



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VLIV KANÁLU TRYSKY NA PARAMETRY TISKU 3D FDM TISKÁRNY

THE EFFECT OF A NOZZLE CHANNEL ON PRINTING PARAMETERS OF FDM 3D PRINTER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Filip Rygl

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Filip Rygl
Studijní program:	Strojirenství
Studijní obor:	Strojirenská technologie
Vedoucí práce:	Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.
Akademický rok:	2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Vliv kanálu trysky na parametry tisku 3D FDM tiskárny

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Student na zvolené FDM 3D tiskárně. Provede testování vlivu délky a průměru výstupního kanálu trysky na kvalitu vyráběného dílu. Práce bude rovněž obsahovat řešení problematiky úzce související se zadaným tématem. Navrhne vlastní experiment a testované parametry. Na závěr provede vyhodnocení a doporučení do budoucna.

Cíle bakalářské práce:

- řešení zvolené problematiky
- popis technického vybavení
- návrh experimentu
- vyhodnocení experimentu
- závěr a doporučení do budoucna

Seznam doporučené literatury:

BILÍK, Oldřich a Martin VRABEC. Technologie obrábění s využitím CAD/CAM systémů. Ostrava: Vysoká škola báňská-Technická univ., 2002. 128 s. ISBN 80-248-0034-9.

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

CHANG, Tien-Chien, Richard WYSK a Hsu-Pin WANG. Computer-Aided Manufacturing. 3. vyd. New Jersey: Prentice Hall, 2005. 684 s. ISBN 0-13-142919-1.

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

PIŠKA, Miroslav a kol. Speciální technologie obrábění. Brno: CERM, 2009, 246 s. ISBN 978-80-2-4-4025-8.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne:

L. S.

prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá vlivem kanálu trysky na různé parametry tisku metodou FDM / FFF. V první části je stručně popsáno zařazení této metody mezi aditivními technologiemi. Následuje popis zařízení pro dotčenou metodu, parametrů tisku a rešerše zabývající se používanými polymerními materiály. V další kapitole je navržen experiment pro otestování vybraných tiskových parametrů a popsáno použité vybavení. Navazující část dokumentuje výstupy z provedených testů včetně jejich vyhodnocení a okomentování.

Klíčová slova

3D tisk, FFF, kanál trysky, ABS, PLA, zkušební tisk

ABSTRACT

This bachelor thesis follows up the influence of the nozzle channel on different parameters of printing using FDM / FFF method. The first part briefly describes the inclusion of this method in additive technologies. Then follows the description of the device for this involved method, printing parameters and research of used polymer materials. In the next chapter is proposed an experiment to test selected print parameters and there is described used equipment. The following part documents the outputs of the tests, their evaluation and comments.

Key words

3D print, FFF, nozzle channel, ABS, PLA, test print

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

RYGL, F. *Vliv kanálu trysky na parametry tisku 3D FDM tiskárny*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 69 s. 3 přílohy. Vedoucí bakalářské práce Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Vliv kanálu trysky na parametry tisku 3D FDM tiskárny vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
Datum

.....
Filip Rygl

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto vedoucímu bakalářské práce Ing. Oskaru Zemčíkovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce. Rád bych též poděkoval své družce Martině a dcerce Amálii za velikou trpělivost a za duševní podporu.

OBSAH

ABSTRAKT.....	3
PROHLÁŠENÍ.....	4
PODĚKOVÁNÍ	5
OBSAH	6
ÚVOD	8
1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY METODY FFF	9
1.1 Základní rozdělení technologií.....	9
1.2 Metoda FFF.....	10
1.3 Projekt RepRap	11
1.4 Konstrukční celky 3D tiskáren RepRap.....	11
1.4.1 Rám tiskárny	11
1.4.2 Pohybové mechanismy	12
1.4.3 Řídící elektronika.....	13
1.4.4 Extruder.....	14
1.4.5 Sestava tiskové hlavy	15
1.4.6 Pracovní stůl.....	16
1.4.7 Napájení	17
1.5 Důležité faktory působící na proces tisku	17
1.5.1 Oblast softwarového zpracování.....	17
1.5.2 Tvar a rozměry tištěného dílu	17
1.5.3 Parametry tisku	20
1.6 Tryska.....	22
1.7 Materiály pro 3D tisk metodou FFF	23
1.7.1 Obecná charakteristika polymerů.....	24
1.7.2 Některé další charakteristiky polymerů	24
1.7.3 Termoplasty	28
1.7.4 Index toku taveniny.....	29
1.7.5 Termoplasty obvykle používané pro 3D tisk metodou FFF	30
2 NÁVRH EXPERIMENTU	36
2.1 Zkušební trysky.....	36
2.2 Zkušební výtisky	36
2.3 Popis použitého vybavení	40
3 PROVEDENÍ EXPERIMENTU.....	42
3.1 Rozměrová kontrola vláken	42

3.1.1	Rozměrová kontrola vláken ABS	42
3.1.2	Rozměrová kontrola vláken PLA	46
3.2	Mikroskopické pozorování vzorků vláken.....	48
3.2.1	Vlákna z materiálu ABS	49
3.2.2	Vlákna z materiálu PLA	51
3.4	Vyhodnocení vzorků reprezentujících převis	55
3.5	Vyhodnocení vzorků reprezentujících přemostění	57
3.6	Měření teploty motoru extruderu.....	59
4	VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU.....	61
5	ZÁVĚR	63
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	65
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	68
	SEZNAM PŘÍLOH.....	70

ÚVOD

Vedle růstu podílu 3D tisku v oblastech průmyslu a zdravotnictví, přichází také stále častější uplatnění této metody v i malých dílnách, či dokonce v domácnostech. Z poměrně široké škály aditivních technologií jsou to zejména stroje pracující na principu metody FFF (fused filament fabrication, což je otevřená varianta registrované komerční technologie FDM - fused modeling deposition), ke kterým nachází cestu čím dál více běžných uživatelů. Díky tomu vzniká stále početnější komunita stavitelů a provozovatelů 3D tiskáren, na což reagují výrobci elektroniky a mechanických dílů a nabízí široké spektrum součástí pro stavbu tiskáren.

Tryska tiskárny (obr. 1) je jedním z těchto dílů. Je k dispozici v mnoha provedeních a v širokém cenovém rozpětí. V katalogu bývá uveden její materiál, rozměr připojovacího závitu a průměr kanálu. Údaj o délce, případně geometrii kanálu však v naprosté většině případů chybí. Nabízí se otázka, zda tyto parametry také mohou znatelným způsobem ovlivnit průběh a výsledek tisku.

Záměrem této práce je provedení experimentu s několika různými typy trysek a porovnání výsledků. Na tiskový proces působí velké množství různých faktorů, které na něj mají menší či větší vliv, je tedy třeba je vzít v úvahu. Proto experimentu předchází stručné seznámení s problematikou, které se týká jednak metody FFF se zvláštním zřetelem na stroje vzešlé z komunitních projektů, poté následuje popis skupiny používaných materiálů, jejich složení a vlastností. Na základě těchto informací je pak možné lépe uchopit kontext výsledků experimentu.



Obr. 1 – Trysky různých výrobců.

1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY METODY FFF

3D tisk je tzv. aditivní technologií. Tímto pojmem se obecně rozumí skládání výrobku po jednotlivých horizontálních vrstvách, v průmyslových aplikacích o výšce zpravidla v řádu setin až desetin milimetru. Ve srovnání s konvenčními metodami používanými v hromadné a sériové výrobě jde ve všech případech o metody drahé a málo produktivní. Proto nacházejí hlavní uplatnění v oblasti Rapid Prototyping (rychlá výroba prototypů) omezeně i v kusové či umělecké výrobě (např. šperkařství) [1]. Produkce velkého množství výrobků často vyžaduje používání speciálních nástrojů, forem a přípravků o vysoké pořizovací ceně. Tato cena je potom rozmělněna počtem výrobků. Zcela jiná situace je však u výroby kusové nebo prototypové. Zde by se cena za jeden výrobek po přičtení nákladů na výrobní prostředky a příslušenství byla mnohdy neúnosnou. Zde se proto dostávájí ke slovu hlavní výhody zařízení pro 3D tisk:

- minimum nástrojů - stroj pro 3D tisk používá mnohem užší škálu pracovních nástrojů, než například obráběcí stroje, často pouze jeden (zdroj laseru nebo elektronového paprsku, tisková hlava, nebo sada trysek),
- nejsou třeba formy - pohybový systém stroje dopraví materiál (nebo zajistí jeho vytvrzení) jen tam, kde se má podle projektu nacházet, odpadá tedy nutnost tvar výrobku fyzicky vymezovat,
- nejsou třeba přípravky, nebo si je stroj vyrábí sám, souběžně s výrobkem (podpory).

1.1 Základní rozdělení technologií

Spojování materiálu je realizováno tavením, spékáním, vytvrzováním, nebo lepením. Podle typu používaného materiálu a metody jeho nanášení a spojování lze rozlišit tyto technologie (mimo metodu FFF, která bude dále rozebrána podrobněji):

- **SLA** (laserová stereolitografie) a **DLP** (Digital-Light-Processing) - obě metody jsou založeny na polymerizačním vytvrzování roztoku prostřednictvím působení záření (ultrafialové, případně z viditelné části spektra). U SLA je fotopolymerizace realizována průchodem laserového paprsku přes každý bod plochy průřezu vyráběného dílu. V DLP zařízení je vyráběná plocha ozařována prostřednictvím projektoru. Obě tyto metody se vyznačují vysokou rozměrovou přesností výrobků, výrobní zařízení i materiály jsou velice drahé [2],
- **SLS** (Selective Laser Sintering) a **DMLS** (Direct Metal Laser Sintering) - materiál je ve formě prášku prostřednictvím válce nebo ramena s keramickým břitkem po vrstvách nanášen do pracovní komory. Zde je průchodem laserového paprsku po ploše průřezu výrobku spojován spékáním. Tímto způsobem se zpracovávají termoplasty, keramika, sklo, anebo v případě

DMLS kovy. Rovněž tato metoda se řadí mezi velmi drahé způsoby výroby [3],

- **LOM** (Laminated Object Manufacturing) - polotovarem je fólie, z jedné strany opatřená přilnavou vrstvou. Tato fólie se odvíjí ze zásobního válce přes pracovní prostor, kde dochází k vlastnímu technologickému procesu a poté je navíjena na druhý válec. V pracovním prostoru dochází k přitisknutí fólie na předchozí vrstvu. Poté je laserem vyříznut požadovaný obrys dané vrstvy. Při vyřezávání nesmí dojít k porušení spojitosti pásu materiálu, aby se po dokončení řezu mohla jeho použitá část odvinout, čímž se do pracovního prostoru dostane nový materiál pro další vrstvu. Pracovní prostor je vyhříván a pohybuje se v něm válec, kterým je prováděno stlačení výrobku po každé vrstvě [2],
- **MJM** (Multi Jet Modeling) - nanášení materiálu funguje na podobném principu jako inkoustová tiskárna. Kapalný fotopolymer je nanášen soustavou trysek, jejichž počet podle typu zařízení činí několik desítek až stovek. Bezprostředně po nanesení je vytvrzen osvitom UV záření. Tisk probíhá opět po horizontálních vrstvách, po dokončení každé vrstvy se pracovní stůl posune o její výšku [2],
- **Powder Binding** - podobně jako u metody SLS je zde přítomen materiál ve formě prášku, který je ze zásobníku po jednotlivých vrstvách distribuován do pracovního prostoru, vybaveného vertikálně posuvným stolem. Odlišný je způsob spojování materiálu – v rovině nad pracovním prostorem se pohybuje tisková hlava. Ta funguje na principu inkoustové tiskárny, jako tiskový materiál se však používají speciální pryskyřice. Ty mohou být obarveny, takže tato metoda umožňuje i barevný 3D tisk. Tisknout lze z práškových plastů, nebo např. sádry [4].

1.2 Metoda FFF

Metoda FFF s výše uvedenými technologiemi sdílí prakticky jen v ose Z (vertikálně) posuvný pracovní stůl (resp. u některých řešení 3D tiskáren může být stůl pevný a posouvá se osa X nebo Y, případně obě). Mohou být rovněž používány některé materiály, které se používají i pro SLS, avšak typicky v jiné formě. V ostatních ohledech se jedná o technologicky odlišné řešení.

Obecný princip této metody spočívá v tom, že je z polotovaru vytvořeno vlákno o definovaném průměru, kterým se postupně vyplňuje celý průřez dané vrstvy výrobku. Tvorba vlákna probíhá v kanálu trysky, kterým je polotovar protlačován. Polotovarem může být takový materiál, který splňuje 2 základní požadavky: za prvé musí být schopen průchodu kanálem s rozumně nízkým odporem a bez porušení spojitosti a za druhé je nutné, aby byl po opuštění trysky dostatečně tuhý – pokud by tomu tak nebylo, pak by tištěná struktura nemohla udržet požadovaný tvar. Z toho lze vyvodit, že materiál musí v průběhu tiskového procesu vykazovat plastické vlastnosti. Pro účely strojírenského průmyslu jsou zdaleka nejvýznamnějšími a nejrozšířenějšími materiálem plasty.

Polotovary jsou ve formě strun navinutých na cívce. Obvyklé průměry jsou 3 (přesněji 2,85) mm a 1,75 mm.

Dalším znakem této metody je v porovnání s ostatními méně složitá konstrukce stroje. Nejsou totiž třeba další obslužné systémy pro nakládání s práškem nebo kapalinami. Rovněž procesní komponenty jsou méně komplikované – sestava pracovní části FFF tiskárny je mnohem jednodušší a méně náročným zařízením, nežli například laserový modul s optickým příslušenstvím, nebo technologicky poměrně sofistikovaná tisková hlava s desítkami až stovkami trysek. Vzhledem k těmto skutečnostem došlo k rozšíření 3D tisku metodou FFF i do domácích a amatérských podmínek a možnost svépomocné konstrukce tiskových zařízení.

1.3 Projekt RepRap

V roce 2005 tak vzniknul komunitní projekt RepRap (replicating rapid prototyper) a o něco později první prototypy těchto 3D tiskáren. Jeho název je mírně zavádějící, neboť sebereplikace zdaleka není úplná; tisknout lze jen plastové díly sloužící k uchycení konstrukčních prvků, držáky apod. Kovové součásti, motory, vodiče, řemeny a řídicí elektroniku tisknout nelze a musí se opatřit jiným způsobem. Cílem však je, aby se u netisknutelných dílů jednalo o běžně dostupné, normalizované díly [5].

RepRap je tzv. opensourcový projekt, veškeré informace, plány, principy a také software spadá pod tzv. GPL (General public licence). Filozofií této licence je svobodný přístup k informacím a též zdrojovým kódům softwaru. Materiály týkající se tohoto projektu je možné za dodržení několika vyjmenovaných podmínek volně používat, šířit, nebo upravovat. Jednou z hlavních podmínek je jakékoli další používání informací pouze opět pod touto licencí. To znamená, že na produkt vzešlý z tohoto projektu nelze uplatňovat patentovou ochranu a bránit jeho šíření [6].

1.4 Konstrukční celky 3D tiskáren RepRap

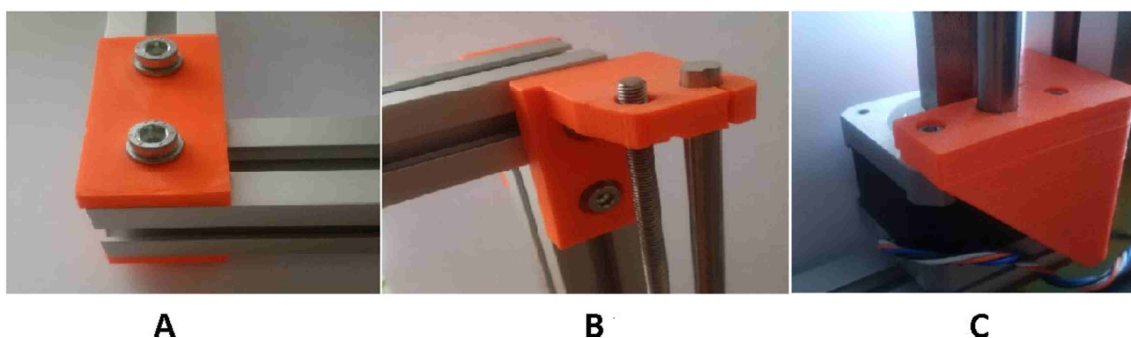
Při konstrukci tiskových zařízení projektu RepRap se uplatňuje mnoho poměrně rozdílných přístupů. V následujících podkapitolách bude uveden stručný přehled nejrozšířenějších řešení. Pro účely této práce se dále pojmem „3D tiskárna“ bude rozumět 3D tiskárna s technologií FFF zásobovaná plastovou strunou a vycházející z filosofie RepRap - pokud nebude výslovně uvedeno jinak.

1.4.1 Rám tiskárny

Rám je základním stavebním prvkem, na němž jsou uchyceny všechny mechanické komponenty. Jedná se o prostorovou konstrukci z kovových profilů, ev. výpalků z plechu. Spoje jsou nejčastěji šroubové, s využitím vytištěných dílů sloužících jako vazby sousedních profilů (viz obr. 1.1a), nebo za účelem uchycení dalších konstrukčních elementů (např. 1.1b, c.). Rovněž se objevuje

i spojování svařováním, avšak není zdaleka tak rozšířené, krom toho se toto řešení příliš neslučuje s filosofií RepRap, protože snižuje podíl vytištěných součástí v konstrukci a vyžaduje další technologii. Rám bývá typicky ve tvaru portálu nebo kostky. Méně často se lze (hlavně u starších konstrukcí) setkat i s jinými, složitějšími tvary.

Sofistikovanější 3D tiskárny mohou být vybaveny také vyhřívanou komorou, v níž je umístěn pracovní prostor. Jedná se o komoru s řízeným tepelným režimem, v níž je vznikající výrobek udržován při vyšší teplotě, než je teplota okolí. Temperování vytištěných vrstev do značné míry omezuje deformace vznikající nerovnoměrným ochlazováním. Uzavřený prostor navíc zamezuje nežádoucímu proudění vzduchu, které rovněž zapříčiňuje nerovnoměrné ochlazování výrobku.



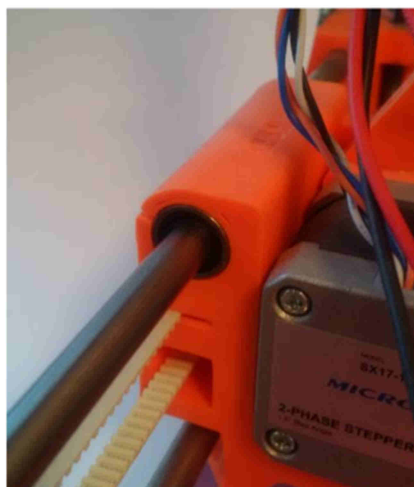
Obr 1.1 – Příklady konstrukčního využití součástí vytištěných na jiné tiskárně. A – spojení dvou profilů, B – uchycení vodící tyče, C – konzola krokového motoru.

1.4.2 Pohybové mechanismy

3D tisk ve skutečnosti neprobíhá ve všech 3 směrech zároveň - je vždy tištěna jedna vrstva výrobku v rovině XY, přičemž osa Z zůstává statickou. Po dokončení dané vrstvy dojde k posunu v ose Z o její výšku a proces se opakuje [1].

Pro vedení v osách se nejčastěji používají hlazené kruhové tyče, po kterých se pohybují lineární ložiska (obr. 1.2) – kuličková nebo kluzná (ta mohou být rovněž zhotovena metodou FFF). Přenos síly od motorů se uskutečňuje v případě horizontálních os ozubenými řemeny, ev. trapézovými tyčemi, u svislé osy pak výhradně prostřednictvím závitové tyče.

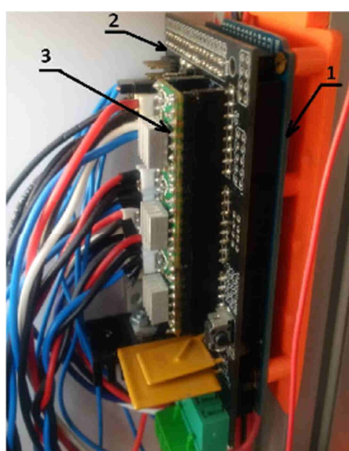
Zdrojem síly jsou pak krokové motory s osazenými řemenicemi pro pohon os X a Y a sespojovány se závitovou tyčí v případě osy Z. Na přesnost a rozlišení pohybů má vliv nejmenší délka kroku, která vychází jednak z průměru řemenice nebo stoupání závitu a jednak z úhlové velikosti kroku motoru. Ta je dána konstrukcí motoru, počtem fází a počtem zubů na rotoru [7].



Obr. 1.2 – Realizace vedení v ose prostřednictvím lineárního ložiska a řemenu – vozík extruderu na ose X.

1.4.3 Řídící elektronika

Úkolem řídicí elektroniky (ilustrační foto na obr. 1.3) je přijímat z počítače nebo paměťové jednotky bloky G-kódu a interpretovat je – tj. přímo řídit chod motorů, ventilátorů a topných těles. Skládá se procesorové desky, výkonového rozhraní (může být integrováno v jeden prvek), obsahujícího spínací tranzistory pro ovládání náhřevu stolku a tiskové hlavy a patič, ovladačů krokových motorů, kabeláže a prostředků zpětné vazby [8]. Zpětnou vazbu zajišťují termistory snímající teplotu stolku (tzv. heatbedu) a tzv. hot-endu, neboli tiskové hlavy. Každá osa je vybavena jedním či dvěma koncovými spínači (na mechanickém, nebo elektro-optickém principu), které slouží k určení nulového bodu před započítím tisku – všechny osy najedou do koncové polohy, čímž je nastaven souřadný systém. Žádnými dalšími typy zpětné vazby stroje RepRap obvykle nedisponují.

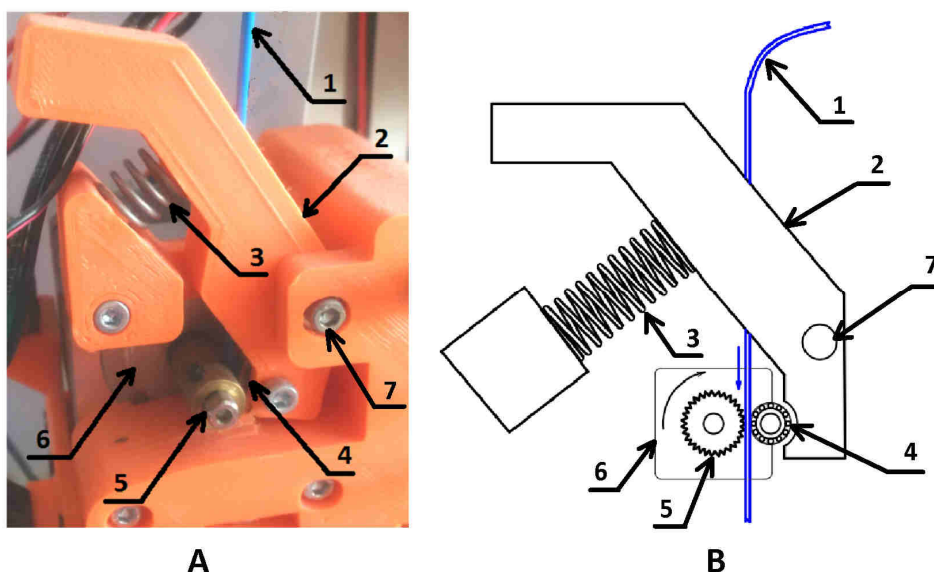


Obr 1.3 – Sestava řídicí elektroniky: 1 – procesorová deska, 2 – výkonové rozhraní, 3 – ovladače krokových motorů.

1.4.4 Extruder

Extruder, v literatuře někdy uváděný jako dávkovač [1] slouží k mechanickému podávání materiálu do trysky. Jeho otáčky jsou řízeny v závislosti na aktuální tiskové rychlosti. Nachází se mezi zásobníkem materiálu a tryskou resp. tepelnou bariérou. Z hlediska jeho umístění existují dvě možnosti. První z nich je přichycení k rámu, poblíž cívky s tiskovou strunou. Extruder v tomto případě protlačuje strunu do trysky přes bowden. Výhodou tohoto řešení je výrazné odlehčení pohyblivých částí tiskárny a tím snížení setrvačných sil během tisku. Použití bowdenu však s sebou nese vyšší obtížnost při seřizování podávání a retrakci a možné problémy se zasekáváním struny. Druhou, častější možností je umístění extruderu bezprostředně za tepelnou bariéru tiskové hlavy. Tato varianta je jednodušší a spolehlivější, avšak přináší větší zatížení posuvových elementů stroje. Motor extruderu je zpravidla nejvíce namáhaným motorem tiskárny.

Princip funkce a náčrt extruderu je znázorněn na obr. 1.4. Tisková struna (1) je posouvána prostřednictvím zubatice extruderu (5), která je osazena na hřídeli krokového motoru (6). Kuličkové ložisko (4) tlačí strunu proti ozubení. Tato přítlačná síla je vyvozována tlačnou pružinou (3), která se se na ložisko přenáší pákovým převodem tvořeným ramenem (2) uloženým na čepu (7). Přítlačnou sílu je nutno volit takovou, aby při podávání nedocházelo k prokluzu zubatice, a zároveň aby ozubení netvořilo v materiálu hluboké otlaky.

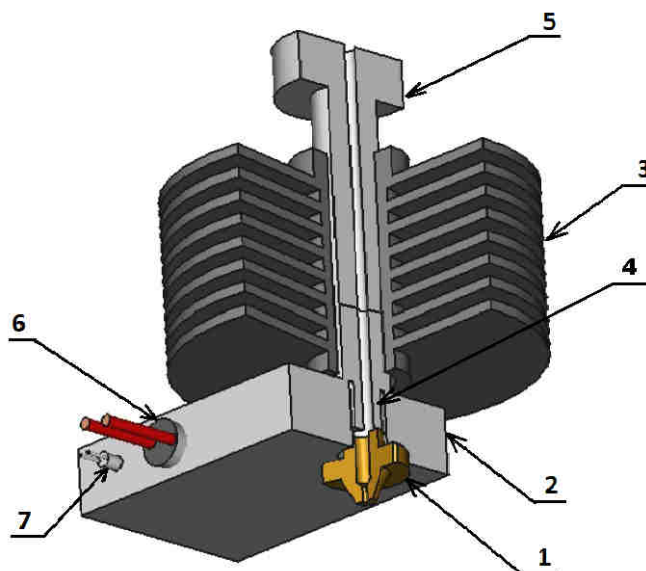


Obr. 1.4 Extruder: A – skutečný vzhled, B – schéma. 1 – tisková struna, 2 rameno, 3 tlačná pružina, 4 radiální kuličkové ložisko, 5 zubatice extruderu, 6 krokový motor, 7 čep.

1.4.5 Sestava tiskové hlavy

Pracovním nástrojem 3D tiskárny je tryska, ve které dochází k přeměně polotovaru na základní stavební prvek výrobku – vlákno. Vstupující polotovar je zde kontinuálně nahříván, čímž postupně dochází k jeho měknutí, v poslední fázi proběhne jeho roztavení. Materiál je protlačován kanálem trysky, kde získává požadovaný tvar a rozměr.

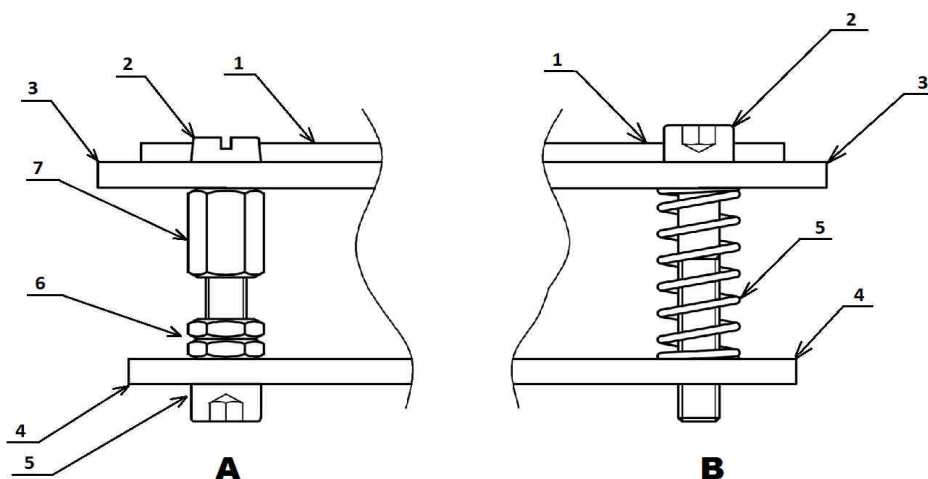
Řez je znázorněn na obr. 1.5. Tryska (1) je zasazena v tělese z hliníkové slitiny nazývaném heatblock, tepelný blok (2). Tento blok dále nese odporové topné těleso (6) a termistor (7). Souose s tryskou je zamontována trubička tvořící tepelnou bariéru – heatbreak (4). Ta může být zhotovena buď z austenitické oceli, anebo polymerních materiálů TEFLON/PEEK. Výhodou plastové varianty je daleko vyšší izolační schopnost, díky níž zpravidla není třeba zařadit aktivní chlazení. Nevýhodou je značně nižší mechanická odolnost a sklon k ucpávání a lepení materiálu na stěny. Ocelová trubička naproti tomu ucpáváním nebo zasekáváním procházejícího materiálu prakticky netrpí, vykazuje výrazně vyšší odolnost a životnost, nicméně její tepelná vodivost je natolik velká, že vyžaduje intenzivní chlazení. To je realizováno prostřednictvím žebrovaného chladiče (3), který je na tepelné bariéře nasunut. Chladič může být ještě navíc ofukován ventilátorem. Celá sestava je uložena za osazení (5) ve vozíku vodorovné osy, kde navazuje dle provedení buď přímo na extruder, anebo na ústí bowdenu. Tuhnutí vystupujícího materiálu může být urychleno přídatným ventilátorem, který se nachází v blízkosti tiskové hlavy a pohybuje se současně s ní.



Obr. 1.5 Sestava tiskové hlavy: 1 – tryska, 2 – tepelný blok, 3 – chladič, 4 – tepelná bariéra, 5 – osazení, 6 – topné těleso, 7 – termistor.

1.4.6 Pracovní stůl

Vlákna materiálu vznikající kanálu trysky jsou kladeny a čelem trysky přitlačovány na pracovní desku stolku. Ta bývá zhotovena ze skla, nebo hliníkové slitiny. Požaduje se od ní rovnoběžnost s rovinou tvořenou vodorovnými pracovními osami a rovinnost – kvůli zajištění stejnoměrné výšky vrstvy. Vzhledem k tomu, že tištěný výrobek je na stroji upnut pouze prostřednictvím adhezních sil, musí pracovní deska plnit umožnit přilnutí prvé tištěné vrstvy. To je řešeno několika přístupy v závislosti na typu tištěného materiálu – zejména na koeficientu jeho tepelné roztažnosti. Některé materiály nevyžadují žádná zvláštní opatření a lze je tisknout přímo na desku. U jiných je nutno desku temperovat, čímž je kotvící první vrstva udržována při vyšší teplotě, než je okolní. Díky tomu není její tepelná deformace natolik vysoká, aby došlo překonání adhezních sil a tím odtržení výtisku. Dalším řešením je použití prostředků zvyšujících přilnavost – kaptonová lepicí páska, speciální folie, lak na vlasy, nátěr roztokem rozpuštěného materiálu (např. ABS v acetonu) nebo lepidlem na bázi polyvinylacetátu. V praxi se většinou používá kombinace vyhřívané pracovní desky s její povrchovou úpravou pro zvýšení adheze. Ohřev pracovní desky je realizován prostřednictvím desky plošného spoje, na kterém je umístěna. Teplota je snímána termistorem, náhřev je řízen spínacím tranzistorem řídicí elektroniky. DPS spolu s pracovní deskou je v rozích připevněna k nosné desce šroubovým spojem, který umožňuje výškové seřízení (schematicky znázorněno na obr. 1.6 A, B). Nosná deska je buď uchycena k rámu stroje, anebo upevněna k vozíku pracovní osy (typicky Y), což je častější varianta.



Obr. 1.6 – Pracovní stůl 3D tiskárny, příklady provedení. A - uchycení prostřednictvím 2 šroubů a převlečné matice: 1 pracovní deska, 2 – horní šroub, 3 plošný spoj, 4 – nosná deska, 5 – spodní šroub, 6 – kontramatice, 7 – převlečná matice. B - uložení na pružině: 1 pracovní deska, 2 – horní šroub, 3 plošný spoj, 4 – nosná deska, 5 – tlačná pružina.

1.4.7 Napájení

Řídící i výkonové elektrické systémy 3D tiskárny vyžadují napájení stejnosměrným napětím 12 V (vzácně 24 V). Pro tento účel se nejčastěji používá napájecí zdroj určený pro osobní počítače, anebo pro průmyslové použití. Obvykle se jedná o spínaný zdroj o výkonu v řádu stovek Wattů, ze kterého je vyvedeno několik napájecích větví.

1.5 Důležité faktory působící na proces tisku

Průběh tisku a vlastnosti výsledného výrobku jsou ovlivněny kombinací mnoha okolností. Projevuje se geometrie a rozměry tištěného dílu, provedení stroje a jeho funkčních součástí, použitý materiál, kinematika pracovních pohybů, působení okolního prostředí atd. Pro dosažení očekávané kvality výrobku je nutno znát dopad těchto vlivů a zohlednit je ve fázi návrhu, modelování a při volbě parametrů tisku.

1.5.1 Oblast softwarového zpracování

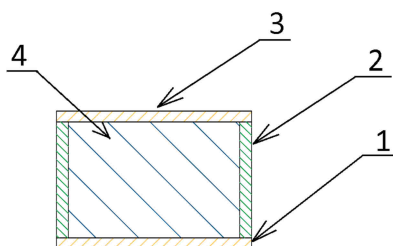
Prvním krokem k výrobě součásti na 3D tiskárně je digitalizace skutečného předmětu, návrhu, nebo představy. To znamená vytvoření digitálního modelu zpracovatelného počítačem. K tomu lze přistoupit dvěma způsoby. Prvním z nich je nasnímání reálného objektu speciálním scannerem, druhým je použití některého CAD programu, kterým může být komerční produkt jako např. Autodesk Inventor, AutoCAD Mechanical, SolidWorks, anebo volně použitelné programy OpenSCAD, FreeCAD atd. Výstupem je soubor ve formátu *.stl, který obsahuje síťový model [1].

Tento soubor je pak načten programem pro generování G-kódu. Zde se provede nastavení parametrů tisku, tiskárny a materiálu. Aplikace pak provede virtuální rozřezání modelu po jednotlivých vrstvách a na základě nastavených parametrů vygeneruje prostřednictvím svých algoritmů G-kód pro řízení posuvů ve všech osách, řízení otáček motoru extruderu, pro regulaci teplot a ovládání pomocného ventilátoru pro řízené chlazení výtisku. Jako zástupce těchto programů lze jmenovat např. Slic3r, Cura, Repetier; tyto funkce mohou mít také zabudovány některé komerční CAD/CAM programy. Získaný G-kód je potom načten do ovládacího rozhraní – programu zajišťujícího komunikaci počítače s řídicí elektronikou tiskárny, kam je odeslán k realizaci.

1.5.2 Tvar a rozměry tištěného dílu

Možnosti 3D tiskárny produkovat rozmanitou škálu tvarových prvků jsou značné, avšak existují určitá omezení daná vlastnostmi stroje a materiálu. Některé typy prostorových útvarů lze v limitované míře při dodržení potřebných podmínek tisknout, jiné není možné touto metodou vytvořit vůbec a je nutno se jim při návrhu vyhnout.

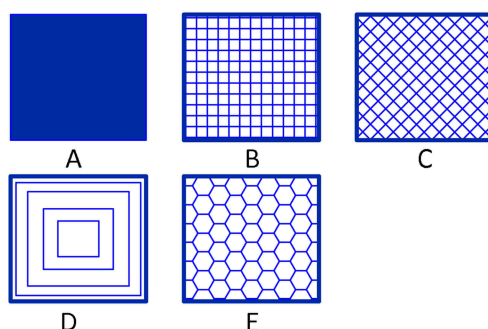
Před uvedením příkladů problematických míst je třeba provést popis složek vlastní tištěné součásti a vyjasnění pojmů s ní souvisejících. Řez výtiskem je na obr. 1.7. Prvá vrstva spočívající na pracovní desce stolku je kotvící. Musí mít dostatečnou plochu, aby byla zaručena pevnost spojení a tím neměnná poloha tištěného dílu po celou dobu procesu. Půdorysnou hranicí vrstvy je stěna tvořená několika paralelně uloženými vlákny (typicky 2 až 3). Z horní strany je součást uzavřena krycími vrstvami. Uvnitř se nachází výplň.



Obr. 1.7 Řez tištěnou součástí – boční pohled. 1 – spodní vrstva, 2 – stěna, 3 – horní vrstva, 4 – výplň.

Výplň

Různé varianty výplně jsou schematicky znázorněny na obr. 1.8 (silnější čarou je vyvedena stěna, slabší pak výplň). Zcela kompaktní bývá pouze spodní a horní vrstva. Důvodem je spotřeba materiálu a krom toho jeho vysoká koncentrace zapříčiňuje sklony k praskání a tím zhoršení mechanických vlastností. Tvar a hustota výplně vnitřního prostoru výtisku se volí dle požadavků na jeho pevnost a hmotnost. Zvolené parametry výplně pochopitelně také ovlivňují pracnost a dobu tisku [9].



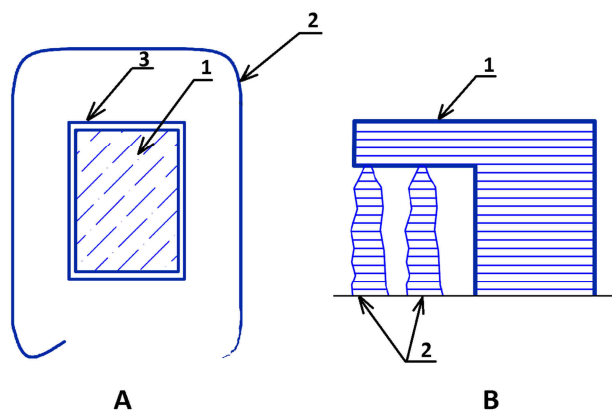
Obr. 1.8 - Obvyklé typy výplně – pohled shora: A – plná, B – lineární rovnoběžná, C – lineární diagonální, D – soustředná, E – hexagonální.

Pomocné prvky

Pomocné prvky jsou tištěné struktury, které přímo tvoří tištěnou součást, ale jsou velmi důležité z technologického hlediska. Jako první lze uvést rozšíření první vrstvy mimo půdorys modelu, čímž dojde ke zvětšení kotvící plochy – volí se v případě požadavku na zlepšení ukotvení výtisku. Další pomocné prvky jsou znázorněny na obr. 1.9. Před vlastním tiskem provede tryska okolo oblasti tištěné součásti průchod se zapnutým podáváním materiálu. Při tom se zaplní kanál trysky roztaveným materiálem, normalizuje se průřez vlákna a jeho kontinuita. Po dokončení tohoto průchodu může začít vlastní tisk [5].

Pro ochranu výtisku před nežádoucím prouděním vzduchu je možné tisknout ekvidistantní ochrannou obálku. Ta nemusí být součástí modelu, lze ji naprogramovat v aplikaci pro generování G-kódu.

Pro tištění převisů, nebo dlouhých přemostění se používá podpor tištěných zároveň s výrobkem. Tyto podpory rovněž nemusí být součástí původního modelu a vytváří se až při nastavování parametru tisku. V závislosti na provedení stroje (počtu extruderů) mohou být vytvořeny ze stejného materiálu jako tištěný díl a po jeho dokončení se odstraňují mechanicky, anebo, u strojů vybavených více extrudery jsou z odlišného, snadno rozpustného materiálu a jejich odstranění se provádí chemickou cestou [10].



Obr. 1.9 Pomocné prvky. A – pohled shora: 1 – tištěná součást, 2 – první průchod trysky, 3 ochranná obálka. B – pohled ze strany: 1 – tištěná součást, 2 – podpory.

Problématické body

Jak již bylo předesláno, některé designové prvky jsou z hlediska principu technologie FFF nevhodné a je třeba je omezit, popřípadě se jim vyhnout. Jako nejzásadnější [11] lze jmenovat:

- dlouhá přemostění bez podpor - zatímco krátké úseky lze bez dalších opatření přemostit, u dlouhých dojde ke zhroucení vláken a nedodržení požadovaného tvaru,
- vodorovné převisy, nebo převisy s velkým úhlem od normály roviny XY. Do určité velikosti tohoto úhlu (uvádí se hodnota okolo 45°,

nejedná se však o ostrou hranici) lze bez problémů tisknout. Pokud nejsou použity podpory, pak při jejím překročení postupně rostou problémy se soudržností vláken, což vede k jejich borcení a tím poškození výtisku,

- ostré rohy. Problémem zde je lámání vlákna a také malá plocha, která může vést ke ztrátě adheze. Odtrhávání výtisku od pracovní desky bývá často iniciováno právě v rozích,
- příliš malé prvky a detaily. Detailnost tisku je limitována rozměrem vlákna a přesností stroje. Pokud je jeden nebo více rozměrů příliš malý, pak je složen pouze ze stěn a neobsahuje výplň, která je hlavním nositelem pevnosti. To vede ke sklonu k praskání a samovolným deformacím,
- horizontálně orientované díry vykazují menší přesnost než vertikální a mohou s sebou nést také nutnost tisku podpor, jejichž odstranění může být obtížné,
- vzhledem k tomu, že výrobek vzniká postupným vrstvením, je jasné, že jeho mechanické vlastnosti budou anizotropní. Při tahovém zatížení kolmém na vlákna bude vykazovat nižší pevnost, než při zatížení ve směru vláken,
- v závislosti na materiálu, resp. jeho tepelné roztažnosti jsou limitovány i rozměry tištěného dílu a to zejména v případě, že 3d tiskárna nemá vyhřívanou komoru. Vhodné je se vyhnout dlouhým rovným úsekům a nahradit je klenutými. Tím se omezí kroucení a zvedání okrajů od podložky během chladnutí výtisku.

1.5.3 Parametry tisku

Nastavení adekvátních parametrů tisku má rovněž podstatný vliv na jeho výsledek. Při jejich nesprávné volbě nebude proces probíhat optimálně, popřípadě bude výrobek vykazovat vady. Před vygenerováním G-kódu je tedy třeba přesně zadat exaktní informace o materiálu, které se týkají jeho průměru a pracovních teplot, průměr kanálu trysky, rozměr pracovní plochy a počet extruderů. Další volby již nejsou vždy tak jednoznačné a vyžadují uvážení více okolností, případně otestování. Jako příklad budou popsány důležité parametry vycházející z nastavení v programu Slic3r.

Rychlosti

Posuvová rychlost je zadávána v $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$, rychlost protlačování struny se udává v $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Nastavuje se rychlost tisku stěn, výplně, spodní (kotvící) a vrchní (krycí) vrstvy. Zde je ještě možno rozlišit, zda jde o první, následné a poslední vrstvy, drobné detaily či vnější obrys a nastavit zde rychlost odlišnou. Dále se zadává rychlost tisku

podpor a přemostění. Uvedené posuvy jsou pracovní; mimo to se zadávají ještě hodnoty obslužných pohybů – rychloposuvu. Volit lze také velikost akcelerací [12].

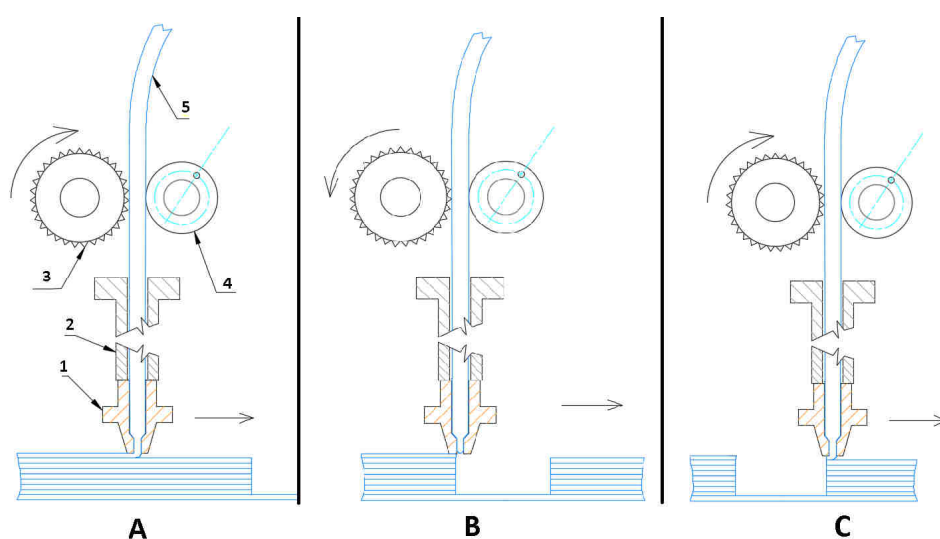
Při volbě kinematických parametrů je nutno najít vhodný kompromis mezi dobou tisku a možnostmi stroje.

Nastavení výplně

Zde se provádí výběr tvaru výplně a její hustota zadaná desetinným číslem v intervalu 0 – 1. Vyšší hustota výplně znamená menší velikost základního prvku a tudíž jejich vyšší počet v dané ploše. O úloze výplně a jejich nejobvyklejších typech bylo pojednáno v předchozí kapitole, zbývá dodat, že tento výčet není konečný a různé programy nabízejí širší možnosti. U výplně lze editovat také její parametry jako například úhel, pořadí jejího tisku (oproti stěnám), retrakci při křížení, minimální vyplňovanou plochu apod. [13].

Retrakce

Účelem retrakce je řízené přerušování spojitosti vlákna. Princip je schematicky znázorněn na obr. 1.10. Během tisku extruder průběžně podává materiál do trysky (obr. 1.10 a). Pokud je třeba tisk v definovaném místě přerušit, změní se smysl otáčení zubatice extruderu a vlákno je zasunuto o určitou délku zpět. To vede k utržení vlákna (obr. 1.10 b). Při průchodu úsekem se zakázaným tiskem se extruder nepohybuje, po jeho překonání je pak podávání obnoveno (obr. 1.10 c). Nedostatečná hodnota retrakce způsobuje v místech přerušování vlasové otřepy, příliš vysoká hodnota zase zbytečně zatěžuje motor extruderu [14].



Obr. 1.10 – Retrakce. A – normální pracovní pohyb: 1 – tryska, 2 – tepelná bariéra, 3 – zubatice extruderu, 4 – ložisko extruderu, 5 tisková struna. B – přerušování tisku, C - obnovení tisku.

Chlazení

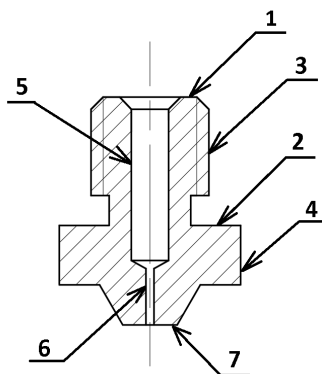
Pro dosažení očekávaného tvaru je žádoucí, aby materiál ztuhnul co nejdříve po opuštění trysky. Zejména u tisku přemostění je tento požadavek velmi důležitým. Zároveň však nesmí být přílišným chlazením ohrožena adheze, nebo způsobeno nerovnoměrné smršťování výrobku, které by mohlo vést k praskání. Pro chod ventilátoru se nastavuje rozmezí otáček v procentech; 100 % znamená maximální otáčky. Tato hodnota se používá zejména pro tisk přemostění [15].

Výška vrstvy

Výška čela trysky nad pracovní deskou či předcházející vrstvou bývá menší, než je průměr vlákna. Lze uvést orientační hodnotu 50 % průměru kanálu trysky. Nejmenší výšku má zpravidla první vrstva. Její velikost má vliv na dobu tisku, soudržnost vláken ve vrstvách a na boční profil stěny.

1.6 Tryska

Z konstrukčního hlediska je tryska rotačním tělesem obsahujícím průchozí díru, vnější závit, osazení pro manipulaci, dvě dosedací plochy a čelo. Řez je schematicky znázorněn na obr. 1.11. Dosedací plocha označená č. 1 (1) se stýká s tepelnou bariérou, plocha č. 2 (2) je buď volná, nebo může ležet na tepelném bloku, se kterým je spojena závitem (3). Z funkčního hlediska je důležitý těsný styk plochy č. 1 s čelem tepelné bariéry, jinak hrozí pronikání materiálu přes závit na vnější plochu trysky a také snížený průtok kanálem. Tryska je dále vybavena osazením (4), které má typicky šestihranný průřez a slouží k uchopení nástrojem (plochým klíčem) při montáži a demontáži trysky. Díra, kterou shora vstupuje materiál, slouží k jeho vedení a současně nahřívání (5). Do kanálu (6) vstupuje materiál v tekutém stavu a během průchodu přebírá jeho tvar. Z trysky vystupuje přímo na pracovní desku, ke které je navíc přitlačován čelní plochou (7).



Obr. 1.11 – Řez tryskou. 1- dosedací plocha, horní čelní plocha, 3 – závit, 4 - osazení pro manipulaci, 5 – vedení struny, 6 – kanál trysky, 7 – čelo trysky.

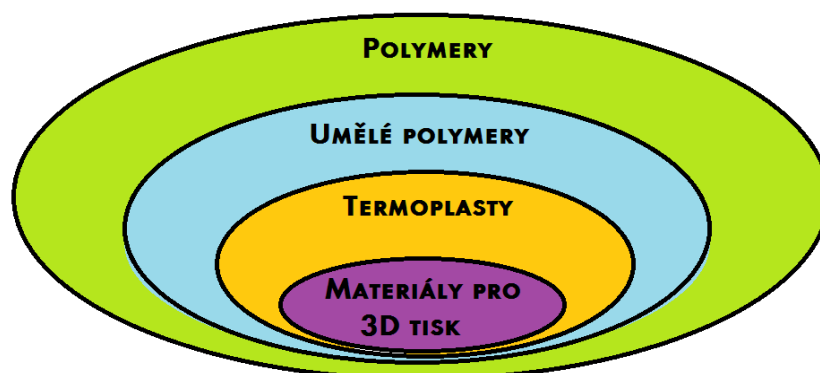
Průměry kanálů trysek se obvykle pohybují v desetinách milimetrů – od 0,2 mm až po hodnoty 0,8 mm, nebo i více. Kanály malých průměrů se používají pro jemný a detailní tisk, nevýhodou je velmi dlouhá doba pracovního procesu a materiálové omezení. Větší průměry kanálů trysek vedou ke zkrácení doby tisku, avšak za snížení tvarové a rozměrové přesnosti výrobku. Některé materiály (zejména plněné) je také velmi obtížné protlačovat kanálem o malém průměru, takže při volbě trysky je nutné přihlížet i k této skutečnosti.

Zdaleka nejběžnějším materiálem trysky je mosaz. Předurčuje ji k tomu dobrá tepelná vodivost, nízká smáčivost roztavenými materiály a snadná obrobitelnost. V případě použití běžných, neplněných materiálů nepředstavuje větší problém ani nízká otěruvzdornost mosazi. Odolnější variantou je tryska z austenitické oceli. Pro požadavek na tisk vysoce abrazivními materiály a dlouhou životnost je pak určena speciální mosazná tryska, jejíž kanál se nachází ve vsazené rubínové vložce [16].

Kromě popsané klasické varianty se objevují i trysky pro tisk více materiály. Na jedno těleso je připojeno více extruderů. Vedení struny se sbíhají do společného kanálu. Výhodou je již zmíněná možnost tisku více materiály, přičemž odpadají komplikace při seřizování výšky pracovní desky (rovnoměrné tloušťky vrstvy), které jinak provázejí vícemateriálový tisk realizovaný více tryskami. Pracovat lze pochopitelně jen s materiály, které nemají přílišný rozdíl v teplotách tavení, protože jejich náhřev je společný [17].

1.7 Materiály pro 3D tisk metodou FFF

Jako materiál polotovarů (strun) pro 3D tisk metodou FFF jsou v zásadě myslitelné pouze některé látky ze skupiny polymerů (zařazení znázorněno na obr. 1.12). Důvodem je kompatibilita jejich vlastností s technologickými požadavky této metody. Jedná se zejména o teplotu tání, reologické charakteristiky, chemickou odolnost (např. vůči oxidaci taveniny). Proběhly a stále probíhají experimenty například s hliníkem či zinkovými slitinami. Nicméně dosud nebylo dosaženo uspokojivých výsledků a k jejich rozšíření nedošlo.



Obr. 1.12 Materiály pro 3D tisk jako podmnožina polymerních materiálů

1.7.1 Obecná charakteristika polymerů

Polymery jsou makromolekulární látky, které jsou tvořeny řetězci molekul jednoho či více druhů. Tyto elementární jednotky tvořící řetězce nazýváme "mery" resp. "monomery". Chemické složení monomerů a výsledná struktura řetězců pak tvoří chemické i fyzikální vlastnosti daného polymeru. Podle složení monomerů můžeme dělit polymery na organické (tvořené typicky uhlíkem, vodíkem, dusíkem, kyslíkem či sírou) a anorganické (skládající se z křemíku a fosforu). Na tuto kostru mohou být navázány i atomy dalších prvků – např. chlor, vodík, fluor, bor, popřípadě různé molekuly.

Dle svého původu mohou být polymery buď přírodní, anebo vytvořené lidskou činností, tzv. syntetické. Podle toho, zda jsou tyto látky tvořené jen jedním typem monomeru či více typy, rozlišujeme je ještě na homopolymery a kopolymery [18, 19]. U kopolymerů rozeznáváme několik možných vzájemných uspořádání jednotlivých monomerů v řetězci:

- uspořádání statistické - řetězec tvoří nahodile uspořádané monomery, jejich rozmístění je dáno pouze statisticky,
- uspořádání blokové - řetězec se skládá z bloků složených ze stejných monomerů,
- uspořádání alternující - monomery jsou v řetězci umístěny střídavě,
- uspořádání roubované - na řetězci tvořeným monomerem jednoho typu jsou stranově připojeny řetězce monomeru typu druhého.

1.7.2 Některé další charakteristiky polymerů

Konfigurace makromolekul:

U některých polymerů je možné ovlivnit prostorové rozložení monomerů volbou polymeračních podmínek u jejich přípravy. Typicky se jedná o řetězce monomerních jednotek typu – $(\text{CH}_2)\text{-HC}^*\text{R-}$ s asymetrickým uspořádáním. Způsob konfigurace dle poloh substituentů R vůči asymetrickému uhlíku C^* a vůči řetězci se nazývá stereoizomerií, nebo též takticitou. Existují tyto typy [20]:

- polymer ataktický - substituenty na asymetrickém uhlíku nemají dáno žádné uspořádání, jejich rozmístění je náhodné. Ataktické polymery nekystalizují – jsou amorfní,
- polymer syndiotaktický - poloha substituentů ležících na C^* sousedních elementů řetězce je alternující vůči jeho podélné rovině. Jedná se o semikrystalické materiály,
- polymer izotaktický - poloha všech substituentů ležících na C^* sousedních elementů řetězce je stejná vůči jeho podélné rovině. Tyto polymery tvoří krystaly [21].

Typ takticity přitom nemá vliv na tvar sumárního vzorce polymeru.

Typy řetězců

Typy makromolekulárních řetězců závisí na typu monomeru a také na podmínkách přípravy polymeru.

Lineární makromolekuly. Monomery jsou uspořádány za sebou pouze v jedné linii, popřípadě jsou jen velmi mírně, sporadicky rozvětveny. Jednotlivé řetězce nejsou vzájemně propojeny žádnými chemickými vazbami. Jsou různě zakřiveny v prostoru a vzájemně zapleteny se sousedními řetězci. Jejich vzájemná vzdálenost může být různá, což má za následek určitou variabilitu měrné hmotnosti. Makromolekuly v tomto typu řetězce mají velkou volnost pohybu, takže lze očekávat snadnou tavitelnost a rozpustnost, z mechanických vlastností pak houževnatost a formovatelnost za tepla [20].

Rozvětvené makromolekuly. Skládají se z kmenového řetězce, k němuž jsou stranově připojeny další větve. Jednotlivé řetězce rovněž nejsou vzájemně propojeny. Postranní větve omezují pohyblivost makromolekul. To má negativní vliv na rozpustnost, stejně tak je omezena tekutost taveniny. Boční větve také zvyšují vzájemnou vzdálenost řetězců, takže se tyto polymery vyznačují nižší měrnou hmotností. Mechanické vlastnosti jsou horší, než u polymerů s lineárními řetězci [21].

Zesíťované makromolekuly. Mohou být tvořeny makromolekulami lineárními či rozvětvenými, které jsou navzájem propojeny chemickými vazbami. Prostor vyplňují ve formě sítě. Zesíťování vede ke ztrátě rozpustnosti a tavitelnosti – tepelný rozklad nastane ještě před dosažením teploty tavení [20]. Z tohoto důvodu jsou tyto polymery zcela nepoužitelné jako materiály pro 3D tisk metodou FFF.

Velikost makromolekul

Velikostí molekul se obecně rozumí jejich hmotnostní charakteristika, nikoli rozměrová. Molární hmotnost M je poměr hmotnosti a látkového množství, udává se buď v $\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$, nebo také v $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$. Molekulová hmotnost je sumou atomových hmotností atomů tvořících molekulu. Relativní molekulová hmotnost M_r je podílem klidové hmotnosti molekuly a atomové hmotnostní konstanty ($1/12$ klidové hmotnosti atomu uhlíku C 12). Jde o bezrozměrnou veličinu.

Makromolekulární látky mívají molekulovou hmotnost větší, než $10^4 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$. Tato hodnota byla stanovena smluvně, protože mezi vlastnostmi nízko a makromolekulárních látek je plynulý přechod. Velikost makromolekul lze vyjádřit také polymeračním stupněm, což je vlastně počet základních elementů v makromolekule. Je dán vztahem:

$$N = M / M_o, \quad (1.1)$$

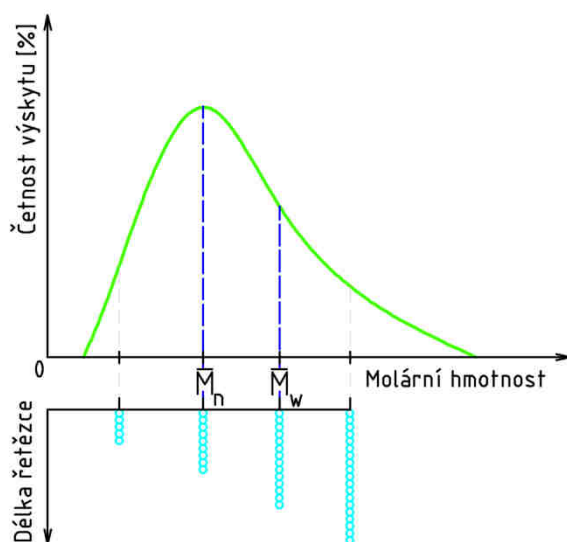
kde

N - polymerační stupeň [-],

M - molární hmotnost polymeru [$\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$],

M_0 - molární hmotnost strukturní jednotky [$\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$].

Makromolekuly v běžně používaných polymerních materiálech nemají stejnou velikost, nýbrž se vždy vyskytují v jistém rozmezí délek. Každá velikost makromolekuly má v celkovém objemu své vlastní početní zastoupení. Tato vlastnost se nazývá polydisperzita a ovlivňuje ji nejenom druh polymeru, nýbrž i způsob jeho výroby. Popisovat velikost makromolekul toho kterého polymeru prostřednictvím jedné nebo několika diskrétních hodnot by bylo zcela zavádějící. Mnohem více vypovídající informační hodnotu má distribuční křivka (příkl. na obr. 1.13). Z jejích číselných hodnot a jejího tvaru lze přibližně odvozovat některé fyzikální a mechanické vlastnosti – teplotu tání, pevnost atd.



Obr. 1.13 – Distribuční křivka relativního zastoupení makromolekul dle jejich velikosti, podle [21]:

M_n – číselný střed molekulové hmotnosti polymeru,
 M_w – hmotnostní střed molekulové hmotnosti polymeru.

Konformace makromolekul

Schopnost řetězců zaujímat různé prostorové tvary je omezena jejich ohebností. Jednotlivé stavební jednotky makromolekuly mohou konat sférický pohyb kolem jednoduché vazby v řetězci. Jedná se tu o jev ryze fyzikální, nedochází ke změnám v oblasti chemických vazeb. Konformacemi se pak nazývají pozice, které zaujímají

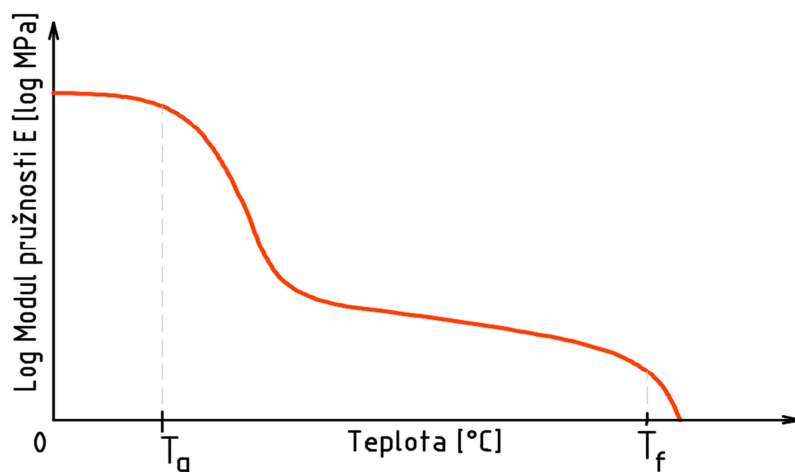
jednotlivé části molekul. Ty mají snahu zaujmout energeticky nejvýhodnější pozici. Na konformaci mají rovněž velký vliv substituenty vázané na hlavní řetězec [21].

Fázové stavy polymerů

Polymery se mohou vyskytovat ve více stavech, které jsou dány jednak jejich morfologií (krystalinitou) a jednak teplotou. Pokud se jedná o vliv teploty, je nutno zmínit teplotu rozpadu (též se užívá termín tepelná degradace), kdy dochází k rozpadu polymerních řetězců, a jejich části pak spolu mohou vzájemně reagovat. To má za následek nevratné porušení struktury a s tím spojenou změnu chemických a fyzikálních vlastností. U všech existujících polymerů je jejich teoretická teplota varu vyšší, nežli teplota rozkladu. Z toho vyplývá, že polymerní látky nemohou existovat v plynném stavu a některé dokonce ani v tekutém.

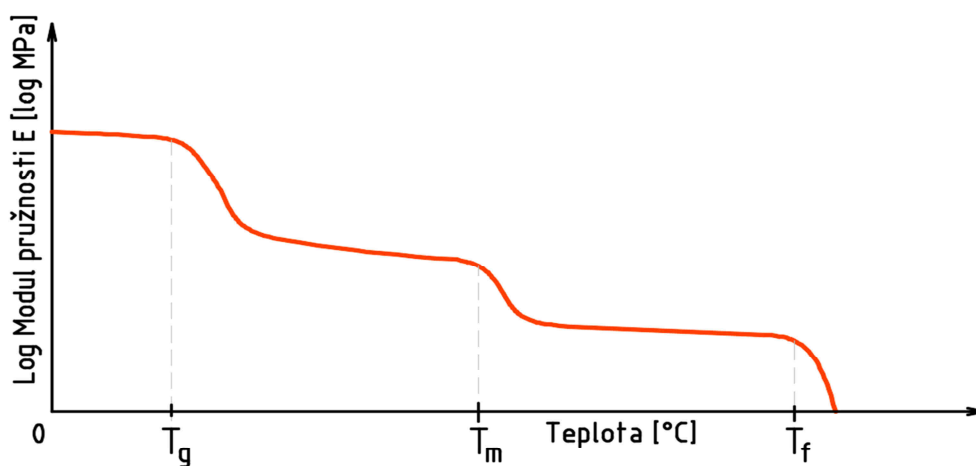
U amorfních polymerů rozeznáváme tyto fázové stavy [20] (znázorněno grafem na obr. 1.14):

- stav skelný - stav amorfních polymerů, který zaujímají při teplotách nižších, než je jejich teplota skelného přechodu - T_g . Vzájemná pohyblivost řetězců je vyloučena, či velice omezena. Materiál ve skelném stavu je tvrdý a křehký, má vysokou pevnost a nízkou houževnatost,
- stav kaučukovitý - po překročení teploty T_g nastává kaučukovitý stav, kdy dochází k prudkému zvýšení pohyblivosti částí molekul a zeslabení sil mezi nimi, což způsobí značný pokles modulu pružnosti. To může vést i k samovolné deformaci. U kaučukového stavu se nejedná o fázovou přeměnu. Polymer se v tomto stavu vyznačuje velkou deformovatelností, při níž dochází k orientaci částí makromolekul ve směru působící síly,
- stav plastický - po dosažení teploty tečení T_f ztratí polymer své viskoelastické vlastnosti a přechází do stavu viskózně tekutého, neboli plastického.



Obr. 1.14 – Stav amorfního polymeru v závislosti na teplotě podle [22].

U semikrystalických polymerů je pokles modulu pružnosti po překročení teploty T_g mnohem méně strmým, neboť krystalická část struktury zůstává nadále pevnou. K razantnímu poklesu dochází až poblíž teploty tavení T_m , kdy dochází k náhlému rozpadu krystalové struktury a fázové změně skupenství – znázorněno na obr. 1.15



Obr. 1.15 – Stav semikrystalického polymeru v závislosti na teplotě podle [23].

1.7.3 Termoplasty

Termoplasty jsou lineární, nebo mírně rozvětvené polymery, jejichž teplota tání T_m , popř. teplota tečení T_f leží pod oblastí jejich tepelné degradace. To znamená, že je lze opakovaně tavit, či tvářet za tepla a to bez vlivu na jejich chemickou strukturu a fyzikální

vlastnosti. [24]. Pro technologii FFF je velmi důležité chování materiálu v plastickém a tekutém stavu, kterému jsou podřízeny hlavní parametry tisku – tisková rychlost, dynamika, kvalita povrchů, detailnost tisku apod.

Termoplasty v roztaveném stavu jsou nenewtonovskými kapalinami (kapalina, u níž neplatí lineární závislost deformace na napětí), jejichž viskozita je přímo úměrná teplotě a nepřímo úměrná smykové rychlosti. Zásadní vliv na viskozitu má molekulová hmotnost, resp. její distribuce a také případná rozvětvenost makromolekul. Se vzrůstající délkou řetězce a v závislosti na jeho zakřivení a jeho orientaci roste množství styčných míst s vedlejšími makromolekulami. Povaha tohoto styku je přitom ryze fyzikální. Na tokové chování taveniny má znatelný vliv též přítomnost různých příměsí jako jsou pigmenty, maziva, plniva, změkčovadla a jiné složky, které zde mohou působit i jako samostatné fáze, což má obvykle za následek nárůst její viskozity, příp. posun T_m .

V případě průtoku roztaveného plastu tryskou tiskárny se na celkovém průběhu viskózního toku projevuje navíc časová změna smykové rychlosti a napětí působícího na taveninu. [25].

1.7.4 Index toku taveniny

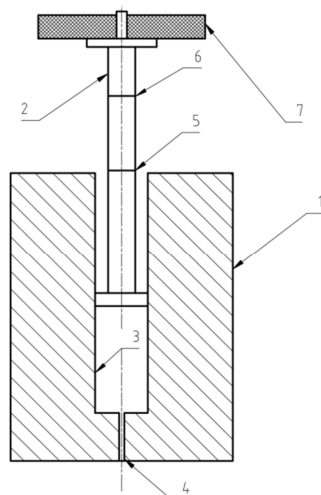
Index toku taveniny (MFI – Melt Flow Index) je jednou z forem popisu reologických charakteristik polymerů v roztaveném stavu. Jeho hodnota dává určitou představu o molární hmotnosti makromolekul zkoušeného vzorku a tedy i o jeho viskozitě. Tato metoda je rychlá a jednoduchá, určitou nevýhodou je poměrně malá přesnost, která však pro základní srovnání materiálů postačuje. [26]. Hodnotu MFI lze nalézt (často jako jediný reologický údaj) v datových listech materiálů strun pro 3D tisk.

Stanovení tohoto indexu popisuje norma ČSN EN ISO 1133-1. Zde jsou rozlišeny 2 metody a to MFR (Melt Mass-Flow Rate, hmotnostní index toku taveniny) a dále MVR (Melt Volume-Rate, objemový index toku taveniny). Zkušební zařízení je pro obě metody totožné. Jedná se o sestavu vyhřívaného válce, pístu s oddělitelným závažím a trysky – viz obr. 1.16. Rozměry jednotlivých součástí i hodnoty hmotnosti a teplot jsou normovány. Princip měření spočívá v tom, že se do komory ve válci vloží a napěchuje vzorek testovaného materiálu. Po uplynutí doby předehřevu se píst se závažím uvolní - tím začne klesat a protlačovat materiál skrze trysku. V okamžiku, kdy spodní ryska na pístu mine horní hranu válce, se spustí časomíra.

Při měření hodnoty MFR se v předepsaných časových intervalech rotačním nožem odřezávají od ústí trysky protlačené segmenty struny materiálu. Segmenty odříznuté před spuštěním časomíry se vyřadí, segmenty odříznuté během doby měření jsou kontrolovány a váženy. Měření je ukončeno okamžikem, kdy horní ryska na pístu mine horní hranu válce.

Pro určení hodnoty MVR se měří dráha, kterou píst urazí za určitý čas, nebo se měří čas, za který píst urazí danou dráhu. Ze známé geometrie zkušebního zařízení se poté spočte objemový průtok.

Při znalosti hodnoty měrné hmotnosti testovaného materiálu lze mezi těmito metodami provádět přepočet. Jako výstup z tohoto měření se uvádí vypočtená hmotnost, resp. objem za 10 min a zkušební podmínky (teplota, hmotnost závaží) [27].



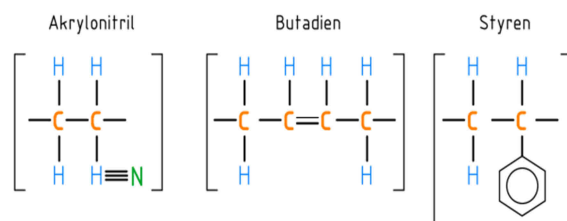
Obr. 1.16 – Schéma zařízení pro měření indexu toku podle ISO 1133-1:

1- válec, 2- píst, 3 – vyhřívaná komora se vzorkem materiálu, 4 – kapilára, 5 – spodní ryska, 6 – horní ryska, 7 – závaží.

1.7.5 Termoplasty obvykle používané pro 3D tisk metodou FFF

Jak již bylo naznačeno výše, mnoho důležitých vlastností plastových materiálů je výrazně ovlivněno způsobem jejich výroby a případnými příměsemi. Údaje o fyzikálních a technologických vlastnostech dostupné z tabulek a materiálových databází jsou uvedeny s velkým rozsahem hodnot. Pro porovnávání jednotlivých druhů materiálu je tedy nejvhodnějším přístupem vycházet z datových listů poskytnutých výrobcí daného plastu. Ke strunám vyrobeným z materiálu s výplní (piliny, vlákna) data obvykle nejsou k dispozici, proto budou porovnány materiály v čistém stavu, popř. obsahující pouze barvivo.

ABS



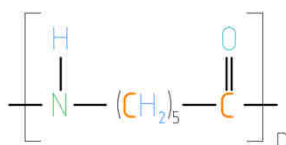
Obr. 1.17 – Strukturální vzorec monomerů ABS.

Jedná se o neprůhledný, amorfní kopolymer s blokovým uspořádáním monomerů, kterými jsou styren, který má největší zastoupení, dále akrylonitril a butadien – strukturální vzorce znázorněny na obr. č. 1.17. Tento materiál se vyznačuje vysokou pevností a houževnatostí a dobrou chemickou odolností. V čistém stavu má však poměrně nízkou

odolnost vůči povětrnostním podmínkám, zejména ultrafialovému záření [28]. ABS je nejpoužívanějším materiálem pro tisk metodou FFF, především (krom vlastností uvedených výše) z důvodu poměrně snadné zpracovatelnosti a příznivé ceny. Při tisku uvolňuje nepříjemný zápach. Vzhledem k vyšší smrštitivosti je limitován tvar a rozměry výtisku. Důležité technologické vlastnosti uvedeny v tabulce č. 1.1.

Teplota měknutí (dle Vicata, ISO 306)	96 ÷ 103 °C	Pevnost v tahu (dle ISO 527)	32 MPa
Doporučená teplota trysky	220 – 240 °C	Prodloužení při přetržení (dle ISO 527)	20 %
Index toku taveniny (dle ISO 1133)	3,21 g, 10 min: (220 °C; 10 kg)	Pevnost v ohybu (dle ISO 178)	60 MPa
Měrná hmotnost (ISO 1183)	1 040 kg · m ⁻³	Nárazová práce (dle ISO 179)	25 kJ · m ⁻²

NYLON



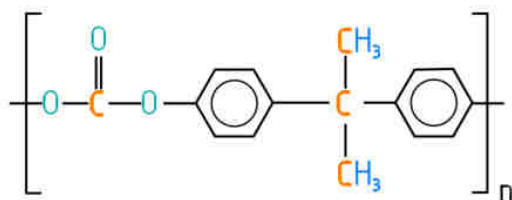
Obr. 1.18 – strukturní vzorec materiálu Nylon6.

Název Nylon má poněkud nejednoznačný původ a význam. Všeobecně se používá pro označení semikrystalických termoplastů ze skupiny polyamidů. Jedná se o lineární neprůhledné homopolymery, jejichž charakteristickými mechanickými vlastnostmi jsou vysoká tuhost, pevnost, dobrá houževnatost, otěruvzdornost a kluzné vlastnosti. V tenkých vrstvách vykazují vysokou pružnost a ohebnost, se zvyšující se tloušťkou vrstvy nastupuje tuhost a pevnost. Mají vysokou odolnost vůči běžným rozpouštědlům, naopak nízkou pak např. vůči anorganickým kyselinám. Další nevýhodou je silná navlhavost a smršťování při chladnutí [28]. Jako materiál tiskových strun se obvykle používá Nylon6 – strukturní vzorec na obr. 1.18. Důležité technologické vlastnosti uvedeny v tabulce č. 1.2.

Tab. 1.2 – Vybrané technologicko-fyzikální parametry dle výrobce – mat. NYLON [30].

Teplota skelného přechodu T _g	50 °C	Napětí v tahu na mezi kluzu (ISO 527)	27,8 MPa
Doporučená teplota trysky	210 – 260 °C	Prodloužení na mezi kluzu (ISO 527)	20 %
Index toku taveniny (dle ISO 1133)	6,2 g, 10 min (250 °C; 1,2 kg)	Pevnost v ohybu (ISO 178)	24 MPa
Měrná hmotnost	1 140 kg · m ⁻³	Nárazová práce (dle ISO 180)	34,4 kJ · m ⁻²

PC

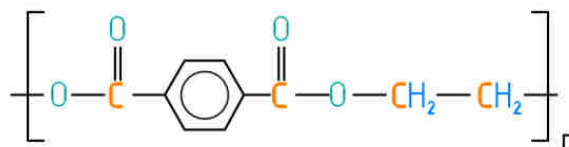


Obr. 1.19 – Strukturní vzorec polykarbonátu.

Polykarbonát (strukturní vzorec na obr. 1.19) náleží mezi termoplastické polyestery. Je materiálem velice pevným, houževnatým, odolným vůči nárazu. Odolává vyšším teplotám než ostatní běžně používané materiály. Dále lze jmenovat dobrou chemickou odolnost a biologickou nezávadnost [28]. Technologické vlastnosti z hlediska 3D tisku však nejsou příliš dobré, (pokud není stroj vybaven vyhřívanou komorou) protože z polykarbonátu je nutno tisknout při vysokých teplotách jak tiskové hlavy, tak pracovního stolu, navíc dochází k silnému smršťování a kroucení. Důležité technologické vlastnosti uvedeny v tabulce č. 1.3.

Tab. 1.3 – Vybrané technologicko-fyzikální parametry dle výrobce – mat. Polykarbonát [31].

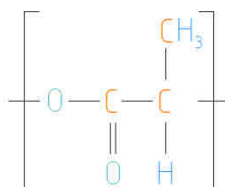
Teplota skelného přechodu T _g	150 °C	Napětí v tahu na mezi kluzu (ISO 527)	60 MPa
Doporučená teplota trysky	210 – 260 °C	Prodloužení na mezi kluzu (ISO 527)	6 %
Index toku taveniny (dle ISO 1133)	7 g, 10 min (220 °C; 10 kg)	Pevnost v ohybu (ISO 178)	90 MPa
Měrná hmotnost (dle ISO 1133)	1 200 kg · m ⁻³	Nárazová práce (dle ISO 178)	80 kJ · m ⁻²

PETG

Obr. 1.20 – Strukturní vzorec Polyethyltereftalátu.

PETG je amorfní, glykolem modifikovaný polymer PET (strukturní vzorec na obr. 1.20). V čistém stavu je to průhledný materiál. Mezi jeho přednosti patří nízká smrštitivost, chemická odolnost, nemá sklon k praskání a kroucení, je pružný a dostatečně pevný. Je zdravotně nezávadný a může přicházet do styku s potravinami. PETG lze dobře tvářet za tepla, je přístupný i úpravě povrchu plamenem. Při tavení nevydává zápach. Výrobky z tohoto materiálu mají, díky chemické odolnosti a dobrým mechanickým vlastnostem, značnou trvanlivost. Vzhledem k uvedeným vlastnostem je v poslední době stále rozšířenějším materiálem, jímž jsou v mnoha aplikacích nahrazovány tradiční materiály ABS a PLA. Důležité technologické vlastnosti uvedeny v tabulce č. 1.4.

Teplota měknutí (dle ISO 75)	65	Pevnost v tahu	49 MPa
Doporučená teplota trysky	235 – 255 °C	Prodloužení při přetržení	228 %
Index toku taveniny (dle ISO 1133)	20 g, 10 min (250 °C; 2,16 kg)	Pevnost v ohybu	68 MPa
Měrná hmotnost	1 230 kg · m ⁻³	Nárazová práce (Izodovým kladivem)	8 kJ · m ⁻²

PLA

Obr. 1.21 Strukturní vzorec molekuly PLA.

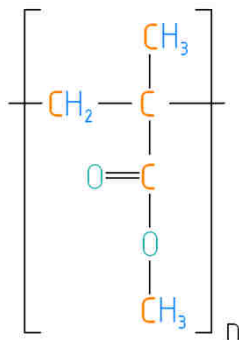
Materiál PLA (Polylactid acid, kyselina polymléčná - strukturní vzorec na obr. 1.21), patříci mezi polyestery, je považován za ekologický materiál, protože se připravuje nikoli z ropných produktů, nýbrž z bramborového či kukuřičného škrobu a je biologicky odbouratelný. Tento homopolymer má semikrystalickou strukturu a v čistém stavu je

průsvitný. Z mechanického hlediska jde o poměrně tvrdý a křehký materiál, pevnost je v porovnání s materiály jako ABS či Nylon nižší. Má poměrně nízkou teplotu tavení, což je výhodné z hlediska snazšího tisku, na druhou stranu to však s sebou nese omezení teplotního rozsahu použitelnosti – výrobky by neměly být vystavovány teplotám vyšším, než cca 60 °C [33]. PLA je z hlediska technologie FFF materiálem nenáročným, umožňujícím detailní tisk, má nízkou smrštitost a nemá sklony k praskání. Při skladování je nutno brát v úvahu jeho sklon absorbovat vlhkost, což vede k degradaci některých jeho vlastností. Důležité technologické vlastnosti uvedeny v tabulce č. 1.5.

Tab. 1.5 - Vybrané technologicko-fyzikální parametry dle výrobce – mat. PLA [34].

Teplota měknutí (dle ASTM E2092)	55 °C	Pevnost v tahu (dle ASTM D882)	53 MPa
Doporučená teplota trysky	190 – 210 °C	Prodloužení při přetržení (dle ASTM D882)	6 %
Index toku taveniny	6 g, 10 min: (210 °C; 2,16 kg)	Pevnost v ohybu (dle ASTM D790)	83 MPa
Měrná hmotnost (ISO 1183)	1 240 kg · m ⁻³	Nárazová práce (dle ASTM D256)	16 kJ · m ⁻²

PMMA

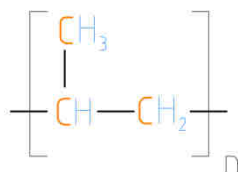


Obr. 1.22 - Strukturální vzorec molekuly PMMA.

Polymethylakrylát (strukturální vzorec znázorněn na obr. 1.22), známý jako plexisklo, nebo také organické sklo, se řadí mezi akrylové polymery. Tento amorfní, průhledný termoplast vyniká značnou odolností vůči povětrnostním vlivům a UV záření, kyseliny a zásady o vyšší koncentraci jej však poškozují. Optické vlastnosti jsou srovnatelné s běžným sklem, avšak měrná hmotnost je zhruba poloviční (cca 2 500 oproti 1 170 kg · m⁻³). PMMA je poměrně pružným a pevným materiálem s dobrou tvarovou pamětí. Nevýhodou je poměrně vyšší cena a také malá povrchová tvrdost, výrobek z PMMA je tedy málo odolný vůči poškrábání a opotřebení povrchu [28]. Důležité technologické vlastnosti uvedeny v tabulce č. 1.6.

Tab. 1.6 – Vybrané technologicko-fyzikální parametry dle výrobce – mat. PMMA [35].

Teplota měknutí (dle Vicata, ISO 306)	108 °C	Pevnost v tahu (dle ISO 527-2)	neuveveno
Doporučená teplota trysky	220 – 250 °C	Prodloužení při přetržení (dle ISO 527-2)	6 %
Index toku taveniny	13 g, 10 min: (podmínky neuvevedeny))	Modul pružnosti (dle ISO 178)	3300 MPa
Měrná hmotnost (ISO 1183)	1 170 kg · m ⁻³	Nárazová práce (dle ISO 178)	11 kJ · m ⁻²

PP

Obr. 1.23 – Strukturní vzorec molekuly PP.

Semikrystalický plast polypropylen (strukturní vzorec na obr. 1.23), patřící mezi polyolefiny, je jedním nejrozšířenějších průmyslově vyráběných plastů. Ze všech uvedených materiálů má nejmenší měrnou hmotnost. Odolává vařící vodě, má velmi nízkou nasákavost a dobrou chemickou odolnost. Zmínit lze i velký elektrický odpor [28]. Mechanické vlastnosti jsou spíše průměrné, tisk tímto materiálem obvykle neprovází velké problémy. Důležité technologické vlastnosti uvedeny v tabulce č. 1.7.

Tab. 1.7 – Vybrané technologicko-fyzikální parametry dle výrobce – mat. Polypropylen [36].

Teplota měknutí	115 °C	Pevnost v tahu (dle ISO 527)	14 MPa
Doporučená teplota trysky	200 – 240 °C	Prodloužení na mezi kluzu (dle ISO 527)	13 %
Index toku taveniny (dle ISO 1133)	20 g, 10 min (230 °C; 2,16 kg)	Pevnost v ohybu (dle ISO 179)	14 MPa
Měrná hmotnost (ISO 1183)	890 kg · m ⁻³	Nárazová práce (dle ISO 179)	10 kJ · m ⁻²

2 NÁVRH EXPERIMENTU

Pro zjištění praktických dopadů různých provedení kanálu trysky na praktické parametry tisku je nutno provést experiment. Měl by být zaměřen zejména na problematická místa, která nejlépe odhalí vhodnost či nevhodnost daného řešení. Jako materiály pro experimentální výtisky byly po zvážení informací uvedených v kapitole 1.7 vybrány polymery PLA a ABS od výrobce Fillamentum. Tyto dva plasty se od sebe odlišují v mnoha ohledech – ve složení, v morfologii, v tepelných a mechanických charakteristikách. Z toho lze usuzovat, že zkoušky s nimi pokryjí co nejširší škálu materiálových vlastností. Krom toho je možné s nimi pracovat s dostupným vybavením – nevyžadují vyhřívanou komoru, ani tiskové hlavy upravené pro vysoké teploty.

2.1 Zkušební trysky

K testování budou použity mosazné trysky asijského výrobce. Jmenovitým průměrem kanálu trysky byla zvolena hodnota 0,4 mm. Tento rozměr je v současné době nejvíce požívaným, neboť nabízí přijatelný kompromis mezi rychlostí a detailností tisku.

Než bude možno přistoupit k úpravám a testování, je třeba provést kontrolu délky a průměru kanálů zakoupených trysek a jejich roztřídění. Vzhledem k miniaturním rozměrům měřeného objektu a jeho špatné přístupnosti by bylo krajně obtížné provést přímé měření. Proto bude průměr kanálu zkontrolován drátkem o průměru 0,40 mm. Vyřazeny budou kusy, kterými drátek buď neprojde, anebo naopak projde zcela bez odporu. Použity budou jen trysky, jejichž kanálem lze drátek prostrčit s mírným odporem. Kontrola výchozí délky kanálu se provede pomocí vrtáku o průměru 0,5 mm a posuvného měřidla. U vybraných trysek se provede úprava délky tak, aby výsledný poměr délky vůči průměru kanálu byl v poměru:

- 2 : 1, tedy 0,8 : 0,4 mm u zkušební trysky č. 1,
- 1,5 : 1, tedy 0,6 : 0,4 mm u zkušební trysky č. 2,
- 1 : 1, tedy 0,4 : 0,4 mm u zkušební trysky č. 3,
- 0,5 : 1, tedy 0,2 : 0,4 mm u zkušební trysky č. 4

2.2 Zkušební výtisky

Nejprve bude každou z trysek protlačeno 20 mm struny rychlostmi 40, 60, 80, 100, 120 a 140 mm · min⁻¹. Ze vzniklého vlákna se vyřízne úsek délce 25 mm. Na něm bude provedena rozměrová kontrola průměru třmenovým mikrometrem. Každý vzorek se změří ve dvou kolmých rovinách celkem 10x. Z výsledků měření se sestaví tabulka a provede statistické vyhodnocení [37]:

1) Výpočet aritmetického průměru naměřených hodnot dle vzorce

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i, \quad (2.1)$$

kde

\bar{x} - aritmetický průměr [mm],

n – počet měření [-],

x_i - hodnota z i -tého měření [mm].

2) Výpočet výběrové směrodatné odchylky dle vzorce

$$s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}, \quad (2.2)$$

kde

$s(\bar{x})$ je výběrová směrodatná odchylka [mm].

3) Výpočet standardní nejistoty typu A dle vzorce

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n - 1)}}, \quad (2.3)$$

kde

u_A je standardní nejistota typu A [mm].

4) Stanovení standardní nejistoty typu B takto:

$$u_B = \sqrt{\sum_{j=1}^m u_{zj}^2}, \quad (2.4)$$

kde

u_B - standardní nejistota typu B [mm],

u_{zj} – nejistoty přispívající k u_B [mm],

které se vypočítají jako:

$$u_{zj} = c_j \frac{\Delta_{Z_{MAXj}}}{\chi}, \quad (2.5)$$

kde

c_j – koeficient citlivosti [-],

ΔZ_{MAXj} – rozsah odchylek od jmenovité hodnoty [mm],

χ – koeficient určující typ příslušného rozdělení pravděpodobnosti [-].

5) Stanovení kombinované standardní nejistoty výpočtem dle vzorce

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}, \quad (2.6)$$

kde

u_c je kombinovaná standardní nejistota [mm].

6) Stanovení rozšířené nejistoty dle vzorce

$$U = u_c \cdot k, \quad (2.7)$$

kde

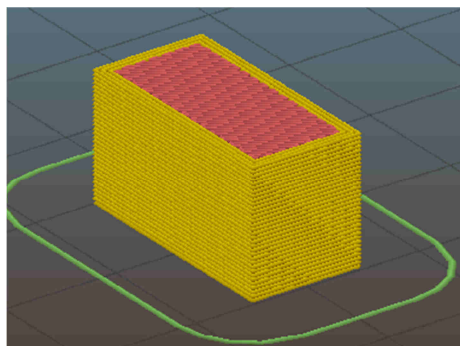
U – rozšířená nejistota měření [mm]

k – koeficient rozšíření [-]

Dále bude povrch vlákna pozorován mikroskopem a pořízena fotodokumentace.

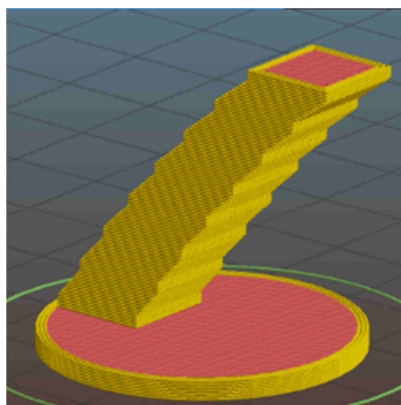
Další zkoušky by již měly dokumentovat průběh reálného tisku:

- Bude vytisknut jednoduchý objekt složený z více vrstev (obr. 2.1), proveden řez ve směru kolmém na vlákna a pozorována plocha průřezu, zaměřená na tvar a povrch vláken.



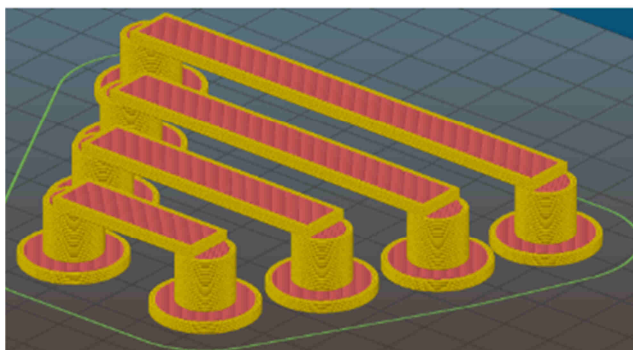
Obr. 2.1 – Simulace zkušebního výtisku č. 1 z programu Slic3r

- Tisk vzorku reprezentujícího převis (obr. 2.2). Vzorek má odstupňovanou šikmou stěnu s úhly 42 až 54 ° od kolmice k základní rovině. Prostřednictvím vizuální prohlídky a rozměrové kontroly bude porovnáno případné borcení a deformace. Skloněné stěny jsou rovnoběžné a jejich teoretická vzdálenost (rozměr 3D modelu použitého pro generování G-kódu) je 10 mm.



Obr. 2.2 – Simulace zkušebního výtisku č. 2 z programu Slic3r

- Tisk vzorku reprezentujícího přemostění v délkách 20, 40, 60 a 80 mm (obr. 2.3). U těchto vzorků bude provedeno srovnání zborcení profilu (reprezentovaného zvětšením výšky průřezu). Teoretická výška průřezu mostu (rozměr 3D modelu použitého pro generování G-kódu) je 2 mm, šířka 10 mm a světlá výška 13 mm.



Obr. 2.3 – Simulace zkušebního výtisku č. 3 z programu Slic3r

- Sledování teploty motoru extruderu, z jejíž velikosti a trendu růstu lze vyvodit jeho relativní zatížení.

2.3 Popis použitého vybavení

Tiskárna

FFF tiskárna s portálovým rámem, sestavená dle konceptu Rebel II. Vozík extruderu se pohybuje v ose X, jeho vedení v ose Z, vyhřívaný pracovní stůl pak v ose Y. Pohyb v ose Z zajišťují 2 motory, které otáčejí závitovými tyčemi M6 x 300 mm. U os X a Y je přenos síly od motorů realizován prostřednictvím polyuretanových ozubených řemenů s ocelovou vložkou typu GT2 (rozeč 2 mm). Vedení pohyblivých prvků je u všech os řešeno pomocí broušených tyčí o průměru 8 h7, po kterých se pohybují lineární kuličková ložiska typu LM8UU, která jsou v těchto prvcích zalisována.

Pracovní stůl je vyhříván plošným spojem HeatBed MK2b, tisková plocha je tvořena tabulkou skla s folií BuildTak o rozměru 200 x 200 mm.

Řídící elektroniku tvoří základní deska Arduino s procesorem ATmega 2560, výkonové rozhraní RAMPS 1.4 a 4 ovladače krokových motorů typu A4988. Koncové spínače jsou mechanické. Jako teplotní čidla jsou použity 100k Ohm termistory NTC 3950, koncové spínače jsou mechanické-páčkové. Pro pohon pojezdů a extruderu jsou použity dvoufázové krokové motory s přírubou NEMA 17 typu 1005VLQCEF, výrobce Microcon.

Tisková hlava je celokovová s upínací hlavou typu J-head, chladič struny žebrovaný s přídatným ventilátorem. Vývrt je uzpůsoben pro materiál průměru 1,75 mm. Tepelný blok je z hliníkové slitiny, vybavený závitěm M6. Náhřev zajišťován prostřednictvím keramického topného tělíska o příkonu 40 W.

Programové vybavení:

- FreeCAD pro modelování tištěných součástí,

- Slic3r pro generování G-kódu,
- Printron Pronterface jako počítačové ovládací rozhraní tiskárny

Měřidla:

- třmenový mikrometr analogový s rozsahem $0 \div 25$ mm, rozlišením 0,01 mm, 0,003; mm výrobce Somet Teplice,
- posuvné měřidlo digitální s rozsahem $0 \div 150$ mm, rozlišením 0,01 mm a maximální odchylkou 0,02 mm; výrobce Somet Teplice,
- teploměr digitální TM-902C s rozsahem $-50 \div 1050$ °C $\pm (0,75\% +1$ °C); výrobce Lutron.

3 PROVEDENÍ EXPERIMENTU

Experiment byl prováděn dle návrhu popsaného v předešlé kapitole. Naměřené hodnoty byly zaznamenány do tabulek. Vlastní tisk a měření probíhalo při teplotě okolního prostředí 22 ± 1 °C. Detailní nastavení programu Slic3r je uvedeno v příloze č. 1 pro ABS a v příloze č. 2 pro PLA.

3.1 Rozměrová kontrola vláken

Nejprve budou stanoveny nejistoty tvořící standardní nejistotu typu B použitím vztahu (2.5). Hodnoty a výsledky uvedeny v tabulce č. 3.1. Vliv roztažnosti lze vzhledem k měřenému rozměru zanedbat, neboť bude řádově nižší, než ostatní zdroje nejistot.

Tab. 3.1. - Nejistoty související s měřením třmenovým mikrometrem $0 \div 25$ mm.

Zdroj nejistoty	Standardní nejistota [mm]	Rozdělení pravděpodobnosti [-]	Koeficient citlivosti c_j [-]	Příspěvek k nejistotě u_B [mm]
Měřidlo (údaj z kalibrace $U=0,003$ mm)	$u_E=0,0015$	Normální $\chi = 2$	1	0,0015
Rozlišení stupnice (0,01 mm)	$u_M=0,0029$	Rovnoměrné $\chi = \sqrt{3}$	1	0,0029

Po dosazení do vzorce (2.4) pak bude získána hodnota standardní nejistoty typu B, která bude použita v dalších výpočtech:

$$u_B = \sqrt{0,0015^2 + 0,00289^2} = 0,0033 \text{ mm.} \quad (3.1)$$

3.1.1 Rozměrová kontrola vláken ABS

Tryska č. 1

Užitím vzorce (2.1) se spočte hodnota aritmetického průměru z hodnot naměřených u vlákna vytlačeného tryskou č. 1 rychlostí $40 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$:

$$\bar{x} = \frac{0,46 + 0,47 + 0,46 + 0,47 + 0,46 + 0,45 + 0,46 + 0,46 + 0,47 + 0,47}{10} \quad (3.2)$$

$$\bar{x} = 0,4630 \text{ mm.}$$

Poté se dosazením do vzorce (2.2) spočte výběrová směrodatná odchylka:

$$s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{(9 + 49 + 9 + 49 + 9 + 169 + 9 + 9 + 49 + 49) \cdot 10^{-6}}{10 - 1}} \quad (3.3)$$

$$s(\bar{x}) = 0,0067 \text{ mm.}$$

Pomocí vztahu (2.3) se spočte standardní nejistota typu A:

$$u_A = \sqrt{\frac{(9 + 49 + 9 + 49 + 9 + 169 + 9 + 9 + 49 + 49) \cdot 10^{-6}}{10(10 - 1)}} \quad (3.4)$$

$$u_A = 0,0021 \text{ mm.}$$

Dosazením výsledků z výpočtů (3.1) a (3.4) do vztahu (2.6) se získá kombinovaná standardní nejistota:

$$u_C = \sqrt{0,0021^2 + 0,033^2} \quad (3.5)$$

$$u_C = 0,0039 \text{ mm.}$$

Nakonec je pomocí vztahu (2.7) vypočítána rozšířená nejistota měření:

$$U = 0,0039 \cdot 2 = 0,0078 \text{ mm.} \quad (3.6)$$

Stejným způsobem se postupuje i u dalších trysek. Naměřené hodnoty a výsledky výpočtů jsou shrnuty v tabulce č. 3.2.

i	Rychlost protlačení [mm · min ⁻¹]					
	40	60	80	100	120	140
1	0,4600	0,4500	0,4500	0,4800	0,4600	0,4700
2	0,4700	0,4400	0,4400	0,4700	0,4600	0,4800
3	0,4600	0,4700	0,4500	0,4600	0,4600	0,4600
4	0,4700	0,4500	0,4500	0,4600	0,4600	0,4700
5	0,4600	0,4400	0,4500	0,4700	0,4600	0,4700
6	0,4500	0,4300	0,4500	0,4700	0,4700	0,4700
7	0,4600	0,4500	0,4500	0,4600	0,4700	0,4700
8	0,4600	0,4500	0,4500	0,4600	0,4600	0,4500
9	0,4700	0,4400	0,4500	0,4700	0,4700	0,4600
10	0,4700	0,4400	0,4400	0,4600	0,4600	0,4600

Tab. 3.2 – Naměřené a vypočtené hodnoty vzorků vláken ABS u trysky č. 1 [mm]

i	Rychlost protlačení [mm · min ⁻¹]					
	40	60	80	100	120	140
\sum [mm]	4,6300	4,4600	4,4800	4,6600	4,6300	4,6600
\bar{x} [mm]	0,4630	0,4460	0,4480	0,4660	0,4630	0,4660
$s(\bar{x})$ [mm]	0,0067	0,0107	0,0042	0,0070	0,0048	0,0084
u_A [mm]	0,0021	0,0034	0,0013	0,0022	0,0015	0,0027
u_C [mm]	0,0039	0,0047	0,0036	0,0040	0,0036	0,0042
U [mm]	0,0079	0,0095	0,0071	0,0079	0,0073	0,0085
$\bar{x} \pm U$ [mm]	0,4630 \pm 0,0079	0,4460 \pm 0,0095	0,4480 \pm 0,0071	0,4660 \pm 0,0079	0,4630 \pm 0,0073	0,4660 \pm 0,0085

Tryska č. 2, 3, 4

Naměřené hodnoty byly zpracovány stejným způsobem, jako u trysky č. 1. Naměřené a vypočtené hodnoty jsou uvedeny v tabulkách č. 3.3 (tryska č. 2), č. 3.4 (tryska č. 3) a č. 3.5 (tryska č. 4).

Tab. 3.3 – Naměřené a vypočtené hodnoty vzorků vláken ABS u trysky č. 2 [mm]

i	Rychlost protlačení [mm · min ⁻¹]					
	40	60	80	100	120	140
1	0,4800	0,4600	0,4600	0,4500	0,4500	0,4800
2	0,4700	0,4400	0,4500	0,4500	0,4400	0,4600
3	0,4900	0,4400	0,4300	0,4400	0,4500	0,4700
4	0,4800	0,4200	0,4400	0,4600	0,4600	0,4500
5	0,4500	0,4500	0,4500	0,4200	0,4300	0,4600
6	0,4700	0,4300	0,4300	0,4200	0,4400	0,4400
7	0,5000	0,4600	0,4400	0,4600	0,4400	0,4800
8	0,4600	0,4200	0,4300	0,4400	0,4400	0,4600
9	0,4600	0,4300	0,4600	0,4300	0,4600	0,4400
10	0,4800	0,4500	0,4500	0,4500	0,4400	0,4500
\sum [mm]	4,7400	4,4000	4,4400	4,4200	4,4500	4,5900
\bar{x} [mm]	0,4740	0,4400	0,4440	0,4420	0,4450	0,4590
$s(\bar{x})$ [mm]	0,0151	0,0149	0,0117	0,0148	0,0097	0,0145
u_A [mm]	0,0048	0,0047	0,0037	0,0047	0,0031	0,0046
u_C [mm]	0,0058	0,0058	0,0050	0,0057	0,0045	0,0056
U [mm]	0,0116	0,0115	0,0099	0,0114	0,0090	0,0113
$\bar{x} \pm U$ [mm]	0,4740 \pm 0,0116	0,4400 \pm 0,0115	0,4440 \pm 0,0099	0,4420 \pm 0,0114	0,4450 \pm 0,0090	0,4590 \pm 0,0113

Tab. 3.4 – Naměřené a vypočtené hodnoty vzorků vláken ABS u trysky č. 3 [mm]

i	Rychlost protlačení [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]					
	40	60	80	100	120	140
1	0,4500	0,4700	0,4400	0,4600	0,4600	0,4300
2	0,4600	0,4500	0,4600	0,4500	0,4600	0,4300
3	0,4300	0,4700	0,4500	0,4700	0,4500	0,4500
4	0,4500	0,4700	0,4600	0,4600	0,4700	0,4800
5	0,4400	0,4400	0,4500	0,4500	0,4500	0,4600
6	0,4400	0,4500	0,4300	0,4500	0,4400	0,4900
7	0,4300	0,4600	0,4400	0,4800	0,4400	0,4900
8	0,4300	0,4500	0,4400	0,4900	0,4500	0,4300
9	0,4500	0,4400	0,4500	0,4500	0,4500	0,4300
10	0,4500	0,4400	0,4500	0,4600	0,4600	0,4200
Σ [mm]	4,4300	4,5400	4,4700	4,6200	4,5300	4,5100
\bar{x} [mm]	0,4430	0,4540	0,4470	0,4620	0,4530	0,4510
$s(\bar{x})$ [mm]	0,0106	0,0126	0,0095	0,0140	0,0095	0,0273
u_A [mm]	0,0033	0,0040	0,0030	0,0044	0,0030	0,0086
u_C [mm]	0,0047	0,0052	0,0045	0,0055	0,0045	0,0092
U [mm]	0,0094	0,0104	0,0089	0,0110	0,0089	0,0185
$\bar{x} \pm U$ [mm]	0,4430 \pm 0,0094	0,4540 \pm 0,0104	0,4470 \pm 0,0089	0,4620 \pm 0,0110	0,4530 \pm 0,0089	0,4510 \pm 0,0185

Tab. 3.5 – Naměřené a vypočtené hodnoty vzorků vláken ABS u trysky č. 4 [mm]

i	Rychlost protlačení [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]					
	40	60	80	100	120	140
1	0,4400	0,4900	0,4300	0,4500	0,4500	0,4200
2	0,4500	0,4800	0,4200	0,4600	0,4600	0,4100
3	0,4600	0,4800	0,4300	0,4900	0,4300	0,4100
4	0,4500	0,4700	0,4400	0,4900	0,4400	0,4500
5	0,4700	0,4600	0,4400	0,4300	0,4500	0,4100
6	0,4400	0,4500	0,4400	0,4600	0,4400	0,3900
7	0,4600	0,4500	0,4500	0,4400	0,4700	0,4100
8	0,4500	0,4800	0,4600	0,4100	0,4600	0,4500
9	0,4600	0,4800	0,4600	0,4800	0,4300	0,4300
10	0,4400	0,4100	0,4400	0,4200	0,4500	0,4100
Σ [mm]	4,5200	4,6500	4,4100	4,5300	4,4800	4,1900
\bar{x} [mm]	0,4520	0,4650	0,4410	0,4530	0,4480	0,4190
$s(\bar{x})$ [mm]	0,0103	0,0237	0,0129	0,0283	0,0132	0,0191
u_A [mm]	0,0033	0,0075	0,0041	0,0090	0,0042	0,0141
u_C [mm]	0,0046	0,0082	0,0052	0,0095	0,0053	0,0144
U [mm]	0,0093	0,0164	0,0105	0,0191	0,0106	0,0289

Tab. 3.5 – Naměřené a vypočtené hodnoty vzorků vláken ABS u trysky č. 4 [mm]

i	Rychlost protlačení [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]					
	40	60	80	100	120	140
$\bar{x} \pm$	0,4520 \pm	0,4650 \pm	0,4410 \pm	0,4530 \pm	0,4480 \pm	0,4190 \pm
U [mm]	0,0093	0,0164	0,0105	0,0191	0,0106	0,0289

V případě materiálu ABS lze z měřených hodnot vypočítat, že s klesající délkou kanálu se zmenšuje průměr vlákna a zvětšuje se jeho rozměrová nestabilita. Nejvyšších hodnot průměru dosahuje tryska č. 1, následuje tryska č. 3, tryska 2 a nakonec tryska č. 4. Pokud jde o variabilitu rozměrů vlákna, pak nejnižší dosahuje tryska č. 1, vyšší je u trysek č. 2 a 3 a nejvyšších hodnot (zhruba dvojnásobných) nabývá vlákno vytlačené tryskou č. 4.

3.1.2 Rozměrová kontrola vláken PLA

Výstupy z měření vláken z materiálu PLA jsou zaznamenány a zpracovány stejným způsobem, jako v předchozí kapitole popsány materiál ABS. Hodnoty pro jednotlivé trysky jsou znázorněny v tabulce č. 3.6 (tryska č. 1), č. 3.7 (tryska č. 2), č. 3.8 (tryska č. 3) a tabulce č. 3.9 (tryska č. 4).

Tab. 3.6 – Naměřené a vypočtené hodnoty vzorků vláken PLA u trysky č. 1 [mm]

i	Rychlost protlačení [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]					
	40	60	80	100	120	140
1	0,3900	0,4200	0,4200	0,4300	0,4400	0,4400
2	0,4100	0,3800	0,4200	0,4300	0,4500	0,4600
3	0,4500	0,4100	0,4200	0,4300	0,4500	0,4600
4	0,4100	0,4100	0,4200	0,4300	0,4500	0,4700
5	0,4100	0,4000	0,4300	0,4300	0,4500	0,4500
6	0,3900	0,4100	0,4300	0,4300	0,4400	0,4500
7	0,4100	0,4000	0,3800	0,4300	0,4400	0,4700
8	0,4300	0,4000	0,4500	0,4300	0,4400	0,4700
9	0,4100	0,4000	0,4300	0,4200	0,4100	0,4600
10	0,4100	0,4000	0,4100	0,4400	0,4500	0,4600
Σ [mm]	4,1200	4,0300	4,2100	4,3000	4,4200	4,5900
\bar{x} [mm]	0,4120	0,4030	0,4210	0,4300	0,4420	0,4590
s(\bar{x}) [mm]	0,0175	0,0106	0,0179	0,0047	0,0123	0,0099
u_A [mm]	0,0055	0,0033	0,0057	0,0015	0,0039	0,0031
u_C [mm]	0,0064	0,0047	0,0066	0,0036	0,0051	0,0046
U [mm]	0,0129	0,0094	0,0131	0,0072	0,0102	0,0091
$\bar{x} \pm$	0,4120 \pm	0,4030 \pm	0,4210 \pm	0,4300 \pm	0,4420 \pm	0,4590 \pm
U [mm]	0,0129	0,0094	0,0131	0,0072	0,0102	0,0091

Tab. 3.7 – Naměřené a vypočtené hodnoty vzorků vláken PLA u trysky č. 2 [mm]

i	Rychlost protlačení [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]					
	40	60	80	100	120	140
1	0,3800	0,4100	0,4000	0,4300	0,4400	0,4800
2	0,3800	0,4100	0,3600	0,4300	0,4500	0,4800
3	0,4000	0,4100	0,4200	0,4300	0,4600	0,4700
4	0,3800	0,3900	0,3900	0,4200	0,4600	0,4700
5	0,3800	0,4000	0,4000	0,4400	0,4100	0,4800
6	0,3900	0,3700	0,4300	0,4300	0,4500	0,4700
7	0,3900	0,4200	0,3900	0,4300	0,4600	0,4900
8	0,3700	0,3800	0,3800	0,4600	0,4300	0,4700
9	0,3900	0,4600	0,3900	0,4000	0,4600	0,4800
10	0,3900	0,3700	0,4000	0,3900	0,4600	0,4800
Σ [mm]	3,8500	4,0200	3,9600	4,2600	4,4800	4,7700
\bar{x} [mm]	0,3850	0,4020	0,3960	0,4260	0,4480	0,4770
$s(\bar{x})$ [mm]	0,0085	0,0270	0,0196	0,0196	0,0169	0,0067
u_A [mm]	0,0027	0,0085	0,0062	0,0062	0,0053	0,0021
u_C [mm]	0,0043	0,0092	0,0070	0,0070	0,0063	0,0039
U [mm]	0,0085	0,0183	0,0140	0,0140	0,0125	0,0079
$\bar{x} \pm U$ [mm]	$0,3850 \pm 0,0085$	$0,4020 \pm 0,0183$	$0,3960 \pm 0,0140$	$0,4260 \pm 0,0140$	$0,4480 \pm 0,0125$	$0,4770 \pm 0,0079$

Tab. 3.8 – Naměřené a vypočtené hodnoty vzorků vláken PLA u trysky č. 3 [mm]

i	Rychlost protlačení [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]					
	40	60	80	100	120	140
1	0,3800	0,4200	0,4300	0,4400	0,4400	0,4700
2	0,4000	0,4200	0,4300	0,4400	0,4400	0,4600
3	0,3900	0,4000	0,4200	0,4400	0,4300	0,4600
4	0,3700	0,3700	0,4300	0,4600	0,4600	0,4700
5	0,3700	0,4300	0,4400	0,4500	0,4300	0,4600
6	0,3800	0,4600	0,4300	0,4500	0,4600	0,4900
7	0,3900	0,4500	0,4400	0,4500	0,4800	0,4600
8	0,3800	0,4500	0,4200	0,4500	0,4400	0,4500
9	0,3700	0,4600	0,4300	0,4600	0,4300	0,4600
10	0,3800	0,4200	0,4400	0,4500	0,4400	0,4900
Σ [mm]	3,8100	4,2800	4,3100	4,4900	4,4500	4,6700
\bar{x} [mm]	0,3810	0,4280	0,4310	0,4490	0,4450	0,4670
$s(\bar{x})$ [mm]	0,0099	0,0286	0,0074	0,0074	0,0165	0,0134
u_A [mm]	0,0031	0,0090	0,0023	0,0023	0,0052	0,0042
u_C [mm]	0,0046	0,0096	0,0040	0,0040	0,0062	0,0054

Tab. 3.8 – Naměřené a vypočtené hodnoty vzorků vláken PLA u trysky č. 3 [mm]

	Rychlost protlačení [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]					
i	40	60	80	100	120	140
U [mm]	0,0091	0,0193	0,0081	0,0081	0,0123	0,0107
$\bar{x} \pm$ U [mm]	0,3810 \pm 0,0091	0,4280 \pm 0,0193	0,4310 \pm 0,0081	0,4450 \pm 0,0123	0,4620 \pm 0,0330	0,4670 \pm 0,0107

Tab. 3.9 – Naměřené a vypočtené hodnoty vzorků vláken PLA u trysky č. 4 [mm]

	Rychlost protlačení [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]					
i	40	60	80	100	120	140
1	0,4200	0,3700	0,4200	0,4300	0,4600	0,4800
2	0,4100	0,3900	0,4300	0,4200	0,4700	0,4900
3	0,3900	0,3900	0,4400	0,4300	0,4800	0,4900
4	0,3700	0,4000	0,4200	0,4300	0,4600	0,4700
5	0,3700	0,4100	0,4300	0,4300	0,4600	0,4800
6	0,3800	0,4000	0,4200	0,4200	0,4700	0,4900
7	0,3700	0,3900	0,4200	0,4400	0,5000	0,4800
8	0,3800	0,3900	0,4300	0,4300	0,4600	0,4800
9	0,4000	0,3700	0,4300	0,4400	0,4400	0,4300
10	0,3800	0,3900	0,4400	0,4200	0,4400	0,4400
Σ [mm]	3,8700	3,9000	4,2800	4,2900	4,6400	4,7300
\bar{x} [mm]	0,3870	0,3900	0,4280	0,4290	0,4640	0,4730
s(\bar{x}) [mm]	0,0177	0,0125	0,0079	0,0074	0,0178	0,0211
u_A [mm]	0,0056	0,0039	0,0025	0,0023	0,0056	0,0068
u_C [mm]	0,0065	0,0051	0,0041	0,0040	0,0065	0,0076
U [mm]	0,0130	0,0103	0,0083	0,0081	0,0130	0,0152
$\bar{x} \pm$ U [mm]	0,3870 \pm 0,0130	0,3900 \pm 0,0103	0,4280 \pm 0,0083	0,4290 \pm 0,0081	0,4640 \pm 0,0130	0,4730 \pm 0,0152

U vláken z materiálu PLA dosahují největších rozměrů vlákna protlačena tryskou č. 3, potom tryskou č. 4, č. 1 a nejmenších pak u trysky č. 2. V tomto případě tedy nelze prokázat korelaci mezi délkou kanálu trysky a výsledným průměrem vlákna. Nejnižší kolísání průměru vláken se objevuje u trysky č. 1, nejvyšší u trysky č. 2. Trysky č. 3 a 4 dosahují prakticky stejných hodnot.

3.2 Mikroskopické pozorování vzorků vláken

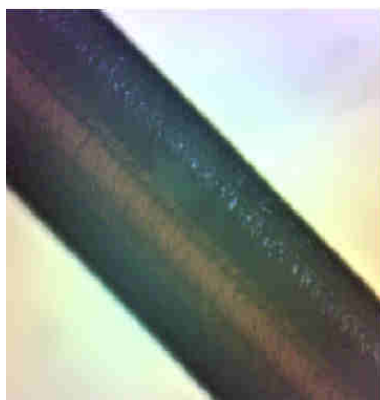
Vzorek vlákna byl pozorován po celé délce (25 mm) při stonásobném zvětšení a byla pořízena fotodokumentace povrchu. Případné vady či deformace byly označeny.

3.2.1 Vlákna z materiálu ABS

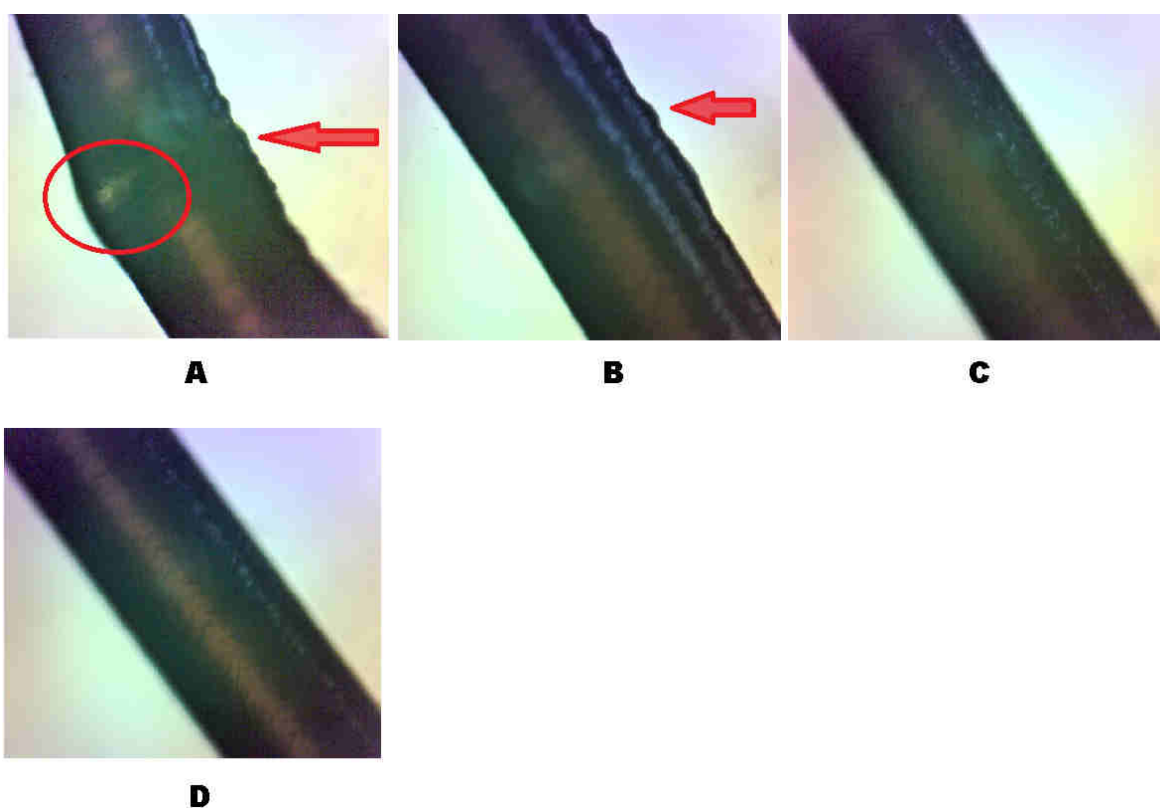
Fotografie z pozorování vzorků vláken jsou na obrázku č. 3.1 (tryska č. 1), č. 3.2, (tryska č. 2), č. 3.3 (tryska č. 3) a obrázku č. 3.4 (tryska č. 4).

**A****B****C**

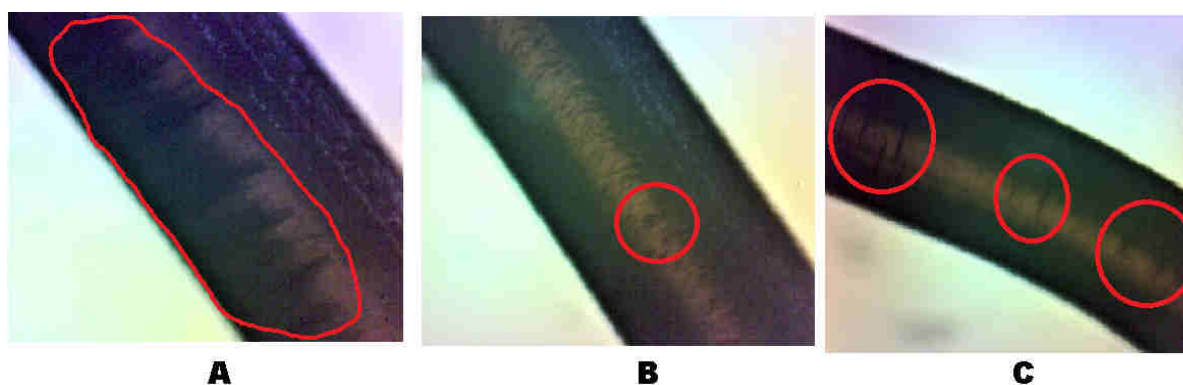
Obr. 3.1 – Vlákno protlačené tryskou č. 1 rychlostí 40 (a), 100 (b) a 140 mm · min⁻¹ (c).

**A****B****C****D**

Obr. 3.2 – Vlákno protlačené tryskou č. 2 rychlostí 40 (a, b), 100 (c) a 140 mm · min⁻¹ (d).



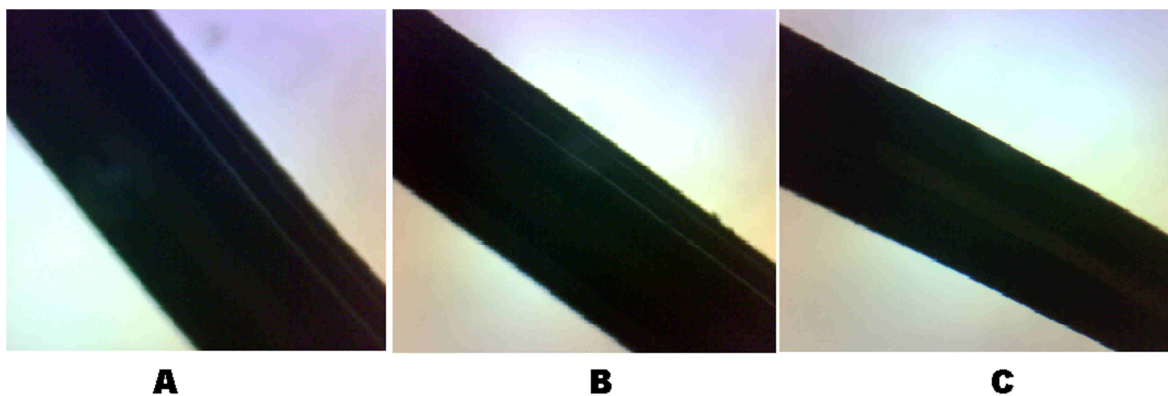
Obr. 3.3 – Vlákno protlačené tryskou č. 3 rychlostí 40 (a, b), 100 (c) a 140 mm · min⁻¹ (d)



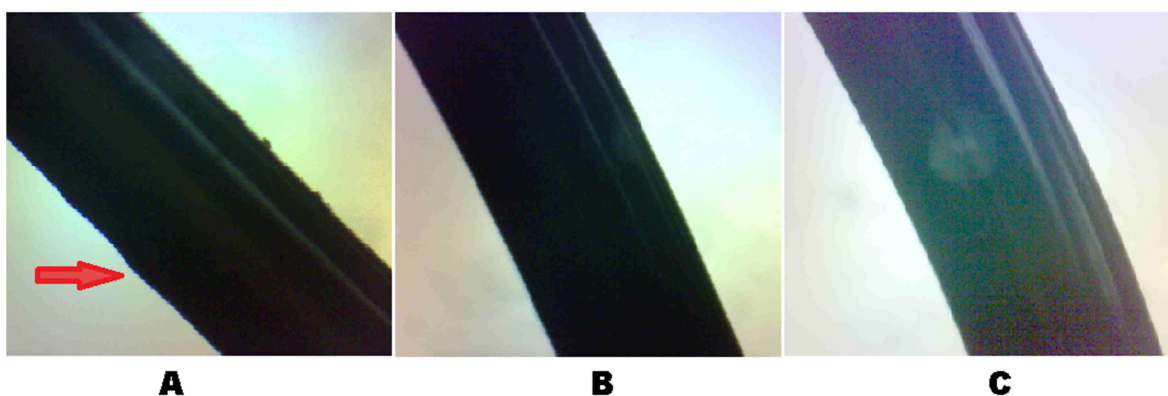
Obr. 3.4 – Vlákno protlačené tryskou č. 4 rychlostí 40 (a), 100 (b) a 140 mm · min⁻¹ (c)

Mikroskopickým pozorováním vláken materiálu ABS byla zjištěna zvyšující se tendence přítomnosti a rozsahu vad v souvislosti s klesající délkou kanálu. Objevují se vady typu kráterů, příčných rýh a deformace profilu. Největší velikost vad byla zjištěna při nízké (40 mm · min⁻¹) rychlosti extruze.

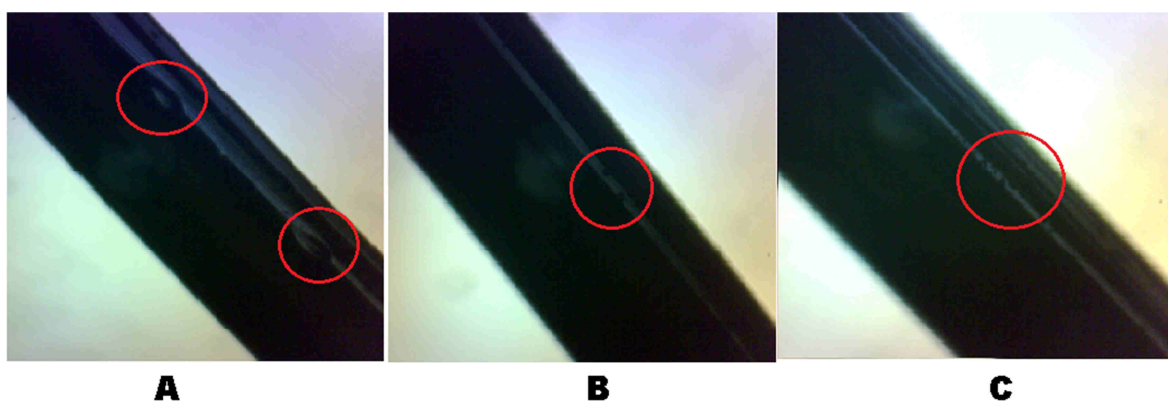
3.2.2 Vlákna z materiálu PLA



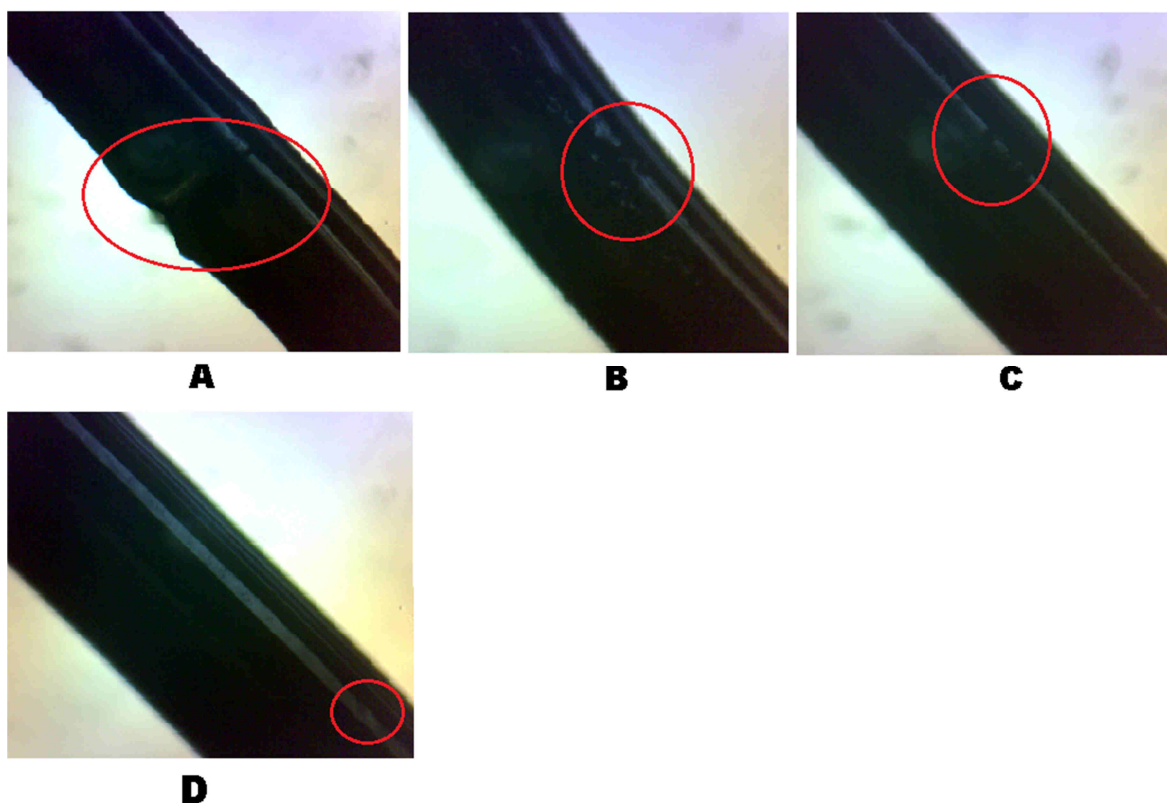
Obr. 3.5 – Vlákno protlačené tryskou č. 1 rychlostí 40 (a), 100 (b) a 140 mm · min⁻¹ (c).



Obr. 3.6 – Vlákno protlačené tryskou č. 2 rychlostí 40 (a), 100 (b) a 140 mm · min⁻¹ (c).



Obr. 3.7 – Vlákno protlačené tryskou č. 3 rychlostí 40 (a), 100 (b) a 140 mm · min⁻¹ (c).

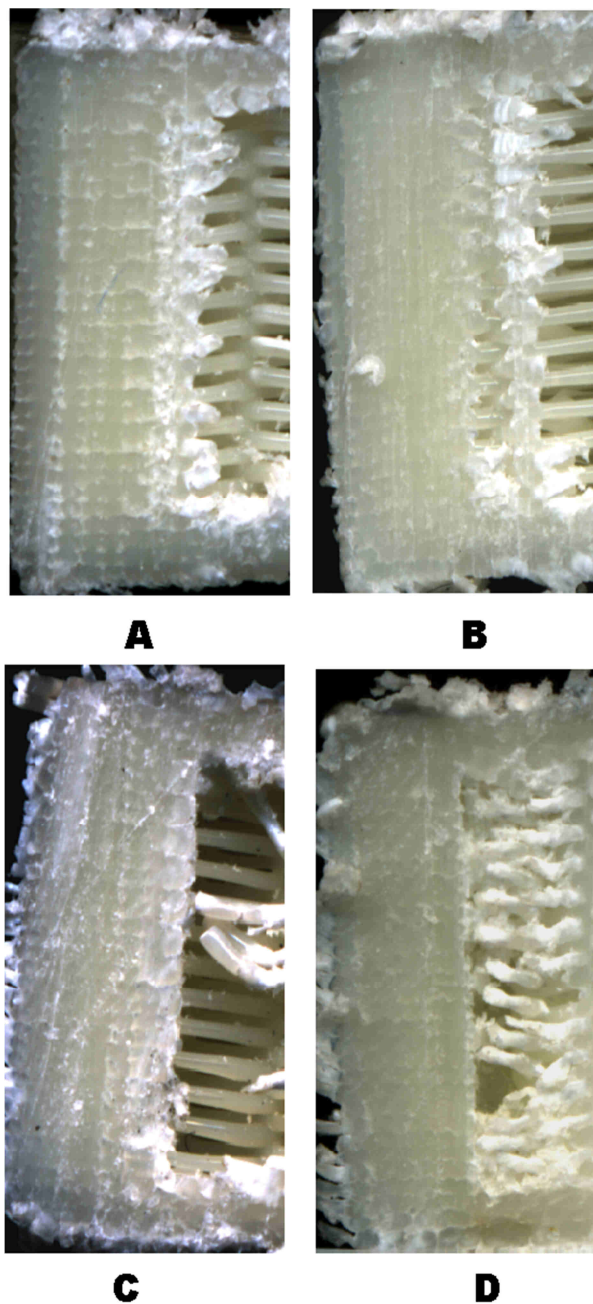


Obr. 3.8 – Vlákno protlačené tryskou č. 4 rychlostí 40 (a, b), 100 (c) a 140 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ (d).

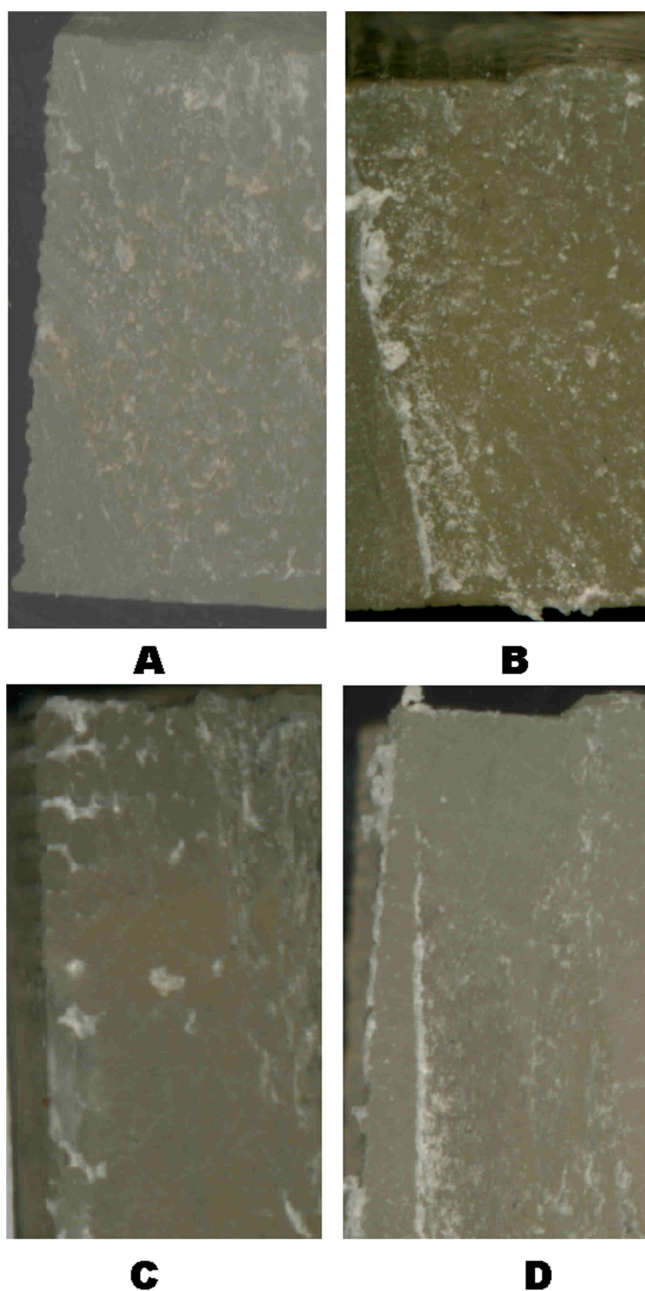
Na obrázcích č. 3.5, 3.6, 3.7 a 3.8 jsou snímky vláken materiálu PLA protlačených tryskami č. 1 až č. 4. Zatímco na vzorcích z trysky č. 1 nebyly nalezeny žádné vady, na vzorcích z dalších trysek přibývá vad typu kráterů, případně deformací profilu, a to zejména při nízkých rychlostech. Největší vady byly zaznamenány u trysky č. 4 při rychlosti protlačení 40 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$.

3.3 Řez vytištěným vzorkem

Na obrázku č. 3.9 je vyfotografován řez vzorky materiálu ABS, které byly vytištěny jednotlivými tryskami. V levé části každého snímku se nachází stěna výtisku (perimetr) a v pravé části výplň. Výška vzorku je 10 mm. Lze pozorovat rostoucí nepravidelnosti tvaru vláken výplně v závislosti na snižující se délce kanálu trysky. Jiná situace je u materiálu PLA (obr. č. 3.10), kde dochází ke vzájemnému slití jednotlivých vláken, čímž je v tomto případě porovnání znemožněno.

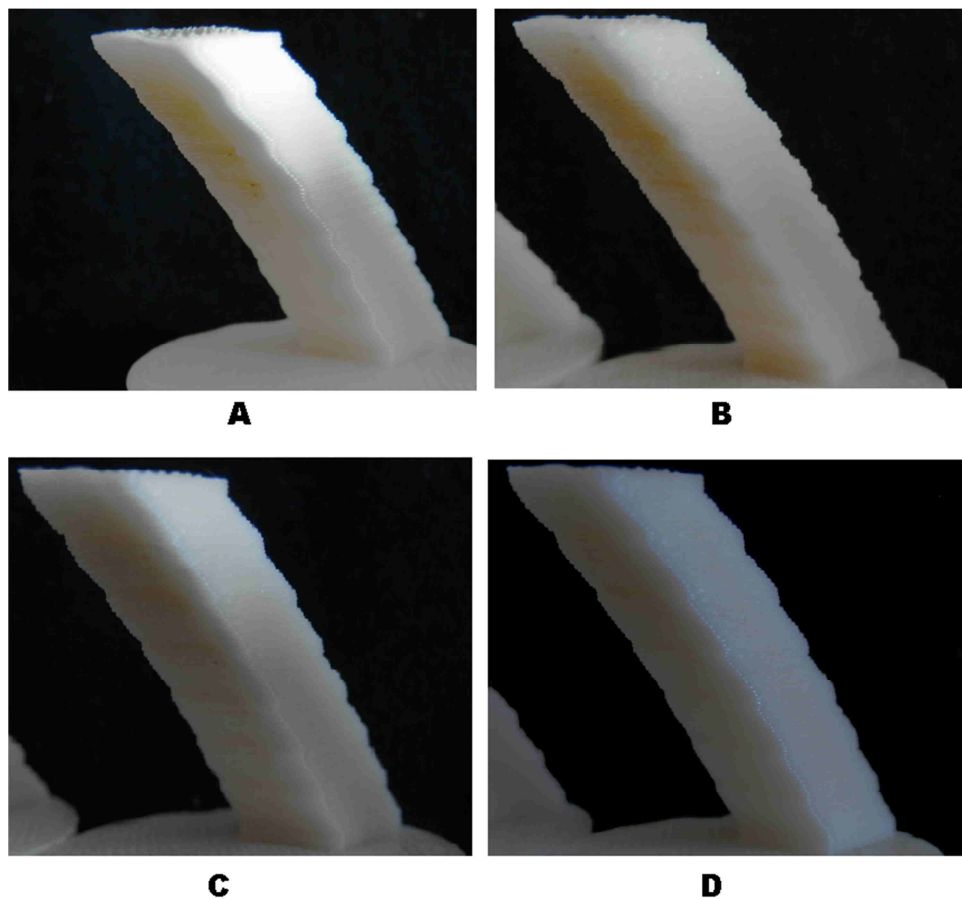


Obr. 3.9 – Řez objektem vytištěným tryskou č. 1 (a), tryskou č. 2 (b), tryskou č. 3 (c) a tryskou č. 4 (d). Materiál ABS.

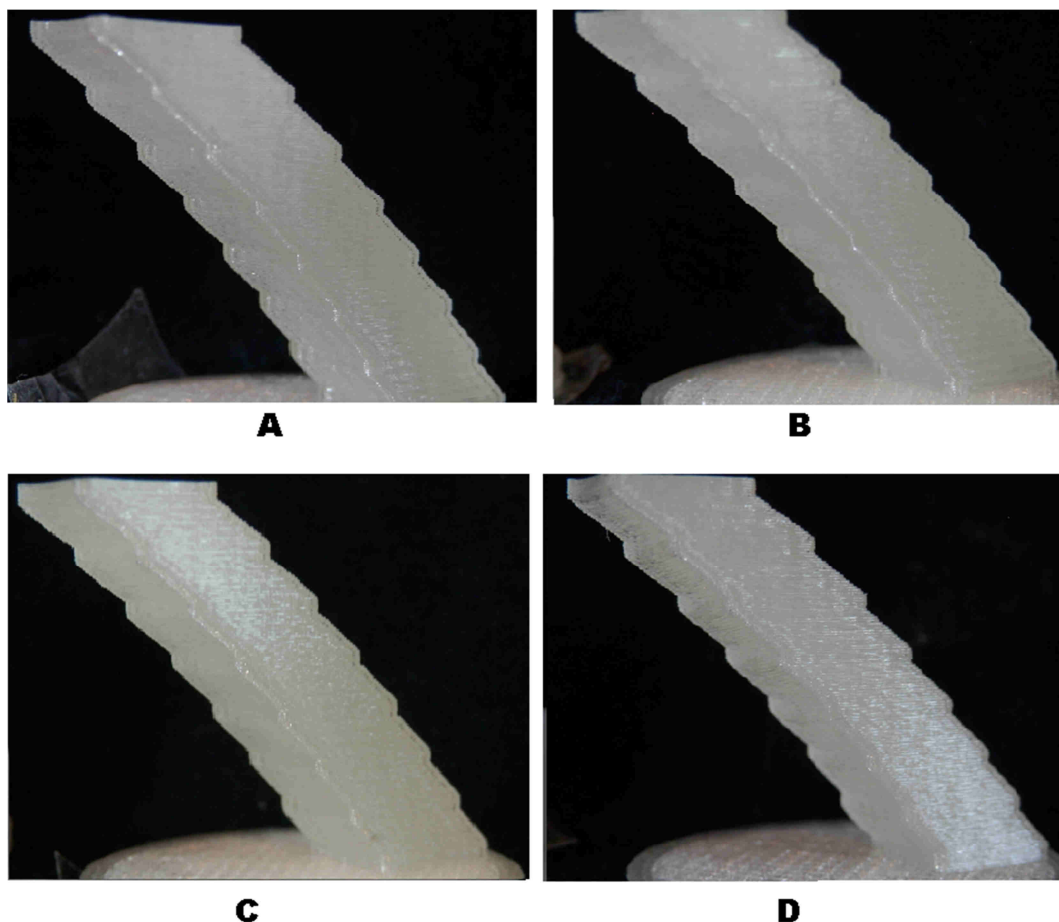


Obr. 3.10 – Řez objektem vytištěným tryskou č. 1 (a), tryskou č. 2 (b), tryskou č. 3 (c) a tryskou č. 4 (d). Materiál PLA.

3.4 Vyhodnocení vzorků reprezentujících převis



Obr. 3.11 – Vzorek převisu vytištěný tryskou č. 1 (a), tryskou č. 2 (b), tryskou č. 3 (c) a tryskou č. 4 (d). Materiál ABS.



Obr. 3.12 – Vzorek převisu vytištěný tryskou č. 1 (a), tryskou č. 2 (b), tryskou č. 3 (c) a tryskou č. 4 (d). Materiál PLA.

Na obrázcích č. 3.11 a 3.12 jsou fotografie vytištěných vzorků s odstupňovanými úhly sklonu. Vizuální prohlídkou zaměřenou na borcení vláken tvořících převislou stěnu nebyly zjištěny viditelné rozdíly mezi jednotlivými výtisky. Hodnoty naměřené při rozměrové kontrole jsou uvedeny v tabulce č. 3.10 (pro materiál ABS) a č. 3.11 (materiál PLA). K rozměrové kontrole bylo použito digitální posuvné měřidlo.

Tab. 3.10 – Vzdálenosti skloněných stěn u vzorků z materiálu ABS.

Úhel sklonu od kolmice	Naměřené hodnoty u jednotlivých vzorků [mm]			
	Tryska č. 1	Tryska č. 2	Tryska č. 3	Tryska č. 4
54°	10,49	10,47	10,44	10,52
52°	10,35	10,39	10,38	10,37
50°	10,27	10,33	10,37	10,31
48°	10,36	10,36	10,34	10,40
46°	10,34	10,32	10,33	10,37
44°	10,30	10,31	10,32	10,34
42°	10,33	10,31	10,30	10,29

Tab. 3.11 – Vzdálenosti skloněných stěn u vzorků z materiálu PLA.

Úhel sklonu od kolmice	Naměřené hodnoty u jednotlivých vzorků [mm]			
	Tryska č. 1	Tryska č. 2	Tryska č. 3	Tryska č. 4
54°	10,52	10,48	10,45	10,47
52°	10,48	10,44	10,47	10,49
50°	10,42	10,43	10,41	10,42
48°	10,39	10,42	10,40	10,38
46°	10,33	10,36	10,38	10,38
44°	10,29	10,29	10,31	10,32
42°	10,27	10,24	10,28	10,29

Z tabulek je zřejmé, že naměřené hodnoty mají u obou materiálů velmi podobnou velikost a nevykazují žádný trend vzhledem k délce kanálu trysky. Žádný projev vlivu poměru délky kanálu k jeho šířce nebyl v testovaném rozsahu úhlů sklonu prokázán.

3.5 Vyhodnocení vzorků reprezentujících přemostění

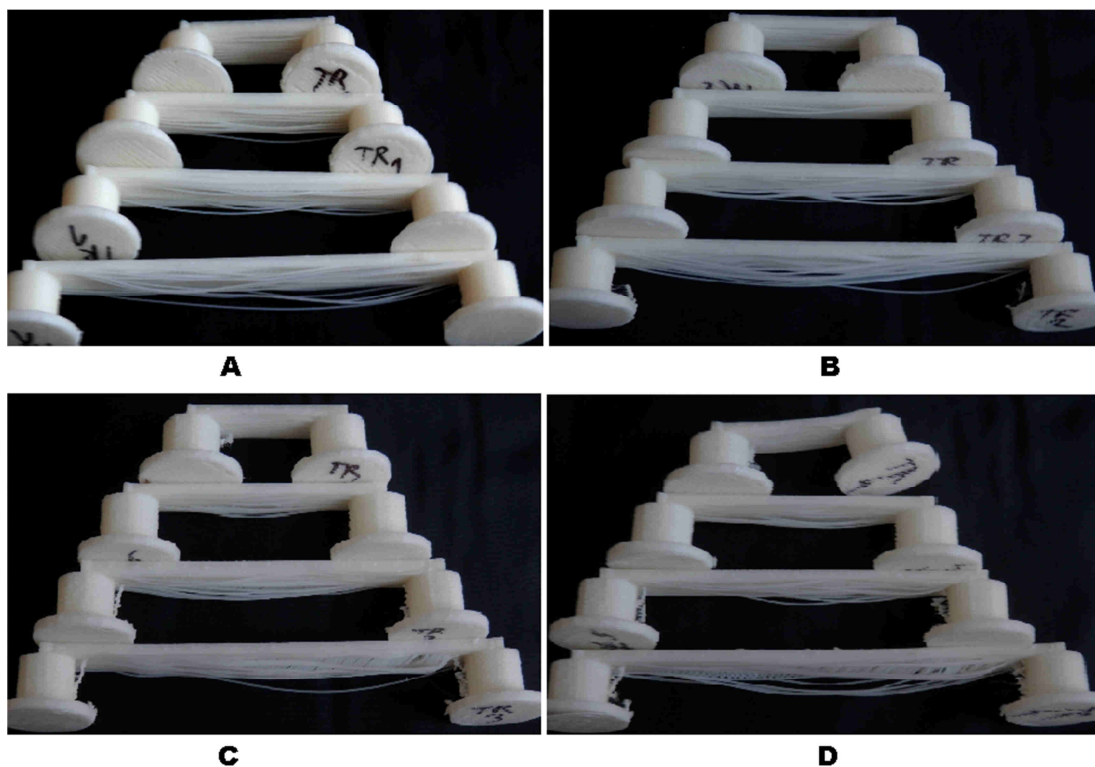
Výtisky reprezentující přemostění jsou znázorněny na obr. 3.13 (materiál ABS) a 3.14 (materiál PLA). Byla provedena rozměrová kontrola výšky profilu. Nejvyšší naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 3.12 (materiál ABS) a č. 3.13 (materiál PLA). K rozměrové kontrole bylo použito digitální posuvné měřidlo. Z porovnání vytištěných vzorků vyplývá, že u trysek se zkráceným kanálem dochází k většímu propadu vláken tvořících spodní vrstvy.

Tab. 3.12 – Nejvyšší naměřená hodnota výšky profilu mostu – materiál ABS.

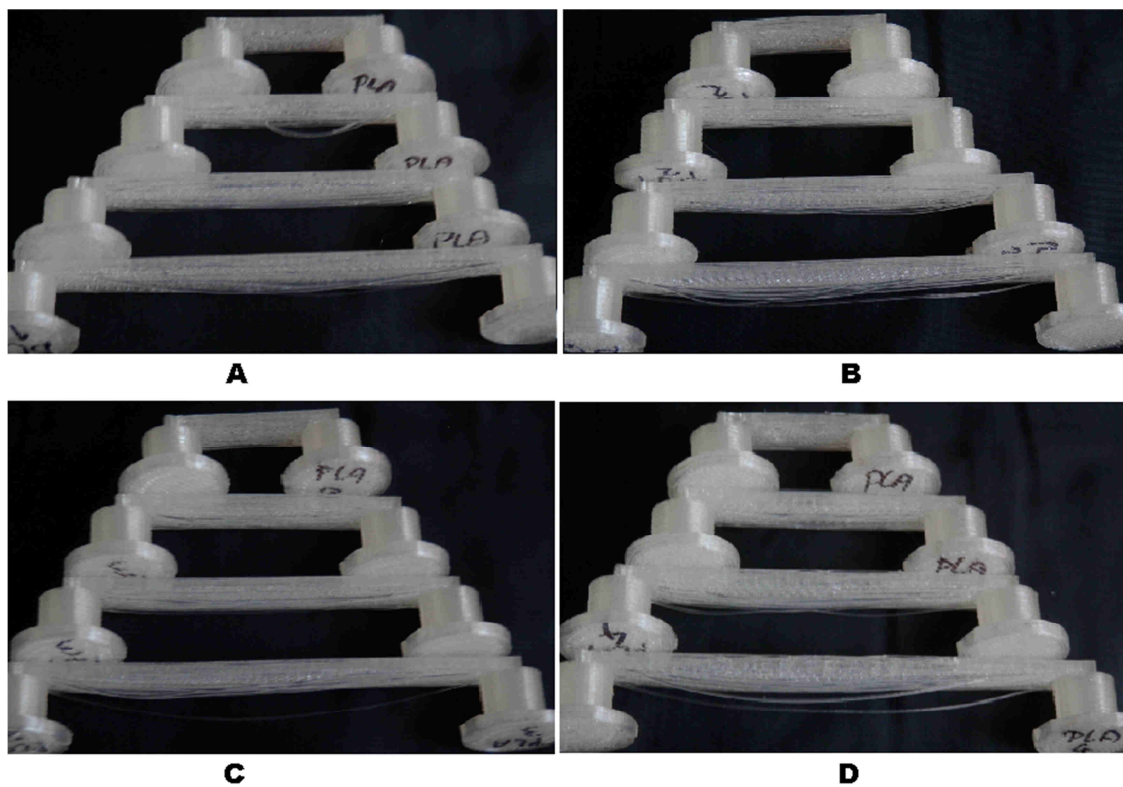
Délka přemostění [mm]	Naměřené hodnoty u jednotlivých vzorků [mm]			
	Tryska č. 1	Tryska č. 2	Tryska č. 3	Tryska č. 4
20	2,60	2,70	2,72	2,64
40	2,90	2,98	2,96	2,98
60	3,40	3,42	3,35	3,47
80	3,60	3,90	4,50	5,20

Tab. 3.13 – Nejvyšší naměřená hodnota výšky profilu mostu – materiál PLA.

Délka přemostění [mm]	Naměřené hodnoty u jednotlivých vzorků [mm]			
	Tryska č. 1	Tryska č. 2	Tryska č. 3	Tryska č. 4
20	2,60	2,70	2,72	2,64
40	2,90	2,98	2,96	2,98
60	3,40	3,42	3,35	3,47
80	3,60	3,90	4,50	5,20



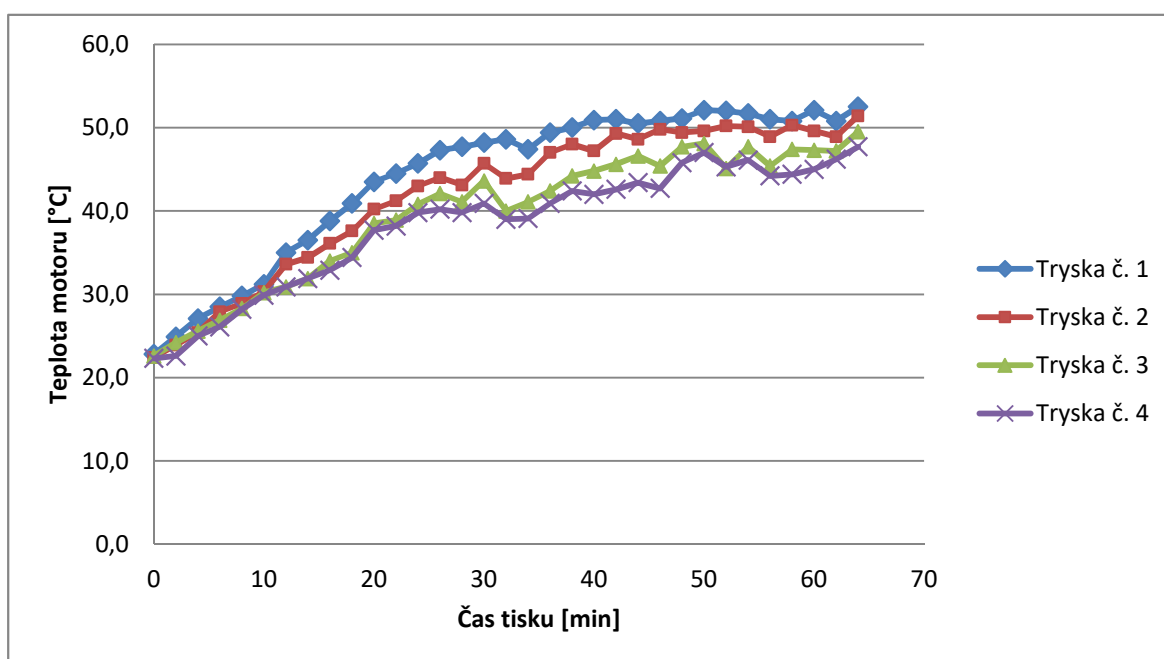
Obr. 3.13 - Vzorky přemostění vytištěné tryskou č. 1 (a), tryskou č. 2 (b), tryskou č. 3 (c) a tryskou č. 4 (d). Materiál ABS.



Obr. 3.14 - Vzorky přemostění vytištěné tryskou č. 1 (a), tryskou č. 2 (b), tryskou č. 3 (c) a tryskou č. 4 (d). Materiál PLA.

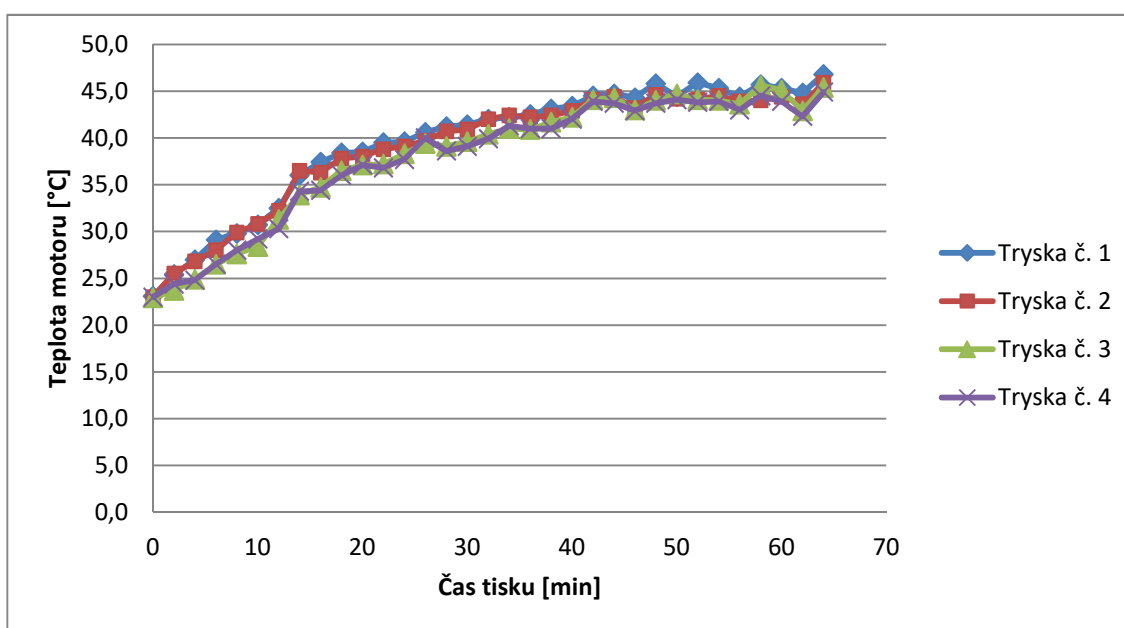
3.6 Měření teploty motoru extruderu

Následující grafy znázorňují průběh teplot motoru extruderu v závislosti na čase. Byly sestaveny z hodnot odečítaných během tisku ve dvouminutových intervalech. Konkrétní hodnoty jsou uvedeny v tabulce tvořící přílohu č. 3. Měření bylo prováděno digitálním teploměrem. Graf dokumentující ohřev motoru při tisku materiálem ABS je na obrázku 3.15. Lze pozorovat, že při tisku tryskou s kratším kanálem dochází k poněkud menšímu zatížení motoru, které je reprezentováno jeho ohřevem.



Obr. 3.15 – Teplota motoru v průběhu tisku. Materiál ABS.

Na obrázku 3.16 je znázorněn graf popisující průběh teplot motoru extruderu při tisku materiálem PLA. Na rozdíl od předchozího případu je zde změna průběhu a velikosti teplot v závislosti na délce kanálu trysky pouze minimální.



Obr. 3.16 – Teplota motoru v průběhu tisku. Materiál PLA.

4 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU

Doba trvání tisku zkušebních vzorků byla přibližně 19 hodin. Úprava trysek, čištění, seřizování a kontroly trvaly 5 hodin. Rozměrové kontroly a mikroskopické pozorování a dokumentování pak dalších 10 hodin. Praktická část experimentu si tedy vyžádala 34 hodin čistého času. Spotřeba materiálu pro tisk objektů (vlákna pro rozměrovou kontrolu a mikroskopické pozorování nejsou započítána) činila 224 g ABS a 265 g PLA. Pořízeno bylo celkem 22 ks trysek, z nichž byly po kontrolách délky a průměru kanálu pro experiment vybrány 4 ks, které pocházejí od jednoho výrobce.

Aby bylo eliminováno co nejvíce nechtěných vlivů, které by se mohly podílet na výsledcích, byla v průběhu celého experimentu používána stále stejná sestava tiskové hlavy a extruderu. Při změně materiálu bylo provedeno rozebrání a důkladné vyčištění všech komponent a jejich následná kontrola. Rovněž byl brán zřetel na vytvoření podmínek pro zamezení nežádoucímu ofuku průvanem, nicméně vzhledem k otevřené konstrukci tiskárny nelze tomuto vlivu zcela zamezit. Dále byla průběžně prováděna namátková rozměrová kontrola průměru tryskových strun. Při této kontrole nebyly zjištěny žádné anomálie. Jako teplota tisku byla volena střední hodnota rozsahu teplot doporučeného výrobcem. Tato teplota pak byla nastavena při všech částech experimentu.

Vlákna pro rozměrovou a mikroskopickou kontrolu byla vytlačována do volného prostoru. To sice přesně neodpovídá situaci vlákna ve výtisku, které je přitlačeno k podložce či sousedním vláknům, nicméně při jeho extrakci z výtisku či z podložky lze očekávat jeho nezanedbatelnou deformaci, krom toho by struktura povrchu byla ovlivněna sousedícími objekty. Pro rozměrovou kontrolu byl před posuvným měřidlem upřednostněn třmenový mikrometr, neboť poměrně ostré měřicí doteky posuvného měřidla by mohly poškodit povrch vlákna, navíc při proměnné přitlačné síle by výsledky mohly být poněkud zkreslené.

Čistá forma materiálu PLA je u malých tloušťek průhledná. Z tohoto důvodu byla pro účely mikroskopického pozorování použita barevná varianta – konkrétně tmavší odstín šedé. Polymer ABS je v čistém stavu prakticky neprůhledný, takže v tomto případě nebylo třeba žádných dalších opatření. Větší deformace, které se objevují při nižších rychlostech protlačení mohou souviset s delší dobou visu ve volném prostoru, čímž se vlákno může deformovat tahem způsobeným vlastní hmotností. Vady a deformace projevující se u kratších kanálů jsou pravděpodobně způsobeny tím, že se vlákno při průtoku nestihne dokonale zformovat a normalizovat.

U provedených řezů vytištěným objektem z ABS lze pozorovat makroskopickou změnu tvaru a povrchu vláken vytištěných tryskou s délkou kanálu 0,2 mm. U materiálu PLA došlo ke slití stěny a výplně, primární příčinou byla patrně nevhodně zvolená (příliš vysoká teplota) tisku. Hustota výplně byla přitom zadána stejná, jako u předešlého materiálu.

Při tisku převisů nebyl v testovaném rozsahu prokázán vliv kanálu trysky. Návrh této části experimentu vycházel z testování v přípravné fázi této práce, kdy byly tyto vzorky vytištěny dvěma náhodně vybranými tryskami a mezi těmito výtisky byly pozorovatelné rozdíly. Jednalo se však o trysky různých výrobců a krom toho byl použit materiál (ABS)

od jiné firmy, který navíc obsahoval barviva a jeho stáří bylo zhruba 2 roky. Souhrn těchto okolností tedy překonává vlastní vliv délky kanálu.

Během tisku přemostění bylo pozorováno větší propadání vláken u trysek s kratšími kanály. Toto pozorování bylo následně potvrzeno i rozměrovými kontrolami. Zjištěné skutečnosti korespondují s výstupy rozměrových a mikroskopických kontrol samostatných vláken. Zdeformované vlákno má menší pevnost a během tažení za tryskou během tisku přemostění se více prodlužuje, čímž vzniká větší propad profilu výtisku.

Měření teploty bylo doplňkovým testem s cílem poskytnout orientační přehled o průběhu namáhání motoru extruderu během tisku. Naměřené rozdíly v průběhu teplot u ABS a PLA mají pravděpodobně původ v rozdílných reologických vlastnostech těchto materiálů. Zjišťování vytižení motoru prostřednictvím měření spotřeby elektrické energie napájecím zdrojem zařízení za čas tisku by nepřineslo použitelné výsledky vzhledem k nízkému podílu motoru na její velikosti. Měření proudu napájecího motor by vzhledem k jeho kolísání nebylo možné provádět manuálně, vyžadovalo by automatizované zpracování dat. Další možností by bylo měřit přímo přenášený moment, to by však vyžadovalo speciální zařízení, nezbytnou úpravu vozíku nesoucího motor extruderu a rovněž automatizované zpracování dat. Zjištěné rozdíly v průběhu teplot u ABS a PLA mají pravděpodobně původ v rozdílných reologických vlastnostech těchto materiálů.

Pro případné navázání na tento experiment lze do budoucna doporučit tyto body:

- mikroskopické pozorování vláken výtisku v podélném směru (pouze vnější povrch, bez provedení řezu),
- u řezu vzorkem z materiálu PLA upravit teplotu, případně hustotu výplně tak, aby nedošlo ke slití a bylo možno provést pozorování,
- u řezu vzorkem materiálu ABS nastává skoková změna ve vzhledu vláken mezi tryskami s poměrem délky kanálu k šířce 1:1 a 1:2. Bylo by tedy vhodné se blíže zaměřit na tento rozsah,
- provést destruktivní defektoskopické zkoušky vzorků vytištěných různými tryskami,
- pro zjištění zda u trysek s delším kanálem nedochází k prokluzu zubatice extruderu by bylo možné vytisknout objemnější vzorky a provést porovnání jejich hmotnosti,
- provést tento experiment s jinými materiály a porovnat výsledky,
- provést tento experiment s různými barevnými variantami téhož materiálu,
- otestovat trysky s delšími kanály
- experiment provádět v uzavřeném zařízení,
- provést nezávislé ověření jakosti používaných materiálů.

5 ZÁVĚR

V rámci tohoto textu bylo zpracováno téma vlivu kanálu trysky na parametry tisku metodou FDM, respektive FFF. Teoretická část práce krátce pojednává o technologickém zařazení předmětné metody, dále se zabývá jejím bližším popisem, přibližuje konstrukci tiskových zařízení a jejich komponent. Jako skutečnosti, z nichž se vychází při návrhu experimentu zde byly představeny nastavitelné parametry, možnosti metody, typické vlastnosti výrobků a jejich případná omezení.

Byla zpracována rešerše, jejímž obsahem je stručný vhled do problematiky polymerních materiálů a vyjmenovány nejčastěji používané druhy i s jejich typickými vlastnostmi. Informace byly předloženy tak, aby na jejich základě bylo možno provést posouzení charakteristik materiálů, jejich srovnání a výběr vhodných reprezentantů pro provádění experimentu.

Vycházející z informací uvedených v teoretické části byl poté navržen experiment, zaměřený na pozorování různých projevů rozdílných délek kanálů. Skládá se z kontroly jednotlivých vláken a z výroby objektů reprezentujících různé charakteristiky výtisků. Pro jeho provádění byly vybrány materiály ABS a PLA.

V následující kapitole jsou pak zdokumentovány výstupy z jednotlivých fází provedeného experimentu, které lze ve stručnosti shrnout takto:

- rozměrová kontrola vláken: materiál ABS – vliv délky kanálu prokázán; materiál PLA – vliv délky kanálu prokázán částečně,
- mikroskopická kontrola vláken: materiál ABS – vliv délky kanálu prokázán; materiál PLA – vliv délky kanálu prokázán,
- řez vytištěným objektem: materiál ABS – vliv délky kanálu prokázán částečně; materiál PLA – vliv délky kanálu nebylo možno prokázat,
- kontrola vzorků reprezentujících převis: materiál ABS - vliv délky kanálu nebyl prokázán; materiál PLA - vliv délky kanálu nebyl prokázán,
- kontrola vzorků reprezentujících přemostění: materiál ABS – vliv délky kanálu prokázán; materiál PLA – vliv délky kanálu prokázán,
- měření ohřevu motoru extruderu během tisku: materiál ABS – vliv délky kanálu prokázán; materiál PLA – vliv délky kanálu nebyl prokázán.
- Navazující kapitola pak vyhodnocuje průběh experimentu a komentuje jeho jednotlivé části. Je zde rovněž zdůvodněno použití konkrétních přístupů k návrhům vzorků a jejich kontrolám. Na jejím konci jsou předložena různá doporučení pro budoucí pokračování experimentu tohoto typu.

Z provedených zkoušek vyplývá, že se délka kanálu na parametrech tisku a na vlastnostech jeho produktů částečně projevuje. Nicméně je nutno vzít v úvahu skutečnost, že např. vzorky přemostění, kde je tento projev nejmarkantnější, byly úmyslně navrženy technologicky nevhodně, tedy tak, aby se případné vady vláken mohly projevit co nejvýrazněji. Mnohem větší vliv než má poměr délky kanálu k jeho šířce má nastavení teploty tisku, správné seřízení stroje, vlastnosti materiálu a jeho jakost. Při dodržení

technologických zásad konstrukce modelu se z hlediska dodržení jeho geometrie není třeba tímto parametrem u testovaných materiálů zabývat.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. PÍŠKA, Miroslav a kol. *Speciální technologie obrábění*. Brno: CERM, 2009. 246 s. ISBN 978-80-214-4025-8.
2. CHUA, Chee Kai, Kah Fai LEONG a Chu-Sing LIM. *Rapid Prototyping: Principles and Applications*. 3. vyd. Singapore: World Scientific Publishing Co., 2010. 512 s. ISBN 978-981-277-897-0
3. SEKERKA, V. *Výroba dílů technologií DMLS a jejich porovnání s jinými konvenčními technologiemi z hlediska ekonomické náročnosti*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 65 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Josef Sedlák, Ph.D
4. VAROTSIS, Alkaios Bournias. Introduction to Binder Jetting 3D printing. *3dhubs.com* [online]. 2018 [cit. 2018-04-03]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-binder-jetting-3d-printing>
5. HORVATH, Joan C. *Mastering 3D printing* [online]. Berkeley, California: Apress, 2014 [cit. 2018-04-04]. Technology in action series. ISBN 978-1-4842-0025-4
6. LHOTKA, Ladislav. Obecná veřejná licence GNU. *Zpravodaj ÚVT MU* [online]. 2005, XV(5), 16-20 [cit. 2018-04-18]. ISSN ISSN 1212-0901. Dostupné z: <http://webserver.ics.muni.cz/bulletin/articles/336.html#lit1>
7. BĚLÍČEK, D. *Řízení krokového motoru mikrokontrolérem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 66s. Vedoucí diplomové práce Ing. Ladislav Káňa.
8. Arduino Mega Pololu Shield. *Reprap.org* [online]. 13 April 2017 [cit. 2018-04-07]. Dostupné z: http://reprap.org/wiki/Arduino_Mega_Pololu_Shield
9. What is the influence of infill %, layer height and infill pattern on my 3D prints?. *My3dmatter* [online]. 2015, 10.03.2015 [cit. 2018-04-04]. Dostupné z: <http://my3dmatter.com/what-is-the-influence-of-color-printing-speed-extrusion-temperature-and-ageing-on-my-3d-prints/>
10. CHAIN, Perry. Supports in 3D Printing: A technology overview. *3dhubs* [online]. 2018 [cit. 2018-04-04]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/supports-3d-printing-technology-overview#fdm>
11. HUDSON, Ben. How to design parts for FDM 3D Printing. *3dhubs* [online]. 2018 [cit. 2018-04-04]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/how-design-parts-fdm-3d-printing>
12. HODGSON, Gary, Alessandro RANELLUCCI a Jeff Moe MOE. *Speed. Slic3r Manual* [online]. Aleph Objects [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: <http://manual.slic3r.org/expert-mode/speed>

13. HODGSON, Gary, Alessandro RANELLUCCI a Jeff Moe MOE. Infill Patterns and Density. *Slic3r Manual* [online]. Aleph Objects [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: <http://manual.slic3r.org/expert-mode/infill>
14. HODGSON, Gary, Alessandro RANELLUCCI a Jeff Moe MOE. Fighting Ooze. *Slic3r Manual* [online]. Aleph Objects [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: <http://manual.slic3r.org/expert-mode/fighting-ooze>
15. HODGSON, Gary, Alessandro RANELLUCCI a Jeff Moe MOE. Cooling. *Slic3r Manual* [online]. Aleph Objects [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: <http://manual.slic3r.org/expert-mode/cooling>
16. SAUNDERS, Sarah. 3D Print Abrasive Materials More Quickly: 3DVerkstan Releases New Sizes and Geometries for Olsson Ruby Nozzle. 3dprint.com [online]. 2017, Jul 17, 2017 [cit. 2018-04-04]. Dostupné z: <https://3dprint.com/181232/olsson-ruby-nozzle-sizes/>
17. O'NEAL, Bridget Butler. 'The Diamond Hotend,' for Multi-color & Multi-material 3D Printing, Offered by Denmark's RepRap.me. 3dprint.com [online]. 2015, Apr 2, 2015 [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: <https://3dprint.com/55323/kickstarter-diamond-hotend/>
18. MACHEK, Václav a Jaromír SODOMKA. *Nauka o materiálu*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2008. ISBN 978-80-01-03927-4.
19. DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-708-0617-6.
20. KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005. ISBN 80-708-0568-4.
21. BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. Svitavy: publi.cz, 2016 [cit. 2018-04-18]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Impresum.html>
22. AKLONIS, J. J. Mechanical properties of polymers. *Journal of Chemical Education*. 1981, **58**(11), 892 - 893. DOI: 10.1021/ed058p892.
23. PROKOPOVÁ, Irena. *Makromolekulární chemie*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2007. ISBN 978-80-7080-662-3.
24. LEDNICKÝ, František. *Mikroskopie a morfologie polymerů*. V Liberci: Technická univerzita, 2009. ISBN 978-80-7372-487-0.
25. Understanding Rheology of Thermoplastic Polymers. *TA Instruments* [online]. 2004 [cit. 2018-04-11]. Dostupné z: http://www.tainstruments.com/pdf/literature/AAN013_V_1_U_Thermoplast.pdf
26. WRIGHT, Jarret. The Value of Melt Flow Index Testing. Polymersolutions.com [online]. July 24, 2015 [cit. 2018-04-11]. Dostupné z: <https://www.polymersolutions.com/blog/the-value-of-melt-flow-index-testing/>

27. Melt Flow Index. *Polymerdatabase.com* [online]. 2015 [cit. 2018-04-11]. Dostupné z: <http://polymerdatabase.com/polymer%20physics/Melt%20Flow.html>
28. WEISS, Viktorie a Elena STRĚHAVKOVÁ. *Polymery*. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně, Fakulta výrobních technologií a managementu, 2014. ISBN 978-80-7414-738-8.
29. Datasheet ABS Extrafill. *Fillamentum.com* [online]. Hulín, 2018 [cit. 2018-04-18]. Dostupné z: https://www.dropbox.com/s/pb9kxtuj8ei2t8y/datasheet_abs_extrafill.pdf?dl=0
30. Technický datový list - Nylon. *Ultimaker.com* [online]. Geldermalsen, 2018, 16/05/2017 [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: <https://ultimaker.com/download/67538/TDS%20Nylon%20v3.011-cze.pdf>
31. Polycarbonate Technical Data Sheet. *Rigid.ink* [online]. Wetherby [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: https://cdn.shopify.com/s/files/1/0714/6487/files/rigid.ink_Polycarbonate.pdf
32. Technical Data Sheet PETG Filament. *Airwolf 3D* [online]. Fountain Valley, 2018, March 21, 2017 [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: <https://airwolf3d.com/wp-content/uploads/2018/03/3D-Printer-Filament-Technical-Specifications-Data-Sheet-PETG-FILAMENT-V.1.200.pdf>
33. Everything You Need To Know About Polylactic Acid (PLA). *Creativemechanisms.com* [online]. Warminster, 2016 [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: <https://www.creativemechanisms.com/blog/learn-about-poly-lactic-acid-pla-prototypes>
34. Datasheet PLA Extrafill. *Fillamentum.com* [online]. Hulín, 2018 [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: https://www.dropbox.com/s/vhw2gtb3tyj145a/datasheet_pla_extrafill.pdf?dl=0
35. TECHNICAL DATA SHEET FOR PRODUCT: PMMA FILAMENT. *Filament-pm.cz* [online]. Chudobín, 2018 [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: <https://www.filament-pm.cz/stranka/downloadFile/61/technicke-listy-produktu-15>
36. Technický datový list – PP. *Ultimaker.com* [online]. Geldermalsen, 2018, 16/05/201 [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: <https://ultimaker.com/download/67830/TDS%20PP%20v1.006-cze.pdf>
37. PERNIKÁŘ, Jiří a Miroslav TYKAL. *Strojírenská metrologie II*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-3338-8.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Popis
ABS	Akrylonitril Butadien Styren
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
DLP	Digital Light Processing
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
FDM	Fused Modeling Deposition
FFF	Fused Filament fabrication
GPL	General Public Licence
LOM	Laminated Object Manufacturing
MFI	Melt Flow Index
MFR	Melt Flow-mass Rate
MVR	Melt Volume Rate
MJM	Multi Jet Modeling
PC	Polykarbonát
PEEK	Polyetereterketon
PET	Polyethylentereftalát
PETG	Polyethylentereftalát-Glykol
PLA	Polylactic Acid
PMMA	Polymetylakrylát
PP	Polypropylen
RepRap	Replicating Rapid Prototyper
SLA	Stereolitography
SLS	Selective Laser Sintering
X, Y, Z	Označení os v kartézském souřadném systému
XY	Označení roviny v kartézském souřadném systému

Symbol	Jednotka	Popis
E	[MPa]	Modul pružnosti
M	[g · mol ⁻¹]	Molární hmotnost polymeru
M_o	[g · mol ⁻¹]	Molární hmotnost strukturní jednotky
M_r	[-]	Relativní molekulová hmotnost
T_f	[°C]	Teplota tečení
T_g	[°C]	Teplota skelného přechodu
T_m	[°C]	Teplota tavení
N	[-]	Polymerační stupeň
U	[mm]	Rozšířená nejistota měření
c_j	[-]	Koeficient citlivosti
i	[-]	Index měření
k	[-]	Koeficient rozšíření
n	[-]	Počet měření
s(\bar{x})	[mm]	Výběrová směrodatná odchylka
u_A	[mm]	Standardní nejistota typu A
u_B	[mm]	Standardní nejistota typu B
u_C	[mm]	Kombinovaná standardní nejistota
u_{ZJ}	[mm]	Nejistoty přisívající k standardní nejistotě typu B
\bar{x}	[mm]	Aritmetický průměr
x_i	[mm]	Hodnota z i-tého měření
ΔZ_{MAXj}	[mm]	Rozsah odchylek od jmenovité hodnoty
χ	[mm]	Koeficient určující typ příslušného rozdělení

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Nastavení parametrů v programu Slic3r – materiál ABS
Příloha 2 Nastavení parametrů v programu Slic3r – materiál PLA
Příloha 3 Tabulka teplot motoru extruderu.

PŘÍLOHA 1

Fill density:	30% ▾ %
Fill pattern:	Honeycomb ▾
Top/bottom fill pattern:	Rectilinear ▾

Reducing printing time	
Combine infill every:	1 ▾ layers
Only infill where needed:	<input type="checkbox"/>

Advanced	
Solid infill every:	0 ▾ layers
Fill angle:	45 ▾ °
Solid infill threshold area:	70 mm ²
Only retract when crossing perimeters:	<input checked="" type="checkbox"/>
Infill before perimeters:	<input type="checkbox"/>
Skirt	
Loops (minimum):	1 ▾
Distance from object:	4 mm
Skirt height:	1 ▾ layers
Minimum extrusion length:	0 mm

Brim	
Brim width:	0 mm

Size	
Nozzle diameter:	0.4 mm

Position (for multi-extruder printers)	
Extruder offset:	x: 0 y: 0 mm

Retraction	
Length:	2 mm (zero to disable)
Lift Z:	0 mm
Speed:	40 mm/s
Extra length on restart:	0 mm
Minimum travel after retraction:	2 mm
Retract on layer change:	<input type="checkbox"/>
Wipe while retracting:	<input type="checkbox"/>

Retraction when tool is disabled (advanced settings for multi-extruder setups)	
Length:	10 mm (zero to disable)
Extra length on restart:	0 mm

Support material	
Generate support material:	<input type="checkbox"/>
Overhang threshold:	0 *
Enforce support for the first:	0 layers

Raft	
Raft layers:	0 layers

Options for support material and raft	
Contact Z distance:	0.2 (detachable) mm
Pattern:	pillars ▾
Pattern spacing:	2.5 mm
Pattern angle:	0 *
Interface layers:	3 layers
Interface pattern spacing:	0 mm
Don't support bridges:	<input checked="" type="checkbox"/>

Perimeters:	60 mm/s
Small perimeters:	15 mm/s or %
External perimeters:	50% mm/s or %
Infill:	80 mm/s
Solid infill:	20 mm/s or %
Top solid infill:	15 mm/s or %
Support material:	60 mm/s
Support material interface:	100% mm/s or %
Bridges:	60 mm/s
Gap fill:	20 mm/s

Speed for non-print moves	
Travel:	130 mm/s

Modifiers	
First layer speed:	25 mm/s or %

Acceleration control (advanced)	
Perimeters:	0 mm/s ²
Infill:	0 mm/s ²
Bridge:	0 mm/s ²
First layer:	0 mm/s ²
Default:	0 mm/s ²

Autospeed (advanced)	
Max print speed:	80 mm/s
Max volumetric speed:	0 mm ³ /s

PŘÍLOHA 1

Enable

Keep fan always on:

Enable auto cooling:

If estimated layer time is below ~5s, fan will run at 80% and print speed will be reduced so that no less than 5s are spent on that layer (however, speed will never be reduced below 10mm/s).
If estimated layer time is greater, but still below ~60s, fan will run at a proportionally decreasing speed between 80% and 35%.
During the other layers, fan will be turned off.

Fan settings:

Fan speed: Min: 35 %Max: 80 %

Bridges fan speed: 100 %

Disable fan for the first: 3 layers


Cooling thresholds

Enable fan if layer print time is below: 60 approximate seconds

Slow down if layer print time is below: 5 approximate seconds

Min print speed: 10 mm/s

Filament

Color: 

Diameter: 1.75 mm

Extrusion multiplier: 1

Temperature (°C)

Extruder: First layer: 230 Other layers: 230

Bed: First layer: 105 Other layers: 105

Size

Nozzle diameter: 0.4 mm

Position (for multi-extruder printers)

Extruder offset: x: 0 y: 0 mm

Retraction

Length: 2 mm (zero to disable)

Lift Z: 0 mm

Speed: 40 mm/s

Extra length on restart: 0 mm

Minimum travel after retraction: 2 mm

Retract on layer change:

Wipe while retracting:

Retraction when tool is disabled (advanced settings for multi-extruder setups)

Length: 10 mm (zero to disable)

Extra length on restart: 0 mm

PŘÍLOHA 2

Fill density: 30% %
Fill pattern: Honeycomb
Top/bottom fill pattern: Rectilinear

Reducing printing time

Combine infill every: 1 layers
Only infill where needed:

Advanced

Solid infill every: 0 layers
Fill angle: 45 °
Solid infill threshold area: 70 mm²
Only retract when crossing perimeters:
Infill before perimeters:

Skirt

Loops (minimum): 1
Distance from object: 4 mm
Skirt height: 1 layers
Minimum extrusion length: 0 mm

Brim

Brim width: 0 mm

Size

Nozzle diameter: 0.4 mm

Position (for multi-extruder printers)

Extruder offset: x: 0 y: 0 mm

Retraction

Length: 2 mm (zero to disable)
Lift Z: 0 mm
Speed: 40 mm/s
Extra length on restart: 0 mm
Minimum travel after retraction: 2 mm
Retract on layer change:
Wipe while retracting:

Retraction when tool is disabled (advanced settings for multi-extruder setups)

Length: 10 mm (zero to disable)
Extra length on restart: 0 mm

Support material

Generate support material:
Overhang threshold: 0 layers
Enforce support for the first: 0 layers

Raft

Raft layers: 0 layers

Options for support material and raft

Contact Z distance: 0.2 (detachable) mm
Pattern: pillars
Pattern spacing: 2.5 mm
Pattern angle: 0 °
Interface layers: 3 layers
Interface pattern spacing: 0 mm
Don't support bridges:

Perimeters: 60 mm/s
Small perimeters: 15 mm/s
External perimeters: 50% mm/s
Infill: 80 mm/s
Solid infill: 20 mm/s
Top solid infill: 15 mm/s
Support material: 60 mm/s
Support material interface: 100% mm/s
Bridges: 60 mm/s
Gap fill: 20 mm/s

Speed for non-print moves

Travel: 130 mm/s

Modifiers

First layer speed: 25 mm/s

Acceleration control (advanced)

Perimeters: 0 mm/s²
Infill: 0 mm/s²
Bridge: 0 mm/s²
First layer: 0 mm/s²
Default: 0 mm/s²

Autospeed (advanced)

Max print speed: 80 mm/s
Max volumetric speed: 0 mm³/s

PŘÍLOHA 2

Enable

Keep fan always on:
Enable auto cooling:

If estimated layer time is below ~5s, fan will run at 80% and print speed will be reduced so that no less than 5s are spent on that layer (however, speed will never be reduced below 10mm/s).
If estimated layer time is greater, but still below ~60s, fan will run at a proportionally decreasing speed between 80% and 35%.
During the other layers, fan will be turned off.

Fan settings

Fan speed: Min: 35 % Max: 80 %
Bridges fan speed: 100 %
Disable fan for the first: 3 layers

Cooling thresholds

Enable fan if layer print time is below: 60 approximate seconds
Slow down if layer print time is below: 5 approximate seconds
Min print speed: 10 mm/s

Filament

Color: 
Diameter: 1.75 mm
Extrusion multiplier: 1

Temperature (°C)

Extruder: First layer: 200 Other layers: 200
Bed: First layer: 50 Other layers: 50

Size

Nozzle diameter: 0.4 mm

Position (for multi-extruder printers)

Extruder offset: x: 0 y: 0 mm

Retraction

Length: 2 mm (zero to disable)
Lift Z: 0 mm
Speed: 40 mm/s
Extra length on restart: 0 mm
Minimum travel after retraction: 2 mm
Retract on layer change:
Wipe while retracting:

Retraction when tool is disabled (advanced settings for multi-extruder setups)

Length: 10 mm (zero to disable)
Extra length on restart: 0 mm

PŘÍLOHA 3

Tabulka na měřených teplot během tisku různými tryskami.

Čas [min]	Naměřené teploty motoru [°C].							
	ABS				PLA			
	Tryska č. 1	Tryska č. 2	Tryska č. 3	Tryska č. 4	Tryska č. 1	Tryska č. 2	Tryska č. 3	Tryska č. 4
0	22,8	22,4	22,6	22,3	23,1	23,0	22,9	23,0
2	24,9	23,9	24,2	22,6	25,4	25,5	23,7	24,4
4	27,1	25,4	25,6	25,0	27,0	26,8	24,9	24,8
6	28,5	27,9	26,9	26,1	29,1	28,0	26,5	26,5
8	29,8	28,9	28,3	28,2	29,8	29,9	27,6	28,0
10	31,2	30,3	30,2	29,9	30,7	30,8	28,4	29,2
12	35,0	33,6	30,9	30,9	32,5	32,2	31,3	30,3
14	36,5	34,4	31,9	31,9	36,0	36,5	33,9	34,3
16	38,8	36,1	34,0	32,9	37,4	36,3	34,7	34,4
18	40,9	37,6	35,0	34,4	38,4	37,8	36,5	36,0
20	43,5	40,2	38,5	37,7	38,5	38,0	37,1	37,1
22	44,5	41,2	38,9	38,2	39,5	38,8	37,2	36,8
24	45,7	43,0	40,8	39,8	39,6	39,1	38,3	37,7
26	47,3	44,0	42,1	40,2	40,6	39,7	39,4	40,0
28	47,7	43,1	41,1	39,8	41,2	40,7	39,1	38,6
30	48,2	45,7	43,6	40,9	41,4	40,9	39,6	39,1
32	48,6	43,9	40,0	39,0	42,0	42,0	40,4	39,9
34	47,4	44,4	41,1	39,1	42,2	42,4	41,0	41,3
36	49,4	47,0	42,4	40,9	42,5	42,2	40,9	41,0
38	50,0	48,0	44,2	42,4	43,1	42,4	41,7	41,0
40	50,9	47,2	44,8	42,0	43,4	42,9	42,2	42,0
42	51,0	49,3	45,6	42,6	44,5	44,1	44,1	43,9
44	50,5	48,6	46,6	43,4	44,7	44,4	44,3	43,7
46	50,8	49,8	45,4	42,7	44,3	43,2	43,0	42,9
48	51,1	49,4	47,7	45,8	45,8	44,6	44,0	43,7
50	52,1	49,6	48,1	47,0	44,4	44,2	44,7	44,1
52	52,0	50,2	45,1	45,3	45,9	44,1	44,1	43,8
54	51,7	50,1	47,7	46,1	45,3	44,5	44,0	43,9
56	51,0	48,9	45,4	44,2	44,4	43,9	43,6	43,0
58	50,8	50,3	47,4	44,4	45,7	44,0	45,6	44,5
60	52,1	49,6	47,3	45,0	45,3	44,4	45,1	43,9
62	50,8	48,9	47,2	46,2	44,8	43,6	42,9	42,3
64	52,5	51,4	49,5	47,7	46,8	45,9	45,4	44,9