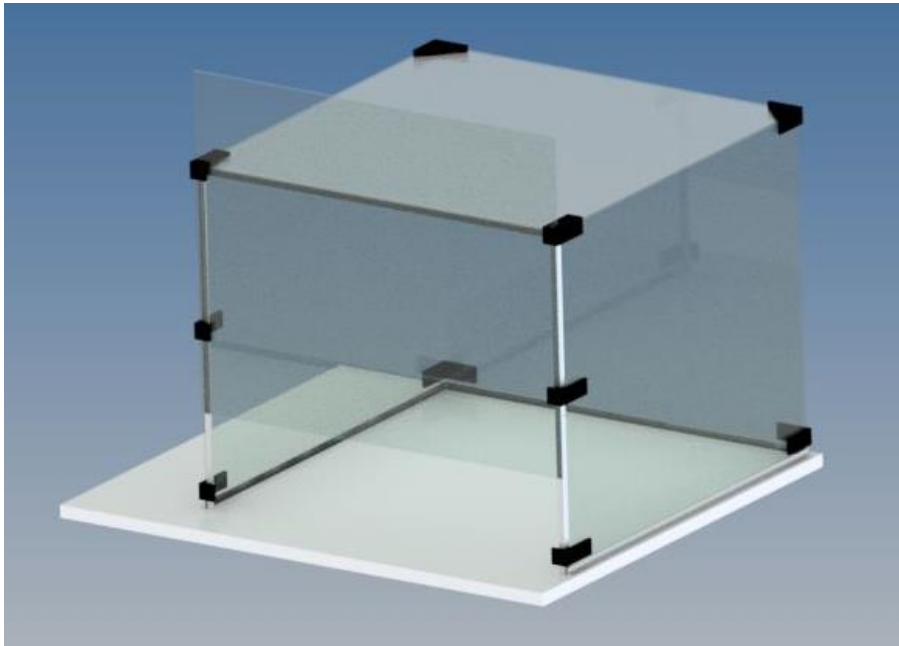
Průhledné desky budou spojeny šroubovými spoji pomocí navrhnutých a následně vytisknutých dílů z materiálu ABS, zobrazených na obrázku 4-3.



Obr. 4-3 Spojovací díly.

Protože bude přední deska boxu výsuvná, je nutné přilehlé hrany desek vyztužit. K tomu dobře poslouží hliníkový L profil 10 x 10 mm, který bude vlepený na vnitřní stranu podél hran. Tím bude zaručena dostatečná pevnost a stabilita vyhřívané komory.

Celý box bude uložen do ohrádky tvořené hliníkovým profilem L 10 x 10 mm, který bude přišroubovaný do laminované dřevotřískové desky. Profil zabráni případnému posunu celého boxu. Model této konstrukce je zobrazen na obrázku 4-4.



Obr. 4-4 Model vyhřívané komory.

4.1.1 Vyhřev komory

Vzhledem k tomu, že komora bude obklopotvat celou tiskárnu, není možné uvažovat nad teplotou v komoře vyšší než 60°C. Vyšší teplota by měla za následek rapidní snížení životnosti krokových motorů. Také by byl vyhřev celého prostoru komory velice náročný na čas a energii. Teplota bude kontrolována v bezprostřední blízkosti tisknutého dílu. Teplotní čidlo bude připevněno na extruder v úrovni trysky. Pro ohřev vzduchu v tiskovém prostoru by mělo být použito topení s bezpečným vstupním napětím 12V. Tomuto požadavku odpovídá jednoduchý topný modul (Obr.4-5).



Obr. 4-5 Topný modul. [36]

Topný modul bude uchycen ve vytisknutém stojanu a bude možné jeho polohu vůči tiskárně měnit. K zadní části článku bude připevněn vytisknutý přechodový díl na ventilátor, který bude přes článek hnát ohřátý vzduch přímo do prostoru tisku. Návrh celé této sestavy je zobrazen na obrázku 4-6.



Obr. 4-6 Návrh sestavy topení.

Spínání topení bude probíhat přes digitální termostat STC-1000 (Obr. 4-7).



Obr. 4-7 Digitální termostat STC-1000 [37].

4.1.2 Seznam materiálu

Vyhřívání komory se bude skládat z těchto součástí:

- řezané desky polykarbonátu (4ks 600 x 500 mm, 1 ks 600 x 600 mm),
- vytisknuté spojovací prvky,
- hliníkový L profil 10 x 10 mm o délce 3400 mm,
- laminovaná dřevotřísková deska 800 x 700 mm, tl.18 mm,
- topný článěk 12 V,
- ventilátor 40 x 40 mm 12 V,
- digitální termostat s čidlem,
- transparentní univerzální lepidlo,
- spojovací materiál (šrouby, matice, podložky, vruty).

4.2 Stavba vyhřívané komory

Po obstarání všech potřebných dílů se přistoupilo ke kompletaci komory. Komora byla stavěna v domácí dílně za pomoci dostupných nástrojů. Nejprve se zkompletoval box z polykarbonátových desek, vytisknutých spojovacích dílů a spojovacího materiálu. Dále bylo nutné vlepít podél vstupního otvoru hliníkový L profil jako výztuž. Spoje polykarbonátových desek byly vyplněny tmelem, pro lepší těsnost celého boxu. Následovala příprava spodní podstavy. Na laminovanou dřevotřískovou desku byly přišroubovány hliníkové L profily, mezi kterými byla vynechána mezera na kabeláž. Po montáži osvětlení byla komora kompletní (Obr. 4-8).



Obr. 4-8 Zkompletovaná komora.

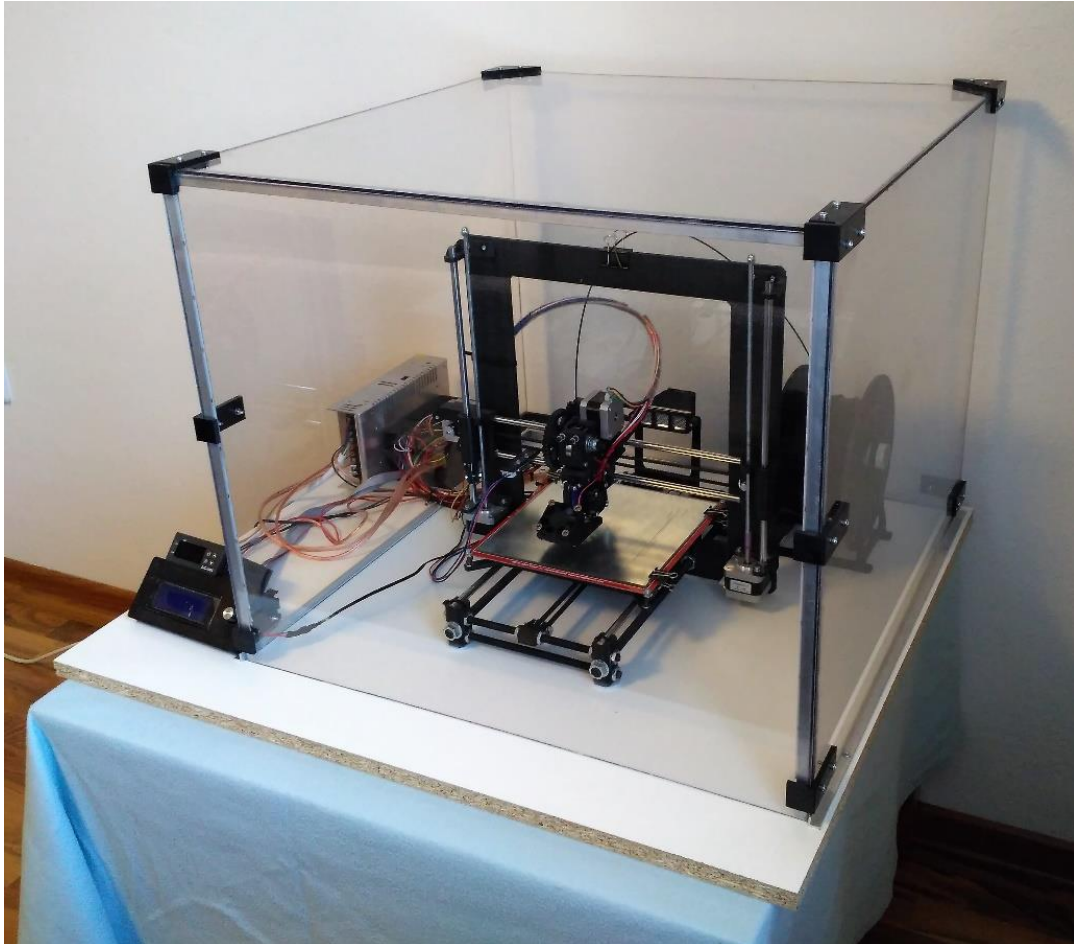
Dále proběhl tisk potřebných dílů pro sestavu topení a následná kompletace. Tato sestava je na obrázku 4-9.



Obr. 4-9 Sestava topení

4.2.1 Úprava tiskárny

Přehřívání elektroniky uvnitř vyhřívané komory by mohlo zapříčinit snížení její životnosti, proto byla elektronika spolu s ovládacím panelem umístěna mimo komoru. Z tohoto důvodu byly prodlouženy všechny kabely a elektronika byla umístěna do vytisknuté krabičky. Přesunutí ovládacího panelu mimo box také umožnilo ovládání tiskárny během tisku. Dále bylo do blízkosti trysky umístěno čidlo termostatu pro ovládání vyhřívání tiskárny. Tiskárna umístěná v boxu je zobrazena na obrázku 4-10.



Obr. 4-10 Vyhřívaná komora s tiskárnou.

5 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

Pro testování vlivu okolní teploty byl zvolen materiál ABS a PETG. Jsou to společně s PLA nejpoužívanější materiály. Materiál PLA má nízkou teplotu skelného přechodu a velmi nízký koeficient lineární roztažnosti. Proto byl z testů vyřazen.

Testování vlivu okolní teploty vzduchu na tisk bude probíhat ve dvou fázích. První fáze se bude zaměřovat na chyby vznikající při tisku za různých podmínek a druhá fáze na kvalitu spojení vrstev.

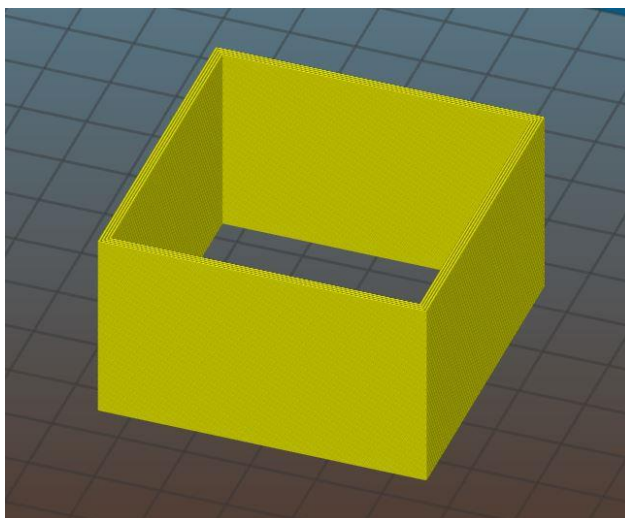
Testovací tisk proběhne bez vyhřívání komory za pokojové teploty a poté s vyhříváním komorou při okolní teplotě 50 °C a 60 °C. Vzhledem k tomu, že jsou ve vyhřívání komory přítomny i krokové motory, není možné vyhřívání komory na více stupňů.

5.1 Vliv teploty okolí na chyby v tisku

V tomto experimentu proběhne ověření teorie vzniku tiskových chyb, popsanych v teoretické části této práce. Experimenty proběhnou na vybraných modelech, které podpoří vznik těchto chyb. Parametry tisku budou modifikovány pouze pro vybraný testovací díl. To znamená, že se na začátku experimentu zvolí vhodné parametry pro daný testovací díl a ty se již pro různé teploty okolí nebudou měnit. Cílem tohoto experimentu bude najít takovou teplotu okolí, při které dojde k eliminaci chyb.

5.1.1 Prohnutí dílu neboli warp

Jako testovací díl pro tento experiment byl zvolen plášť kvádru o půdorysném rozměru 50 x 50 mm a výšce 30 mm, který je zobrazen na obrázku 5-1.



Obr. 5-1 Díl pro testování prohnutí.

Takto navrhnutý díl by měl přispět ke vzniku prohnutí, absence dna a tenké stěny by měly snížit přilnavost k podložce. Stěny jsou tvořeny pouze z perimetrů, což by mělo zvýšit efekt smrštění. Pro vypovídající výsledek tohoto testu je důležité, aby podkladová vrstva vždy vychladla na teplotu okolí, čemuž je nutné přizpůsobit rychlost tisku.

Parametry tisku byly nastaveny podle tabulky 5-1.

Tab. 5-1 Parametry tisku pro test prohnutí dílu

| Parametry ovlivňující průtok tryskou | |
|--------------------------------------|-----------|
| Výška vrstvy [mm] | 0,2 |
| Šířka extruze [mm] | 0,45 |
| Rychlost tisku [mm/s] | 30 |
| Teplota | |
| Podložka [°C] ABS / PETG | 100 / 70 |
| Tryska [°C] | 235 / 240 |
| Stavební prvky | |
| Perimetry [-] | 4 |

Výsledky prohnutí

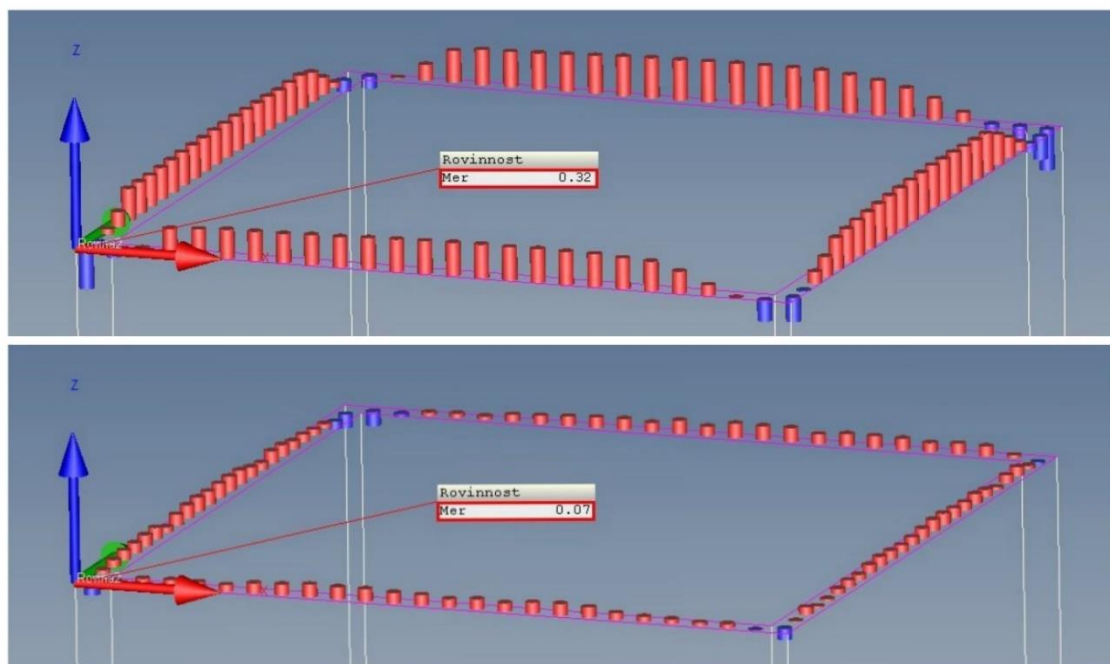
Míra prohnutí byla vyhodnocena na souřadnicovém měřicím stroji CMM ZEISS contoura G2 jako rovinnost spodní plochy výtisku. Rovina byla snímána skenováním v celém rozsahu.

Výsledky měření rovinnosti dílu z ABS jsou v tabulce 5-2.

Tab. 5-2 Výsledky vyhodnocení rovinnosti dílu z ABS.

| Teplota okolí při tisku [°C] | Rovinnost spodní plochy výtisku [mm] |
|------------------------------|--------------------------------------|
| 21 °C (tisk bez komory) | 0,32 |
| 50 °C | 0,15 |
| 60 °C | 0,07 |

Grafické vyhodnocení rovinnosti dílů s nejhorším a nejlepším výsledkem je zobrazena na obrázku 5-2.



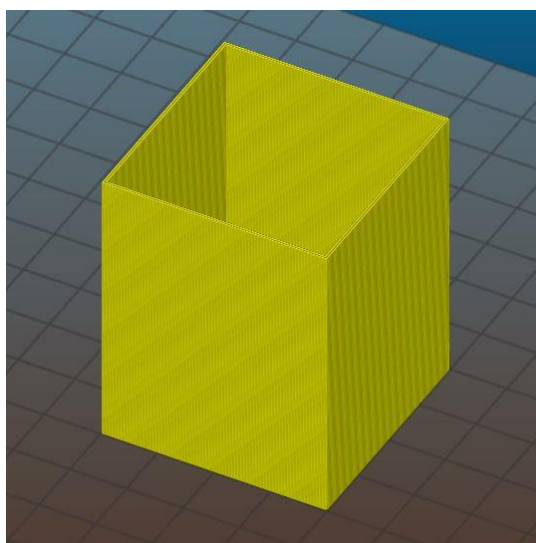
Obr. 5-2 Vyhodnocení rovinností: nahoře díl tisknutý bez komory, dole díl tisknutý při teplotě okolí 60 °C.

Z výsledků testu při tisku dílu z materiálu ABS plyne, že stabilizací teploty okolí lze významně omezit prohnutí a odlepení dílu od podložky. Nejlepší výsledek vykazuje díl tisknutý při teplotě okolí 60 °C.

Materiál PETG tuto chybu nevykazoval, spodní plocha dílu zůstala vždy přilepená k podložce bez deformací. Toto je způsobeno nižší koeficient lineární roztažnosti tohoto materiálu.

5.1.2 Delaminace

K delaminaci vrstev dochází v horní části vysokých dílů vlivem nižší teploty okolí. Proto byl jako testovací díl zvolen kvádr se spodní čtvercovou podstavou o hraně 40 mm a výšce 50 mm. Kvádr je dutý bez horní podstavy, viz obrázek 5-3.



Obr. 5-3 Díl pro testování vzniku delaminace.

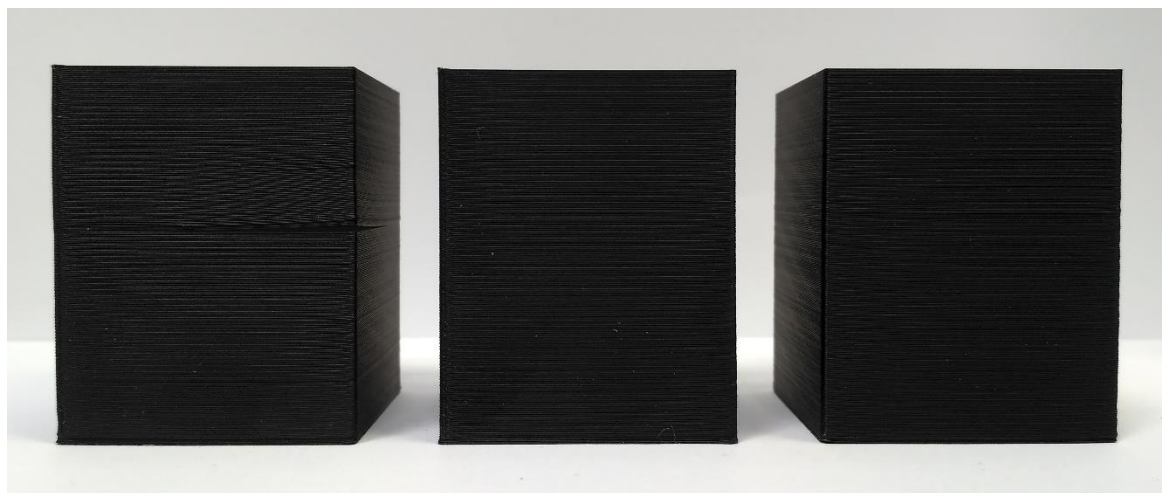
Parametry tisku byly nastaveny podle tabulky 5-3.

Tab. 5-3 Parametry tisku pro test delaminace.

| Parametry ovlivňující průtok tryskou | |
|--------------------------------------|-----------|
| Výška vrstvy [mm] | 0,2 |
| Šířka extruze [mm] | 0,45 |
| Rychlost tisku [mm/s] | 20 |
| Teplota | |
| Podložka [°C] ABS / PETG | 100 / 70 |
| Tryska [°C] | 235 / 240 |
| Stavební prvky | |
| Perimetry [-] | 2 |
| Počet spodních / horních vrstev | 3 / 0 |

Výsledky testu delaminace

Vytisknuté vzorky byly kontrolovány na přítomnost oddělených vrstev neboli delaminaci. Vytisknuté díly z ABS jsou zobrazeny na obrázku 5-4.



Obr. 5-4 Výsledky testu delaminace, zleva: díl s prasklinou tisknutý bez komory, díl tisknutý při 50 °C, díl tisknutý při 60 °C.

Na dílu z ABS, tisknutém bez vyhřívání komory, se ve výšce 30 mm vytvořila velká prasklina, viz obrázek 5-5.



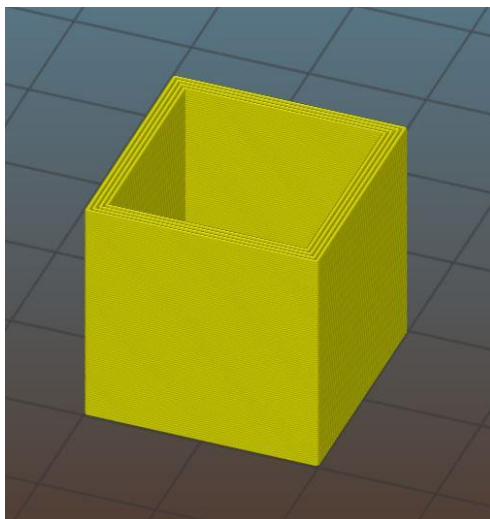
Obr. 5-5 Delaminace vrstev.

Další dva vzorky nevykazovaly tuto chybu. Chyba se neprojevila ani při přiměřeném namáhání na tah.

Při tisku dílů z materiálu PETG nedošlo k delaminaci vrstev ani v jednom případě. Opět je to způsobeno nižší teplotou skelného přechodu.

5.1.3 Deformace spodních vrstev

Tato chyba vzniká nejčastěji při tisku malých objektů, protože tisk jedné vrstvy netrvá dostatečně dlouho, aby díl vychladnul pod teplotu skelného přechodu. Testovací díl byl plášť krychle o hraně 20 mm, viz obrázek 5-6.



Obr. 5-6 Díl pro testování deformace spodních vrstev

Parametry tisku byly nastaveny podle tabulky 5-4.

Tab. 5-4 Parametry tisku pro test deformace spodních vrstev.

| Parametry ovlivňující průtok tryskou | |
|--------------------------------------|-----------|
| Výška vrstvy [mm] | 0,2 |
| Šířka extruze [mm] | 0,45 |
| Rychlost tisku [mm/s] | 30 |
| Teplota | |
| Podložka [°C] ABS / PETG | 100 / 70 |
| Tryska [°C] | 235 / 240 |
| Stavební prvky | |
| Perimetry [-] | 4 |

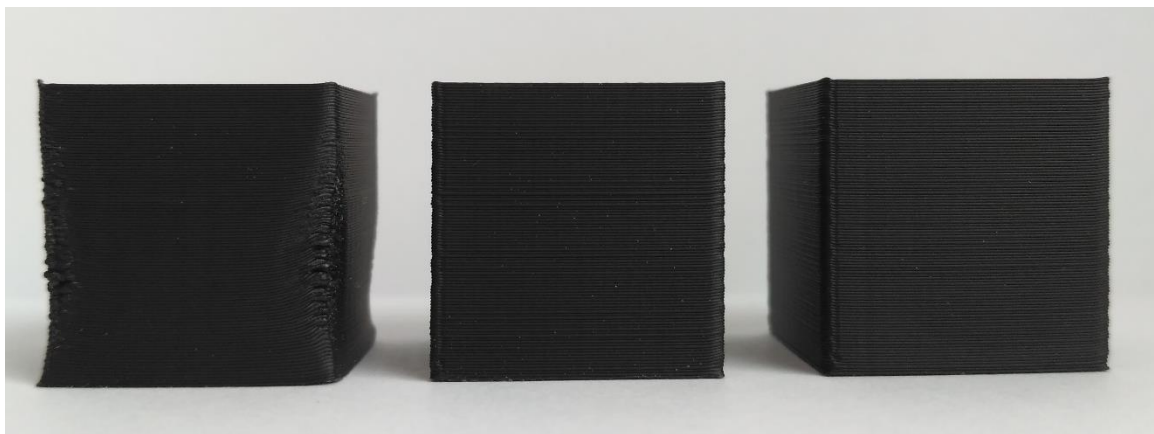
Výsledky testu deformace spodních vrstev

Vyhřívaná komora umožňuje použít ventilátor pro chlazení tisku i pro materiál ABS, který urychlí ochlazení podkladové vrstvy na teplotu okolí. Při použití ventilátoru pro tisk materiálu ABS bez vyhřívané komory dochází k ochlazení podkladové vrstvy na velmi nízkou teplotu a tím k vzniku studených spojů a delaminace i u malých dílů. Toto tvrzení bylo ověřeno a výsledek je zobrazen na obrázku 5-7.



Obr. 5-7 Delaminace vrstev při použití ventilátoru bez vyhřívané komory.

Vznik deformace spodních vrstev u dílů z materiálu ABS byl kontrolován opticky, výsledky jsou zobrazeny na obrázku 5-8.



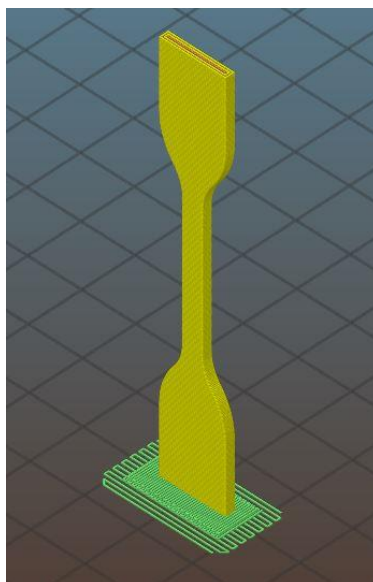
Obr. 5-8 Výsledky testování deformace spodních vrstev, zleva: deformovaný díl tisknutý bez komory, díl tisknutý při teplotě 50 °C, díl tisknutý při 60 °C.

Díl tisknutý bez vyhřívání komory je značně deformován. Mezi díly tisknutými v komoře za různých teplot není téměř žádný viditelný rozdíl. Rozdíl bude zřejmě v pevnosti spojení jednotlivých vrstev. Tím se bude zabývat následující kapitola.

Díly vytisknuté z materiálu PETG opět nevykazovaly žádnou chybu. K deformaci spodních vrstev opět nedošlo, protože tento materiál má nižší koeficient roztažnosti.

5.2 Vliv teploty vzduchu na pevnost výtisku v tahu

Vliv teploty vzduchu při tisku na pevnost vytisknutého dílu je teoreticky popsán v kapitole 2.6.1 Spojování vláken a vrstev. Ověření tohoto vlivu bylo provedeno pomocí vytisknutých zkušebních těles, na kterých byla provedena tahová zkouška za účelem zjištění maximální hodnoty napětí v tahu. Tělesa byla tisknuta na výšku v ose Z se 100% výplní (Obr. 5-9) tak, aby při tahové zkoušce docházelo k přenosu tahové síly pouze krčky vláken. Tělesa byla tisknuta opět bez použití vyhřívání komory, s vyhříváním komorou o teplotě vzduchu 50 °C a 60 °C.



Obr. 5-9 Zkušební těleso.

Parametry tisku byly nastaveny podle tabulky 5-5.

Tab. 5-5 Parametry tisku pro test pevnosti výtisku v tahu.

| Parametry ovlivňující průtok tryskou | |
|--------------------------------------|-----------|
| Výška vrstvy [mm] | 0,2 |
| Šířka extruze [mm] | 0,45 |
| Rychlost tisku [mm/s] | 20 |
| Teplota | |
| Podložka [°C] ABS / PETG | 100 / 70 |
| Tryska [°C] | 235 / 240 |
| Stavební prvky | |
| Perimetry [-] | 2 |

5.2.1 Výsledky tahové zkoušky

Hodnoty naměřených maximálních napětí v tahu pro materiál ABS v tabulce 5-6.

Tab. 5-6 Hodnoty naměřených maximálních napětí v tahu pro materiál ABS.

| Teplota okolí při tisku [°C] | Maximální napětí v tahu [MPa] |
|------------------------------|-------------------------------|
| 21 °C (tisk bez komory) | 15,12 |
| 50 °C | 20,41 |
| 60 °C | 22,38 |

Hodnoty naměřených maximálních napětí v tahu pro materiál PETG jsou uvedeny v tabulce 5-7.

Tab. 5-7 Hodnoty naměřených maximálních napětí v tahu pro materiál PETG.

| Teplota okolí při tisku [°C] | Maximální napětí v tahu [MPa] |
|------------------------------|-------------------------------|
| 21 °C (tisk bez komory) | 24,26 |
| 50 °C | 28,59 |
| 60 °C | 30,92 |

Z výsledků je patrný vliv teploty okolí na maximální napětí v tahu jak pro materiál ABS, tak i pro materiál PETG. U těles tisknutých bez vyhřívání komory došlo k porušení v horní zúžené části. To značí, že vlivem nižší teploty okolí ve vyšších vrstvách došlo k horšímu spojení vláken. Mezi tělesy tisknutými v komoře již není tak razantní rozdíl. Lze u nich předpokládat, že je kvalita spojení vrstev v celé výšce stejná. Se zvyšující teplotou okolí se kvalita spojení vrstev zvyšuje.

Materiál PETG při zvyšování teploty okolí vykazuje kvalitnější spojení vláken, podobně jako materiál ABS. Rozdíl je pouze ve velikosti naměřeného napětí, protože pro materiál PETG je udávána vyšší pevnost v tahu.

6 DISKUSE

6.1 Shrnutí dosažených výsledků

V rámci diplomové práce byl teoreticky popsán vliv teploty vzduchu na 3D FDM tisk. Byly popsány chyby, které při tisku materiálu s vyšším koeficientem lineární roztažnosti a s vyšší teplotou skelného přechodu mohou nastat. Za účelem zkoumání vlivu teploty okolí při tisku byla navržena a vyrobena vyhřívaná komora pro FDM 3D tiskárnu typu RepRap Prusa i3.

Pro testování byl zvolen materiál ABS a PETG. Testování probíhalo bez použití komory za pokojové teploty, s použitím komory za teploty 50 °C a 60 °C. Pro jednotlivé testy byla navržena testovací tělesa, která přispěla ke vzniku testovaných chyb.

Při tisku testovacího tělesa z materiálu ABS se projevil vliv teploty okolí na prohnutí dílu, tím byla ověřena teorie vzniku tohoto prohnutí, která byla popsána v teoretické části. Stabilizace teploty v ose Z pomocí vyhřívané komory omezila vznik prohnutí dílu a tím bylo zabráněno odlepení dílu od podložky. Z testů vyplývá, že nejmenšího prohnutí dílu bylo dosaženo při teplotě 60 °C. Pokud by bylo možné tisknout při vyšší teplotě než 60 °C, pravděpodobně by byla míra deformace ještě menší. Při tisku z materiálu PETG se prohnutí a odlepení od podložky neprojevilo díky menšímu koeficientu lineární roztažnosti.

Tisk dílu z materiálu ABS pro testování delaminace bez použití vyhřívané komory, byl podle očekávání doprovázen vznikem studených spojů a delaminace. Opět tento test potvrdil teorii. Při použití vyhřívané komory byl tento problém odstraněn již při vyhřívání na teplotu okolí 50°C. Při tisku za teploty okolí 60 °C nedošlo k žádným viditelným změnám. Materiál PETG tuto chybu nevykazoval, protože jeho teplota skelného přechodu je nižší než u materiálu ABS. Kdyby bylo testovací těleso vyšší, pravděpodobně by se bez použití vyhřívané komory tato chyba projevila i u materiálu PETG a při použití vyhřívané komory by byla odstraněna stejně jako u materiálu ABS.

Při tisku malého objektu z materiálu ABS bylo ověřeno, že dochází k nedostatečnému ochlazení podkladových vrstev, které jsou v těsné blízkosti podložky, a tím k vzniku jejich deformací. Při použití ventilátoru bez vyhřívané komory pro podpoření chlazení těchto vrstev na teplotu okolí zase došlo k přechlazení podkladové vrstvy a následkem byl vznik studených spojů a delaminace. Pokud se však použil ventilátor v kombinaci s vyhřívanou komorou, vyhřátou na 50 °C, bylo výsledkem dostatečné zchlazení a zároveň dostatečné propojení spodních vrstev. Tisk při teplotě okolí 60 °C pak jen zlepšil kvalitu spojení vrstev. Materiál PETG opět bez použití vyhřívané komory tuto vadu nevykazoval. To souvisí s jeho nižším koeficientem lineární roztažnosti.

Naměřené hodnoty maximálního napětí v tahu na zkušebních tělesech z materiálu ABS a PETG potvrdily, že teplota okolí má značný vliv na kvalitu propojení vrstev. Při tisku bez vyhřívané komory za pokojové teploty je v určité vzdálenosti od podložky v ose Z teplota okolí nedostatečná pro kvalitní propojení vrstev. Při použití vyhřívané komory a se zvyšováním teploty v komoře kvalita propojení vrstev stoupá a s tím stoupají i naměřené hodnoty maximálního napětí v tahu. Pokud by bylo možné komoru vyhřát na vyšší teplotu, naměřené hodnoty by byly ještě vyšší.

Výsledky testování vlivu teploty okolí na vznik chyb v tisku potvrdily teorii vzniku těchto chyb, která je popsána v kapitole 2.6.2 Smrštění a deformace. Dále potvrdily vliv teploty okolí na kvalitu spojení vrstev, který je popsán v kapitole 2.6.1 Spojování vláken a vrstev. A bylo prokázáno, že teplota okolí 60 °C je dostatečná pro odstranění

tiskových chyb u materiálu ABS a také tato teplota podporuje kvalitnější propojení vrstev u obou testovaných materiálů.

6.2 Ekonomický a časový rozbor stavby vyhřívané komory

Vyhřívaná komora byla postavena z lehce dostupných materiálů s nárokem na nízkou cenu. Náklady na materiál byly v přípravné fázi odhadnuty na 3 000 Kč. Díky nákupu termostatu z Číny se podařilo celkovou cenu snížit na hodnotu 2790 Kč. Nejdražší položkou byly polykarbonátové desky, které by bylo možno z části nahradit levnějším neprůhledným materiálem a tím celkovou cenu snížit. Seznam všech nakoupených součástí včetně ceny je v tabulce 6-1. Cena tisknutých dílu je pouze za materiál ABS.

Tab. 6-1 Nakoupené díly a jejich ceny.

| Nakupované díly | Cena |
|--|---------|
| Polykarbonátové desky 4ks 600x500 mm, 1ks 600x600 mm | 1230 Kč |
| Laminovaná dřevotřísková deska 800x700 mm, tl.18 mm, | 311 Kč |
| Hliníkový profil L 10x10 mm délka 3400mm | 95 Kč |
| Spojovací materiál (šrouby, matice, podložky) | 34 Kč |
| Termostat STC 1000 | 390 Kč |
| Topný článek 12V | 309 Kč |
| Ventilátor 40x40 mm 12V | 115 Kč |
| Osvětlení 12V | 223 Kč |
| Tisknuté díly materiál ABS | 83 Kč |
| Celková cena | 2790 Kč |

Celkový počet hodin odvedené práce při stavbě vyhřívané komory byl 21 hodin, včetně návrhu a tisku plastových dílů.

6.3 Návrh alternativního řešení

Vyrobená sestava může dosáhnout teploty vzduchu v komoře pouze 60 °C, jinak by mohlo dojít ke zničení krokových motorů. Materiály ULTEM (PEI), PC a další, které mají vyšší teplotu tavení a teplotu skelného přechodu než materiál ABS, lze tisknout pouze za teploty okolí vyšších než 60 °C. Toto dovolují pouze profesionální 3D tiskárny.

Vyšších teplot by bylo možné dosáhnout, pokud by navržená vyhřívaná komora byla pouze nad vyhřívanou podložkou a motory by byly umístěny mimo vyhřívanou komoru. A také by musel být předělán použitý extruder na bovdenový. Toto řešení by znatelně zmenšilo již tak malý tiskový prostor.

Dalším řešením je úplná změna konstrukce tiskárny, která by umožnila přesunutí motorů mimo vyhřívanou komoru. Toto řešení by bylo velmi nákladné, ale blížilo by se profesionálním 3D tiskárnám.

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo teoreticky popsat vliv teploty vzduchu na 3D tisk metodou FDM, navrhnout a postavit vhodnou vyhřívanou komoru pro 3D tiskárnu a zvolit vhodné materiály a příslušné testy pro ověření teoreticky popsaného vlivu teploty vzduchu na kvalitu tisku.

Výstupem práce je vyhřívaná komora pro 3D tiskárnu typu RepRap s maximální dosažitelnou teplotou 60 °C a doporučené teploty vzduchu pro tisk materiálu ABS a PETG.

Nejprve byl testován materiál ABS. Při testování vlivu teploty okolí na vznik chyb popsaných v teoretické části, bylo bez použití vyhřívané komory na zvolených modelech, dosaženo všech popsaných chyb. Chyby byly následně použitím vyhřívané komory vyhřívané na 50 °C minimalizovány. Vytisknuté testovací vzorky při teplotě 60 °C již vykazovaly pouze mírné zlepšení z hlediska prohnutí a vzhledu. Dále bylo dokázáno pomocí tahové zkoušky, že vzorky tisknuté při teplotě vzduchu 50 °C dosahují téměř o 26 % vyššího maximálního napětí v tahu, a tedy i lepší kvality spojení vrstev než vzorky tisknuté bez vyhřívané komory za pokojové teploty. Rozdíl maximálního napětí v tahu mezi vzorky tisknutými při teplotě 50 °C a 60 °C je téměř 9 %.

Testováním materiálu PETG bylo zjištěno, že při tisku bez vyhřívané komory tento materiál nevykazuje žádné chyby způsobeny vlivem teploty okolí. Tahová zkouška prokázala vliv teploty na kvalitu spojení vláken stejně jako u materiálu ABS. Vzorky tisknuté při teplotě vzduchu 50 °C dosahují o 25 % vyššího maximálního napětí v tahu, než vzorky tisknuté bez vyhřívané komory a rozdíl maximálního napětí v tahu mezi vzorky tisknutými při teplotě 50 °C a 60 °C je téměř 8 %.

Doporučená teplota vzduchu pro tisk z materiálu ABS i PETG je 60 °C, jak z hlediska odstranění chyb v tisku, tak z hlediska kvality spojení vláken.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] PÍŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, 247 s. ISBN 978-80-214-4025-8.
- [2] ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. *Nekonvenční metody obrábění 9. díl: Rapid Prototyping. MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008, (11) [cit. 2017-03-02]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonnvencnimetody-obrabeni-9-dil.html>
- [3] HODEK, Josef. *Aditivní technologie: Zpráva o stavu 3D tisku pro Českou technologickou platformu STROJÍTENSTVÍ, o.s.* [online]. 2013 [cit. 2017-02-03]. Dostupné z: <http://www.ctps.cz/cs/uvodni-stranka/soubor-aditivnitechologie/85/>
- [4] Stereolithography. *Custompart.net* [online]. 2009 [cit. 2017-02-04]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/stereolithography>
- [5] Selective Laser Sintering. *Custompart.net* [online]. 2009 [cit. 2017-02-04]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/selective-laser-sintering>
- [6] Stratatys: *FDM Technology, About Fused Deposition Modeling*. Stratatys [online]. 2015 [cit. 2017-02-02]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/3dprinters/technologies/fdm-technology>
- [7] 3D Printing: Fused Deposition Modeling: Most Common 3D Printing Method. 3D Printing [online]. 2015 [cit. 2017-02-02]. Dostupné z: <http://www.livescience.com/39810-fused-deposition-modeling.html>
- [8] SPŠ NA PROSEKU, Praha, ČR. *FDM – Fused Deposition Modeling* [online]. [vid. 2017-05-14]. Dostupné z <http://www.sps-prosek.cz/soubory/S/CAX/FDM.pdf>.
- [9] Typy 3D tiskáren. *Makerslab* [online]. 2016 [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: <http://www.makerslab.cz/typy-3d-tiskaren/>
- [10] Tripodmaker black edition. *Tripodmaker* [online]. 2016 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://www.tripodmaker.com/tripodmaker-black-edition/>
- [11] Polar printer. *Polar 3D* [online]. 2017 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://about.polar3d.com/printer/>
- [12] R-360: a simple and modular 3D printer. *3ders* [online]. 2013 [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: <http://www.3ders.org/articles/20131108-r-360-a-simple-and-modular-3d-printer.html>
- [13] 3D TISKÁRNA ORIGINAL PRUSA I3 MK2S. *Prusa3d* [online]. 2017 [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: <http://www.prusa3d.cz/>
- [14] RepRap History. *RepRap.org* [online]. 2011 [cit. 2017-02-05]. Dostupné z: http://reprap.org/wiki/RepRap_history

-
- [15] About. *RepRap.org* [online]. 2014 [cit. 2017-02-05]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/About>
- [16] RepRapOneDarwin. *RepRap.org*. [online]. 2007 [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/RepRapOneDarwin>
- [17] Darwin. *RepRap Wiki* [online]. 2014 [cit. 2017-03-08]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/Darwin>
- [18] .Mendel. *RepRap Wiki*. [online]. 2015 [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/Mendel>
- [19] Prusa i3. *RepRap.org* [online]. 2016 [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: http://reprap.org/wiki/Prusa_i3
- [20] *Material Property Data* [online]. b.r. [cit. 2017-03-26]. Dostupné také z: <http://www.matweb.com/index.aspx>
- [21] Plasty Mladeč. *Dokumenty- technické listy* [online]. b.r. [cit. 2017-03-26]. Dostupné také z: <http://www.plastymladec.cz/?id=4>
- [22] Stratasys. Compare *FDM materials* [online]. b.r. [cit. 2017-03-26]. Dostupné také z: <http://www.stratasys.com/materials/fdm/compare-fdm-materials>
- [23] 3D-TISK. *ABS* [online]. 2014 [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <http://www.3d-tisk.cz/abs/>
- [24] REPRAP. *ABS* [online]. 2015 [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/ABS>
- [25] 3D-TISK. *Studie potvrdila rozdíly u zdravotních rizik při 3D tisku z různých materiálů* [online]. 2016 [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <http://www.3d-tisk.cz/studie-potvrdila-rozdily-u-zdravotnich-rizik-pri-3d-tisku-z-ruznych-materialu/>
- [26] 3D-TISK. *PLA* [online]. 2014 [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <http://www.3d-tisk.cz/pla/>
- [27] REPRAP. *PLA* [online]. 2015 [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/PLA>
- [28] PETG Filament - Here's what you need to know. *Forbidden* [online]. Copyright © 2017 rigid.ink. [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <https://rigid.ink/blogs/news/175700615-petg-filament-heres-what-you-need-to-know>
- [29] PET & PETG Drive a 'Hard' Bargain. In: *Plasticsmachining* [online]. [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: <http://www.plasticsmachining.com/magazine/199802/petg.html>

-
- [29] CAIN, Perry. The impact of layer height on a 3D Print. *3D Hubs* [online]. [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/impact-layer-height-3d-print>
- [30] SUN, Q., G. M. RIZVI, C. T. BELLEHUMEUR a P. GU Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments. *Rapid Prototyping Journal*. [Bellehumeur, C. T, 2008, 14(2): 72-80. DOI: 10.1108/13552540810862028. ISSN 13552546. Dostupné také z: Go to ISI://WOS:000254759100002
- [31] WANG, Tian-Ming, Jun-Tong XI a Ye JIN. A model research for prototype warp deformation in the FDM process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2007, 33(11-12): 1087-1096 [cit. 2017-04-18]. DOI: 10.1007/s00170-006-0556-9. ISSN 02683768. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-006-0556-9>
- [32] ŽLEBEK, M. *Konstrukce 3D tiskárny pro materiály s vyšší pevností*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 85 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Daniel Koutný, Ph.D
- [33] RODRIGUEZ, Jose F., James P. THOMAS a John E. RENAUD Characterization of the mesostructure of fused-deposition acrylonitrile-butadiene-styrene materials. *Rapid Prototyping Journal* [online]. 2000, 6(3):175-186 [cit. 2017-04-18]. DOI: 10.1108/13552540010337056. ISSN 13552546. Dostupné také z: <http://www.emeraldinsight.com/10.1108/13552540010337056>
- [34] Ultimaker Original+. *Ultimaker* [online]. 2017 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <https://ultimaker.com/en/products/ultimaker-original>
- [35] LÍZAL, Lukáš. RepRap Stavebnice. *Reprapfan* [online]. [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <http://reprapfan.cz/stavebnice/>
- [36] Topný modul. *Conrad* [online]. 2017 [cit. 2017-05-04]. Dostupné z: <http://www.conrad.cz/topny-modul-12-v-dc-150-w-d-x-s-x-v-90-x-27-x-17-mm.k532894>
- [37] Digitální termostat STC-1000. *HWPRO* [online]. 2017 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: http://www.hwpro.cz/oc/index.php?route=product/product&product_id=391

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

| | |
|--------|-----------------------------------|
| 3D | Třídimenzionální |
| ABS | Akrylonitrilbutadienstyren |
| ASA | Akrilonitril-styren-akryl |
| CAD | Computer aided design |
| CMM | Coordinate Measuring Machines |
| DMLS | Direct Metal Laser Sintering |
| FDM | Fused Deposition Modeling |
| HIPS | Houževnatý polystyren |
| LOM | Laminated Object Manufacturing |
| MJM | Multi Jet Modeling |
| NYLON | Obchodní název pro Polyamid |
| PA | Polyamid |
| PC | Polykarbonát |
| PEI | Polyetherimid |
| PET | Polyethyltereftalát |
| PETG | Polyethyltereftalátglykol |
| PLA | Polylactid acid |
| PVA | Polyvinyl alkohol |
| RepRap | Replicating Rapid prototyper |
| SGC | Solid Group Cutting |
| SLA | Stereolitografie |
| SLS | Selective Laser Sintering |
| STL | Stereo Lithography, datový formát |
| ULTEM | Obchodní název pro polyetherimid |
| UV | Ultrafialové záření |

SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN

| Veličina | Jednotka | Popis |
|-----------------|--------------------|---------------------------------|
| ΔT | [K] | Změna teploty při chladnutí |
| $2y$ | [mm] | Délka krčku |
| E | [Pa] | Modul pružnosti v tahu |
| H | [mm] | Výška vytlačeného vlákna |
| T_e | [°C] | Teplota okolí |
| T_g | [°C] | Skelní přechod |
| T_m | [°C] | Teplota tavení |
| T_p | [°C] | Teplota podložky |
| W | [mm] | Šířka vytlačeného vlákna |
| α_L | [K ⁻¹] | Koeficient lineární roztažnosti |
| ε_L | [mm] | Délková deformace |
| σ | [Pa] | Napětí |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|--|----|
| Obr. 1-1 Fáze výroby součásti pomocí rapid prototyping. | 11 |
| Obr. 1-2 Princip stereolitografie. | 12 |
| Obr. 1-3 Princip metody SLS. | 13 |
| Obr. 2-1 Princip 3D tisku metodou FDM. | 15 |
| Obr. 2-2 Převod 3D modelu na G-kód..... | 16 |
| Obr. 2-3 3D tiskárna s kartézským souřadným systémem Ultimaker. | 17 |
| Obr. 2-4 Delta tiskárna Tripodmaker. | 18 |
| Obr. 2-5 Tiskárna typu polar Polar 3D..... | 18 |
| Obr. 2-6 Nejrozšířenější modely RepRap 3D tiskáren. | 19 |
| Obr. 2-7 Tiskárna Darwin. | 20 |
| Obr. 2-8 Tiskárna Mendel. | 20 |
| Obr. 2-9 Tiskárna Prusa i3..... | 21 |
| Obr. 2-10 Stavební prvky. | 24 |
| Obr. 2-11 Závislost kvality povrchu na výšce vrstvy..... | 25 |
| Obr. 2-12 Výška vrstvy a šířka extruze. | 25 |
| Obr. 2-13 Případy spojení vláken..... | 26 |
| Obr. 2-14 Mikrofotografie spojených vláken..... | 27 |
| Obr. 2-15 Simulace průběhu teploty při různých rychlostech tisku..... | 28 |
| Obr. 2-16 Nanesená nová vrstva, za předpokladu ideálního přilnutí..... | 28 |
| Obr. 2-17 Volné ochlazení vrstev bez vzniku napětí. | 29 |
| Obr. 2-18 Natažení vrstvy do původní délky. | 29 |
| Obr. 2-19 Výsledná deformace objektu..... | 29 |
| Obr. 2-20 Závislost teploty vzduchu a vrstev tisku na vzdálenosti od vyhřívané podložky..... | 30 |
| Obr. 2-21 Zdeformovaný díl vlivem vnitřního napětí. | 30 |
| Obr. 2-22 Delaminace. | 31 |
| Obr. 2-23 Deformace spodních vrstev. | 31 |
| Obr. 4-1 RepRap tiskárna Průša i3 | 33 |
| Obr. 4-2 a) konstrukce bez rámu, b) konstrukce s rámem. | 33 |
| Obr. 4-3 Spojovací díly..... | 34 |
| Obr. 4-4 Model vyhřívané komory..... | 35 |
| Obr. 4-5 Topný modul. | 35 |
| Obr. 4-6 Návrh sestavy topení. | 36 |
| Obr. 4-7 Digitální termostat STC-1000..... | 36 |

| | |
|--|----|
| Obr. 4-8 Zkompletovaná komora. | 37 |
| Obr. 4-9 Sestava topení | 37 |
| Obr. 4-10 Vyhřívaná komora s tiskárnou..... | 38 |
| Obr. 5-1 Díl pro testování prohnutí..... | 39 |
| Obr. 5-2 Vyhodnocení rovinností | 41 |
| Obr. 5-3 Díl pro testování vzniku delaminace. | 41 |
| Obr. 5-4 Výsledky testu delaminace. | 42 |
| Obr. 5-5 Delaminace vrstev. | 43 |
| Obr. 5-6 Díl pro testování deformace spodních vrstev | 43 |
| Obr. 5-7 Delaminace vrstev při použití ventilátoru bez vyhřívané komory..... | 44 |
| Obr. 5-8 Výsledky testování deformace spodních vrstev. | 45 |
| Obr. 5-9 Zkušební těleso..... | 45 |

SEZNAM TABULEK

| | |
|--|----|
| Tab. 1-1 Dostupné technologie rapid prototyping. | 12 |
| Tab. 2-1 Přehled základních vlastností materiálů. | 22 |
| Tab. 5-1 Parametry tisku pro test prohnutí dílu | 40 |
| Tab. 5-2 Výsledky vyhodnocení rovinnosti dílu z ABS. | 40 |
| Tab. 5-3 Parametry tisku pro test delaminace..... | 42 |
| Tab. 5-4 Parametry tisku pro test deformace spodních vrstev. | 44 |
| Tab. 5-5 Parametry tisku pro test pevnosti výtisku v tahu. | 46 |
| Tab. 5-6 Hodnoty naměřených maximálních napětí v tahu pro materiál ABS. | 46 |
| Tab. 5-7 Hodnoty naměřených maximálních napětí v tahu pro materiál PETG. .. | 46 |
| Tab. 6-1 Nakoupené díly a jejich ceny. | 48 |