



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

3D FDM TISKÁRNA REBEL II A PARAMETRY TISKU

3D FDM PRINTER REBEL II AND PARAMETERS OF PRINT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Patrik Pištek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Patrik Pištek**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojírenského inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.**
Akademický rok: 2015/16

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

3D FDM tiskárna Rebel II a parametry tisku

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Součástí práce je přestavba 3d tiskárny na model Rebel II, její následné oživení a testy. Autor zvolí vhodné méně často využívané materiály pro tisk, na základě jejich charakteristik a provede testy směřující k volbě vhodných technologických podmínek. Výsledkem práce budou doporučené technologické podmínky pro 3D tisk pro zvolený materiál a typ 3D tiskárny.

Cíle bakalářské práce:

- řešerše zvolené problematiky
- přestavba 3D tiskárny
- volba materiálů
- volba testovaných technologických parametrů
- vyhodnocení a doporučení autora

Seznam literatury:

GEBHARDT, Andreas. Understanding additive manufacturing: rapid prototyping - rapid tooling - rapid manufacturing. Munich: Hanser, c2012, ix, 164 s. ISBN 978-1-56990-507-4.

FOŘT, Petr a Jaroslav 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, C.K., K.F. LEONG a C.S. LIM. Rapid Prototyping: Principles and Applications. 3. vyd. Singapore: World Scientific Publishing Co., 2010, 512 s. ISBN 978-981-277-897-0.

SLOTA, Ján, Martin MANTIČ a Ivan GAJDOŠ. Rapid Prototyping a Reverse Engineering v strojárstve.
Vyd. 1. Košice: Strojnícka fakulta, Technická univerzita v Košiciach, 2010, 207 s. ISBN
978-80-553-0548-6.

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

V Brně, dne 27. 11. 2015



prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Práca sa zaoberá problematikou 3d tlačiarňi typu RepRap. V úvodných kapitolách je uvedená prestavba, dôvody prestavby a základné komponenty 3d tlačiarne. Nasleduje voľba menej používaných materiálov PETG a nylon. V samostatných kapitolách sú zhrnuté rešerše experimentálnych štúdií a typov používaných vzoriek v testovaní podobných zariadení. Na základe týchto informácií autor navrhol rozmery a tvary testovaných vzoriek pre druhý experiment, zvolil relevantné testované technologické parametre a navrhol priebeh experimentov. Vyšetrované parametre sú teplota trysky a rýchlosť tlače. Experimentálna časť práce obsahuje dva experimenty. V prvom pokuse boli zhotovené tenkostenné objekty o šírke jedného vlákna. Kvalita povrchu jednotlivých vlákien bola pozorovaná pod mikroskopom. V druhom experimente sú vyhodnotené rozmerové odchýlky zhotovených vzoriek v závislosti od testovaných parametrov. Vzorky boli skenované na kancelárskom 2D skenery a pomocou drsnomeru boli zisťované hodnoty stredných aritmetických hodnôt drsnosti povrchu R_a na bočných a vrchných stenách vzorky. Výsledky a odporúčania autora sú zhrnuté v samostatných kapitolách. Teplota a rýchlosť mali vplyv na kvalitu povrchu vytláčaných vlákien. Vplyv teploty na kvalitu spojenia medzi vláknami bol výrazný. Rýchlosť tlače vo veľkej miere ovplyvňovala rozmerovú presnosť a deformácie jednotlivých geometrických prvkov na vzorke. Vplyv teploty na rozmerovú presnosť bol omnoho menej výrazný. V sekcii diskusia sú vyjadrené určité námety na budúce experimenty. V závere je zhrnutý celý prínos tejto práce.

Kľúčové slová

RepRap, FDM, FFF, Rebel II

ABSTRACT

This work deals with a RepRap 3D printer. The introductory chapter describes rebuilding, the reason of the rebuilding and basic components of a 3D printer. The following is a selection of lesser-used materials PETG and nylon. The individual chapters summarized reviews of experimental studies and the types of samples used in the testing of similar machines. Based on this information the author design size and shape of the sample for the second experiment, chosed relevant technological parameters and proposed plan of the experiments. Investigated parameters are temperature of the nozzle and printing speed. Experimental part of this work includes two experiments. In the first experiment, thin-walled objects by width of a single fiber were printed. The surface quality of the fibers was observed under a microscope. The second experiment evaluated the dimensional variations of the samples in dependence on the aforementioned parameters. Samples were scanned at the office 2D scanner and arithmetic mean of surface roughness R_a was measured by roughness meter on the side and top wall of the samples. The results and recommendations of the author are summarized in separate sections. The temperature and speed affected the quality of the surface of extruded fibers. The effect of temperature on the quality of the bond between the fibers has been significant. Print speed heavily influences the dimensional accuracy and deformation of geometric elements of the sample. The effect of temperature on dimensional accuracy was much less pronounced. In discussion part are expressed some ideas for future experiments. The conclusion summarizes all the gains of this work.

Key words

RepRap, FFF, FDM, Rebel II

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

PIŠTEK, P. *3D FDM tiskárna Rebel II a parametry tisku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 78 s. 12 příloh. Vedoucí bakalářské práce Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som bakalársku prácu na tému **3D FDM tiskárna Rebel II a parametry tisku** vypracoval samostatne s použitím odbornej literatúry a prameňov, uvedených na zozname, ktorý tvorí prílohu tejto práce.

27.5.2016

Patrik Pištek

POĎAKOVANIE

Ďakujem týmto pánovi Ing. Oskarovi Zemčíkovi Ph.D. za cenné rady a pripomienky pri vypracovaní tejto bakalárskej práce. Ďalej by som sa chcel poďakovať pánovi Milanovi Rusiňákovi za jeho čas a ochotu pri meraní drsnosti povrchu vzoriek. Ďakujem aj mojím rodičom, ktorý ma podporovali počas celého štúdia.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PREHLÁSENIE.....	6
POĎAKOVANIE	7
OBSAH.....	8
ÚVOD.....	10
1 REPRAP	11
2 PRESTAVBA 3D TLAČIARNE.....	13
2.1 Dôvody prestavby a porovnanie zariadení.....	13
2.2 Charakteristika zariadenia Rebel II.....	15
3 POUŽITÝ SOFTVÉR PRI TVORBE G KÓDU	18
4 OŽIVENIE A KALIBRÁCIA 3D TLAČIARNE.....	19
4.1 Oživenie tlačiarne	19
4.2 Kalibrácia zariadenia	20
5 VOĽBA MATERIÁLOV	24
5.1 PETG	24
5.2 Nylon	25
6 TESTOVANÉ PARAMETRE.....	28
6.1 Experimentálne štúdie.....	28
6.2 Zhodnotenie a výber testovaných technologických parametrov.....	31
7 SKÚŠOBNÉ MODELY	32
8 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ.....	37
8.1 Testovanie extrudovania materiálu	37
8.1.1 Vyhodnotenie spojenia medzi vláknami.....	38
8.1.2 Pozorovanie vlákien pod mikroskopom pre materiál PETG	39
8.1.3 Pozorovanie vlákien pod mikroskopom pre materiál nylon	40
8.2 Druhý experiment	44
8.2.1 Návrh testovanej vzorky	44
8.2.2 Parametre	47
8.3 Povrch a teplota tlačovej podložky	47
8.4 Meracie zariadenia.....	48
8.4.1 Kancelársky skener	48
8.4.2 Mikroskop.....	48
8.4.3 Drsnomer	48
8.4.4 CAD softvér.....	48

9	VYHODNOTENIE.....	50
9.1	Drsnosť povrchu	50
9.2	Kvádre.....	51
9.3	Tenké steny.....	53
9.4	Valce	55
9.5	Valcové diery	57
9.6	Štvorcové diery	59
9.7	Previsy a naklonené roviny.....	63
9.7.1	Previsy	63
9.7.2	Šikmé plochy	64
9.8	Premostenie.....	65
10	DISKUSIA.....	66
	ZÁVER	68
	ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV	69
	ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK.....	76
	ZOZNAM PRÍLOH.....	78

ÚVOD

Aditívne technológie sú známe už istý čas. Jedna z nich, konkrétne FDM (fused deposition modeling) bola vynájdená pred viac ako 20 rokmi, zakladateľom spoločnosti Stratasys, Scottom Crumpom. Objekty sú zhotovené vrstvu po vrstve nanášaním roztopených termoplastických materiálov. Profesionálne FDM zariadenia boli pomerne cenovo náročné a vlastníť si ich mohli dovoliť len väčšie spoločnosti. Ukončenie patentov umožnilo začatie revolúcie domácej 3d tlače. Netrvalo dlho a vznikli prvé zariadenia, ktoré boli cenovo dostupné aj pre jednotlivcov. Dnes už existuje obrovské množstvo spoločností, ktoré navrhujú, vyrábajú a predávajú takéto stroje. Jeden z najznámejších projektov je RepRap (Replicatin Rapid Prototyper) projekt, ktorý je opísaný podrobnejšie v prvej kapitole. Rozmach amatérskeho domáceho rapid prototypingu (rýchleho prototypovania) umožnil nadšencom z celého sveta slobodne tvoriť nie len dizajnové modely, ale hlavne funkčné a prakticky využiteľné predmety [1,2].

Autora práce zaujal projekt RepRap svojou univerzálnosťou a praktickosťou. Preto sa rozhodol na túto tému písať aj svoju bakalársku prácu.

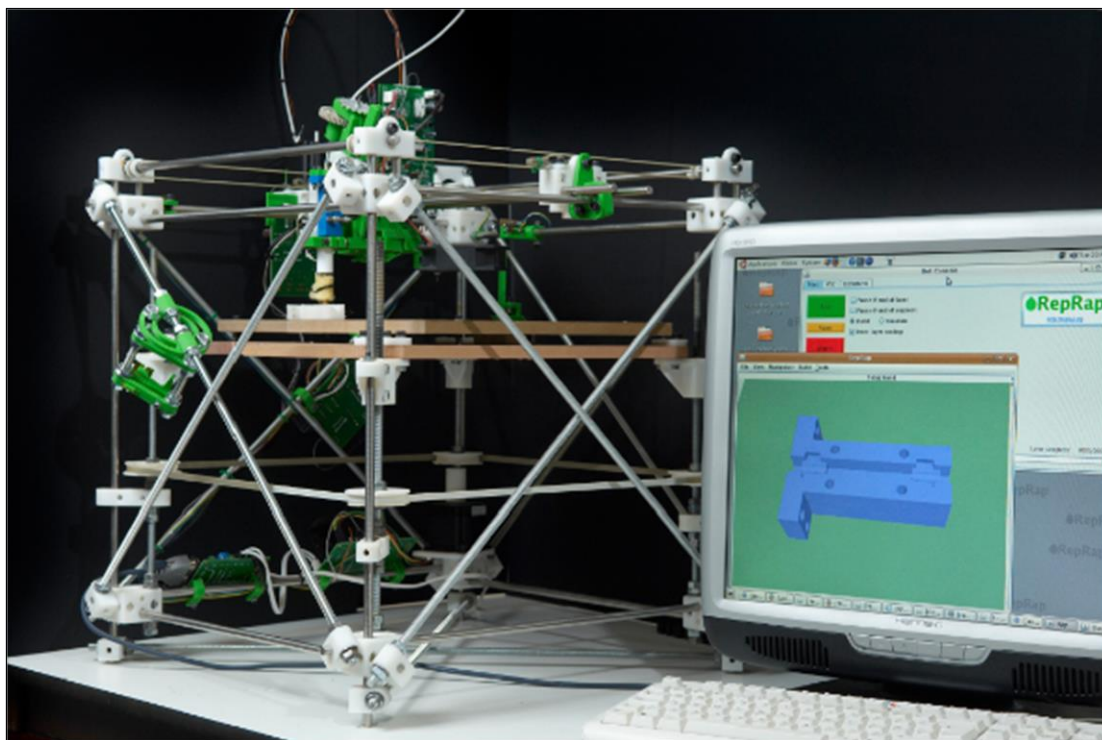
1 REPRAP

RepRap je open-source zariadenie schopné čiastočnej seba replikácie. Za iniciátora celého projektu je považovaný Dr. Adrian Bowyer Univerzita Bath Veľká Británia. RepRap je robot, ktorý technológiou FFF (fused-filament fabrication) vytvára objekty z termoplastických polymérov. Dokáže vytvoriť časť svojich vlastných komponentov. Je snaha, aby ostatné diely boli štandardné, lacné a hlavne široko dostupné [3, 4].

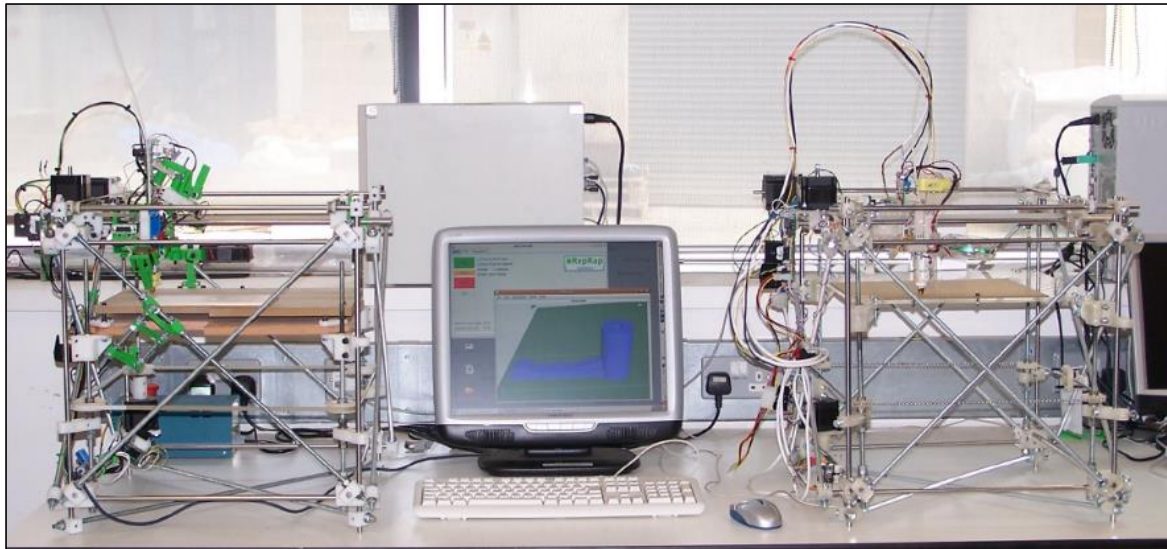
Tvorcovia RepRapu uvádzajú dôvody uprednostnenia technológie rýchleho prototypovania pred CNC frézovaním:

1. K tvorbe objektov sú vyžadované veľmi malé sily v porovnaní s obrábaním.
2. Rapid prototyping je zo všetkých výrobných technológií najjednoduchšie automaticky kontrolovateľná počítačom.
3. V osemdesiatych rokoch 20. storočia NASA zadefinovala pojem „*maximum versatility*“ (maximálna všestrannosť). Rapid prototyping zo všetkých aktuálnych technológií najbližšie vystihuje tento pojem [4].

Z množstva aditívnych technológií tvorcovia vybrali FFF technológiu, ktorej hlavné výhody sú jednoduchosť, cena a veľké množstvo rozličných materiálov. Táto technológia je niekedy označovaná ako FDM (Fused Deposition Modeling). Toto označenie je obchodnou značkou spoločnosti Stratasys Inc. Autori RepRapu vymysleli pomenovanie FFF, ktoré je možné využívať bez obmedzenia [4]. Na obr. 1 je znázornená prvá RepRap tlačiareň a na obr. 2 prvé reprodukované zariadenie.



Obr.1 Prvé RepRap zariadenie Version I „Darwin“, ktoré bolo schopné čiastočnej seba replikácie [4].



Obr. 2 Prvé reprodukované RepRap zariadenie – „rodič“ (vľavo) a „dieťa“ (vpravo) [4]

„Myšlienka evolúcie RepRap zariadení:

CAD dizajnové modely (genotyp) musia byť dostupné s RepRap strojom (fenotyp), aby sa mohol sám replikovať.

- *Ludia vylepšia dizajn.*
- *Niektoré vylepšenia budú spätne uložené na webe.*
- *Staré stroje môžu vynoviť svoj dizajn.*
- *Umelý výber – rýchlosť, jednoduchosť, presnosť, menej pridaných súčiastok.*
- *„Vznik druhov“ rýchla symbiotická selekcia [5].“*

2 PRESTAVBA 3D TLAČIARNE

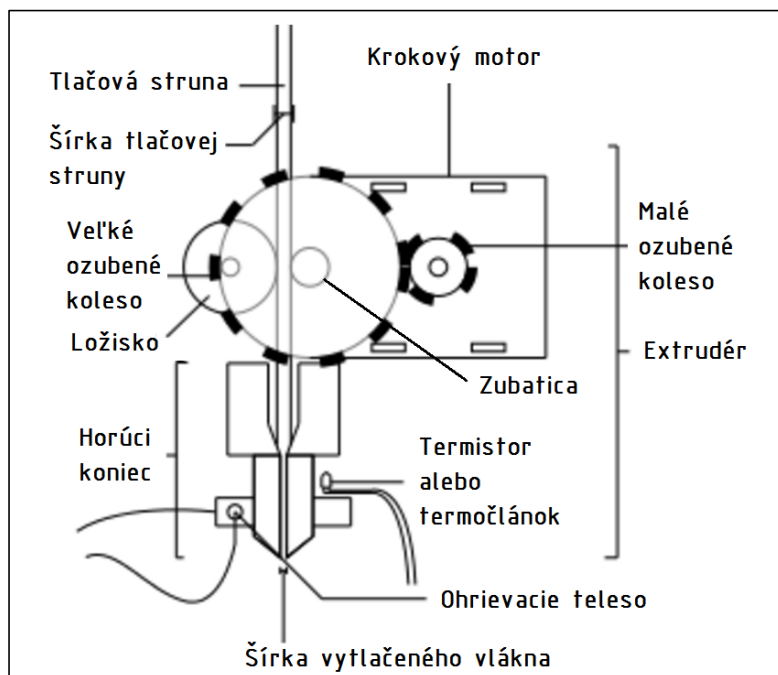
Autor vlastnil 3d tlačiareň HE3D-i3. Ide o typ stroja označovaný ako typ Prusa i3. Jozef Pruša, český vývojár 3d tlačiarní, je tvorcom tohto modelu. Keďže projekt RepRap je typu open-source, vzniklo veľké množstvo alternatívnych výrobcov zariadení podobných originálnej tlačiarňi Prusa i3.

Model HE3D-i3 (vid' obr. 5) bol prerobený na model Rebel II (vid' obr. 6).

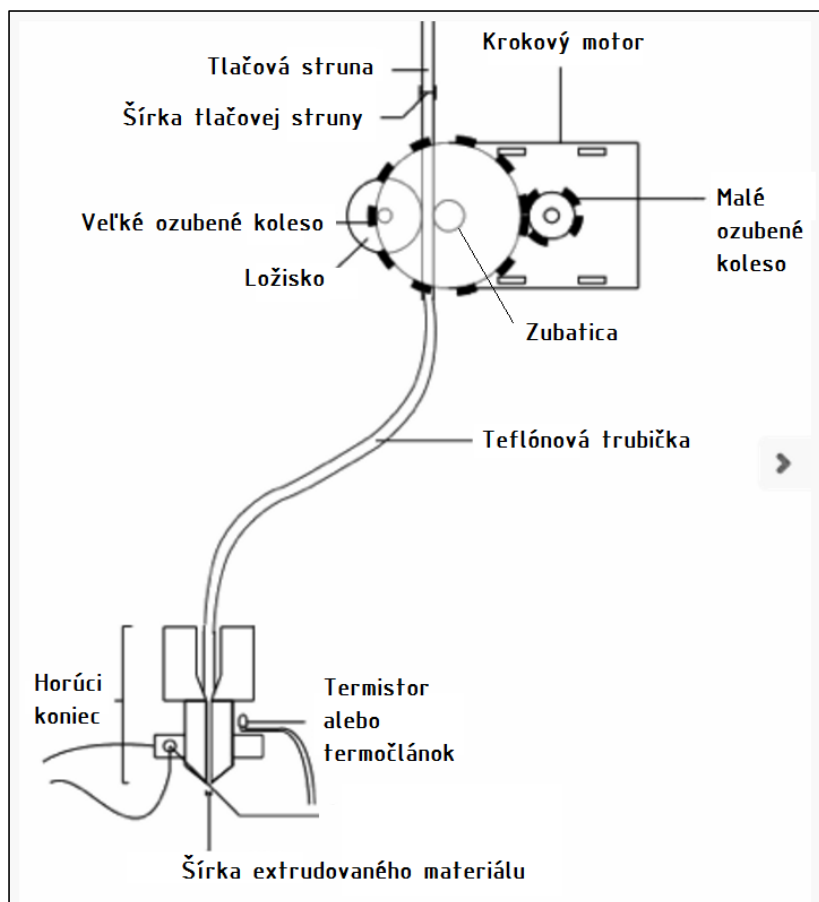
2.1 Dôvody prestavby a porovnanie zariadení

He3d-i3:

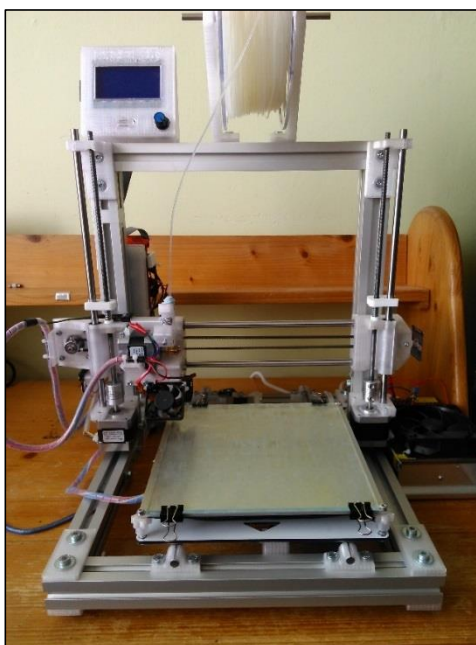
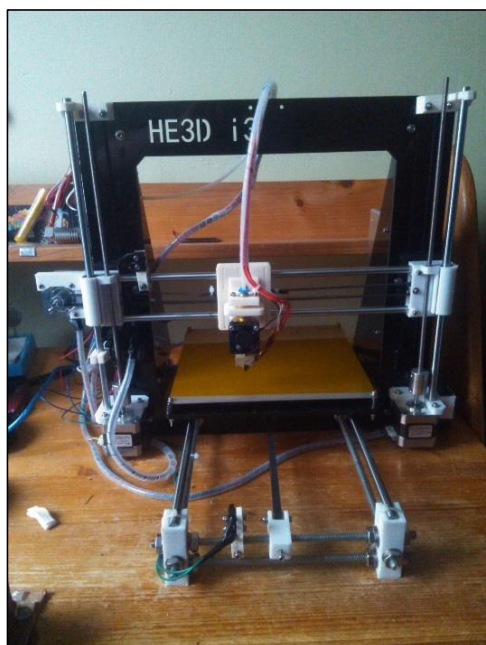
- Nízka tuhosť rámu: rám bol vyrobený z plexiskla o nominálnej hrúbke 5mm. Celková tuhosť zariadenia bola nedostatočná.
- Bowdenový extrudér: tento typ extrudéru má svoje výhody aj nevýhody. Motor s podávacím mechanizmom nie je uložený priamo na pojazde osi x, ale mimo pojazdu na ráme tlačiarne. Výhodou je, že pojazd má nízku hmotnosť, čo znižuje hodnoty zotrvačných síl pôsobiacich na pojazd a pojazdy s bowdenovými extrudérmi sú preto schopné dosiahnuť vyššie tlačové rýchlosti. Tlačová struna je vedená z podávacieho mechanizmu cez teflónovú trubičku až do horúceho konca (hot end), ktorý obsahuje trysku. Práve veľká vzdialenosť medzi podávacím mechanizmom a tryskou má za následok vznik problémov. Nebolo zaručené presné dávkovanie materiálu, pretože prietok tryskou nebol stály a dosiahnutie optimálnych parametrov retrakcie bolo náročné. Pojem retrakcia je podrobne vysvetlený v kapitole 4. Schematické znázornenie extrudéru typu bowden je na obr. 4 a priameho typu na obr. 3.



Obr. 3 Schematické znázornenie priameho extrudéru [6, 7]



Obr. 4 Schematické znázornenie bowdenového extrudéru [7].



Obr. 5, 6 Reprap tlačiareň HE3d-i3 vľavo a Rebel II vpravo.

Rebel II:

Spomínané problémy boli vyriešené zmenou konštrukcie a použitím priameho extrudéra. Preto zariadenie He3d i3 bolo prestavané na Rebel II.

- Rám: je vytvorený z hliníkových profilov. Tuhosť rámu tlačiarne bola zvýšená.
- Priamy extrudér: motor a podávací mechanizmus tlačovej struny je uložený na pojazde osi x. Vzdialenosť medzi podávacím mechanizmom a tryskou je mnohonásobne menšia ako pri riešení pomocou bowdenového extrudéra. Prietok tryskou bol ustálený, zjednodušilo sa nastavenie parametrov retrakcie, čo viedlo k výraznému zlepšeniu kvality tlače.

2.2 Charakteristika zariadenia Rebel II**• Rám**

Je zostavený z hliníkových profilov (viď obr. 7), plastových dielov, uholníkov a spojovacích prvkov [8].



Obr. 7 Sada hliníkových profilov pre Rebel II [9].

• Riadiaca elektronika

Existuje veľké množstvo rozličných typov riadiacej elektroniky používanej v RepRap projektoch [10].

Bola použitá elektronika Arduino Mega 2560 spolu s Ramps 1.4 (RepRap Arduino Pololu Shield).

- Arduino Mega 2560

Stavebnica Arduino je fyzickou open-source platformou, ktorá je založená na jednoduchej mikrokontrolnej doske a vývojárskom prostredí slúžiacom na zápis softvéru. S Arduino môžu byť vyvíjané interaktívne predmety, získavané vstupy z rôznych senzorov alebo ovládané ďalšie zariadenia, ako sú svetlá alebo motory. Projekty postavené pomocou stavebnice Arduino môžu byť samostatné alebo v spojení s počítačom [11].

- Ramps 1.4

Ramps 1.4 je interface medzi Arduinom Mega 2560 a jednotlivými časťami 3d tlačiarne. Do rampsu sú zasunuté ovládače krokových motorov. V tejto práci boli použité ovládače Pololu A4988 [12].

- **Krokové motory**

Krútiaci moment potrebný pre pohyb jednotlivých osí a vytlačanie plastového vlákna je zabezpečený piatimi krokovými motormi s prírubou typu NEMA17. Základné parametre sú zhrnuté v tab. 1.

Krokový motor je špeciálny druh viacpólového synchronného motora. Využíva sa predovšetkým tam, kde je potrebné presne riadiť nie len otáčky, ale aj konkrétnu polohu rotora. Používajú sa v presnej mechanike, regulačnej technike, robotike a pod. Základný princíp krokového motora je – prúd prechádzajúci cievkou statora vytvorí magnetické pole, ktoré pritiahne opačný pól magnetu rotora. Motor je schopný v tejto polohe presne stáť. Vhodnou kombináciou zapojenia cievok vznikne rotujúce krokové magnetické pole, ktoré nielen otáča rotorom, ale zabezpečuje aj jeho presnú polohu voči statoru. Kvôli prechodovým javom je rýchlosť otáčania motora limitovaná. Pri jej prekročení motor začne strácať kroky.[13].

Tab. 1 Základné parametre použitých krokových motorov NEMA17 [14].

Parameter	Jednotka	Hodnota
Prúd vinutia	[A/fáza]	1,7
Odpor vinutia	[Ω /fáza]	1,5
Indukčnosť	[mH]	2,8
Statický moment	[N.cm]	40 min
Zbytkový moment	[N.cm]	2,2 max
Moment zotrvačnosti	[g.cm ²]	50
Priemer výstupného hriadeľa	[mm]	5
Uhol kroku	[°]	1,8
Dĺžka motora	[mm]	40 max

- **Prevody a pohyb osí**

Lineárny pohyb je zabezpečený dvomi spôsobmi. Pomocou remeňov a remeníc v osách x, y a závitovými tyčami v ose z. Existujú rôzne typy remeňov a remeníc používaných v RepRap zariadeniach, ako napr. T5, T2,5, MXL, HDT, GT2, S2M. Originálny Rebel II používa buď T2,5 16 zubovú alebo GT2 20 zubovú verziu remenice (viď tab. 2). V tejto práci sú použité remenice a remene typu GT2 [15].

Tab. 2 Porovnanie parametrov remeníc najčastejšie používaných v zariadení Rebel II [16, 17].

Typ remenice	GT2	T2,5
Počet zubov	20	16
Rozteč medzi zubami [mm]	2	2,5
Vonkajší priemer cez zuby [mm]	12,2	12,05
Celkový priemer [mm]	16	16
Priemer diery [mm]	5	5
Šírka remeňa [mm]	6	6

Pre osu z sú používané závitové tyče M6 alebo M5. Pri M5 variante sú nutné špeciálne matice M5, ktoré majú vonkajšie rozmery totožné s M6. Druhá možnosť je zmeniť rozmery a vytlačiť nové diely. V tejto práci boli použité M6 závitové tyče. Stúpanie je 1 mm na otáčku. Na jeden krok motora pripadá 0,005 mm stúpania, čo je najmenší krok v ose z.

- **Vodiaci systém**

Vodiaci systém pozostával z vodiacich tyčí a lineárnych guľôčkových ložísk. Pôvodné nerezové, nekalené tyče boli vymenené za tyče kalené, brúsené.

- **Extrudér**

Pôvodný bowdenový extrudér bol kompletne vymenený za priamy. Bol použitý celokovový horúci koniec, ktorý vyrába česká spoločnosť OPTIMAL 4 s.r.o (viď obr. 8). Súčasťou podávacieho mechanizmu bola mosadzná zubatica (viď obr. 9) priamo nasunutá na motor.



Obr. 8, 9 Hot end V2.0 pre 3d tlačiarne od spoločnosti OPTIMAL 4 s.r.o. dostupný v eshope 3draty.cz vľavo [18] a mosadzná zubatica vpravo [19].

- **Vyhrievaná podložka**

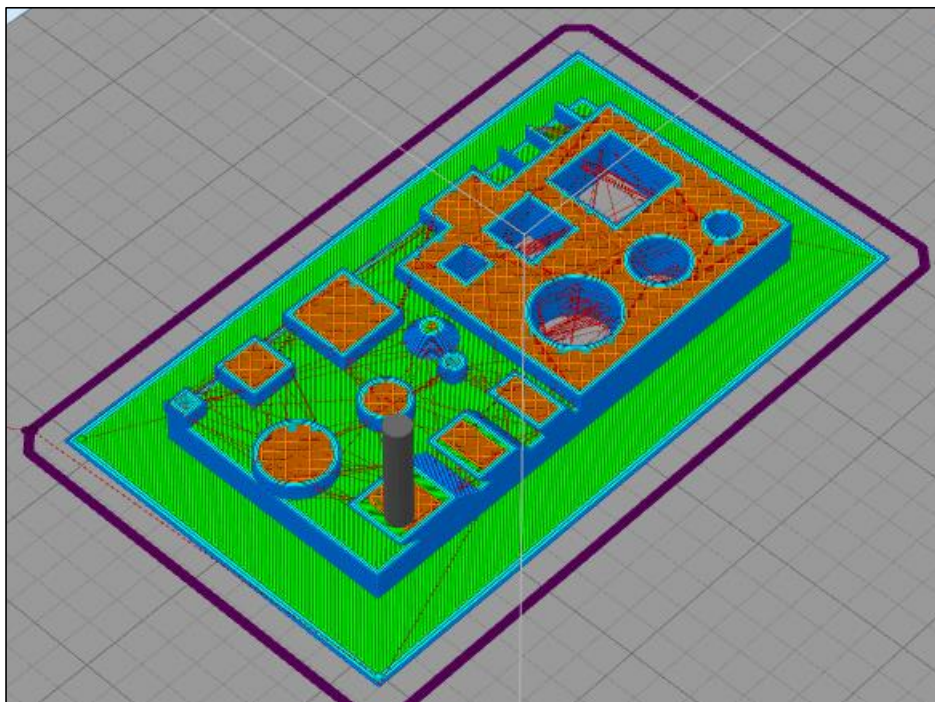
Vyhriatie tlačového povrchu na určitú teplotu umožňuje správne priľnutie tlačeneho objektu k tomuto povrchu. Pre Rebel II bola použitá pôvodná podložka z tlačiarne HE3d-i3. Ide o verziu, ktorá obsahuje 3 mm hrubý hliníkový plech, na ktorého spodnej strane sú pravdepodobne nalepené odporové rezistory (spodná časť je zaizolovaná a nie je preto isté či sú použité odporové rezistory alebo iná varianta). Odpor je 1,5 Ω . Podložka má rozmer 214 mm x 214 mm.

3 POUŽITÝ SOFTVÉR PRI TVORBE G KÓDU

V práci bol použitý komerčný softvér Simplify3d. Softvér umožňuje import, opravu, vytvorenie g-kódu, náhľad a tlač 3d modelov. Tlač je možná priamo cez USB port alebo SD kartu. Tvorcovia tvrdia, že ide o najrýchlejší slicer na trhu. Funkcia chytrých podpor automaticky vytvorí podpory v miestach previsov. Softvér umožňuje pridávať a odoberať podpory aj manuálne. Jedna z najvýznamnejších funkcií softvéru je tlač viacerých objektov súčasne pri nastavení odlišných parametrov pre jednotlivé objekty. Objekty je možné tlačiť kontinuálne vrstvu po vrstve alebo sekvenčne objekt za objektom. Mód umožňujúci náhľad poskytuje kvalitnú vizualizáciu celého procesu pred začiatkom tlače (viď obr. 10). Simplify3d obsahuje funkcie, ktoré dokážu odhadnúť výrobný čas, množstvo spotrebovaného materiálu a cenu materiálu. [20].

Postup práce so softvérom:

- Import a usporiadanie STL modelov.
- Kontrola a prípadná oprava STL modelov.
- Vytvorenie FFF procesu alebo procesov a pridelenie modelov k týmto procesom.
- Vygenerovanie inštrukcií v podobe g kódu a vizualizácia celého procesu pred začatím tlače.
- Začatie tlače priamo cez USB pripojenie počítača s 3d tlačiarňou alebo uloženie kódu na SD kartu. SD karta s inštrukciami sa potom vloží do funkčného panelu obsahujúceho LCD displej a tlač môže byť realizovaná bez priameho pripojenia 3d tlačiarne k počítaču [21].



Obr. 10 Vizualizácia výrobného procesu pred jeho spustením.

4 OŽIVENIE A KALIBRÁCIA 3D TLAČIARNE

4.1 Oživenie tlačiarne

Pre oživenie tlačiarne je nutné nakonfigurovať firmvér. Autor zvolil jeden z najpoužívanejších firmvérov pod označením Marlin. Ako prvé je nutné stiahnuť Marlin firmvér. Firmvér môže byť stiahnutý tu <https://github.com/MarlinFirmware/Marlin>. Ďalej je potrebný softvér Arduino IDE, ktorý je vývojárskym prostredím pre Arduino mikrokontroléry. Softvér Arduino IDE môže byť stiahnutý na nasledovnej adrese <https://www.arduino.cc/en/Main/Software>. Po nainštalovaní softvéru je potrebné zvoliť typ hardvéru. V tomto prípade bola zvolená možnosť *Arduino Mega 2560 or Mega ADK*. V prostredí *Arduino IDE* bol otvorený *Configuration.h* súbor, ktorý sa nachádza v zložke *Marlin* [22].

Pre Rebel II bol použitý už nakonfigurovaný firmvér pre tlačiareň HE3d-i3. V tlačiarňi HE3d-i3 bol prevod sily z motora pre osu z zabezpečený závitovou tyčou so závitom M5. Pre Rebel II bola použitá tyč so závitom M6. Preto musel byť vo firmvéry upravený počet krokov motora na pohyb osi z o 1 mm. Tlačiareň HE3d-i3 využívala remene a remenice typu GT2. Remenica mala počet zubov 16. Pre Rebel II boli použité tak isto remene a remenice typu GT2, ale počet zubov remenice bol 20. Opäť bolo nutné vo firmvéry zmeniť počet krokov motora pre pohyb osí x a y o 1 mm.

Tab. 3 Hodnoty parametrov potrebných pre výpočet počtu krokov motora na 1 mm v jednotlivých osiach [23].

Počet krokov na otáčku	200
Mikrokrok ovládača	16
Rožteč zubov remeňa [mm]	2
Počet zubov remenice	20
Stúpanie závitu M6 [mm]	1

Počet krokov motora na pohyb pojazdu v ose x a y o 1 mm bol vypočítaný pomocou vzťahu (1).

$$\text{počet krokov na 1 mm} = \frac{\text{počet krokov na otáčku} * \text{mikrokrok ovládača}}{\text{rožteč zubov remena} * \text{počet zubov remenice}} \quad [23](1)$$

Výpočet:

$$\text{počet krokov na 1 mm} = \frac{200 * 16}{2 * 20} = 80$$

Počet krokov motora na pohyb pojazdu v ose z o 1 mm bol vypočítaný podľa vzťahu (2).

$$\text{počet krokov na 1 mm} = \frac{\text{počet krokov na otáčku} * \text{mikrokrok ovládača}}{\text{stúpanie závitu}} \quad [23](2)$$

Výpočet:

$$\text{počet krokov na 1 mm} = \frac{200 * 16}{1} = 3200$$

Počet krokov motora na vytlačenie 1 mm tlačovej struny (1mm struny vstupujúcej do trysky) bolo možné určiť pomocou vzťahu (3).

$$\text{počet krokov na 1 mm} = \frac{\text{počet krokov na otáčku} * \text{mikrokrok ovládača}}{\text{efektívny priemer zubatice}} \quad [23](3)$$

Efektívny priemer zubatice nebol známy a preto hodnota počtu krokov motora na 1 mm bola použitá z internetového fóra: 138 [24]. Tab. 4 zhrňuje všetky zmenené parametre.

Tab. 4 zobrazuje parametre, ktorých hodnoty bolo nutné po prestavaní tlačiarne zmeniť [24].

Parameter	Podnota parametru	
	HE3d-i3	Rebel II
Počet krokov motora na pohyb o 1 mm v osách		
Osa x	100	80
Osa y	100	80
Osa z	4000	3200
Osa E	920	138

Nasledujúce kroky:

Uloženie firmvéru do zariadenia:

- Uloženie modifikácií v súbore *Configuration.h*.
- Kompilácia kódu.
- Uplodovanie kompilovaného kódu do Arduina.

Testovanie zariadenia:

- Kontrola pohybu osí.
- Kontrola extrudovania a retrakcie [22].

4.2 Kalibrácia zariadenia

- **Nastavenie prúdu pre krokové motory**

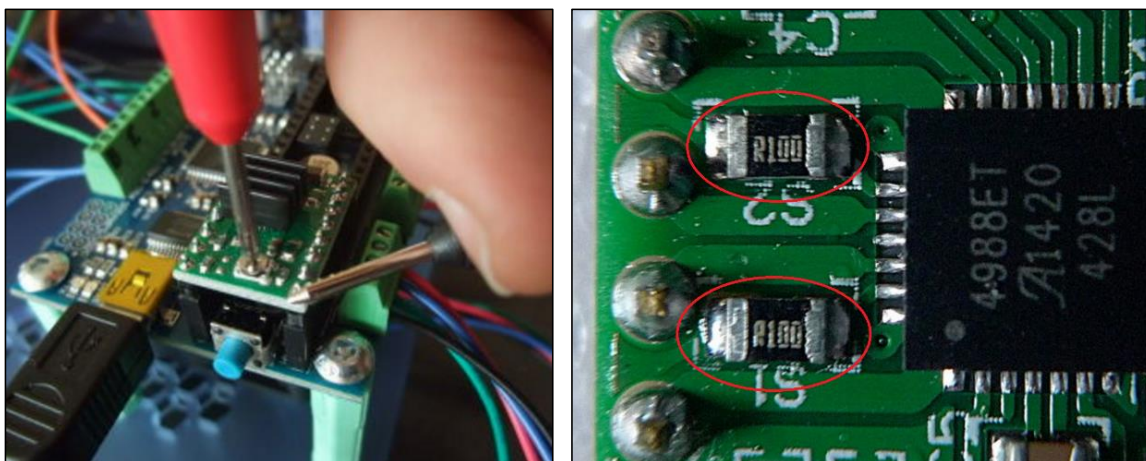
Prúd vstupujúci do krokových motorov bol nastavený pomocou trimrov, ktoré sa nachádzajú na ovládačoch Pololu A4988. Postupným experimentovaním sa osvedčili hodnoty napätí na trimroch:

- osa x = 0,5 V ==> $I_{\max} = 0,625$ A
- osa y = 0,5 V ==> $I_{\max} = 0,625$ A
- osa z = 0,75 V ==> $I_{\max} = 0,9375$ A
- extrudér = 0,7 V ==> $I_{\max} = 0,875$ A

Hodnoty maximálneho prúdu prechádzajúceho jednotlivými motormi boli vypočítané podľa vzťahu (4). Obr. 11 znázorňuje spôsob zisťovania referenčného napätia a obr. 12 ukazuje polohu snímacích rezistorov.

$$I_{\max} = V_{\text{ref}} / (8 * R_s) \quad [25] \quad (4)$$

kde: I_{\max} [A] – maximálny prúd vinutia,
 V_{ref} [V] – referenčné napätie,
 R_s [Ω] – snímací rezistor,
 $R_s = 0,1$ ohm.



Obr. 11, 12 Meranie referenčného napätia multimetrom vľavo [25] a zobrazenie polohy snímacích rezistorov na ovládači typu Pololu A4988 vpravo [26].

- **Nastavenie tlačovej podložky**

Tlačová podložka predstavuje rovinu, ktorá musí byť rovnobežná s osu x. To znamená, že pri pohybe v rovine XY musí byť vzdialenosť medzi špičkou trysky a tlačovou podložkou vo všetkých bodoch tejto roviny do čo najväčšej miery totožná. Pri vynulovaní osi z musí byť táto vzdialenosť presne špecifikovaná. Pomocou kancelárskeho papiera o hrúbke 0,1 mm bola nastavená optimálna vzdialenosť medzi špičkou trysky a podložkou postupne vo všetkých rohoch a uprostred podložky pri konkrétnej teplote podložky a teplote trysky. Pri prechode trysky cez papier musí byť citeľný mierny odpor. Hodnota tejto vzdialenosti bola neskôr zadefinovaná v softvéri Simplify3d. Pre každé hodnoty teplôt podložky a trysky bolo nutné nastaviť spomínanú výšku pomocou kancelárskeho papiera zvlášť. Rebel II obsahuje nastaviteľný držiak koncového vypínača v ose z, ktorý tento úkon urýchľuje a zjednodušuje [27].

- **Kalibrácia prietoku materiálu**

Jeden zo základných parametrov je súčiniteľ prietoku, ktorý môže byť definovaný ako percentuálne vyjadrenie počtu otáčok motora extrudovacieho mechanizmu potrebných pre vytlačenie 1 mm tlačovej struny [28]. Z dôvodu rozličnej tvrdosti tlačných materiálov je nutné tento parameter nastaviť pre každý materiál zvlášť. Tvrdosť materiálu, tvar profilu zubov a veľkosť prítlačnej sily zubatice na tento materiál určujú do akej hĺbky sa zuby zubatice zaryjú do plastu, a tým pádom hodnotu efektívneho priemeru podávacieho mechanizmu [29].

Na délce tlačovej struny asi 300 mm bolo urobených desať meraní priemeru. Priemerná hodnota bola zapísaná do softvéru Simplify3d. Na pojazde osi x bolo určené vhodné referenčné miesto. Vo vzdialenosti 100 mm kolmo nahor od referenčného miesta bola urobená značka na tlačovej strune. Pri rýchlosti vytlačovania struny 2,5 mm/s a teplote 240°C pre PETG a 245°C pre nylon (stredná hodnota z testovaných teplôt v druhom experimente) bolo vytlačených 50 mm vlákna. Následne bola zmeraná vzdialenosť medzi značkou a referenčným miestom. Pokus bol opakovaný desať krát. Na základe predpokladanej hodnoty 50 mm a získaných hodnôt bol stanovený súčiniteľ prietoku. Tento parameter slúži na nastavenie optimálneho prietoku. Ak je vytlačované nedostatočné množstvo, teda vzdialenosť medzi značkou a referenčným miestom je väčšia ako 50 mm volíme hodnotu tohto parametru väčšiu ako 1. V opačnom prípade, teda pri prebytočnom vytlačovaní materiálu volíme hodnotu menšiu ako 1. 1 znamená 100% prietok. Ďalej boli uskutočnené viaceré kalibračné testy, pri ktorých boli tlačené kocky so 100% výplňou a 1 perimetrom, ďalej kocky s hustotou 40 % pri odlišných hodnotách súčiniteľa prietoku. Po vizuálnej kontrole priebehu výrobného procesu, najmä vytváraní spodných a vrchných vrstiev a po odmeraní rozmerov vzoriek bola zvolená hodnota súčiniteľa 0,96 pre materiál PETG a 1 pre materiál nylon. Tieto hodnoty boli počas celého experimentu konštantné pričom bolo predpokladané, že prítláčna sila, ktorou zubatica tlačí na materiál je dostatočná a prešmyky medzi zubaticou a materiálom sú minimálne [23].

- **Nastavenie retrakcie**

Samovoľné vytekание plastu z trysky a tvorba tenkých prebytočných vlákien medzi objektami sú nežiadúce javy. Tieto problémy sa eliminujú správnym nastavením retrakcie. Retrakcia je spätný chod motora extrudéry pri pohybe trysky medzi dvomi miestami alebo pri zmene vrstvy [30]. Simplify3d obsahuje viacero nastavení retrakcie:

- dĺžka retrakcie (retraction distance): je najdôležitejší z týchto parametrov. Ide o dĺžku tlačovej struny, ktorá je vytiahnutá z trysky. Priame extrudéry zvyknú vyžadovať hodnotu dĺžky retrakcie v rozmedzí 0,5 - 2 mm. Bowdenové extrudéry sú špecifické veľkou vzdialenosťou medzi podávacím mechanizmom extrudéry a tryskou, preto častokrát vyžadujú hodnotu dĺžky retrakcie približne 15 mm [30].
- rýchlosť retrakcie (retraction speed): je to rýchlosť vytiahnutia tlačovej struny z trysky. Pri pomalom vyťahovaní môže stále dochádzať k nechcenému vytekaniu materiálu z trysky. Pri príliš vysokej hodnote parametru môže dôjsť k vybrúseniu kúskov plastov z tlačovej struny zubami zubatice alebo k oddeleniu plastovej struny od horúceho plastu v tryske. Obvyklé hodnoty sa nachádzajú v rozmedzí 20 - 100 mm/s [30].

Ďalšími parametrami, ktoré zhoršujú problém neželaného unikania plastu z trysky sú vysoká teplota a veľké vzdialenosti medzi objektami. Softvér Simplify3d obsahuje funkciu, ktorá umožňuje vytvorenie dráhy trysky, tak aby tryska prechádzala v otvorenom priestore čo najmenšie vzdialenosti a v optimálnych prípadoch sa vyhla prechádzaniu voľného priestoru úplne. Ide o funkciu *Avoid crossing outline for travel movement* [30].

Tlačiareň vytvára vonkajšiu obálku tak, že na určitom mieste začne vytlačovať materiál a po obehnutí celého obvodu sa opäť vráti na začiatok, kde ukončí vytlačovanie materiálu. Vytvorenie spojenia v tomto počiatočnom a zároveň konečnom bode môže byť náročné.

Preto na bočných povrchoch objektov sa častokrát objavujú povrchové vady v podobe malých kvapiek, zhlukov plastu alebo naopak malých prepadlín. Je dôležité pozorovať proces tlače a všimnúť si či k spomínaným vadám dochádza na začiatku alebo na konci tlače vonkajšieho perimetru [30]. Simplify3d obsahuje parametre a funkcie, ktoré tieto vady minimalizujú:

- *extra dĺžka pri reštarte (extra restart distance)* – Vhodné nastavenie tohto parametru môže pomôcť, ak dochádza k tvorbe poruchových vád na začiatku tlače vonkajšej obálky. Väčšinou problémy vznikajú kvôli prebytočnému dávkovaniu materiálu na začiatku perimetru. Preto sa tento parameter obvykle definuje v záporných hodnotách. V praxi to znamená, že ak hodnota tohto parametru je - 0,2 mm a dĺžka retrakcie je nastavená na 1 mm, tak pri každej retrakcii je spätne vytiahnutý z extrudéru 1 mm tlačovej struny a pri opätovnom začatí tlače je vsunutých do extrudéru len 0,8 mm [30].

Pri testovaní rôznych hodnôt parametru bolo zistené, že príliš vysoká záporná hodnota má za následok nedávkovanie plastu na začiatku perimetra. Optimálne hodnoty sa pohybovali v rozmedzí od - 0,1 až - 0,3 mm.

- *zotrvačná vzdialenosť (coasting distance)* – Optimálne nastavenie tohto parametra môže pomôcť eliminovať tvorbu vád na konci vytlačania vonkajšej obálky. Parameter udáva vzdialenosť, na ktorej bude vypnuté dávkovanie materiálu, aby došlo k uvoľneniu napätia akumulovaného v tryske. Obvyklé hodnoty sa pohybujú v rozmedzí 0,2 – 0,5 mm [30].

Pri vysokých hodnotách dochádzalo k vzniku medzery medzi výplňou a vnútorným perimetrom.

Pre účely experimentu, v ktorom bude testovaný vplyv rôznych nastavení parametrov rýchlosť tlače a teplota trysky nebolo možné zvoliť všeobecne platné optimálne nastavenia súvisiace s retrakciou. Každá teplota aj rýchlosť si pre dosiahnutie dokonalého výsledku vyžadujú osobitné nastavenia týchto parametrov. Ako kompromis bola hodnota *dĺžky retrakcie* pre oba materiály zvolená 1 mm. Hodnota *rýchlosti retrakcie* sa osvedčila 30 mm/s. Parameter *extra dĺžka na reštarte* nebol aktivovaný, pretože aj pri najmenšej hodnote parametru a pri nízkych rýchlostiach a teplotách dochádzalo k zlému začatiu perimetra a prvá vrstva miestami nepriľnula k podložke. Parameter mal svoj význam pri vyšších teplotách a rýchlostiach. Parameter *zotrvačná vzdialenosť* nebol aktivovaný, pretože na konci vonkajšieho perimetru nedochádzalo k tvorbe vád. Hodnoty sú zhrnuté v tab. 5.

Tab. 5 Hodnoty parametrov retrakcie.

Názov parametru	Jednotka	Hodnota
Dĺžka retrakcie	[mm]	1
Rýchlosť retrakcie	[mm/s]	30
Extra dĺžka na reštarte	[mm]	0
Zotrvačná dĺžka	[mm]	0

5 VOĽBA MATERIÁLOV

Autor zvolil k účelu testovania menej používané materiály. Cena, materiálové vlastnosti a dostupnosť boli hlavnými kritériami. Vybrané boli materiály PETG a nylon od spoločnosti Shenzhen Esun Industrial Co., Ltd. Tlačové struny boli zakúpené v českom internetovom obchode 3dstruny.cz. Vlastnosti materiálov sú zhrnuté v tab. 6.

Tab. 6 Vlastnosti materiálov PETG a nylon udávané výrobcom [31].

Parameter	Jednotka	Hodnota	
		PETG	Nylon
Hustota	[kg/m ³]	1,23	1,15
Teplota topenia	[°C]	230-250	220-260
Index toku taveniny	[g/10 min]	20	3
Medza klzu	[MPa]	49	50-55
Ťažnosť	[%]	228	40-50
Medza pevnosti v ohybe	[MPa]	68	85-90
Modul pružnosti v ohybe	[MPa]	2072	2000-2400
Rázová húževnatosť	[kJ/m ²]	7,5	354
Presnosť	[mm]	1,7-1,8	

Zvolené nylonové vlákno je výrobcom uvádzané ako samozhášavý plast. Dosahuje hodnotenie na stupnici horľavosti UL 94 V-2. UL 94 označuje metódu testovania horľavosti. Plastová tyč o stanovených rozmeroch je umiestnená vo vertikálnej polohe (V – označenie), pričom je zapalovaná zo spodu. Doba po skončení zapalovania potrebná k uhaseniu vzorky udáva klasifikáciu: V-0 (najmenej horľavé), V-1, V-2 až 5V. Zvolený materiál prestane horieť priemerne po 25 sek. z 10 testovaných tyčí. Z 5 testovaných tyčí je to 30 sek. Po 60 sek. nesmie dôjsť k žiadnemu vznieteniu od žiaru. Kvapky, ktoré by zapálili bavlnu sú povolené [32, 33].

5.1 PETG

PETG je glykolom modifikovaný PET (polyetyléntereftalát). Vyznačuje sa vynikajúcou priehľadnosťou. Má vyššiu pevnosť a chemickú odolnosť ako väčšina ostatných transparentných polymérov. Tento materiál má modul pružnosti v ťahu, pevnosť a priehľadnosť podobnú ako PC (polykarbonát) a častokrát sa používa ako náhrada za PC [34].

Teplota skelného prechodu leží v rozmedzí 70-110°C [34].

PET je semi-kryštalický materiál. V miestach, kde sa vyskytuje kryštalická mriežka je zoslabený a pôsobením sily môže dôjsť v týchto miestach k porušeniu materiálu. PETG je vďaka glykolu amorfný materiál a nekryštalizuje. Je menej krehký ako PET [35].

PETG sa vyznačuje vysokou odolnosťou voči rázom. Materiál v podobe plátov dosahuje 15 až 20 násobnú pevnosť ako plexisklo a 10 krát vyššiu ako nárazuvzdorné plexisklo. Dosahuje 60 % až 70 % pevnosti polykarbonátu [35].

PETG sa vyznačuje vyššou priehľadnosťou ako PET. PET počas tepelného formovania kryštalizuje a počas tejto kryštalizácie dochádza k zakaleniu materiálu. PETG je naproti tomu navrhnutý tak, aby ku kryštalizácii nedochádzalo [35].

K zaručeniu dokonalej priehľadnosti musí byť PETG materiál spracovávaný v úzkej škále teplôt. Pri príliš nízkej alebo vysokej teplote sa PETG zakalí. PETG nevyžaduje sušenie pred tepelným spracovaním. Dobre sa obrába, fabrikuje a ohýba. Povrch je možné vyleštiť ohňom. Materiál sa vyznačuje dobrou chemickou odolnosťou [35].

PETG je cenovo pomerne dostupný materiál. Je približne o 15 až 25 % drahší ako plexisklo, asi o 2 až 10 % drahší ako nárazuvzdorné plexisklo a o 20 až 40 % lacnejší ako polykarbonát. Polotovary ako plechy a filmy sú o niečo lacnejšie s PET ako PETG [35].

PET a PETG majú lepšiu odolnosť voči kyslým roztokom a roztokom chlóru a vody ako nylon a acetál. Tieto roztoky sa používajú k dezinfekcii vybavenia v potravinárskom priemysle. PETG má dobrú odolnosť proti olejom, alkoholom a alifatickým hydrokarbónom. Nie je odolný voči ketónom, aromatickým a halogénovým hydrokarbónom [34, 35].

PETG má dobrú odolnosť proti oteru. Vyznačuje sa omnoho menšou absorpciou vody ako nylon. Má nízku odolnosť proti zásadám a horúcej vode [35].

Oba materiály PET aj PETG nie sú UV-stabilné. Po dlhodobom vystavení slnečnému žiareniu skrehnú a zožltnú [35].

Využitie

PET a PETG sa vyznačujú dobrou priehľadnosťou, pričom môžu byť jednoducho farbené. Aj preto sa používajú na výrobu obalov v zdravotníctve, pre elektroniku, v potravinárskom priemysle. PETG dokáže odolávať gama radiácii, ktorá je využívaná pre sterilizáciu nástrojov vo vnútri obalu. V potravinárskom priemysle má PETG vysoké zastúpenie aj pre svoju priaznivú plynnú permeabilitu [35].

5.2 Nylon

Nylon bol vynájdený americkým chemikom menom Wallac Carothers. Zhotovenia prvého nylonu sa však nedožil. Prvý nylon vyrobil v roku 1935 Gerard J. Berecht, člen Carothersova výskumného tímu z firmy Du Pont. Bol vytvorený ako náhrada za drahý a menej odolný hodváb, ktorý bol dovážaný z Japonska. Za druhej svetovej vojny bol tento materiál výhradne používaný na vojenské účely. Vyrábali sa z neho padáky, pevné laná, nepremokavé plášte, stany atď. V 40. rokoch dvadsiateho storočia vyvinul podobné vlákno aj český chemik Otto Wichterle, ktorý sa zaujímal o Carothersové práce. Tento materiál bol pomenovaný silon (polyamid 6). Boli vyrobené aj mnohé ďalšie podobné vlákna ako napr. nemecký perlon, aramidy (nomex, kevlar), živica (zytel) atď [36, 37, 38].

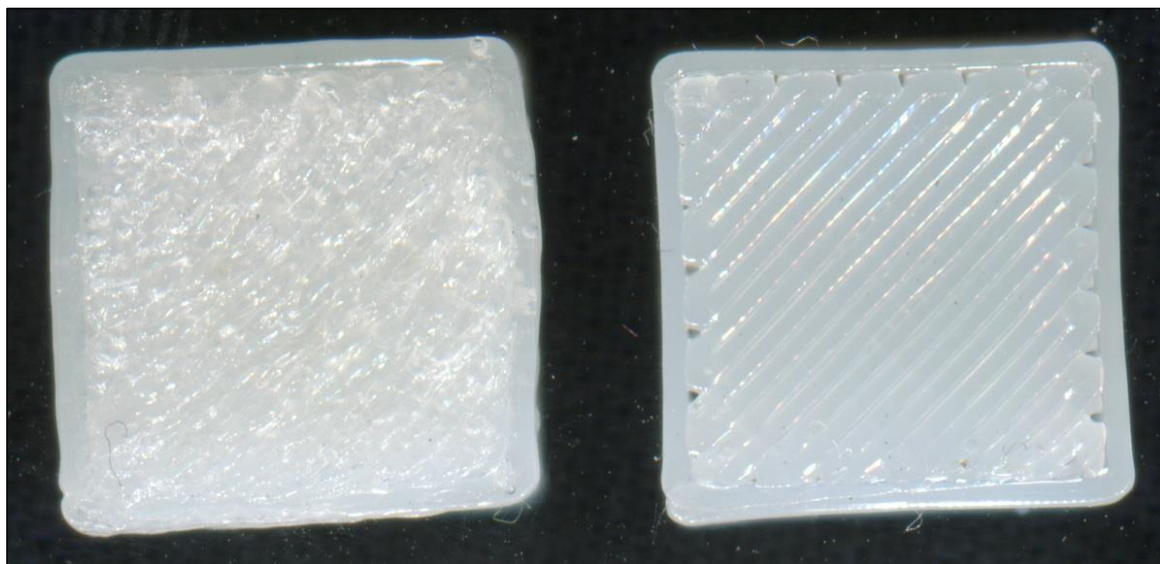
„Nylon je označenie pre skupinu syntetických polymérov, termoplastov. Základný reťazec týchto polymérov je tvorený peptidickými väzbami, preto sú tiež často označované ako polyamidy. Nylon je prvý syntetický polymér a prvé syntetické vlákno, ktoré bolo vyrobené priamo z uhlia, vody a vzduchu, a ktoré malo komerčný úspech. Pretože označenie nylon nie je chránené, používajú ich výrobcovia v obchodnom styku nielen pre pôvodnú skupinu polyamidov 6.6, ale pre všetky druhy polyamidových vlákien [39].“

V priemyselnej výrobe sa nylon používa vo forme vlákien, filmu alebo zmesi pre vstrekovanie. Existujú rôzne typy nylonov, ako napr. nylon 6, nylon 4/6, nylon 6/6, nylon 6/6-6, nylon 6/9, nylon 6/10, nylon 6/12, nylon 11, nylon 12. Vyrába sa vo forme homopolymérov, ko-polymérov alebo vo vystuženej forme. Nylon je možné kombinovať s inými technickými materiálmi k získaniu lepších vlastností [38, 40].

Využíva sa ako polotovar vo výrobných procesoch vstrekovanie, rotačné tvárnenie, odlievanie alebo extrudovanie do vlákien a filmov [38, 40].

Nylony vo veľkej miere na seba viažu vlhkosť z okolitého prostredia, čo má negatívny efekt na ich rozmerovú stálosť. Vlhkosť absorbujú až do dosiahnutia equilibria. Podiel vody v nylone sa môže meniť v závislosti od relatívnej vlhkosti vzduchu. Odolnosť voči rázom a flexibilita z narastajúcim podielom vlhkosti zvyknú narastať. Tuhosť a pevnosť pri teplotách pod teplotou skleného prechodu ($50^{\circ}\text{C} - 80^{\circ}\text{C}$) naopak majú zo zvyšujúcim sa podielom vody klesajúcu tendenciu. Preto pre zachovanie plnej pružnosti a odolnosti voči rázom je určitý obsah vody v nylone potrebný. Pokiaľ je nylon skladovaný na suchom, teplom mieste, mal by byť pre plné navrátenie pružnosti a odolnosti voči rázom pred ďalším mechanickým spracovaním ponorený do vody na 24 až 48 hodín [41, 42].

Vplyv absorpcie vzdušnej vlhkosti bol pozorovaný aj pri tlačení vzoriek. Na obr. 13 sú zobrazené vrchné steny plných kociek o rozmeroch $10 \times 10 \times 10,1$, o výške vrstvy 0,3 mm, šírke vlákna 0,48 mm. Kocka vľavo je vytlačená z vlhkosťou nasiaknutého nylonu. Kocka vpravo bola vytlačená pri tých istých parametroch, z toho istého materiálu, ktorý sa štyri hodiny sušil pri teplote 90°C v trúbe. Na ľavej vzorke bolo pozorované zhoršenie kvality povrchu vplyvom varenia a vyparovania sa vody z nylonu. Naproti tomu vzorka vpravo vykazuje veľmi výrazné zvýšenie kvality povrchu.



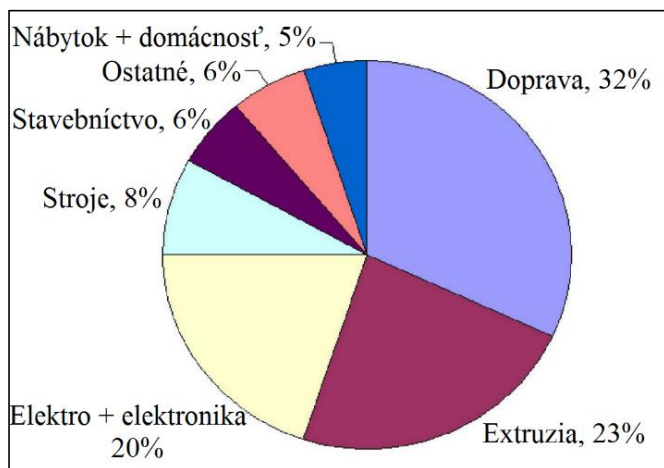
Obr. 13 Vytlačená plná kocka z vlhkosťou nasiaknutého nylonu vľavo a z následne vysušeného nylonu vpravo.

Počas procesu výroby nylonov sa pre zvýšenie tuhosti a pevnosti pridávajú krátke sklené vlákna. Nylony sa vyznačujú nízkym koeficientom trenia a vysokou odolnosťou voči opotrebeniu. Zafarbené polyamidy vplyvom UV žiarenia žltnú a strácajú svoju farbu. Nylony majú dobrú tepelnú a chemickú odolnosť a vysokú pevnosť. Sú odolné proti bežným rozpúšťadlám ako napr. všetky alkálie, oleje, tuky, väčšina zlúčenín kyselín, alkoholu, benzolu, acetónu atď. Naopak majú nízku odolnosť voči koncentrovaným kyselinám a alkoholom. Dobre znášajú starnutie a vplyv vonkajšieho prostredia. Existujú špeciálne farbivá, ktoré zvýšia odolnosť nylonov proti poveternostným podmienkam. Vyznačujú sa dobrou rozmerovou stálosťou i za vyšších teplôt.

Maximálna prevádzková teplota sa nachádza v rozmedzí - 40 až + 125 °C. Nylony zle horia, pri horení sa topia, roztekajú a samé sa uhasia [41, 42].

Použitie

Nylony sa používajú napr. na výrobu rybárskych vlascov, kobercov, používajú sa v textilnom priemysle, na výrobu potravinových obalov. Tepelná odolnosť umožňuje používať tieto materiály na výrobu „boil in the bag“ (variť priamo v obale) potravinových obalov [41]. Hlavné použitie polyamidov znázorňuje obr. 14.



Obr. 14 Hlavné použitie polyamidov [43].

6 TESTOVANÉ PARAMETRE

Bol urobený prieskum literatúry opisujúcej testovanie parametrov 3d tlače. Rešerš je zameraná na technológiu FDM, FFF. Rozmerová presnosť, drsnosť povrchu a kvalita povrchu boli hlavné skúmané kritéria. Vplyv rôznych parametrov na mechanické vlastnosti predmetov, zhotovených na FDM zariadeniach, nie je predmetom tejto práce.

6.1 Experimentálne štúdie

Existuje veľké množstvo experimentálnych prací zameraných na hodnotenie FDM zariadení. Autor sa riadil predpokladom, že výsledky štúdií zameraných na profesionálne 3d tlačiarne sa vzťahujú v určitej miere aj na nízkorozpočtové zariadenia, akým je Rebel II.

Autori jednej práce použili komerčný softvér ANSYS, v ktorom metódou konečných prvkov vytvorili simuláciu technológie FDM. Materiál bol ABS. Na základe výsledkov tejto simulácie analýzou rozptylu (ANOVA) bolo zistené, že rýchlosť trysky je najvýznamnejší faktor ovplyvňujúcim skrútenie, distorziu objektu. Druhým najpodstatnejším parametrom bola výška vrstvy. Významnosť šírky pokladaného vlákna ako samostatného parametru nebola preukázaná, avšak jeho vzájomná interakcia s výškou vrstvy sa ukázala ako podstatná. Dokopy tieto dva parametre určujú počet vrstiev a prejazdov trysky v každej vrstve. Širšia vrstva zníži počet vrstiev, čo vedie k zníženiu počtu ohrievacích a ochladzovacích cyklov. Menšia šírka rastru síce zníži prechod tepla do vyrábaného objektu, ale na druhej strane sa zvýši počet prejazdov trysky na jednu vrstvu. Čo celú problematiku pomerne komplikuje. Výsledky experimentálnej časti vykazujú podobnosť so simuláciou. Rýchlosť akou je polohovaná tryska v rovine XY môže ovplyvniť zahrievací a chladiaci cyklus, čo môže zapríčiniť rozdielny stupeň tepelného gradientu a teda aj ovplyvniť výslednú rozmerovú presnosť vyrábanej súčiastky. So zvyšujúcou sa šírkou vrstvy a šírkou rastru dochádza k nárastu vnútorného pnutia v materiáli [44].

Autori ďalších prác vytvorili model, v ktorom termálnou analýzou potvrdili, že teplota trysky má významný vplyv na kvalitu spojenia medzi vytlačenými vláknami. Tepelná energia ovplyvňuje proces spájania čiastočne nataveného materiálu. Ide o difúzny proces a výsledkom je čiastočne spojenie medzi susediacimi vláknami. Vzniká tzv. krčok a práve od rastu tohto krčku závisí aj celková kvalita spojenia [45, 46].

Na zariadení Stratasys FDM 2000 bol testovaný materiál ABS 400. Na výslednú mezoštruktúru a kvalitu spojenia medzi priľahlými vláknami materiálu ABS 400 mala veľký vplyv tepelná história materiálu. Autori v experimente dokázali, že materiál bol vystavený teplotám vyšším ako teplota skleneného prechodu, ale zároveň menším ako kritická spekacia teplota po väčšinu výrobného času [46].

V ďalšej experimentálnej práci autori testovali materiál PLA na stroji Makerbot Replicator 2. Bol testovaný vplyv parametrov rýchlosť tlače a teplota trysky na drsnosť povrchu zhotovených vzoriek. Rýchlosť tlače bola preukázaná ako významný parameter, zatiaľ čo teplota trysky ako nevýznamný. Zvýšením teploty došlo len k veľmi malému zníženiu strednej aritmetickej hodnoty drsnosti povrchu R_a . Zo zvyšujúcou sa rýchlosťou znateľne narastala aj hodnota R_a . Autori pripustili, že teplota by mohla byť významným parametrom, ak by bol testovaný väčší interval teplôt [47].

V ďalšej práci bol použitý stroj Dimension SSR 768 a materiál ABS 400. Autori pomocou počítačovej tomografie zistili, že hustota materiálu nie je konštantná v celom objeme vytlačeného telesa. Najvyššiu hustotu vykazovala spodná časť vzoriek, smerom nahor hustota klesala [48].

V ďalšej práci autor testoval vplyv parametrov výška vrstvy, rýchlosť depozície a hustota výplne na drsnosť povrchu a rozmerovú presnosť. Pre každý parameter boli zvolené dve hodnoty, vysoká a nízka. V experimente bolo použité zariadenie 3D Touch a materiál PLA. Najvýznamnejším faktorom ovplyvňujúcim rozmerovú presnosť je šírka vrstvy. Rýchlosť depozície materiálu nemala vplyv na drsnosť povrchu a percentuálnu zmenu šírky, pričom ale interakcia medzi hustotou výplne a rýchlosťou tlače má význam na drsnosť povrchu. Optimálne parametre pre rozmerovú presnosť sú vysoká šírka vrstvy, nízka rýchlosť tlače, nízka hustota výplne a pre drsnosť povrchu to je nízka šírka vrstvy, nízka rýchlosť tlače a nízka hustota výplne [49].

Autor ďalšej práce experimentálne overil efekt rôznych hodnôt parametrov výška vrstvy, šírka extrudovaného materiálu a rýchlosť polohovania trysky. Výsledky analýzy rozptylu (ANOVA) preukázali, že jediným podstatným faktorom je rýchlosť pohybu trysky. Autor však vyjadril záver, že rušivé elementy, ktoré produkujú takéto typy strojov mali väčší vplyv na výsledky experimentu ako testované parametre. Experiment mohol byť ovplyvnený elementami, ako napr. vibrácie, vlhkosť, nečistoty v materiály, kalibrácia atď. Testovaná open-source 3d tlačiareň bola FoldaRap. Na základe údajov zistených v experimente bol určený tolerančný stupeň (International Standart Tolerance Grade) tohto zariadenia medzi IT14 – IT16 [50].

V ďalšej práci boli testované parametre rýchlosť depozície materiálu, výška vrstvy a prietok. Najvýznamnejším parametrom bola rýchlosť tlače. Pri nízkych rýchlostiach je dosiahnutá vyššia presnosť za cenu zvýšenia výrobného času [28].

Ďalšia práca testovala vplyv procesných parametrov na rozmerovú presnosť 3d tlačiarne Duplicator 4x. Testované parametre: materiál (ABS, PLA), hustota výplne (20%, 50%, 70%), počet vonkajších vrstiev (1, 2, 3) a výška vrstvy (0,1; 0,2; 0,3). Výsledky experimentu preukázali, že vplyv parametrov v rovine XY nie je totožný s osou z. V rovine XY bola presnosť ovplyvnená hlavne materiálom, v tesnom závесе množstvom výplne a počtom vonkajších obálok. V ose z dominovali výška vrstvy a počet vonkajších obálok. Pričom najlepšej rozmerovej presnosti bolo dosiahnutej pre rovinu XY: 1 vonkašia obálka, výška vrstvy 0,3 mm, 20% výplň. Pre osu Z: 3 vonkajšie obálky, výška vrstvy 0,2 mm, 20% výplň. PLA materiál vykazoval vyššiu rozmerovú presnosť ako ABS [51].

Na drsnosť povrchu majú vplyv rôzne procesné parametre. Autori jednej experimentálnej štúdie testovali konkrétne vplyv výška vrstvy (0,1778 mm ; 0,254 mm; 0,3556 mm), šírky vytlačeného vlákna (0,537 mm; 0,622 mm; 0,706 mm) a rýchlosti depozície materiálu (100 mm/s, 150 mm/s, 200 mm/s). Výška vrstvy mala najväčší podiel na zmene drsnosti povrchu, rýchlosť a šírka vlákna mali menší podiel na zmene drsnosti [52].

Menšie šírky vrstiev všeobecne korešpondujú s lepšou kvalitou povrchu u RP súčastí. Samozrejme, že do úvahy musí byť zobraňovaný aj uhol naklonenia plochy vzhľadom k vertikálnej ose, teda tzv. schodovitý efekt. Na kvalitu povrchu má takisto vplyv aj aproximácia digitálneho modelu sériou trojuholníkov (STL formát), ktorý vedie k aproximačnej chybe [53].

V tejto práci autori zisťovali vplyv parametrov priemer trysky, šírka vytlačeného vlákna a výška vrstvy. Bol študovaný vplyv chemickej metódy na kvalitu povrchu testovanej vzorky. Zmena priemeru trysky nemala vplyv na hodnoty drsnosti R_a . Šírka vlákna a výška vrstvy ovplyvnili kvalitu vrchného povrchu. Výška vrstvy mala vplyv aj na drsnosť povrchu bočných stien. Šírka vlákna nemala vplyv na drsnosť povrchu bočných stien. Chemický post-processing výrazne zlepšil kvalitu povrchu [53].

V ďalšej práci bolo zistené, že pre získanie rovného vrchného povrchu je nutné nastaviť optimálny podiel medzi prietokom materiálu a rýchlosťou trysky. Na kvalitu bočného povrchu vyrábaného objektu majú najvyšší vplyv parametre výška vrstvy a uhol naklonenia bočnej steny vzhľadom k tlačovej podložke [54].

Orientácia objektu je ďalší dôležitý parameter. Najväčšiu presnosť je možné dosiahnuť u objektov, ktorých plochy zvierajú s tlačovou podložkou uhly 0° a 90° . V intervale ($0^\circ, 90^\circ$) dochádza k tzv. schodovitému efektu. Najväčšie rozmerové odchýlky zvyknú byť zaznamenané pri hodnote 45° [55].

V ďalšej experimentálnej štúdií autori testovali vplyv parametrov orientácia modelu, výška vrstvy, orientácia vlákien, šírka vytlačeného vlákna a vzduchová medzera medzi vláknami a ich vzájomnú interakciu pri troch hodnotách pre každý parameter. Za najvýznamnejší parameter ovplyvňujúci rozmerovú presnosť, pevnosť, výrobný čas, náklady a drsnosť povrchu autori určili orientáciu modelu [56].

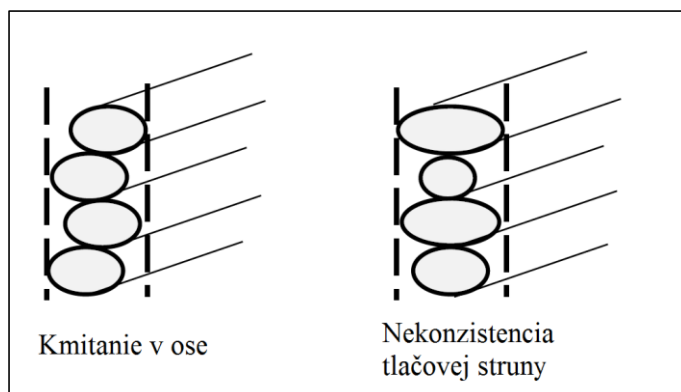
V ďalšej práci autori testovali vplyv parametrov výška vrstvy, orientácia modelu (uhol, ktorý zvierá bočná stena s tlačovou podložkou) a uhol výplne (uhol medzi smerovaním vlákien a osou x) na pevnosť v ťahu, drsnosť povrchu, rozmerovú presnosť a výrobný čas. Použité zariadenie bolo Julia. Materiál ABS-PA-747. Najvýznamnejším parametrom bola výška vrstvy. Pre dosiahnutie najlepšej rozmerovej presnosti autori odporúčali použiť najmenšiu testovanú hodnotu výšky vrstvy 0,1 mm, pre optimálnu drsnosť povrchu výšku vrstvy 0,1 mm pre optimálny výrobný čas najvyššiu testovanú šírka vrstvy 0,3 mm. 0° uhol orientácie a 0° uhol výplne boli optimálne hodnoty pre drsnosť, presnosť aj výrobný čas [57].

V ďalšej štúdií bolo potvrdené, že orientácia modelu má vplyv na presnosť a opakovateľnosť FDM súčastí. Autori vyjadrili záver, že neexistuje správna orientácia modelu pre zaručenie aj optimálnej presnosti aj optimálnej pevnosti. Ekonomická efektívnosť je najlepšie hľadisko, ktoré treba brať do úvahy pri jednoduchých modeloch. Kratšie výrobné časy zvyknú korešpondovať s vyššou pevnosťou a niekedy aj väčšou presnosťou a lepšou kvalitou povrchu. Väčší počet vrstiev automaticky znamená vyšší výrobný čas. Spojenia medzi jednotlivými vrstvami sú vytvárané difúznym procesom, a teda väzby medzi vrstvami sú omnoho slabšie ako väzby v položených vláknach. Ďalej bolo zistené, že čím väčší je vyrábaný objekt, tým menšia je relatívna odchýlka rozmerov. Absolútna odchýlka bola pri rôznych nominálnych rozmeroch približne rovnaká [58].

Materiál PLA (nominálny priemer 2,85 mm). Zariadenie Ultimaker 2. Vytvorenie objektu s rozmermi v ose z, ktoré nie sú násobkom danej výšky vrstvy môže viesť k rozmerovým chybám. Vzťah medzi prietokom a rýchlosťou trysky vo veľkej miere ovplyvňuje kvalitu tlače. Nedostatočné dávkovanie materiálu má negatívny vplyv na kvalitu a môže až znemožniť dokončenie tlače [59].

Autor testoval parametre ako rýchlosť trysky (rýchlosť tlače spodnej vrstvy, výplne, vrchnej vrstvy, vonkajšej obálky, vnútornej obálky), veľkosť a hrúbka obálky. Každý parameter mal dve hodnoty, nízku a vysokú. Parametre sa ukázali ako štatisticky nevýznamné [59]. Autor vyjadril záver:

„na presnosť a výslednú kvalitu objektov majú vplyv nasledujúce faktory: nízka presnosť STL súboru, nesprávne nastavenie sliceru, nepresnosti spodnej vrstvy, zlá kalibrácia prietoku, prekročenie maximálneho prietoku, ktorý zariadenie dokáže vyvinúť, nesprávne nastavenie tlačovej podložky, skrútenie výtláčkov pre zľú príľnavosť k podložke, rozmery v ose z, ktoré nie sú násobkom výšky vrstvy, nastavenie výplne, ktoré spôsobuje výrazné mykanie na okrajoch výplne, chyby retrakcie [59].“ Dráha pohybu trysky nezodpovedá úplne predpísanému pohybu. Je to spôsobené nepresnosťami v konštrukcii zariadenia a vôľami v prevodoch (remeň – remenica, závitová tyč – matica). Preto býva pozorovaný jav nazývaný v anglickej literatúre Z-wobble (kmitanie v ose z) (viď obr. 15). Nestálosť priemeru tlačovej struny po celej dĺžke tak isto spôsobuje zníženie rozmerovej presnosti a kvality povrchu (viď obr. 15) [59].



Obr. 15 Efekt kmitania v ose z vľavo a efekt nekonzistencie materiálu vpravo [59].

6.2 Zhodnotenie a výber testovaných technologických parametrov

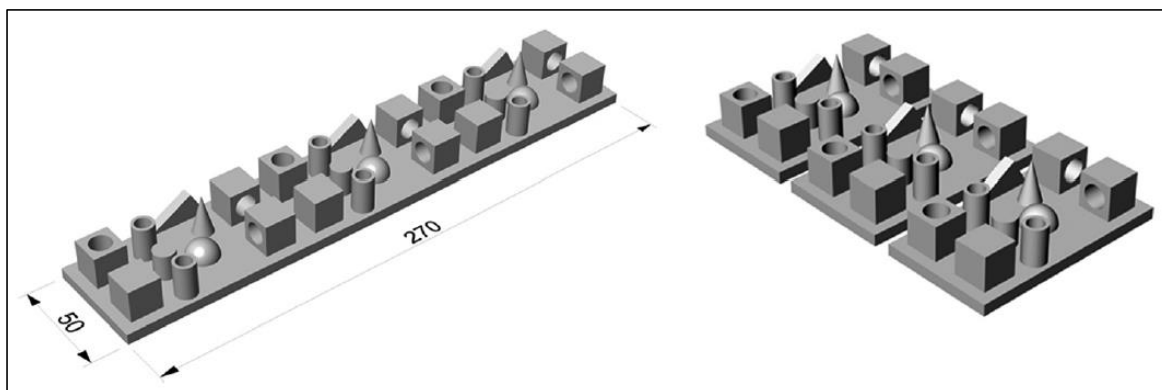
Na základe rešeršnej časti bolo zistené, že veľké množstvo testov technológie FDM bola uskutočnená na profesionálnych zariadeniach a uzavretých systémoch, ktoré neponúkajú užívateľom také rozsiahle možnosti zásahu do výrobného procesu ako open-source technológie. RepRap tlačiarne umožňujú užívateľom meniť širokú škálu procesných parametrov ako napr. rýchlosť pohybu trysky, teplota podložky, teplota trysky, súčiniteľ prietoku materiálu tryskou atď. Preto výhodou týchto a podobných zariadení je to, že umožňujú dôkladné testovanie spomínanej technológie. Naopak nevýhodou je pomerne zdĺhavý proces experimentálneho zisťovania optimálnych hodnôt technologických parametrov. Ďalšou podstatnou nevýhodou väčšiny týchto zariadení je absencia vyhrievanej komory, preto teplota pracovného priestoru je určená teplotou okolitého prostredia.

Po zhodnotení rešeršnej časti tejto práce a základných princípov fungovania RepRap tlačiarň boli zvolené nasledovné testovacie parametre:

- teplota trysky,
- rýchlosť pohybu trysky.

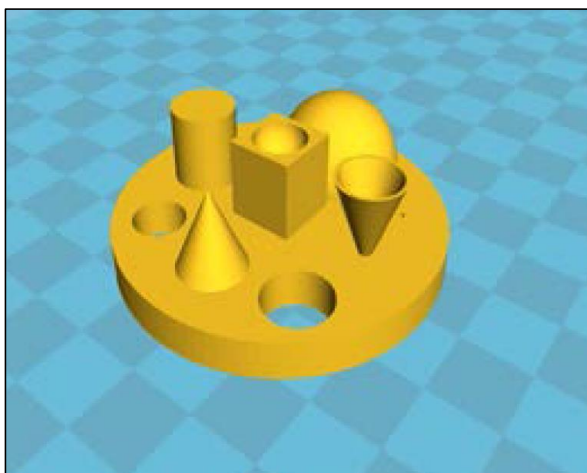
7 SKÚŠOBNÉ MODELKY

Autori v jednej práci navrhli model k testovaniu presnosti a opakovateľnosti RP procesov. Je dizajnovaný tak, aby obsahoval základné tvarové prvky (kocka, valcová diera, guľa, plný valec, dutý valec, kužeľ, naklonený povrch) (viď obr. 16). Desať vzoriek bolo trikrát vytvorených pre zistenie opakovateľnosti [60].



Obr. 16 Skúšobná vzorka s troma opakovaniami [60].

V ďalšej experimentálnej štúdiu autori vytvorili dva skúšobné objekty. Prvý model v sebe zahrňoval rôzne geometrické tvary. Tento model obsahoval tenké steny o hrúbke 0,5 mm, malé diery o priemeru 1 mm a veľké diery o priemeru 10 mm (viď obr. 17). Rozmerová presnosť bola overená 3D skenerom. Druhý model bola trubka, ktorej rozmery boli overené digitálnym posuvným meradlom (viď obr. 18) [61].



Obr. 17, 18 Skúšobné modely, prvý model vľavo a druhý model vpravo [61].

Kvalita zhotoveného objektu na 3d tlačiarňami typu reppap závisí v značnej miere aj na použiteľnom softvéri, ktorý generuje G kód. Pričom je známe, že každý takýto softvér medzi užívateľmi RepRapov nazývaný „slicer“ má určité pozitíva a negatíva. Príklad výsledku rozdielneho prístupu slicerov ku generovaniu G kódu toho istého modelu reprezentuje obr. 19 [61].

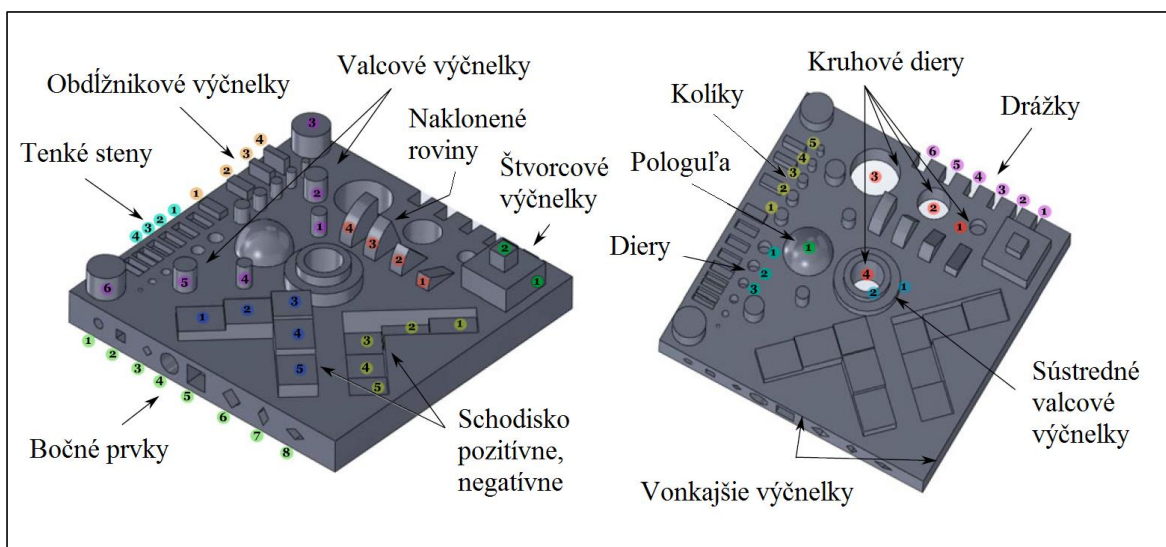


Obr. 19 Rovnaký objekt, ktorého g kód bol vytvorený v softvéri Cura vľavo a v Repetier vpravo [61]

V ďalšej práci bol navrhnutý testovací objekt, ktorý obsahoval štyri typy rozmerových presností (viď obr. 20):

- v rovine XY,
- v ose z,
- kruhové, valcové,
- tenké steny.

Išlo o modifikovanú verziu z NIST (National Institution of Standards and Technology) [62, 63].



Obr. 20 CAD model s označenými rozmerovými prvkami [63].

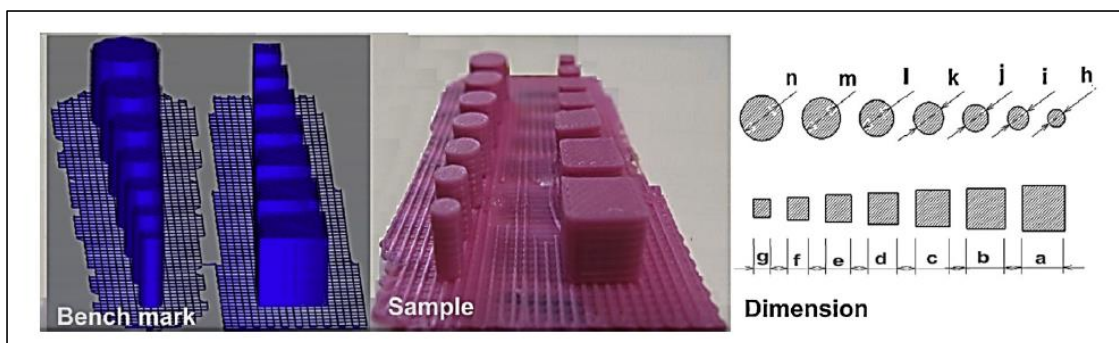
„Dalšia práca bola zameraná na zostavenie pravidiel pre tvorbu skúšobných modelov. Tieto pravidlá sú:

- *dostatočná veľkosť k testovaniu prevádzky stroja aj na rohoch tlačovej podložky aj v blízkosti stredu,*
- *objekt musí obsahovať dostatočný počet malých, stredne veľkých a veľkých prvkov,*
- *nízka spotreba materiálu,*
- *nízky výrobný čas,*
- *jednoduché meranie,*
- *jednoduché geometrické prvky, ktoré umožnia dokonalú definíciu a jednoduchú kontrolu geometrie,*
- *objekt nevyžaduje post-processing alebo manuálny zásah (žiadne podporné štruktúry),*
- *umožnenie merania opakovateľnosti [62].“*

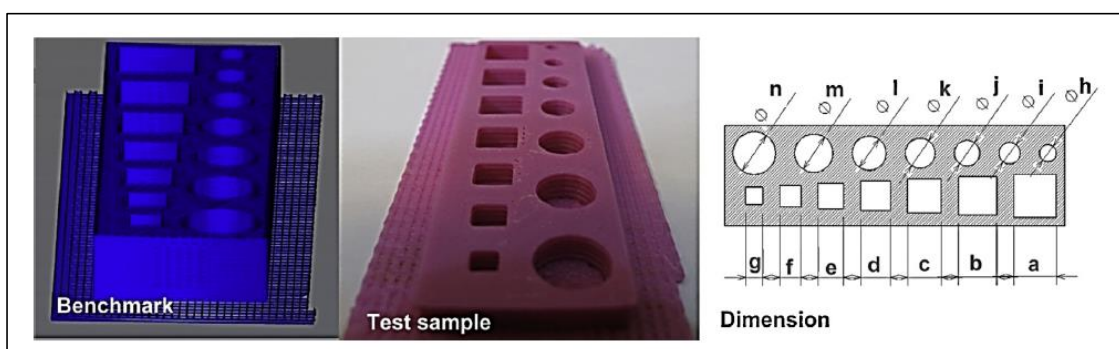
„Skúšobné objekty používané k testovaniu aditívnych technológií majú určité spoločné vlastnosti:

- *obdĺžnikové otvory, výstupky a trubky v rôznych smeroch,*
- *kruhové otvory, výstupky a trubky v rôznych smeroch,*
- *sférické otvory a výstupky,*
- *kuželovité výstupky,*
- *prvky v tvare písmena L,*
- *naklonené plochy,*
- *previsy,*
- *uhly,*
- *drážky na bokoch,*
- *tenké steny a drobné, jemné prvky,*
- *voľné štruktúry,*
- *veže [62].“*

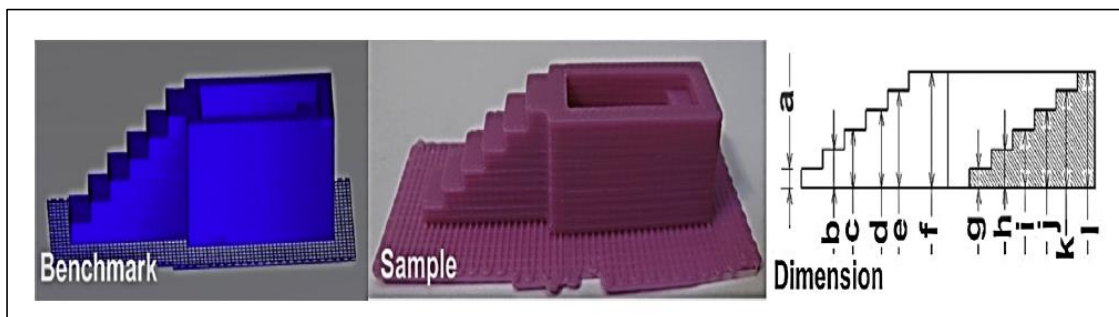
K zisteniu kalibračných faktorov pre vonkajšie rozmery autori ďalšej práce navrhli model, ktorý obsahoval sedem valcov a sedem kociek o rôznych rozmeroch (vid' obr. 21). Pre zistenie kalibračného faktoru dier bol navrhnutý model obsahujúci sedem cylindrických a sedem štvorcových dier o rôznych rozmeroch (vid' obr. 22). Ďalší model obsahoval šesť vonkajších a šesť vnútorných schodov (vid' obr. 23) [64].



Obr. 21 Skúšobný model pre výpočet vonkajšej kalibrácie [64].



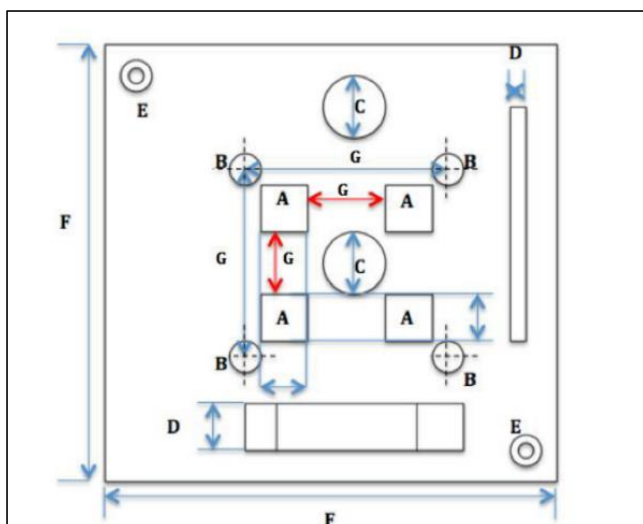
Obr. 22 Skúšobný model pre výpočet kalibrácie rozmerov dier [64].



Obr. 23 Skúšobný model pre výpočet kalibrácie rozmerov v ose z [64].

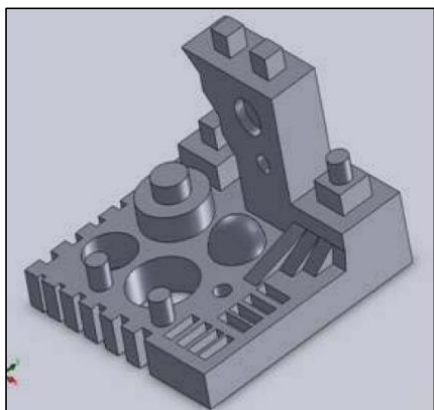
Muhamad A M J Alhubail vo svojej dizertačnej práci navrhol testovací model, ktorý obsahoval geometrické prvky ako kocky, valce, pologule a okrúhle diery (viď obr. 24). Model bol navrhnutý tak, aby bolo možné odmerať:

- priemery (pologule a valce),
- rovinnosť,
- rozmery (kocky a steny),
- vzdialenosť medzi objektami [65].



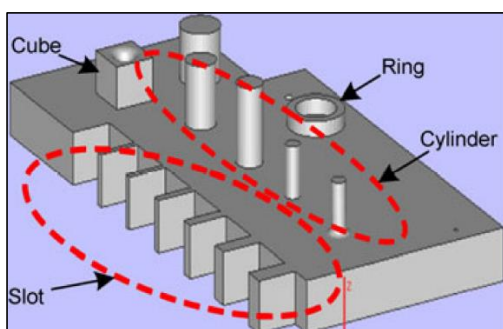
Obr. 24 Testovaný objekt s vyznačenými meranými prvkami [65].

Skúšobný model pre testovanie zariadenia MakerBot CupCake CNC bol navrhnutý v ďalšej práci. Hodnotená bola rozmerová presnosť, schodovitý efekt, tepelné zmrštenie, geometrické a rozmerové tolerancie. Model obsahoval tenké steny, výčnelky v tvare kvádrov a valcov, priechodné a slepé diery, naklonené plochy, drážky a poglobule (vid' obr. 25) [66].



Obr. 25 Skúšobný model [66].

V ďalšej práci testovaný model obsahoval drážky, kocku, valce a prstenec (vid' obr. 26) [67].



Obr. 26 Testovací model [67].

8 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

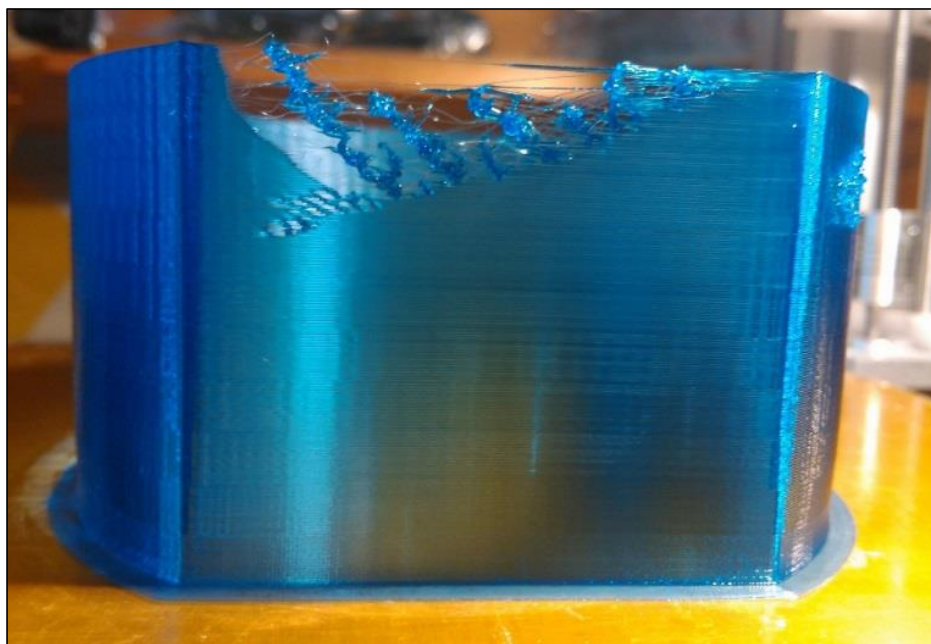
V tejto práci boli vyhotovené dva experimenty. Testovaný interval teplôt bol zvolený na základe hodnôt udávaných priamo na kotúčoch tlačových strún.

8.1 Testovanie extrudovania materiálu

Bol uskutočnený test extrudovania materiálu. Zhotovený tenkostenný objekt mal hrúbku steny presne jeden perimeter, teda 0,32 mm. Výška vrstvy bola 0,2 mm. Výkres vzorky je v prílohe 2. Každých 5 mm v ose z bola zvýšená rýchlosť tlače. Test bol uskutočnený pre rôzne teploty (viď tab. 7) [68]. Jedna z vzoriek je zobrazená na obr. 27.

Tab. 7 Testované parametre a ich hodnoty.

PETG		
Interval rýchlostí	[mm/s]	20 – 200
Krok zmeny	[mm/s]	20
Interval teplôt	[°C]	230 – 251
Krok zmeny	[°C]	7
Nylon		
Interval rýchlostí	[mm/s]	20 - 200
Krok zmeny	[mm/s]	20
Interval teplôt nylon	[°C]	230 – 260
Krok zmeny	[°C]	10



Obr. 27 Testovanie extrudovania materiálu PETG pri teplote 250°C.

8.1.1 Vyhodnotenie spojenia medzi vláknami

Sila spojenia medzi vláknami bola vyhodnotená zjednodušeným spôsobom. Vlákná boli ručne oddeľované prstami. Tab. 8 obsahuje výsledky.

Tab. 8 Výsledky testov extrudovania materiálov PETG a nylon.

Materiál	PETG			Nylon		
	Teplota trysky [°C]					
	230	240	250	230	245	260
Rýchlosť tlače [mm/s]	Hodnotenie					
20	C3	C3	C3	C3	C3	C3
40	C3	C3	C3	C3	C3	C3
60	C2	C3	C3	C2	C3	C3
80	C1	C3	C3	C1	C3	C3
100	N1	C2	C3	C1	C3	C3
120	---	C1	C2	C1	C3	C3
140	---	N1	C2	C1	C3	C3
160	---	---	N1	N1	C3	C3

Vysvetlenie tabuľky:

Celistvosť steny

Celistvá (vrstvy sú spojené a tvoria súdržnú stenu) – ozn. C → vyhovujúce

Necelistvá (steny sú čiastočne spojené) – ozn. N → nevyhovujúce

Miestami nedošlo k žiadnemu spojeniu vlákien – ozn. --- → nevyhovujúce

Sila spojenia medzi vláknami

Silné väzby (ani silnejším mechanickým pôsobením, napr. zatlačenie palcom, nedôjde k oddeleniu vlákien) – ozn. 3 → vyhovujúce

Slabé väzby (slabším mechanickým pôsobením, napr. mierne zatlačenie palcom, dôjde k oddeleniu vrstiev) – ozn. 2 → nevyhovujúce

Veľmi slabé spojenie (veľmi slabím mechanickým pôsobením dôjde k oddeleniu vrstiev) – ozn. 3 → nevyhovujúce

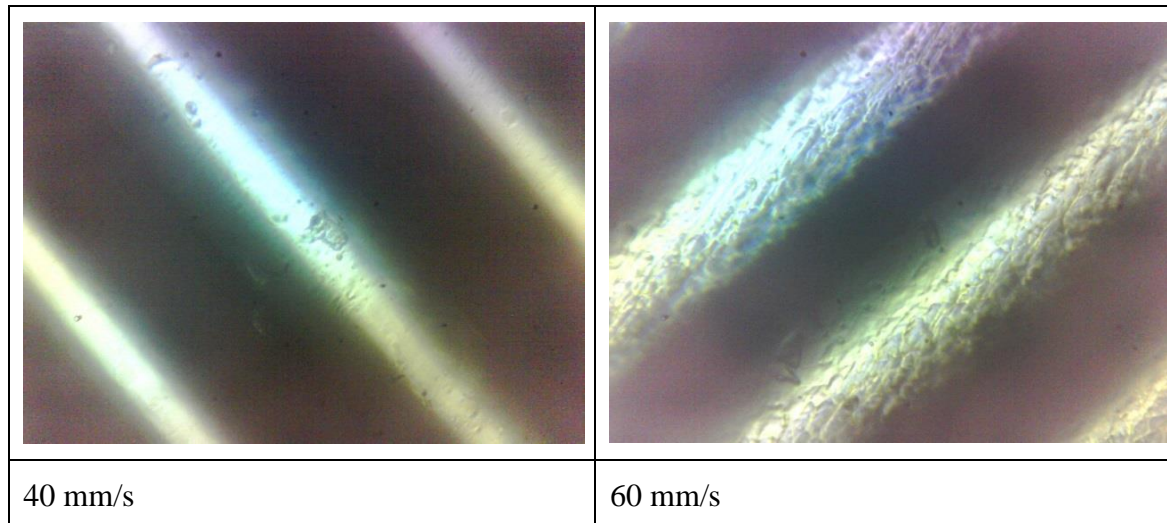
Poznámky:

Z experimentu je patrné, že kruhová časť vzorky bola zhotovená s celistvou stenou aj pri vysokých rýchlostiach, avšak pri najvyšších rýchlostiach bola sila spojenia medzi vláknami veľmi slabá.

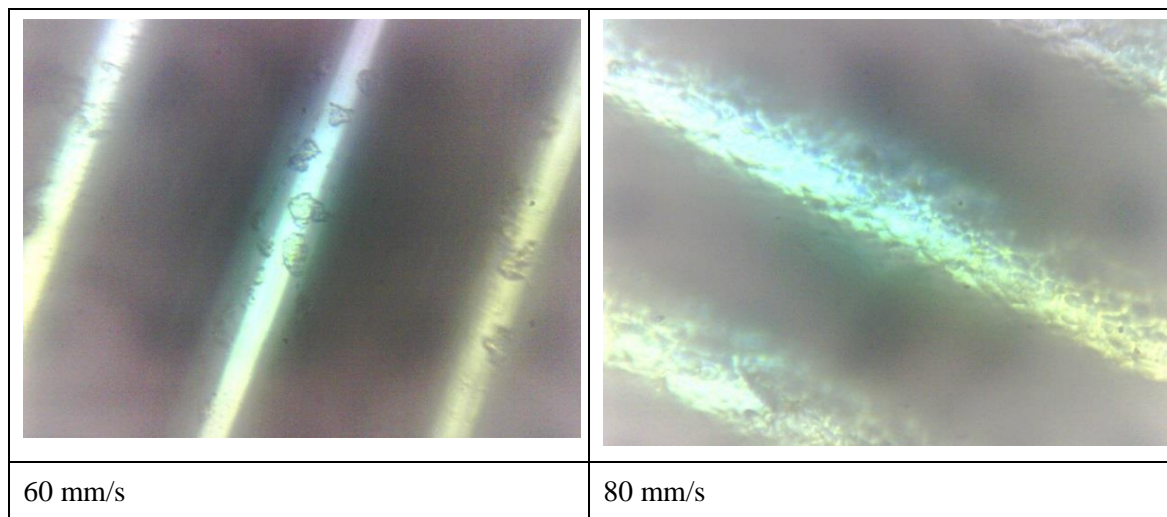
Naproti tomu na rovnom, a teda aj testovanom úseku došlo k pretrhávaniu vlákien už pri nižších rýchlostiach. Vo výsledkoch je hodnotený práve tento rovný úsek.

Pri rýchlosti 160 mm/s mala tlačiareň problém udržiavať rýchlosť na kruhovom profile, pohyb bol prerušovaný. Preto vyššie rýchlosti ako 160 mm/s neboli vyhodnotené.

Kvalita steny vzorky vyhovuje ak vyhovuje celistvosť steny aj sila spojenia medzi vláknami, teda kombinácia C3 (označené zelenou farbou).

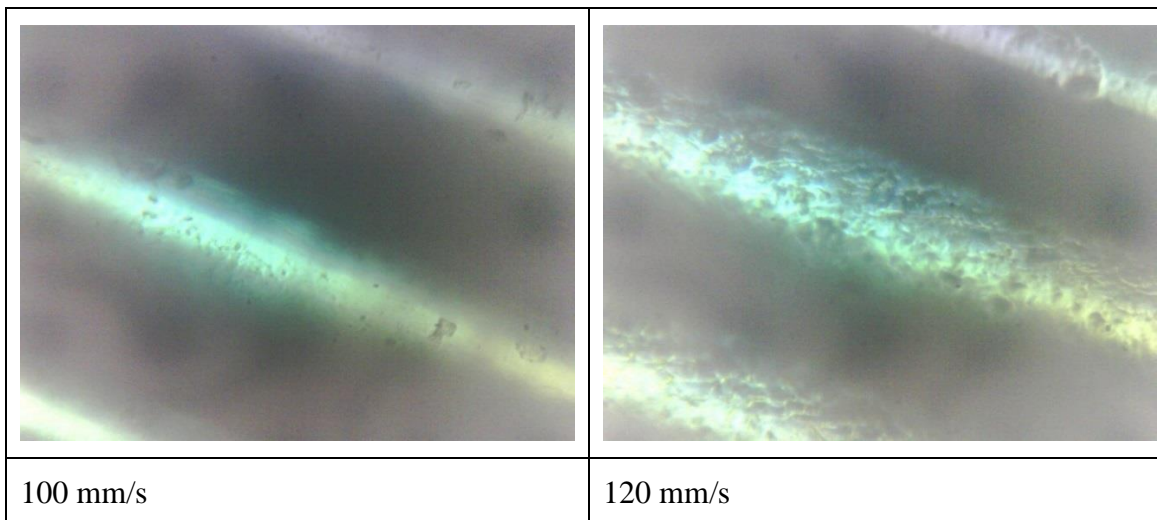
8.1.2 Pozorovanie vlákien pod mikroskopom pre materiál PETG**230°C**

Obr. 28, 29 Vlákna pozorované pod mikroskopom. Materiál PETG, teplota trysky 230°C, rýchlosť tlače 40 mm/s vľavo a 60 mm/s vpravo.

240°C

Obr. 30, 31 Vlákna pozorované pod mikroskopom. Materiál PETG, teplota trysky 240°C, rýchlosť tlače 60 mm/s vľavo a 80 mm/s vpravo.

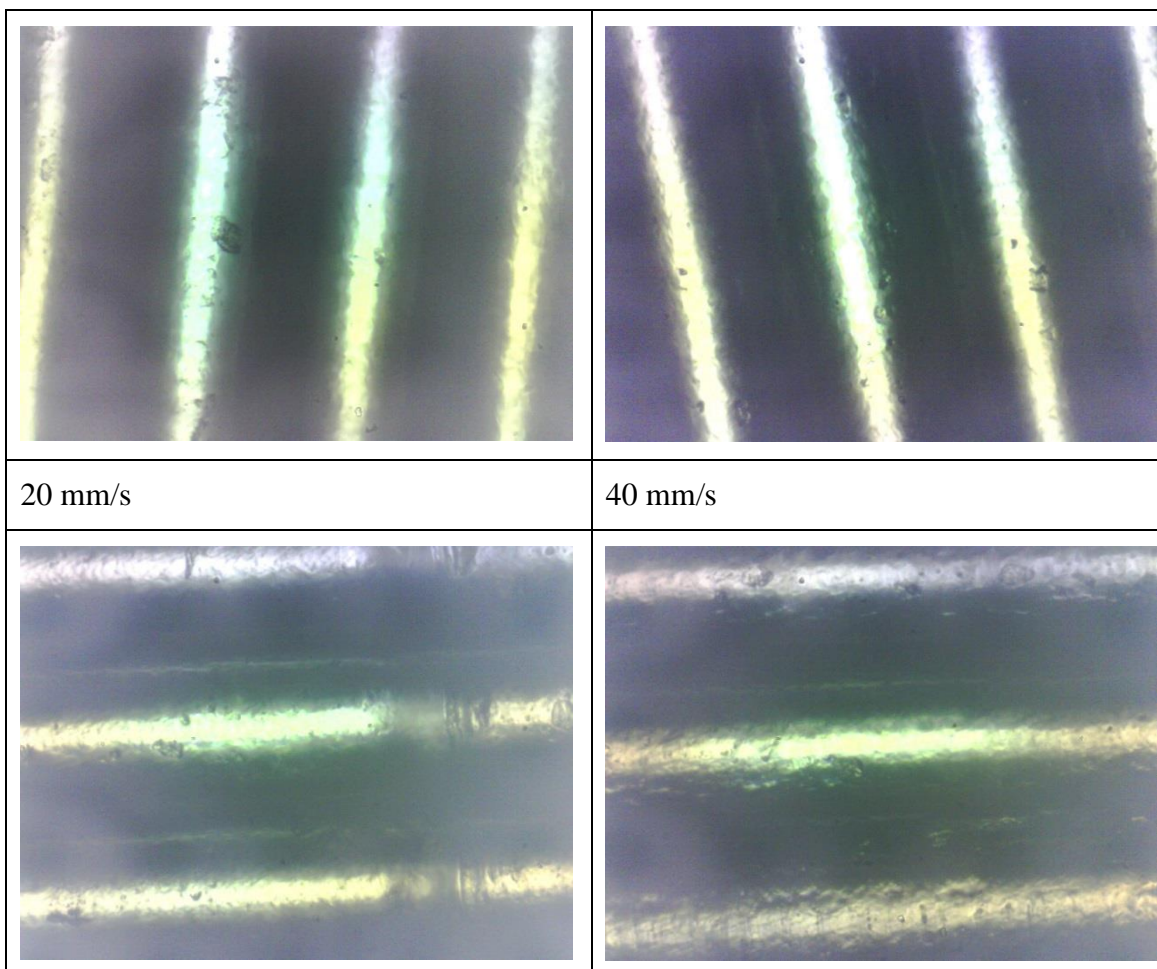
250°C

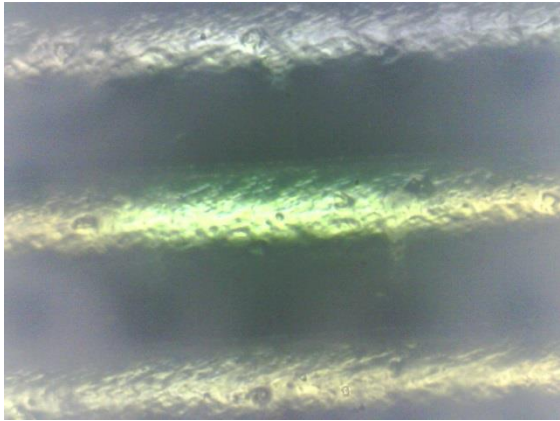
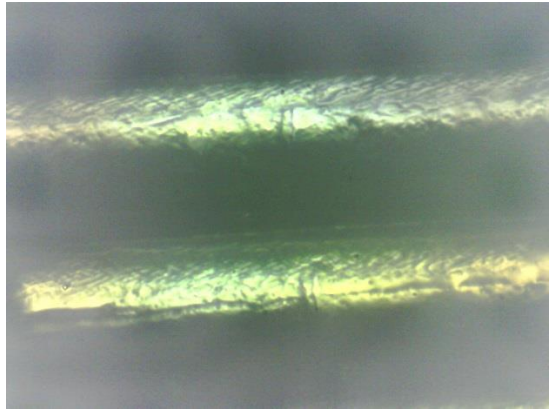
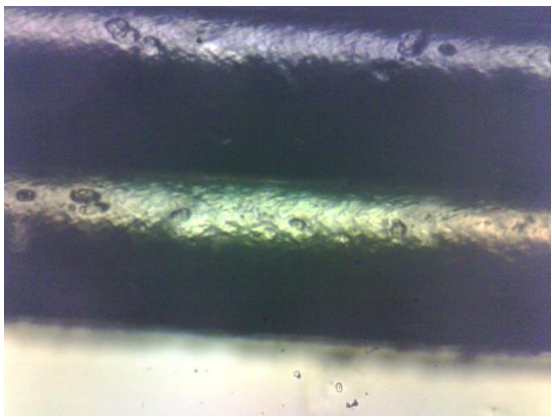


Obr. 32, 33 Vlákna pozorované pod mikroskopom. Materiál PETG, teplota trysky 250°C, rýchlosť tlače 100 mm/s vľavo a 120 mm/s vpravo.

8.1.3 Pozorovanie vlákien pod mikroskopom pre materiál nylon

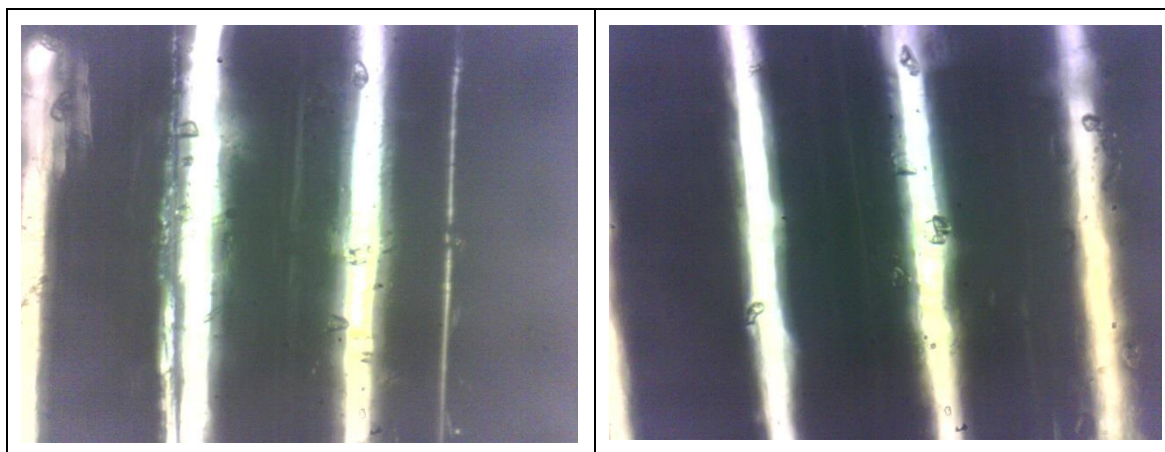
230°C



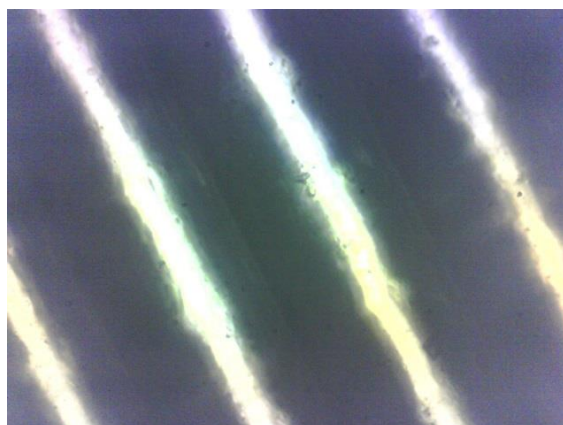
60 mm/s	80 mm/s
	
100 mm/s	120 mm/s
	
140 mm/s	

Obr. 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40 Pozorovanie vlákien z nylonu pod mikroskopom. Teplota trysky 230°C.

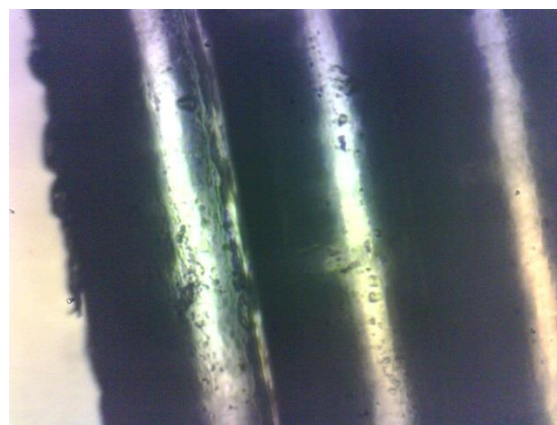
245°C



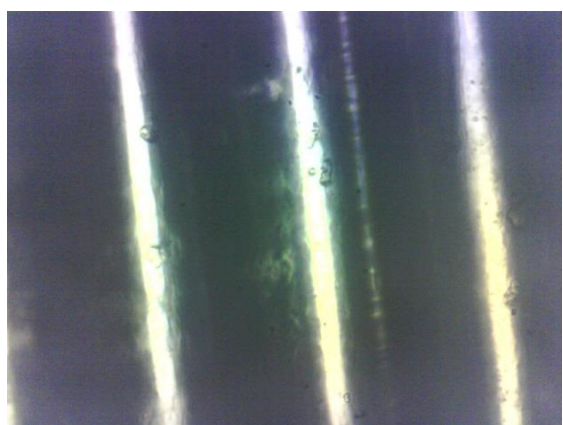
20 mm/s



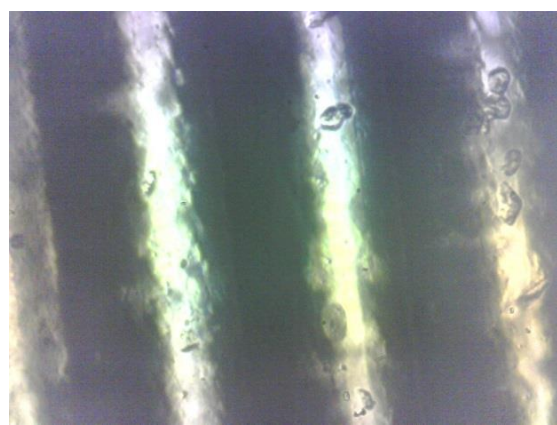
40 mm/s



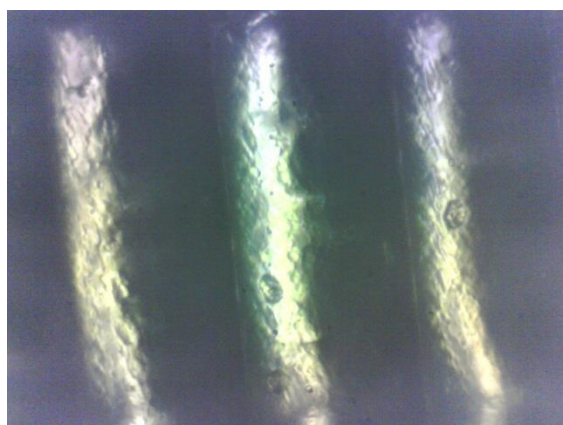
60 mm/s



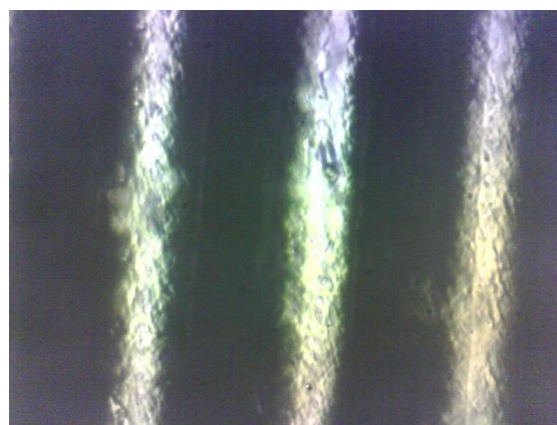
80 mm/s



100 mm/s



120 mm/s

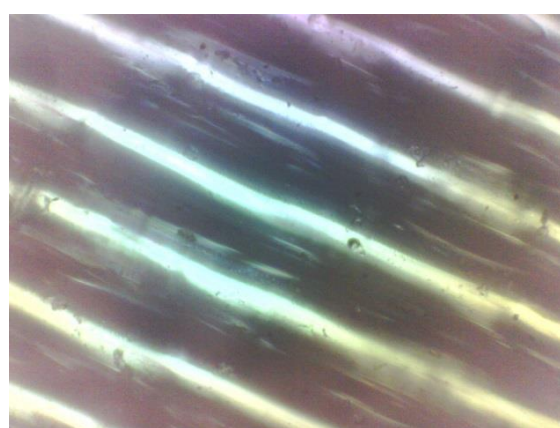


140 mm/s

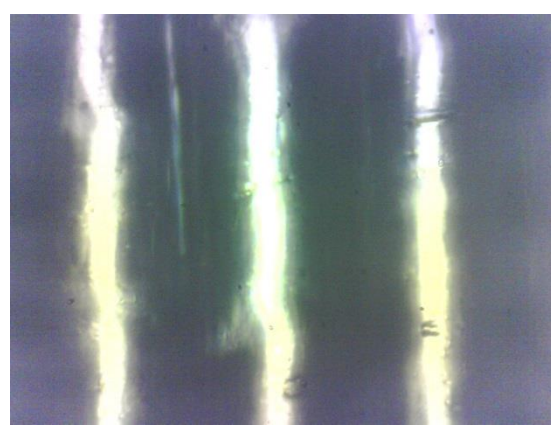
160 mm/s

Obr. 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48 Pozorovanie vlákien z nylonu pod mikroskopom. Teplota trysky 245°C.

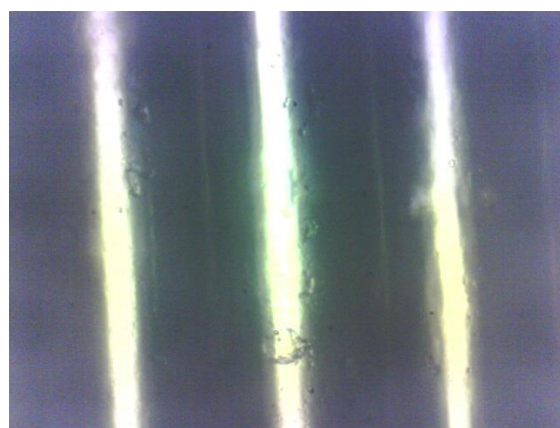
260°C



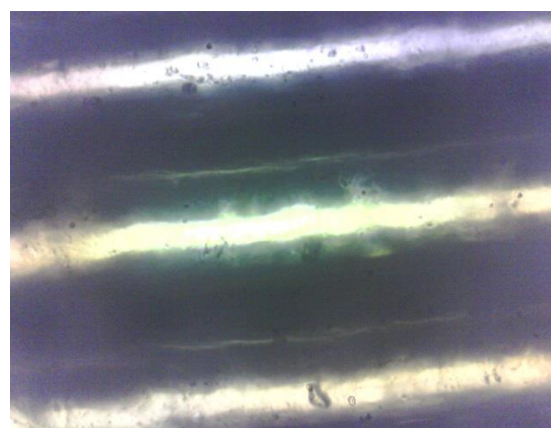
20 mm/s



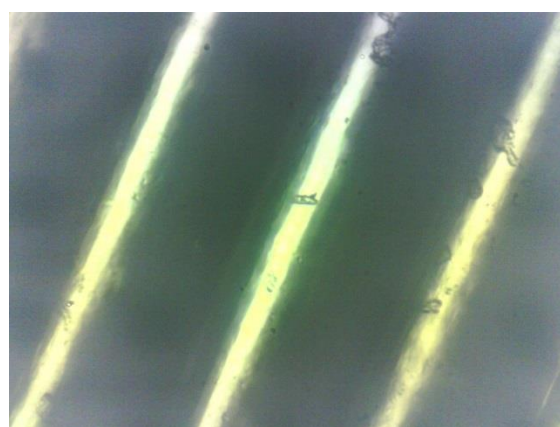
40 mm/s



60 mm/s



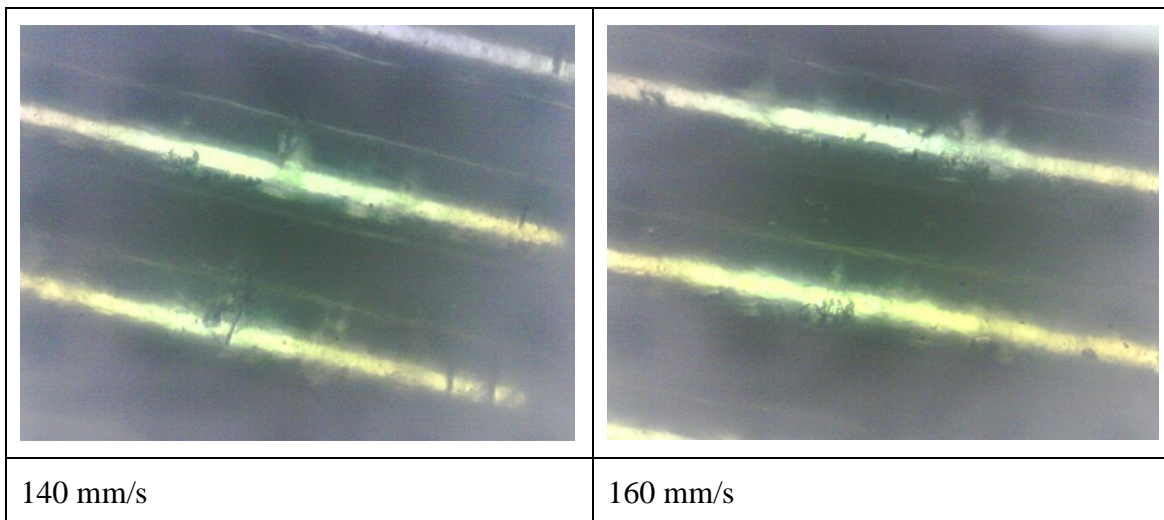
80 mm/s



100 mm/s



120 mm/s



Obr. 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56 Pozorovanie vlákien z nylonu pod mikroskopom. Teplota trysky 260°C.

Čiastkový záver:

z pozorovania vlákien pod mikroskopom vyplýva, že pri určitej teplote trysky a rýchlosti pohybu trysky dochádzalo k zhoršeniu kvality povrchu pozorovaných vlákien, konkrétne k zvráskaveniu, k zdrsneniu a k akumulovaniu vúd na povrchu. K opisovanému javu dochádzalo pri nižších teplotách a vyšších rýchlostiach. Pre materiál PETG bolo pozorované pomerne náhle zhoršenie kvality povrchu (viď obr. 28-33). Zvýšenie teploty umožní použitie vyšších rýchlostí, pri ktorých ešte nedôjde k výraznejšiemu zhoršeniu kvality povrchu vytlačovaných vlákien. Pre materiál nylon nebolo pozorované náhle zhoršenie kvality povrchu (viď obr. 34-56). Kvalita sa zhoršovala postupne zo zvyšujúcou sa rýchlosťou.

8.2 Druhý experiment

Experiment spočíval v zhotovení konkrétnych vzoriek pri rôznych nastaveniach parametrov rýchlosť tlače a teplota trysky. Hodnoty ostatných parametrov boli počas experimentu konštantné.

Nylon bol po každých približne dvanástich hodinách tlače štyri hodiny sušený v trúbe pri teplote 90°C kvôli zredukovaniu podielu vlhkosti v materiáli.

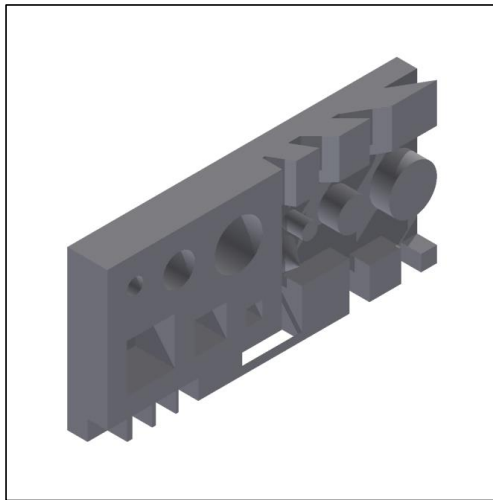
8.2.1 Návrh testovanej vzorky

Na základe rešeršnej časti tejto práce (kapitola 7) bola navrhnutá vzorka, ktorá obsahovala:

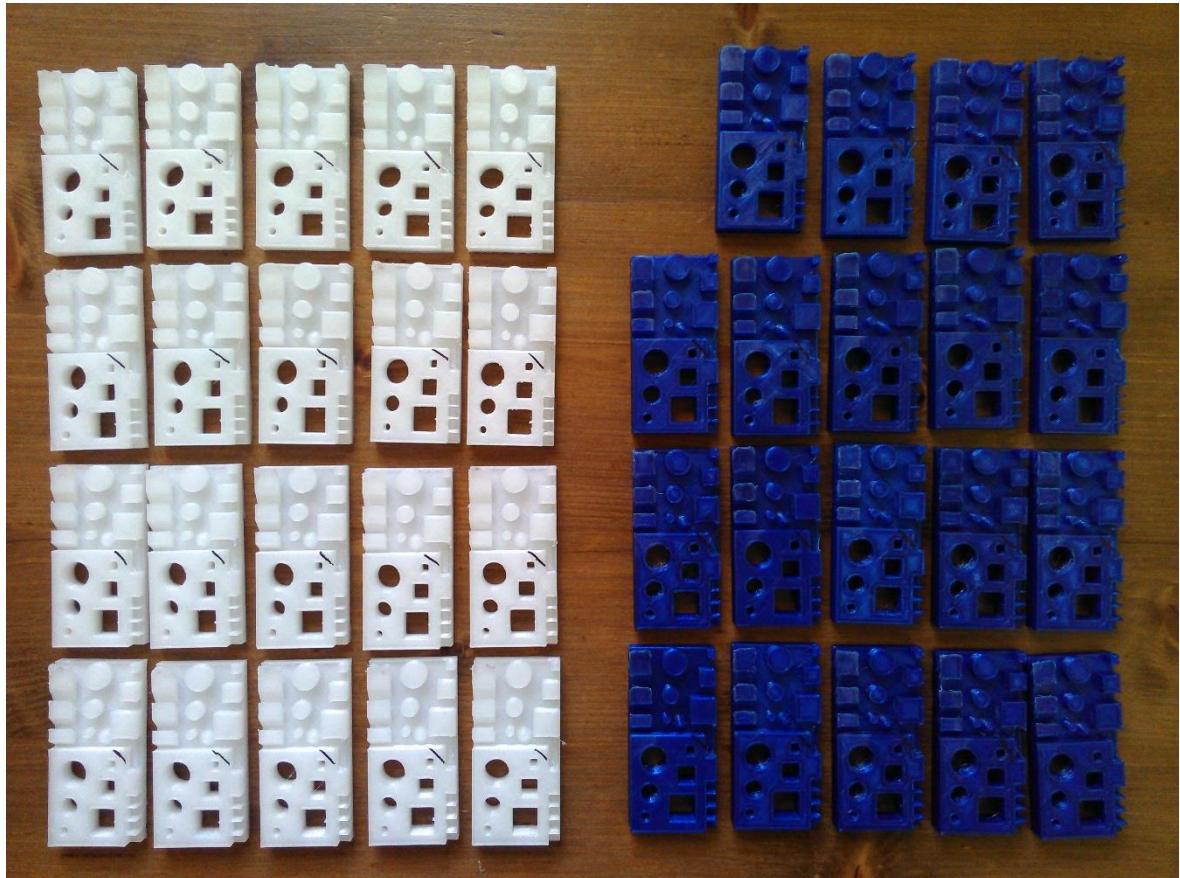
- podstavu,
- kvádre so štvorcovou podstavou (rozmery podstavy: 4x4 mm, 8x8 mm, 12x12 mm),
- valce (rozmery: (ø4 mm, ø8 mm, ø12 mm),
- previsy (30°, 45°, 60°),
- naklonené roviny (30°, 45°, 60°),
- štvorcové priechodzie diery (rozmery podstavy: 4x4 mm, 8x8 mm, 12x12 mm),

- valcové priechodzie diery ($\varnothing 4$ mm, $\varnothing 8$ mm, $\varnothing 12$ mm),
- tenké steny (šírka steny: 2x šírka perimetru, 3x šírka perimetru, 4x šírka perimetru),
- premostenie (šírka = výška jednej vrstvy, teda 0,2 mm).

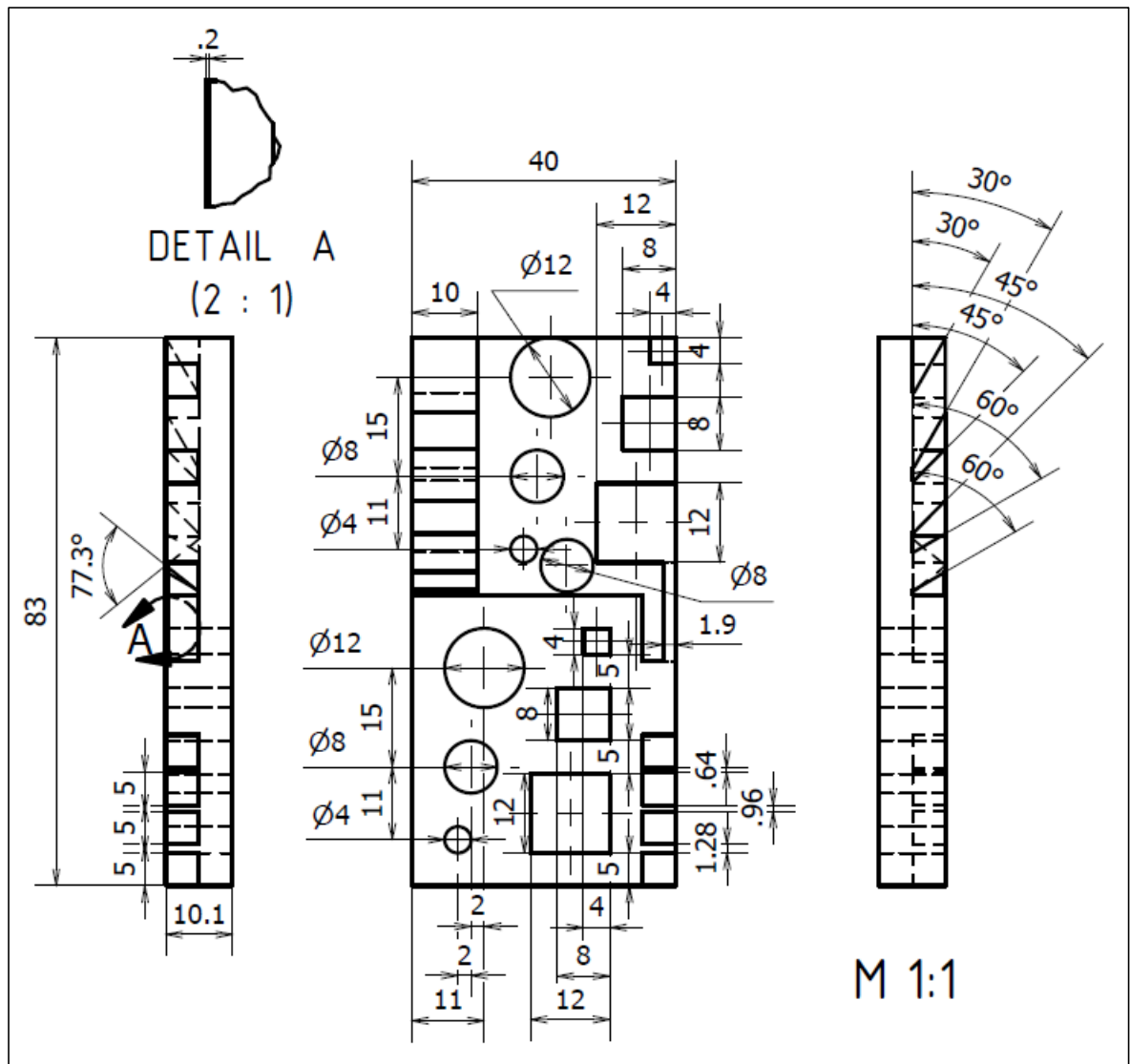
Veľkosť vzorky bola zvolená tak, aby spotreba materiálu bola čo najnižšia (viď obr. 58 a príloha 1). Model vzorky je na obr. 57. Zhotovené vzorky sú zobrazené na obr. 58, 60.



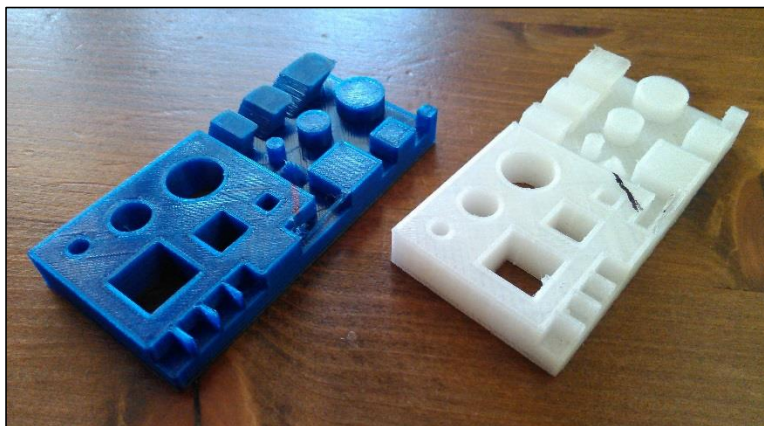
Obr. 57 Model testovanej vzorky.



Obr. 58 Všetky vzorky nylon vľavo a PETG vpravo.



Obr. 59 Rozmery testovanej vzorky



Obr. 60 Vzorka materiál PETG vľavo a nylon vpravo.

8.2.2 Parametre

Tab. 9 zahŕňa parametre, ktoré boli počas experimentu nemenné. Intervaly hodnôt a kroky zmien testovaných parametrov sú uvedené v tab. 10.

Tab. 9 Hodnoty niektorých základných parametrov, ktoré boli konštantné pre všetky experimenty

Parameter	Hodnota
Primárna výška vrstvy [mm]	0,2
Šírka vytlačeného vlákna [mm]	0,32
Počet vrchných vrstiev	5
Počet spodných vrstiev	5
Počet perimetrov	3
Typ vnútornej výplne	mriežka
Typ vonkajšej výplne	priamočiary
Percento vnútornej výplne [%]	40
Prekrytie obrysu [%]	5
Extrudovaná šírka výplne [%]	100
Spomalenie obrysu [%]	75
Spomalenie plnej výplne [%]	100
Rýchlosť polohovania v osách x, y [mm/s]	80
Rýchlosť pohybu v ose z [mm/s]	16,7

Tab. 10 Intervaly hodnôt testovaných parametrov

Nylon	
Interval teploty [°C]	<230 – 260>
Krok zmeny teploty [°C]	10
Interval rýchlosti [mm/s]	<25 – 125>
Krok zmeny rýchlosti [mm/s]	25
PETG	
Interval teploty [°C]	<230 – 250>
Krok zmeny teploty [°C]	7
Interval rýchlosti [mm/s]	(25 – 125)
Krok zmeny rýchlosti [mm/s]	25

8.3 Povrch a teplota tlačovej podložky

- **PETG**

Povrch tlačovej podložky – kaptonová páska potretá tuhým kancelárskym lepidlom, približne štyri tenké vrstvy

Teplota tlačovej podložky – prvé dve vrstvy 90 °C, ďalšie vrstvy 75 °C

Prvá vrstva – šírka 150 %, výška 150 %, rýchlosť tlače 10 mm/s

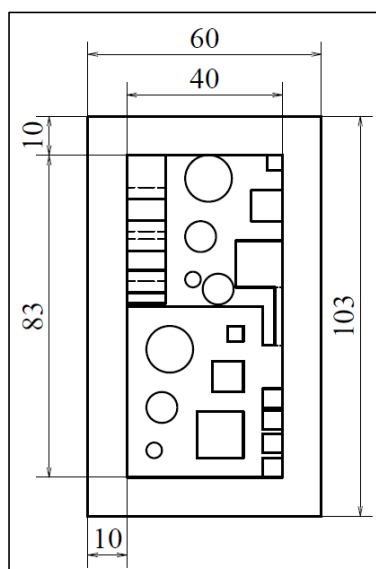
- **Nylon**

Povrch tlačovej podložky – sklenená tabuľa potretá tuhým kancelárskym lepidlom, približne štyri vrstvy

Teplota tlačovej podložky – izbová teplota, tlačová podložka nebola nahrievaná

Prvá vrstva – šírka 150 %, výška 150 %, rýchlosť tlače 20 mm/s

Dodatočné ukotvenie – vzorky zhotovené z nylonu boli upravené a po obvode bola rozšírená prvá vrstva (viď obr. 61), aby nedochádzalo k odlepeniu objektu z tlačovej podložky počas tlače.



Obr. 61 Znázornenie rozšírenia spodnej vrstvy.

8.4 Meracie zariadenia

8.4.1 Kancelársky skener

Vrchné a bočné steny vzoriek boli skenované na skenery Epson Perfection V370. Optické rozlíšenie skenera bolo 4800 dpi. Technológia CCD (charged-coupled device) umožnila pre účely tejto práce skenovať do dostatočne veľkej hĺbky [69].

8.4.2 Mikroskop

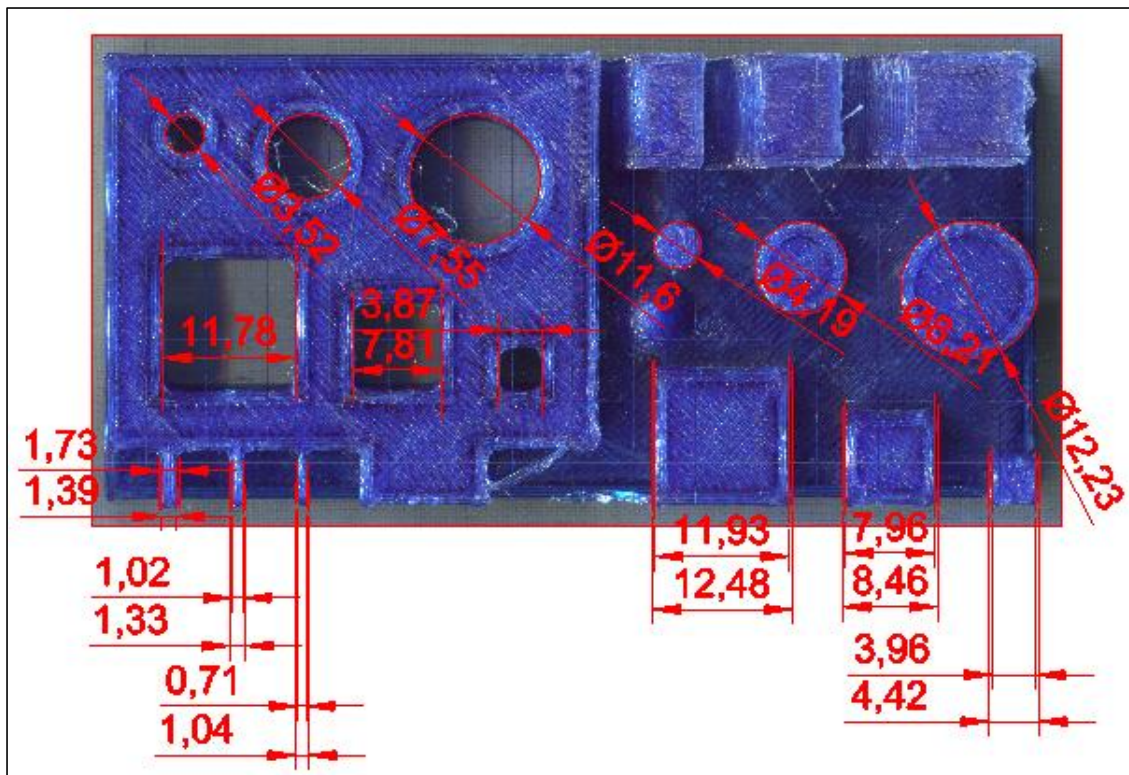
Vzorky z prvého experimentu boli pozorované na školskom mikroskope. Išlo o optický digitálny mikroskop. Maximálne zväčšenie mikroskopu bolo 1250 krát. Rozlíšenie web kamery bolo 1600x1200.

8.4.3 Drsnomer

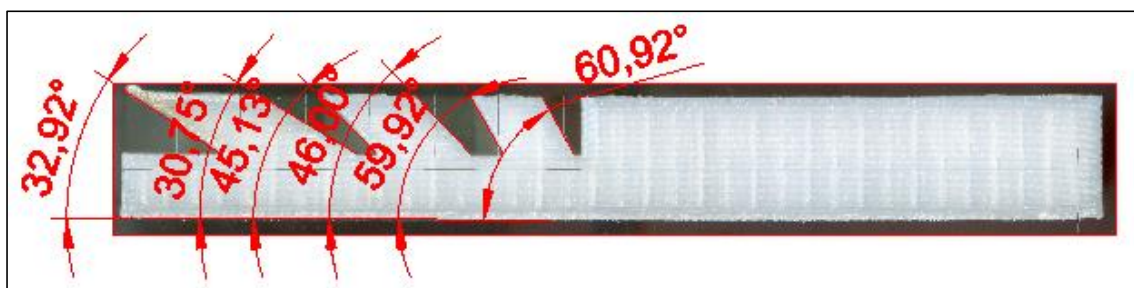
Na meranie drsnosti povrchu vzoriek bol použitý drsnomer Form Talysurf 50 od spoločnosti Taylor Hopson.

8.4.4 CAD softvér

Na spracovanie naskenovaných obrázkov bol použitý bezplatný CAD softvér DraftSight od spoločnosti Dassault Systèmes (viď obr. 62, 63).



Obr. 62 Meranie rozmerov z naskenovaného obrázku vrchnej plochy pomocou CAD softvéru DraftSight.

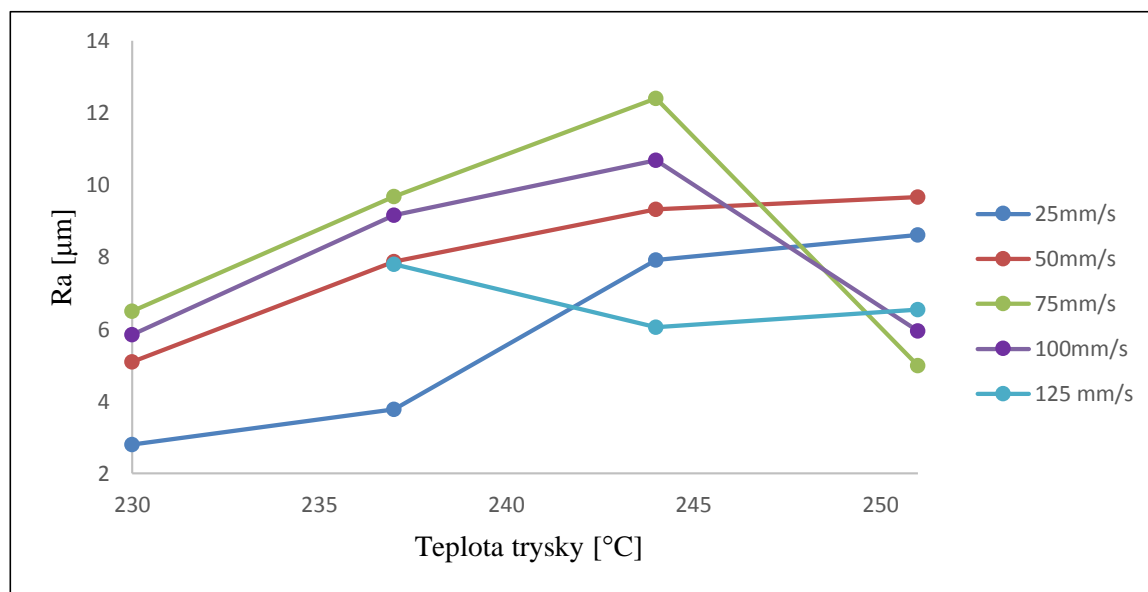


Obr. 63 Meranie rozmerov z naskenovaného obrázku bočnej plochy pomocou CAD softvéru DraftSight.

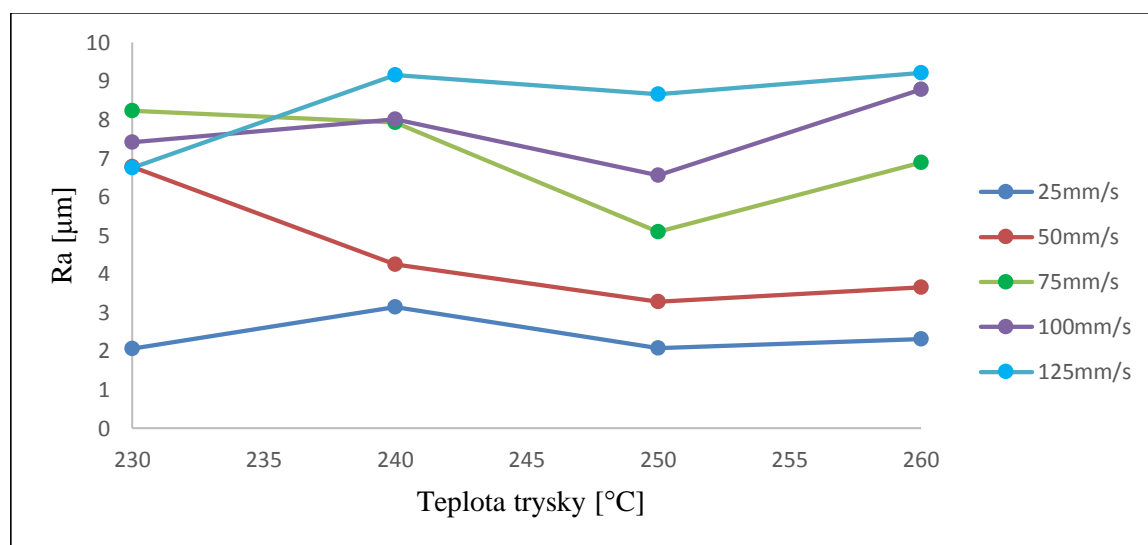
9 VYHODNOTENIE

Údaje získané pri experimentoch boli vložené do grafov. Vznikol veľký počet grafov, preto sú v práci uvedené len niektoré, ktoré v dostatočnej miere vystihujú podstatu výsledkov.

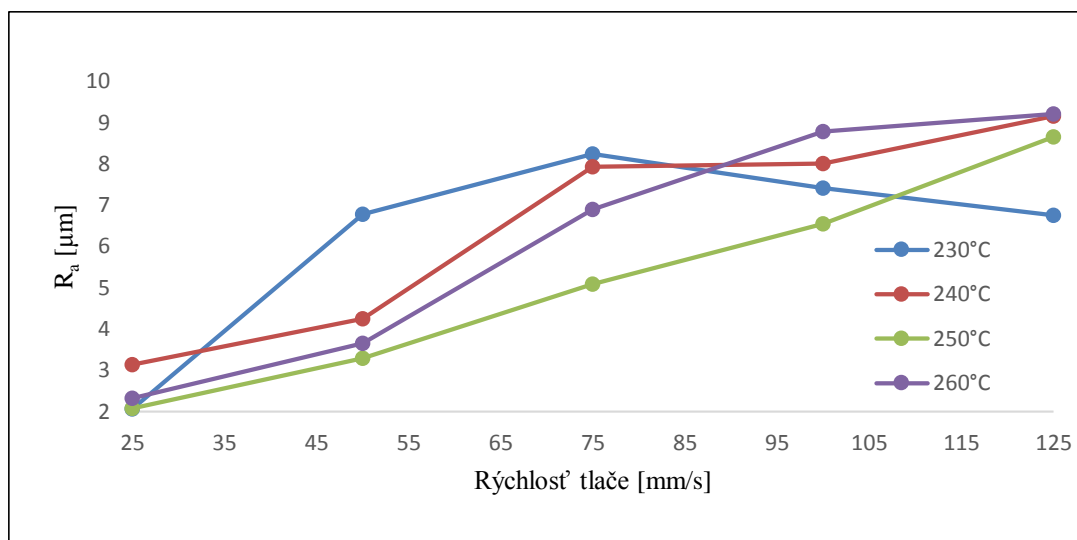
9.1 Drsnosť povrchu



Obr. 64 Stredná aritmetická hodnota drsnosti R_a vrchnej plochy v závislosti od teploty pre materiál PETG.



Obr. 65 Stredná aritmetická hodnota drsnosti R_a vrchnej plochy v závislosti od teploty pre materiál nylon.



Obr. 66 Stredná aritmetická hodnota drsnosti R_a vrchnej plochy v závislosti od rýchlosti pre materiál nylon.

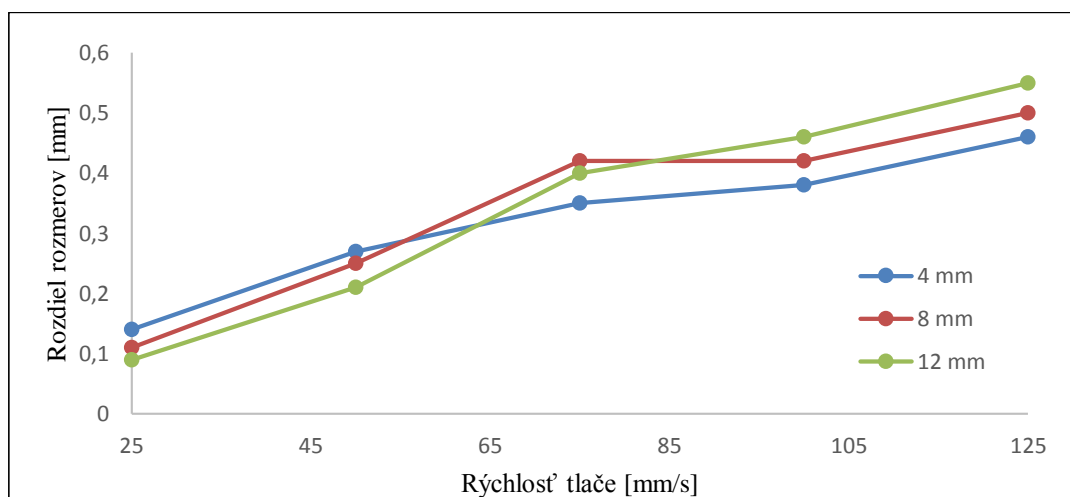
Čiastkový záver:

stredná aritmetická hodnota drsnosti povrchu R_a bola meraná drsnomerom na bočnej stene a vrchnej stene vzorky. Meranie bolo uskutočnené kolmo na smerovanie vlákien, pretože v tomto smere sa predpokladá, že bude drsnosť povrchu dosahovať najvyšších hodnôt. Aj keď hodnoty boli pomerne dosť rozptýlené autor urobil závery. Drsnosť povrchu bočných stien sa javila ako nezávislá na testovaných parametroch. Drsnosť povrchu vrchnej steny materiálu nylon sa javila ako nezávislá na teplote (viď obr. 65), ale závislá na rýchlosti (viď obr. 66). Hodnoty pre materiál PETG neboli jednoznačné, pričom ale z obr. 64 s časti vyplýva, že najnižšie hodnoty drsnosti sú pozorované pre najnižšie rýchlosti.

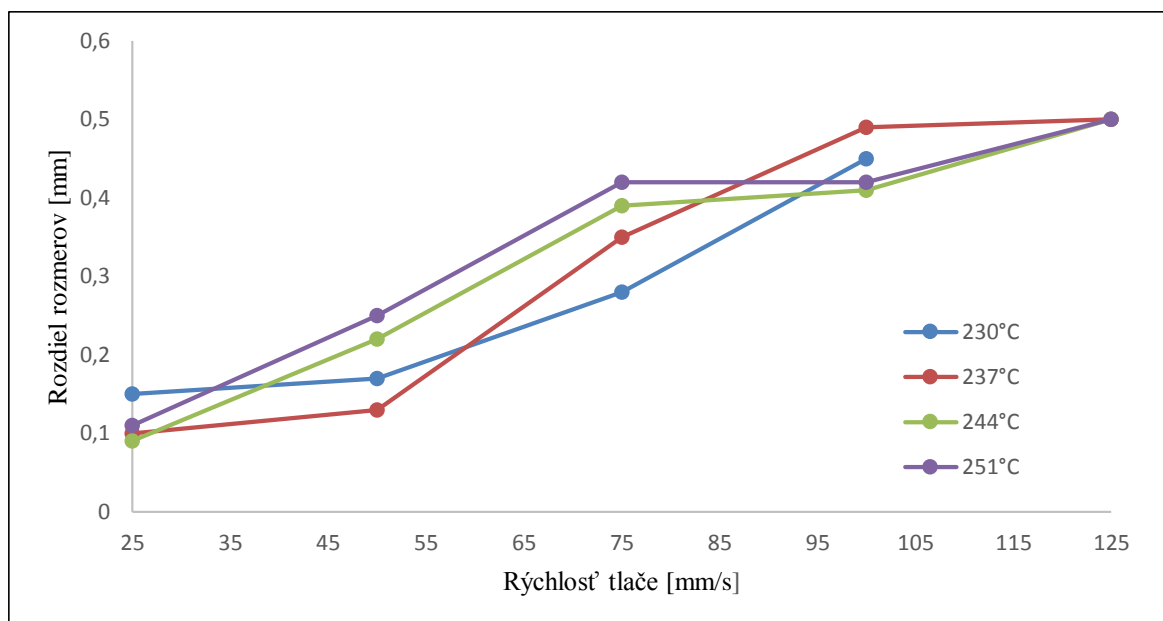
Tabuľky hodnôt, z ktorých boli grafy zostrojené sú súčasťou prílohy 3.

9.2 Kvádre

- PETG

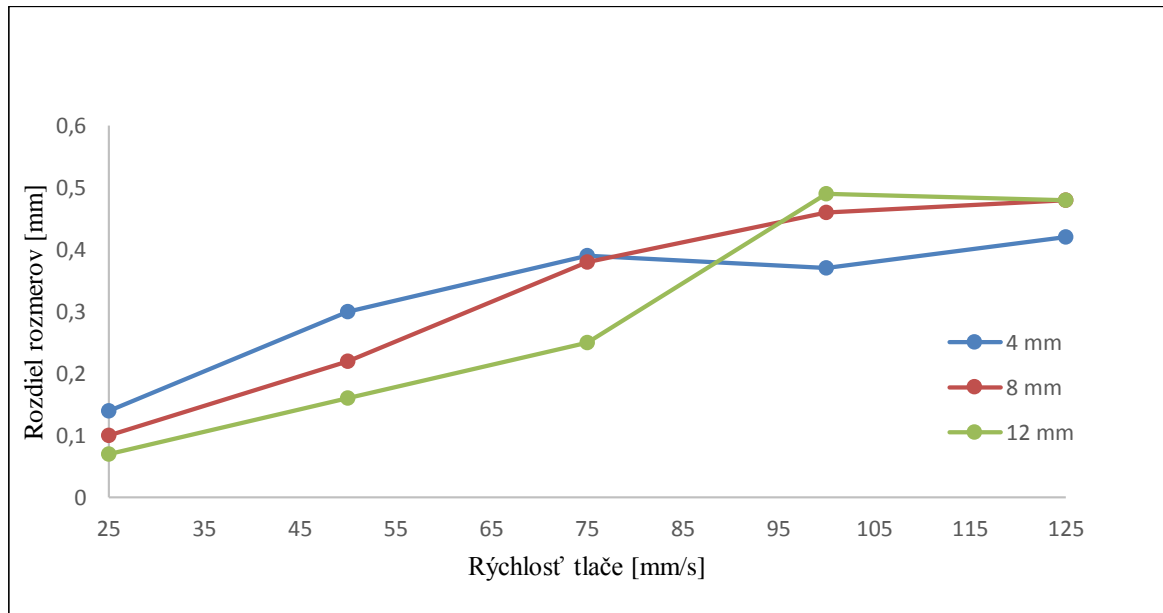


Obr. 67 Rozdiel horného a dolného rozmeru kvádrov zhotovených pri teplote 251°C v závislosti od rýchlosti. Materiál PETG.

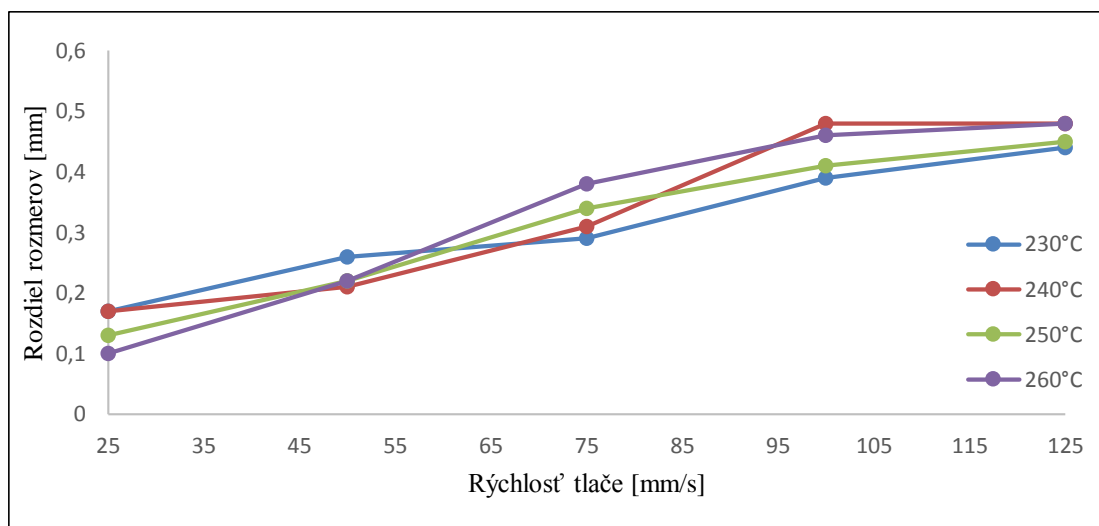


Obr. 68 Rozdiel horného a dolného rozmeru kvádrov o rozmere 8 mm v závislosti od rýchlosti. Materiál PETG.

- **Nylon**



Obr. 69 Rozdiel horného a dolného rozmeru kvádrov zhotovených pri teplote 260 °C v závislosti od rýchlosti. Materiál nylon.



Obr. 70 Rozdiel horného a dolného rozmeru kvádrov o rozmere 8 mm v závislosti od rýchlosti. Materiál nylon.

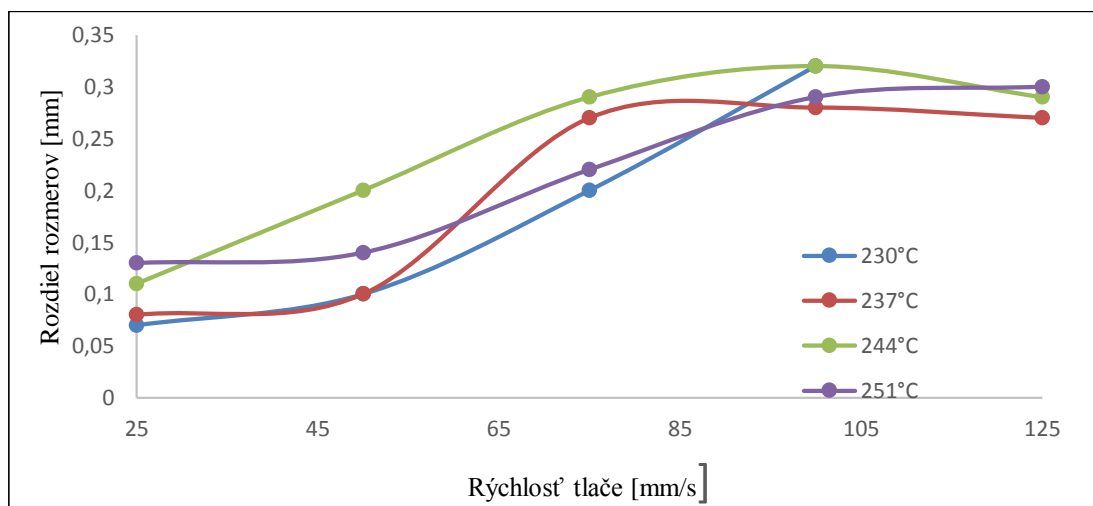
Čiastkový záver:

na základe rozmerov v rovine XY bolo pozorované, že dochádzalo k deformáciám v miestach rohov a v strede strán. Príčina tohto negatívneho javu bola pravdepodobne v zotrvačnom pohybe nataveného plastu. Vytlačaný materiál sa pri vysokých rýchlostiach v podstate rozliat mimo trajektóriu, ktorú opisuje špička trysky. Tento jav bol kvantifikovaný zjednodušeným spôsobom, ako rozdiel najväčšieho a najmenšieho rozmeru šírky hornej podstavy (viď obr. 67, 68, 69, 70). Vplyv teploty na tento jav nebol preukázaný, avšak na obr. 67, 68, 69, 70 je viditeľná výrazná závislosť od rýchlosti tlače. Čím vyššia rýchlosť, tým výraznejšia deformácia.

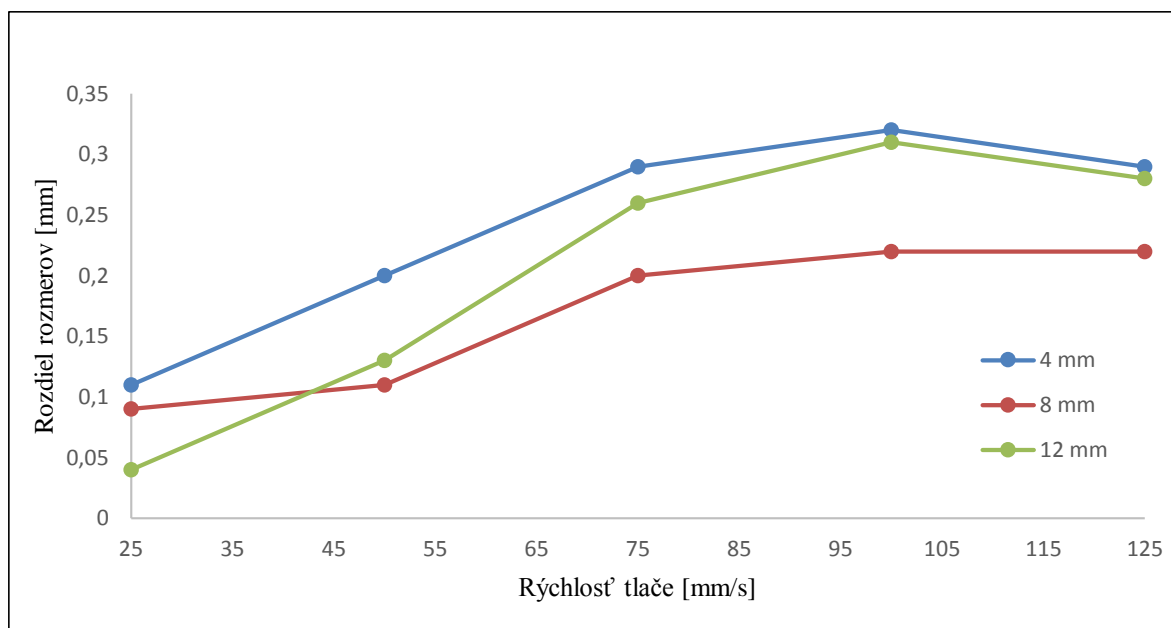
Tabuľky hodnôt z ktorých boli grafy zostrojené sú súčasťou príloh 4 a 5.

9.3 Tenké steny

- **PETG**

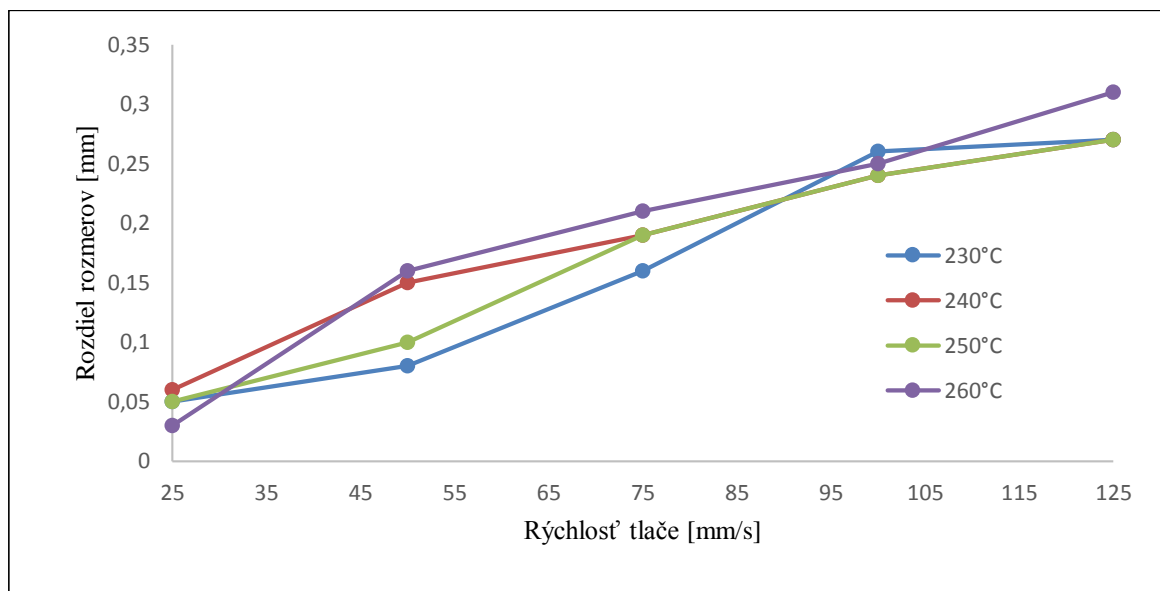


Obr. 71 Rozdiel horného a dolného rozmeru tenkých stien o šírke 1 perimeter v závislosti od rýchlosti. Materiál PETG.

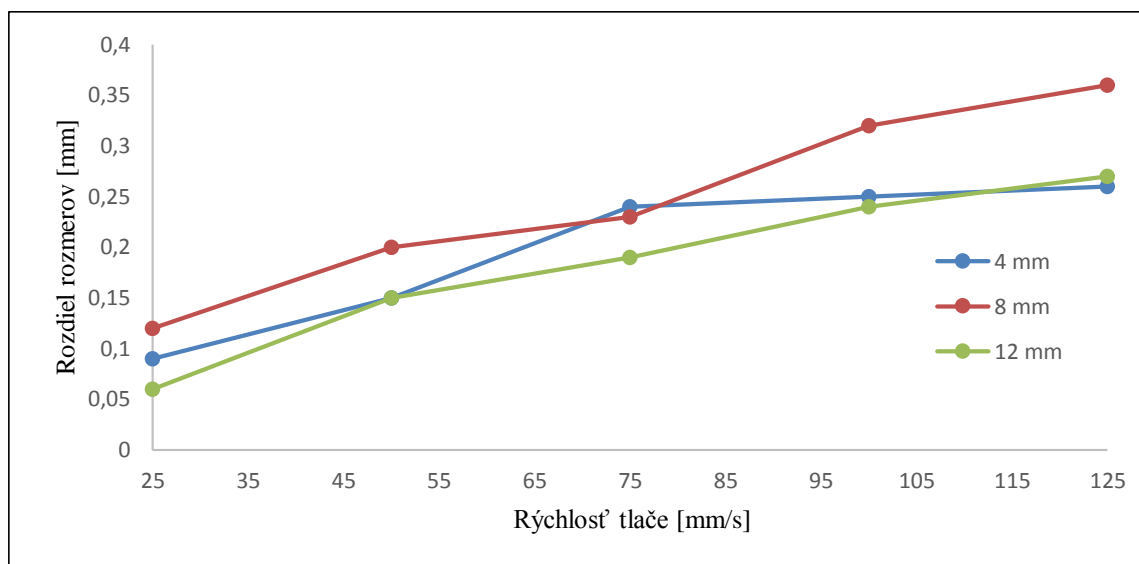


Obr. 72 Rozdiel horného a dolného rozmeru tenkých stien zhotovených pri teplote 251°C v závislosti od rýchlosti. Materiál PETG.

- **Nylon**



Obr. 73 Rozdiel horného a dolného rozmeru tenkých stien o šírke 4 perimetre v závislosti od rýchlosti. Materiál nylon.



Obr. 74 Rozdiel horného a dolného rozmeru tenkých stien zhotovených pri teplote 240 °C v závislosti od rýchlosti. Materiál nylon.

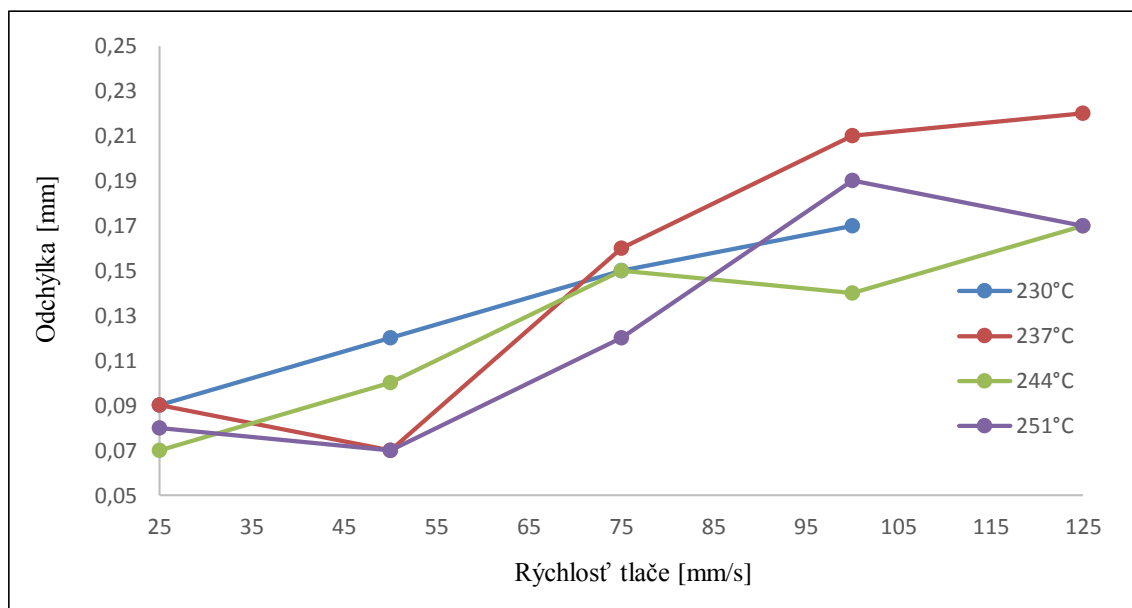
Čiastkový záver:

Pri tenkých stenách bol pozorovaný analogický negatívny efekt ako pri kvádroch. Pri nižších rýchlostiach boli deformácie menšie (viď obr. 71, 72, 73, 74). Tento jav bol opäť zjednodušene znázornený ako rozdiel najväčšieho a najmenšieho rozmeru šírky tenkých stien (viď obr. 71, 72, 73, 74). Vplyv teploty nebol preukázaný.

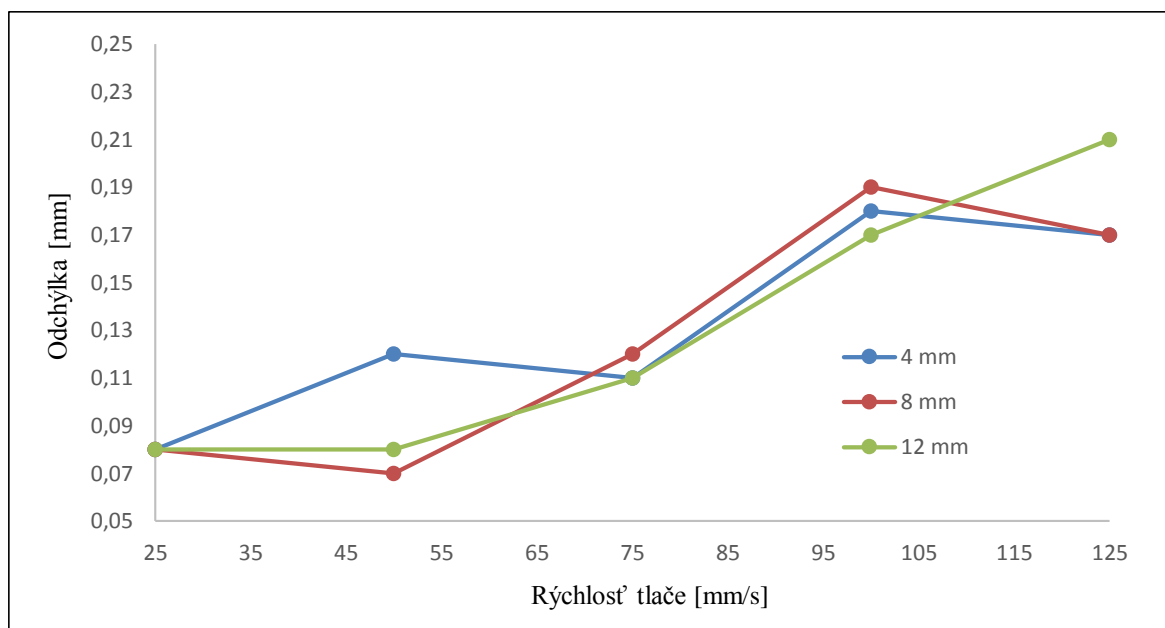
Tabuľky s hodnotami, z ktorých boli grafy zostrojené sú súčasťou príloh 6 a 7.

9.4 Valce

• PETG

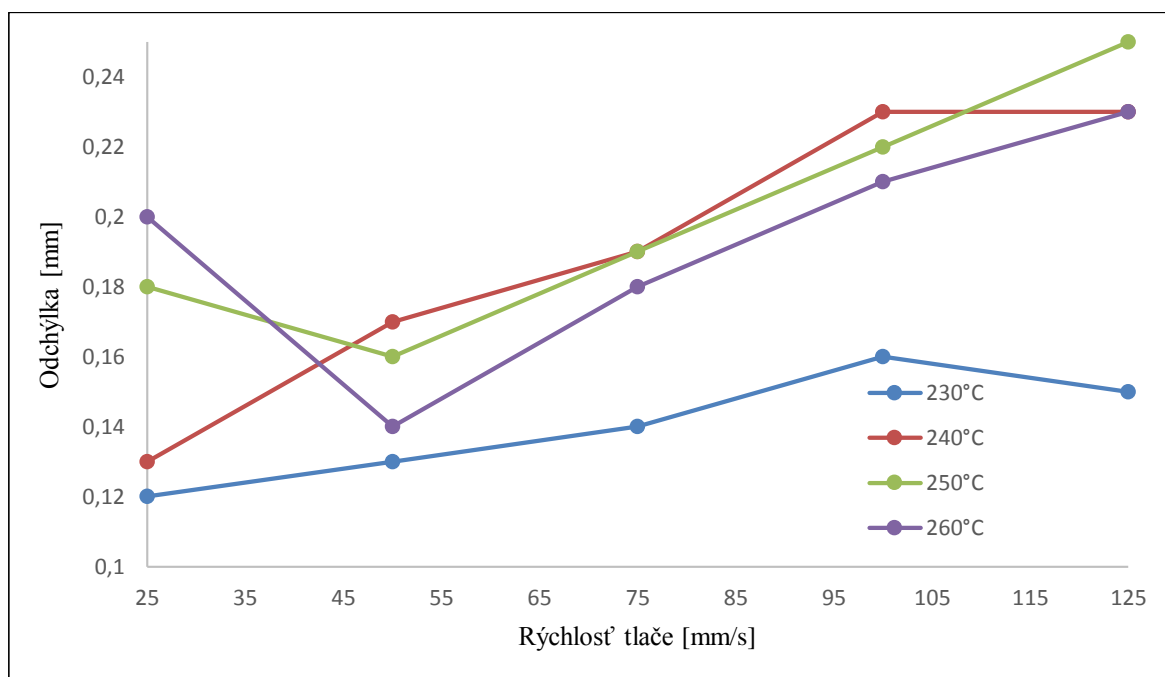


Obr. 75 Odchýlky priemeru valcov od nominálneho rozmeru v závislosti od rýchlosti. Nominálny priemer 8 mm, materiál PETG.

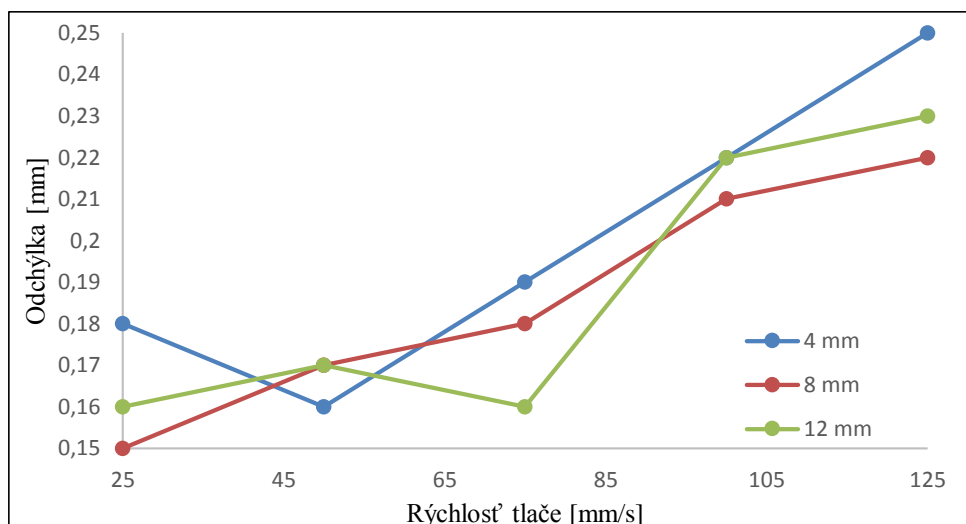


Obr. 76 Odchýlky priemeru valcov od nominálneho rozmeru v závislosti od rýchlosti. Teplota trysky 251°C, materiál PETG.

- **Nylon**



Obr. 77 Odchýlky priemeru valcov od nominálneho rozmeru v závislosti od rýchlosti. Nominálny priemer 4 mm, materiál nylon.



Obr. 78 Odchýlky priemeru valcov od nominálneho rozmeru v závislosti od rýchlosti. Teplota trysky 250°C, materiál nylon.

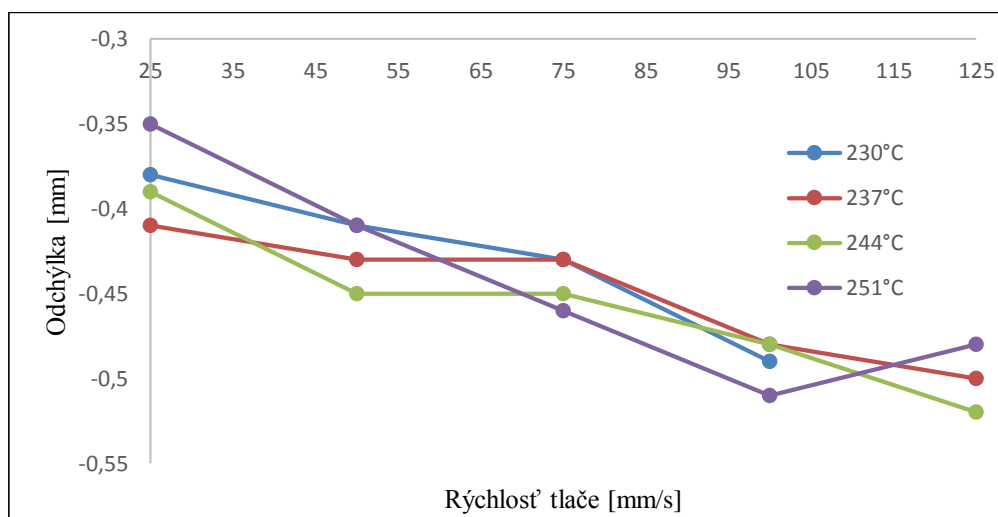
Čiastkový záver:

nebola preukázaná závislosť odchýlok rozmeru valcov na teplote. Aj keď pre nylon bolo pozorované, že pri najnižšej teplote 230 °C narastali odchýlky v závislosti od rýchlosti výrazne menej, ako pri ostatných teplotách (viď obr. 77). Odchýlky boli závislé od rýchlosti (viď obr. 75, 76, 77, 78). Jav je opäť možné vysvetliť analogicky ako pri kvádroch a tenkých stenách, teda že so zvyšujúcou sa rýchlosťou narastajú hodnoty zotrvačných síl pôsobiace na roztopený plast, ktorý sa v podstate rozleje mimo trajektóriu, ktorú opisuje špička trysky. Opäť použitie najnižšej rýchlosti viedlo k najmenším odchýlkam. Jav bol pozorovaný pre oba materiály.

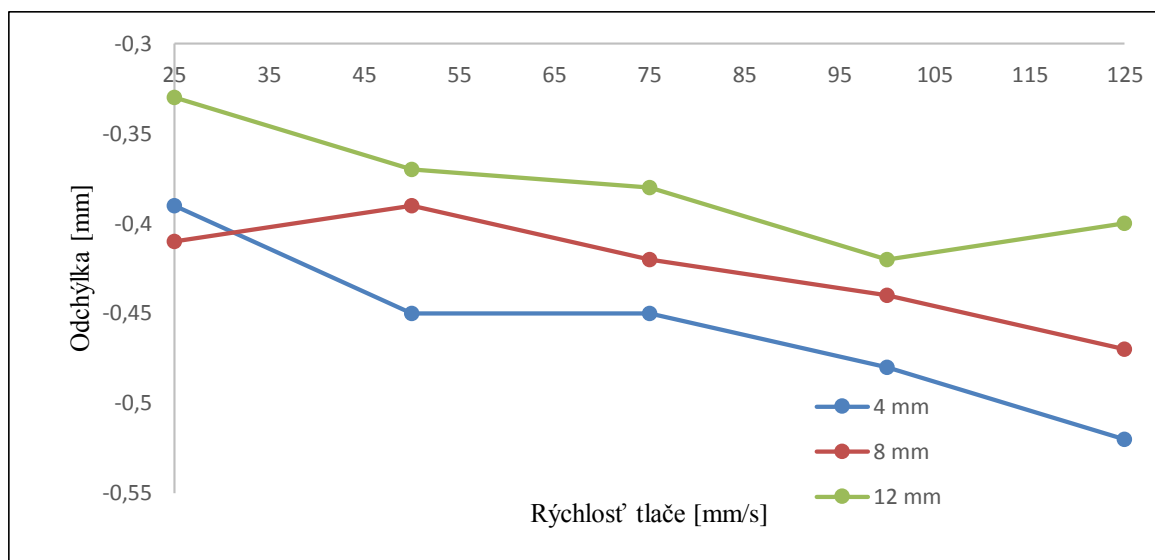
Tabuľky s hodnotami, z ktorých boli zostrojené grafy sú súčasťou prílohy 8.

9.5 Valcové diery

- **PETG**

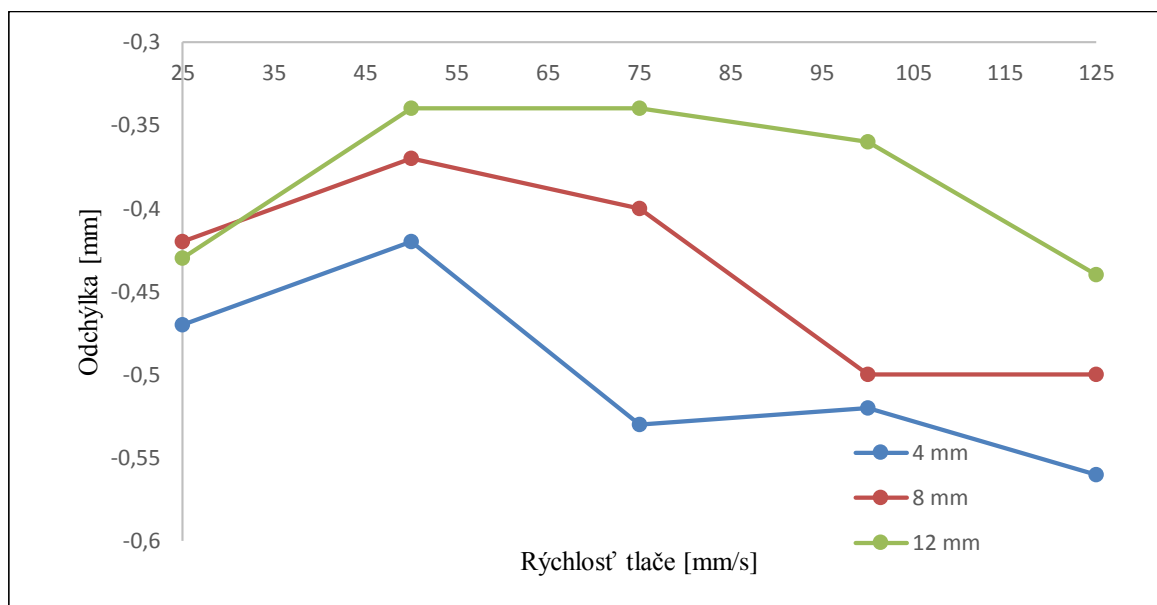


Obr. 79 Odchýlky priemeru dier od nominálneho rozmeru v závislosti od rýchlosti. Nominálny priemer 4 mm, materiál PETG.

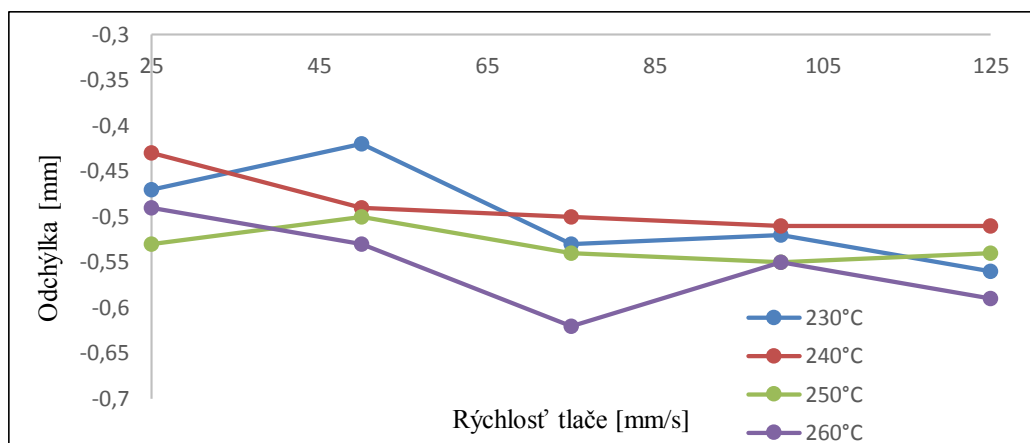


Obr. 80 Odchýlky priemeru dier od nominálneho rozmeru v závislosti od rýchlosti. Teplota trysky 244°C, materiál PETG.

- **Nylon**



Obr. 81 Odchýlky priemeru dier od nominálneho rozmeru v závislosti od rýchlosti. Teplota trysky 230°C, materiál nylon.



Obr. 82 Odchýlky priemeru dier od nominálneho rozmeru v závislosti od rýchlosti. Nominálny priemer 4 mm, materiál nylon.

Čiastkový záver:

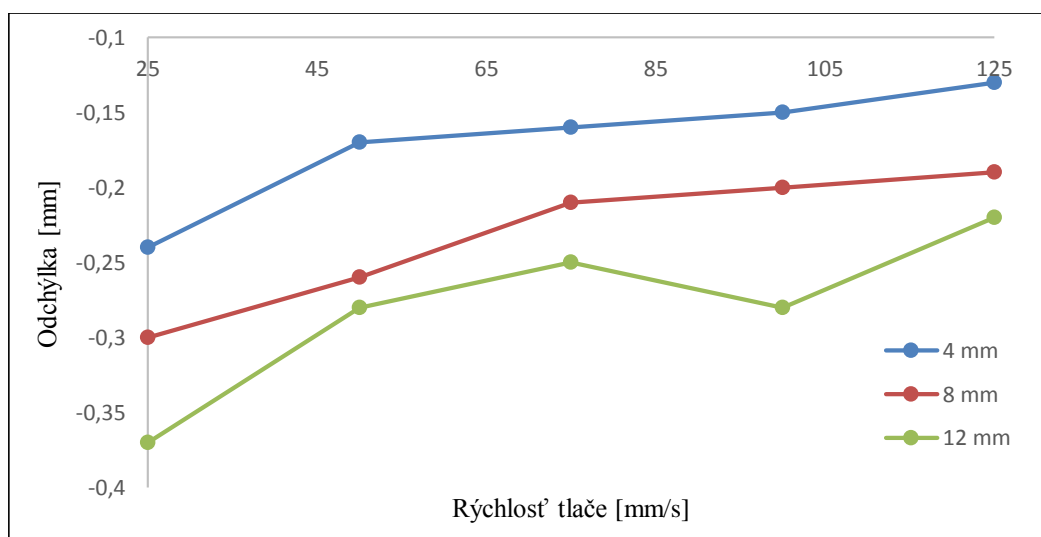
Závislosť od teploty nebola preukázaná ani pre PETG ani pre nylon. Pre materiál PETG bola pozorovaná závislosť odchýlok priemerov dier od rýchlosti (viď obr. 79, 80). Čím vyššia rýchlosť, tým sa priemery dier viac zmenšovali. Pre nylon bola pozorovaná taktiež závislosť od rýchlosti, ale v menšej miere ako pre PETG (viď obr. 81, 82). Pre oba materiály platilo, že diery s menším nominálnym priemerom mali väčšie odchýlky (viď obr. 80, 81). Čím väčší nominálny rozmer, tým boli odchýlky menšie, teda diery boli väčšie.

Tabuľky s hodnotami, z ktorých boli grafy zostrojené sú súčasťou príloh 9.

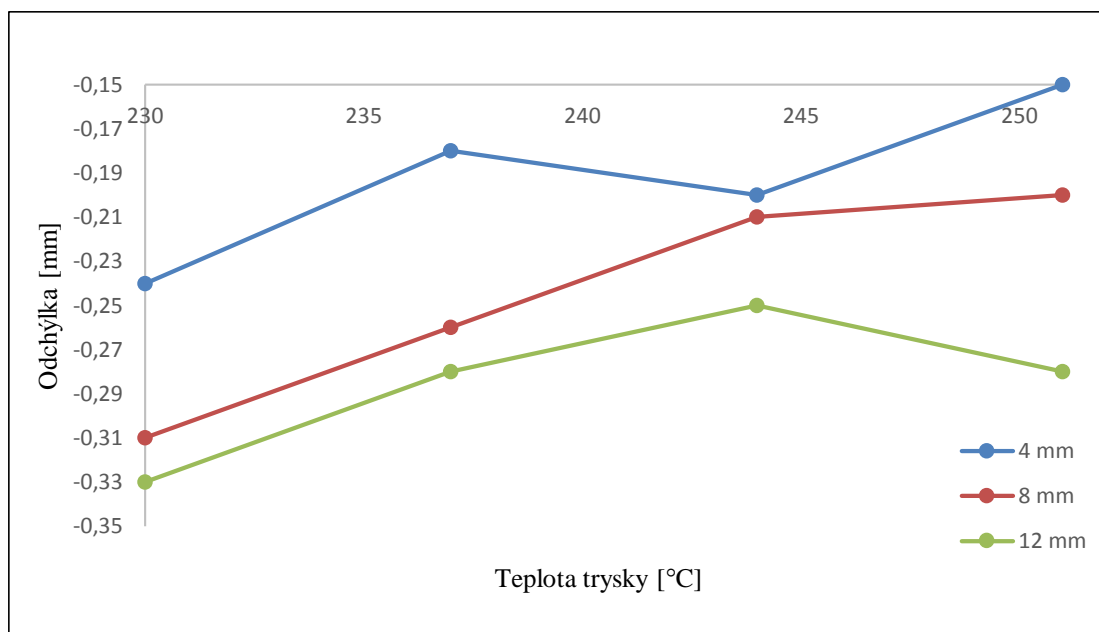
9.6 Štvorcové diery

- **PETG**

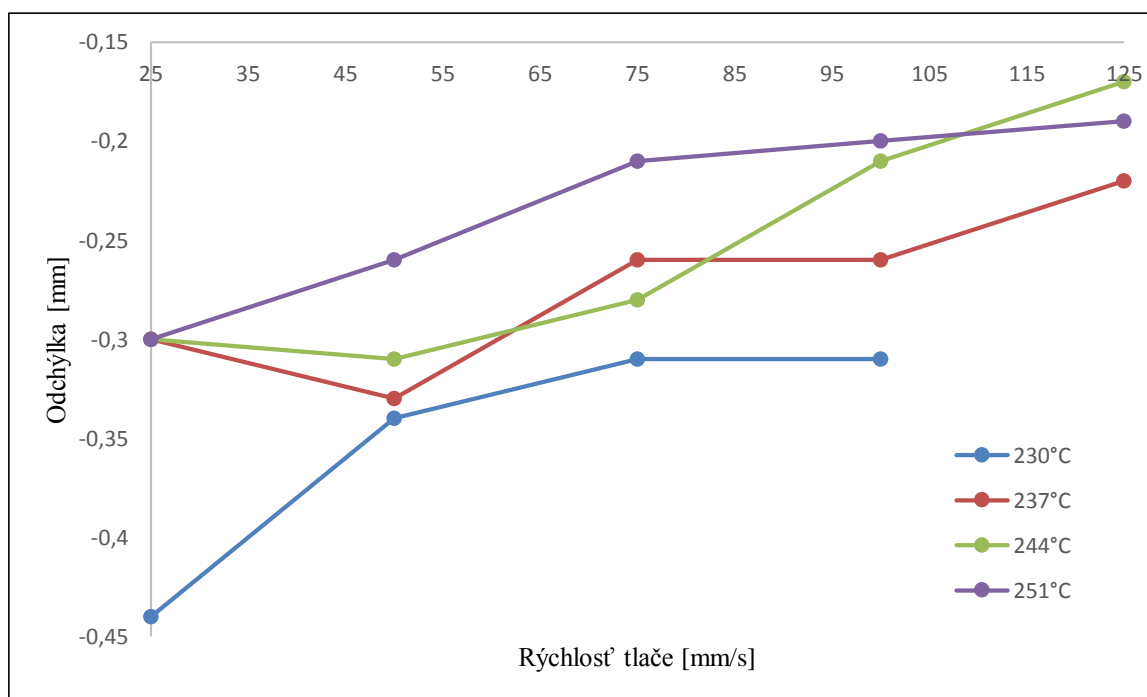
Odchýlky boli závislé aj na teplote aj na rýchlosti. Najmenšie diery vykazovali najmenšie odchýlky.



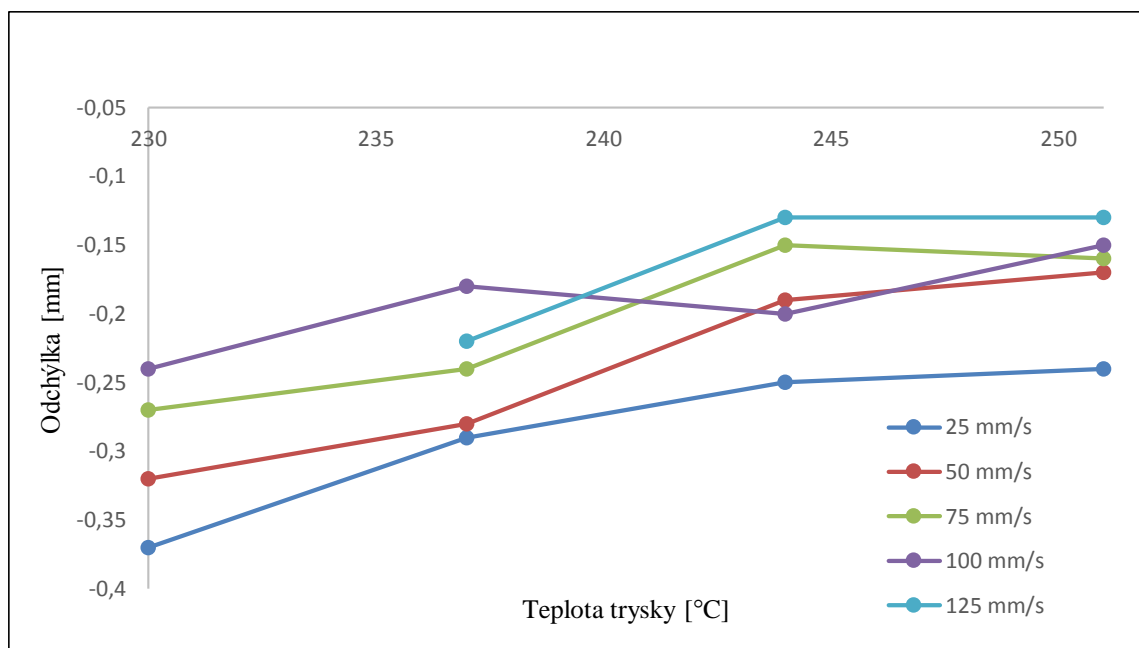
Obr. 83 Odchýlky od nominálneho rozmeru v závislosti od rýchlosti. Teplota trysky 251°C, materiál PETG.



Obr. 84 Odchýlky od nominálneho rozmeru v závislosti od teploty. Rýchlosť tlače 100 mm/s, materiál PETG.

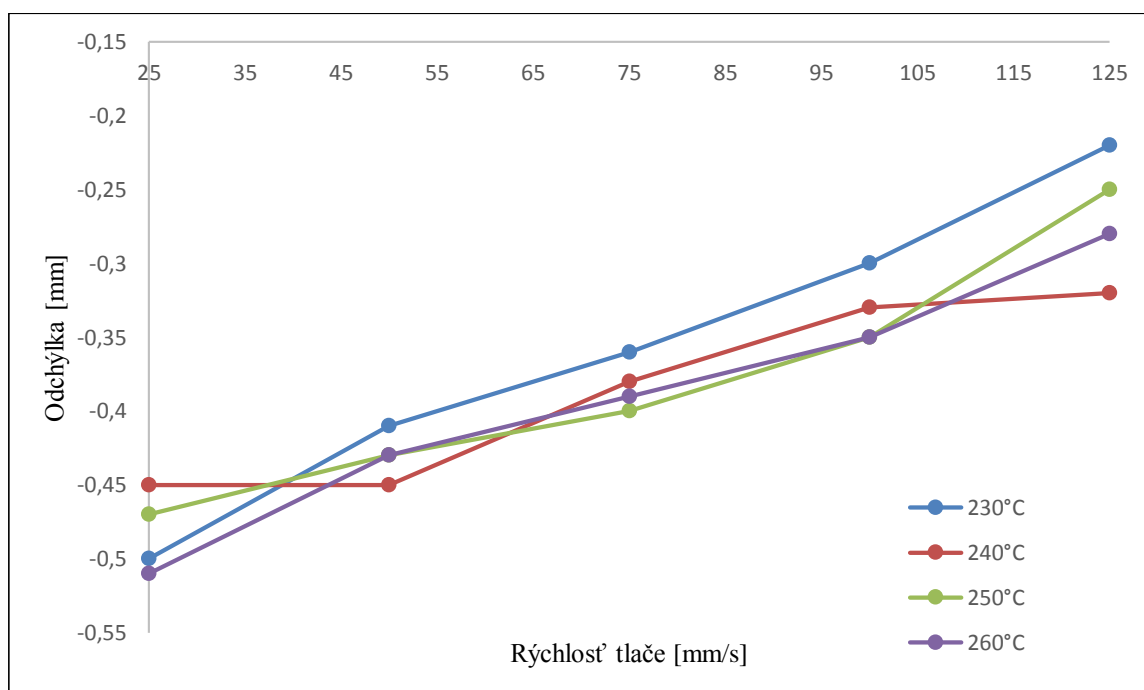


Obr. 85 Odchýlky od nominálneho rozmeru v závislosti od rýchlosti. Nominálny rozmer 8 mm, materiál PETG.

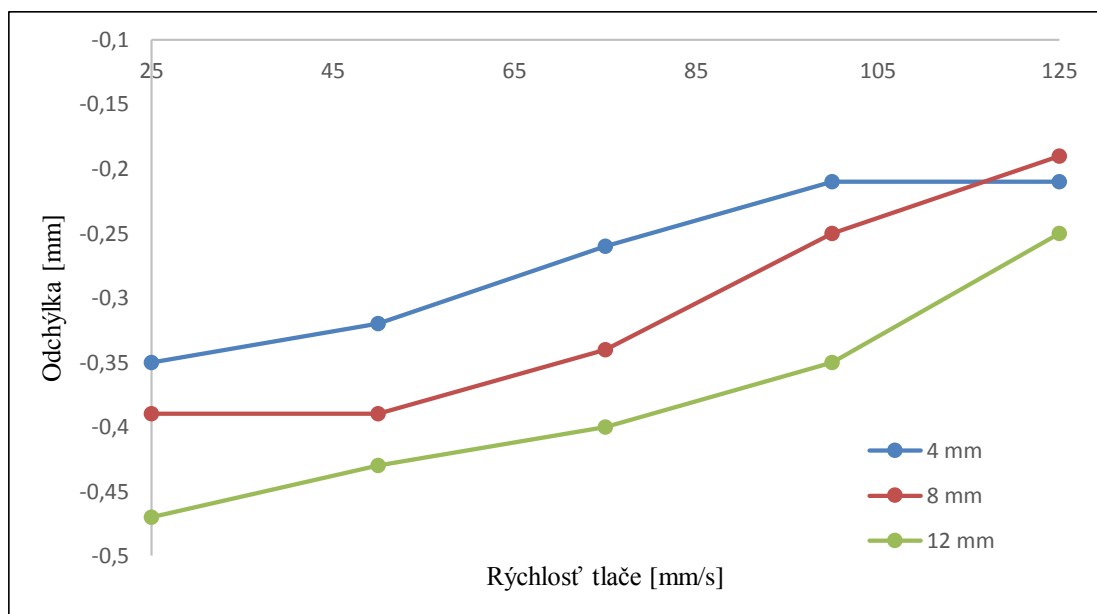


Obr. 86 Odchýlky od nominálneho rozmeru v závislosti od teploty. Nominálny rozmer 4 mm, materiál PETG.

- **Nylon**



Obr. 87 Odchýlky od nominálneho rozmeru v závislosti od rýchlosti. Nominálny rozmer 12 mm, materiál nylon.



Obr. 88 Odchýlky od nominálneho rozmeru v závislosti od rýchlosti. Teplota trysky 250 °C, materiál nylon.

Čiastkový záver:

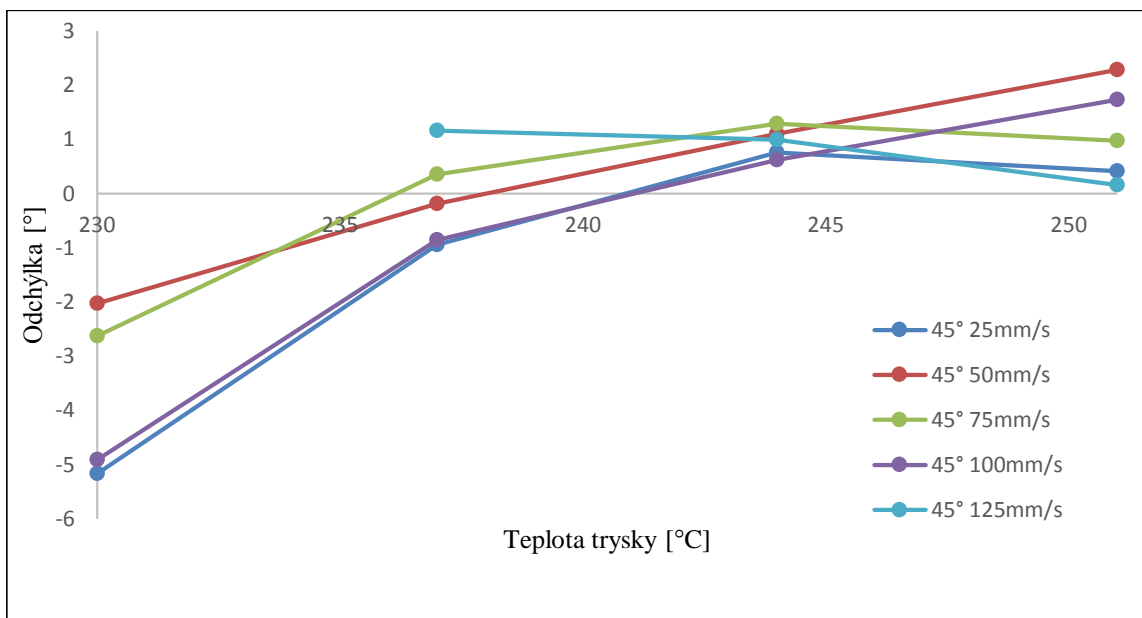
Pre oba materiály z obr. 83, 85, 87, 88 vyplýva, že so vzrastajúcou sa rýchlosťou klesajú odchýlky od nominálneho rozmeru. Diery sa so vzrastajúcou rýchlosťou zväčšovali. Tento jav je opačný ako pri valcových dierach. Odchýlky materiálu PETG boli závislé aj od teploty. So stúpajúcou teplotou klesali odchýlky, diery sa zväčšovali (viď obr. 84, 86). Pre nylon nebola preukázaná závislosť odchýlok od teploty. Pre oba materiály platilo, že diery s najmenším nominálnym rozmerom mali najmenšie odchýlky (viď obr. 83, 84, 88). Čím väčší nominálny rozmer, tým boli odchýlky väčšie, teda diery boli menšie. Tento jav je opačný ako pri valcových dierach.

Tabuľky s hodnotami, z ktorých boli grafy zostrojené sú súčasťou prílohy 10..

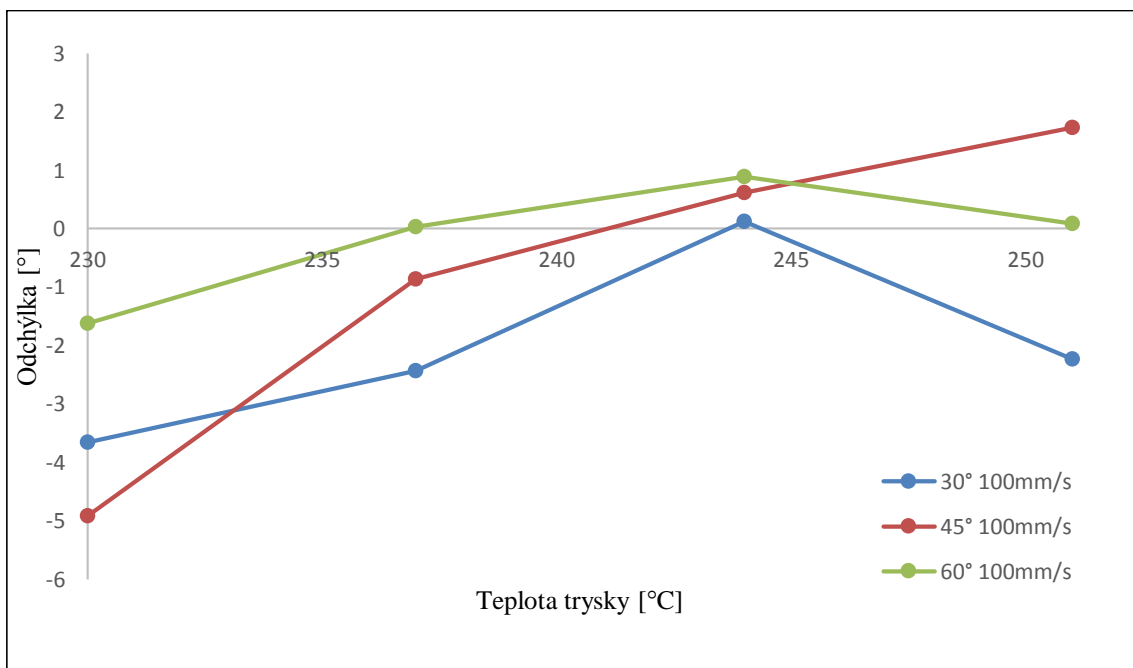
9.7 Previsy a naklonené roviny

9.7.1 Previsy

- PETG

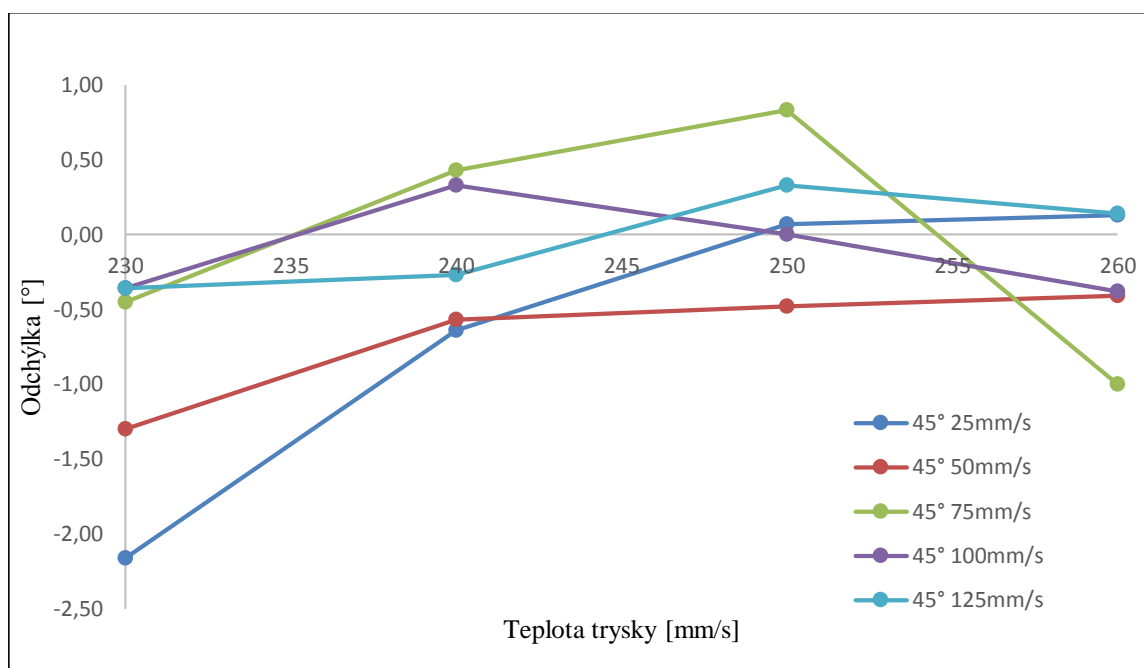


Obr. 89 Uhlové odchýlky v závislosti od teploty. Previs 45°, materiál PETG.



Obr. 90 Uhlové odchýlky v závislosti od teploty. Rýchlosť tlače 100 mm/s, materiál PETG.

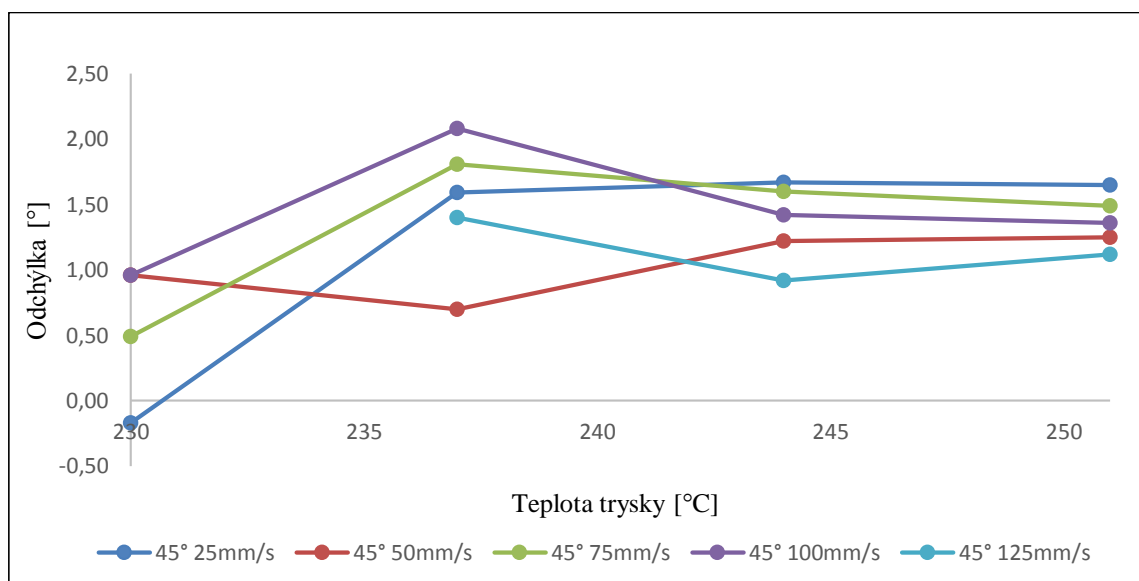
- **Nylon**



Obr. 91 Uhlové odchýlky v závislosti od teploty. Previs 45°, materiál nylon.

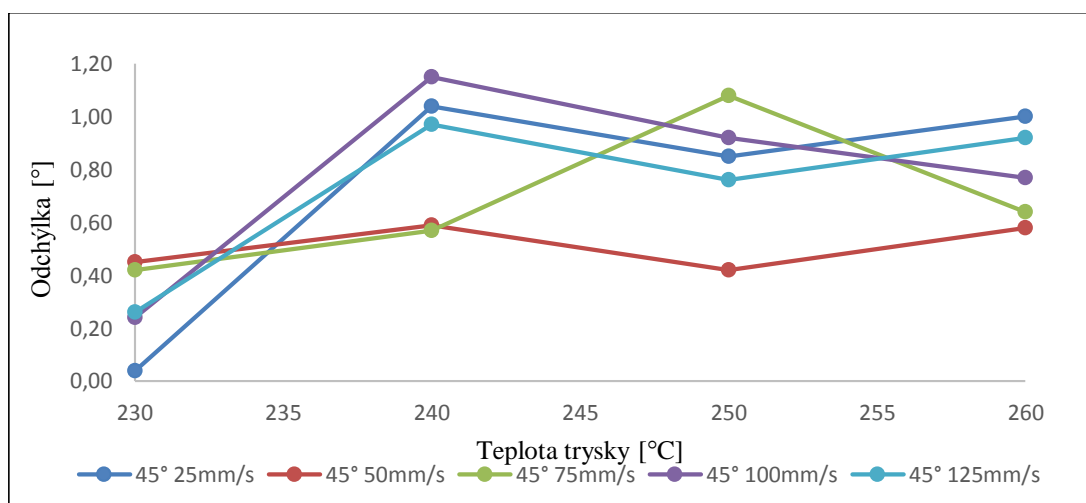
9.7.2 Šikmé plochy

- **PETG**



Obr. 92 Uhlové odchýlky v závislosti od teploty. Previs 45°, materiál PETG.

- **Nylon**



Obr. 93 Uhlové odchýlky v závislosti od teploty. Previs 45°, materiál NYLON.

Čiastkový záver:

Z nameraných hodnôt vyplýva, že odchýlky uhlov naklonených rovín sú v kladných hodnotách zatiaľ čo uhlové odchýlky previsov boli aj kladné aj záporné. Viditeľná závislosť od rýchlosti nebola pozorovaná. Z obr. 89, 90, 91 je badateľný určitý vplyv teploty trysky na priebeh grafov. Pre PETG bolo pozorované, že so vzrastajúcou sa teplotou uhlové odchýlky prechádzajú zo záporných smerom ku kladným hodnotám.

Pre materiál PETG bolo pozorované, že uhlové odchýlky 30° previsov smerujú viac do záporných hodnôt, zatiaľ čo 60° do hodnôt kladných (viď obr. 90).

Previsy naklonené o 30° vzhľadom k podstave nebolo možné zhotoviť v optimálnej kvalite. Preto autor neodporúča tlačiť takéto previsy bez podpory.

Tabuľky s hodnotami, z ktorých boli zostrojené grafy sú súčasťou príloh 11 a 12.

9.8 Premostenie

Na každej vzorke bolo navrhnuté premostenie o hrúbke jednej vrstvy. Pre materiál PETG sa nepodarilo na žiadnej vzorke zhotoviť premostenie. Pre materiál nylon sa podarilo zhotoviť premostenie len pre najnižšiu rýchlosť 25 mm/s a najvyššiu teplotu 260 °C. Ani toto premostenie nebolo optimálne.



Obr. 94 Jediné zhotovené premostenie. Materiál nylon, teplota trysky 260 °C, rýchlosť tlače 25 mm/s

10 DISKUSIA

Závislosti zistené zo získaných údajov približne odpovedajú záverom nachádzajúcim sa v rešeršnej časti. Teplota mala výrazný vplyv na silu spojenia medzi vláknami. Čím vyššia teplota, tým silnejšie spojenie vzniklo. Rýchlosť mala výrazný vplyv na rozmerovú presnosť a drsnosť povrchu, zatiaľ čo teplota sa javila buď ako málo významný, nevýznamný parameter alebo na základe nedostatočného počtu meraní a veľkého rozptylu hodnôt nebolo možné potvrdiť vplyv tohto parametru na kvalitu povrchu a rozmerovú presnosť.

Môžu byť vznesené námietky týkajúce sa veľkosti intervalu testovaných teplôt. Bol zvolený interval teplôt udávaný výrobcom priamo na kotúčoch tlačových strún. Testovanie pri vyšších teplotách je námet na experimenty do budúcnosti. Hardvér tlačiarne nedovoľoval dosiahnutie vyšších teplôt, respektíve to nebolo odporúčané. Kontakty termistoru boli izolované kaptonovou trubičkou. Kapton pri teplotách vyšších ako 250 °C - 260 °C začína degradovať. Preto aj použitie teploty 260 °C pri tlačení nylonu je otáznе. Tento nedostatok je možné vyriešiť voľbou izolačného materiálu, ktorý znesie vyššie teploty. Autor však nemal takýto materiál k dispozícii počas vykonávania experimentov.

Vzorky pre PETG boli tlačенé na kaptonovú pásku. Táto metóda sa osvedčila. Tlač na sklo nebola testovaná. Avšak kaptonová páska sa pri tlačení nylonu neosvedčila. Objekt na kaptone nedržal, rohy sa odlepili a objekt sa zdeformoval. Lepidlo ani ukotvenie rohov pridanými plochami nepomohlo. Pri vyšších teplotách objekt zostal prichytený k páske, ale samotná páska sa odlepila od podložky a objekt sa zdeformoval. Preto sa neosvedčila ani teplota podložky 110 °C. Na základe internetového zdroja [70] bolo ako tlačový povrch testované sklo. Sklo bolo obrúsené brúsnym papierom a potreté tuhým kancelárskym lepidlom. Teplota podložky bola zvolená 50 °C. Objekt držal na podložke, nedošlo k odlepeniu rohov ani k žiadnemu skrúteniu. Dokončený objekt nebolo možné oddeliť od skla. K oddeleniu musela byť použitá väčšia sila a s objektom sa odštiepil aj kúsok skla. Pri testoch bez lepidla objekt na skle nedržal. Ako vhodný povrch sa osvedčilo sklo pri izbovej teplote (pri vyšších teplotách bol problém oddeliť objekt od skla), bez zdrsnenia brúsnym papierom, potreté tuhým kancelárskym lepidlom. Pre zabránenie odlepeniu rohov bola spodná vrstva vzorky rozšírená (viď obr. 61). Zvýšila sa tak kontaktná plocha medzi vzorkou a sklom a zároveň táto plocha umožnila aj jednoduchšie odlepovanie vzorky od podložky (zachytenie kliešťami a podvihnutie). Experiment so zdrsneným sklom preukázal, že táto možnosť by mohla nájsť uplatnenie pre rôzne materiály. Autor odporúča urobiť experiment pre tlač rôznych materiálov a rôzne zrnitosti použitého brúsneho papiera. Pri optimálnych výsledkoch by mohla byť znížená teplota podložky aj pre tie materiály, ktoré normálne vyžadujú vysoké teploty (100 – 130°C).

Pri zhotovovaní previsov a šikmých plôch neboli na základe nejednoznačných výsledkov vyvedené jednoznačné závery. Pozorovateľné bolo len to, že odchýlka šikmých plôch bola kladná (uhol sklonu bol väčší ako nominálna hodnota). Zatiaľ čo hodnoty odchýlok previsov dosahovali kladné aj záporné hodnoty. Pre PETG bolo pozorované, že so vzrastajúcou sa teplotou uhlové odchýlky prechádzajú zo záporných smerom ku kladným hodnotám. Je predpoklad, že tvorbe previsov by mohlo pomôcť chladenie vytlačeného materiálu prúdom vzduchu čo je aj námet na experiment do budúcnosti.

Pri tlačení premostení sa podarilo zhotoviť premostenie len pre jednu vzorku materiálu nylon a to pre najvyššiu teplotu 260 °C a najnižšiu rýchlosť 25 mm/s. Je nutné vykonať komplexnejší experiment, ktorý by v sebe zahŕňal aj vplyv *súčiniteľa premostovania (bridge multiplier)*, ktorý je obdobou *súčiniteľa prietoku*. Je predpoklad, že pri zvýšení prietoku počas premostovania by premostenie mohlo byť úspešne realizované aj pri vyšších rýchlostiach.

Aj pri optimálnych hodnotách testovaných parametrov boli pozorované rozmerové odchýlky. Diery boli menšie ako nominálny priemer a všetky vyčnievajúce prvky (kvádre, tenké steny) vykazovali kladnú odchýlku. Toto odpovedá aj záverom v rešeršnej časti. Riešením môže byť dodatočná úprava rozmerov objektov v CAD softvéry a opätovné vytlačenie objektu.

ZÁVER

Na základe údajov zistených z experimentov autor vyjadril nasledovné závery:

- s pozorovania vzoriek pod mikroskopom vyplynulo, že teplota aj rýchlosť tlače majú vplyv na kvalitu povrchu vytlačených vlákien. So zvyšujúcou sa teplotou bolo možné použiť vyššie rýchlosti pri zachovaní dobrej kvality povrchu vlákien (hladký povrch). Pri nízkych teplotách a vysokých rýchlostiach bol povrch vlákien zvráskavený.
- teplota výrazne vplývala na kvalitu spojenia medzi vláknami. Pri zvyšujúcej sa teplote sa zosilňovala aj väzba medzi vláknami. Najnižšia testovaná teplota bola nedostatočná, čo bolo výrazné najmä pri vzorke z nylonu, ktorá vykazovala veľmi slabé spojenia aj pri nízkych rýchlostiach. So zvyšujúcou sa teplotou bolo možné použiť vyššie rýchlosti, pričom výsledné spojenia medzi vláknami sa javili stále ako silné.
- nebola preukázaná závislosť drsnosti povrchu bočných stien na testovaných parametroch. Hodnoty drsnosti povrchu vrchnej steny vzoriek zhotovených z materiálu nylon sa javili ako závislé od rýchlosti. Spolu s rýchlosťou narastala aj hodnota strednej aritmetickej hodnoty drsnosti povrchu R_a . Pre materiál PETG nebola pozorovaná takáto jednoznačná závislosť. Avšak určitý náznak zvyšovania sa drsnosti povrchu so zvyšujúcou sa rýchlosťou bol pozorovaný aj preto, lebo najmenšie hodnoty drsnosti boli získané zo vzoriek zhotovených pri najnižšej rýchlosti.
- rýchlosť tlače mala výrazný vplyv na rozmerovú presnosť a deformáciu jednotlivých geometrických prvkov na zhotovených vzorkách. Čím vyššia rýchlosť, tým boli odchýlky od nominálnych rozmerov a deformácie väčšie. Pri valcoch bolo pozorované so zvyšujúcou sa rýchlosťou zväčšovanie priemeru. Pri dierach sa so zvyšujúcou rýchlosťou diery zmenšovali. Pri štvorcových dierach bol pozorovaný opačný jav ako pri dierach valcových. Štvorcové diery sa zvyšujúcou rýchlosťou zväčšovali. V tomto prípade bol meraný najväčší vnútorný rozmer. Kvádre a tenké steny vykazovali prebytok materiálu v rohoch. Tento negatívny jav narastal so zvyšujúcou sa rýchlosťou. Zatiaľ čo sa v rohoch hromadil nechcený materiál, uprostred strán štvorcov a tenkých stien materiál ubúdala. Tento negatívny efekt je zaznamenaný graficky ako rozdiel hodnôt najväčšieho a najmenšieho rozmeru.
- autor odporúča pre oba materiály najnižšiu z testovaných rýchlostí 25 mm/s a najvyššie teploty 251 °C pre PETG a 260 °C pre nylon. Teplota mala významný vplyv na kvalitu spojenia medzi vláknami. Najnižšia rýchlosť vykazovala najnižšie deformácie a najlepšiu kvalitu vrchného povrchu.

ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

1. FDM Technology [online]. Stratasys, 2016 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z:
<http://www.stratasys.com/3d-printers/technologies/fdm-technology>
2. CANESSA, E., C. FONDA a M. ZENNARO (eds.). Low-cost 3D Printing for Science, Education & Sustainable Development [online]. ICTP—The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, 2013 [cit. 2016-05-23]. ISBN ISBN 92-95003-48-9. Dostupné z:
http://web.archive.org/web/20150407185109/http://sdu.ictp.it/3d/book/Low-cost_3D_printing_screen.pdf
3. RepRap project. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2016 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z:
https://en.wikipedia.org/wiki/RepRap_project
4. BOWYER, Adrian, Rhys JONES, Patrick HAUFE, Ed SELLS, Pejman IRAVANI, Vik OLLIVER a Chris PALMER. RepRap - The Replicating Rapid Prototyper. In: Robotica [online]. CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 2009 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://reprap.org/mediawiki/images/d/da/Jones-et-al-paper.pdf>
5. BOWYER, Adrian. The Replicating Rapid-prototyper: moving hardware through the wires. In: World Public Library [online]. University of Bath, 2006 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z:
<http://uploads.worldlibrary.net/uploads/pdf/201106180351bowyer.pdf>
6. Category:Extruders. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2015 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z:
<http://reprap.org/wiki/Category:Extruders>
7. Dentro la stampante 3D: i consigli degli esperti. In: 3DARWIN DA IDEA A MATERIA [online]. 2015 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z:
<http://www.3darwin.it/3darwin-blog/stampante-3d-fdm-come-stampare/>
8. JAROŠEK, Pavel a Daniel LENC. Návod na stavbu tiskárny REBEL II. In: JRC GAMECENTRUM [online]. JRC Czech [cit. 2016-05-23]. Dostupné z:
http://www.jrc.cz/3dsoubory/navod_rebel_ii_051.pdf
9. Sada hliníkových profilov pre REBEL II. In: BRLOH [online]. Bratislava: JRC SK [cit. 2016-05-23]. Dostupné z:
http://www.brloh.sk/3d_tlac_sada_hlinikovych_profilov_pre_rebel_ii
10. List of electronics. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2016 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z:
http://reprap.org/wiki/List_of_electronics
11. Arduino Mega ADK Rev3. In: Alza [online]. 2016 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z:
<https://www.alza.sk/arduino-mega-adk-rev3-d2426300.htm#popis>
12. Arduino Mega Pololu Shield. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2016 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z:
http://reprap.org/wiki/Arduino_Mega_Pololu_Shield

13. Elektromotor. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2016 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: https://sk.wikipedia.org/wiki/Elektromotor#Krokov.C3.BD_elektromotor
14. Reprap 3d printer X, Y, Z, E, extruder stepper motor NEMA17 [online]. In: . HOYI SUNWAY LIMITED, 2016 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.reprap.cn/reprap-3d-printer-x-y-z-e-extruder-stepper-motor-nema17-p-36.html?cPath=10>
15. RepRap: Belt. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2015 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/Belt>
16. Řemenice GT2 /š.6/ 20 zubů, d=5, REPRAP 3D tisk. In: Aukro [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://archiv.aukro.cz/remenice-gt2-s-6-20-zubu-d-5-reprap-3d-tisk--i4397510492>
17. Řemenice T2,5 /š.6/16 zubů, d=5, REPRAP 3Dtisk. In: Aukro [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: http://aukro.cz/remenice-t2-5-s-6-16-zubu-d-5-reprap-3dtisk-i5060717490.html?bi_s=archiv_aukro&bi_m=page-user-items-page&bi_c=link-recommended-bottom-box
18. HOTEND. In: 3dráty [online]. Lysá nad Labem: Optimal 4 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <https://3draty.cz/cs/7-hotend>
19. Mechanické díly: Zubatice posuvu filamentu mosazná. In: Obchod.rebelove [online]. [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://obchod.rebelove.org/mechanicke-dily/140-zubatice-posuvu-filamentu-mosazna.html>
20. Software. In: Simplify3d [online]. 2016 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/software/>
21. Multi-Part Printing. In: Simplify3d [online]. 2016 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/tutorials/multi-part-printing/>
22. Marlin firmware user guide for beginners. In: Solid Utopia [online]. 2016 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://solidutopia.com/marlin-firmware-user-guide-basic/>
23. Triffid Hunter's Calibration Guide. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2015 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: http://reprap.org/wiki/Triffid_Hunter's_Calibration_Guide
24. (první) nastavení Slic3r pro REBEL 2. In: Rebelove [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.rebelove.org/viewtopic.php?f=12&t=268>
25. Pololu stepper driver board. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2015 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: http://reprap.org/wiki/Pololu_stepper_driver_board
26. A4988 vs DRV8825 Chinese Stepper Driver Boards. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2016 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: http://reprap.org/wiki/A4988_vs_DRV8825_Chinese_Stepper_Driver_Boards

27. Leveling the Print Bed. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2016 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: http://reprap.org/wiki/Leveling_the_Print_Bed
28. Understanding Process Parameter Effects of RepRap Open-Source Three-Dimensional Printers Through a Design of Experiments Approach. In: LANZOTTI, Antonio, Massimo MARTORELLI a Gabriele STAIANO. Journal of Manufacturing Science and Engineering[online]. ASME, 2015 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://manufacturingscience.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1935374>
29. NEWMAN, Laurel. SAILFISH Reference Manual v7.7 [online]. 2015 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.sailfishfirmware.com/doc/sailfish.pdf>
30. Print Quality Troubleshooting Guide. In: Simplify3d [online]. 2016 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/print-quality-troubleshooting/>
31. Data Sheet of eSUN 3D Filament [online]. In: . [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://makemike.com/media/recursos/esun/date/Data%20Sheet%20for%20eSUN%203D%20Filament-201411.pdf>
32. ESUN 3D FILAMENT ePA Natural. In: Esun [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.esun3d.net/cpxx.aspx?id=227&TypeId=37>
33. Co znamená UL-94? In: HEYMAN [online]. Heyman Manufacturing [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: https://www.heyman.cz/media/useruploads/files/cz/technische_angaben/ul-94.pdf?f=1
34. PETG Glycol Modified Polyethylene Terephthalate. In: Promolding [online]. 2016 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.promolding.nl/petg/>
35. PET & PETG Drive a 'Hard' Bargain. In: Plasticmachining [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.plasticmachining.com/magazine/199802/petg.html>
36. Nylon. In: Eprojekt [online]. 2016 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.eprojekt.gjs.cz/>
37. Příběh nylonu: Materiál, který zkrášlil ženské nohy a pomstil se Japoncům. Hospodářské Noviny [online]. Economia, 2012 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://life.ihned.cz/atelier/c1-54870050-pribeh-nylonu-material-ktery-zkraslil-zenske-nohy-a-pomstil-se-japoncum>
38. WOLFE, Audra J. Nylon: A Revolution in Textiles. Chemical Heritage Magazine [online]. 2008 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.chemheritage.org/discover/media/magazine/articles/26-3-nylon-a-revolution-in-textiles.aspx?page=2>
39. Nylon. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2015 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Nylon>

40. Nylons. In: Plasticmoulding [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.plasticmoulding.ca/polymers/nylons.htm>
41. Nylons (Polyamide). In: Bpf [online]. British Plastics Federation, 2016 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.bpf.co.uk/plastipedia/polymers/Polyamides.aspx>
42. Všeobecné vlastnosti materiálu polyamid (PA). In: Heyman [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: http://www.heyman.de/media/useruploads/files/de/documentation/eigenschaften_kunststoffen.pdf
43. LEDERER, Jaromír. POLYAMIDY (NYLONY). In: Chemistry.ujep [online]. KATEDRA CHEMIE, PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA, Univerzita J. E. Purkyně v Ústí nad Labem [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://chemistry.ujep.cz/userfiles/files/POLYAMIDY07022013.pdf>
44. ZHANG, Yizhuo a Y. Kevin CHOU. A PARAMETRIC STUDY OF PART DISTORTIONS IN FDM USING 3D FEA. ANNUAL INTERNATIONAL SOLID FREEFORM FABRICATION SYMPOSIUM [online]. 2006 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://sffsymposium.engr.utexas.edu/Manuscripts/2006/2006-37-Zhang.pdf>
45. BELLEHUMEUR, Céline, Longmei LI, Qian SUN a Peihua GU. Modeling of Bond Formation Between Polymer Filaments in the Fused Deposition Modeling Process. In: Journal of Manufacturing Processes [online]. Volume 6, Issue 2. 2004, s. 170-178 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: http://ac.els-cdn.com/S1526612504700717/1-s2.0-S1526612504700717-main.pdf?_tid=4100c3b6-214f-11e6-846d-00000aab0f27&acdnat=1464053675_3fd89012e5d0ff9e1895ebe5c5d2ea35
46. SUN, Q., G.M. RIZVI, C.T. BELLEHUMEUR a P. GU. Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments. In: Rapid Prototyping Journal [online]. 2008 [cit. 2016-05-24]. DOI: <http://dx.doi.org/10.1108/13552540810862028>. ISSN 1355-2546. Dostupné z: <http://www.emeraldinsight.com/doi/pdfplus/10.1108/13552540810862028>
47. LUŽANIN, Ognjan, Dejan MOVRIN a Miroslav PLANČAK. EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF EXTRUSION SPEED AND TEMPERATURE EFFECTS ON ARITHMETIC MEAN SURFACE ROUGHNESS IN FDM BUILT SPECIMENS. In: Journal for Technology of Plasticity [online]. 2013 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.dpm.ftn.uns.ac.rs/jtp/Download/2013/2/Article7.pdf>
48. GAJDOŠ, Ivan a Ján SLOTA. INFLUENCE OF PRINTING CONDITIONS ON STRUCTURE IN FDM PROTOTYPES [online]. In: . [cit. 2016-05-24]. ISSN 1848-6339. Dostupné z: <https://www.google.cz/search?q=INFLUENCE+OF+PRINTING+CONDITIONS+ON+STRUCTURE+IN+FDM+PROTOTYPES&oq=INFLUENCE+OF+PRINTING+CONDITIONS+ON+STRUCTURE+IN+FDM+PROTOTYPES&aqs=chrome.69i57.789j0j4&sourceid=chrome&ie=UTF-8>
49. AKANDE, Stephen O. Dimensional Accuracy and Surface Finish Optimization of Fused Deposition Modelling Parts using Desirability Function Analysis.

- In: International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) [online]. Vol. 4 Issue 04. Newcastle, UK: School of Mechanical and System Engineering Newcastle University, 2015 [cit. 2016-05-24]. ISSN 2278-0181. Dostupné z: <http://www.ijert.org/view-pdf/12799/dimensional-accuracy-and-surface-finish-optimization-of-fused-deposition-modelling-parts-using-desirability-function-analysis>
50. ALBERTO, Fabio et al. Towards a standard experimental protocol for open source additive manufactu. In: Virtual and Physical Prototyping [online]. Volume 9, Issue 3. 2014 [cit. 2016-05-24]. ISSN 1745-2767. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/17452759.2014.919553>
51. MOZA, Zoi, Konstantinos KITSAKIS, John KECHAGIAS a Nikos MASTORAKIS. Optimizing Dimensional Accuracy of Fused Filament Fabrication using Taguchi Design. In: 14th International Conference on Instrumentation, Measurement, Circuits and Systems [online]. At Salerno, Italy, 2015 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/279411884_Optimizing_Dimensional_Accuracy_of_Fused_Filament_Fabrication_using_Taguchi_Design
52. ANITHA, R., S. ARUNACHALAM a P. RADHAKRISHNAN. Critical parameters influencing the quality of prototypes in fused deposition modelling. In: *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2001, s. 385-388 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: http://ac.els-cdn.com/S0924013601009803/1-s2.0-S0924013601009803-main.pdf?_tid=a45b95c0-2155-11e6-9e70-00000aacb362&acdnat=1464056419_5f2ad8fe0b0eeb6c2b52c21d54f7b8e3
53. GALANTUCCI, L.M., F. LAVECCHIA a G. PERCOCO. Experimental study aiming to enhance the surface finish of fused deposition modeled parts. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology [online]. 2009, s. 189-192 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: http://ac.els-cdn.com/S0007850609000778/1-s2.0-S0007850609000778-main.pdf?_tid=2911df30-2157-11e6-b245-00000aacb360&acdnat=1464057071_14fab2f177ba9d5b16fedada27a2223d
54. JIN, Yu-an, Hui Li LI, Yong He HE a Jian-zhong FU. Quantitative analysis of surface profile in fused deposition modelling. In: Additive Manufacturing [online]. 2015, s. 142-148 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: http://ac.els-cdn.com/S2214860415000512/1-s2.0-S2214860415000512-main.pdf?_tid=c5d03e5c-2157-11e6-81bd-00000aab0f27&acdnat=1464057334_212ae5db1d0cdf6a4f359c9800efb1c9
55. MASOOD, S. H., W. RATTANAWONG a P. IOVENITTI. Part Build Orientations Based on Volumetric Error in Fused Deposition Modelling. In: MASOOD, S. H. a W. RATTANAWONG. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology [online]. Melbourne, Australia: Industrial Research Institute Swinburne, Swinburne University of Technology, 2000, s. 162-168 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs001700050022>
56. SOOD, A. K., R.K. OHDAR a S.S. MAHAPATRA. Improving dimensional accuracy of Fused Deposition Modelling processed part using grey Taguchi

- method. In: Materials & Design [online]. 2009, s. 4243–4252 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306909001794>
57. NIDAGUNDI, V.B., R. KESHAVAMURTHY a C.P.S. PRAKASH. Studies on Parametric Optimization for Fused Deposition Modelling Process. In: Materials Today: Proceedings [online]. 2015, s. 1691–1699 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785315003429>
58. GALANTUCCI, L.M. et al. Analysis of dimensional performance for a 3D open-source printer based on fused deposition modeling technique. In: Procedia CIRP [online]. 2015, s. 82-87 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827115002760>
59. HERNANDEZ, David D. Factors Affecting Dimensional Precision of Consumer 3D Printing. In: International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace [online]. 2015 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://commons.erau.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1085&context=ijaaa>
60. FAHAD, Muhammad a Neil HOPKINSON. A new benchmarking part for evaluating the accuracy and repeatability of Additive Manufacturing (AM) processes. In: 2nd International Conference on Mechanical, Production and Automobile Engineering [online]. Singapore, 2012 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://psrcentre.org/images/extraimages/6.%20412635.pdf>
61. CUPAR, A., V. POGACAR a Z. STJEPANOVIČ. Shape Verification of Fused Deposition Modelling 3D Prints. In: International Journal of Information and Computer Science (IJICS) [online]. 2015 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/274650618_Shape_Verification_of_Fused_Deposition_Modelling_3D_Prints
62. MOYLAN, Shawn et al. Proposal for standardized test artifact for additive manufacturing machines and processes. In: Solid Freeform Fabrication Symposium [online]. Gaithersburg: Engineering Laboratory, National Institute of Standards and Technology, 2012 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: http://www.nist.gov/customcf/get_pdf.cfm?pub_id=911953
63. SANCHEZ, F. A. C., H. BOUDAUD, L. MULLER a M. CAMARGO. Towards a standard experimental protocol for open source additive manufacturing. In: Virtual and Physical Prototyping [online]. 2014, s. 151-167 [cit. 2016-05-24]. ISSN 1745-2767. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17452759.2014.919553>
64. KAVEH, Mahdi et al. Optimization of the printing parameters affecting dimensional accuracy and internal cavity for HIPS material used in fused deposition modeling processes. In: Journal of Materials Processing Technology [online]. Isfahan, Iran: Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, 2015, s. 280-286 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013615300637>
65. ALHUBAIL, Mohammad A M J. Statistical-based optimization of process parameters of fused deposition modelling for improved quality. 2012. Dizertácia.

University of Portsmouth. Vedoucí práce Nick Bennet , Spencer Onuh. Dostupné také z: http://eprints.port.ac.uk/7689/1/Thesis_PDF_Moh_ALHUBAIL.pdf.

66. JOHNSON, W. M. et al. Benchmarking evaluation of an open source fused deposition modeling additive manufacturing system. In: Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://sffsymposium.engr.utexas.edu/Manuscripts/2011/2011-16-Johnson.pdf>
67. BAKAR, Nur Saaidah Abu et al. Analysis on fused deposition modelling performance. In: Journal of Zhejiang University SCIENCE [online]. 2010, s. 972-977 [cit. 2016-05-24]. ISSN 1862-1775. Dostupné z: <http://link.springer.com/article/10.1631%2Fjzus.A1001365>
68. A tougher extrusion test. In: Ultimaker [online]. 2016 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <https://ultimaker.com/en/community/6436-a-tougher-extrusion-test-o>
69. PERFECTION V370 PHOTO. In: Epson [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.epson.sk/products/scanners/consumer-scanners/perfection-v370-photo>
70. How to 3D print Nylon reliably, cleanly and hassle-free. In: Tridimake [online]. 2014 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.tridimake.com/2014/01/how-to-3d-print-nylon-and-trimmer-line.html>

ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

Skratka	Jednotka	Popis
2D	[-]	dvojmerný
3D	[-]	trojmerný
ABS	[-]	Akrylonitrilbutadiénstýrén
ANOVA	[-]	(analysis of variance) analýza rozptylu
CAD	[-]	Computer Aided Design
CNC	[-]	Computer Numerical Control
FDM	[-]	Fused Deposition Modeling
FFF	[-]	Fused-Filament Fabrication
IT	[-]	tolerančný stupeň
LCD	[-]	(liquid crystal display) displej s kvapalnými kryštálmi
NASA	[-]	National Aeronautics and Space Administration
NIST	[-]	National Institution of Standarts and Technology
PC	[-]	polykarbonát
PETG	[-]	polyetylén teraftalát modifikovaný glykolom
PLA	[-]	polylaktid
Ramps	[-]	Reprap Arduino Mega Pololu Shield
RepRap	[-]	Replicating Rapid Prototyper
RP	[-]	Rapid Prototyping
SD karta	[-]	(Secure Digital), typ pamätevej karty
STL	[-]	(Standard Tessellation Language), typ dátového súboru
USB	[-]	univerzálna sériová zbernica (Universal Serial Bus)
UV	[-]	(ultraviolet) ultra fialový

Symbol	Jednotka	Popis
GT2	[-]	typ zubového profilu remeňov a remeníc
HDT	[-]	typ zubového profilu remeňov a remeníc
I_{\max}	[A]	maximálna hodnota elektrického prúdu
M5	[-]	metrický závit s veľkým priemerom 5 mm
M6	[-]	metrický závit s veľkým priemerom 6 mm
MXL	[-]	typ zubového profilu remeňov a remeníc
R _a	[μm]	stredná aritmetická hodnota drsnosti
R _s	[Ω]	snímací rezistor
S2M	[-]	typ zubového profilu remeňov a remeníc
T2,5	[-]	typ zubového profilu remeňov a remeníc
T5	[-]	typ zubového profilu remeňov a remeníc
V _{ref}	[V]	referenčné napätie

ZOZNAM PRÍLOH

Príloha 1	Výkres vzorky pre druhý pokus
Príloha 2	Výkres vzorky pre prvý pokus
Príloha 3	Tabuľka hodnôt drsností povrchu
Príloha 4	Tabuľka hodnôt rozmerov a odchýlok kvádrov, PETG
Príloha 5	Tabuľka hodnôt rozmerov a odchýlok kvádrov, Nylon
Príloha 6	Tabuľka hodnôt rozmerov a odchýlok tenkých stien, PETG
Príloha 7	Tabuľka hodnôt rozmerov a odchýlok tenkých stien, Nylon
Príloha 8	Tabuľka hodnôt rozmerov a odchýlok valcov
Príloha 9	Tabuľka hodnôt rozmerov a odchýlok valcových dier
Príloha 10	Tabuľka hodnôt rozmerov a odchýlok štvorcových dier
Príloha 11	Tabuľka hodnôt rozmerov a odchýlok previsov
Príloha 12	Tabuľka hodnôt rozmerov a odchýlok šikmých plôch

PRÍLOHA 3

Drsnosť povrchu bok, PETG [μm]					Drsnosť povrchu vrch, PETG [μm]				
	Teplota [$^{\circ}\text{C}$]					Teplota [$^{\circ}\text{C}$]			
Rýchlosť [mm/s]	230	237	244	251	Rýchlosť [mm/s]	230	237	244	251
25	15,035	15,3189	14,9595	15,1685	25	2,811	3,7773	7,9203	8,6179
50	14,9836	15,2485	15,5882	14,1112	50	5,0968	7,8771	9,3338	9,6659
75	14,8769	15,1878	16,5977	15,1043	75	6,511	9,6895	12,402	4,9997
100	14,7634	14,7592	14,4342	15,8845	100	5,8539	9,1679	10,6953	5,9593
125		14,9185	13,9205	13,8473	125		7,8091	6,0563	6,5564
Drsnosť povrchu bok, Nylon [μm]					Drsnosť povrchu vrch, Nylon [μm]				
	Teplota [$^{\circ}\text{C}$]					Teplota [$^{\circ}\text{C}$]			
Rýchlosť [mm/s]	230	240	250	260	Rýchlosť [mm/s]	230	240	250	260
25	13,5205	14,0051	13,8478	15,1793	25	2,0573	3,1367	2,0739	2,3166
50	14,1218	14,2667	13,6236	14,5671	50	6,7735	4,2452	3,2835	3,6499
75	13,8986	13,7955	13,4947	13,8846	75	8,2345	7,9292	5,0852	6,8909
100	14,0078	14,0899	13,2527	13,3492	100	7,4091	8,0095	6,551	8,7767
125	13,8455	13,6392	13,846	14,1827	125	6,7476	9,1556	8,658	9,2107

PRÍLOHA 4

Kvádre, PETG																
Dolný rozmer [mm]																
Nom. rozmer [mm]		4					8					12				
Rýchlosť [mm/s]		25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125
Teplota [°C]	230	4,19	4,19	4,16	4,15		8,06	8,1	8,08	7,95		12,06	12,16	12,16	12,14	
	237	4,18	4,2	4,05	4,03	4,05	8,17	8,11	8,1	7,99	7,95	12,12	12,12	12,06	12	11,95
	244	4,12	4,08	4,03	4,05	4,01	8,12	8,12	8,09	8,03	7,93	12,04	12,02	11,99	11,91	11,88
	251	4,08	4,06	4,04	4,02	3,96	8,14	8,09	8,01	8	7,96	11,98	12	12	11,97	11,93
Odchýlka dolného rozmeru [mm]																
Nom. rozmer [mm]		4					8					12				
Rýchlosť [mm/s]		25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125
Teplota [°C]	230	0,19	0,19	0,16	0,15	-4	0,06	0,1	0,08	-0,05	-8	0,06	0,16	0,16	0,14	
	237	0,18	0,2	0,05	0,03	0,05	0,17	0,11	0,1	-0,01	-0,05	0,12	0,12	0,12	0	-0,05
	244	0,12	0,08	0,03	0,05	0,01	0,12	0,12	0,09	0,03	-0,07	0,04	0,02	0,02	-0,09	-0,12
	251	0,08	0,06	0,04	0,02	-0,04	0,14	0,09	0,01	0	-0,04	-0,02	0	0	-0,03	-0,07
Horný rozmer [mm]																
Nom. rozmer [mm]		4					8					12				
Rýchlosť [mm/s]		25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125
Teplota [°C]	230	4,3	4,36	4,45	4,48		8,21	8,27	8,36	8,4		12,19	12,42	12,47	12,54	
	237	4,27	4,33	4,41	4,42	4,4	8,27	8,24	8,45	8,48	8,45	12,25	12,25	12,47	12,46	12,48
	244	4,29	4,33	4,38	4,43	4,35	8,21	8,34	8,48	8,44	8,43	12,18	12,24	12,34	12,33	12,37
	251	4,22	4,33	4,39	4,4	4,42	8,25	8,34	8,43	8,42	8,46	12,07	12,21	12,4	12,43	12,48
Odchýlka horného rozmeru [mm]																
Nom. rozmer [mm]		4					8					12				
Rýchlosť [mm/s]		25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125
Teplota [°C]	230	0,3	0,36	0,45	0,48		0,21	0,27	0,36	0,4		0,19	0,42	0,47	0,54	
	237	0,27	0,33	0,41	0,42	0,4	0,27	0,24	0,45	0,48	0,45	0,25	0,25	0,47	0,46	0,48
	244	0,29	0,33	0,38	0,43	0,35	0,21	0,34	0,48	0,44	0,43	0,18	0,24	0,34	0,33	0,37
	251	0,22	0,33	0,39	0,4	0,42	0,25	0,34	0,43	0,42	0,46	0,07	0,21	0,4	0,43	0,48
Horný - dolný rozmer [mm]																
Nom. rozmer [mm]		4					8					12				
Rýchlosť [mm/s]		25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125
Teplota [°C]	230	0,11	0,17	0,29	0,33		0,15	0,17	0,28	0,45		0,13	0,26	0,31	0,4	
	237	0,09	0,13	0,36	0,39	0,35	0,1	0,13	0,35	0,49	0,5	0,13	0,13	0,41	0,46	0,53
	244	0,17	0,25	0,35	0,38	0,34	0,09	0,22	0,39	0,41	0,5	0,14	0,22	0,35	0,42	0,49
	251	0,14	0,27	0,35	0,38	0,46	0,11	0,25	0,42	0,42	0,5	0,09	0,21	0,4	0,46	0,55

PRÍLOHA 5

Kvádre, Nylon																
Dolný rozmer [mm]																
Nom. rozmer [mm]		4					8					12				
Rýchlosť [mm/s]		25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125
Teplota [°C]	230	4,27	4,13	4,08	4,08	4,11	8,25	8,16	8,14	8,1	8,04	12,15	12,04	12,02	12,05	11,94
	240	4,2	4,18	4,11	4,08	4,12	8,19	8,23	8,2	8,05	8,05	12,16	12,07	12,08	12	12,02
	250	4,19	4,11	4,09	4,12	4,11	8,25	8,16	8,15	8,13	8,08	12,13	12,1	12,09	11,94	11,94
	260	4,22	4,07	4,04	4,09	4,08	8,3	8,25	8,17	8,12	8,13	12,18	12,06	12,05	11,96	11,96
Odchýlka dolného rozmeru [mm]																
Nom. rozmer [mm]		4					8					12				
Rýchlosť [mm/s]		25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125
Teplota [°C]	230	0,27	0,13	0,08	0,08	0,11	0,25	0,16	0,14	0,1	0,04	0,15	0,04	0,02	0,05	-0,06
	240	0,2	0,18	0,11	0,08	0,12	0,19	0,23	0,2	0,05	0,05	0,16	0,07	0,08	0	0,02
	250	0,19	0,11	0,09	0,12	0,11	0,25	0,16	0,15	0,13	0,08	0,13	0,1	0,09	-0,06	-0,06
	260	0,22	0,07	0,04	0,09	0,08	0,3	0,25	0,17	0,12	0,13	0,18	0,06	0,05	-0,04	-0,04
Horný rozmer [mm]																
Nom. rozmer [mm]		4					8					12				
Rýchlosť [mm/s]		25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125
Teplota [°C]	230	4,35	4,44	4,46	4,4	4,52	8,42	8,42	8,43	8,49	8,48	12,21	12,2	12,29	12,4	12,39
	240	4,35	4,39	4,43	4,47	4,49	8,36	8,44	8,51	8,53	8,53	12,2	12,28	12,4	12,4	12,42
	250	4,31	4,4	4,38	4,45	4,47	8,38	8,38	8,49	8,54	8,53	12,19	12,23	12,43	12,42	12,39
	260	4,36	4,37	4,43	4,46	4,5	8,4	8,47	8,55	8,58	8,61	12,25	12,22	12,3	12,45	12,44
Odchýlka horného rozmeru [mm]																
Nom. rozmer [mm]		4					8					12				
Rýchlosť [mm/s]		25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125
Teplota [°C]	230	0,35	0,44	0,46	0,4	0,52	0,42	0,42	0,43	0,49	0,48	0,21	0,2	0,29	0,4	0,39
	240	0,35	0,39	0,43	0,47	0,49	0,36	0,44	0,51	0,53	0,53	0,2	0,28	0,4	0,4	0,42
	250	0,31	0,4	0,38	0,45	0,47	0,38	0,38	0,49	0,54	0,53	0,19	0,23	0,43	0,42	0,39
	260	0,36	0,37	0,43	0,46	0,5	0,4	0,47	0,55	0,58	0,61	0,25	0,22	0,3	0,45	0,44
Horný - dolný rozmer [mm]																
Nom. rozmer [mm]		4					8					12				
Rýchlosť [mm/s]		25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125
Teplota [°C]	230	0,08	0,31	0,38	0,32	0,41	0,17	0,26	0,29	0,39	0,44	0,06	0,16	0,27	0,35	0,45
	240	0,15	0,21	0,32	0,39	0,37	0,17	0,21	0,31	0,48	0,48	0,04	0,21	0,32	0,4	0,4
	250	0,12	0,29	0,29	0,33	0,36	0,13	0,22	0,34	0,41	0,45	0,06	0,13	0,34	0,48	0,45
	260	0,14	0,3	0,39	0,37	0,42	0,1	0,22	0,38	0,46	0,48	0,07	0,16	0,25	0,49	0,48

PRÍLOHA 6

Tenké steny, PETG																
Dolný rozmer [mm]																
Nom. rozmer [mm]		0,64					0,96					1,28				
Rýchlosť [mm/s]		25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125
Teplota [°C]	230	0,88	0,79	0,78	0,74		1,18	1,04	1,03	1,11		1,55	1,44	1,43	1,43	
	237	0,77	0,82	0,69	0,66	0,69	1,02	1,09	1,03	1,02	1,06	1,47	1,5	1,44	1,41	1,48
	244	0,75	0,72	0,69	0,7	0,71	1,03	1,03	1,01	1,03	1,01	1,48	1,44	1,43	1,4	1,42
	251	0,75	0,7	0,74	0,65	0,69	1,04	1,01	1,03	1	1,02	1,44	1,41	1,4	1,41	1,41
Odchýlka dolného rozmeru [mm]																
Nom. rozmer [mm]		0,64					0,96					1,28				
Rýchlosť [mm/s]		25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125
Teplota [°C]	230	0,24	0,15	0,14	0,1		0,22	0,08	0,07	0,15		0,27	0,16	0,15	0,15	
	237	0,13	0,18	0,05	0,02	0,05	0,06	0,13	0,07	0,06	0,1	0,19	0,22	0,16	0,13	0,2
	244	0,11	0,08	0,05	0,06	0,07	0,07	0,07	0,05	0,07	0,05	0,2	0,16	0,15	0,12	0,14
	251	0,11	0,06	0,1	0,01	0,05	0,08	0,05	0,07	0,04	0,06	0,16	0,13	0,12	0,13	0,13
Horný rozmer [mm]																
Nom. rozmer [mm]		0,64					0,96					1,28				
Rýchlosť [mm/s]		25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125
Teplota [°C]	230	0,95	0,89	0,98	1,06		1,24	1,26	1,21	1,3		1,6	1,65	1,83	1,8	
	237	0,85	0,92	0,96	0,94	0,96	1,1	1,14	1,23	1,22	1,25	1,53	1,59	1,72	1,71	1,76
	244	0,86	0,92	0,98	1,02	1	1,12	1,14	1,21	1,25	1,23	1,52	1,57	1,69	1,71	1,7
	251	0,88	0,84	0,96	0,94	0,99	1,1	1,16	1,18	1,21	1,2	1,52	1,59	1,65	1,74	1,73
Odchýlka horného rozmeru [mm]																
Nom. rozmer [mm]		0,64					0,96					1,28				
Rýchlosť [mm/s]		25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125
Teplota [°C]	230	0,31	0,25	0,34	0,42		0,28	0,3	0,25	0,34		0,32	0,37	0,55	0,52	
	237	0,21	0,28	0,32	0,3	0,32	0,14	0,18	0,27	0,26	0,29	0,25	0,31	0,44	0,43	0,48
	244	0,22	0,28	0,34	0,38	0,36	0,16	0,18	0,25	0,29	0,27	0,24	0,29	0,41	0,43	0,42
	251	0,24	0,2	0,32	0,3	0,35	0,14	0,2	0,22	0,25	0,24	0,24	0,31	0,37	0,46	0,45
Horný - dolný rozmer [mm]																
Nom. rozmer [mm]		0,64					0,96					1,28				
Rýchlosť [mm/s]		25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125
Teplota [°C]	230	0,07	0,1	0,2	0,32		0,06	0,22	0,18	0,19		0,05	0,21	0,4	0,37	
	237	0,08	0,1	0,27	0,28	0,27	0,08	0,05	0,2	0,2	0,19	0,06	0,09	0,28	0,3	0,28
	244	0,11	0,2	0,29	0,32	0,29	0,09	0,11	0,2	0,22	0,22	0,04	0,13	0,26	0,31	0,28
	251	0,13	0,14	0,22	0,29	0,3	0,06	0,15	0,15	0,21	0,18	0,08	0,18	0,25	0,33	0,32

PRÍLOHA 7

Tenké steny, Nylon																
Dolný rozmer [mm]																
Nom. rozmer [mm]	0,64					0,96					1,28					
Rýchlosť [mm/s]	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	
Teplota [°C]	230	0,8	0,76	0,71	0,66	0,68	1,11	1,04	0,97	0,98	0,99	1,55	1,45	1,44	1,46	1,49
	240	0,8	0,77	0,69	0,69	0,69	1,05	1,04	0,99	0,96	0,95	1,56	1,47	1,44	1,44	1,48
	250	0,79	0,79	0,7	0,68	0,69	1,06	1,07	1,03	0,97	0,96	1,55	1,5	1,46	1,49	1,5
	260	0,83	0,75	0,69	0,68	0,66	1,15	1,03	0,98	0,96	0,96	1,59	1,46	1,43	1,4	1,49
Odchýlka dolného rozmeru [mm]																
Nom. rozmer [mm]	0,64					0,96					1,28					
Rýchlosť [mm/s]	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	
Teplota [°C]	230	0,16	0,12	0,07	0,02	0,04	0,15	0,08	0,01	0,02	0,03	0,27	0,17	0,16	0,18	0,21
	240	0,16	0,13	0,05	0,05	0,05	0,09	0,08	0,03	0	-0,01	0,28	0,19	0,16	0,16	0,2
	250	0,15	0,15	0,06	0,04	0,05	0,1	0,11	0,07	0,01	0	0,27	0,22	0,18	0,21	0,22
	260	0,19	0,11	0,05	0,04	0,02	0,19	0,07	0,02	0	0	0,31	0,18	0,15	0,12	0,21
Horný rozmer [mm]																
Nom. rozmer [mm]	0,64					0,96					1,28					
Rýchlosť [mm/s]	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	
Teplota [°C]	230	0,92	0,9	0,92	0,95	0,96	1,21	1,2	1,21	1,23	1,25	1,6	1,53	1,6	1,72	1,76
	240	0,89	0,92	0,93	0,94	0,95	1,17	1,24	1,22	1,28	1,31	1,62	1,62	1,63	1,68	1,75
	250	0,86	0,91	0,93	0,95	0,94	1,19	1,24	1,23	1,3	1,36	1,6	1,6	1,65	1,73	1,77
	260	0,96	0,94	0,97	0,96	0,96	1,37	1,25	1,27	1,42	1,35	1,62	1,62	1,64	1,65	1,8
Odchýlka horného rozmeru [mm]																
Nom. rozmer [mm]	0,64					0,96					1,28					
Rýchlosť [mm/s]	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	
Teplota [°C]	230	0,28	0,26	0,28	0,31	0,32	0,25	0,24	0,25	0,27	0,29	0,32	0,25	0,32	0,44	0,48
	240	0,25	0,28	0,29	0,3	0,31	0,21	0,28	0,26	0,32	0,35	0,34	0,34	0,35	0,4	0,47
	250	0,22	0,27	0,29	0,31	0,3	0,23	0,28	0,27	0,34	0,4	0,32	0,32	0,37	0,45	0,49
	260	0,32	0,3	0,33	0,32	0,32	0,41	0,29	0,31	0,46	0,39	0,34	0,34	0,36	0,37	0,52
Horný - dolný rozmer [mm]																
Nom. rozmer [mm]	0,64					0,96					1,28					
Rýchlosť [mm/s]	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	
Teplota [°C]	230	0,12	0,14	0,21	0,29	0,28	0,1	0,16	0,24	0,25	0,26	0,05	0,08	0,16	0,26	0,27
	240	0,09	0,15	0,24	0,25	0,26	0,12	0,2	0,23	0,32	0,36	0,06	0,15	0,19	0,24	0,27
	250	0,07	0,12	0,23	0,27	0,25	0,13	0,17	0,2	0,33	0,4	0,05	0,1	0,19	0,24	0,27
	260	0,13	0,19	0,28	0,28	0,3	0,22	0,22	0,29	0,46	0,39	0,03	0,16	0,21	0,25	0,31

PRÍLOHA 8

Valce																
PETG																
Priemer [mm]																
Nom. rozmer [mm]		4					8					12				
Rýchlosť [mm/s]		25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125
Teplota [°C]	230	4,08	4,14	4,13	4,18		8,09	8,12	8,15	8,17		12,02	12,08	12,09	12,16	
	237	4,12	4,08	4,17	4,15	4,18	8,09	8,07	8,16	8,21	8,22	12,14	12,13	12,17	12,2	12,19
	244	4,07	4,16	4,14	4,17	4,15	8,07	8,1	8,15	8,14	8,17	12,13	12,12	12,13	12,17	12,15
	251	4,08	4,12	4,11	4,18	4,17	8,08	8,07	8,12	8,19	8,17	12,08	12,08	12,11	12,17	12,21
Odchýlka priemeru [mm]																
Nom. rozmer [mm]		4					8					12				
Rýchlosť [mm/s]		25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125
Teplota [°C]	230	0,08	0,14	0,13	0,18		0,09	0,12	0,15	0,17		0,02	0,08	0,09	0,16	
	237	0,12	0,08	0,17	0,15	0,18	0,09	0,07	0,16	0,21	0,22	0,14	0,13	0,17	0,2	0,19
	244	0,07	0,16	0,14	0,17	0,15	0,07	0,1	0,15	0,14	0,17	0,13	0,12	0,13	0,17	0,15
	251	0,08	0,12	0,11	0,18	0,17	0,08	0,07	0,12	0,19	0,17	0,08	0,08	0,11	0,17	0,21
Nylon																
Priemer [mm]																
Nom. rozmer [mm]		4					8					12				
Rýchlosť [mm/s]		25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125
Teplota [°C]	230	4,12	4,13	4,14	4,16	4,15	8,16	8,11	8,11	8,16	8,18	12,2	12,14	12,16	12,19	12,17
	240	4,13	4,17	4,19	4,23	4,23	8,14	8,17	8,19	8,2	8,17	12,18	12,2	12,21	12,2	12,23
	250	4,18	4,16	4,19	4,22	4,25	8,15	8,17	8,18	8,21	8,22	12,16	12,17	12,16	12,22	12,23
	260	4,2	4,14	4,18	4,21	4,23	8,2	8,16	8,18	8,19	8,23	12,22	12,19	12,21	12,21	12,24
Odchýlka priemeru [mm]																
Nom. rozmer [mm]		4					8					12				
Rýchlosť [mm/s]		25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125
Teplota [°C]	230	0,12	0,13	0,14	0,16	0,15	0,16	0,11	0,11	0,16	0,18	0,2	0,14	0,16	0,19	0,17
	240	0,13	0,17	0,19	0,23	0,23	0,14	0,17	0,19	0,2	0,17	0,18	0,2	0,21	0,2	0,23
	250	0,18	0,16	0,19	0,22	0,25	0,15	0,17	0,18	0,21	0,22	0,16	0,17	0,16	0,22	0,23
	260	0,2	0,14	0,18	0,21	0,23	0,2	0,16	0,18	0,19	0,23	0,22	0,19	0,21	0,21	0,24

PRÍLOHA 9

Valcové diery																
PETG																
Priemer [mm]																
Nom. rozmer [mm]	4					8					12					
Rýchlosť [mm/s]	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	
Teplota [°C]	230	3,62	3,59	3,57	3,51		7,58	7,59	7,54	7,49		11,61	11,58	11,59	11,56	
	237	3,59	3,57	3,57	3,52	3,5	7,59	7,53	7,51	7,55	7,51	11,64	11,65	11,58	11,55	11,59
	244	3,61	3,55	3,55	3,52	3,48	7,59	7,61	7,58	7,56	7,53	11,67	11,63	11,62	11,58	11,6
	251	3,65	3,59	3,54	3,49	3,52	7,69	7,63	7,58	7,51	7,55	11,65	11,66	11,66	11,55	11,6
Odchýlka priemeru [mm]																
Nom. rozmer [mm]	4					8					12					
Rýchlosť [mm/s]	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	
Teplota [°C]	230	-0,38	-0,41	-0,43	-0,49		-0,42	-0,41	-0,46	-0,51		-0,39	-0,42	-0,41	-0,44	
	237	-0,41	-0,43	-0,43	-0,48	-0,5	-0,41	-0,47	-0,49	-0,45	-0,49	-0,36	-0,35	-0,42	-0,45	-0,41
	244	-0,39	-0,45	-0,45	-0,48	-0,52	-0,41	-0,39	-0,42	-0,44	-0,47	-0,33	-0,37	-0,38	-0,42	-0,4
	251	-0,35	-0,41	-0,46	-0,51	-0,48	-0,31	-0,37	-0,42	-0,49	-0,45	-0,35	-0,34	-0,34	-0,45	-0,4
Nylon																
Priemer [mm]																
Nom. rozmer [mm]	4					8					12					
Rýchlosť [mm/s]	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	
Teplota [°C]	230	3,53	3,58	3,47	3,48	3,44	7,58	7,63	7,6	7,5	7,5	11,57	11,66	11,66	11,64	11,56
	240	3,57	3,51	3,5	3,49	3,49	7,58	7,62	7,57	7,58	7,48	11,63	11,64	11,6	11,55	11,55
	250	3,47	3,5	3,46	3,45	3,46	7,53	7,56	7,56	7,53	7,54	11,57	11,6	11,6	11,55	11,6
	260	3,51	3,47	3,38	3,45	3,41	7,49	7,61	7,57	7,5	7,5	11,54	11,56	11,64	11,56	11,58
Odchýlka priemeru [mm]																
Nom. rozmer [mm]	4					8					12					
Rýchlosť [mm/s]	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	
Teplota [°C]	230	-0,47	-0,42	-0,53	-0,52	-0,56	-0,42	-0,37	-0,4	-0,5	-0,5	-0,43	-0,34	-0,34	-0,36	-0,44
	240	-0,43	-0,49	-0,5	-0,51	-0,51	-0,42	-0,38	-0,43	-0,42	-0,52	-0,37	-0,36	-0,4	-0,45	-0,45
	250	-0,53	-0,5	-0,54	-0,55	-0,54	-0,47	-0,44	-0,44	-0,47	-0,46	-0,43	-0,4	-0,4	-0,45	-0,4
	260	-0,49	-0,53	-0,62	-0,55	-0,59	-0,51	-0,39	-0,43	-0,5	-0,5	-0,46	-0,44	-0,36	-0,44	-0,42

PRÍLOHA 10

Štvorcové diery																
PETG																
Rozmer [mm]																
Nom. rozmer [mm]	4					8					12					
Rýchlosť [mm/s]	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	
Teplota [°C]	230	3,63	3,68	3,73	3,76		7,56	7,66	7,69	7,69		11,65	11,63	11,67	11,67	
	237	3,71	3,72	3,76	3,82	3,78	7,7	7,67	7,74	7,74	7,78	11,59	11,62	11,66	11,72	11,74
	244	3,75	3,81	3,85	3,8	3,87	7,7	7,69	7,72	7,79	7,83	11,67	11,63	11,63	11,75	11,78
	251	3,76	3,83	3,84	3,85	3,87	7,7	7,74	7,79	7,8	7,81	11,63	11,72	11,75	11,72	11,78
Odchýlka rozmeru [mm]																
Nom. rozmer [mm]	4					8					12					
Rýchlosť [mm/s]	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	
Teplota [°C]	230	-0,37	-0,32	-0,27	-0,24		-0,44	-0,34	-0,31	-0,31		-0,35	-0,37	-0,33	-0,33	
	237	-0,29	-0,28	-0,24	-0,18	-0,22	-0,3	-0,33	-0,26	-0,26	-0,22	-0,41	-0,38	-0,34	-0,28	-0,26
	244	-0,25	-0,19	-0,15	-0,2	-0,13	-0,3	-0,31	-0,28	-0,21	-0,17	-0,33	-0,37	-0,37	-0,25	-0,22
	251	-0,24	-0,17	-0,16	-0,15	-0,13	-0,3	-0,26	-0,21	-0,2	-0,19	-0,37	-0,28	-0,25	-0,28	-0,22
Nylon																
Rozmer [mm]																
Nom. rozmer [mm]	4					8					12					
Rýchlosť [mm/s]	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	
Teplota [°C]	230	3,64	3,74	3,8	3,83	3,8	7,61	7,68	7,7	7,77	7,8	11,5	11,59	11,64	11,7	11,78
	240	3,7	3,71	3,79	3,81	3,82	7,68	7,68	7,74	7,79	7,82	11,55	11,55	11,62	11,67	11,68
	250	3,65	3,68	3,74	3,79	3,79	7,61	7,61	7,66	7,75	7,81	11,53	11,57	11,6	11,65	11,75
	260	3,58	3,73	3,76	3,78	3,74	7,58	7,66	7,72	7,77	7,78	11,49	11,57	11,61	11,65	11,72
Odchýlka rozmeru [mm]																
Nom. rozmer [mm]	4					8					12					
Rýchlosť [mm/s]	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	
Teplota [°C]	230	-0,36	-0,26	-0,2	-0,17	-0,2	-0,39	-0,32	-0,3	-0,23	-0,2	-0,5	-0,41	-0,36	-0,3	-0,22
	240	-0,3	-0,29	-0,21	-0,19	-0,18	-0,32	-0,32	-0,26	-0,21	-0,18	-0,45	-0,45	-0,38	-0,33	-0,32
	250	-0,35	-0,32	-0,26	-0,21	-0,21	-0,39	-0,39	-0,34	-0,25	-0,19	-0,47	-0,43	-0,4	-0,35	-0,25
	260	-0,42	-0,27	-0,24	-0,22	-0,26	-0,42	-0,34	-0,28	-0,23	-0,22	-0,51	-0,43	-0,39	-0,35	-0,28

PRÍLOHA 11

Previsy																
PETG																
Uhol [°]																
Nom. rozmer [°]	30					45					60					
Rýchlosť [mm/s]	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	
Teplota [°C]	230	25,76	25,89	27,37	26,35		39,83	42,97	42,38	40,09		59,22	58,88	59,42	58,38	
	237	28,3	29,98	28,92	27,67	28,17	44,05	44,81	45,35	44,14	46,16	61,08	60,78	60,95	60,03	60,55
	244	30,79	28,54	28,54	30,12	28,64	45,75	46,1	46,28	45,62	45,99	60,35	60,87	60,13	60,89	61,19
	251	30,43	30,78	29,33	27,77	28,71	45,41	47,28	45,97	46,73	45,15	60,43	59,72	60,07	60,09	59,48
Uhlová odchýlka [°]																
Nom. rozmer [°]	30					45					60					
Rýchlosť [mm/s]	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	
Teplota [°C]	230	-4,24	-4,11	-2,63	-3,65		-5,17	-2,03	-2,62	-4,91		-0,78	-1,12	-0,58	-1,62	
	237	-1,7	-0,02	-1,08	-2,34	-1,83	-0,95	-0,19	0,35	-0,86	1,16	1,08	0,78	0,95	0,03	0,55
	244	0,79	-1,46	-1,46	0,12	-1,36	0,75	1,1	1,28	0,62	0,99	0,35	0,87	0,13	0,89	1,19
	251	0,43	0,78	-0,67	-2,23	-1,29	0,41	2,28	0,97	1,73	0,15	0,43	-0,28	0,07	0,09	-0,52
Nylon																
Uhol [°]																
Nom. rozmer [°]	30					45					60					
Rýchlosť [mm/s]	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	
Teplota [°C]	230	31,78	32,11	32,83	28,66	27,37	42,84	43,70	44,55	45,36	44,64	59,37	60,95	59,90	59,75	60,16
	240	32,61	30,72	28,67	27,77	30,96	44,36	44,43	45,43	45,33	44,73	58,82	59,4	59,37	60,18	60,19
	250	34,06	30,81	27,52	27,89	31,13	45,07	44,52	45,83	45	45,33	59,38	60,34	61,03	60,01	60,61
	260	32,92	31,92	31,03	32,08	28,4	45,13	44,59	44	44,62	45,14	59,92	59,47	60,11	60,21	59,51
Uhlová odchýlka [°]																
Nom. rozmer [°]	30					45					60					
Rýchlosť [mm/s]	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	
Teplota [°C]	230	1,78	2,11	2,83	-1,34	-2,63	-2,16	-1,30	-0,45	-0,36	-0,36	-0,63	0,95	-0,10	-0,25	0,16
	240	2,61	0,72	-1,33	-2,23	0,96	-0,64	-0,57	0,43	0,33	-0,27	-1,18	-0,6	-0,63	0,18	0,19
	250	4,06	0,81	-2,48	-2,11	1,13	0,07	-0,48	0,83	0	0,33	-0,62	0,34	1,03	0,01	0,61
	260	2,92	1,92	1,03	2,08	-1,6	0,13	-0,41	-1	-0,38	0,14	-0,08	-0,53	0,11	0,21	0,49

PRÍLOHA 12

Šikmé plochy																
PETG																
Uhol [°]																
Nom. rozmer [°]	30					45					60					
Rýchlosť [mm/s]	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	
Teplota [°C]	230	29,64	30,23	30,43	30,84		44,83	45,96	45,49	45,96		60,98	60,80	60,87	60,60	
	237	30,81	31,1	30,73	30,66	30,91	46,59	45,7	46,81	47,08	46,4	60,75	60,7	61,45	61,22	60,99
	244	30,75	30,64	30,52	30,82	30,55	46,67	46,22	46,6	46,42	45,92	61,38	60,99	60,97	61,19	61,43
	251	30,92	30,71	30,8	30,78	30,21	46,65	46,25	46,49	46,36	46,12	61,01	60,89	61,02	60,96	61,46
Uhlová odchýlka [°]																
Nom. rozmer [°]	30					45					60					
Rýchlosť [mm/s]	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	
Teplota [°C]	230	-0,36	0,23	0,43	0,84		-0,17	0,96	0,49	0,96		0,98	0,80	0,87	0,60	
	237	0,81	1,1	0,73	0,66	0,91	1,59	0,7	1,81	2,08	1,4	0,75	0,7	1,45	1,22	0,99
	244	0,75	0,64	0,52	0,82	0,55	1,67	1,22	1,6	1,42	0,92	1,38	0,99	0,97	1,19	1,43
	251	0,92	0,71	0,8	0,78	0,21	1,65	1,25	1,49	1,36	1,12	1,01	0,89	1,02	0,96	1,46
Nylon																
Uhol [°]																
Nom. rozmer [°]	30					45					60					
Rýchlosť [mm/s]	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	
Teplota [°C]	230	30,07	30,34	30,58	30,26	30,32	45,04	45,45	45,42	45,24	45,26	60,03	60,70	60,97	59,75	60,44
	240	30,78	30,64	30,46	30,64	30,62	46,04	45,59	45,57	46,15	45,97	60,54	60,5	60,25	60,74	60,58
	250	30,64	30,34	30,35	30,83	30,72	45,85	45,42	46,08	45,92	47,76	60,27	60,44	60,63	61,08	60,78
	260	30,75	30,5	30,62	30,79	30,59	46	45,58	45,64	45,77	45,92	60,92	60,7	60,49	60,69	60,54
Uhlová odchýlka [°]																
Nom. rozmer [°]	30					45					60					
Rýchlosť [mm/s]	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125	
Teplota [°C]	230	0,07	0,34	0,58	0,26	0,32	0,04	0,45	0,42	0,24	0,26	0,03	0,70	0,97	-0,25	0,44
	240	0,78	0,64	0,46	0,64	0,62	1,04	0,59	0,57	1,15	0,97	0,54	0,5	0,25	0,74	0,58
	250	0,64	0,34	0,35	0,83	0,72	0,85	0,42	1,08	0,92	0,76	0,27	0,44	0,63	1,08	0,78
	260	0,75	0,5	0,62	0,79	0,59	1	0,58	0,64	0,77	0,92	0,92	0,7	0,49	0,69	0,54