



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

KONSTRUKCE 3D TISKÁRNY PRO MATERIÁLY S VYŠŠÍ PEVNOSTÍ

DESIGN OF 3D PRINTER FOR HIGH STRENGTH MATERIALS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. MICHAL ŽLEBEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. DANIEL KOUTNÝ, Ph.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Michal Žlebek

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Konstrukční inženýrství (2301T037)**

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:

Konstrukce 3D tiskárny pro materiály s vyšší pevností

v anglickém jazyce:

Design of 3D printer for high strength materials

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je konstrukce 3D tiskárny pro materiály s vyšší pevností s těmito parametry: technologie FDM; materiál ABS,PC; 2 vyhřívané trysky pro stavbu ze 2 materiálů; vyhřívaná základní deska; tloušťka nanášené vrstvy 0,15-0,5 mm; pracovní prostor o průměru min. 150 mm a výšce 150 mm.

Cíle diplomové práce:

Diplomová práce musí obsahovat: (odpovídá názvům jednotlivých kapitol v práci)

1. Úvod
2. Přehled současného stavu poznání
3. Analýza problému a cíl práce
4. Návrh konstrukčních řešení
5. Výsledné konstrukční řešení
6. Diskuze
7. Závěr
8. Seznam použitých zdrojů

Forma práce: průvodní zpráva, výkres sestavení, fotografická dokumentace, 3D digitální data (model), funkční výrobek

Typ práce: konstrukční; Účel práce: výzkum a vývoj

Výstup práce: prototyp, funkční vzorek; Projekt: specifický výzkum

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 - 50 stran textu bez obrázků)

Zásady pro vypracování práce:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2015.pdf

Šablona práce: http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/UK_sablona_praci.zip

Seznam odborné literatury:

- 1) SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS. Konstruování strojních součástí. 1. vyd. Editor Martin Hartl, Miloš Vlk. Brno: VUTIUM, 2010, 1159 s. ISBN 978-80-214-2629-0.
- 2) CROCCOLO, Dario, Massimiliano DE AGOSTINIS a Giorgio OLMI. Experimental characterization and analytical modelling of the mechanical behaviour of fused deposition processed parts made of ABS-M30 . Computational Materials Science, 2013, vol. 79, s. 506-518.
- 3) ČSN EN ISO 527-1, Plasty: stanovení tahových vlastností, Praha: Úřad protechnickou normalizací, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Daniel Koutný, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne

L.S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
Ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Práce se zabývá problematikou 3D tisku metodou FDM a možnostmi testování optimálních podmínek tisku pro různé materiály. Cílem této práce je konstrukční návrh a výroba experimentálního zařízení, které umožní tyto podmínky tisku zkoumat. Zařízení, zkonstruované v této práci, bylo pojmenováno UK3DP a umožňuje dvoubarevný tisk objektu o maximálních rozměrech čtvercové podstavy 150 mm a výšce 150 mm. Před tiskem je možno uživatelsky nastavit téměř všechny parametry ovlivňující průběh tisku, a to včetně teploty vzduchu ve vyhřívané komoře, která je součástí tiskárny. Pro ověření funkčnosti je testováno několik materiálů, mezi které patří například ABS, PC a PEI. Práce se také věnuje základnímu ověření vlivu vybraných parametrů na výsledek tisku. Provádí tahové zkoušky potvrzující vliv okolní teploty při tisku na výslednou kvalitu spojení vláken, zkoumá výslednou kvalitu povrchu pro jednotlivé výšky vrstvy a porovnává výsledné deformace tisknutých objektů s jinými tiskárnami. Výsledkem této práce je 3D tiskárna určená k testování různých podmínek tisku pro stávající i nové druhy materiálů s možností uživatelského nastavení řady parametrů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Rapid Prototyping, FDM, 3D tiskárna, podmínky tisku, testování materiálů

ABSTRACT

Thesis deals with FDM 3D printing method and testing capabilities of optimum printing conditions for different materials. The aim of this work is to design and manufacture of experimental device that enables printing to investigate these conditions. A device designed in this work was named UK3DP and allows dual color object printing with maximum dimensions of the square base of 150 mm and a height of 150 mm. Before printing, the user can set almost all parameters affecting the printing process, including air temperature in heated chamber that is part of it. To verify the functionality several materials are tested, including ABS, PC and PEI. It also describes basic verification of the influence of selected parameters on the print result. Performs tensile tests confirming the influence of ambient temperature during printing on the quality of fiber connections, examines the final quality of the surface for each layer height and compares the resulting deformation of printed objects with other printers. The result of this work is a 3D printer capable of testing printing conditions for both existing and new types of materials with a range of user adjustable parameters.

KEY WORDS

Rapid Prototyping, FDM, 3D printer, printing conditions, materials testing



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

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..



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že diplomovou práci *Konstrukce 3D tiskárny pro materiály s vyšší pevností* jsem vypracoval samostatně, pod vedením Ing. Daniela Koutného, Ph.D., s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně dne 22. května 2015

.....
Bc. Michal Žlebek



PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych rád poděkoval Ing. Danielu Koutnému, Ph.D. za cenné rady a odbornou pomoc při vypracování diplomové práce. Velké poděkování patří rodině za podporu a trpělivost v průběhu celé doby studia.



OBSAH

ÚVOD.....	15
1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ.....	16
1.1 Metoda FDM.....	16
1.2 Materiály a jejich vlastnosti	17
1.3 Spojování jednotlivých vrstev	18
1.3.1 Nehomogenita	19
1.3.2 Kvalita spojení vláken	20
1.3.3 Deformace vlivem smrštění materiálu	22
1.3.4 Možnosti ovlivnění deformace	24
1.3.5 Přilnavost k podložce a první vrstva.....	26
1.3.6 Vliv nastavení parametrů na mechanické vlastnosti	27
1.3.7 Vliv nastavení parametrů na rozměrovou přesnost.....	32
1.4 3D tiskárny	33
1.4.1 Rámová konstrukce.....	34
1.4.2 Pojezdové systémy	34
1.4.3 Motory a přenos sil	34
1.4.4 Systém vyhřívání	35
1.4.5 Tryska	35
1.4.6 Elektronika a softwarové řízení	37
2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	39
2.1 Analýza problému	39
2.2 Cíl práce	39
3 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ.....	40
3.1 Varianty rámové konstrukce	40
3.1.1 Profilová konstrukce	40
3.1.2 Plechová konstrukce	40
3.1.3 Rám Delta	40
3.2 Varianty systému pohybu.....	41
3.2.1 Klasický statický kartézský systém	41
3.2.2 Paralelní statický systém H-bot	41
3.2.3 Vertikální systém delta	42
3.2.4 Osa Z.....	42
3.3 Extruderový systém.....	43
3.4 Izolace komory	43
3.5 Zhodnocení a výběr optimální varianty	44
4 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ	46
4.1 Konstrukce	46
4.1.1 Rám tiskárny	46
4.1.2 Pojezdový systém osy Z	47
4.1.3 Pojezdový systém roviny XY	50
4.1.4 Tisková hlava.....	53
4.1.5 Trysky	54
4.1.6 Extruderový systém	54
4.1.7 Vyhřívaná komora	55
4.1.8 Uzavírání.....	56
4.1.9 Krytování	56

4.2	Elektronika a řízení.....	56
4.2.1	Řídící jednotka a ovládací panel	57
4.2.2	Snímací členy	58
4.2.3	Systém ohřevu	58
4.3	Firmware a software	59
4.4	Kalibrace.....	59
4.5	Výroba a kompletace	61
4.6	Testování a validace	62
4.6.1	Povrch a materiál podložky pro tisk.....	62
4.6.2	Validační výtisky	64
4.6.3	Kvalita povrchu	67
4.6.4	Tisk různých druhů materiálů	68
4.6.5	Ověření vlivu teploty okolí na spoje vláken	69
4.6.6	Porovnání deformací	70
5	DISKUZE	72
5.1	Shrnutí dosažených výsledků	72
5.2	Ekonomický a časový rozbor řešení	73
5.3	Postup dalších prací	73
6	ZÁVĚR	74
7	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	75
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	79
9	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	82
10	SEZNAM TABULEK.....	84
11	SEZNAM PŘÍLOH	85

ÚVOD

Aditivní technologie je typ výroby, při kterém nedochází k postupnému ubírání materiálu od polotovaru, ale naopak přidávání materiálu do požadovaného tvaru. Mezi aditivní typ výroby řadíme technologie zahrnující spékání prášků různého chemického složení, vytvrzování fotopolymery laserem či nanášení různých druhů materiálu po jednotlivých vrstvách. Nejznámější a nepoužívanější je metoda nanášení materiálu ve vrstvách nazývaná FDM (Fused Deposition Modeling), která se těší značnému zájmu průmyslu. Umožňuje totiž relativně rychlou a levnou výrobu plastových součástí o téměř jakémkoliv tvaru a to bez zbytečného odpadu, který je v porovnání s třískovým obráběním minimální. Oproti klasické výrobě plastových dílů vstřikováním do formy jsou náklady na kusovou výrobu aditivními technologiemi zanedbatelné a není tedy divu, že se v posledních letech tento způsob výroby rozšířil do téměř všech průmyslových odvětví. Mezi hlavní průmyslová odvětví využívající tuto technologii 3D tisku patří především automobilový průmysl s potřebou rychlé výroby prototypů. Od výroby prototypů je odvozen sekundární název Rapid Prototyping. Dalšími oblastmi použití je letectví, stavebnictví či zdravotnictví.

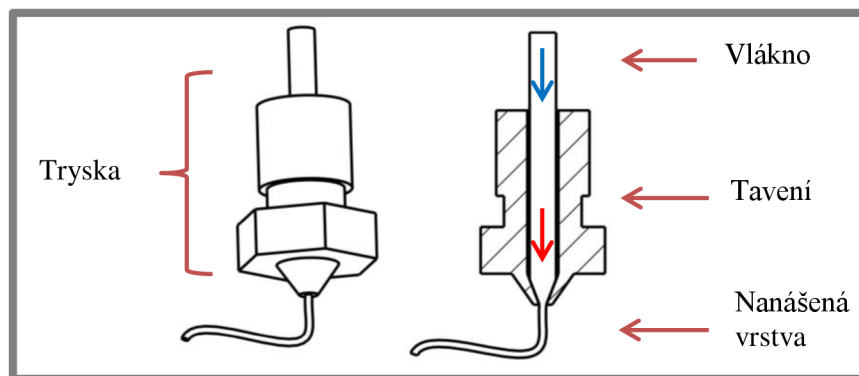
Zpřísnováním požadavků na bezpečnost a kvalitu výrobků dochází k vývoji nových druhů materiálů s lepšími mechanickými vlastnostmi. Objevují se nové kompozitní materiály pro 3D tisk, dosahující stále lepších materiálových charakteristik. Nové materiály s sebou před uvedením na trh přinášejí potřebu testování a stanovení optimálních podmínek tisku, jelikož podmínky tisku jsou hlavním faktorem ovlivňujícím výsledné mechanické i vzhledové vlastnosti objektu. Cílem je přiblížení se mechanickým vlastnostem dílů vyrobených metodou FDM mechanickým vlastnostem dílů ze stejného materiálu vyrobených přímým vstřikováním do formy a tím umožnit již ve fázi vývoje výrobku testovat jeho mechanické a tepelné zatížení očekávané v sériové produkci. Za účelem dosažení požadovaných nároků je nutno podmínky tisku a jejich vliv na výsledek zkoumat. Výsledkem zkoumání podmínek tisku je stanovení jejich hodnot tak, aby předmět tisku co nejpřesněji odpovídal požadavkům na rozměrovou přesnost a pevností se přiblížil hodnotám, kterých dosahují vstřikované díly ze stejného materiálu.

Tato diplomová práce se zabývá návrhem, konstrukcí a ověřením funkčnosti experimentálního zařízení 3D tiskárny, která bude schopna testovat nové druhy materiálů s možností uživatelského nastavení co největšího počtu parametrů ovlivňujících průběh a výsledek tisku. Zařízení tohoto typu není zatím dostupné.

1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

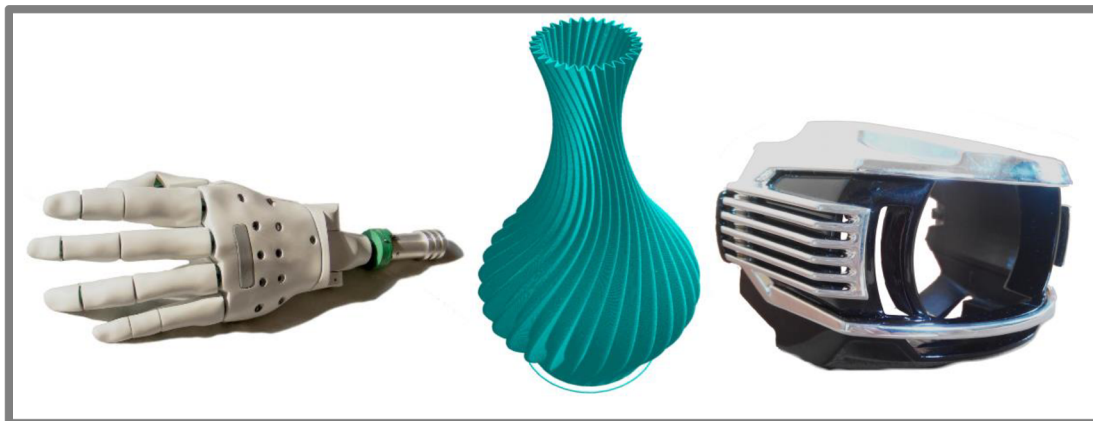
1.1 Metoda FDM

FDM je technologie aditivní výroby, která byla patentována v roce 1989 zakladatelem a vlastníkem ochranné známky společností Stratasys S. Scottem Crumpem. Jedná se o metodu profesionálního 3D tisku, která se po expiraci patentu v roce 2009 rychle rozšířila do řad běžných uživatelů. Princip této metody je založen na protlačování plastového vlákna tryskou daného průměru. Plastové vlákno je v trysce roztaveno a v tenkých vrstvách nanášeno na tiskovou podložku v rovině horizontálního průřezu budoucího výrobku. Po kompletním nanesení jedné horizontální vrstvy dojde k vertikálnímu posuvu podložky či trysky a tisku další vrstvy. Tento proces pokračuje až do kompletního zhotovení tisknutého objektu. Obr. 1-1 znázorňuje průchod vlákna tryskou.



Obr. 1-1 Průchod vlákna tryskou

Tato technologie aditivní výroby nabízí velké množství různých materiálů k tisku a umožňuje jejich relativně rychlé zpracování do podoby funkčních mechanismů o téměř jakémkoliv tvaru. Finální výtisky je možné dále zpracovávat a provádět různé povrchové úpravy jakými jsou lakování, broušení nebo pokovování a další. Uplatnění nachází především v automobilovém průmyslu při výrobě funkčních prototypů plastových částí s mechanickými vlastnostmi blízcími se reálnému výlisku. Mezi další průmyslové odvětví využívající metodu FDM patří zdravotnictví, stavebnictví či letecký průmysl a kosmonautika. Následující obr. 1-2 zobrazuje možná využití 3D tisku v praxi. [1]



Obr. 1-2 Protéza horní končetiny [2]; designérský model vázy; prototyp reflektoru

1.2 Materiály a jejich vlastnosti

Materiály pro běžný 3D tisk metodou FDM jsou dodávány ve formě vlákna o průměru 1,7–3 mm, navinutého na rolích o hmotnosti materiálu 0,5–1 kg. Typickými materiály jsou termoplasty ABS (akrylonitrilbutadienstyren) a PLA (polylactid acid). Pro náročné průmyslové využití se používají materiály PC (polykarbonát) a PEI (polyetherimid), známý také pod obchodním názvem ULTEM, doplněné o materiály určené pro stavbu podpurných struktur, mezi které patří PVA (polyvinyl alkohol) rozpustný ve vodě a HIPS (houževnatý polystyren) rozpustný v limonenem. Dalšími materiály jsou PA (polyamid), známý také jako NYLON, či PET (polyethylentereftalát). Pro kvalitní výtisk je nutné nastavit tiskové podmínky s ohledem na materiálové charakteristiky požadovaného materiálu, které jsou vždy udávány výrobcem v materiálovém listu. Mezi nejdůležitější patří teplota tavení T_m (melting temperature), teplota skelného přechodu T_g (glass transition) a koeficient smrštění. Důležitou vlastností materiálu je pevnost v tahu, kterou lze ovlivnit správnou orientací dílu při tisku a kvalitním spojením jednotlivých vrstev. Další vlastností je pevnost v ohybu, na kterou je nutné brát ohled zejména při tisku cyklicky namáhaných dílů. Vlastnosti materiálů se mohou v závislosti na výrobcích značně odlišovat. Podrobné materiálové charakteristiky a odpovídající zkušební normy lze nalézt v datových listech jednotlivých výrobců. Přehled základních charakteristik pro nejběžněji používané materiály porovnává následující tab. 1-1.

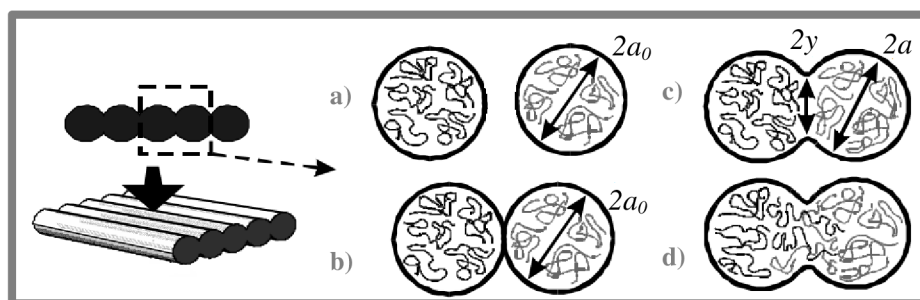
Tab. 1-1 Stručný přehled vlastností materiálu [3], [4], [5], [6]

	Teplota tavení T_m (°C)	Skelný přechod T_g (°C)	Pevnost v tahu (MPa)	Pevnost v ohybu (MPa)	Lineární smrštění α_L ($10^{-6} \cdot K^{-1}$)
PEI (ULTEM)	310	186	71,6	115	54
PC	280	161	68	104	70,2
ABS	230	85	43	65	73,8
PA (NYLON)	178	75	44	59	72
HIPS	215	73	16	50	70
PVA	210	68	65	68	55
PLA	210	65	53	56	30
PET	255	60	48	64	59,4

Obecně se pro tisk metodou FDM doporučují materiály s nízkou teplotou skelného přechodu a nízkým koeficientem lineárního smrštění. Jelikož je extrudovaný materiál z teploty tavení rychle chlazen na teplotu okolí, dochází u materiálů s vysokým koeficientem smrštění ke vzniku vnitřních pnutí, zodpovědných za deformace objektu způsobující praskání a odlupování jednotlivých vrstev. Nižší teplota skelného přechodu pak podporuje proces spojování vláken při tisku bez vyhřívání komory. Ideálním materiálem pro 3D tisk je tedy PLA, které nachází využití především u tiskáren spadajících pod kategorii RepRap. Toto označení je zkratkou anglického **Replicating Rapid Prototyper** a značí skupinu tiskáren, schopných z větší části vytisknout samy sebe. [7]

1.3 Spojování jednotlivých vrstev

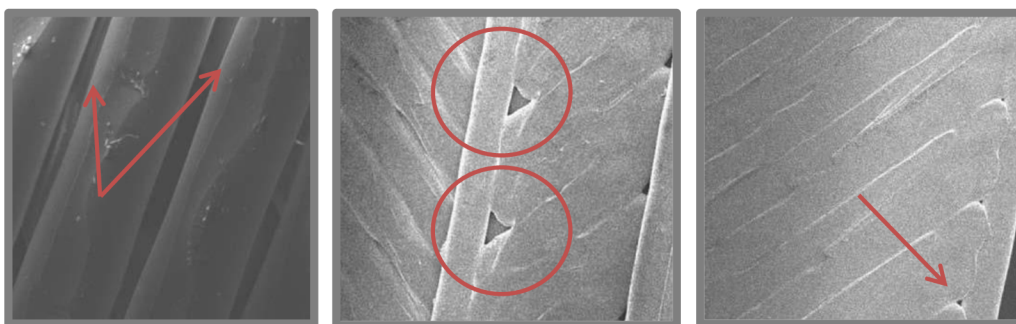
Snahou Rapid Prototypingu je výroba dílů s mechanickými vlastnostmi blízcími se mechanickým vlastnostem dílů, vyrobených technologií přímého vstřikování. Aby se výtisk vyrobený metodou FDM těmto vlastnostem přiblížil, je nutné zkoumat nejslabší místa této technologie, mezi které patří proces spojování jednotlivých vláken. Na kvalitu spojení vláken a jejich výsledné mechanické vlastnosti má vliv řada nastavovaných parametrů a podmínek tisku, které budou dále popsány. Typy spojení vláken je možné rozdělit do čtyř kategorií znázorněných na obr. 1-3.



Obr. 1-3 Vznik jednotlivých spojů vlákna [8]

a) bez kontaktu; b) povrchový kontakt; c) spojení krčků; d) spojení molekulární difúzí

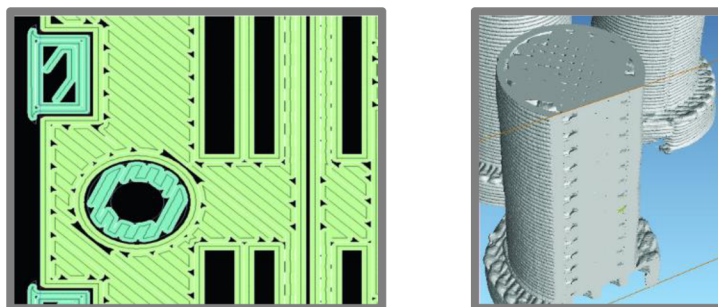
Vznik daného typu spojení je ovlivněn především velikostí hodnoty překrytí, která určuje velikost prolnutí jednotlivých vláken v jejich průřezu kolmém ke směru osy vlákna. Při povrchovém kontaktu (Obr. 1-3b) dochází pouze k dotyku vnějších povrchů vláken a to při nulové hodnotě překrytí. Pokud hodnota překrytí nabývá kladné hodnoty, dochází při teplotách nižších, než je teplota skelného přechodu daného materiálu, ke spojení vláken bez míšení materiálu a vzniku tzv. studeného spoje, skrze krček o velikosti $2y$ (Obr. 1-3c). V ideálním případě, kdy teplota vláken a okolí dosahuje teplot vyšších, než je teplota skelného přechodu daného materiálu, dojde k ideálnímu spojení a inicializaci molekulární difúze, která umožní vznik pevného krčku (Obr. 1-3d). Pokud jsou jednotlivá vlákna od sebe vzdálena na vzdálenost větší, než je dvojnásobek jejich poloměru a_0 (Obr. 1-3a), nedojde ke spojení a mezi vlákny se vytvoří vzduchová mezera. Velikost vzduchové mezery je parametr, který v případě nabytí záporných hodnot nahrazuje kladnou hodnotu překrytí vláken. Vzduchová mezera je ve většině případů nežádoucím jevem. Pokud neúmyslně nedojde ke spojení, vzniká chyba označovaná jako strukturální nehomogenita, která vychází z vlastních principů této metody tisku. Strukturální nehomogenitu lze pozorovat na detailu morfologie povrchu výtisků na následujícím obr. 1-4. [8]



Obr. 1-4 Morfologie povrchů se znázorněním nevyplněných míst [9]

1.3.1 Nehomogenita

Základy pro vznik nehomogenity vznikají již během zpracování CAD modelu k tisku. Objekt je při zpracování rozřezán na jednotlivé horizontální vrstvy a v každé je vytvořen soubor křivek kopírujících tvar modelu v této vrstvě. Takto zpracovaný soubor slouží jako podklad pro trasování tiskové hlavy. Produkt je tedy stavěn postupně po jednotlivých horizontálních vrstvách systémem kopírování stop geometrických křivek charakterizujících objekt tiskovou hlavou. V každé vrstvě můžeme nalézt vlivem tvaru vytlačovaného vlákna a geometrie trasování nevyplněná místa znázorněná na obr. 1-5.



Obr. 1-5 Výskyt strukturální nehomogenity vlivem trasování [10]

Tyto chyby byly zkoumány Technickou Univerzitou v Košicích pomocí počítačové tomografie se závěrem, že množství výskytu strukturální nehomogenity lze do jisté míry potlačit správně zvolenou teplotou natavování vlákna a teplotou vyhřívání komory. Obr. 1-6 zobrazuje řezy snímků získaných z tomografu pro modely s různým nastavením teplot tisku. [10]



Obr. 1-6 Nehomogenity FDM objektu u obdélníkové výplně [10]

Následující tab. 1-2 srovnává množství nevyplněného objemu u tělesa válcového tvaru v závislosti na teplotě okolí a teplotě tavení vlákna za použití obdélníkové a kruhové výplně vnitřního objemu objektu.

Tab. 1-2 Množství nehomogenit v závislosti na teplotě tavení a teplotě okolí [10]

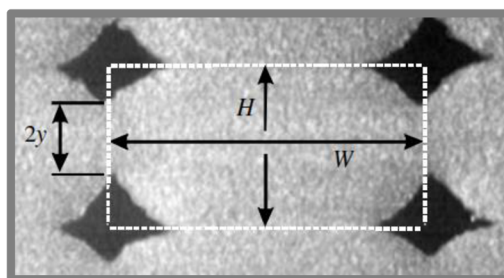
Teplota tavení vlákna T_m (°C)	Teplota okolí T_e (°C)	Nevyplněný objem obdélníkové výplně UV_r (%)	Nevyplněný objem kruhové výplně UV_c (%)
280	70	15,89	11,34
280	75	13,27	11,06
285	70	16,05	11,65
285	75	14,42	11,21
290	70	11,17	11,68
290	75	10,34	8,41

Můžeme pozorovat relativně malý vliv teploty okolí T_e na výskyt nehomogenit u kruhové výplně při vyplňování objektu s kruhovým půdorysem. Opačným

případem je obdélníková výplň, u které lze pozorovat pokles množství nevyplněného objemu s rostoucí teplotou okolí. Nejdokonalejší výplně bylo dosaženo při vyšších teplotách okolí a tavení. Materiál je při vyšších teplotách méně viskózní a lépe zatéká do nevyplněných oblastí objektu. V případě navyšování teploty tavení je předpoklad poklesu výskytu nehomogenit a to na úkor přesnosti tisku a rychlé degradaci materiálu. U obdélníkové výplně má na výskyt nehomogenit velmi výrazný vliv jak teplota okolí, tak teplota tavení vlákna. Z výsledků tohoto výzkumu je tedy patrné, že výskyt množství nehomogenit v objektu vyrobeného metodou FDM lze ovlivnit správnou volbou vnitřní výplně objektu a korekcí teplot tavení vlákna a okolí.

1.3.2 Kvalita spojení vláken

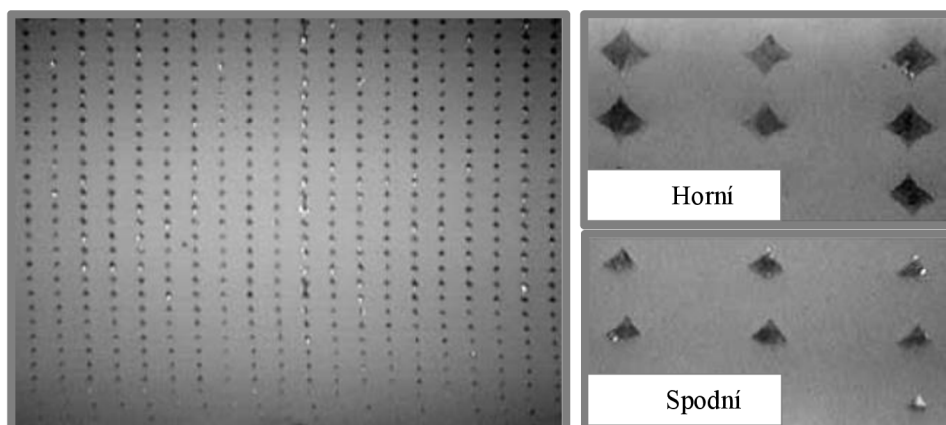
Mechanické vlastnosti objektu jsou výsledkem kvality spojení vláken přes vzniklý krček. Procesům ovlivňujícím podmínky vzniku kvalitního spojení vláken se věnuje Q. Sun a kol. [8], který experimentálně dokázal, že kritickým parametrem, na kterém závisí pevnost objektu, je historie teploty vlákna. Tato teplota se odvíjí od rychlosti chladnutí vlákna po vytlačení tiskovou hlavou, jelikož vlákna se pevně spojují při teplotě vyšší, než je teplota skelného přechodu materiálu. Aby bylo možné popsat tento proces, byly zavedeny 3 parametry zobrazené na obr. 1-7, které charakterizují vlastnosti a tvary vytlačených vláken. [8]



Obr. 1-7 Fotografie spojení vláken [8]

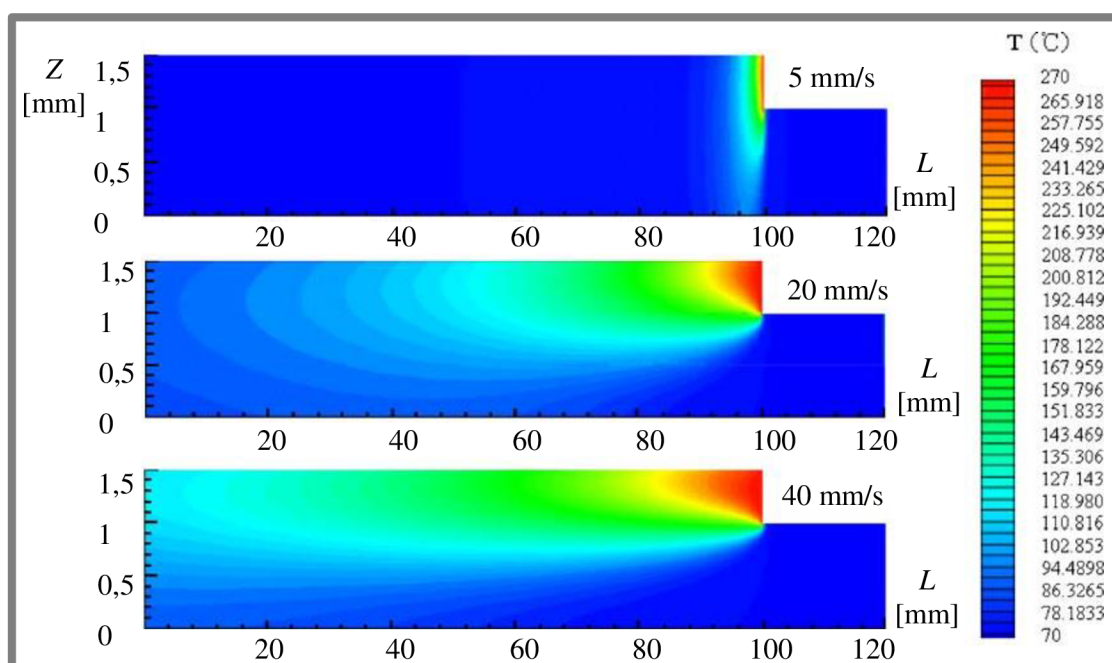
W - šířka vlákna; H - výška vlákna; $2y$ - délka krčku

Q. Sun [8] provedl experiment za účelem zjištění průběhu teploty u již nanesených vrstev při aplikaci vrstvy nové. Experiment byl proveden s materiálem ABS o $T_m = 270\text{ °C}$ protlačovaným tryskou o průměru 0,3 mm s přednastavenými parametry $H = 0,254\text{ mm}$ a $W = 0,508\text{ mm}$, při $T_e = 70\text{ °C}$. I přes dodržení teploty tavení vlákna na teplotě T_m , byla měřená teplota vlákna na výstupu trysky v rozmezí 235–245 °C. Experiment prokázal, že teplota rozhraní nanášené vrstvy a jejího podkladu roste nad teplotu skelného přechodu ihned po vytlačení filamentu a zůstává nad touto teplotou jen po krátký časový úsek (3 s). Během této doby nesmí být na vlákno položena další vrstva, jelikož může dojít ke zhroucení stěny vlivem působení sil na vlákno v plastickém stavu. Tento experiment nepřímo potvrdil T. Wang a kol. [7] teplotní simulací zobrazenou na obr. 1-9. Dále bylo prokázáno, že teplota spodních vrstev zůstává na teplotě vyšší, než je teplota skelného přechodu déle, než u vyšších vrstev a z tohoto důvodu je růst krčku ve spodních vrstvách razantnější. Tento jev dokazuje snímek zobrazený na obr. 1-8. Ve spodních vrstvách dochází také k větším tlakům vlivem vlastní hmotnosti objektu a tyto vrstvy jsou při vyšších teplotách, pohybujících se okolo teploty T_g , mírně deformovány a stlačovány k sobě. Tento jev přispívá k lepšímu spojení vláken a ke vzniku krčků s větší délkou, avšak na úkor rozměrové přesnosti v tiskové rovině XY. [8]



Obr. 1-8 Mikrofotografie spojení vláken [8]

T. Wang a kol. [7] primárně zkoumal rozložení teplot nanášené vrstvy a jednotlivých podvrstev při rozdílných rychlostech pokládání vlákna tiskovou hlavou. Závěrem výzkumu je zjištění, že pokud je objekt tisknut nekonstantní rychlostí, dochází ke vzniku rozdílu teplot a délky doby chladnutí, což přispívá ke vzniku nežádoucího napětí. Následující obr. 1-9 znázorňuje teplotní simulaci nanášení vrstvy materiálu, provedenou metodou konečných prvků, při rozdílných rychlostech tiskové hlavy. Jedna vrstva je vysoká 0,5 mm a dlouhá 120 mm. [7]



Obr. 1-9 Simulace teploty při tisku probíhající za různých rychlostí tiskové hlavy [7]

Teplotní profil ukazuje, že teplota vlákna ve spodních vrstvách přesahuje teplotu skelného přechodu materiálu a rapidně klesá ve směru pohybu tiskové hlavy. Tím potvrdil experiment Q. Suna [8], zmíněný výše, který tvrdí, že molekulární difúze je mnohem výraznější ve spodních vrstvách tisknutého objektu (Obr. 1-8) a to díky vyšší teplotě a delšímu časovému úseku, po který vlákna na této teplotě setrvávají.

1.3.3 Deformace vlivem smrštění materiálu

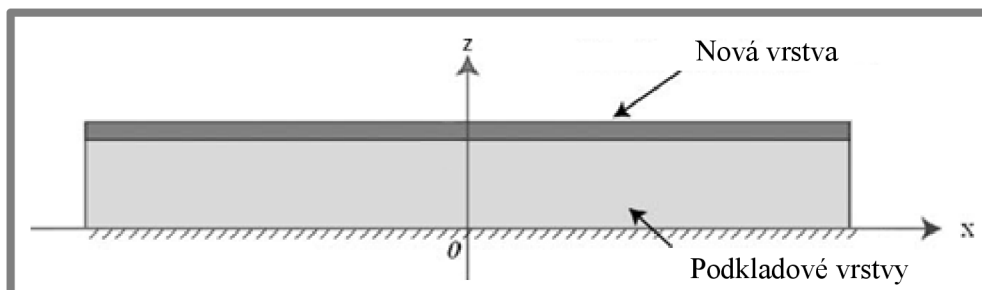
Jednou z nejzásadnějších chyb vznikající při tisku metodou FDM je deformace způsobená smrštěním materiálu v průběhu jeho chladnutí a projevující se prohnutím výtisku způsobem zobrazeným na obr. 1-10.



Obr. 1-10 Deformace objektu

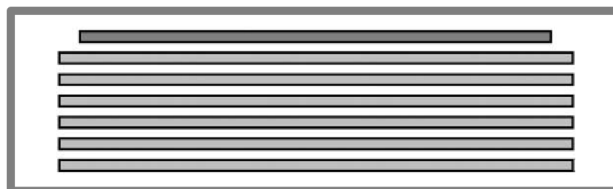
Tyto deformace experimentálně i analyticky popisuje T. Wang a kol. [7]. Jeho výzkum uvádí příčinu deformace objektu jako uvolnění vnitřního napětí akumulovaného ve vytisknutém objektu. Toto vnitřní napětí vzniká vlivem smršťování nanášených vláken a je charakterizováno koeficientem lineárního smrštění (roztlačnosti). Vlákná mohou být bez rizika podrobena kontrakci v rozmezí teploty tavení T_m a teploty skelného přechodu T_g , jelikož schopnost vlákna odolávat deformacím způsobených silou je v tomto teplotním rozhraní malá a i přes probíhající kontrakci nedochází při těchto teplotách k akumulaci vnitřního napětí. Vnitřní napětí je akumulováno především při ochlazování materiálu z teploty skelného přechodu na teplotu okolí T_e . Následující sada obrázků popisuje vznik napětí a následnou deformaci objektu při tisku. [7]

Předpokládejme ideální proces nanášení nové vrstvy materiálu na vrstvu stávající a její ideální přilnutí dle následujícího obr. 1-11:



Obr. 1-11 Předpoklad ideálního přilnutí nově nanášené vrstvy [7]

Nyní objekt rozdělíme na jednotlivé horizontální vrstvy dle obr. 1-12 a za předpokladu ideálních podmínek necháme vychladnout. V této fázi dojde k lineárnímu smrštění poslední vrstvy o hodnotu ε_L .



Obr. 1-12 Proces volného chlazení bez vzniku napětí [7]

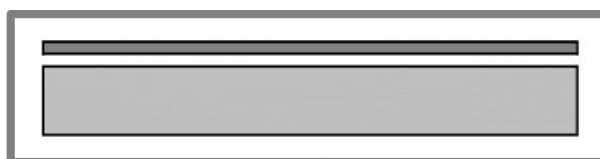
Napětí σ a deformace ε_L akumulované v tomto procesu chladnutí jsou následující:

$$\begin{aligned}\sigma &= 0 \\ \varepsilon_L &= \alpha_L \Delta T\end{aligned}\quad (1)$$

kde:

σ	Pa	je napětí
ε_L	mm	- deformace
α_L	K ⁻¹	- koeficient lineárního smrštění (roztažnosti)
ΔT	K	- změna teploty při chladnutí

Jakmile dojde k ochlazení poslední vrstvy na konstantní teplotu T_e , provedeme její natažení do původní délky tak, jak je znázorněno na následujícím obr. 1-13.



Obr. 1-13 Natažení do původní délky [7]

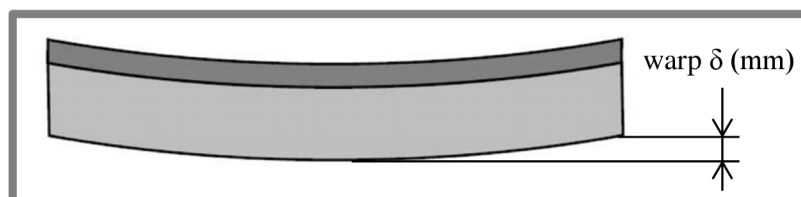
Natažením dojde ke vzniku napětí σ a deformace ε :

$$\begin{aligned}\sigma &= -E\alpha_L\Delta T \\ \varepsilon_L &= -\alpha_L\Delta T\end{aligned}\quad (2)$$

kde:

E	Pa	je modul pružnosti v tahu
-----	----	---------------------------

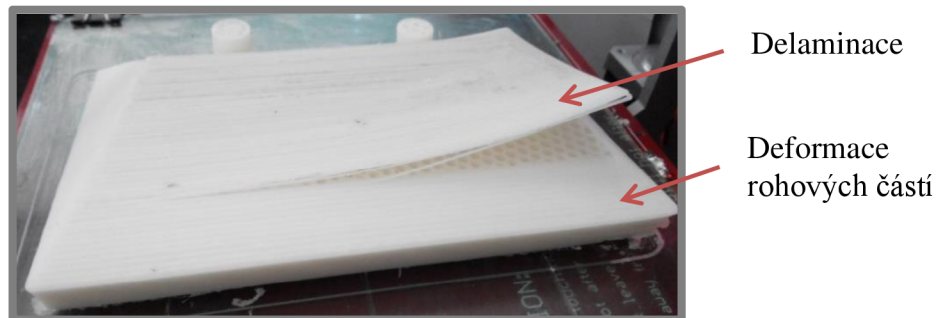
Napětí vzniklé procesem chlazení a smršťování, vyvolává po opětovném spojení jednotlivých vrstev v jeden celek silové účinky, působící na spodní vrstvy objektu. Vlivem lineární deformace ε_L vzniká po vyrovnání působících sil celková deformace objektu zobrazená na obr. 1-14. Tato chyba, označována jako warp, je výslednou deformací skládající se ze zvlnění, zprohýbání a zkroucení objektu vlivem lineárního smrštění vláken.



Obr. 1-14 Výsledná deformace objektu [7]

Ideálním stavem z hlediska deformací je homogenní teplota výtisku a jeho rovnoměrné a pomalé chladnutí. Při tisku však dochází k velmi rychlému ochlazení nanášeného vlákna, čemuž se podobně jako Q. Sun [8] věnoval J. Rodriguez [11], který spočítal, že v případě trysky o výstupním průměru 0,254 mm, okolní teploty 70 °C a použitím materiálu ABS P400, je doba chladnutí vlákna z teploty $T_m = 270$ °C na teplotu $T_g = 85$ °C rovna 0,55 s a dalších 1,2 s trvá ochlazení z teploty T_g na teplotu $T_e = 70$ °C. 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. Tím dochází v každé vrstvě k nerovnoměrnému rozložení teploty a vzniku napětí. [11]

Při velkém rozdílu teplot a nerovnoměrném ochlazování dochází ke vzniku větších pnutí a větších deformací. Následující obr. 1-15 ukazuje oddělení horních vrstev u objektu z materiálu ABS vlivem velkých vnitřních pnutí. Tato pnutí vznikla vlivem lokálního chlazení objektu v oblastech delaminace. Vlivem rychlého chlazení neproběhlo ideální spojení vláken ve formě pevného krčku, který by byl schopen udržet vlákna pohromadě. Vysoké vnitřní pnutí způsobilo jeho porušení a následné znehodnocení objektu.

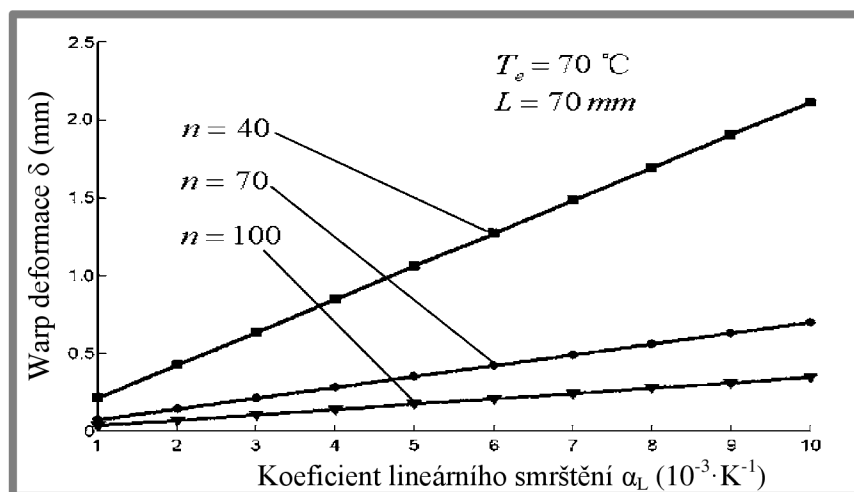


Obr. 1-15 Delaminace způsobená vlivem lokálního chlazení

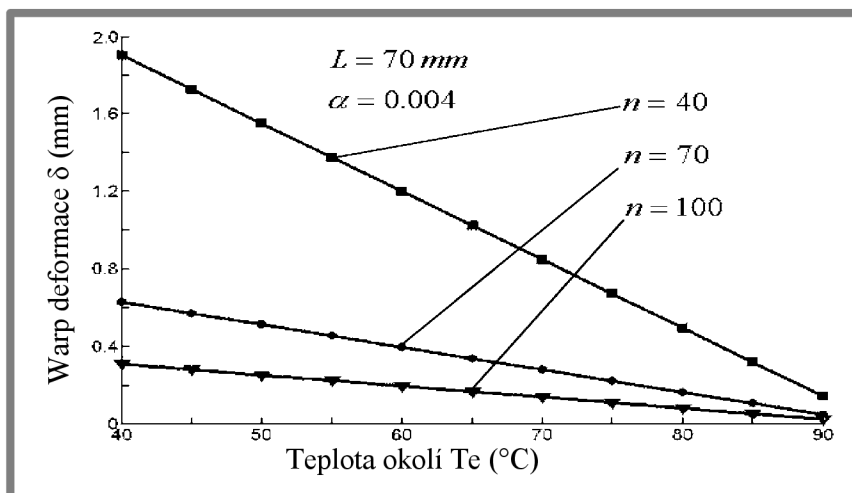
Velikost a množství deformací vzniklých v průběhu tisku a chlazení lze primárně ovlivnit teplotou okolí a rychlostí nanášení nové vrstvy. S rostoucí teplotou okolí se výsledné deformace po postupném ochlazení výtisku zmenšují, což má pozitivní vliv na výslednou rozměrovou přesnost. Naopak při vysoké teplotě okolí a velké hmotnosti tisknutého objektu dochází k deformaci spodních vrstev objektu.

1.3.4 Možnosti ovlivnění deformace

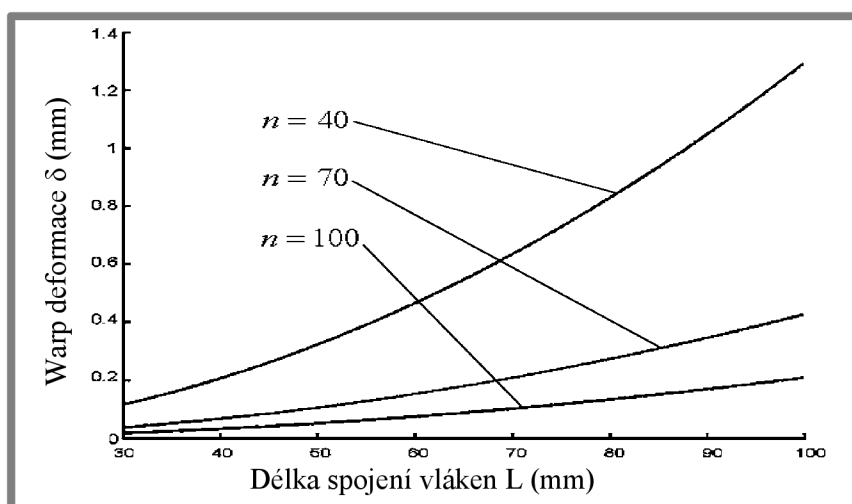
Velikost deformace objektu vyrobeného metodou FDM je výsledkem několika faktorů. Většina deformací je závislá na charakteristických vlastnostech použitého materiálu, jako je koeficient roztažnosti (smrštění), a není tedy možné jim ve vzniku vždy plně zabránit. Existují však způsoby, jakými lze dopady deformace minimalizovat. Dle následujících grafů (Graf 1-1, Graf 1-2 a Graf 1-3) může být velikost deformace ovlivněna počtem nanesených vrstev objektu, délkou nanášených vláken a již zmiňovanou teplotou okolí a materiálem s nízkým koeficientem lineárního smrštění. [7]



Graf 1-1 Vliv koeficientu smrštění na warp deformace [7]



Graf 1-2 Vliv teploty okolí na velikost warp deformace [7]



Graf 1-3 Deformace v závislosti na délce tisknutého objektu [7]

Z grafů je patrné, že z hlediska potlačení deformací je k tisku vhodný materiál s minimálním koeficientem smrštění v kombinaci s větším počtem nanášených vrstev tisknutých v krátkých délkách a ve vyhřívané komoře. Výzkum ukázal, že dochází k mnohem menším deformacím v případě, že namísto podélného spojování vláken (obr. 1-16a) u velkých objektů je zvoleno pokládání vláken podél kratší hranice tak, jak znázorňuje obr. 1-16b. Tento jev vysvětluje graf 1-3, který porovnává závislost deformace na délce spojení vláken o daném počtu vrstev. [7]

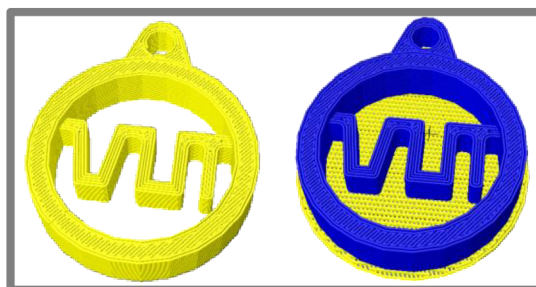


Obr. 1-16 Různé typy výplně dlouhého objektu [7]: a) podélná; b) příčná

1.3.5 Přílnavost k podložce a první vrstva

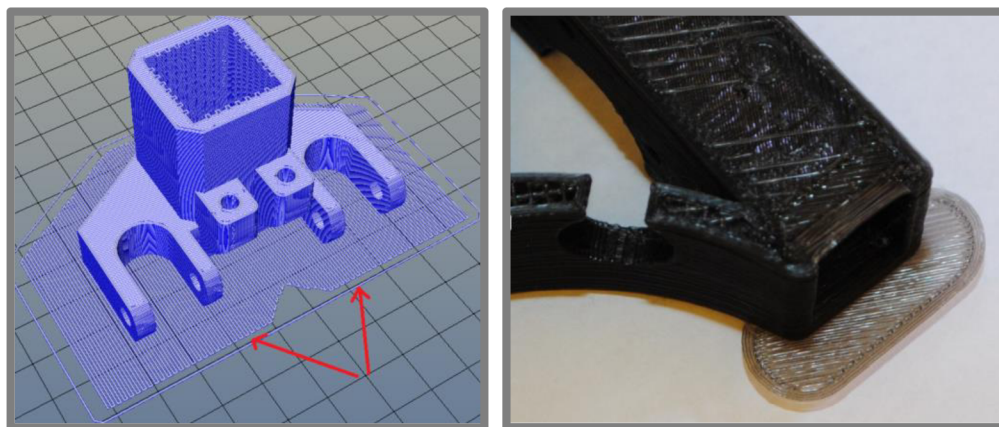
Kritickou částí tisku je tisk první vrstvy, která bez vyhřívání chladne rychleji a tím v ní dochází k akumulaci většího napětí. FDM simulace procesu nanášení vlákna za pomoci metody konečných prvků (Obr. 1-9) potvrzuje, že delaminace objektu způsobená akumulací zbytkových napětí na spodní ploše objektu během výroby, je způsobena teplotním vlivem a to zejména v případech absence vyhřívané podložky či komory. [7] Na vnějších částech objektu dochází k rychlejšímu chladnutí a tím také k větší deformaci a odlupování od spodní vrstvy zobrazené na obr. 1-10.

S cílem zabránit velkému rozdílu teplot se používá vyhřívaná podložka, která udržuje konstantní teplotu spodní vrstvy v okolí teploty T_g . Vyhřívaná podložka také zlepšuje přílnavost první vrstvy a tiskového podkladu. V případě absence vyhřívané podložky je možné k podpoře adheze mezi objektem a podložkou využít techniky podkladových vrstev, kdy je nejprve nanesena mezivrstva mezi podložkou a tisknutý objekt tak, jako je zobrazeno na obr. 1-17. Tato vrstva materiálu má obvykle větší zástavbovou plochu a zaručuje tak lepší adhezi v kontaktu mezi výtiskem a podložkou. Slouží také jako izolace zabraňující rychlému ochlazení první vrstvy, což do jisté míry zabraňuje vzniku nežádoucích deformací. V případě nerovnosti tiskové plochy lze mezivrstvu, označovanou také jako raft, využít k jejímu vyrovnání, což se ve výsledku projeví dosažením přesnějších rozměrů objektu a lepší strukturou povrchu první vrstvy. [12]



Obr. 1-17 Podkladová mezivrstva

Další možností je využití mezivrstvy větší, než tisknutelný objekt, nebo naopak mezivrstvy lokální tak, jako je znázorněno na obr. 1-18.



Obr. 1-18 Velkoplošná a lokální mezivrstva [13]

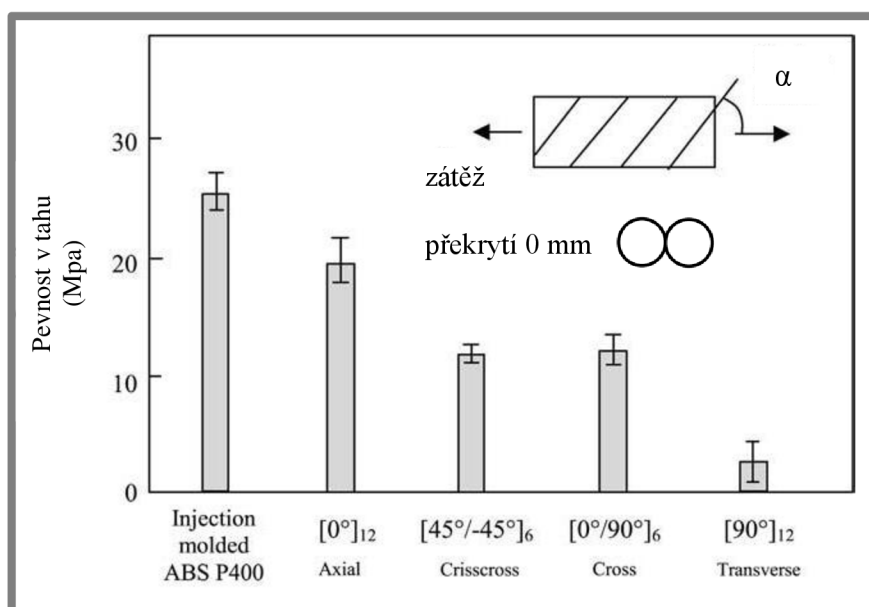
Ani jedna z těchto metod však není 100% efektivní a nezaručuje úspěšný tisk s dobrou přilnavostí a bez deformací. Procento úspěšného tisku narůstá při použití vyhřívané podložky, která při správném teplotním nastavení udržuje podkladové vrstvy na požadované teplotě po celou dobu tisku. Vyhřívaná podložka ve spojení s prvky podporujícími navýšení adhezních sil mezi první vrstvou a podložkou jsou jedním ze základních kritérií úspěšného tisku s minimálními deformacemi. Pro různé materiály existují odlišné způsoby dosažení lepší přilnavosti. Mezi základní patří nanášení různých tenkých lepících vrstev či kaptonových pásek. Dále se používají perforované plechy, do kterých materiál zateče, či různé plastové podložky s upraveným profilem povrchu.

1.3.6 Vliv nastavení parametrů na mechanické vlastnosti

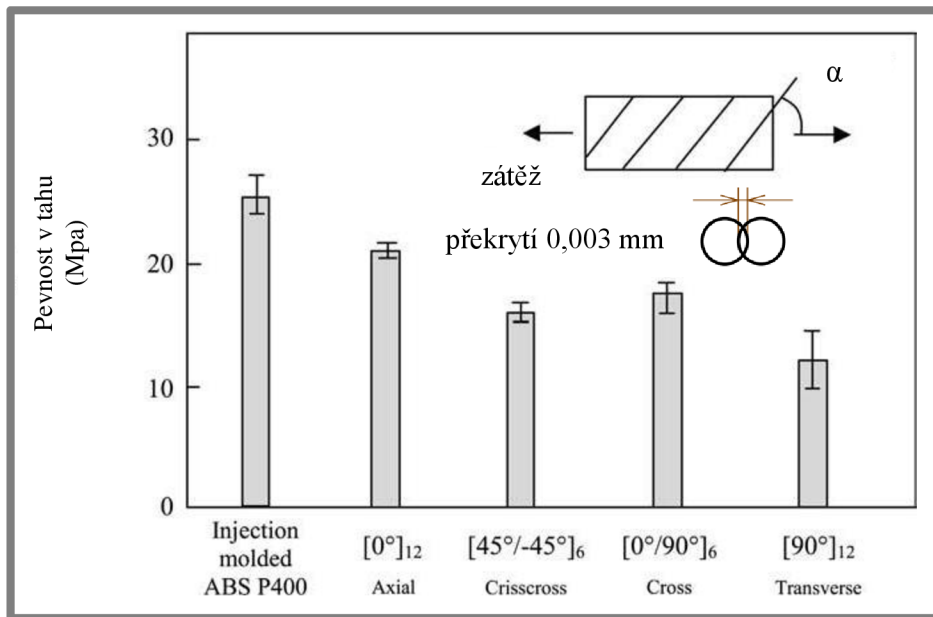
1.3.6

Mezi faktory ovlivňující výsledné mechanické vlastnosti výtisku patří orientace součásti na tiskové ploše a vnitřní výplň objektu. Správnou orientací objektu lze ovlivnit celkové mechanické vlastnosti vzhledem k uvažovanému směru zatěžování a zvolením vhodné výplně lze podpořit požadované vlastnosti na pevnost v tahu a tlaku. Těmito parametry, jejich vlivem na výsledné mechanické vlastnosti objektu a vhodnou volbou jejich nastavení se zabývá několik následujících odborných prací.

S. Ahn a kol. [14] provedl výzkum zaměřený na ideální nastavení parametrů, jakými jsou velikost překrytí a úhel rastru (výplně). Výsledkem je zjištění podložené grafy, že optimálním parametrem pro spojení vláken s ohledem na kvalitu mechanických vlastností je záporná hodnota vzduchové mezery, která má vliv především na výslednou pevnost produktu. Porovnání pevnosti v tahu při dvou různých hodnotách překrytí (0 mm a 0,003 mm) a s rozdílným úhlem rastru vnitřní výplně objektu znázorňuje následující graf 1-4 a graf 1-5.

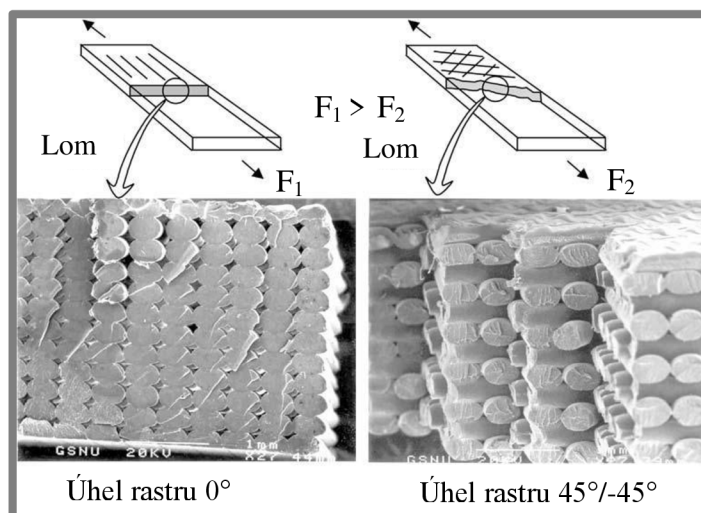


Graf 1-4 Zkouška tahem pro různé úhly rastru s překrytím 0 mm pro ABS P400 [14]



Graf 1-5 Zkouška tahem pro různé úhly rastru s překrytím 0,003 mm pro ABS P400 [14]

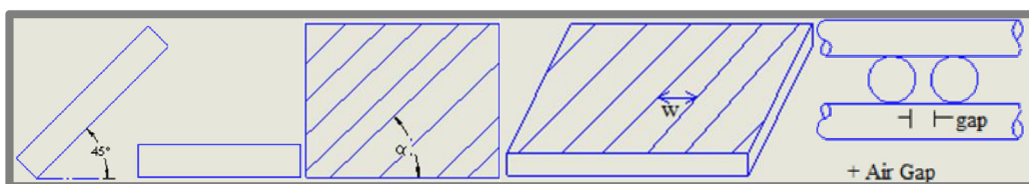
Z předchozích grafů vyplývá, že model vytištěný metodou FDM nedosahuje stejných pevnostních vlastností jako model vyrobený vstřikováním do formy. Obecně se pevnost v tahu a tlaku u objektů vyrobených metodou FDM pohybuje v rozmezí 80–90 % objektů vyrobených vstřikováním do formy [14]. To je způsobeno nehomogenitou ve spojení mezi vlákny, která rapidně redukuje efektivní průřez. Mechanické vlastnosti objektů vytištěných s výplní pod úhlem 90° dosahují nejhorších výsledků, jelikož síla je přenášena pouze spoji (krčky) mezi vlákny a ne vlákny samotnými. Objekty s rastroem 0°/90° jsou dle očekávání mezi modely s rastroem 90° a rastroem 0°, který dosahuje nejlepších výsledků při zátěži na tah. Tento výsledek potvrdil také J. Lee [15], který provedl podobný experiment, při kterém dosahovaly vzorky stavěné na výšku v ose Z, což je ekvivalentní typu vzorků s úhlem rastru 90°, třetinových hodnot napětí v tahu oproti vzorkům s rastroem pod úhlem 0°. Pohled na mikroskopický snímek oblasti lomu zkušební tyče zatěžované tahem zobrazuje následující obr. 1-19.



Obr. 1-19 Mikroskopický pohled na oblast lomu při tahové zkoušce [14]

Předchozí obrázek ukazuje mikrosnímek místa porušení při tahové zkoušce. Na levém snímku je možné pozorovat patrný směr růstu modelu a to díky velmi znatelnému vlivu molekulární difuze, která jak již bylo dříve zmíněno, probíhá ve větším množství ve spodní části modelu. Lze také pozorovat inicializaci přetržení v horní části, kde je kvalita spojení vláken horší. Na snímku vpravo je zkušební tyč otočena o 180° oproti směru stavby, což už není tak zřejmé z molekulární difuze, která je pouze nepatrná, ale z obtištěného vzoru podložky na horní straně obrázku. Dále lze u tohoto porušení objektu s rastrem $45^\circ/45^\circ$ pozorovat porušení u linie pod úhlem 45° , ale mikroskopické zvětšení ukazuje střídavé selhání jednotlivých příčných vláken stříhem a podélných vláken napětím v tahu.

F. Rayegani a kol. [16] provedl experiment a simulace pevnosti v tahu s odlišnými výsledky než výše zmínění autoři. Ve své práci vzájemně kombinuje různá nastavení orientace součástí, úhlu rastru, šířky rastru a velikosti vzduchové mezery. Tyto parametry popisuje následující obr. 1-20.



Obr. 1-20 Nastavované parametry tisku [16]

a) orientace součásti; b) úhel rastru; c) šířka rastru; d) velikost překrytí

I když předpokládal, že maximální hodnoty napětí se budou objevovat při uspořádání vláken ve směru zatěžování, dle tab. 1-3 došel k jiným závěrům.

Tab. 1-3 Měřené a předpokládané hodnoty pevnosti v tahu pro materiál ABS [16]

Číslo měření	Orientace součásti (°)	Úhel rastru (°)	Šířka rastru (mm)	Vzduchová mezera (mm)	Naměřeno (Mpa)	Predikce (Mpa)
1	0	0	0,2032	-0,00254	34,07	37,04
2	0	0	0,2032	0,5588	6,14	5,19
3	0	0	0,5588	-0,00254	29,83	31,19
4	0	0	0,5588	0,5588	10	10,52
5	0	45	0,2032	-0,00254	38,9	36,59
6	0	45	0,2032	0,5588	4,44	5,59
7	0	45	0,5588	-0,00254	36,03	34,08
8	0	45	0,5588	0,5588	8,59	7,89
9	90	0	0,2032	-0,00254	23,94	22,09
10	90	0	0,2032	0,5588	4,29	4,12
11	90	0	0,5588	-0,00254	23,8	21,50
12	90	0	0,5588	0,5588	9,45	9,83
13	90	45	0,2032	-0,00254	21,51	22,04
14	90	45	0,2032	0,5588	3,95	4,56
15	90	45	0,5588	-0,00254	18,37	21,8
16	90	45	0,5588	0,5588	7,77	7,02

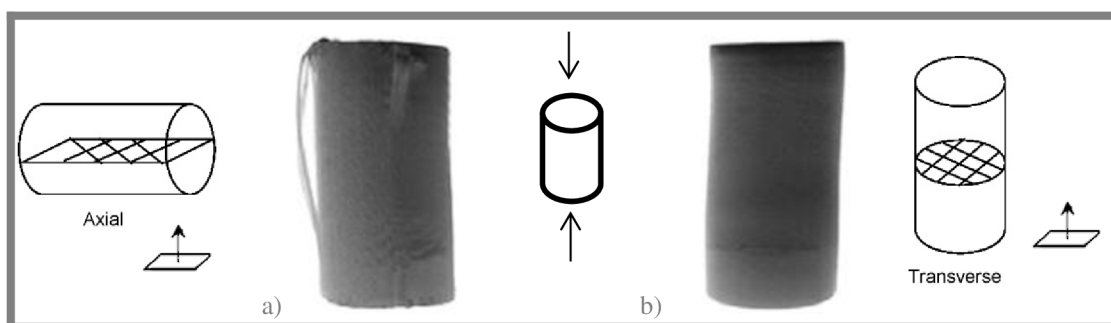
Na základě těchto experimentů publikoval hodnoty nastavení jednotlivých parametrů zajišťující maximální pevnost součásti v tahu. Tyto hodnoty jsou vypsány v tab. 1-4.

Tab. 1-4 Ideální hodnoty nastavení parametrů tisku [16]

Orientace součásti	(°)	0
Úhel rastru	(°)	50
Šířka rastru	(mm)	0,2034
Vzduchová mezera	(mm)	-0,0025
Napětí v tahu	(Mpa)	36,86

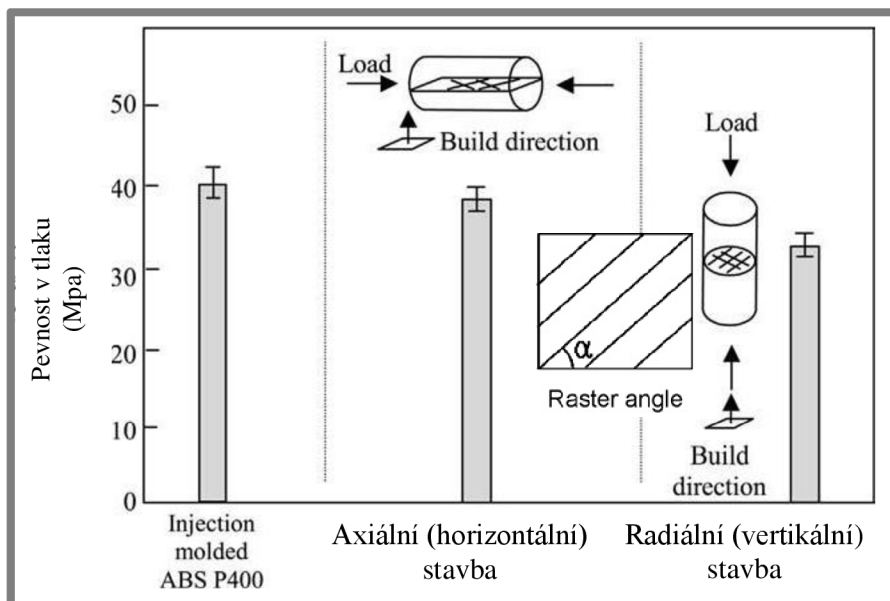
Podobné tahové zkoušky, zaměřené však na porovnání výsledných vlastností vytištěného objektu s mechanickými charakteristikami udávanými výrobcem materiálu, provedl W. C. Smith a kol. [17]. Ve svém článku publikoval, že mechanické vlastnosti objektu lze z 30–53 % ovlivnit orientací vláken a pro zkoušený materiál dosáhl shody s mechanickými vlastnostmi udávanými výrobcem jen z 36–63 %, což je značný rozdíl oproti výsledkům S. Ahna a kol. [14], který dosáhl 80% shody. Testy probíhaly s materiálem PC firmy Stratasys na stroji Stratasys Ventage SE FDM. [17]

C.S. Lee [18] se naopak zabýval tlakovým zatěžováním dílů vyrobených metodou FDM. Dospěl k závěrům dokazujícím lepší vlastnosti materiálu ABS v tlaku, než v tahu a publikoval, že v případě namáhání součásti na tlak je nejlepším řešením rovnání vláken ve směru tlakového namáhání. Výsledky ukazují, že příčně stavěný objekt odolá přibližně o 15 % menší tlakové síle, než axiálně stavěný objekt stejného rastru a potvrdil tak anizotropní povahu modelů vyrobených metodou FDM. Autor také porovnává maximalní možná zatížení u dílů vyrobených na práškové tiskárně metodou SLS a na tiskárně pracující na principu FDM, která dosahovala lepších výsledků. Následující obr. 1-21 ukazuje vzorky po testu tlakovým zatížením provedeným pro axiální a příčný směr stavby rastru.



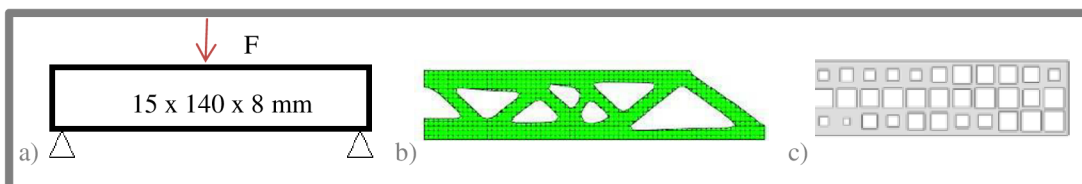
Obr. 1-21 Porušené vzory vlivem tlakové zátěže [14], [18]

U obou vzorků je patrná deformace ve formě odchylky od původní osy. U vzorku na obr. 1-21a můžeme pozorovat také delaminaci obvodových vláken, u kterých vlivem zatížení došlo k porušení krčků a následnému odtržení. Tlakovému namáhání se věnuje také S. Ahn a kol. [14]. Následující graf 1-6 ukazuje porovnání mechanických vlastností při zatěžování tlakem při různém směru stavění modelu za použití rastru výplně s hodnotami 45°/- 45°.



Graf 1-6 Pevnost v tlaku modelu s výplní 45°/-45° [14]

Základními parametry ovlivňujícími mechanické vlastnosti tisku jsou tedy orientace součástí na tiskové ploše, úhel a šířka rastru, překrytí vláken a teplota okolí. Tyto parametry ovlivňují kvalitu spojení vláken, pevnost součástí v tahu a také mechanické vlastnosti při namáhání na ohyb či tlak. Nastavením parametrů pro součásti namáhané na ohyb se zabývá B.H. Lee a kol. [19] či R. Rezaie a kol. [20], který navrhoval topologickou optimalizací nosníku zatěžovaného silou. Pro výrobu dílu optimalizoval nastavení hardwaru i softwaru tiskárny a dokázal díl upravit tak, aby finální výtisk byl lehčí, pevnější a přesnější. Původní nosník, jeho zatížení a tvary optimalizovaných součástí ukazuje obr. 1-22, dosažené hodnoty po a před optimalizací shrnuje tab. 1-5.



Obr. 1-22 Optimalizace nosníku: a) nosník; b) optimalizace CAE; c) optimalizace čtverci [20]

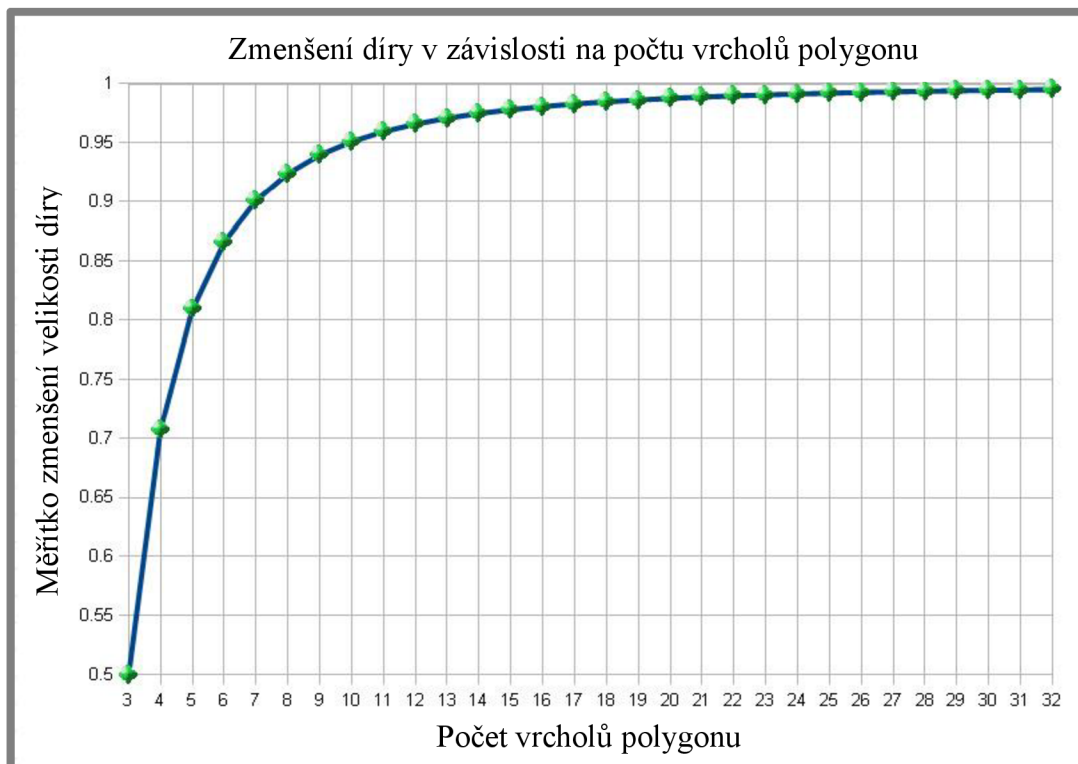
Tab. 1-5 Topologická optimalizace dílu [20]

Parametr	Objem (%)	Deformační energie (N·mm)
Původní	100	15
Optimalizace CAE	50	98,02
Optimalizace čtverci	53,68	118,3

Každá tištěná součást, pokud má být co nejlépe vytištěna a sloužit danému účelu, vyžaduje vlastní nastavení tiskových podmínek s ohledem na požadovanou funkci. Pro součásti, u kterých je vyžadována určitá přesnost či kladeny důrazy na výsledné mechanické vlastnosti nelze volit všeobecně doporučená nastavení parametrů tisku a očekávat ty nejlepší výsledky.

1.3.7 Vliv nastavení parametrů na rozměrovou přesnost

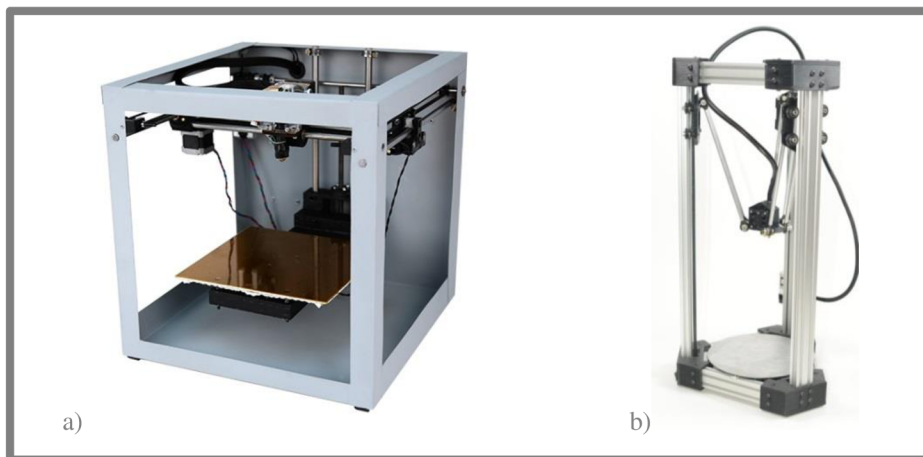
Volba parametrů tisku ovlivňuje nejen mechanické vlastnosti výtisku, ale také jeho rozměrovou přesnost a strukturu povrchu, která může být rozdílná v závislosti na úhlu natočení součásti a směru pokládání vláken. Velký vliv má také pozice umístění výtisku na tiskové ploše, jelikož stroj může vykazovat různé odchylky na různých místech tiskové plochy. Například pro stroj Stratasys Fortus 400mc se nejmenší odchylky nepřekračující hodnotu 0,1 mm vyskytují při úhlu rastru 90°. Tyto odchylky jsou největší při úhlech 0–50 a 135–180°, což je projevem systému pohybu, který jednotlivé tiskárny využívají. Pro Stratasys FDM 1650 byly optimální podmínky pro tisk minimalizující deformace v délce objektu stanoveny na tloušťku vrstvy 0,254 mm, orientaci objektu 0°, maximální úhel rastru 60°, šířku rastru 0,4564 mm a maximální hodnotu překrytí vláken 0,008 mm. Pro minimalizaci deformací v šířce je doporučen úhel rastru 30° a vzduchová mezera mezi vlákny 0,004 mm. Pro minimalizaci deformace výšky objektu je vhodné volit malou výšku vrstvy v ose Z a to 0,127 mm, orientaci součásti 0°, úhel rastru 0°, velkou šířku rastru 0,5064 mm a překrytí 0,004 mm. Jednotlivé charakteristiky ovlivňující rozměrovou přesnost se vztahují k danému stroji a právě používanému materiálu. Mezi faktory ovlivňující přesnost nevztahující se k danému stroji a ovlivňující především hodnoty průměru děr, které jsou menší než požadovaný rozměr, můžeme jmenovat tři následující. Prvním je smrštění materiálu při chladnutí, druhým je tendence materiálu zatékat při kruhovém pohybu tiskové hlavy do vnitřní strany objektu a třetím je způsob přípravy objektu k tisku ve formátu STL. Tento formát proloží válcovou díru polygonem, jehož vrcholy leží na správné velikosti díry, ale hrany, dle kterých se kalkuluje trasování tiskové hlavy, leží uvnitř. Pokud je požadován přesný rozměr, je nutné volit dostatečnou hustotu sítě polygonu. Vliv počtu vrcholů polygonu na výsledné zmenšení požadovaného rozměru díry ukazuje následující graf 1-7. [21] [22]



Graf 1-7 Vliv počtu vrcholů polygonu proloženého kružnicí na výsledný rozměr díry [23]

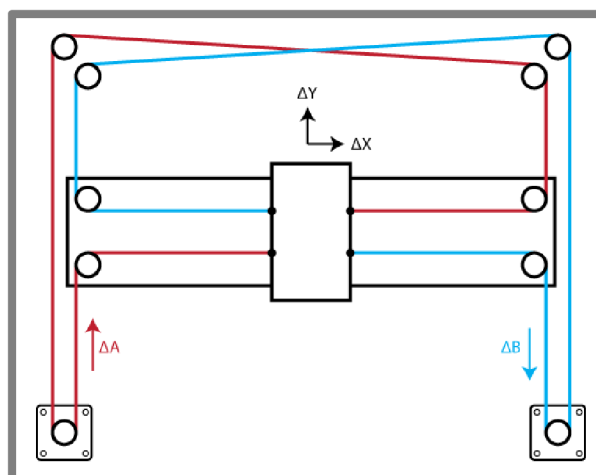
1.4 3D tiskárny

Na trhu se objevuje mnoho rozdílných typů 3D tiskáren využívajících k tisku metodu FDM. Tyto tiskárny lze rozdělit do dvou základních kategorií, a to na tiskárny standardního typu, pohybující se v kartézských souřadnicích a na tiskárny typu delta, využívající paralelní kinematický systém pohybu. Oba typy ukazuje následující obr. 1-23.



Obr. 1-23 Základní typy tiskáren: a) klasická tiskárna [24]; b) tiskárna typu delta [25]

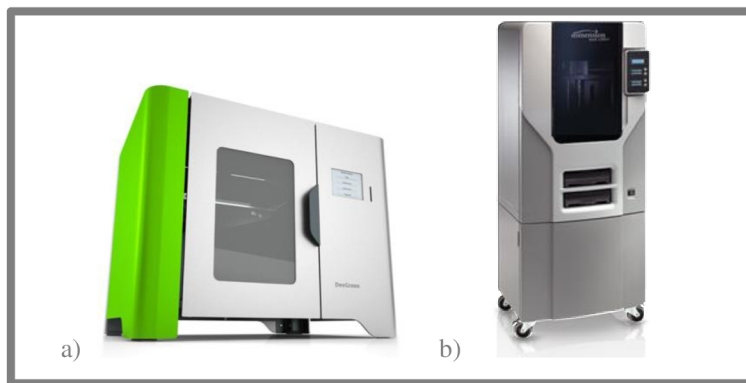
Delta tiskárny vyžadují k polohování tiskové hlavy tři synchronizovaných motorů, které jsou staticky uloženy. Nevýhodou těchto tiskáren je nutnost dvojnásobného rozměru tiskárny v ose Z. Nespornou výhodou jsou nízké setrvačné hmoty při pohybu a tedy možnost rychlejšího tisku. Některé z těchto tiskáren dosahují tiskových rychlostí až 350 mm/s. Standardní tiskárny využívají k pohybu v jedné ose vždy jeden motor nezávisle na ostatních. V některých případech dochází ke kombinaci tohoto typu tiskáren se systémem paralelního pohybu a to především v rovině XY. Zástupci kombinovaného pohybu jsou například systémy CoreXY, H-bot či Gantry. Tyto kombinované systémy umožňují redukcí pojízdných a setrvačných hmot, jelikož motory umožňující pohyb v rovině jsou uloženy staticky. Tyto tiskárny dosahují běžně rychlostí pohybu okolo 100 mm/s. Systém pohybu CoreXY je zobrazen na obr. 1-24.



Obr. 1-24 Systém CoreXY [26]

1.4.1 Rámová konstrukce

Nejlevnější tiskárny, mezi které patří Průša i3 či Mendel, jsou konstruovány z levných a dostupných součástí, jakými jsou závitové tyče v kombinaci s plastovými či dřevěnými díly. Tyto tiskárny však nezaručují dostatečnou přesnost při montáži a dostatečnou rigiditu při pohybu. Tiskárny střední třídy jsou vyráběny z plechů v kombinaci s plastovým designovým krytováním, což jsou z finančního hlediska ideální prvky pro velkosériovou výrobu. Mezi tyto tiskárny lze zařadit například Up!Mini či Flashforge. Průmyslové stroje jsou vyráběny z ocelového základního rámu doplněného o plastové či plechové krytování. Tyto díly zaručují dostatečnou tuhost a odolnost vůči vyšším teplotám, které se u profesionálních tiskáren vyskytují ve vyhřívané komoře tiskárny. Na obr. 1-25 je zobrazena česká tiskárna DeeGreen firmy Be3d a tiskárna Dimension firmy Stratasys.



Obr. 1-25 Tiskárny: a) Be3d DeeGreen [27]; b) Stratasys Dimension 1200es [28]

1.4.2 Pojezdové systémy

Mezi základní vedení pro pohyb v rovině XY patří lineární tyče s lineárními ložisky nebo pojezdové kladky pohybující se přímo po rámové konstrukci. K přesnějšímu vedení patří podepřené lineární tyče se zdvojenými lineárními ložisky či přesné lineární kolejnice s vozičky. Pro pohyb v ose Z se u nejlevnějších tiskáren využívá závitových tyčí a klasických metrických matic, u strojů střední třídy pak trapézových šroubů a v nejvyšší kategorii se využívá šroubů kuličkových.

1.4.3 Motory a přenos sil

Pro pohyb je využíváno především krokových motorů bez zpětné vazby. U nejpřesnějších a nejdražších modelů je pak využíváno motorů se zpětnou vazbou, což vyžaduje dražší elektroniku a složitější řídicí software. Dostatečnou přesnost tisku zajišťují krokové motory s délkou kroku $1,8^\circ$, výjimkou však nejsou motory s délkou kroku $0,9^\circ$. Pro řízení motorů je nutné použití driverů, které generují řídicí pulzy. Většina driverů umožňuje rozdělení celého kroku motoru na menší mikro-kroky. Nejčastěji se můžeme setkat s drivery schopnými rozdělit celé kroky na 1/16 a 1/32. Základní elektronika pro řízení tiskárny umožňuje kontrolu motorů s maximálním proudem do 2. A, jejichž statický moment se pohybuje v rozmezí 0,5–2,5 Nm. Nejčastěji používanou kombinací jsou motory s délkou kroku $1,8^\circ$, dosahující maximálního statického momentem 0,51 Nm při odběru 1 A, ve spojení s driverem schopným mikro-krokování 1/16.

1.4.4 Systém vyhřívání

Během tisku je potřeba kontroly celkem tří tepelných okruhů. Prvním okruhem, který musí obsahovat každá tiskárna je vyhřívání trysky. K vyhřívání trysky se využívá topných patron, které jsou schopny vyhřát trysku až na teplotu 350 °C. Běžně se používá topná patrona o výkonu 40 W s napájecím napětím 12 nebo 24 V. Druhým okruhem je vyhřívání tiskové podložky, které není nutnou součástí každé tiskárny, ale umožňuje lepší adhezi mezi tisknutým objektem a podložkou, a umožňuje tisk více druhů materiálů za podpory menších deformací objektu. K vyhřívání podložky je možno využít tepelných odporů, častěji se však využívá PCB nebo hliníková deska v kombinaci s tištěným plošným spojem, který slouží jako topný člen. Tiskové podložky jsou ve většině případů napájeny napětím 24 V. Třetím tepelným okruhem, je vyhřívání prostoru tiskové komory, využívané především u profesionálních průmyslových strojů. K vyhřívání komory dochází vlivem aktivního proudění vzduchu skrze topný člen do vyhřívání komory.

1.4.5 Tryska

Tryska je velmi důležitou součástí tiskárny, která přímo charakterizuje vzhled a kvalitu výtisku. Tryska musí mít dobré tepelné vlastnosti a zajišťovat dokonalé prohřívání komory pro tavení filamentu. Z tohoto důvodu se pro její výrobu nejčastěji využívá mosaz, dále pak ocel či měď. Při kontaktu taveniny plastového materiálu s mědí může dojít k jeho katalytickému rozkladu a proto je nutné povrch trysky dále upravovat. Dle tab. 1-6 můžeme pozorovat přibližně shodné vlastnosti mosazi a mědi, až na tepelnou vodivost. Při výrobě však dostává přednost mosaz, jelikož je cenově dostupnější a lehčí. [29]

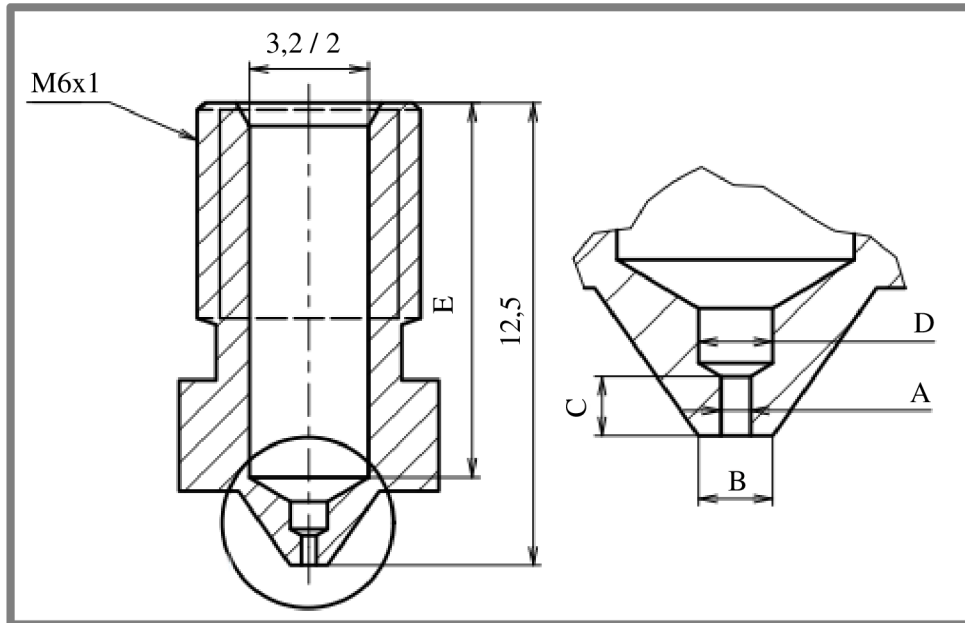
Tab. 1-6 Přehled vlastností materiálů pro výrobu trysky [30]

	Tepelná vodivost λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	Hustota ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Teplota tání T_m ($^{\circ}\text{C}$)	Měrná tepelná kapacita C ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
Měď	386	8900	1064	390
Hliník	237	2700	660	920
Mosaz	120	8400	850-920	385
Ocel	50	7850	1539	460

Výslednou tloušťku vlákna určuje výstupní průměr trysky. Mezi standardní výstupní průměry trysek patří velikosti v rozmezí 0,2–0,5 mm. Vstupní rozměry pro vlákno jsou pak přizpůsobeny jeho průměru. Obr. 1-26 popisuje základní rozměry a tvar trysky určené pro vlákno o průměru 1,75 mm a 3 mm. Následující tab. 1-7 pak doplňuje parametrizované rozměry pro požadované výstupní průměry roztaveného vlákna.

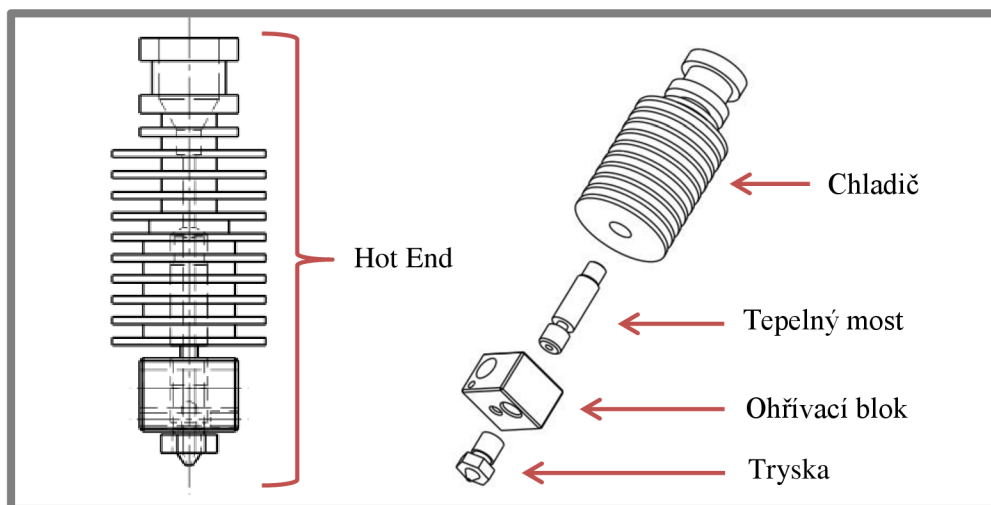
Tab. 1-7 Rozměry trysek [31]

A (mm)	B (mm)	C (mm)	D 3mm (mm)	D 1,75mm (mm)	E (mm)
0,25	0,63	0,50	1,00	1,00	10,10
0,30	0,75	0,60	1,00	1,00	10,10
0,35	0,88	0,70	1,00	1,00	10,10
0,40	1,00	0,80	1,50	1,50	10,10
0,60	1,50	1,20	3,20	2,00	N/A



Obr. 1-26 Parametry rozměrů trysky [31]

Tryska společně s dalšími součástmi tvoří část tiskárny nazývanou Hot End. Mezi tyto součásti patří tryska, ohřivač, tepelný most a chladič. Nejmodernějším typem je sestava zvaná J-head zobrazená na obr. 1-27, která je tvořená pouze kovovými díly a umožňuje tedy dosažení vyšších teplot tavení materiálu.

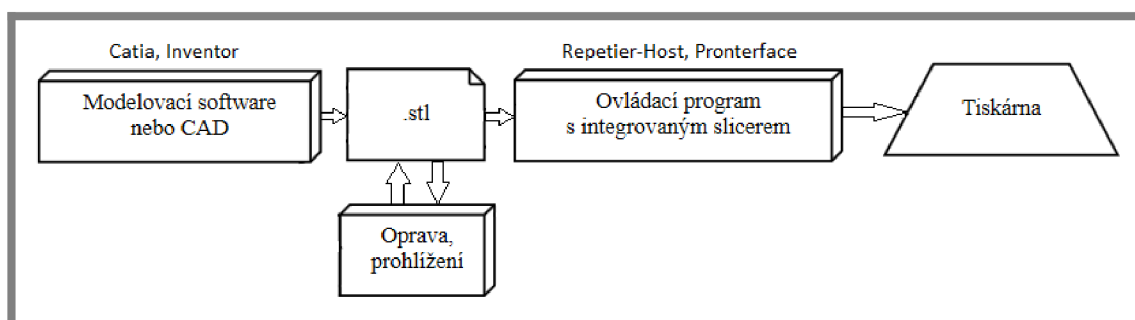


Obr. 1-27 Sestava J-head

Ohřivací blok je zahříván na požadovanou teplotu tepelným odporem a vedením předává teplo do trysky. Tryska předává teplo vláknu, které se taví a vlivem působící síly od podavače vlákna je protlačováno tryskou. Cílem je tavení vlákna v co nejkratším možném úseku, čemuž napomáhá tepelný most a chladič. Úkolem tepelného mostu je zabránit šíření tepla vedením směrem do chladiče, který odvádí zbytkové teplo do okolí a zabraňuje tak natavování filamentu ve větší vzdálenosti od trysky. Pokud dojde k zahřátí vlákna nad teplotu T_g v oblastech chladiče, způsobí plasticita materiálu jeho nepřesné dávkování, což se projeví na výsledné kvalitě výtisku.

1.4.6 Elektronika a softwarové řízení

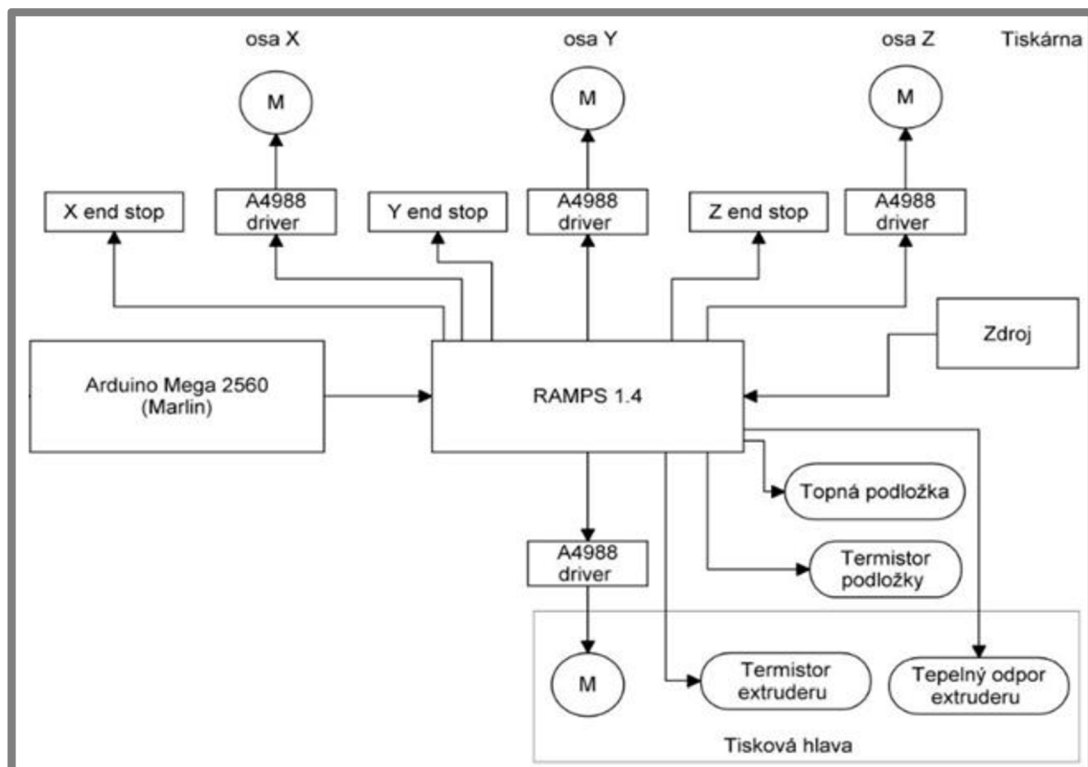
Prvním krokem před tiskem je příprava modelu, kdy je objekt, exportovaný z CAD programu ve formátu STL, softwarově rozřezán na jednotlivé vrstvy kolmo ke svislé ose Z a v každé z vrstev je generován systém pohybů, kopírující průmět objektu v dané rovině řezu. Systém pohybů je generován ve formě G-kódu, který je posléze softwarem zasílán do řídicí jednotky tiskárny. Mezi nejrozšířenější volně dostupný software, nabízený za poplatek i ke komerčnímu využití, umožňující přípravu pohybů a zajišťující komunikaci s tiskárnou patří Repetier-Host, KissSlicer, Cura či Pronterface. Tyto programy zasílají G-kód do řídicí jednotky tiskárny, která jej zpracovává pomocí implementovaného firmwaru. Schéma komunikace popisuje následující obr. 1-28.



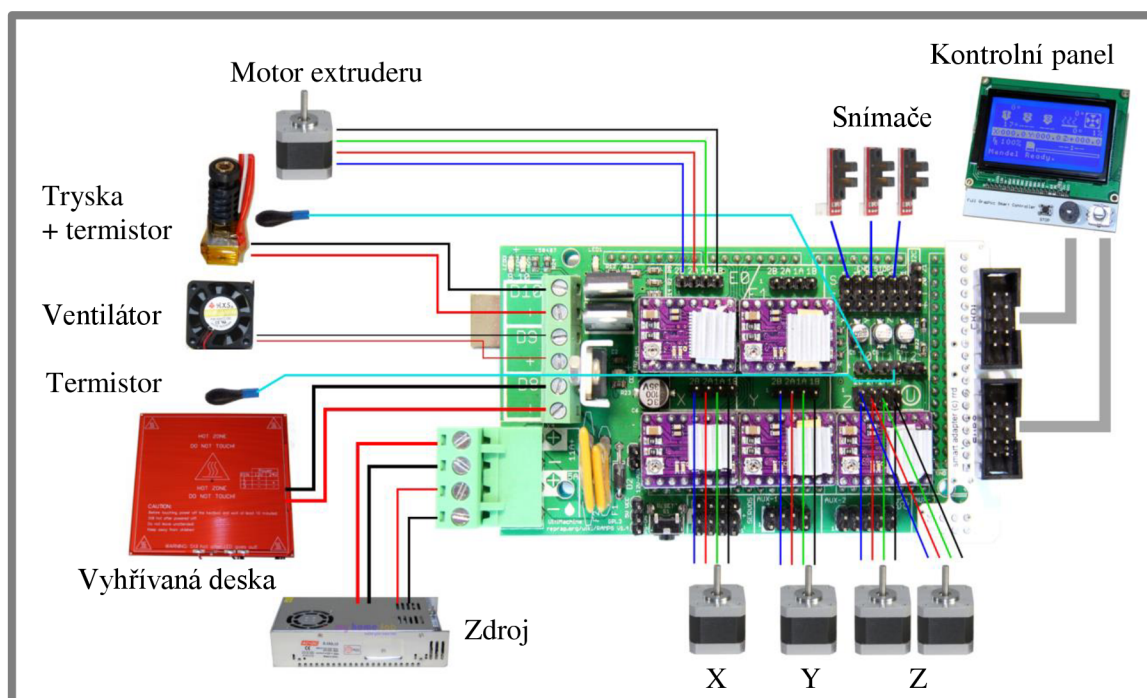
Obr. 1-28 Schéma přípravy objektu k tisku

Firmware obsahuje veškerá vnitřní nastavení tiskárny, jako je přesné krokování motorů, přepočty souřadnic, bezpečnostní teplotní limity, maximální délky drah pojezdů atd. Volně dostupný firmware, který lze podobně jako software za poplatek využít i komerčně patří Repetier, Marlin, Sprinter či Teacup. Řídicích jednotek se na trhu objevuje celá řada, z nichž nejpoužívanější je kombinace Arduina řady Mega 2560 a nadstavby RAMPS. Mezi další řídicí jednotky patří Rumba, Melzi či Rambo. Spojení mezi softwarem PC a firmwarem řídicí jednotky je nejčastěji uskutečněno pomocí USB kabelu. Začíná se však objevovat i bezdrátová komunikace skrze bluetooth či wi-fi. Schéma zapojení jednotlivých prvků tiskárny pomocí Arduina Mega 2560 a jeho nadstavby RAMPS popisuje obr. 1-29. Reálný pohled na jednotlivé součásti a jejich zapojení pro tiskárnu s jednou tryskou, vyhřívanou tiskovou podložkou a kontrolním panelem pak poskytuje obr. 1-30.

Mezi důležitou elektroniku patří koncové spínače umožňující podobně jako u CNC strojů nastavení přesné polohy počátečního bodu, který slouží jako referenční bod k určení počátku souřadnicového systému. Spínače se využívají mechanické či optické. Nespornou výhodou disponují snímače optické, u kterých je snímání realizováno volným průchodem clonky mezi optický snímač a diodu. Tento spínač je výhodný zejména při vyšších rychlostech najíždění do nulové pozice, jelikož vlivem setrvačných hmot při těchto rychlostech může u mechanického spínače dojít k nárazu a jeho zničení. Mechanické spínací členy jsou také omezeny určitým počtem cyklů.



Obr. 1-29 Blokové schéma zapojení jednotlivých prvků tiskárny



Obr. 1-30 Grafické znázornění elektronických prvků a jejich zapojení [32]

2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

2

2.1 Analýza problému

2.1

Rešeršní část práce ukazuje, že požadovaný výsledek 3D tisku je výsledkem mnoha daných či nastavitelných parametrů, jakými jsou například způsob zpracování souborů STL, výška nanášené vrstvy, struktura výplně, tvar vytlačovaného vlákna, rychlost pohybu tiskové hlavy či typ systému pohybu tiskárny. Jedním z nejdůležitějších parametrů je teplota tavení materiálu, podložky a vyhřívané komory. Současná zařízení umožňující tisk metodou FDM jsou zaměřená na jednoduché a uživatelsky přívětivé ovládání s přednastavenými parametry tisku a minimální možností jejich úpravy. Pro vědecké zkoumání jsou tedy tato zařízení značně limitována, ať už omezenými možnostmi softwarového natavení, nedostatečným hardwarovým vybavením či nemožností tisku více druhů materiálů. Na Ústavu konstruování i na trhu chybí zařízení umožňující testování nových druhů materiálů, s možností uživatelského nastavení všech parametrů zmíněných v rešeršní části a zkoumání jejich vlivu na výsledek tisku. Výsledkem tisku se rozumí pohledová kvalita povrchu, rozměrová přesnost, velikost deformací, mechanické vlastnosti a kvalita spojení vláken. Takové zařízení je potřeba navrhnout, sestavit a otestovat jeho funkčnost.

2.2 Cíl práce

2.2

Cílem práce je konstrukce 3D tiskárny pro materiály s vyšší pevností umožňující zkoumání vlivu nastavení parametrů tisku na jeho výsledek. Specifické požadavky kladené na schopnosti a dovednosti tohoto zařízení jsou následující:

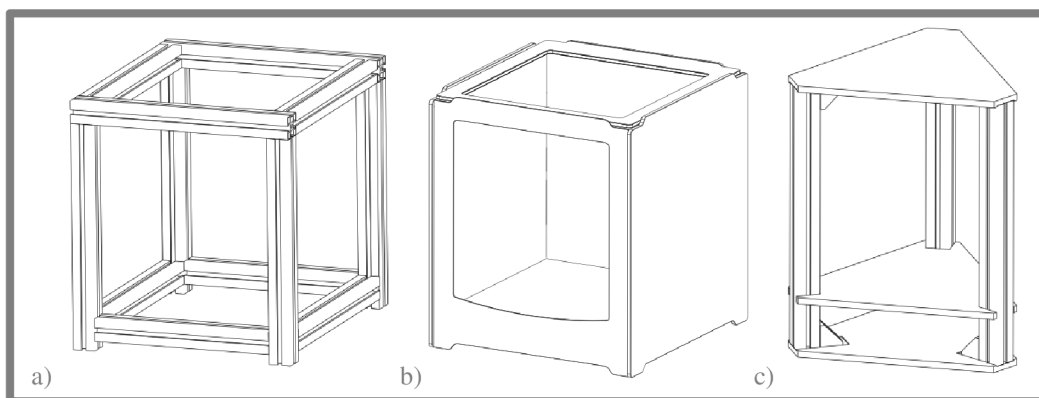
- technologie FDM
- materiál ABS a PC
- 2 vyhřívané trysky pro stavbu ze 2. materiálů
- vyhřívaná základní deska
- tloušťka nanášené vrstvy 0,15–0,5 mm
- pracovní prostor o průměru min. 150 mm a výšce 150 mm

3 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

Tato kapitola navrhuje základní možnosti řešení konstrukce rámu a systému pojezdů. Dále se zaměřuje na návrh extruderového systému k vhánění filamentu do trysky a izolaci vyhřívané komory. Závěrem je vybrána a komentována finální koncepce základních konstrukčních částí tiskárny.

3.1 Varianty rámové konstrukce

Konstrukční materiál a typ konstrukce používaný pro levná zařízení není vhodným pro tuto tiskárnu. V úvahu připadá železná nebo hliníková základní rámová konstrukce ve formě svařovaných profilů, ohýbaných plechů či jiných rigidních součástí. Dílčí návrhy konstrukce rámu zobrazuje následující obr. 3-1.



Obr. 3-1 Rámová konstrukce: a) tvarové profily; b) řezané plechy; c) delta tiskárna

3.1.1 Profilová konstrukce

Konstrukční hliníkové profily jsou dostupným materiálem využívaným například ke konstrukci výrobních linek a přesných přípravků. Zajišťují dostatečnou tuhost a snadnou montáž pomocí spojovacích úhelníků, či přímým šroubovým spojem. Tento návrh počítá s rigidním rámem sloužícím jako pevný bod pro montáž všech dílů sestavy, včetně lineárního vedení. Velkou výhodou je možnost přidání konstrukčních komponent bez nutných obráběcích operací (vrtání), přes drážku v profilu a jejich snadná případná demontáž. Návrh rámu ukazuje obr. 3-1a.

3.1.2 Plechová konstrukce

Druhou možností je spojení laserem řezaných plechů do podoby rámu zobrazeného na obr. 3-1b. Řezané plechy mají výhodu možnosti kreativního designu a tvorby různých tvarových prvků. Tato varianta však musí počítat s dodatečným ohýbáním plechů a řešením přesného uložení lineárního vedení. Případné přidávání konstrukčních komponent je podmíněno vrtáním do plechových částí s nutností demontáže vrtaného prvku.

3.1.3 Rám Delta

Tato varianta počítá s typem tiskárny nazývaným Delta, která vyžaduje konstrukci s většími rozměry v ose Z. Celkem tři základní hliníkové profily, či jiný konstrukční materiál, ve vrcholech trojúhelníkové podstavy tvoří v kombinaci s řezanými plechy rámovou konstrukci této tiskárny. Návrh je zobrazen na obr. 3-1c.

3.2 Varianty systému pohybu

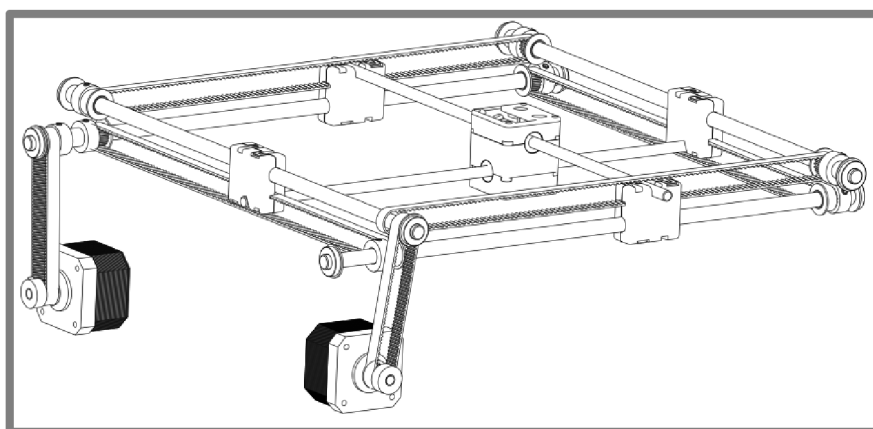
3.2

Systém pohybu všech koncepčních návrhů je řešen statickým uložením motorů z důvodu redukce hmotnosti v pohybu. Jednotlivé varianty jsou také osazeny přesným lineárním vedením ve formě kolejnic s vozíčky či lineárními tyčemi.

3.2.1 Klasický statický kartézský systém

3.2.1

Dva motory, uložené staticky, pohání nezávisle na sobě každý jednu z os v rovině XY. Přenos sil je realizován pomocí celkem šesti ozubených řemenů a systému hřídelů v podobě lineárních tyčí osazených řemenicemi. Pohyblivá platforma je polohována pomocí dvou průchozích lineárních tyčí. Tento systém je optimální pro platformy s nízkou hmotností, kde nehrozí ztráta kroku jednotlivých motorů při rychlejšímu pohybu. Schéma systému reprezentuje obr. 3-2.

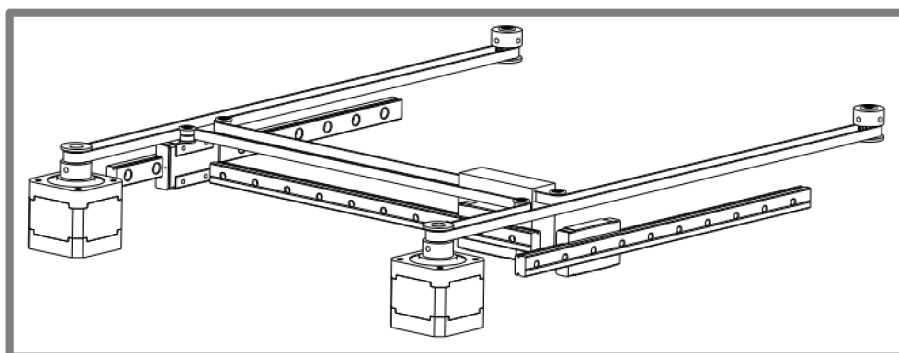


Obr. 3-2 Varianta systému pohybu 1

3.2.2 Paralelní statický systém H-bot

3.2.2

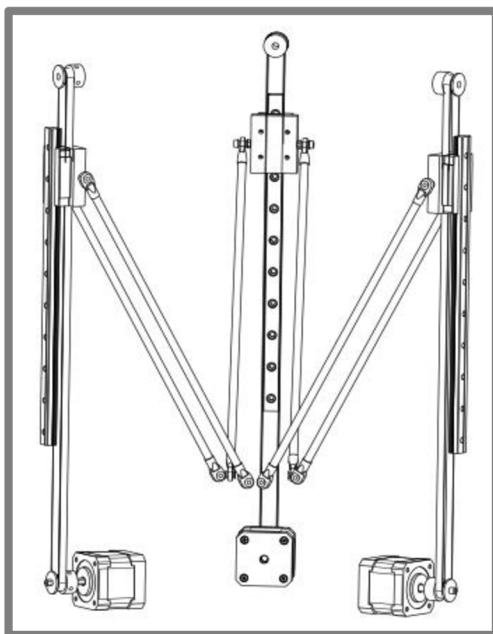
Systém zobrazený na obr. 3-3 využívá dvou staticky uložených motorů a jejich synchronizovaného otáčení. K přenosu sil je využit jeden řemen, jehož konce jsou pevně spojeny s pohyblivou platformou, která je unášena na lineárním vedení ve formě lineárních kolejnic a vozíků. Běžně má každá osa svůj hnací motor, což znamená, že veškerou hmotnost pohyblivých částí vždy uvádí do pohybu právě jeden motor. To však neplatí u tohoto systému pohybu, jehož výhodou je rozložení sil nutných k uvedení platformy do pohybu mezi dva motory. Je tedy možné dosáhnout vyšších rychlostí a zrychlení, u kterých by při klasickém systému pohybu hrozila ztráta kroku.



Obr. 3-3 Varianta systému pohybu 2

3.2.3 Vertikální systém delta

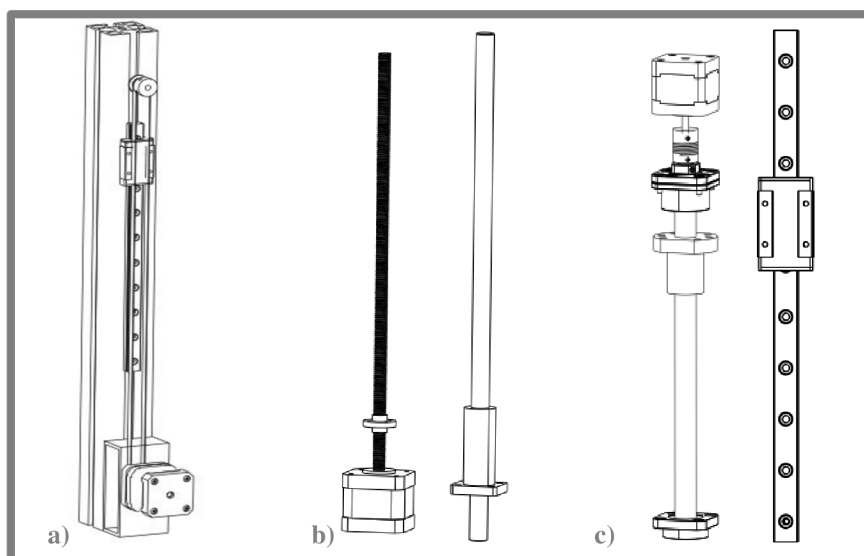
Systém pohybu určený pro delta tiskárny využívá tři staticky uložené motorů a tři lineárních kolejnic s vozíčky umístěných vertikálně. Vozíčky jsou napojeny na celkem šest ramen pohybující platformou. Tento systém umožňuje pohyb ve všech třech osách a vyžaduje vzájemně synchronizovaný pohyb všech tří motorů. Návrh systému ukazuje následující obr. 3-4.



Obr. 3-4 Varianta systému pohybu 3

3.2.4 Osa Z

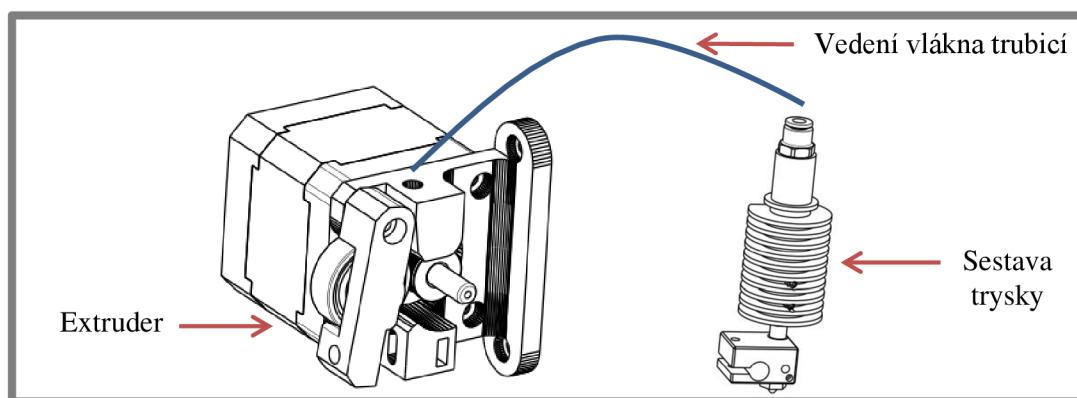
K pohybu v ose Z se nabízí tři základní varianty znázorněné na obr. 3-5. Jako přenašeč síly je možné použít řemen nebo trapézový či kuličkový šroub. Tyto varianty jsou vždy doplněny o lineární vedení ve formě lineární kolejnice nebo vodící tyče a to z důvodu zaručení dostatečné tuhosti při pohybu.



Obr. 3-5 Osa Z: a) řemen; b) trapézový šroub s vodící tyčí; c) kuličkový šroub s kolejnicí

3.3 Extruderový systém

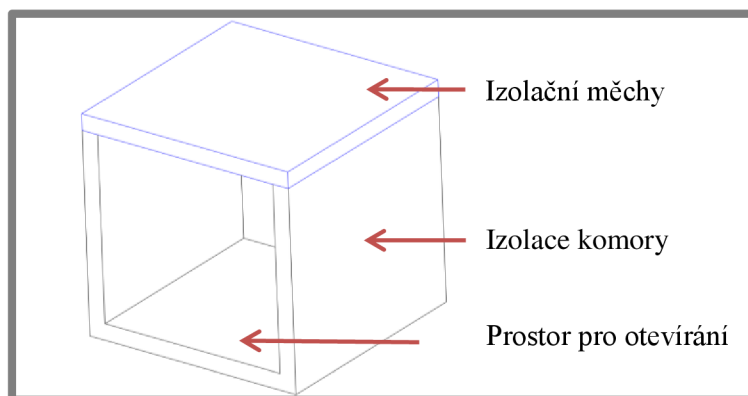
Princip funkce systému vhnání vlákna spočívá ve vyvolání jednostranného tlaku na vlákno, procházející okolo extruderového kola s drážkováním. Drážky na kole vlivem tlaku způsobí jeho zařezání do povrchu vlákna a tím je zaručena dostatečná adheze vlákna a extruderového kola bez možného prokluzu. Vlivem pohybu hřídele motoru dojde k posouvání vlákna skrze trubici do trysky a jeho následnému vytlačení na tiskovou plochu. Návrh extruderového systému počítá se spojením trysky a extruderu pomocí teflonové trubice, zajišťující vedení vlákna. Při konstrukci tiskárny bude nutné použít co nejkratší délku této trubice. Jednotlivé díly ke konstrukci extruderu budou vyrobeny metodou FDM na školních tiskárnách. Možné konstrukční řešení zobrazuje následující obr. 3-6.



Obr. 3-6 Extruderový systém

3.4 Izolace komory

Izolace komory musí být volena s ohledem na vnitřní požadovanou teplotu, jejíž předpokládaná horní hranice se pohybuje okolo 150 °C. Vzhledem k těmto teplotám je nutné umístit co možná nejvíce konstrukčních prvků tiskárny mimo oblast těchto teplot. Vnější izolovaná komora, do které by bylo možné tiskárnu vložit, může dosahovat maximální teplotní hranice 60 °C, což je dostatečné pro materiály jako PLA, nikoliv však pro materiál ABS či PC. S ohledem na tyto fakta je dále nutné se zabývat vnitřním izolačním systémem, ve kterém se bude pohybovat pouze tisková plocha a tryska. Následující obr. 3-7 zobrazuje základní návrh vnitřní izolační komory, který je možné vložit dovnitř rámové konstrukce. Návrh počítá s krycími měchy v horní části komory, izolací po stranách a prostorem pro otevírání.



Obr. 3-7 Návrh izolační komory

3.5 Zhodnocení a výběr optimální varianty

Nejprve je nutné zvolit preferovaný typ tiskárny s ohledem na požadavky kladené na její funkci. Z rešeršní části je patrný značný vliv teploty okolí na výsledek tisku a tento parametr by u experimentálního zařízení neměl být zanedbán. Je potřeba zvolit takový typ tiskárny, který umožní konstrukci vyhřívané komory a všech náležitostí s tím spojených. V úvahu je potřeba vzít montáž systému izolace a následně všech konstrukčních komponent, které by měly být umístěny mimo tuto komoru, stejně jako systém pohybu a systém trysek vyžadující chlazení. Delta tiskárny (Obr. 1-23b, Obr. 3-1c) dosahují vysokých rychlostí tisku, ale jejich nevýhodou jsou rozměry v ose Z a s tím spojená nutnost většího výkonu při případném vyhřívání. Při vysoké výšce se teplo akumuluje v horní části a docházelo by tak k velkému rozdílu teplot v komoře. Další nevýhodou je komplikovanější izolace, jelikož je potřeba izolovat tři pojízdné vozíky (Obr. 3-4) a horní část tiskárny, ve které dochází k pohybu nosných ramen ve všech směrech. Největší komplikací je však s dopravou tiskového vlákna k trysce. Tiskárny typu delta tiskne na pevnou podložku, která se nachází ve spodní části tiskárny a vlákno tedy prochází přes celou tiskovou komoru až k trysce. V případě materiálu ABS, kdy je komora běžně temperovaná na teplotu okolo 75 °C by docházelo k měknutí vlákna již před tryskou a ke ztrátě vzpěrné stability vlákna, což by mělo za následek znemožnění tisku. Vzhledem k těmto faktům připadá v úvahu jen varianta klasické tiskárny pohybující se v kartézských souřadnicích (Obr. 1-23a).

Této tiskárně vyhovuje navrhovaný rám z obr. 3-1a, a ideálním materiálem se zdají být hliníkové profily Alutec, zajišťující rychlou a snadnou montáž. Další výhodou těchto profilů je modulárnost a snadná montáž doplňkových systémů do drážek tohoto profilu. Pevný svařovaný rám není z hlediska vysoké hmotnosti a pořizovací ceny vhodným řešením, stejně tak rám z ohýbaných plechů, který je finančně výhodný pouze pro velkosériovou výrobu.

V případě pojezdů je nutné brát ohled na jejich celkovou životnost a namáhání při pohybu. Vedení pomocí kladek v přímém dotyku s hliníkovým profilem není ideální, jelikož dochází k rychlému poškození vrchní vrstvy hliníku v kontaktu s kladkami a z tohoto důvodu nebylo toto řešení mezi jednotlivými variantami ani uváděno. Mezi uvažovaná řešení patří lineární tyče s lineárními ložisky a lineární kolejničky s vozíčky. Kolejnice s vozíčky disponují oproti druhé variantě menší vůlí v kontaktu a rigidnějším vedením. Dovolují taktéž vyšší rychlosti, vyšší teplotní zatížení a při správném mazání dosahují delší životnosti. I přes vyšší pořizovací cenu je toto lineární vedení zvoleno jako nejvhodnější. Stejně lineární vedení je vhodné zvolit také v ose Z a to v kombinaci s kuličkovým šroubem zajišťujícím z uváděných variant nejlepší přesnost a nejplynulejší chod (Obr. 3-5c).

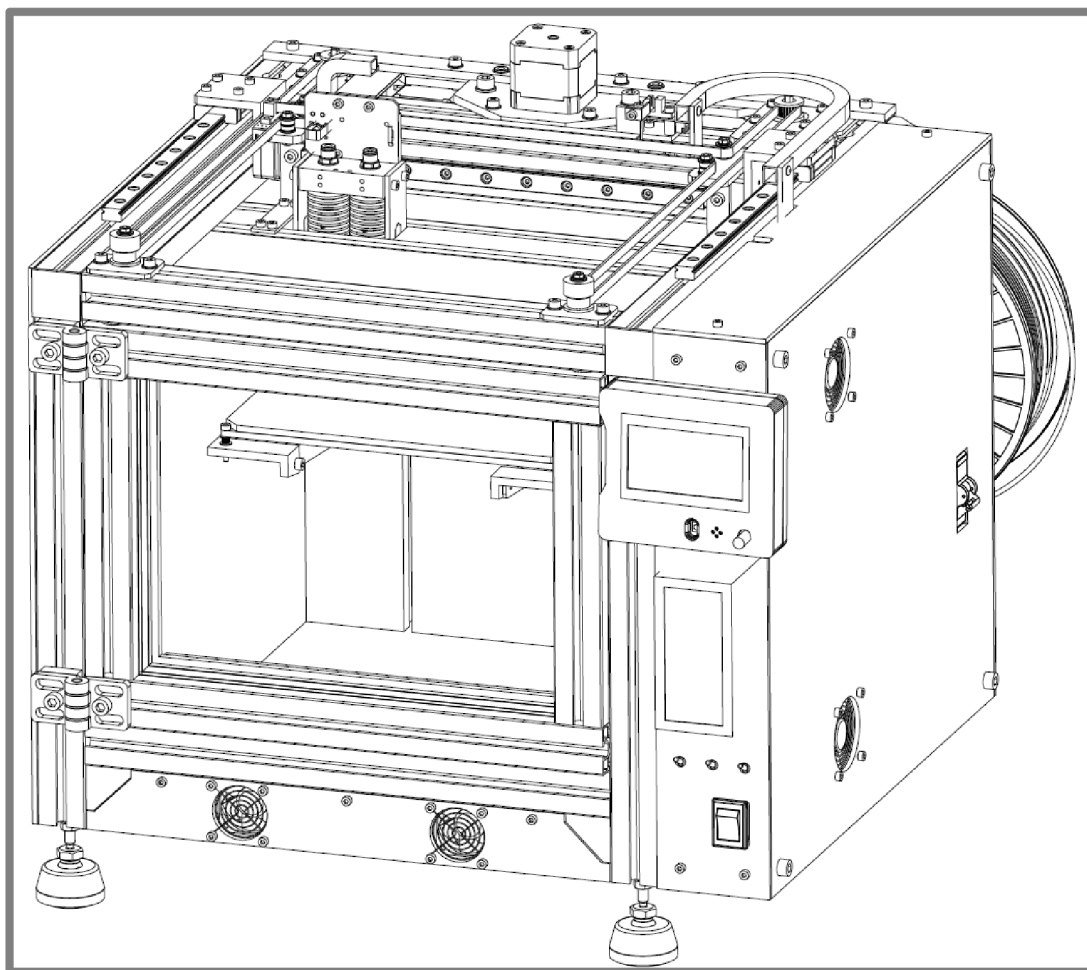
Dále je nutné zvážit způsob dopravování vlákna k trysce a systém extruderu, který vlákno vsouvá do trysky mimo vyhřívanou komoru. Jelikož tiskárna musí obsahovat dvě trysky, a vzhledem ke snaze minimalizovat hmotnost pojízdných částí není vhodné zvolit přímý způsob vtačování vlákna motorem umístěným v bezprostřední blízkosti trysky, zdá se být vhodnou volbou doprava vlákna na dálku skrze teflonovou trubici. Trubice může být uchycena jedním koncem v systému extruderu a druhým v trysce přes standardní pneumatický konektor.

Teflonový materiál trubice odolává vysokým teplotám, minimalizuje tření mezi dopravovaným vláknem a její stěnou a v případě dostatečně malého vnitřního průměru zabrání porušení vzpěrné stability vlákna vlivem sil působících od vtlačování.

K izolaci vyhřívané komory bude potřeba lehký a dobře obrobitelný izolační materiál, jakým je například Promasil odolávající teplotě až 1000 °C v kombinaci s extrudovaným polystyrenem, schopným odolávat teplotám do 80 °C. Nutné je zabránit úniku tepla horní částí komory v rovině XY, kde dochází k pohybům tiskové hlavy ve všech směrech. Řešením by mohl být systém čtyř krycích shrnovacích měchů umožňujících volný pohyb tiskové hlavy v této rovině a zároveň zajišťující jistou izolaci před únikem tepla z komory. S ohledem na predikci vyšších teplot je potřeba volit vhodný materiál měchů, kterým může být například skelné vlákno. Dobrou izolaci musí zajistit také dveře tiskárny, které nejen že zabezpečí izolaci vnitřních teplot, ale také zpřístupní tisknutelný prostor a zaručí dobrou viditelnost objektu při tisku. Tyto požadavky splňuje průhledná skleněná izolace předních dveří ve formě dvou kalených skel se vzduchovou mezerou. Osvětlení komory lze realizovat pásem LED diod umístěným ve vzduchové mezeře mezi skly.

4 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

3D tiskárna je komplexním strojem obsahujícím přibližně 750 součástí od více než 30. různých dodavatelů. Jejich základní přehled a ceny jsou součástí přílohy této práce. Při řešení této práce bylo potřeba rozdělit konstrukci do jednotlivých sekcí, které se postupně zabývají konstrukčními prvky, řídicími prvky, elektronikou, firmwarem, softwarem, kalibrací a testováním. Finální podobu konstrukčního řešení tiskárny ukazuje obr. 4-1.



Obr. 4-1 Konstrukční řešení tiskárny

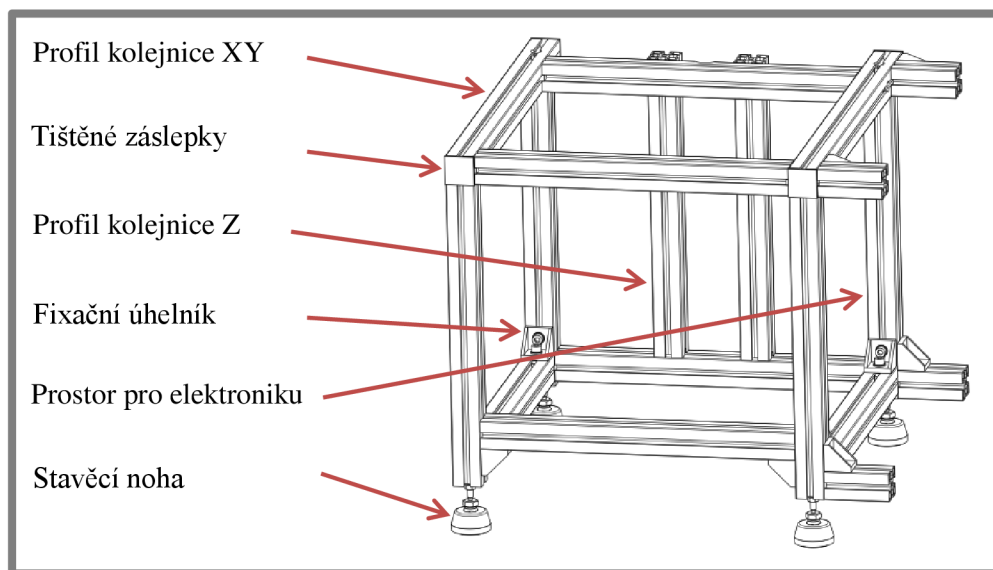
4.1 Konstrukce

Tato kapitola popisuje základní prvky konstrukčního řešení tiskárny a uvádí základní schémata jejich řešení. Podrobné výkresy jednotlivých prvků a sestav lze nalézt ve výkresové dokumentaci nebo na podrobných fotografiích, které jsou součástí přílohy.

4.1.1 Rám tiskárny

Konstrukce rámu je provedena z hliníkových profilů firmy Alutec o rozměrech příčného průřezu (30 x 30) mm. Firma Alutec nabízí řezání profilů na požadovanou délku s přesností 0,1 mm, což je pro rámovou konstrukci dostatečná přesnost. K fixaci jednotlivých profilů jsou využity spojovací úhelníky a fixační spojky zajišťující správnou pozici bez možnosti natočení profilu v ose šroubového spoje.

Fixační spojky jsou vyrobeny metodou FDM na školních tiskárnách, stejně tak jako záslepky profilu použité v místech jeho řezu. Rám je dále vybaven stavěcími nožkami umožňujícími vyrovnání nerovností pracovního stolu, na kterém bude tiskárna umístěna. Tato profilová konstrukce by měla zaručovat dostatečnou stabilitu i pro přímou montáž lineárního vedení, jelikož se tyto profily využívají mimo jiné i ke konstrukci rámu přesných optických, pájecích či šroubovacích strojů v automobilovém průmyslu. Celý rám je konstruován s ohledem na zajištění přesné polohy umístění lineárního vedení a minimalizaci rozměrových chyb při výrobě i montáži. Navržený rám je zobrazen na obr. 4-2.



Obr. 4-2 Konstrukce rámu tiskárny

4.1.2 Pojezdový systém osy Z

Zadání práce požaduje možnost tisku s tloušťkou nanášené vrstvy v ose Z v rozmezí 0,15-0,5 mm. Této požadované hodnoty může být dosaženo ozubeným řemenem nebo trapézovým či kuličkovým šroubem. S ohledem na dlouhou životnost, přesnost a opakovatelnost požadované polohy byl zvolen pohyb pomocí kuličkového šroubu. Pro základní výpočty vhodnosti daného typu šroubu předpokládáme standardně využívaný krokový motor s krouticím momentem 0,5 Nm a driverem schopným mikro-krokování 1/16. Motor má základní krok 1,8 °, což odpovídá 200 krokům na jednu otáčku rotoru. Použitý driver je schopen každý krok rozdělit do 16. mikro-kroků, což je v celkovém součtu 3200 kroků na jednu otáčku. Při použití nejdostupnějšího a cenově přijatelného kuličkového šroubu se stoupáním 5 mm jsme tedy schopni na jeden krok teoretického posuvu v ose Z o 0,0016 mm. Na minimální požadovanou hodnotu posuvu 0,15 mm je tedy potřeba 96 kroků, což odpovídá 6. celým základním krokům. Zvolený kuličkový šroub se stoupáním 5 mm plní požadavky na něj kladené a umožní tisk i s mnohem menšími hodnotami posuvu v ose Z, než požaduje zadání. Základní výpočty počtu kroků a hodnot posuvů uvádí rovnice (3) až rovnice (5).

Celkový počet kroků potřebných na posuv v ose Z o vzdálenost 1 mm:

$$Z_k = \frac{k \cdot s_m}{Z_d} = \frac{200 \cdot 16}{5} = 640 \text{ kr.} \quad (3)$$

Minimální rozlišitelná vzdálenost pohybu na jeden krok:

$$Z_{min} = \frac{1}{Z_k} = \frac{1}{640} = 0,001\,563 \text{ mm} \quad (4)$$

Posuv osy Z na jeden celý základní krok motoru:

$$Z_c = Z_{min} \cdot s_m = \frac{s_m}{Z_k} = \frac{16}{640} = 0,025 \text{ mm} \quad (5)$$

kde:

Z_k		je počet kroků systému potřebných k posuv v ose Z o 1 mm
k		- počet celých základních kroků motoru na 1 otáčku rotoru
s_m		- počet mikro-kroků driveru motoru
Z_d	mm	- stoupání kuličkového šroubu
Z_{min}	mm	- minimální posuv osy Z na jeden krok
Z_c		- posuv osy Z na jeden celý základní krok

Pro konstrukci pojezdu osy Z byl tedy zvolen kuličkový šroub o průměru 16 mm se stoupáním 5 mm. Tento šroub je uváděn do pohybu krokovým motorem s označením SX17-1005 s úhlem základního kroku $1,8^\circ$ a dosahujícím statického krouticího momentu 0,51 Nm. Kuličkový šroub je vsazen do standardizovaných koncových přírub typu FK12 a FF12, které jsou skrze montážní příruby dále pevně spojeny s rámem. Pohyblivým členem této osy je kuličková matice pevně spojená s domkem, sloužícím jako člen pro montáž pojízdné desky. Vzhledem k principu metody FDM, kdy dochází k posuvu v ose Z pouze před začátkem tisku nové vrstvy, zde není předpoklad velkých rychlostí a zrychlení. Zrychlení je softwarově omezeno na 10 mm/s a lze očekávat maximální rychlosti pohybu této osy okolo 25 mm/s a to jen při nájezdu do nulové polohy. Rychlost odpovídá 300. otáčkám šroubu za minut. Pro ověření, zda tato rychlost nepřekračuje dovolené maximální otáčky, byl proveden výpočet kritických a maximálních dovolených otáček šroubu, uvedený v rovnicích (6–7).

Kritické otáčky šroubu [33]:

$$n_k = f_{nk} \cdot \frac{d_2}{l_n^2} \cdot 10^7 = 1,22 \cdot \frac{16}{235^2} \cdot 10^7 = 3\,534,63 \text{ min}^{-1} \quad (6)$$

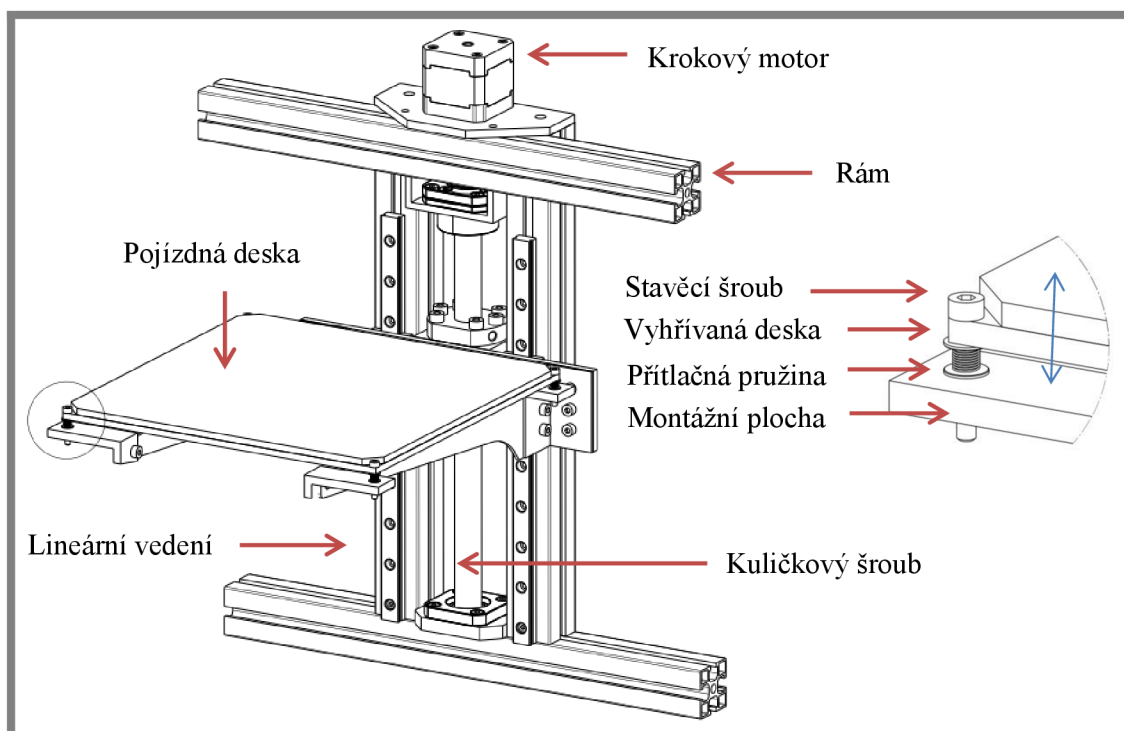
Maximální dovolené otáčky šroubu [33]:

$$n_{max} = 0,8 \cdot n_k = 0,8 \cdot 3\,534,63 = 2\,827,70 \text{ min}^{-1} \quad (7)$$

kde:

n_k	mm^{-1}	jsou kritické otáčky šroubu
f_{nk}		- koeficient uložení šroubu
d_2	mm	- průměr šroubu
l_n	mm	- vzdálenost mezi ložisky uložení šroubu
n_{max}	mm^{-1}	- maximální dovolené otáčky šroubu

Výpočet ukazuje rezervu mezi požadovanými a dovolenými otáčkami. Dle informací od prodejce je tato sestava kuličkového šroubu, při použití krokového motoru s krouticím momentem 0,5 Nm, schopna pohybovat s hmotností 100 N rychlostí 100 mm/s při zrychlení 20 mm/s. Maximální předpokládaná hmotnost všech pohybujících se součástí včetně modelu na tiskové ploše je v našem případě 5 kg. Tato hmotnost je 2x menší než možné zatížení krokového motoru při rychlosti 100 mm·s⁻¹ udávané výrobcem. Vzhledem k předpokladu nízké hmotnosti pohybujících se součástí a posuvu nepřekračujícího rychlost 25 mm/s, není potřeba dále počítat krouticí momenty motoru, maximální rychlosti a zrychlení. Tento systém je schopen přenášet pouze sílu působící v ose kuličkového šroubu a je tedy potřeba podpůrného vedení, které zaručí dostatečnou stabilitu a bude schopno přenášet síly a momenty působící i mimo osu. Tuto funkci zastává lineární vedení v podobě dvou podpůrných kolejnic MGN12R s vozíky MGN12H. Lineární vedení je montováno přímo na rámovou konstrukci a dále je propojeno nosnou deskou s domkem kuličkové matice. Nosná deska slouží jako platforma pro uchycení nosných ramen tiskové podložky, které dále slouží k montáži fixačních úhelníků tiskové podložky. Tiskovou podložku je možné kalibrovat do roviny pomocí čtyř rohových nastavovacích šroubů doplněných o pružiny. Pružiny slouží jako přitlačný člen desky do výchozí pozice a zároveň jako pojistka v případě špatné kalibrace a překročení maximálního možného posuvu v ose Z. V případě nechtěného překročení maximálního posuvu v této ose a následnému nárazu trysky do desky dojde ke stlačení pružin a následnému posuvu tiskové plochy přibližně o 5 mm ve směru pohybu trysky. Tímto posunem lze zabránit případnému poškození tiskové plochy vlivem nárazu způsobeným špatnou kalibrací. Kompletní sestavu konstrukčních prvků pojezdu osy Z zobrazuje obr. 4-3, systém kalibrace plochy tiskové podložky pomocí pružin a kalibračních šroubů pak detailní pohled.



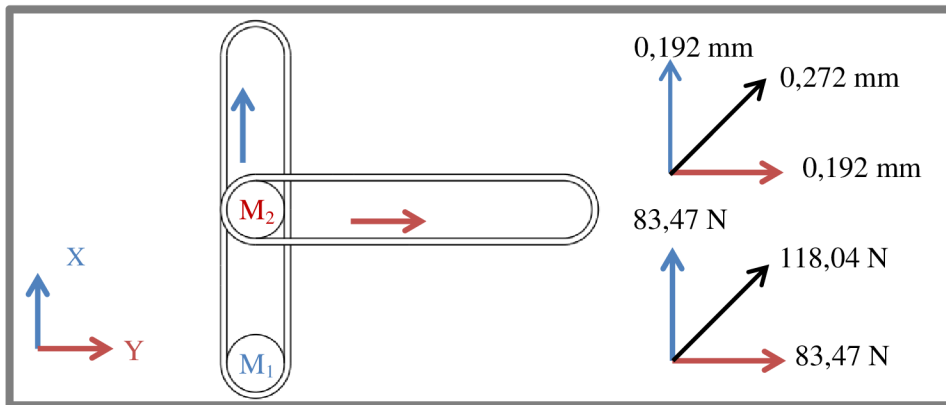
Obr. 4-3 Konstrukční řešení pojezdu osy Z a kalibrace tiskové plochy

4.1.3 Pojezdový systém roviny XY

Pro pohyb v rovině XY byl zvolen systém pohybu nazývaný H-Bot, který oproti běžným systémům disponuje výhodami v podobě statického uložení hnacích členů, přesnějšího polohování a větších sil, které je schopen za použití stejných motorů vyvinout. Pro ověření maximálních možných sil a minimálních hodnot posuvů byly provedeny výpočty jak pro systém H-Bot (rovnice (11)-(14)), tak pro klasický systém pohybu (rovnice (8)-(10)) a výsledné hodnoty jsou porovnány v tab. 4-1.

Klasický systém

Pohyb je složen ze dvou motorů, z nichž každý pohybuje jednou osou nezávisle na druhém. Obr. 4-4 schematicky znázorňuje princip funkce tohoto systému a je doplněn o vypočítané hodnoty minimálních posuvů v jednotlivých osách bez použití mikro-krokování a o maximální možné silové zatížení. Veškeré uvedené hodnoty a výpočty uvažují použití stejného typu krokového motoru, jako v případě osy Z.



Obr. 4-4 Klasický systém pohybu v rovině XY

Hodnotu minimálního posuvu v jednotlivých osách při celých krocích lze vypočítat následovně:

$$L_c = \frac{\pi \cdot r}{180} \cdot \alpha_k = \frac{\pi \cdot 6,11}{180} \cdot 1,8 = 0,192 \text{ mm} \quad (8)$$

Hodnotu kroku při použití driveru schopného mikro-krokování 1/16:

$$L_m = \frac{L_c}{s_m} = \frac{0,192}{16} = 0,012 \text{ mm} \quad (9)$$

Síla, kterou jsou motory schopny vyvinout pro každou osu:

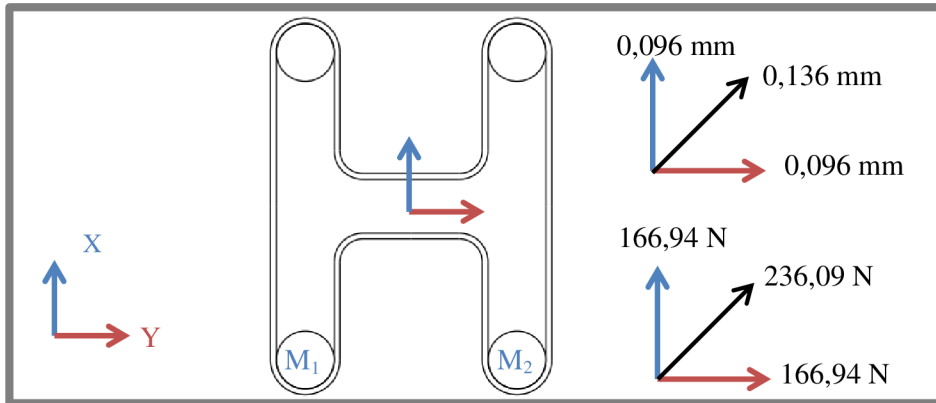
$$F_{xy} = \frac{C_m}{r} = \frac{0,51}{0,00611} = 83,469 \text{ N} \quad (10)$$

kde:

L_c	mm	je minimální vzdálenost při celém kroku
R	mm	- poloměr řemenice
α_k	°	- úhel odpovídající jednomu kroku motoru
L_m	mm	- minimální vzdálenost na jeden krok při mikro-krokování
r	mm	- poloměr řemenic
M_k	Nm	- krouticí moment motoru
F_{xy}	N	- maximální síla

H-Bot

Jedná se o systém pohybu využívající synchronizované otáčení dvou staticky uložených motorů. Schéma pohybu včetně vypočítaných hodnot minimálních posuvů a sil v jednotlivých osách zobrazuje obr. 4-5.



Obr. 4-5 H-bot

Jelikož tento systém využívá synchronizovaného pohybu dvou motorů, je nutné do rovnic určujících polohu v dané ose zakomponovat oba tyto motory. Pro posuv v ose X a Y tedy platí:

$$\Delta x = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi \cdot r}{180} \cdot \alpha_{k1} + \frac{\pi \cdot r}{180} \cdot \alpha_{k2} \right) \quad \Delta y = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi \cdot r}{180} \cdot \alpha_{k1} - \frac{\pi \cdot r}{180} \cdot \alpha_{k2} \right) \quad (11)$$

Pro minimální posuv v jednotlivých osách při celých krocích a pohybu jednoho motoru:

$$L_c = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi \cdot r}{180} \cdot \alpha_{k1,2} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi \cdot 6,11}{180} \cdot 1,8 \right) = 0,096 \text{ mm} \quad (12)$$

Při použití driveru schopného mikro-krokování 1/16:

$$L_m = \frac{L_c}{s_m} = \frac{0,096}{16} = 0,006 \quad (13)$$

Maximální síly v jednotlivých osách:

$$F_{xy} = \frac{2 \cdot M_k}{r} = \frac{2 \cdot 0,51}{0,00611} = 166,939 \text{ N} \quad (14)$$

kde:

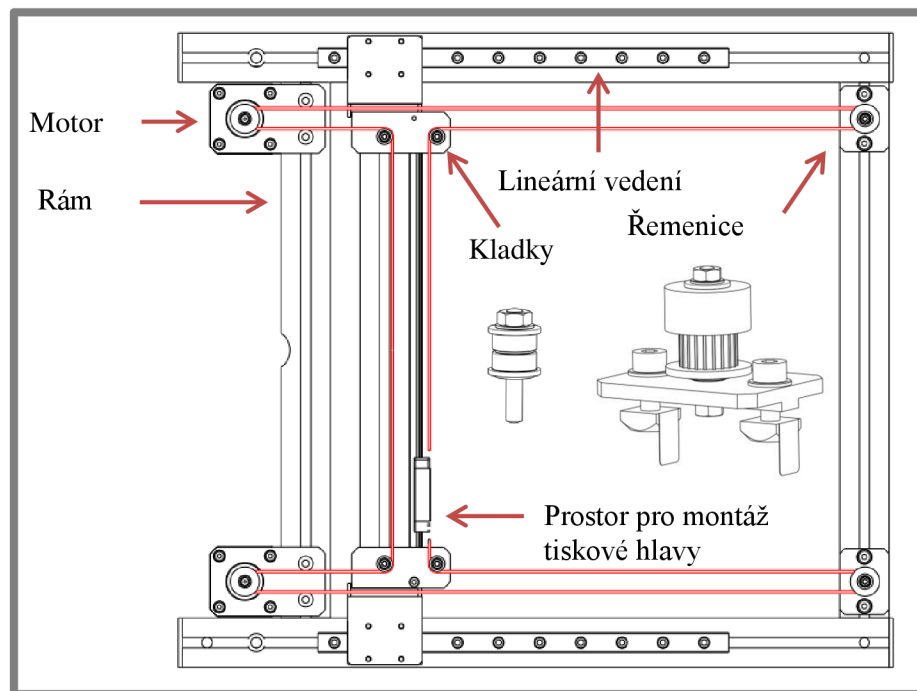
Δx	mm	je přírůstek v ose x
Δy	mm	- přírůstek v ose y
α_{k1}	°	- úhel kroku prvního motoru
α_{k2}	°	- úhel kroku druhého motoru
$\alpha_{k1,2}$	°	- společná hodnota kroku obou motorů

Tab. 4-1 porovnává vypočítané hodnoty maximálních sil a minimálních posuvů jednotlivých systémů pohybu. Hodnoty s indexem 45° značí pohyb ve směru diagonály čtvercového prostoru k tisku v rovině XY.

Tab. 4-1 Porovnání minimálních posuvů a sil jednotlivých systémů

	L_c (mm)	$L_{c\ 45^\circ}$ (mm)	L_m (mm)	$L_{m\ 45^\circ}$ (mm)	F_{xy} (N)	F_{45° (N)
Klasický	0,192	0,272	0,012	0,017	83,469	118,043
H-Bot	0,096	0,136	0,006	0,008	166,939	236,089

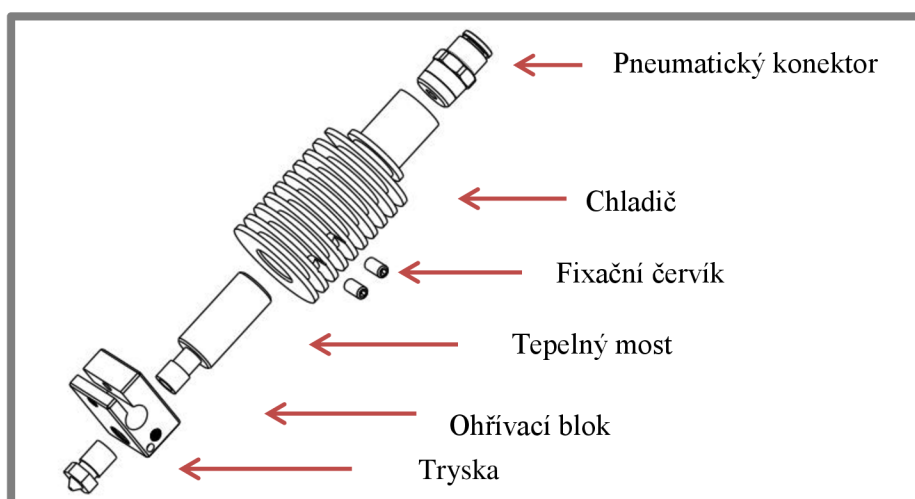
Předchozí výpočty a následné porovnání výsledků potvrzuje výhody systému H-Bot. Pro pohyb byly zvoleny identické krokové motory jako u pojezdů osy Z, čili Nema 17 s krokem 1,8° a krouticím momentem 0,51 Nm. Přenos krouticího momentu na lineární posuv je realizován synchronním řemenem typu GT2 tloušťky 6 mm, který obíhá okolo řemenic GT2 o průměru 12,22 mm s celkovým počtem 20 zubů. Řemen GT2 dosahuje oproti první uvažované volbě, řemenu T2,5, plynulejšího chodu bez vůlí při reverzaci směru. V místech zakřivení řemenu jsou umístěny kladky složené ze dvou ložisek s přírubou, které jsou nalisovány na pevně uloženém kolíku. Příruba ložisek slouží jako drážka pro vedení ozubeného řemenu. Na protější straně motorů jsou umístěny řemenice umožňující obíhání řemenu. Tyto řemenice jsou řešeny obdobně jako kladky, a to ložisky na kolíku, s tím rozdílem, že jsou doplněny o zmiňované řemenice GT2. Dostatečnou rigiditu celého systému zajišťuje lineární vedení ve formě lineárních kolejnic MGNR12 a vozíků MGN12H. Schéma výsledného konstrukčního řešení znázorňuje obr. 4-6, detailní pohled pak nabízí přiložená výkresová dokumentace.



Obr. 4-6 Finální verze systému pohybu v rovině XY

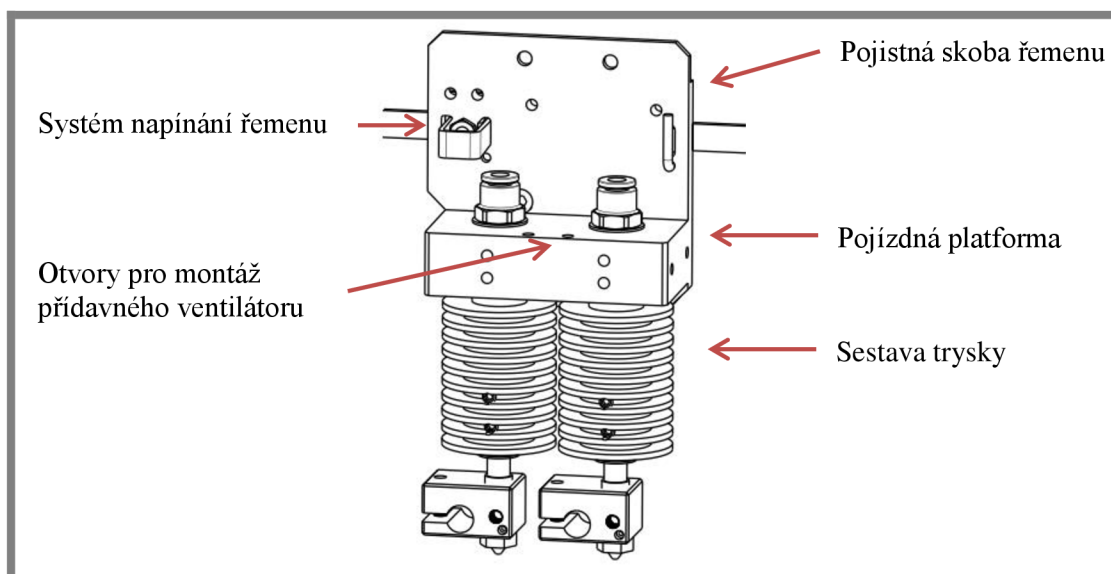
4.1.4 Tisková hlava

Tisková hlava se skládá z pojízdny platformy a sestavy trysky, jejíž konstrukce byla provedena v první fázi návrhu. Sestava trysky využívá upraveného řešení sestavy s označením J-head (kapitola 1.4.5 Tryska). Pro snadnou montáž a demontáž trysky byla provedena úprava chladiče a vyroben nový tepelný přechod. Nová sestava umožňuje vedení teflonové trubice skrze pneumatický konektor až k trysce, což snižuje tření a síly potřebné k protlačení vlákna. Pomocí fixačních červíků lze nastavit délku vysunutí tepelného mostu a provést tak kalibraci výšky trysky nad tiskovou plochou. Ohřivací blok je pak připraven pro fixaci topné patrony o výkonu 40 W a termistoru ke snímání teploty. Upravenou sestavu trysky znázorňuje obr. 4-7.



Obr. 4-7 Upravená sestava trysky

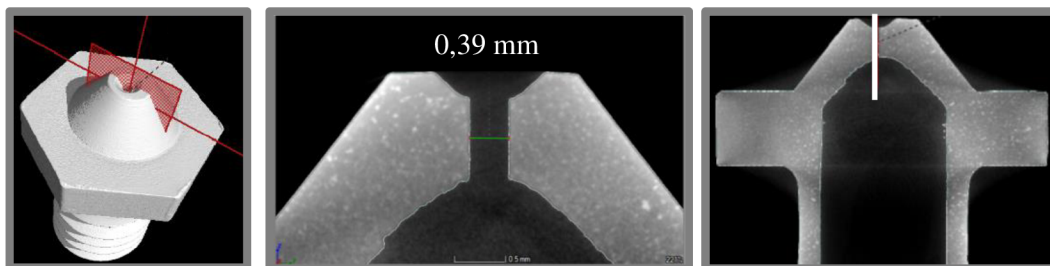
Pojízdny platforma je šroubovým spojem pevně spojena s vozíkem, pohybujícím se po kolejnici. Umožňuje fixaci konců řemenu systému H-Bot a také slouží jako nosný člen pro sestavu trysky. Tato platforma je navržena tak, aby byla schopna nést sestavu dvou trysek umístěných v montážních otvorech a umožňovala jejich chlazení pomocí přídavného ventilátoru. Dále umožňuje napínání jednoho fixovaného konce řemenu pomocí napínacího šroubu. Obr. 4-8 znázorňuje finální konstrukční řešení.



Obr. 4-8 Konstrukční řešení uchycení trysek a řemenu

4.1.5 Trysky

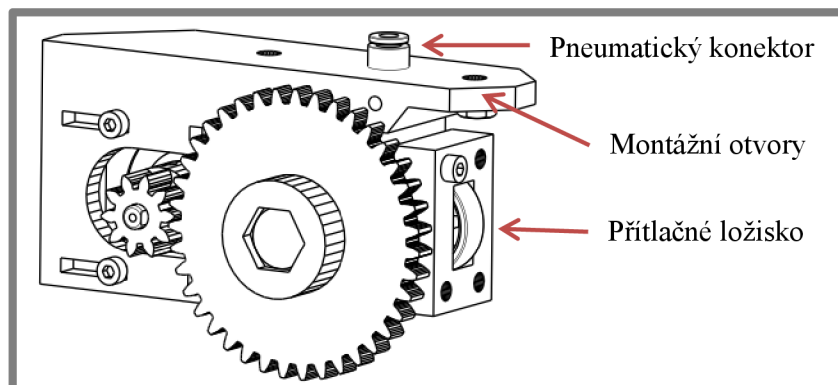
Tiskárna a tisková hlava byla navržena tak, aby umožňovala tisk s různými průměry trysek. Byla tedy zakoupena sada trysek o průměrech 0,2–0,5 mm dle standardu odpovídajícím rozměrům uvedených v rešeršní části na obr. 1-26 a v tab. 1-7. K testování tiskárny byla zvolena tryska o průměru 0,4 mm, jejíž výstupní rozměr byl za použití počítačové tomografie prozkoumán. Tomografie ukázala, že výstupní otvor trysky neleží v její středové ose a správná hodnota výstupního průměru trysky je 0,39 mm. Toto zjištění poslouží k správnému nastavení hodnot při kalibraci tiskárny.



Obr. 4-9 Tomografie trysky 0,4 mm

4.1.6 Extruderový systém

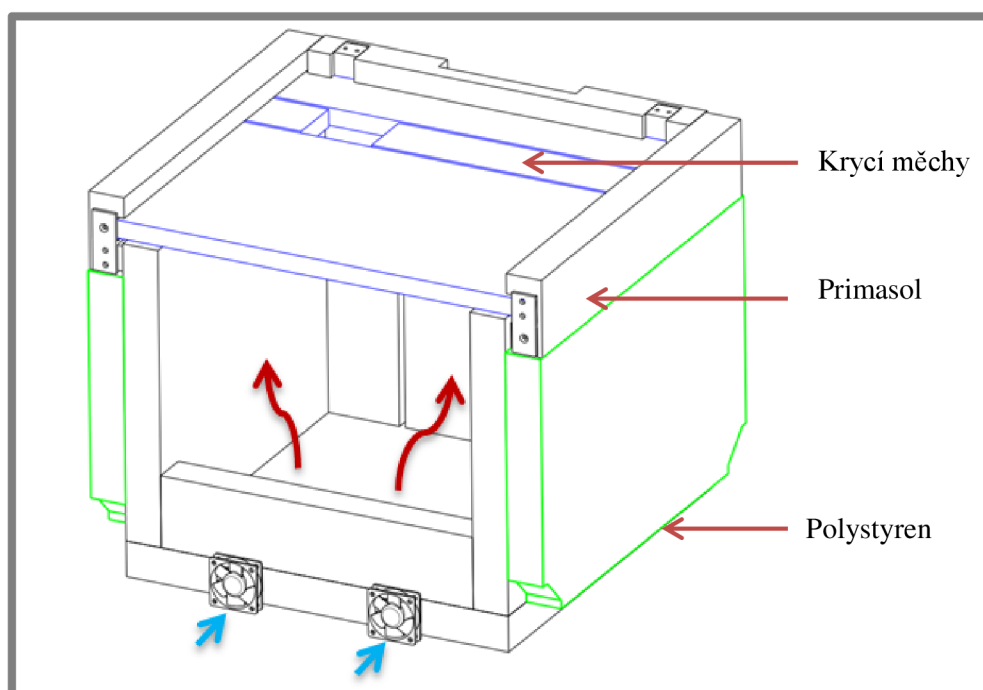
V první fázi navržený extruderový systém počítal s přímým systémem vtlačování vlákna za pomoci motoru velikosti Nema 17, krokem $1,8^\circ$ a statickým momentem 0,51 Nm osazeného drážkovaným kolem s označením MK7. První navržený extruder je uveden v koncepčním řešení na obr. 3-6. Testování tohoto extruderu proběhlo úspěšně u trysek větších průměrů, avšak při malém průměru trysky a pomalém pohybu tiskové hlavy se objevil problém s nedostatečnou rozlišitelností kroků, kdy krokový motor nebyl schopen vtlačit požadovanou délku vlákna, jelikož nedosahoval dostatečně malých kroků. První variantou řešení tohoto problému je koupě drahého motoru s převodem do pomala, nebo výroba vlastního převodovaného extruderu, který by bylo možné vytisknout na školních 3D tiskárnách. Byl tedy upraven model odzkoušeného extruderu s označením Wades Extruder tak, aby vyhovoval požadavkům pro účely této tiskárny. Výsledkem je extruder s převodovým poměrem 10:39. Provedené úpravy umožňují vtlačování dostatečně malého objemu vlákna i při malých rychlostech pohybu a zajišťují snadnou výměnu vlákna. Kompletní pohled ukazuje obr. 4-10.



Obr. 4-10 Převodovaný extruderový systém

4.1.7 Vyhřívaná komora

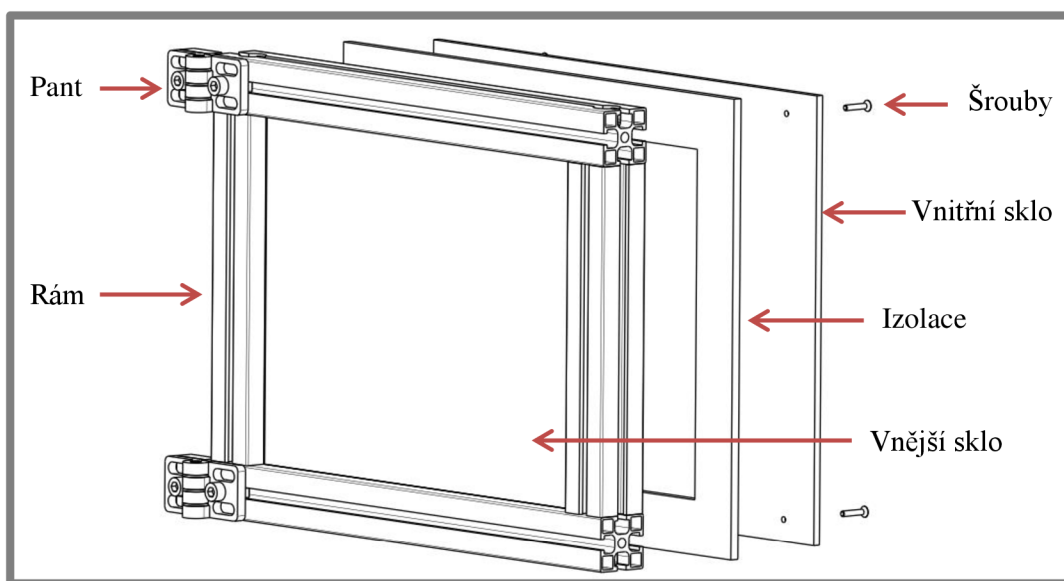
Vzhledem k velkému vlivu okolní teploty na výslednou kvalitu dílu počítá konstrukční návrh tiskárny s vyhříváním prostorem umožňujícím ohřev okolního vzduchu na teploty pohybující se okolo 150 °C. Byl zvolen vnitřní typ vyhřívané komory, který izoluje tiskovou plochu od okolního prostředí. Veškeré pohybové komponenty tiskárny jsou tedy umístěny vně komory. Jako izolační materiál je zvolen lehký a dobře opracovatelný Promasil tloušťky 30 mm, jehož vnější stěny jsou dále izolovány 30. mm vrstvou polystyrénu. Ze strany elektroniky je izolace doplněna odrazovou hliníkovou fólií. V horní části tiskárny bylo nutné navrhnout systém krytování pomocí shrnovacích měchů ze skelných vláken, které jsou schopny odolat předpokládaným teplotám. Tyto shrnovací měchy byly vyrobeny na zakázku firmou Hennlich. Vyhřívací okruh komory se skládá ze dvou odporových topných členů a větráčků pro přívod vzduchu. Každý topný člen dosahuje tepelného výkonu 300 W a je napájen střídavým napětím 230 V. Topné členy jsou vystaveny proudu vzduchu ze soustavy dvou ventilátorů, napájených stejnosměrným napětím o hodnotě 12 V. Průtok vzduchu ventilátory dosahuje hodnoty 13,5 m³/h. Systém izolace vnitřní komory a umístění ventilátorů lze vidět na obr. 4-11.



Obr. 4-11 Vyhřívaná komora

4.1.8 Uzavírání

Konstrukce hlavních dveří tiskárny je řešena hliníkovými profily tvořícími jejich základní rám. Dveře jsou doplněny o dva stabilní panty a izolaci, která se skládá z vnitřního a vnějšího tvrzeného skla. Vnější izolační sklo je napevno vsazeno do drážek profilu uvnitř rámové konstrukce dveří. Vnější sklo je ze strany profilů doplněno o izolační rámeček zabráňující šíření tepla kondukcí do rámu. Jeho uchycení je řešeno šroubovým spojem skrze díry ve skle do drážek profilu. Mezi skly pak vzniká vzduchová mezera, která tvoří tepelný most pro šíření tepla do vnější strany dveří. V horním profilu je dále umístěna soustava LED diod, osvětlujících prostor pro tisk. Konstrukční řešení dveří popisuje následující obr. 4-12.



Obr. 4-12 Dveře tiskárny

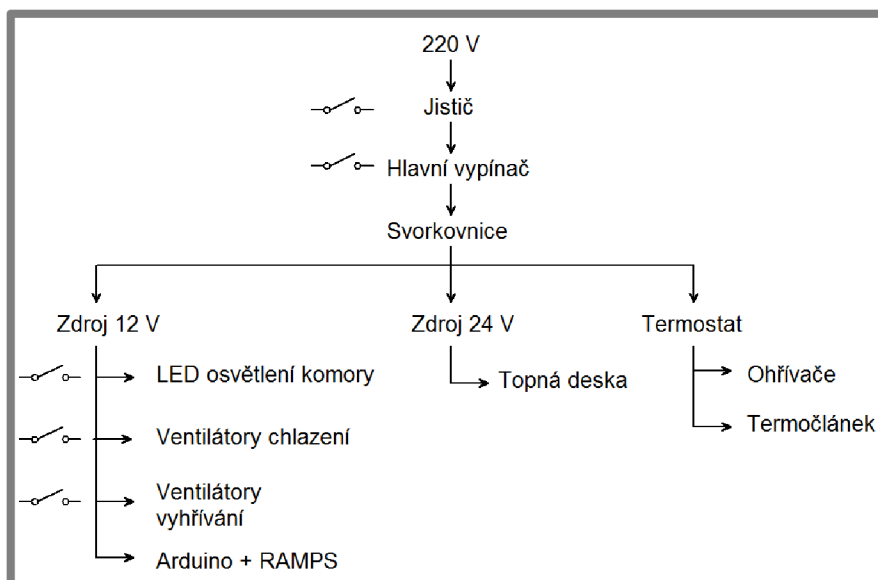
4.1.9 Krytování

Z bezpečnostních důvodů bylo provedeno kompletní zakrytování prostoru určeného pro elektroinstalaci pomocí laserem řezaných dílů z extrudované desky polyetylentereftalátu-glykolu. Tento materiál, označovaný jako PET-G, je špatně hořlavý a dosahuje vysoké rázové houževnatosti. Nařezané pláty jsou z důvodu docílení dobrého vzhledu polepeny karbonovou fólií a použity jako krytovací doplňky na více místech tiskárny. Karbonová fólie dodává tiskárně rázný futuristický vzhled, který ve spojení se stříbrnými montážními šrouby působí přirozeným technickým dojmem.

4.2 Elektronika a řízení

Elektrická instalace tiskárny byla navržena takovým způsobem, aby umožňovala přímé napájení střídavým napětím ze sítě, což z hlediska bezpečnosti vyžaduje implementaci některých bezpečnostních prvků. První pojistkou, umístěnou před vstupem napětí do tiskárny, je jistič, za kterým následuje hlavní vypínač umístěný na předním ovládacím panelu tiskárny. Elektrické rozvody se dále spojují ve svorkovnici, ze které vystupují do jednotlivých spínaných průmyslových zdrojů a termostatu, který řídí teplotu komory. První průmyslový zdroj s hodnotou výstupního napětí 12 V umožňuje odebírat celkový výkon 240 W při maximálním odběru 20 A. Napájejí volitelně spínané prvky jako je LED osvětlení tiskové komory,

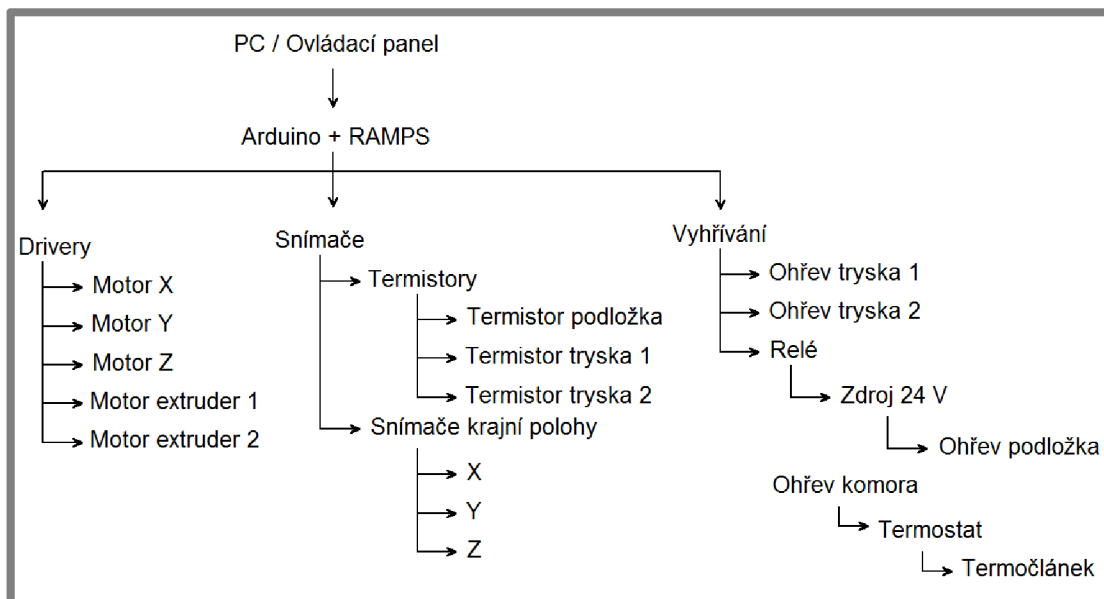
ventilátory zajišťující rozvod teplého vzduchu ve vyhřívané komoře a ventilátory zajišťující chlazení sestavy trysky. Tyto volitelně spínané prvky lze ovládat pomocí páčkových spínačů umístěných na předním kontrolním panelu. Stejný zdroj dále napájí řídicí jednotku a všechny součásti s ní spojené kromě vyhřívané podložky, která je napájena zdrojem o výstupním napětí 24 V schopným dosáhnout výkonu 400 W při maximální hodnotě odebíraného proudu 16,6 A. Přehled zapojení elektrických komponent přibližuje obr. 4-13.



Obr. 4-13 Schéma a výsledné zapojení jednotlivých součástí

4.2.1 Řídicí jednotka a ovládací panel

Řídicí jednotkou tiskárny je Arduino s označením ATmega2560 pracující na vstupní napětí 12 V. Tato řídicí jednotka má celkem 54. digitálních vstupů / výstupů, z nichž některé je možno využít také k PWM regulaci a disponuje 256 KB flash pamětí, sloužící jako úložný prostor pro firmware tiskárny. Ke komunikaci s počítačem slouží rozhraní USB. Arduino je doplněno o nadstavbu s označením RAMPS 1.4 určenou speciálně pro 3D tiskárny. Tato nadstavba umožňuje připojení všech požadovaných součástí tiskárny, včetně driverů pro řízení motorů. Použité drivery nesou označení A4988 a umožňují řízení krokových motorů s napětím 12 V při maximálním proudovém zatížení 2 A. Drivery je při dlouhodobém proudovém zatížení větším než 1 A nutno aktivně chladit. Tiskárna je dále vybavena ovládacím panelem s označením 12864 LCD smart controller. Tento panel umožňuje správu a ovládání tiskárny bez použití počítače. Další výhodou je možnost přímého tisku z SD karty. Ovládací panel je umístěn na přístupném místě v přední části tiskárny. Schéma členů ovládaných řídicí jednotkou znázorňuje obr. 4-14.



Obr. 4-14 Schéma ovládacích prvků tiskárny

4.2.2 Snímací členy

Ke správné funkci řídicího systému je potřeba zaznamenávat data o stavu některých prvků systému a na základě jejich vyhodnocení měnit charakteristiky akčních členů. Mezi potřebná snímaná data patří teplota vyhřívané části trysky, podložky, vzduchu ve vyhřívané komoře a poloha nulové pozice tiskové hlavy. Snímání teplot trysky a vyhřívané podložky je realizováno pomocí termistorů s negativním teplotním koeficientem (NTC) s označením 3950 a hodnotou odporu 100 Kohm. Vývody termistoru jsou izolovány teflonovou trubicí odolávající vysokým teplotám. Maximální teplotní rozsah těchto termistorů je od $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $310\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pro snímání teploty vyhřívané komory je použit termočlánek typu K, umožňující snímání teplot v rozsahu $0\text{--}400\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nulová poloha tiskové hlavy je zjišťována pomocí optických koncových snímačů, u kterých v porovnání s mechanickými nedochází k fyzickému kontaktu a nehrozí tak jejich zničení v případě nárazu při překročení maximálních dovolených rychlostí. Celkem jsou použity tři optické snímače a to pro snímání nulové polohy osy X, Y a Z.

4.2.3 Systém ohřevu

U tiskárny je potřeba celkem tři vyhřívání okruhů. Prvním okruhem je vyhřívání dvou trysek pomocí topných členů zajišťujících tavení materiálu v trysce. K ohřevu je použita topná patrona napájena 12 V, dosahující topného výkonu 40 W. Řízení teploty topných patron probíhá pomocí PWM regulace. Druhým okruhem je vyhřívání tiskové podložky, které je realizováno pomocí tištěného odporového spoje na hliníkové desce o tloušťce 3,5 mm. Deska je schopna dosáhnout povrchové teploty $180\text{ }^{\circ}\text{C}$, je napájena zdrojem stejnosměrného napětí o hodnotě 24 V a při odebíraném proudu 8 A dosahuje výkonu 192 W. Řízení vyhřívání desky je realizováno spouštěcím signálem z řídicí jednotky, který spíná skrze relé příslušný obvod. Třetím okruhem je vyhřívání komory, které zajišťují dva topné členy, každý o výkonu 300 W. Tyto členy jsou ofukovány vzduchem vháněným ventilátory, který dále proudí do komory tiskárny a vyhřívá okolní prostředí. Topné členy jsou řízeny termostatem, který pomocí relé spíná okruh 220 V.

4.3 Firmware a software

Příprava 3D dat k tisku probíhala za pomoci programu CATIA V5 R19, který umožňuje profesionální tvorbu modelů a jejich následný export do požadovaného formátu STL. Další výhodou tohoto programu je možnost ovlivnění řady nastavujících parametrů při exportu do tohoto formátu.

Model ve formát STL je nutné zpracovat v jednotlivých řezech a vytvořit cestu ve formě G-kódu, která slouží k trasování tiskové hlavy. K těmto účelům je využívána kombinace několika programů a to s ohledem na jejich možnosti nastavení jednotlivých parametrů a tvar tisknutého objektu. Mezi tyto programy patří Slic3r, Cura a KisSlicer.

Dalším potřebným softwarem je řídicí program, který je schopen komunikace s tiskárnou a zasilání G-kódu. Vhodným programem je Repetier-Host v1.0.6, jelikož umožňuje přímé řízení tiskárny zasiláním ovládacích příkazů ve formě G-kódu prostřednictvím příkazového řádku. Tento software má také zabudovanou přímou podporu používaného firmwaru, se kterým je plně kompatibilní.

Firmware obsahuje veškerá vnitřní nastavení tiskárny týkající se maximálních rychlostí, zrychlení, posuvů, kroků motorů, tepelných pojistek, snímačů, aj. Nosičem firmwaru je flash paměť řídicí jednotka tiskárny. Pro tuto tiskárnu byl modifikován firmware s označením Marlin, jehož úprava probíhala ve vývojovém prostředí arduino v1.0.6 umožňující správu a komunikaci mezi řídicí jednotkou tiskárny a PC.

4.4 Kalibrace

Před zahájením prvního tisku je nutné provést kalibraci všech krokových motorů, termistorů a tiskové plochy. Kalibrace motorů je provedena pomocí výpočtů celkového počtu kroků, potřebných k posuvu pohyblivého členu o vzdálenost 1 mm. Tato hodnota je implementována do firmwaru tiskárny. Pro kalibraci motoru osy Z, který je spojen s kuličkovým šroubem, lze pro výpočet použít vzorec uvedený v kapitole 4.1.2. Výpočet provádí rovnice (15–17).

Celkový počet kroků potřebných na posuv v ose Z o vzdálenost 1 mm:

$$Z_k = \frac{k \cdot s_m}{Z_d} = \frac{200 \cdot 16}{5} = 640 \text{ kr.} \quad (15)$$

Počet kroků osy X je vzhledem k použitému systému pohybu identický s osou Y:

$$X_k, Y_k = \frac{k \cdot s_m}{b_{\text{řem}} \cdot Z_{\text{řem}}} = \frac{200 \cdot 16}{2 \cdot 20} = 80 \text{ kr.} \quad (16)$$

kde:

X_k		je počet kroků motoru osy X potřebný k posuvu o 1 mm
Y_k		je počet kroků motoru osy Y potřebný k posuvu o 1 mm
$b_{\text{řem}}$	mm	vzdálenost mezi zuby řemenu
$Z_{\text{řem}}$		počet zubů řemenice

Ověření správnosti kalibrace osy X a Y lze provést dvěma způsoby. První možností je zkušební tisk a následné přeměření dílu, druhou pak přímé měření délky pojezdu v dané ose. Vzhledem k chybám při tisku, které nemusí souviset se správným nastavením kroků, bylo ověření správnosti otestováno druhým způsobem. Hodnota posuvu v ose Z byla přeměřena digitálním posuvným měřidlem s přesností na setiny milimetru a naměřené hodnoty odpovídaly hodnotám zadaným. Obdobným způsobem a se stejným výsledkem byl otestován pohyb v rovině XY. Můžeme tedy konstatovat, že kalibrace kroků pojezdů je provedena správně.

Podobným způsobem je nutné provést také kalibraci extruderů. Výpočet počtu kroků na vtlačení 1 mm vlákna pro převodovaný extruder byl proveden následovně:

$$E_k = \left(\frac{\pi \cdot r_e \cdot \alpha_k}{180 \cdot s_m} \cdot i \right)^{-1} = \left(\frac{\pi \cdot 3 \cdot 1,8 \cdot 10}{180 \cdot 16 \cdot 39} \right)^{-1} = 662,08 \quad (17)$$

kde:

r_e mm je poloměr drážkovaného extruderového kola
 i - převodový poměr

Ověření kalibrace probíhá měřením délky vtlačovaného filamentu extruderem. Měření je testováno na vtlačované délce 100 mm, jelikož při menších délkách by se chyba nemusela projevit nebo by nemusela být tak velká, aby byla měřitelná. Při testování nastala mírná neshoda mezi požadovanou a vytlačenou délkou a byla tedy použita následující rovnice (18) pro přepočítání nových kroků. Délka vtlačeného filamentu zadána programem, skutečná délka a přepočítání nové hodnoty kroků je uveden v tabulce tab. 4-2.

$$E_{kn} = \frac{L_z \cdot E_{k0}}{L_s} = \frac{100 \cdot 662,08}{99,56} = 665 \quad (18)$$

kde:

E_{kn} je nová hodnota kroků na 1 mm
 L_z mm - zadaná délka k vytlačení
 E_{k0} - původní hodnota kroků na 1 mm
 L_s mm - skutečná vytlačená délka

Tab. 4-2 Kalibrace extruderu

Číslo měření	Zadaná hodnota E_k (mm)	Skutečný rozměr L_s (mm)	Nová hodnota E_{kn} (mm)
1	662,08	99,56	665,00
2	665,00	100,00	-

Kalibrace termistorů je provedena měřením hodnot odporů a jim odpovídajících teplot, které jsou následně implementovány do firmwaru zařízení. Hodnoty byly zaslány výrobcem a ověřeny pomocí multimetru s termočlánkem.

Nastavení tiskové plochy do roviny s tiskovou hlavou je provedeno kalibračními šrouby. Pomocí přejezdů trysky nad tiskovou podložkou byly kalibrační šrouby postupně nastaveny tak, aby tryska v každém místě roviny XY dosahovala konstantní vzdálenosti od podložky.

4.5 Výroba a kompletace

Po dokončení konstrukce a návrhové části řízení bylo přistoupeno k výrobě jednotlivých dílů tiskárny. Vzhledem k omezeným finančním možnostem probíhala kompletní výroba všech dílů ve školních prostorách dílny za pomoci dostupných nástrojů. Nejprve byla provedena montáž základního rámu tiskárny a pojezdné osy Z v jeho zadní části. Tato sestava byla dále osazena základní deskou pro montáž elektroniky a elektronickými prvky. Následovala montáž systému pohybu v rovině XY a tiskové hlavy. Dále byla doplněna vnitřní izolace a sestava dveří tiskárny. V poslední fázi kompletace došlo k implementaci shrnovacích měchů, zapojení všech elektrických komponent a finálnímu zakrytí tiskárny. Na závěr proběhl zkušební tisk ověřující základní funkčnost všech systémů. Vybrané snímky z průběhu montáže jsou součástí fotodokumentace v příloze. Výsledná podoba tiskárny, elektroinstalace a snímek prvního tisku je zobrazen na obr. 4-15.



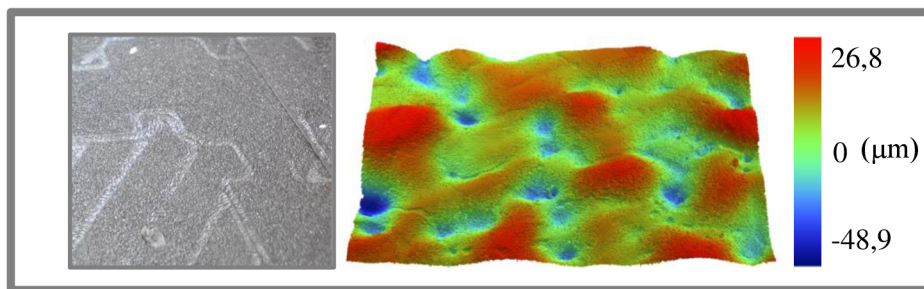
Obr. 4-15 Výsledná podoba tiskárny, elektroinstalace a první tisk

4.6 Testování a validace

Pro ověření požadované funkčnosti tiskárny je třeba provést její testování a ověřit schopnost tisknout požadované materiály s minimálními deformacemi a kvalitním spojením jednotlivých vláken. Před samotným testováním je však nutné pro jednotlivé materiály zvolit vhodnou tiskovou podložku zaručující dostatečnou přilnavost po celou dobu průběhu tisku.

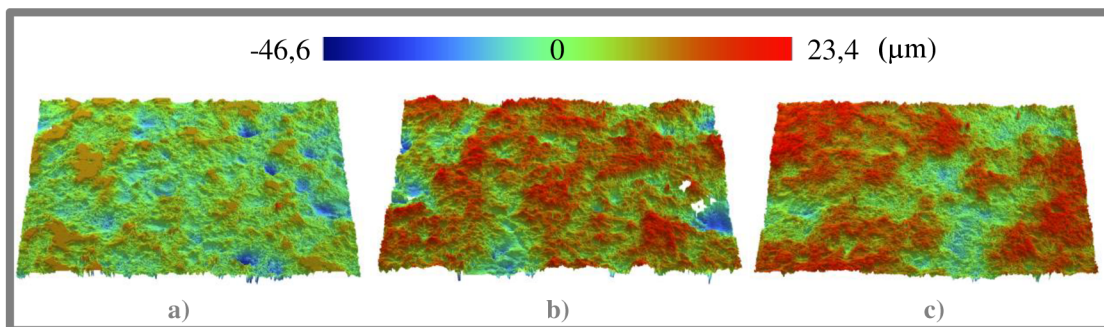
4.6.1 Povrch a materiál podložky pro tisk

Bylo provedeno testování přilnavosti jednotlivých materiálů na různé tiskové podložky rozdílných materiálů a povrchových úprav. Nejlepší přilnavosti dosahuje tisková podložka patentována firmou Stratasys, jejíž adheze je s materiálem ABS zdaleka nejlepší. Jejím nedostatkem je však tepelná nestabilita projevující se značnou deformací při teplotách přesahujících 90 °C. Je tedy nepoužitelná pro naše účely. Povrch této podložky byl za účelem zjištění jeho topografie prozkoumán na profilometru Bruker ContourGT-X a následně vyhodnoceny některé jeho parametry. Drsnost povrchu této podložky je přibližně $R_a = 8 \mu\text{m}$ a zjištěná struktura povrchu je znázorněna na obr. 4-16.



Obr. 4-16 Struktura povrchu podložky Stratasys

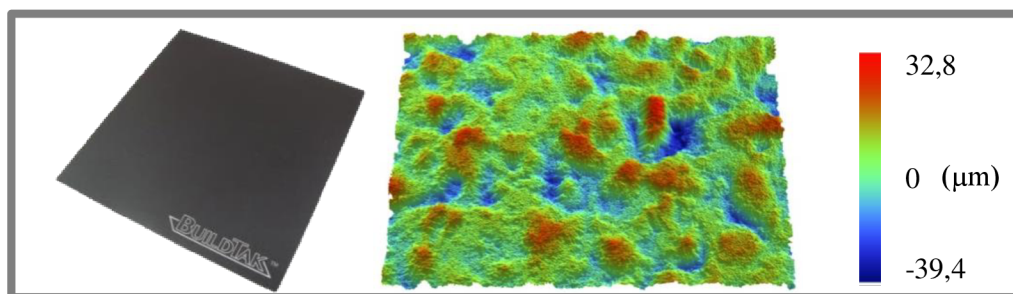
Povrch dle očekávání neobsahuje pravidelné uspořádání ve formě drážek či jiného vzorkování. Vhodnou náhradou této podložky by mohlo být korundované sklo, u kterého je předpoklad podobné topografie povrchu v případě vhodné volby korundovacího tlaku. Sklo také eliminuje nežádoucí jev vlastní deformace při vyšších teplotách. Postupně byla provedena úprava povrchu jednotlivých skel při různém tlaku korundování a následně ověřena jejich přilnavost s různými materiály. Drsnost povrchu skel se pohybuje v rozmezí $R_a = 4,5\text{--}7,4 \mu\text{m}$ vzhledem ke zvolenému korundovacímu tlaku a výsledná topografie povrchu obsahuje ostré přechodové hrany, kterými se odlišuje od povrchu podložky firmy Stratasys. Snímky povrchů těchto skel zobrazuje obr. 4-17.



Obr. 4-17 Struktura povrchu skla korundovaného při tlaku: a) 2 bar.; b) 3 bar.; c) 4 bar.

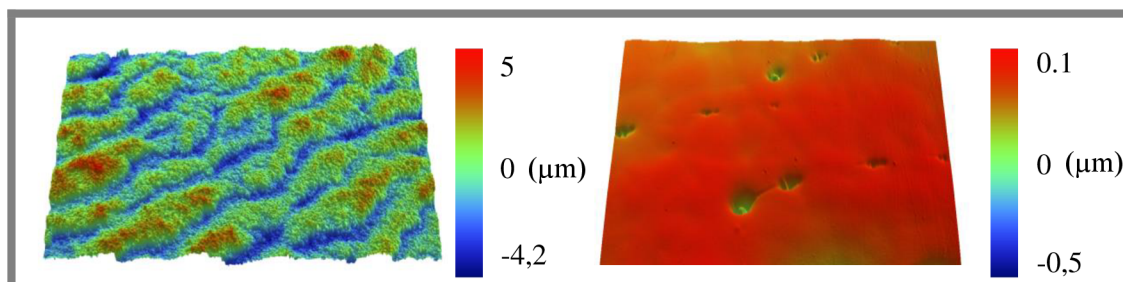
Materiál ABS dosahoval dostatečné přilnavosti (bez delaminace v průběhu tisku) u skla upraveného při tlaku 3. barů a teplotě vyhřívání podložky 90 °C. V kombinaci s vrstvou roztoku acetonu a ABS, dosahovala všechna skla přijatelných výsledků.

Pro jiné materiály bylo provedeno testování různých druhů materiálů a povrchů tiskových podložek s následujícími výsledky. Materiál PLA lze tisknout na čisté sklo vyhřáté na 50 °C, optimálních výsledků s tímto materiálem je však dosahováno při tisku v kombinaci s nanesením vrstvy nasyceného roztoku cukru a vody na tiskovou plochu. V případě PET vlákna je vyhovující odmaštěné sklo vyhřáté na teplotu okolo 100 °C. Dále byla pro testování zakoupena podložka BuildTak, která je dle informací výrobce schopna zajistit dostatečnou přilnavost pro materiály ABS, PLA, PET a NYLON. Testování potvrdilo dobrou přilnavost se všemi zmíněnými materiály a snímek z profilometru potvrdil jistou podobnost v topografii povrchu s podložkou firmy Stratasys. Drsnost povrchu byla vyhodnocena na $R_a = 7,5 \mu\text{m}$. Podložku a její snímek povrchu ukazuje obr. 4-18.



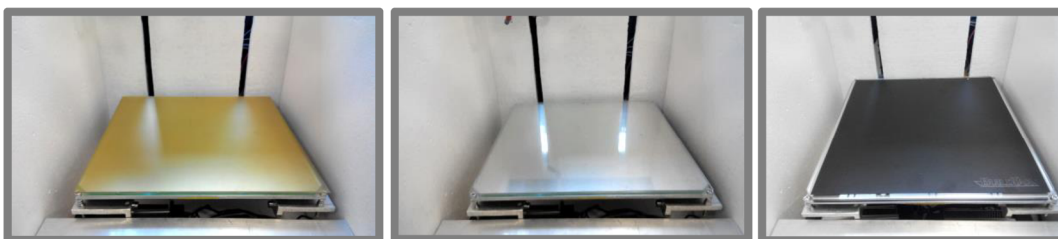
Obr. 4-18 BuildTak

S ohledem na plánovanou možnost tisku materiálů jako je PC či PEI byl proveden průzkum tiskových podložek i pro tyto materiály. Pro tisk materiálu s označením ULTEM, je využívána PEI tisková fólie, jejíž drsnost povrchu se pohybuje okolo hodnoty $R_a = 0,2 \mu\text{m}$ a na snímku z profilometru jsou parné opakující se vzory v podobě prohlubní a výstupků v jednom směru. Tato fólie dosahuje se zmiňovaným materiálem dostatečné přilnavosti v průběhu celé doby tisku. Pro materiál PC byla otestována průhledná plastová PC fólie, jejíž povrch je hladký a výsledky potvrdily dobrou přilnavost. Snímek povrchu jednotlivých fólií z materiálu PEI a PC je znázorněn na obr. 4-19.



Obr. 4-19 Podložka pro tisk materiálu ULTEM (PEI) a PC

Testování tiskových podložek ukázalo, že přilnavost objektu nezávisí pouze na drsnosti povrchu podkladové vrstvy, ale také na vzorkování povrchu a materiálech v kontaktu. Dvě podložky stejných drsností a topografií povrchu vyrobené z různých materiálů nemusí dosahovat stejných výsledků. Obecně lze konstatovat, že vhodnými podkladovými vrstvami pro tisk jsou většinou podložky vyrobené z totožných materiálů, jako je materiál tisku. Pro tisk ABS, PLA, a NYLONU byla vyrobena podložka skládající se z podkladového hladkého skla, které zabraňuje deformacím vlivem vyšších teplot, a nalepené podložky BuildTak. Pro tisk PET byla vyrobena tvrzená skleněná podložka a pro tisk materiálu ULTEM a PC jsou připraveny výše zmiňované PEI a PC fólie. Tyto fólie jsou umístěny na pevný skleněný podklad zabraňující jejich kroucení při tisku. Následující obr. 4-20 zobrazuje připravené podložky k tisku.



Obr. 4-20 Připravené tiskové podložky

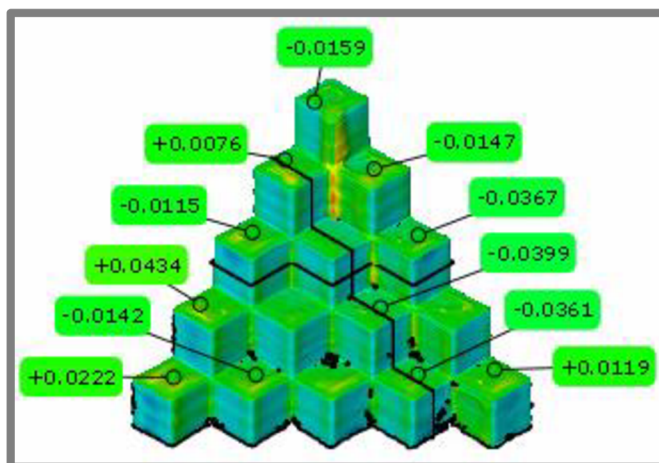
4.6.2 Validační výtisky

K ověření funkčnosti a přesnosti tisku tiskárny byla zvolena tryska o průměru 0,4 mm. Efektivní průměr trysky byl nastaven dle výsledků CT na 0,39 mm, výška vrstvy na 0,25 mm a šířka stěny na 0,5 mm. K základnímu ověření rozměrových odchylek byla vytisknuta dutá krychle s délkou stěny 10 mm a její rozměry přeměřeny digitálním posuvným měřidlem. První výtisk nedosahoval dostatečné rozměrové přesnosti a to z důvodu špatného nastavení extruderového systému. Během první výměny filamentu bylo totiž nutné povolit šrouby u přítlačného členu extruderu, vsunout nový filament a šrouby opět dotáhnout. Čím více se šrouby dotáhnou, tím více dochází k zařezávání zubů extruderu do vlákna a tím dochází ke změně efektivního průřezu. To se následně projevuje v rozdílech při požadované a skutečně vytlačené délce vlákna. Jelikož není možné odhadnout optimální utahovací moment a kalibrace kroků extruderu po každé výměně vlákna nepřipadá v úvahu, byl systému doplněn o přítlačné pružiny, které zajistí konstantní přítlačnou sílu filamentu k extruderovému kolu, a dále usnadní výměnu vlákna. Výsledné naměřené rozměry testovacího výtisku po úpravě extruderu ukazují obr. 4-21.



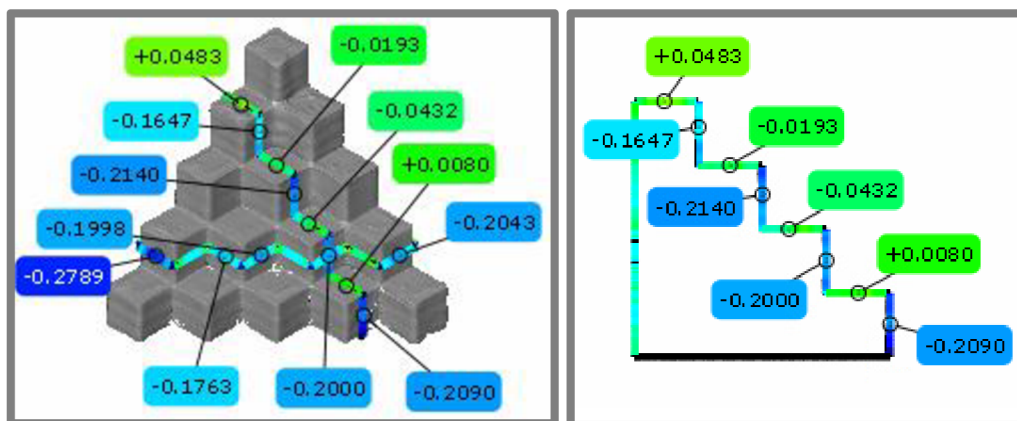
Obr. 4-21 Přeměření objektu digitálním posuvným měřidlem

Po základním nastavení bylo provedeno ověření rozměrové přesnosti na složitějších dílech. Vyhodnocení bylo provedeno na optickém digitalizačním zařízení ATOS Triple Scan. Prvním testovaným objektem byla schodovitá pyramida, u které je možné pozorovat vynikající výsledky rozměrů v ose Z (obr. 4-22), kde se maximální odchylky vnější obálky objektu od požadovaných pohybují v řádu setin milimetru.



Obr. 4-22 Testovací schodovitá pyramida

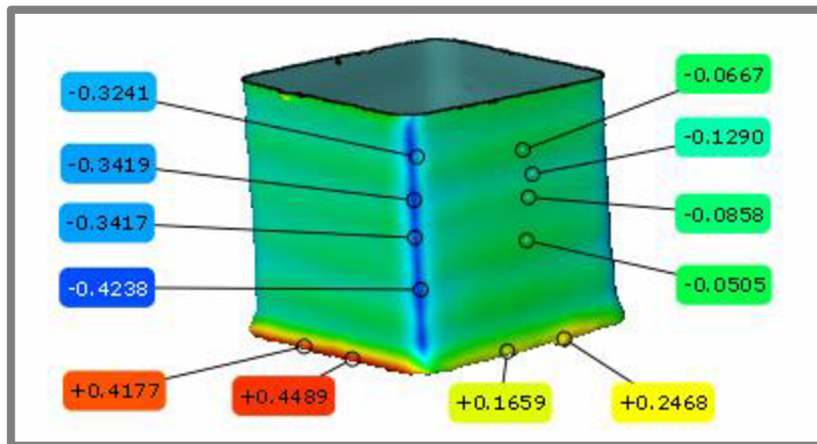
Naopak vyhodnocení rozměrů v ose XY zobrazené na obr. 4-23 ukazuje ztelné odlišné výsledky v porovnání s požadovanými. Bylo tedy nutné zaměřit se na tyto chyby a odhalit jejich příčinu.



Obr. 4-23 Odchylky v rovině XY

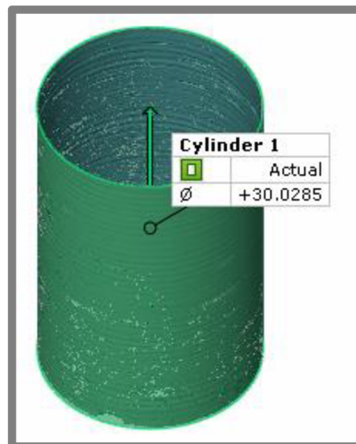
Všechny odchylky se pohybují okolo hodnoty 0,2 mm, což může být způsobeno nedostatečným napnutím či kvalitou ozubeného řemenu, který mohl od první kalibrace mírně povolít. K této chybě může přispívat také smrštění materiálu při chladnutí. Bylo tedy provedeno napnutí řemenu a vytištěn nový zkušební objekt ve tvaru dutého kvádrů. Porovnání odchylek vzhledem k modelu v rovině XY zobrazené na obr. 4-24 ukazuje značné zlepšení a odchylky rozměrů vnější obálky od modelu pohybující se v řádu setin. Objekt je vytištěn tak, aby jeho vnější rozměry odpovídaly požadavkům, je však nutné počítat s tvarem povrchu, který obsahuje prohlubně směrem dovnitř objektu. Tento tvar povrchu je výsledkem samotného principu metody FDM a deformovaným tvarem nanášených vláken. Na objektu lze dále pozorovat nepřesnosti v zaoblených rozích, které jsou způsobeny vlivem

smrštění materiálu a taktéž samotnou podstatou metody FDM, jelikož objekt byl exportován do formátu STL s nedostatečnou hustotou polygonální sítě. V první vrstvě je možné pozorovat zploštění objektu, což je důsledkem jiného nastavení výšky první vrstvy s ohledem na lepší přilnavost. V případě požadavků na rozměrovou přesnost podstavy objektu je možné provést tisk s podkladovou vrstvou tak, jako je uvedeno v kapitole 1.3.5. Veškeré odchylky je možné ovlivnit správným softwarovým nastavením jednotlivých parametrů tisku.



Obr. 4-24 Testovací dutá krychle

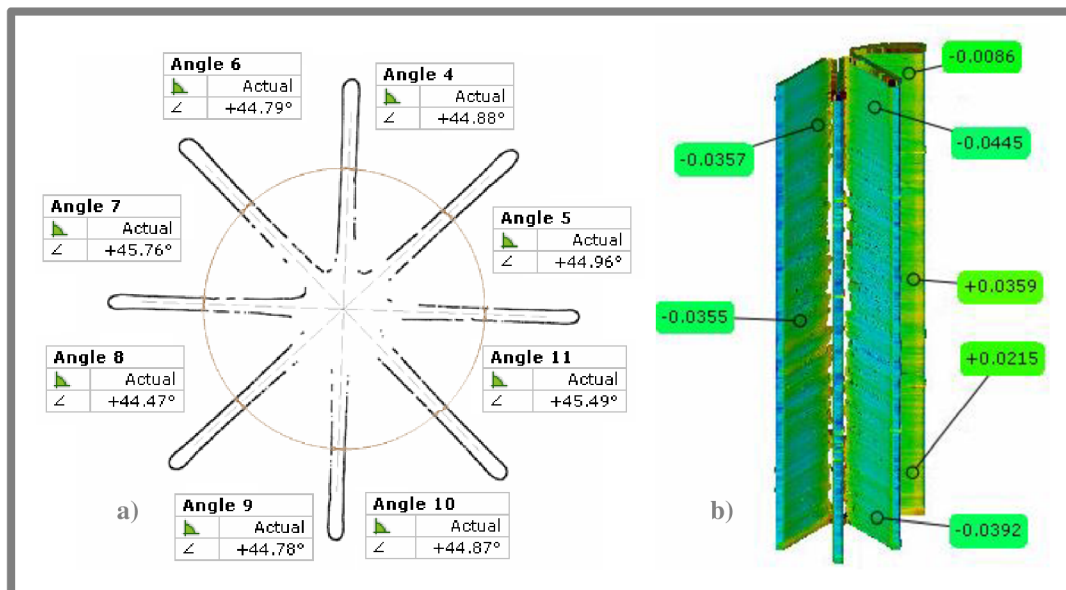
Dalším testovaným objektem byl dutý válec o průměru 30 mm, exportovaný do formátu STL s velmi hustou polygonální sítí. Naskenovaná data byla proložena vnější válcovou plochou a její průměr vyhodnocen. Výsledek tisku a následného měření reprezentuje obr. 4-25, na kterém lze pozorovat odchylku této plochy od modelu v řádu setin milimetru.



Obr. 4-25 Ověření vnějšího průměru dutého válce

Pro ověření kolmosti roviny XY s posuvnou osou Z byl zvolen objekt hvězdicové podstavy s pravidelným úhlem jednotlivých ramen 45° a výšce 150 mm. Tento objekt tedy slouží k ověření nejen odchylek úhlů osy Z od roviny XY, ale také ke stanovení velikosti odchylek úhlů v rovině XY. Jak ukazuje obr. 4-26a, maximální odchylky úhlů v rovině XY nepřesahují hodnotu $0,8^\circ$ a z obr. 4-26b je patrné, že odchylky v ose Z s ohledem na kolmost k rovině XY jsou minimální. Odchylky jednotlivých úhlů stěn mohou být způsobeny chybou v krokování motoru, jejíž tolerance se u jednoho celého kroku $1,8^\circ$ pohybuje v rozmezí $\pm 0,1^\circ$. Tyto odchylky

mohou být také projevem smrštění materiálu či důsledkem manipulace s objektem po tisku.



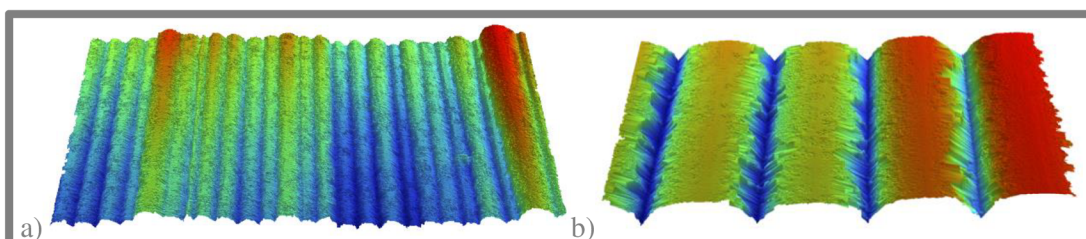
Obr. 4-26 Ověření úhlů a odchylek: a) v rovině XY; b) v ose Z

4.6.3 Kvalita povrchu

Tiskárna umožňuje tisk s velmi malým posuvem v ose Z, čímž je možné ovlivnit výslednou strukturu povrchu objektu. Pro získání představy o tvaru povrchu a možného vlivu tohoto parametru na jeho výslednou strukturu byl proveden zkušební výtisk objektu s proměnnou výškou nanášených vrstev. Objekt byl vytisknut tryskou o průměru 0,3 mm s parametry výšky vrstvy nastavenými na hodnoty 0,05 mm a 0,3 mm. Šířka vytlačovaného vlákna $W = 0,5$ mm. Výsledná struktura povrchu byla vyhodnocena ve směru kolmém na směr vláken optickým profilometrem Taylor Hobson CCI. Hodnoty drsnosti povrchu R_a pro jednotlivé výšky vrstvy jsou uvedeny v tab. 4-3. Vyhodnocení a jiné výsledné vlastnosti povrchu včetně jeho profilu jsou součástí přílohy. Pro získání představy o výsledném tvaru povrchu jsou na obr. 4-27 přiloženy snímky povrchu.

Tab. 4-3 Měřené drsnosti povrchu

Výška vrstvy Z (mm)	0,05	0,30
Drsnost povrchu R_a (μm)	6,3	20,3



Obr. 4-27 Snímky povrchu: a) 0,05 mm; b) 0,3 mm

4.6.4 Tisk různých druhů materiálů

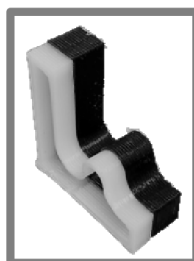
Při přípravě k tisku s novým materiálem je vždy nutné otestovat správnost nového nastavení tiskárny pro tento materiál. Důležité je nastavit správnou teplotu tavení a provést kalibraci tlouštěk stěn. Postupně byla ověřena schopnost tiskárny tisknout materiály ABS, ABS-T, PLA, PLA-D, PET, PVA, NYLON (PA), PC, PTFE a ULTEM (PEI). Objekty z vybraných materiálů jsou zobrazeny na obr. 4-28.



Obr. 4-28 Zleva PLA-D, PC, PLA, ABS, a PET

V případě materiálu ULTEM docházelo po dokončení tisku bez vyhřívání okolní teploty k značným viditelným delaminacím jednotlivých vrstev objektu. Výsledný tisk z materiálu PC disponoval stejnou chybou, avšak s mírnějšími projevy. Tato deformace je projevem nízké teploty okolí při nanášení vláken, kdy spodní vrstva není díky své nízké teplotě schopna molekulární difúze s vrstvou právě nanášenou. Odstraněním tohoto nedostatku a zároveň ověřením funkčnosti a vlivu vyhřívané komory na kvalitu spojení vláken se zabývá podkapitola 4.6.5 Ověření vlivu teploty okolí na spoje vláken.

Proběhl také zkušební tisk dvoubarevného objektu. Objekt byl vytištěn z bílého a černého materiálu ABS s úspěšným výsledkem zobrazeným na obr. 4-29.

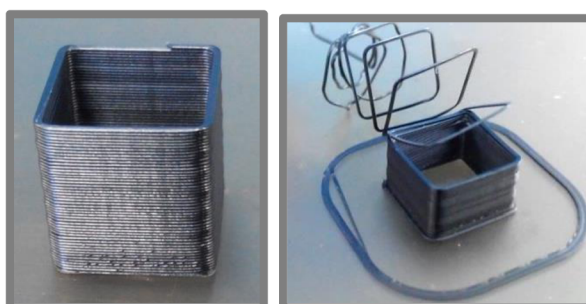


Obr. 4-29 Dvoubarevný tisk

Při vícebarevném či různomateriálovém tisku mohou nastat problémy, jakými je rozdílná výška trysky způsobující narážení nižší trysky do již vytisknutých částí objektu nebo nechtěné zbarvení objektu jiným materiálem, který vytéká z druhé trysky. Stejná vzdálenost trysky od podložky je zajištěna hardwarovou kalibrací, ale vytékání materiálu z trysky je nutné řešit softwarově. Zabránit tomuto jevu lze snížením teploty momentálně nepoužívané trysky pod teplotu tavení materiálu, což však značně prodlužuje dobu tisku při čekání na opětovné dosažení požadované tavicí teploty. Dalším způsobem je využití zpětného chodu extruderu a vlákno vtáhnout o určitou vzdálenost zpět do trysky za účelem vyvolání podtlaku bránícímu vytékání materiálu. Nejčastěji používaným způsobem je kombinace dvou jmenovaných společně s upravenou trasou pohybu, která omezuje přejíždění neaktivní trysky přes objekt, a stavbou obvodových stěn, sloužících k čištění neaktivních trysky od nataveného materiálu. [34]

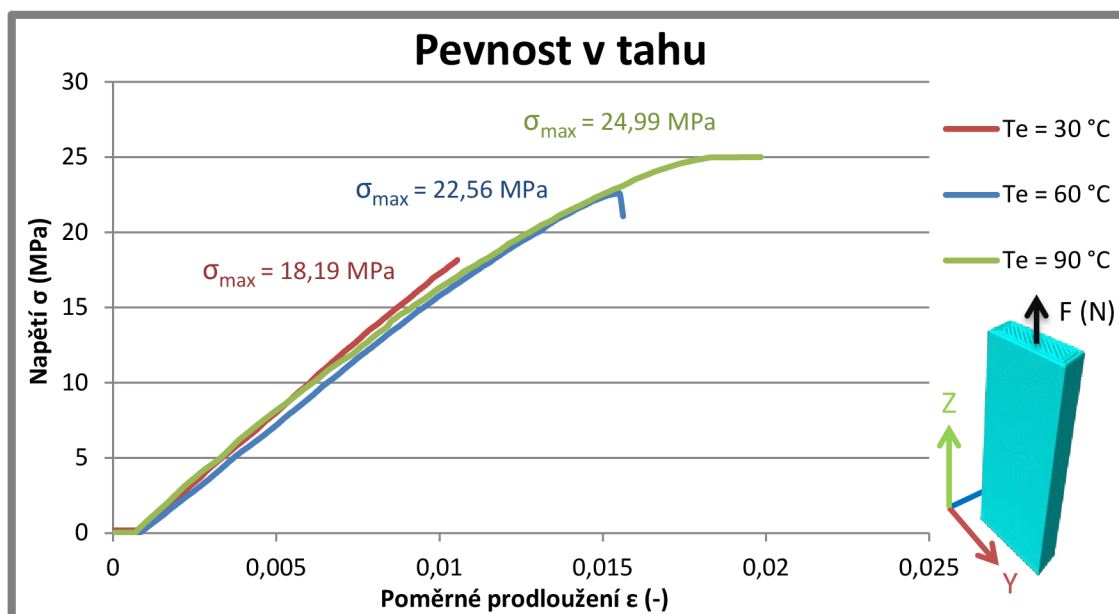
4.6.5 Ověření vlivu teploty okolí na spoje vláken

Pro ověření vlivu teploty okolí na spoj vláken a zároveň ověření funkčnosti vyhřívané komory, která je schopna dosáhnout teploty až 150 °C, byl zvolen materiál ULTEM, který jak popisuje předchozí kapitola, nebylo možné vytisknout bez delaminace jednotlivých vrstev. Vzhledem k nedostatečnému množství tohoto materiálu proběhl tisk malého objektu za účelem zjištění, zdali se viditelně projeví vliv teploty okolí na výsledek tisku. Na základě dvou zkušebních vzorků vytisknutých bez vyhřívání a s vyhříváním, lze potvrdit vliv teploty okolí na spojení vláken a výslednou kvalitu tisku. Výsledek tisku s vyhříváním a bez něj, je zobrazen na následujícím obr. 4-30.



Obr. 4-30 Tisk materiálu ULTEM

Dále byl proveden tisk tří zkušebních tyčí z materiálu ABS M30i o rozměrech (10 x 4 x 100) mm, tisknutých tryskou o průměru 0,3 mm na výšku v ose Z, s výškou vrstvy 0,2 mm a při různých teplotách okolí. Tyče byly testovány při tahové zkoušce, jejíž výsledný průběh zobrazuje graf 4-1. Tahová síla byla cíleně, vzhledem ke směru stavění tyče, přenášena pouze krčky vláken, což je nejnepríznivější případ zatěžování, který může nastat.

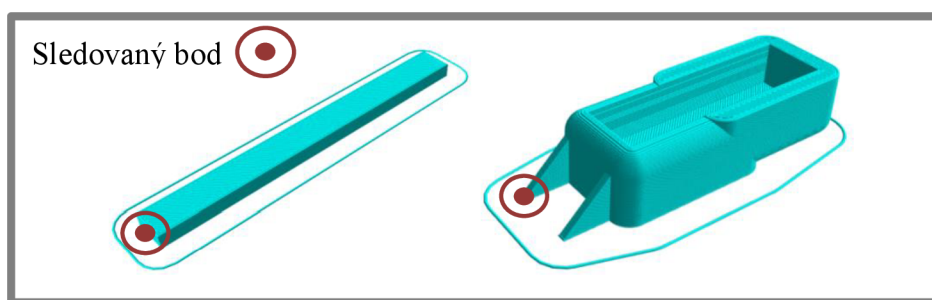


Graf 4-1 Výsledky tahových zkoušek

Výrobce použitého materiálu ABS M30i, firma Stratasys, uvádí maximální hodnotu napětí v tahu 28 MPa. Výsledná maximální hodnota napětí, získaná při tahových zkouškách, dosahovala hodnoty 24,99 MPa, což je přibližně 90 % z hodnoty uváděné výrobcem. Rešeršní část této práce uvádí informaci o výzkumu shody materiálových charakteristik surového materiálu, uvedených výrobcem, v porovnání se skutečnou hodnotou zjištěnou pomocí tištěných vzorků, provedeném W. C. Smithem a kol. [17]. Tištěné vzorky dosahovaly pouze 36–63 % z celkové hodnoty možného napětí v tahu. Podobné testy provedl S. Ahn a kol. [14], který dosáhl shody 80 %. Obě tyto procentuální hodnoty se vztahují k zatěžování zkušební tyče ve směru vláken. Dle S. Ahn. a kol [14] dosahují tyče zatěžované kolmo ke směru stavění vzorku pouze třetinových hodnot oproti tyčím zatěžovaným ve směru vláken. Shoda 90 % při zatěžování ve směru kolmém na směr vláken dokazuje kvality této 3D tiskárny a potvrzuje nesporný vliv teploty okolí na průběh molekulární difúze, která je jednou z příčin kvalitního spojení vláken. Ještě lepších výsledků může být dosaženo při zvýšení okolní teploty tisku nad 100 °C, což ovšem způsobí rozměrovou nepřesnost objektu vlivem deformace vláken v plastickém stavu. Další možností jak dosáhnout lepších výsledku je velmi pomalé ochlazování objektu po dokončení tisku, které umožní relaxaci vnitřních pnutí způsobených vlivem vnitřního napětí. Výše zmíněné výsledky dokazují schopnost tiskárny tisknout materiály dosahující vyšších pevností.

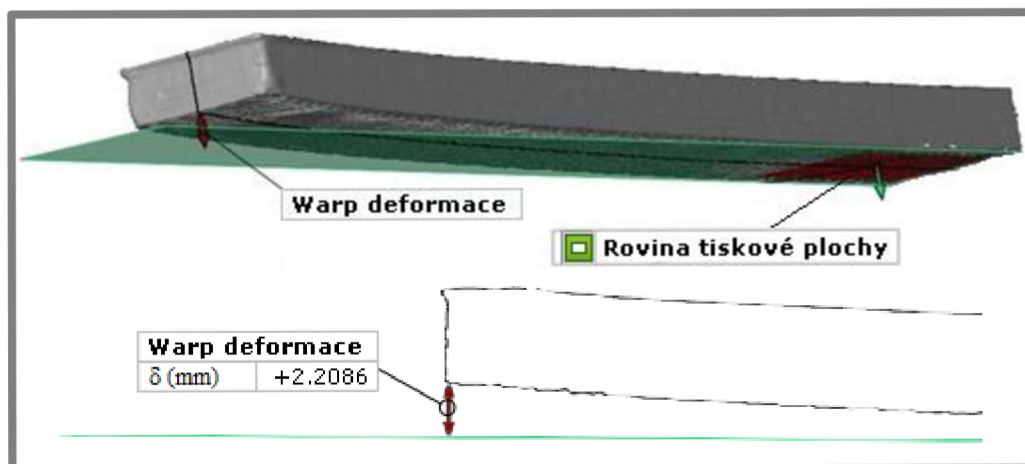
4.6.6 Porovnání deformací

Pro ověření schopnosti tiskárny omezit deformace vzniklé vlivem smrštění vláken v průběhu tisku byl proveden tisk a následné porovnání deformací dvou zkušebních objektů, vytištěných z materiálu ABS na různých tiskárnách. Objekt ve tvaru kvádrů o délce 100 mm, šířce 10 mm a výšce 4 mm, zobrazený společně s druhým testovacím objektem na obr. 4-31, byl vytisknut na komerčních 3D tiskárnách Up!Mini, Flashforge Dreamer, průmyslové tiskárně Stratasys SST 1200 a na tiskárně zkonstruované v této diplomové práci.



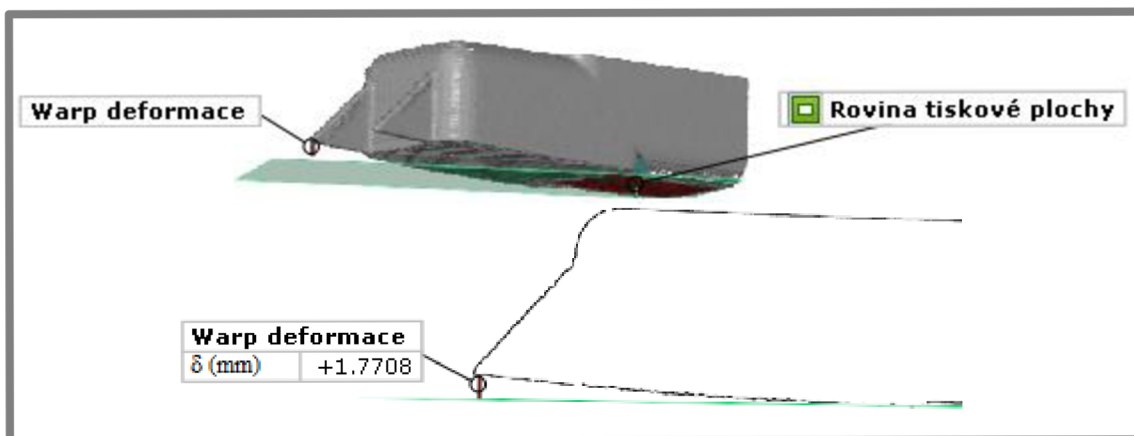
Obr. 4-31 Objekty k porovnání deformací

Vybrané testovací objekty byly opticky digitalizovány na zařízení ATOS Triple Scan a hodnoty vzdáleností sledovaných bodů od roviny tiskové plochy porovnány. Vyhodnocení bylo zaměřeno na typ deformací označovaných jako warp, které popisuje kapitola 1.3.3. U každého objektu je na protější straně sledovaného místa vybrána plocha o velikosti (20 x 10) mm, kterou je proložena rovina nahrazující tiskovou plochu. Velikost warp deformace je pak určena vzdáleností sledovaného bodu od této roviny. V případě objektu ve tvaru kvádrů, leží sledovaný bod na spodním konci řezu, který je veden podélně v polovině jeho šířky. Určení velikosti warp deformace objektu ve tvaru kvádrů zobrazuje obr. 4-32.



Obr. 4-32 Vyhodnocení deformace kvádrů

Pro druhý objekt je vyhodnocení provedeno stejným způsobem a sledovaný bod leží na spodním konci řezu, který je veden podélně skrze jeden z výběžků. Určení velikosti warp deformace u objektu s výběžky zobrazuje obr. 4-33.



Obr. 4-33 Vyhodnocení deformace objektu s výběžky

Výsledné hodnoty warp deformací objektů pro jednotlivé tiskárny jsou uvedeny v tab. 4-4. Z tabulky je patrné, že 3D tiskárna UK3DP dosahuje v porovnání s jinými tiskárnami velmi dobrých výsledků. Minimálních deformací je dosaženo možností uživatelského nastavení parametrů tisku s ohledem na tvar a velikost tisknutého objektu. Ostatní 3D tiskárny mají možnosti nastavení parametrů tisku značně omezené a objekty různého tvaru a velikosti jsou tisknuty s velmi podobným nastavením.

Tab. 4-4 Porovnání warp deformací ve sledovaných bodech

Tiskárna	UK3DP	SST 1200	Flashforge	Up!Mini
deformace kvádrů δ (mm)	0,10	0,10	0,2	2,21
deformace objektu δ (mm)	0,02	0,39	0,63	1,77

5 DISKUZE

5.1 Shrnutí dosažených výsledků

V rámci diplomové práce byla navržena a vyrobena nová 3D tiskárna pojmenovaná UK3DP, která splňuje všechny požadavky zadání. Tiskárna pracuje na principu metody FDM a umožňuje tisk požadovaných materiálů ABS a PC, které je schopna vzhledem ke dvěma vyhřívaným tryskám tisknout dvoubarevně. Mimo tyto dva materiály byla ověřena možnost tisku dalších osmi materiálů, mezi které patří například ULTEM. Tento materiál by nebylo možné tisknout bez vyhřívané komory, která je součástí UK3DP a dokáže dosáhnout teploty okolí až 150 °C. Tiskárna je řízena pomocí ovládacího panelu, který umožňuje plnou kontrolu všech součástí systému a který je schopen tisku z SD karty.

Funkčnost tiskárny byla ověřena na zkušebních výtiscích, které byly podrobeny optickému skenování za účelem zjištění rozměrových odchylek. Vyhodnocení potvrdilo velmi dobrou rozměrovou přesnost v ose Z a po drobných úpravách i v rovině XY. Stejně tak dosahovaly velmi dobrých výsledků odchylky velikosti úhlů v této rovině. Naměřené hodnoty mohly být ovlivněny smrštěním materiálu či manipulací s objektem po tisku. Velký vliv na výsledek má nastavení parametrů tisku, které lze na rozdíl od komerčních tiskáren u UK3DP modifikovat, což patří mezi zásadní výhody této 3D tiskárny.

Součástí validačních výtisků byly objekty s různou výškou vrstvy v ose Z, která ovlivňuje výsledný vzhled, strukturu povrchu a mechanické vlastnosti. Při tisku tryskou o průměru 0,3 mm a daným nastavením tiskárny, bylo bez dodatečných úprav dosaženo struktury povrchu $R_a = 6,3 \mu\text{m}$. Této hodnoty bylo dosaženo při výšce vrstvy 0,05 mm. Vzhledem k možnostem tiskárny tisknout s minimální výškou vrstvy 0,002 mm, lze předpokládat, že je možné dosáhnout ještě lepších výsledků, ovšem na úkor výrobního času. V případě výšky vrstvy 0,3 mm bylo dosaženo hodnoty $R_a = 21 \mu\text{m}$.

Dále byl proveden tisk tří vzorků tyčí při různých teplotách okolí a provedeny tahové zkoušky. Výsledky ukazují značný vliv teploty okolí na kvalitu spojení vláken. S rostoucí teplotou okolí dosahovaly spoje vláken lepších vlastností a byly schopny odolat většímu tahovému napětí. V případě vzorku z materiálu ABS M30i, tisknutého při teplotě okolí 90 °C, bylo při zatěžování ve směru kolmém na směr pokládání vláken dosaženo 90% shody hodnoty napětí v tahu s hodnotou maximálního napětí v tahu udávanou výrobcem. Tento směr zatěžování je nejméně vhodným směrem, jelikož síla je přenášena pouze krčky. Dle literatury se hodnoty napětí v tahu při zatěžování ve směru pokládání vláken shodují z 80 %. Tento směr zatěžování je nejvhodnějším směrem, jelikož tahová síla je přenášena samotnými vlákny. Výsledky tedy potvrzují velmi dobré vlastnosti vytištěných dílů. Test byl z důvodu časové náročnosti této práce proveden pouze na třech vzorcích tahových tyčí, což je pro demonstraci vlivu teploty okolí na kvalitu spojení vláken dostatečné. V případě testování nového materiálu je však potřeba provést testování na dostatečném počtu vzorků, jejichž počet odpovídá alespoň minimálnímu počtu vzorků potřebnému k statistickému vyhodnocení.

Tiskárna umožňuje tisk s minimálními výslednými deformacemi, což bylo testováno na dvou zkušebních výtiscích s tendencí deformovat se. Tyto zkušební tisky byly provedeny na čtyřech komerčních tiskárnách, z nichž pouze Stratasys byla schopna dosáhnout tak malých deformací, jako právě UK3DP, která je schopna

uživatelsky nastavit všechny parametry s ohledem na tvar objektu tak, aby výsledné deformace byly minimální. Nutno zmínit, že vzniklé deformace se mohou lišit v závislosti na tvaru tisknutého objektu a nastavení podmínek tisku.

Testování tiskárny potvrdilo závěry plynoucí z rešeršní části této práce a fakticky ověřilo vliv nastavení parametrů tisku na výslednou rozměrovou přesnost, kvalitu spojení jednotlivých vláken a minimalizaci výsledných deformací. Tiskárna je schopna plnit požadavky na ni kladené a je plně připravena pro testování nových druhů materiálů.

5.2 Ekonomický a časový rozbor řešení

5.2

3D tiskárna UK3DP se skládá s přibližně z 800. součástí od více než 30. různých dodavatelů. S ohledem na nízký finanční rozpočet a vzhledem k vysokým cenám potřebných dílů byly některé z komponent zakoupeny z Číny. Mezi takto nakoupené produkty patří lineární vedení včetně kuličkového šroubu, řídicí elektronika, průmyslové zdroje a sestava trysek. Nejdražší nakupované komponenty byly shrnovací krycí měchy vyrobené na zakázku firmou Hennlich v celkové hodnotě 6 812 Kč. Lineární vedení spolu s kuličkovým šroubem včetně všech přírub bylo nakoupeno za 6 371 Kč a výroba šesti kusů frézovaných dílů stála 5 050 Kč. Náklady na vývoj a výrobu tiskárny byly v přípravné fázi odhadnuty na částku 35 500 Kč. Konečné náklady dosáhly sumy 34 467 Kč a celkový počet hodin odvedené práce při vývoji přesahuje hodnotu 2050. Kompletní přehled nákupů a cen je součástí přílohy.

5.3 Postup dalších prací

5.3

Nad rámec práce bylo provedeno testování přesnosti tiskárny, ověření vlivu vyhřívané komory na kvalitu spojení vláken a provedeno porovnání výsledných deformací tisku s různými tiskárnami. Testy ukázaly výborné výsledky a potvrdily připravenost tiskárny k dalšímu komerčnímu použití. Nyní lze na tiskárně provádět testování nových druhů materiálů a stanovovat jejich výsledné optimální parametry pro tisk.

Prvním krokem by mohlo být testování vlivu plniva materiálu na výslednou mechanickou pevnost či kvalitu spojení vláken v jednotlivých vrstvách. Další možností je také testování optimálních podmínek pro tisk nového materiálu před uvedením do prodeje či tisk materiálu vyrobeného speciálně pro daný účel. Nabízí se také možnosti testování vlivu jednotlivých parametrů tisku jako je výška vrstvy v ose Z, teplota tavení materiálu, teplota vyhřívané podložky, teplota okolního prostředí, rychlost tisku, nastavení parametrů W a H , hustota a typ výplně objektu na výsledné mechanické vlastnosti či rozměrovou přesnost.

6 ZÁVĚR

Cílem této práce byl návrh a výroba funkčního prototypu nové 3D tiskárny pro tisk materiálů s vyšší pevností. První kapitola popisuje chyby vznikající v průběhu tisku metodou FDM a způsoby jejich možného předcházení. Dále se zaměřuje na typy 3D tiskáren a jejich konstrukční prvky. V následující části je provedena analýza problému a specifikován cíl práce, upřesňující požadavky kladené na schopnosti a funkce tiskárny. V konstrukční části, které předchází představení možných variant řešení, se práce postupně věnuje samotnému konstrukčnímu řešení jednotlivých prvků a jejich výrobě, elektroinstalaci, řízení, softwaru, firmwaru a finálnímu testování.

Výstupem práce je plně funkční prototyp experimentální 3D tiskárny, umožňující testování nových druhů materiálů, s možností uživatelského nastavení množství parametrů ovlivňujících průběh a výsledek tisku. UK3DP, jak byla tiskárna nazvána, pracuje na principu metody FDM a díky dvěma tryskám je schopna dvoubarevného tisku s maximálními rozměry podstavy (150 x 150) mm a výšce 150 mm. Objekty je možné tisknout s výškou vrstvy v ose Z od 0,002 mm. Kvalitních výsledků je dosažováno především díky třem vyhřívaným okruhům s automatickou regulací teplot, mezi které patří vyhřívání trysek, podložky a tiskové komory. Tiskárna je díky vyhřívání komoře schopna minimalizovat výsledné deformace objektu, dosahuje kvalitnějších spojů vláken a umožňuje tisk materiálu ULTEM (PEI) a PC, které bylo doposud možné tisknout jen na profesionálních průmyslových tiskárnách. Mezi další odzkoušené materiály, se kterými je možno tisknout, patří ABS-T, ABS, PLA-D, PLA, PVA, PET, NYLON (PA) a HIPS.

Ověření funkčnosti tiskárny bylo provedeno na zkušebních výtiscích, na kterých byla zkoumána přesnost tisku, kvalita povrchu, kvalita spojení vláken a celkové deformace. Přesnost tisku se u měřených dílů pohybuje v závislosti na nastavených parametrech v řádu setin milimetru a při tisku s výškou vrstvy v ose Z 0,05 mm, bylo bez dodatečných úprav dosaženo drsnosti povrchu $R_a = 6,3 \mu\text{m}$. Kvalita spojení vláken byla ověřena tahovou zkouškou s velmi dobrými výsledky, které v případě zatěžování ve směru kolmém na směr pokládání vláken, dosahují 90 % hodnoty pevnosti v tahu udávané výrobcem. Dle literatury jsou tyto hodnoty běžně třetinové. Schopnost tiskárny minimalizovat výsledné deformace byla ověřena porovnáním objektů, vytištěných na různých komerčních tiskárnách. Výsledky ukázaly, že UK3DP dosahuje z porovnávaných 3D tiskáren minimálních deformací. Těchto výsledků bylo dosaženo jednou z hlavních výhod UK3DP, a to možností nastavení řady parametrů tisku, které jsou u ostatních tiskáren značně omezené.

Tímto byly v plném rozsahu splněny všechny cíle zadání práce, a lze konstatovat, že UK3DP je jedinečnou tiskárnou, jelikož žádné komerční zařízení neumožňuje uživateli nastavovat všechny zásadní parametry ovlivňující proces výroby a kvalitu dílů.

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KOCHAN, Anna. Rapid prototyping gains speed, volume and precision. *Assembly Automation* [online]. 2000, **20**(4): 295-299 [cit. 2015-04-06]. DOI: 10.1108/01445150010378425. ISSN 01445154. Dostupné také z: <http://www.emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/01445150010378425>
- [2] KOUKAL, O. *Mechanická protéza horní končetiny*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 77 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. David paloušek, Ph.D..
- [3] Stratasys. *Compare FDM materials* [online]. b.r. [cit. 2015-03-26]. Dostupné také z: <http://www.stratasys.com/materials/fdm/compare-fdm-materials>
- [4] Plasty Mladeč. *Dokumenty- technické listy* [online]. b.r. [cit. 2015-03-26]. Dostupné také z: <http://www.plastymladec.cz/?id=4>
- [5] *Material Property Data* [online]. b.r. [cit. 2015-03-26]. Dostupné také z: <http://www.matweb.com/index.aspx>
- [6] The Engineering Toolbox. *Coefficients of Linear Thermal Expansion* [online]. b.r. [cit. 2015-03-26]. Dostupné také z: http://www.engineeringtoolbox.com/linear-expansion-coefficients-d_95.html
- [7] 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. 2014-09-18]. DOI: 10.1007/s00170-006-0556-9. ISSN 02683768. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-006-0556-9>
- [8] 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
- [9] SINGH, R. Some investigations for small-sized product fabrication with FDM for plastic components. *Rapid Prototyping Journal*. Guru Nanak Dev Univ, Dept Prod Engn, Ludhiana, Punjab, India, 2013, **19**(1): 58-63. DOI: 10.1108/13552541311292745. ISSN 13552546. Dostupné také z: Go to ISI://WOS:000316159400009

- [10] GAJDOS, I. a J. SLOTA INFLUENCE OF PRINTING CONDITIONS ON STRUCTURE IN FDM PROTOTYPES. *Tehnicki Vjesnik-Technical Gazette*. [Gajdos, Ivan, 2013, **20**(2): 231-236. ISSN 13303651. Dostupné také z: Go to ISI://WOS:000317728700005
- [11] 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. 2014-09-18]. DOI: 10.1108/13552540010337056. ISSN 13552546. Dostupné také z: <http://www.emeraldinsight.com/10.1108/13552540010337056>
- [12] VOLPATO, Neri, José AGUIOMAR FOGGIATTO a Daniel CORADINI SCHWARZ. The influence of support base on FDM accuracy in Z. *Rapid Prototyping Journal* [online]. 2014, **20**(3): 182-191 [cit. 2015-04-05]. DOI: 10.1108/RPJ-12-2012-0116. ISSN 13552546. Dostupné také z: <http://www.emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/RPJ-12-2012-0116>
- [13] *Heat Beds in 3D* [online]. b.r. [cit. 2014-09-18]. Dostupné také z: <http://bootsindustries.com/portfolio-item/heat-bed-3d-printing/>
- [14] AHN, S. H., M. MONTERO, D. ODELL, S. ROUNDY a P. K. WRIGHT Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid Prototyping Journal*. 2002, **8**(4): 248-257. DOI: 10.1108/13552540210441166. ISSN 13552546. Dostupné také z: Go to ISI://WOS:000178077300006
- [15] LEE, John a Adam HUANG. *Fatigue analysis of FDM materials*. b.r., : 291-299. DOI: 10.1108/13552541311323290. Dostupné také z: <http://www.emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/13552541311323290>
- [16] RAYEGANI, Farzad a Godfrey C. ONWUBOLU Fused deposition modelling (FDM) process parameter prediction and optimization using group method for data handling (GMDH) and differential evolution (DE). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2014, **73**(1-4): 509-519 [cit. 2014-09-18]. DOI: 10.1007/s00170-014-5835-2. ISSN 02683768. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-014-5835-2>
- [17] SMITH, Walter Castro a Richard W. DEAN Structural characteristics of fused deposition modeling polycarbonate material. *Polymer Testing* [online]. 2013, **32**(8): 1306-1312 [cit. 2015-04-06]. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2013.07.014. ISSN 01429418. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142941813001463>

- [18] LEE, C. S., S. G. KIM, H. J. KIM a S. H. AHN Measurement of anisotropic compressive strength of rapid prototyping parts. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007, **187**: 627-630. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.11.095. ISSN 09240136. Dostupné také z: Go to ISI://WOS:000245898200139
- [19] LEE, B. H., J. ABDULLAH a Z. A. KHAN Optimization of rapid prototyping parameters for production of flexible ABS object. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005, **169**(1): 54-61. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.02.259. ISSN 09240136. Dostupné také z: Go to ISI://WOS:000232937200009
- [20] REZAIE, R., M. BADROSSAMAY, A. GHAIE a H. MOOSAVI Topology Optimization for Fused Deposition Modeling Process. *Procedia CIRP*. Amsterdam: Elsevier B.V., 2013, **6**: 521-526. DOI: 10.1016/j.procir.2013.03.098. ISSN 22128271. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827113001728>
- [21] BOSCHETTO, A. a L. BOTTINI Accuracy prediction in fused deposition modeling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2014, **73**(5-8): 913-928 [cit. 2015-04-05]. DOI: 10.1007/s00170-014-5886-4. ISSN 02683768. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-014-5886-4>
- [22] SOOD, Anoop Kumar, R.K. OHDAR a S.S. MAHAPATRA Improving dimensional accuracy of Fused Deposition Modelling processed part using grey Taguchi method. *Materials & Design* [online]. 2009, **30**(10): 4243-4252 [cit. 2015-04-05]. DOI: 10.1016/j.matdes.2009.04.030. ISSN 02613069. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306909001794>
- [23] HEAD, Nop. HydraRaptor. *Polyholes* [online]. 2011 [cit. 2015-04-25]. Dostupné také z: <http://hydraraptor.blogspot.it/2011/02/polyholes.html>
- [24] Solidoodle introduces new 3D printer: Solidoodle 3. *3D printers* [online]. 2012 [cit. 2015-03-27]. Dostupné také z: <http://www.3ders.org/articles/20121119-solidoodle-introduces-new-3d-printer-solidoodle-3.html>
- [25] DeltaMaker. *DeltaMaker* [online]. 2015 [cit. 2015-03-27]. Dostupné také z: <http://www.deltamaker.com/products/deltamaker-delta-robot-3d-printer>
- [26] MOYER, Ilan E. CoreXY. *Principle of Operation* [online]. 2012 [cit. 2015-04-13]. Dostupné také z: <http://www.corexy.com/theory.html>

- [27] BE3D S.R.O. Produkty: DeeGreen. *Be3d* [online]. b.r. [cit. 2015-04-13]. Dostupné také z: <http://www.be3d.cz/cs/shop/3-deegreen>
- [28] STRATASYS. 3D printers: Dimension 1200es. *Stratasys* [online]. b.r. [cit. 2015-04-13]. Dostupné také z: <http://www.stratasys.com/3d-printers/design-series/dimension-1200es#content-slider-1>
- [29] GABRIEL, Jiří. *Vtokové soustavy vstříkovacích forem*. Brno, 1996.
- [30] *Matematické, fyzikální a chemické tabulky*. Praha: Ottovo nakladatelství, 2012, 208 s. ISBN 978-80-7451-222-3.
- [31] E3D-ONLINE. Documentation: E3D-V6. *E3D* [online]. 2015 [cit. 2015-04-13]. Dostupné také z: http://wiki.e3d-online.com/wiki/E3D-v6_Documentation
- [32] Zapojení elektroniky 3D tiskárny. *3D Printer* [online]. 2015 [cit. 2015-05-13]. Dostupné také z: <http://3dprinter.org.ua/skhema-podklyucheniya-ehlektroniki-k-3d-printeru/>
- [33] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R MISCHKE a Richard G BUDYNAS. *Konstruování strojních součástí*. 1. vyd. Brno: VUTIUM, 2010, 1159 s. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [34] HERGEL, Jean a Sylvain LEFEBVRE. *Clean color: Improving multi-filament 3D prints*. b.r., : 469-478. DOI: 10.1111/cgf.12318. Dostupné také z: <http://doi.wiley.com/10.1111/cgf.12318>

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

Zkratka	Význam
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
ABS-T	Akrylonitrilbutadienstyren transparent
CAD/CAM/CAE	Computer aided design/ manufacturing/ engineering
CCD	Charge-coupled device
CT	Computed Tomography
DC	Stejnosměrný proud
FDM	Fused Deposition Modeling
FEM	Finite Element Method
HIPS	Houževnatý polystyren
HiPS	Houževnatý polystyren
KB	Kilobyte
LCD	Liquid Crystal Display
LED	Light Emitting Diode
MKP	Metoda konečných prvků
MK7	Typ extruderového kola
NTC	Negative temperature coefficient
NYLON	Obchodní název pro Polyamid
PA	Polyamid
PC	Polykarbonát
PEI	Polyetherimid
PET	Polyethylentereftalát
PET-G	Polyethylentereftalát-glykol
PLA	Polylactid acid
PLA-D	Polylactid acid typ D
PVA	Polyvinyl alkohol
RAMPS	RepRap Arduino Mega Pololu Shield
RepRap	Replicating Rapid Prototyper
RP	Rapid Prototyping
STL	Stereo Lithography, datový formát
ÚK	Ústav konstruování
UK3DP	UK 3D Printer
ULTEM	Obchodní název pro polyetherimid
USB	Universal Serial Bus
2D	Dvoudimenzionální
3D	Třidimenzionální

Veličina	Jednotka	Popis
a_0	[mm]	- velikost poloměru vláken
a	[mm]	- velikost poloměru spojených vláken
$b_{řem}$	[mm]	- vzdálenost mezi zuby řemenů
C	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	- měrná tepelná kapacita
d_2	[mm]	- průměr šroubu
E_{kn}		- nová hodnota kroků na 1 mm
E_{k0}		- původní hodnota kroků na 1 mm
E	[Pa]	- modul pružnosti v tahu
F	[N]	- maximální síla
F_{xy}	[N]	- maximální síla v rovině XY
$F_{45°}$	[N]	- maximální síla v rovině XY pod úhlem 45°
f_{nk}		- koeficient uložení šroubu
H	[mm]	- výška vytlačeného vlákna
i		- převodový poměr
k		- počet celých zákl. kroků motoru na 1 otáčku rotoru
L	[mm]	- délka objektu
L_z	[mm]	- zadaná délka k vytlačení
L_s	[mm]	- skutečná vytlačená délka
L_m	[mm]	- min. vzdálenost na jeden krok při mikro-krokování
$L_{m 45°}$	[mm]	- vzdálenost na jeden krok pod úhlem 45°
L_c	[mm]	- minimální vzdálenost při celém kroku
$L_{c 45°}$	[mm]	- minimální vzdálenost při celém kroku pod úhlem 45°
l_n	[mm]	- vzdálenost mezi ložisky uložení šroubu
M_k	[Nm]	- krouticí moment motoru
n		- počet vrstev objektu
n_k	[mm ⁻¹]	- kritické otáčky šroubu
n_{max}	[mm ⁻¹]	- maximální dovolené otáčky šroubu
R_a	[μm]	- drsnost struktury povrchu
r	[mm]	- poloměr řemenice
r_e	[mm]	- poloměr drážkovaného extruderového kola
s_m		- počet mikro-kroků driveru motoru
T_g	[°]	- teplota skelného přechodu (glass temperature)
T_m	[°]	- teplota tavení vlákna (melting temperature)
T_e	[°]	- teplota okolí (envelope temperature)
UV_r	[%]	- nevyplněný objem obdélníkové výplně
UV_c	[%]	- nevyplněný objem kruhové výplně
W	[mm]	- šířka vytlačeného vlákna
w	[mm]	- šířka rastru
X_k		- počet kroků motoru osy X potřebný k posuvu o 1 mm
Y_k		- počet kroků motoru osy Y potřebný k posuvu o 1 mm
Z_c	[mm]	- posuv osy Z na jeden celý základní krok
Z_d	[mm]	- stoupání kuličkového šroubu
Z_k		- počet kr. systému potřebných k posuv v ose Z o 1 mm
Z_{min}	[mm]	- minimální posuv osy Z na jeden krok
$Z_{řem}$	[mm]	- počet zubů řemenice
$2y$	[mm]	- velikost krčku

α_k	[°]	- úhel odpovídající jednomu kroku motoru
α_{k1}	[°]	- úhel kroku prvního motoru
α_{k2}	[°]	- úhel kroku druhého motoru
$\alpha_{k1,2}$	[°]	- společná hodnota kroku obou motorů
ε_L	[mm]	- délková deformace
δ	[mm]	- deformace od podložky
σ	[Pa]	- napětí
ε_p		- poměrná deformace
α_L	[K ⁻¹]	- koeficient lineárního smrštění (roztažnosti)
λ	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	- tepelná vodivost
ρ	[kg·m ⁻³]	- hustota
Δy	[mm]	- přírůstek v ose y
ΔT	[K]	- změna teploty při chladnutí
α	[°]	- úhel rastru

9 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1-1 Průchod vlákna tryskou	16
Obr. 1-2 Protéza horní končetiny [2]; designérský model vázy; prototyp reflektoru	16
Obr. 1-3 Vznik jednotlivých spojů vlákna [8]	18
Obr. 1-4 Morfologie povrchů se znázorněním nevyplněných míst [9]	18
Obr. 1-5 Výskyt strukturální nehomogenity vlivem trasování [10]	19
Obr. 1-6 Nehomogenity FDM objektu u obdélníkové výplně [10]	19
Obr. 1-7 Fotografie spojení vláken [8]	20
Obr. 1-8 Mikrofotografie spojení vláken [8]	21
Obr. 1-9 Simulace teploty při tisku probíhajícíím za různých rychlostí tiskové hlavy [7]	21
Obr. 1-10 Deformace objektu	22
Obr. 1-11 Předpoklad ideálního přilnutí nově nanesené vrstvy [7]	22
Obr. 1-12 Proces volného chlazení bez vniku napětí [7]	22
Obr. 1-13 Natažení do původní délky [7]	23
Obr. 1-14 Výsledná deformace objektu [7]	23
Obr. 1-15 Delaminace způsobená vlivem lokálního chlazení	24
Obr. 1-16 Různé typy výplně dlouhého objektu [7]: a) podélná; b) příčná	25
Obr. 1-17 Podkladová mezivrstva	26
Obr. 1-18 Velkoplošná a lokální mezivrstva [13]	26
Obr. 1-19 Mikroskopický pohled na oblast lomu při tahové zkoušce [14]	28
Obr. 1-20 Nastavované parametry tisku [16]	29
Obr. 1-21 Porušené vzory vlivem tlakové zátěže [14], [18]	30
Obr. 1-22 Optimalizace nosníku	31
Obr. 1-23 Základní typy tiskáren: a) klasická tiskárna [24]; b) tiskárna typu delta [25]	33
Obr. 1-24 Systém CoreXY [26]	33
Obr. 1-25 Tiskárny: a) Be3d DeeGreen [27]; b) Stratasys Dimension 1200es [28]	34
Obr. 1-26 Parametry rozměrů trysky [31]	36
Obr. 1-27 Sestava J-head	36
Obr. 1-28 Schéma přípravy objektu k tisku	37
Obr. 1-29 Blokové schéma zapojení jednotlivých prvků tiskárny	38
Obr. 1-30 Grafické znázornění elektronických prvků a jejich zapojení [32]	38
Obr. 3-1 Rámová konstrukce: a) tvarové profily; b) řezané plechy; c) delta tiskárna	40
Obr. 3-2 Varianta systému pohybu 1	41
Obr. 3-3 Varianta systému pohybu 2	41
Obr. 3-4 Varianta systému pohybu 3	42
Obr. 3-5 Osa Z: a) řemen; b) trapézový šroub s vodící tyčí; c) kuličkový šroub s kolejničí	42
Obr. 3-6 Extruderový systém	43
Obr. 3-7 Návrh izolační komory	43
Obr. 4-1 Konstrukční řešení tiskárny	46
Obr. 4-2 Konstrukce rámu tiskárny	47
Obr. 4-3 Konstrukční řešení pojezdu osy Z a kalibrace tiskové plochy	49
Obr. 4-4 Klasický systém pohybu v rovině XY	50
Obr. 4-5 H-bot	51
Obr. 4-6 Finální verze systému pohybu v rovině XY	52
Obr. 4-7 Upravená sestava trysky	53
Obr. 4-8 Konstrukční řešení uchycení trysek a řemenu	53
Obr. 4-9 Tomografie trysky 0,4 mm	54
Obr. 4-10 Převodovaný extruderový systém	54

Obr. 4-11 Vyhřívaná komora	55
Obr. 4-12 Dveře tiskárny.....	56
Obr. 4-13 Schéma a výsledné zapojení jednotlivých součástí.....	57
Obr. 4-14 Schéma ovládacích prvků tiskárny	58
Obr. 4-15 Výsledná podoba tiskárny, elektroinstalace a první tisk	61
Obr. 4-16 Struktura povrchu podložky Stratasys.....	62
Obr. 4-17 Struktura povrchu skla korundovaného při tlaku: a) 2 bar.; b) 3 bar.; c) 4 bar.	62
Obr. 4-18 BuildTak	63
Obr. 4-19 Podložka pro tisk materiálu ULTEM (PEI) a PC	63
Obr. 4-20 Připravené tiskové podložky	64
Obr. 4-21 Přeměření objektu digitálním posuvným měřidlem	64
Obr. 4-22 Testovací schodovitá pyramida	65
Obr. 4-23 Odchylky v rovině XY	65
Obr. 4-24 Testovací dutá krychle.....	66
Obr. 4-25 Ověření vnějšího průměru dutého válce	66
Obr. 4-26 Ověření úhlů a odchylek: a) v rovině XY; b) v ose Z	67
Obr. 4-27 Snímky povrchu: a) 0,05 mm; b) 0,3 mm.....	67
Obr. 4-28 Zleva PLA-D, PC, PLA, ABS, a PET	68
Obr. 4-29 Dvoubarevný tisk	68
Obr. 4-30 Tisk materiálu ULTEM.....	69
Obr. 4-31 Objekty k porovnání deformací	70
Obr. 4-32 Vyhodnocení deformace kvádrů.....	71
Obr. 4-33 Vyhodnocení deformace objektu s výběžky	71
Graf 1-1 Vliv koeficientu smrštění na warp deformace [7].....	24
Graf 1-2 Vliv teploty okolí na velikost warp deformace [7]	25
Graf 1-3 Deformace v závislosti na délce tisknutého objektu [7].....	25
Graf 1-4 Zkouška tahem pro různé úhly rastru s překrytím 0 mm pro ABS P400 [14].....	27
Graf 1-5 Zkouška tahem pro různé úhly rastru s překrytím 0,003 mm pro ABS P400 [14] ...	28
Graf 1-6 Pevnost v tlaku modelu s výplní 45°/-45° [14]	31
Graf 1-7 Vliv počtu vrcholů polygonu proloženého kružnicí na výsledný rozměr díry [23]...	32
Graf 4-1 Výsledky tahových zkoušek.....	69

10 SEZNAM TABULEK

Tab. 1-1 Stručný přehled vlastností materiálu [3], [4], [5], [6]	17
Tab. 1-2 Množství nehomogenit v závislosti na teplotě tavení a teplotě okolí [10]	19
Tab. 1-3 Měřené a předpokládané hodnoty pevnosti v tahu pro materiál ABS [16]	29
Tab. 1-4 Ideální hodnoty nastavení parametrů tisku [16]	30
Tab. 1-5 Topologická optimalizace dílu [20]	31
Tab. 1-6 Přehled vlastností materiálů pro výrobu trysky [30]	35
Tab. 1-7 Rozměry trysek [31]	35
Tab. 4-1 Porovnání minimálních posuvů a sil jednotlivých systémů	52
Tab. 4-2 Kalibrace extruderu	60
Tab. 4-3 Měřené drsnosti povrchu	67
Tab. 4-4 Porovnání warp deformací ve sledovaných bodech	71

11 SEZNAM PŘÍLOH

11

Příloha 1: Fotodokumentace

Příloha 2: Vyhodnocení povrchu

Příloha 3: Materiálový list ABS M30i

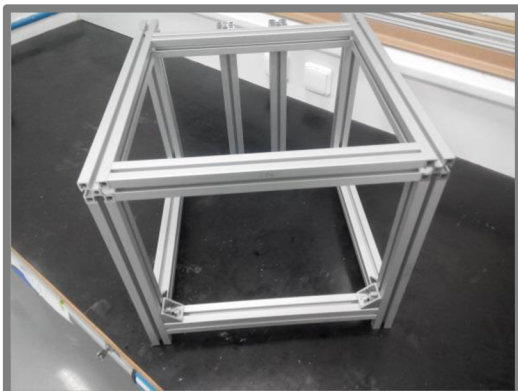
Externí přílohy:

Příloha 4: Seznam nakupovaných dílů

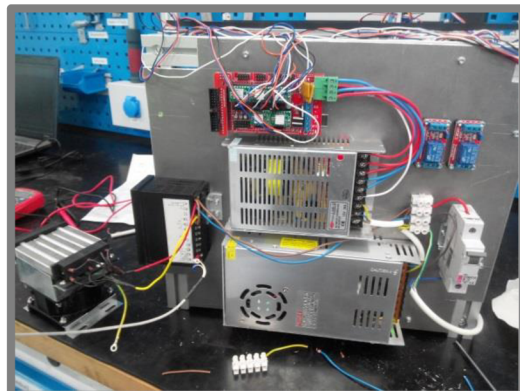
Příloha 5: Výkresová dokumentace

Příloha 6: DVD

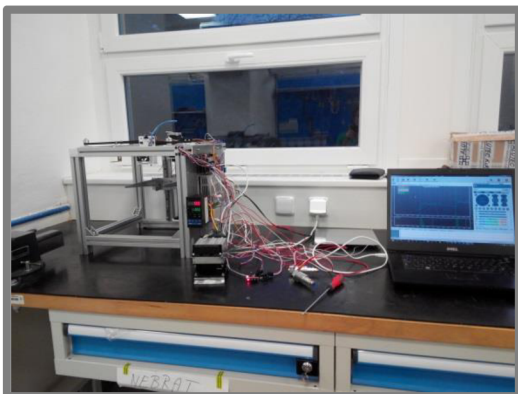
Příloha 1: Fotodokumentace



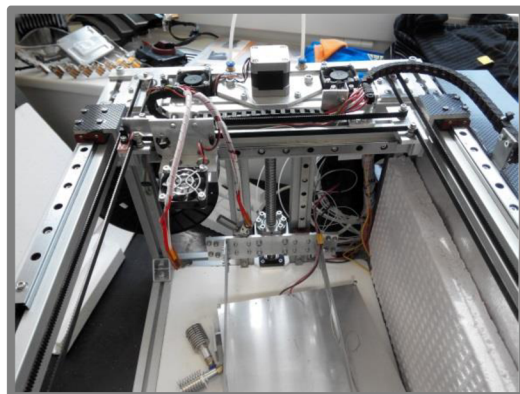
Rám tiskárny



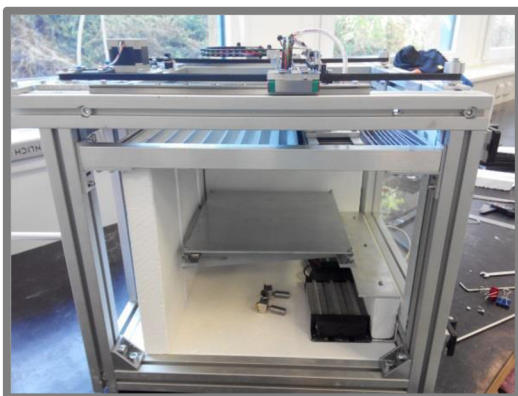
Příprava elektroniky



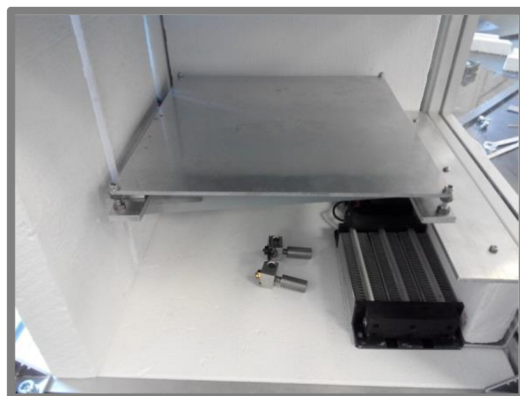
Zkouška elektroniky



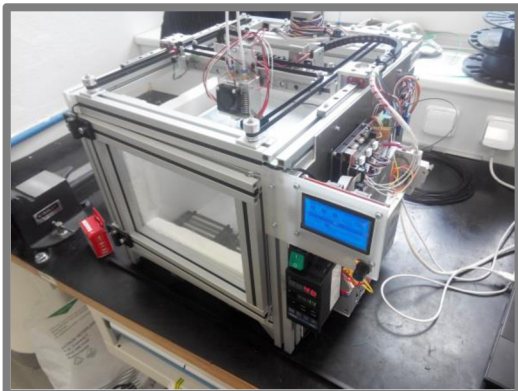
Montáž pojezdů



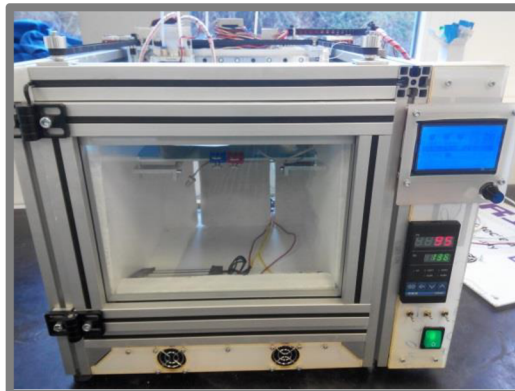
Kompletace vyhřívané komory



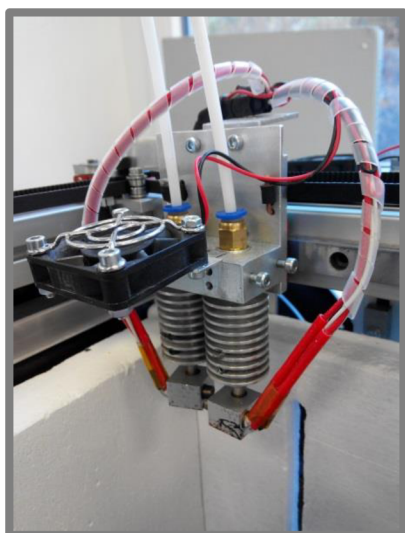
Instalace topných členů



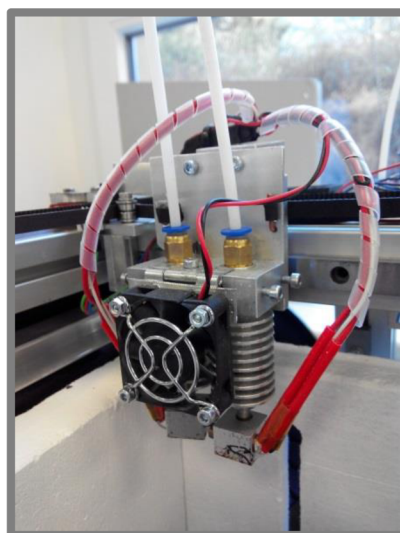
Instalace ovládacího panelu



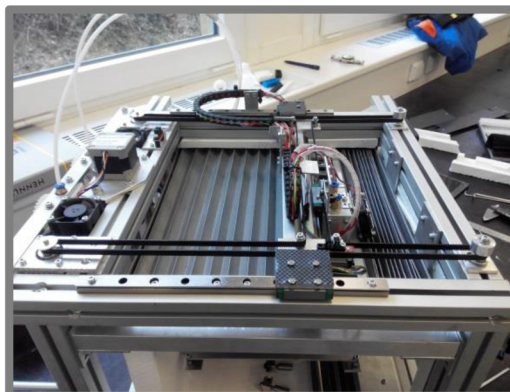
Montáž krytování



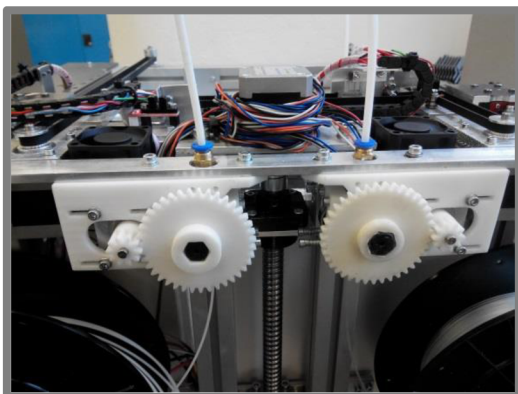
Pohled na pojízdnu tiskovou hlavu a systém chlazení



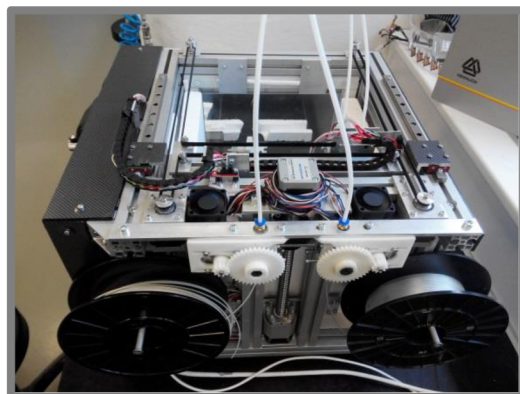
Montáž krycích měčů



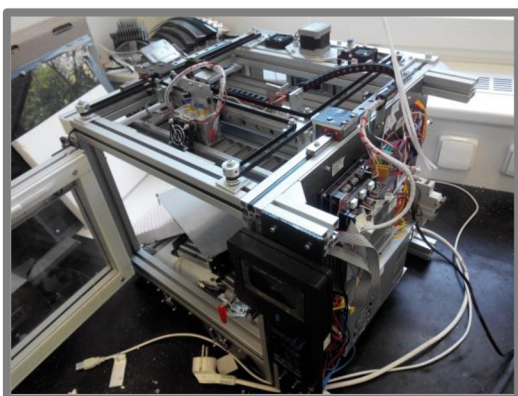
Montáž krycích měčů



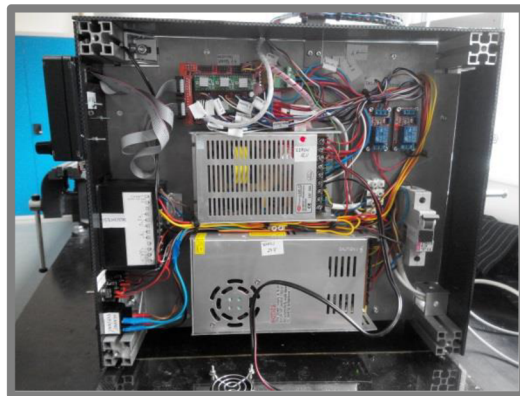
Extruderový systém tiskárny



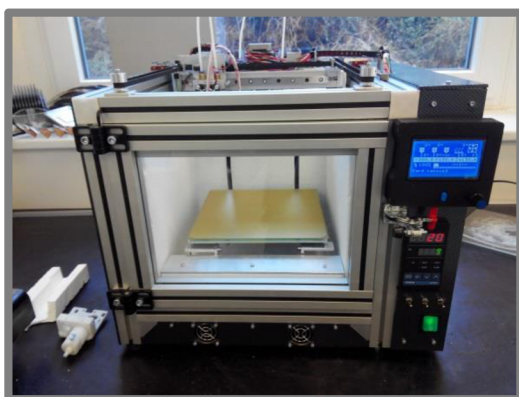
Zadní pohled



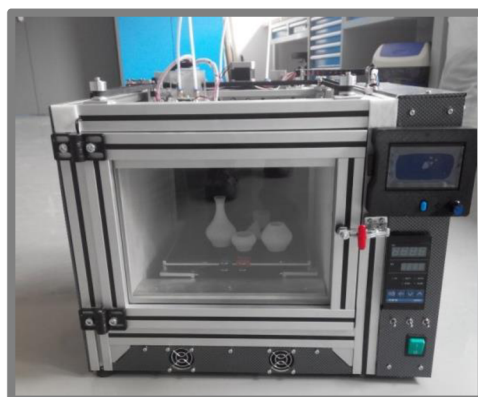
Úpravy elektroinstalace



Pohled na finální elektroinstalaci



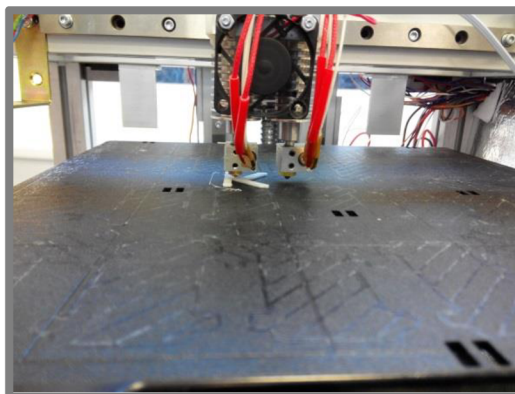
Tiskárna s LED osvětlením



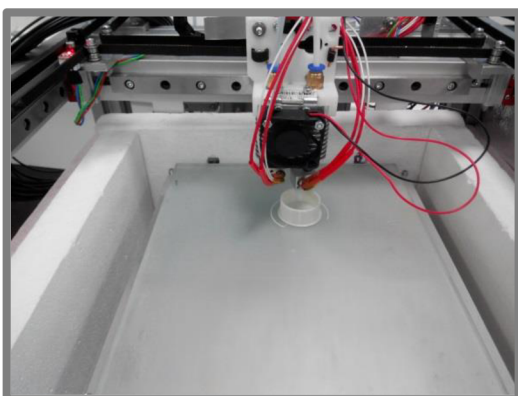
Finální podoba 3D tiskárny



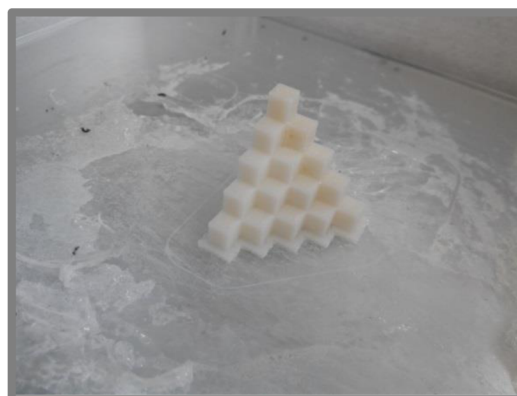
Finální podoba 3D tiskárny



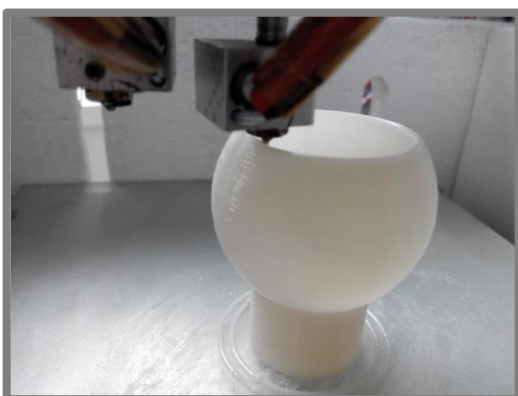
Zkušební tisk



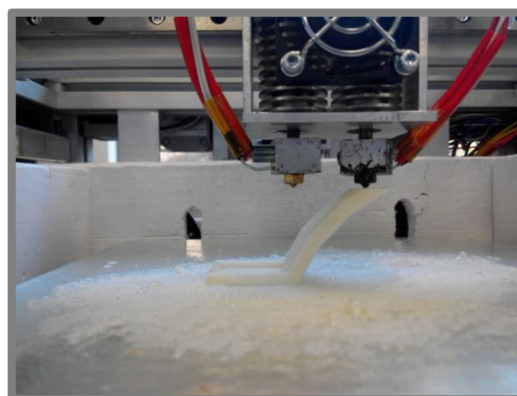
Tisk válcového validačního objektu (ABS M30i)



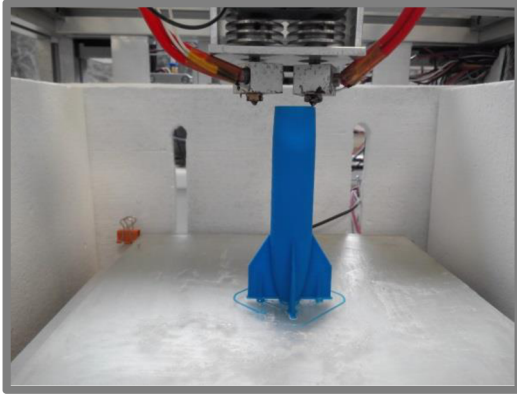
Validační výtisk pyramidy (ABS M30i)



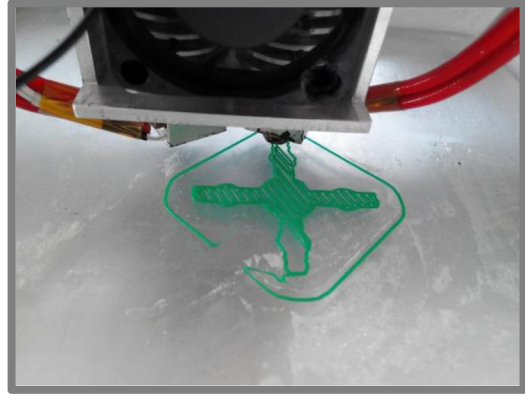
Zkušební tisk (ABS)



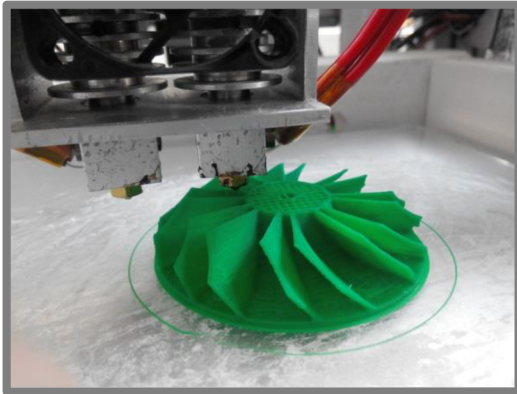
Zkouška tisku pod úhlem (ABS M30i)



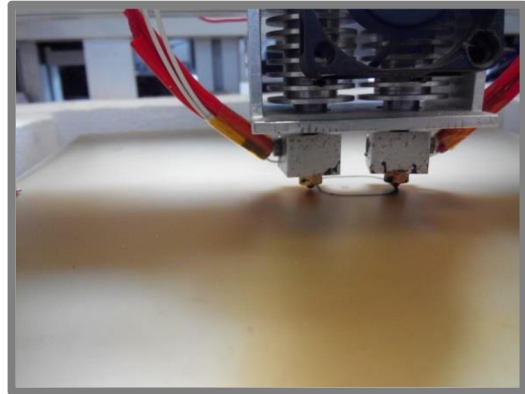
Zkušební tisk (PLA)



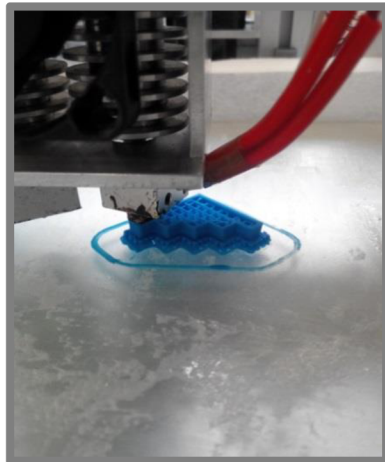
Zkušební tisk (PLA-D)



Tisk turbíny (ABS)



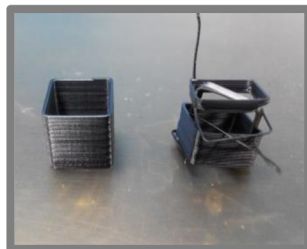
Zkouška tisku materiálu ULTEM (PEI)



Validační tisk (ABS)



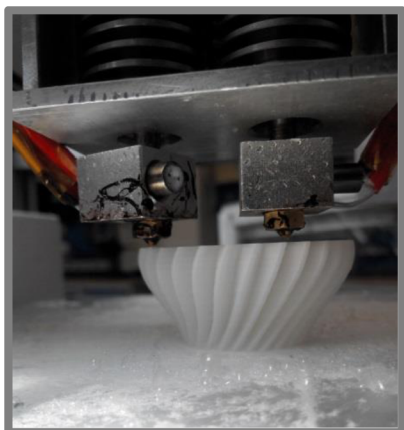
Kontrolní panel tiskárny



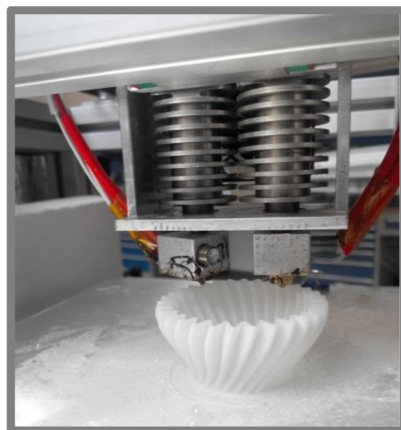
Validační objekt (PEI)



Validační objekt (PC)



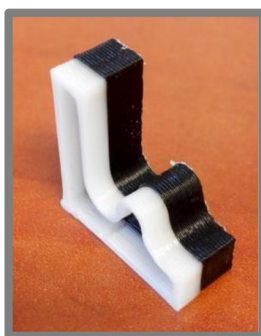
Zkušební tisk vázy (ABS)



Zkušební tisk vázy (ABS)



Zkušební tisk (PET)



Dvoubarevný tisk (ABS)



Výtisk vázy (ABS)



Zkušební tisk (ABS)



Zkušební tisk (NYLON)



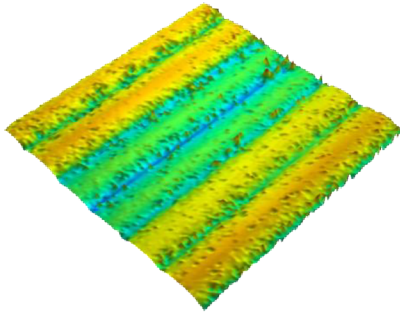
Zkušební tisk (PET)



Validační výtisky raket (PLA-D, ABS M30i, PC, PLA, ABS)

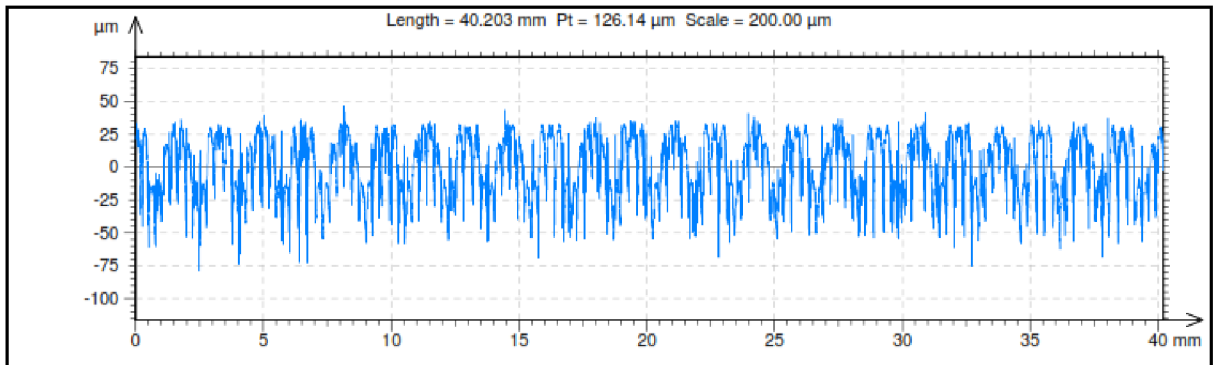
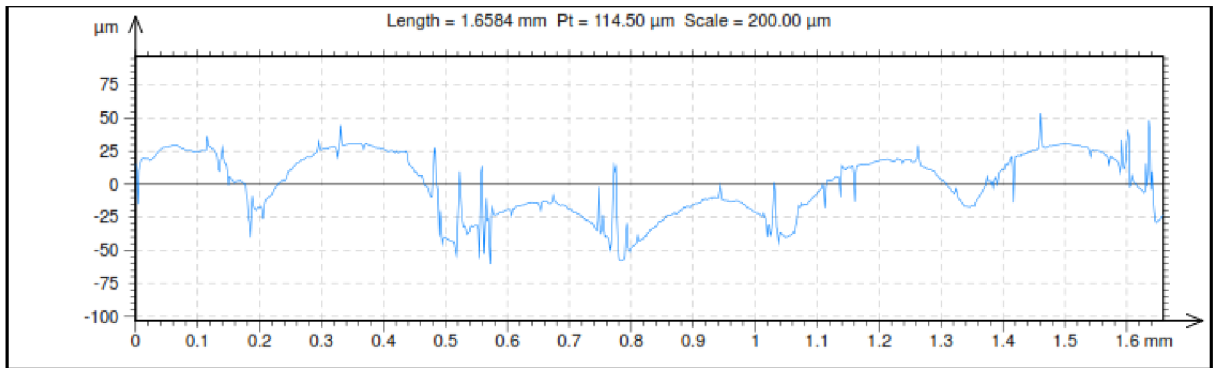
Příloha 2: Vyhodnocení povrchu

Výška vrstvy v ose Z 0,3 mm.

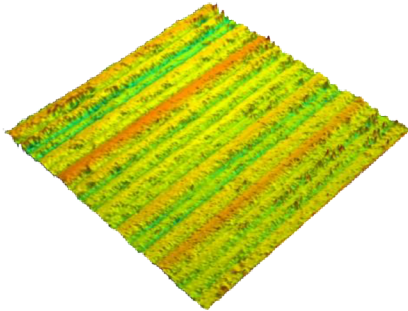


ISO 4287			
Amplitude parameters - Roughness profile			
Rp	39.844	µm	Gaussian filter, 8 mm
Rv	66.198	µm	Gaussian filter, 8 mm
Rz	106.04	µm	Gaussian filter, 8 mm
Rc	56.278	µm	Gaussian filter, 8 mm
Rt	120.12	µm	Gaussian filter, 8 mm
Ra	20.324	µm	Gaussian filter, 8 mm
Rq	23.019	µm	Gaussian filter, 8 mm
Rsk	-0.3244		Gaussian filter, 8 mm
Rku	2.0038		Gaussian filter, 8 mm
Spacing parameters - Roughness profile			
RSm	0.21891	mm	Gaussian filter, 8 mm

Identity card	
Name:	10xABS_BLACK_100001
Measured by:	TalysurfCCI L10xZ1B1S1F5Hpk
Filename:	C:\CCI Data\RoJa\3DP_ZLEBB\10xABS_BLACK_100001.sur
Created on:	5/4/2015 12:44:51 PM
Measure duration:	?
Gauge Resolution:	?
Axis: Z	
Length:	191.80 µm
Z min:	15784 µm
Z max:	15976 µm
Size:	19180090 digits
Spacing:	0.01000 nm
NMP ratio:	4.4919 % (47101 Pts)
CCI Parameters :	
Lens :-	10x (WD 7.4 mm)
Field of View :-	1.660 mm (Zoom x1)
XY Resolution :-	1.62 µm (XY mode)
Height (Meas Range) :	191.80 µm (150.4 µm)
Scan Speed :-	x1
Surface Nature :-	LowReflect2 (Green LED)
Surface Texture :-	Rough
Levelling :-	Off
Threshold Filter :-	None
Data Fill :-	Off
Segmentation :-	Off

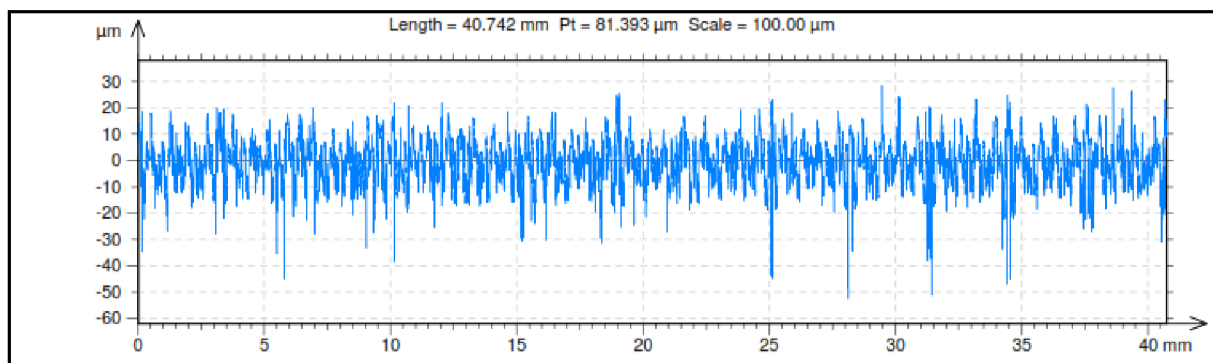
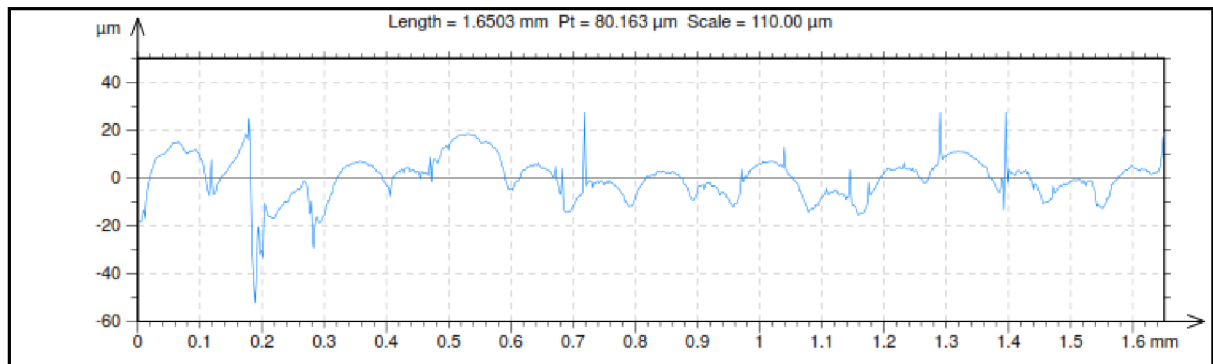


Výška vrstvy v ose Z 0,005 mm



ISO 4287			
Amplitude parameters - Roughness profile			
Rp	20.617	µm	Gaussian filter, 2.5 mm
Rv	33.693	µm	Gaussian filter, 2.5 mm
Rz	54.310	µm	Gaussian filter, 2.5 mm
Rc	19.839	µm	Gaussian filter, 2.5 mm
Rt	77.917	µm	Gaussian filter, 2.5 mm
Ra	6.3765	µm	Gaussian filter, 2.5 mm
Rq	8.0574	µm	Gaussian filter, 2.5 mm
Rsk	-0.32699		Gaussian filter, 2.5 mm
Rku	3.3868		Gaussian filter, 2.5 mm
Spacing parameters - Roughness profile			
RSm	0.11268	mm	Gaussian filter, 2.5 mm

Identity card	
Name:	10xABS_BLACK_200001
Measured by:	TalysurfCCI L10xZ1B1S1F5Hpk
Filename:	C:\CCI Data\RoJa\3DP_ZLEBEK\10xABS_BLACK_200001.sur
Created on:	5/4/2015 1:02:22 PM
Measure duration:	?
Gauge Resolution:	?
Axis: Z	
Length:	130.77 µm
Z min:	15382 µm
Z max:	15512 µm
Size:	13076868 digits
Spacing:	0.01000 nm
NMP ratio:	5.3047 % (55624 Pts)
CCI Parameters :	
Lens :-	10x (WD 7.4 mm)
Field of View :-	1.660 mm (Zoom x1)
XY Resolution :-	1.62 µm (XY mode)
Height (Meas Range) :	130.77 µm (97.8 µm)
Scan Speed :-	x1
Surface Nature :-	LowReflect2 (Green LED)
Surface Texture :-	Rough
Levelling :-	Off
Threshold Filter :-	None
Data Fill :-	Off
Segmentation :-	Off



Příloha 3: Materiálový list ABS M30i

ABS-M30i™ is a high strength material well suited for the medical, pharmaceutical and food packaging industries. Parts manufactured with ABS-M30i material are biocompatible (ISO 10993 USP Class VI)* and can be gamma or EtO sterilized. When combined with Fortus® 3D Production Systems, ABS-M30i gives you biocompatible parts with excellent mechanical properties that are well suited for conceptual modeling, functional prototyping, manufacturing tools and end-use-parts.

Mechanical Properties ¹	Test Method	English		Metric	
		XZ Axis	ZX Axis	XZ	ZX
Tensile Strength, Yield (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	4,550 psi	3,750 psi	31 MPa	26 MPa
Tensile Strength, Ultimate (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	4,650 psi	4,050 psi	32 MPa	28 MPa
Tensile Modulus (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	320,000 psi	310,000 psi	2,230 MPa	2,180 MPa
Tensile Elongation at Break (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	7%	2%	7%	2%
Tensile Elongation at Yield (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	2%	1%	2%	1%
Flexural Strength (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	8,700 psi	7,000 psi	60 MPa	48 MPa
Flexural Modulus (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	300,000 psi	250,000 psi	2,060 MPa	1,760 MPa
Flexural Strain at Break (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	4%	3.5%	4%	3.5%

Mechanical Properties	Test Method	English	Metric
		XZ	XZ
IZOD Impact, notched (Method A, 23°C)	ASTM D256	2.4 ft-lb/in	128 J/m
IZOD Impact, un-notched (Method A, 23°C)	ASTM D256	5.6 ft-lb/in	300 J/m

Thermal Properties ¹	Test Method	English	Metric
Heat Deflection (HDT) @ 66 psi, 0.125" unannealed	ASTM D648	204°F	96°C
Heat Deflection (HDT) @ 264 psi, 0.125" unannealed	ASTM D648	180°F	82°C
Vicat Softening Temperature (Rate B/50)	ASTM D1525	210°F	99°C
Glass Transition (Tg)	DSC (SSYS)	226°F	108°C
Coefficient of Thermal Expansion (flow)	ASTM E831	4.90 ⁻⁰⁵ in/in/°F	8.82 ⁻⁰⁵ mm/mm/°C
Coefficient of Thermal Expansion (xflow)	ASTM E831	4.70 ⁻⁰⁵ in/in/°F	8.46 ⁻⁰⁵ mm/mm/°C
Melting Point	-----	Not Applicable ²	Not Applicable ²

