



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VLIV PRŮMĚRU TRYSKY NA KVALITU TISKU 3D TISKÁRNY

EFFECT OF THE DIAMETER OF THE NOZZLE ON THE 3D PRINTER PRINT QUALITY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jaroslav Kutil

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Jaroslav Kutil**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie
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 diplomové práce:

Vliv průměru trysky na kvalitu tisku 3D tiskárny

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Student na zvoleném typu FDM 3D tiskárny, pro zvolený typ materiálu, provede testy vlivu průměru trysky extruderu na kvalitu výsledného výrobku. Hlavními parametry budou jak kvalita povrchu, tak přesnost tvaru jednotlivých prvků a výplně tělesa. Součástí práce bude i krátká rešerše problematiky, stavba zvolené 3D tiskárny, volba experimentů jejich vyhodnocení a doporučení provozních parametrů.

Cíle diplomové práce:

- rešerše
- stavba testovací 3D tiskárny
- experimentální část
- vyhodnocení experimentů
- doporučení provozních parametrů

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.

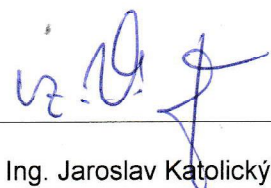
Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16.

V Brně, dne 4. 11. 2015





prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu



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

ABSTRAKT

Podstatou této diplomové práce je nalezení vlivu průměru trysky na kvalitu tisku 3D tiskárny. V první části práce je stručně charakterizována technologie Rapid Prototyping a popsán projekt RepRap. Druhá část popisuje stavbu experimentální FDM 3D tiskárny. V následující kapitole jsou popsány technologické parametry tisku a jejich vliv na tištěný výrobek. Experimentální část práce je zaměřena na zjištění vlivu průměru výtlačné trysky na mechanické vlastnosti, kvalitu ploch a přesnost tvarů výsledného výrobku a následně doporučení provozních parametrů.

Klíčová slova

RepRap, 3D tisk, FDM, tryska, kvalita tisku

ABSTRACT

The matter of this thesis is to find the influence of the diameter of the nozzle on the 3D printer's print quality. The first part briefly characterizes the Rapid Prototyping technology and describes the RepRap project. The second part describes the construction of the experimental FMD 3D printer. The following section deals with technical printing parameters and their influence on the printed product. The experimental part of the thesis is focused on the impact of the discharge nozzle diameter on the mechanical properties, surface quality and shape accuracy of the final product and on the following recommendations of operational parameters.

Key words

RepRap, 3D printing, FDM, nozzle, print quality

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KUTIL, Jaroslav. *Vliv průměru trysky na kvalitu tisku 3D tiskárny*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 69 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Vliv průměru trysky na kvalitu tisku 3D tiskárny** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

20. 5. 2016

Datum

Bc. Kutil Jaroslav

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Oskaru Zemčíkovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Kamilu Podanému, Ph.D. a panu Milanovi Rusiňákovi za pomoc se sběrem dat pro experimentální část práce.

Rád bych tímto poděkoval také své rodině za podporu při studiu, a to především tátovi, který v průběhu mého studia zemřel.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH	7
ÚVOD.....	9
1 RAPID PROTOTYPING	10
1.1 Vývoj RP	10
1.2 Metody Rapid Prototyping	11
1.2.1 SLA – Stereolitografie	12
1.2.2 SLS – Selective Laser Sintering.....	13
1.2.3 FDM – Fused Deposition Modeling.....	14
1.2.4 LOM – Laminated Object Manufacturing.....	16
1.2.5 3DP – 3D Printing	17
1.2.6 Ostatní metody.....	17
1.3 RepRap	18
1.3.1 Historie a vývoj projektu RepRap.....	18
2 STAVBA EXPERIMENTÁLNÍ 3D TISKÁRNY	21
2.1 Konstrukce.....	22
2.2 Řídící prvky a elektronika	23
2.3 Tisková hlava.....	25
2.4 Pracovní podložka	26
2.5 Materiál pro tisk	26
2.5.1 ABS.....	26
2.5.2 PLA	27
2.5.3 Hips.....	27
3 PROVOZNÍ PARAMETRY TISKU	29
3.1 Hlavní parametry tisku	29
3.1.1 Velikost trysky	29
3.1.2 Výška vrstvy	30
3.1.3 Rychlost tisku.....	31
3.1.4 Teplota tisku.....	31
3.1.5 Stěny modelu	31
3.2 Pomocné parametry tisku	32
3.2.1 Podpora	32

3.2.2	Most	33
3.2.3	Pomocná krempa a lem	33
3.2.4	Teplota a povrch pracovní desky	34
3.2.5	Program pro převod do G-kódu	34
4	REALIZACE EXPERIMENTŮ	35
4.1	Mechanické vlastnosti.....	35
4.1.1	Tahová zkouška – ČSN EN ISO 297.1	35
4.1.2	Měřicí zařízení	36
4.1.3	Měřené parametry tisku	37
4.2	Kvalita povrchu tištěných ploch	39
4.2.1	Určení textury povrchu profilovou metodou.....	39
4.2.2	Měření parametrů profilu drsnosti – ČSN EN ISO 4287	40
4.2.3	Měřicí zařízení	42
4.2.4	Měřené parametry tisku	42
4.3	Přesnost tvarů jednotlivých prvků a výplně tělesa	44
4.3.1	Tvarová přesnost	44
4.3.2	Měřené parametry tisku	45
5	VYHODNOCENÍ EXPERIMENTŮ	47
5.1	Mechanické vlastnosti.....	47
5.1.1	Vliv průměru trysky na mez pevnosti v tahu	47
5.1.2	Lomová plocha a pórovitost vzorků.....	48
5.2	Kvalita povrchu tištěných ploch	51
5.2.1	Vliv výšky vrstvy na kvalitu povrchu	51
5.2.2	Vliv průměru trysky na kvalitu povrchu	53
5.2.3	Srovnání PLA s materiály ABS a Hips	55
5.3	Přesnost tvarů jednotlivých prvků a výplně tělesa	57
5.3.1	Vliv průměru trysky na přesnost rozměrů jednotlivých prvků	57
5.3.2	Nepřesnosti tvarů jednotlivých prvků.....	60
5.3.3	Výplň tělesa	61
5.4	Doporučení provozních parametrů	62
	ZÁVĚR	63
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	64
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	67
	SEZNAM PŘÍLOH.....	69

ÚVOD

Technologie Rapid Prototyping slouží především pro rychlé vytváření prototypů k ověření koncepce či designu vyvíjeného výrobku. Ještě před deseti lety byla tato technologie používána převážně ve velkých či specializovaných podnicích. Díky vypršení patentů a snížení cen tiskáren v roce 2005 se 3D tisk začal více prosazovat i v běžných firmách a hlavně díky open source projektu RepRap také u laické veřejnosti.

Tyto domácí tiskárny lze sestavit z běžně dostupných komponent za malý zlomek ceny komerčních zařízení. Část stavebních prvků je dokonce možné vytisknout na jiné již sestavené tiskárně. Tisk běžným uživatelům usnadňují i rozsáhlé online databáze vytvořených 3D modelů a diskuzní fóra věnována jednotlivým typům tiskáren. RepRap 3D tiskárnu si dnes pořizují jednak nadšenci do 3D tisku, ale také například modeláři, domácí kutilové, školy nebo malé podniky, které si nemohou dovolit profesionální zařízení.

V České Republice zpopularizoval RepRap 3D tiskárny konstruktér Josef Průša, který je autorem nejrozšířenější verze tiskárny na světě Prusa i3. Vývoj těchto domácích tiskáren jde mílovými kroky dopředu a neustále se na trhu objevují nové typy a nově použité materiály.

Bohužel i díky negativní mediální kampani jsou dnes 3D tiskárny mnohými lidmi brány jako stroje pro výrobu nedohledatelných střelných zbraní. Ty sice je možné vytisknout, nicméně daleko účinnější a jednodušší zbraně je možné rychleji vyrobit i například na soustruhu, který má dnes každý velký kutil doma.

Cílem této práce je shrnout získané poznatky domácích 3D tiskáren, uplatnit je při stavbě tiskárny a pomocí experimentů doporučit vhodné provozní parametry tiskárny. V experimentální části práce jsou provedené zejména testy vlivu průměru trysky extrudéru domácí 3D tiskárny na kvalitu výsledného výrobku ze zvoleného materiálu. Testy jsou zaměřeny především na ověření mechanických vlastností, kvality povrchu a přesnosti jednotlivých prvků.

1 RAPID PROTOTYPING

Cílem technologie Rapid Prototyping je zhotovení reálné trojrozměrné součásti z počítačových dat, a to co nejrychleji a zároveň co nejkvalitněji. Technologie RP umožňuje už během procesu vývoje výrobku ověřit design, ergonomii a především funkci vyvíjeného výrobku. Použitím RP dojde tedy ke značnému urychlení vývoje výrobku, a tím ke snížení výrobních nákladů. Mimo použití během vývoje výrobku, slouží tato technologie také k výrobě menšího počtu kusů finálních výrobků, nebo se využívá, pokud nelze danou součást vyrobit konvenčními technologiemi [1,2].

1.1 Vývoj RP

Technologie Rapid Prototyping je poměrně nová oblast strojírenství. Tato technologie má počátky v 80. letech 20. století, kdy byla předvedena první RP metoda, a to Stereografie. Nejprve šlo pouze o vrstvení křehkých pryskyřičných materiálů. Tento model sloužil pouze pro lepší vizualizaci a zrychlení schvalování součástí. Později byly tyto materiály nahrazeny pevnějšími, čímž došlo k vytváření modelů z plastových a kovových materiálů vysoké kvality, které je možné použít k funkčním testům, či dokonce jako funkční součásti. Na obr. 1.1 je první funkční auto se samonosnou karoserií vytištěnou pomocí technologie Rapid Prototyping [2].



Obr. 1.1 Vytištěný skelet automobilu Local Motors Strati [3].

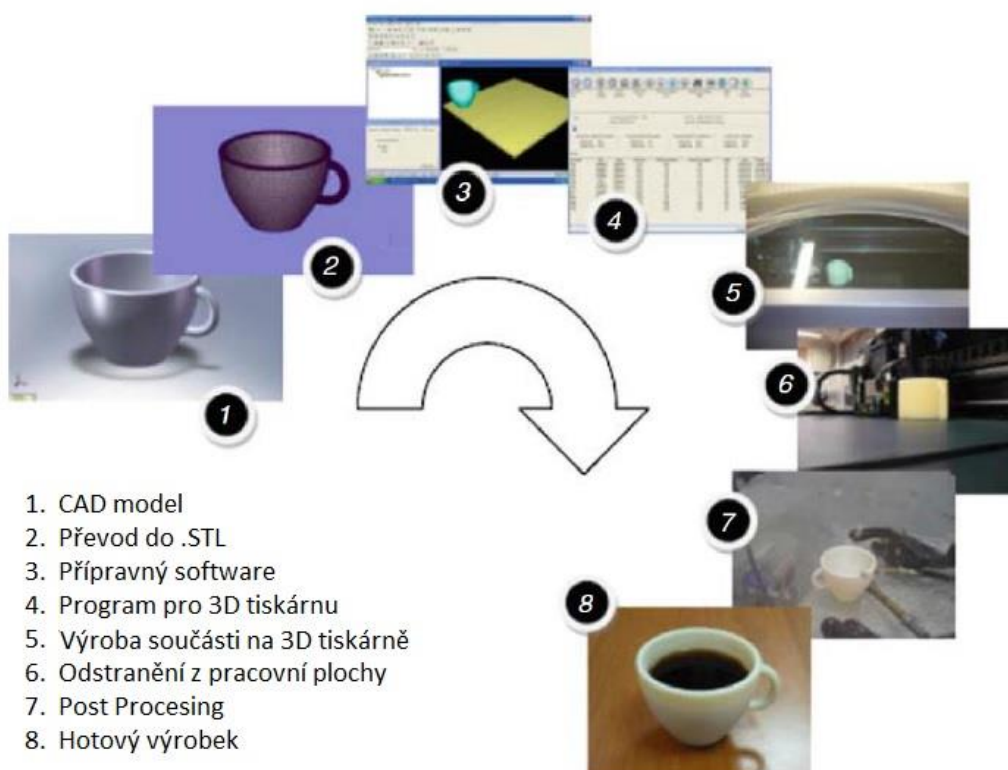
Technologie RP se poměrně rychle prosadila a díky velkému rozmachu vznikaly v následujících letech další metody RP (tab. 1.1). Tyto metody pracují také na principu postupného přidávání nebo vytvrzování vrstev materiálu.

Tab. 1.1 Časový vývoj technologie RP [4].

Rok vzniku	Metoda RP	Zkratka
1986	Stereolitografie	SLA
1987	Ballistic Particle Manufacturing	BPM
1987	Laminated Object Manufacturing	LOM
1991	Selective Laser Sintering	SLS
1989	Fused Deposition Modeling	FDM
1993	3D Printing	3DP

1.2 Metody Rapid Prototyping

Metody RP se také často označují jako aditivní technologie. Oproti konvenčním metodám obrábění, kdy materiál odebíráme z polotovaru, je u aditivní technologie součást vyráběna postupným přidáváním materiálu po vrstvách. To znamená, že model je rozdělen na veliký počet vrstev o tloušťce několik desetin či setin milimetru. Tyto vrstvy jsou postupně kladeny na sebe a vytvářejí i poměrně složité trojrozměrné předměty. Celkový proces výroby pomocí technologie RP je uveden na obr. 1.2 [1,2].



Obr. 1.2 Proces výroby součásti pomocí aditivní technologie [5].

Po vyrobení součásti je nutné vždy provést tzv. Postprocesing. Jedná se o finální úpravu výrobku, např.: tmelení, lakování, barvení, napouštění, vytvrzení atd.

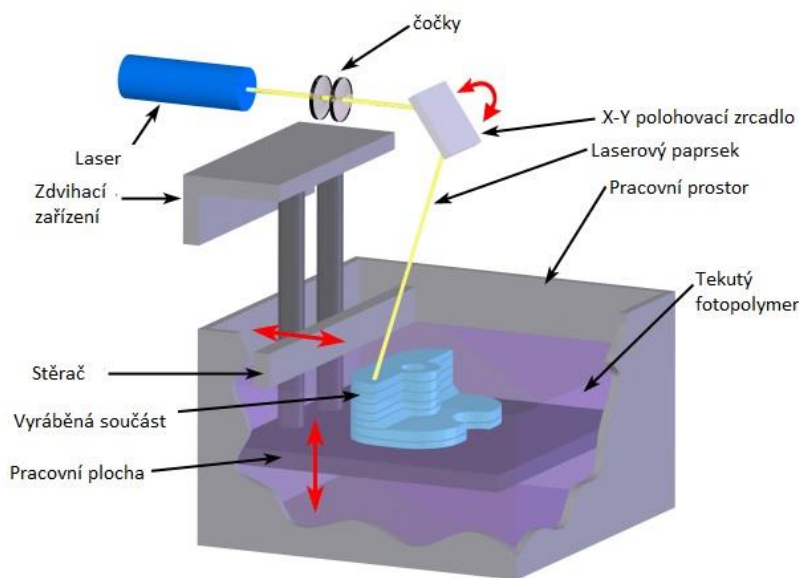
Jednotlivé metody RP lze rozdělit podle typu [1]:

- na bázi vytvrzování fotopolymerů (SLA),
- na bázi spájení práškových materiálů (SLS, 3DP),
- na bázi nanášení tekutých a polotekutých materiálů (FDM),
- na bázi laminování (LOM).

1.2.1 SLA – Stereolitografie

Stereolitografie je nejstarší metodou RP. První výrobní zařízení bylo patentováno již v roce 1984. Zároveň je tato metoda stále nejpoužívanější, a to především díky tomu, že je velice přesná. Technologie zvládá vyrobit složité geometrie s otvory do 1 mm a zároveň vyniká vysokou geometrickou přesností [5].

Princip této metody je zobrazený na obr. 1.3. Laserový paprsek je veden v souřadnicích X a Y (podle vygenerovaného řídicího programu) nad horní plochou nádoby s fotopolymerem. Součást se postupně vytváří na pracovní desce, která je ponořená v tekutém polymeru. Takto se vytvrdí jedna vrstva, pracovní deska sníží a následně stěrač zarovná nanesený polymer na vybranou tloušťku vrstvy. Postup se opakuje až do vytvoření celého objektu. Součást se nakonec vytvrdí pomocí UV záření, to zaručí větší pevnost a integritu povrchu. Následně se může výrobek ještě povrchově upravit, např. vyhlazováním atd. Metoda potřebuje stavbu podpor [1,6].



Obr. 1.3 Princip technologie SLA [6].

Výhody:

- vysoká přesnost vyráběných součástí až $\pm 0,28$ mm,
- kvalitní jakost povrchu,
- vhodné jako modely pro vakuové lití.

Nevýhody:

- velká křehkost součástek,
- relativně vysoké náklady,
- malá tepelná odolnost.

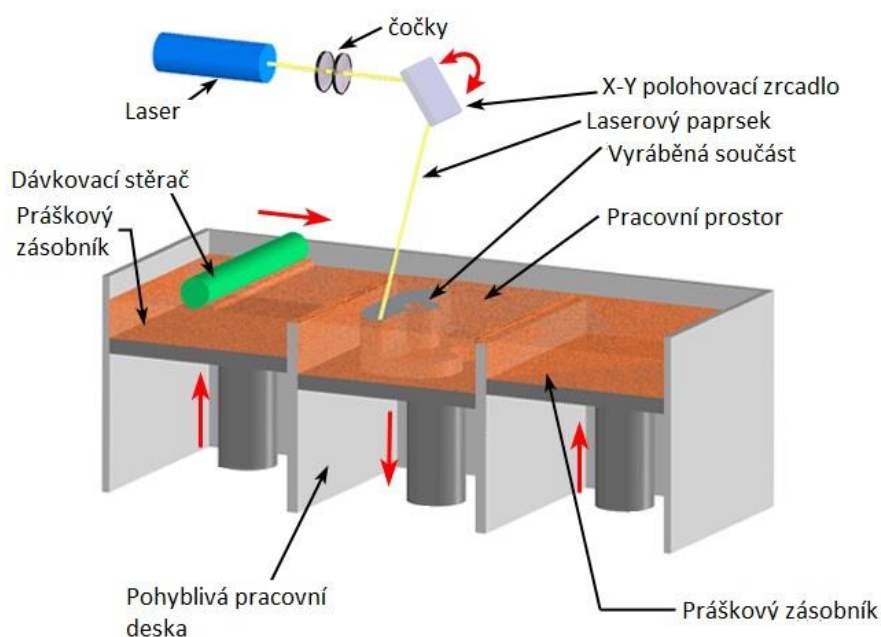
1.2.2 SLS – Selective Laser Sintering

Selective Laser Sintering znamená česky selektivní spékání laserem. Jde o podobnou technologii jako SLA. Oproti Stereolitografii pracuje technologie SLS na principu spékání práškových materiálů (obr. 1.4). Na pracovní pohyblivou desku se nanese pomocí dávkovacího stěrače vrstva práškového materiálu. Nato laserový paprsek dle vygenerovaného programu spéká jen požadovaná místa a spojí je v celistvou vrstvu. Zbývající nespečený prášek slouží jako podpůrný materiál. Pohyblivá pracovní deska se posune o přibližnou výšku vrstvy a celý proces se opakuje. Vytvářená vrstva se zároveň spéká s předcházející vrstvou a tím se vytváří výsledný tvar součásti [4,5].

Na rozdíl od jiných metod lze u SLS použít mnoho druhů materiálů, jako například kovový prášek, polyamid, keramiku, nylon atd. [1].

Podle použitého modelového materiálu dělíme SLS [5]:

- Laser Sintering – Plastic,
- Laser Sintering – Metal,
- Laser Sintering – Foundry Sand,
- Laser Sintering – Ceramic (Direct Shelt Production Casting).



Obr. 1.4 Princip technologie SLS [7].

Výhody:

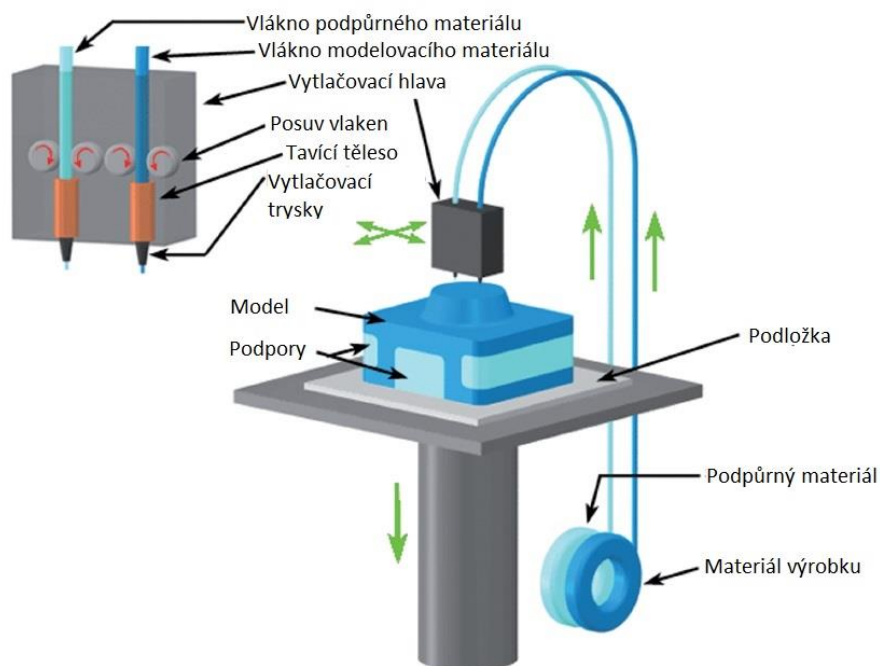
- široký rozsah použitých materiálů,
- dle použitého materiálu nemusí být potřebné podpory,
- není potřebné dodatečné vytvrzování.

Nevýhody:

- pórovitý povrch součástek,
- energeticky náročná technologie,
- malá tepelná odolnost.

1.2.3 FDM – Fused Deposition Modeling

Technologie FDM byla vyvinuta v roce 1989. Jedná se o velmi rozšířenou metodu, zejména proto, že jde o velmi jednoduchou technologii s relativně nízkými výrobními náklady. Výrobní princip je podobný tomu, jak pracuje tavná pistole (obr. 1.5). Technologie používá dva typy materiálů. Jednak je to modelovací materiál, ze kterého se vytváří těleso výrobku, a druhý materiál je tzv. podpůrný. Podpůrný materiál slouží jako podpora při nanášení modelovacího materiálu u převislých ploch. Tištěný model se tvoří na modelovací podložce (obr. 1.6), která zabraňuje deformacím při chladnutí modelu a zajišťuje lepší stabilitu u rozměrných výrobků. Modelovací a podpůrný materiál je ve formě tenkého drátu navinutý na cívce. Pomocí posuvového mechanismu je materiál (modelovací nebo podpůrný) přiveden do vytlačovací hlavy. Zde se pomocí tavicího tělesa nataví na určitou teplotu a vytlačí se přes trysku na pracovní desku. Vytlačovací hlava se podle vygenerovaného programu pohybuje v osách X a Y a tím se vytvoří celistvá vrstva. Poté se pracovní deska posune v ose Z o tloušťku vrstvy dolů a celý proces opakuje [4].



Obr. 1.5 Princip technologie FDM [8].

Nejpoužívanějšími materiály jsou především termoplasty. Jako modelovací materiály se používají především ABS, PLA, PC, PET, ale také keramické hmoty nebo vosky. V současnosti existují rozpustné podpůrné materiály. Tyto materiály se po ponoření hotového modelu do kapaliny vyplaví. Odpadá tedy možné poškození modelu při odstraňování podpůrného materiálu mechanicky. Používá se především materiál PVA (Polyvinyl alcohol), který je rozpustný ve vodě a nebo Hips (High-impact polystyrene), rozpustný v roztoku látky limonenu. [4]

Metoda FDM je známá také díky projektu RepRap (viz kapitola 1.3). Celé zařízení je značně zjednodušeno. Používá se ve většině případů pouze jedna výtlačná tryska. Podpory jsou zhotoveny ze základního materiálu. Proto je nutné dát při jejich odstranění pozor na mechanické porušení modelu.



Obr. 1.6 Ukázka vyrobeného modelu hodin (s neodstraněným podpůrným materiálem) umístěného na modelovací podložce [9].

Výhody:

- široký sortiment materiálů,
- minimální odpad,
- snadné odstranění podpůrného materiálu,
- výroba funkčních výrobků.

Nevýhody:

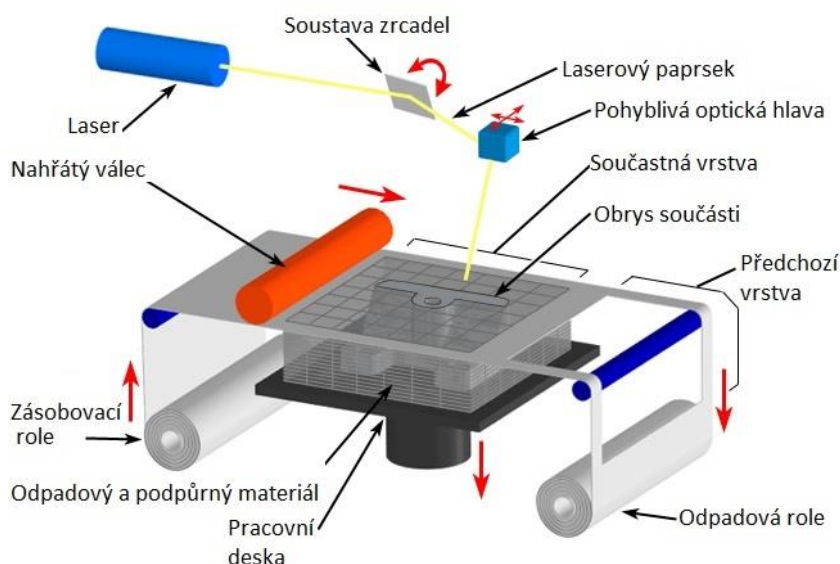
- čas procesu závislý na velikosti modelu,
- omezená přesnost dána průměrem vytlačeného vlákna,
- nutná finální úprava modelu.

1.2.4 LOM – Laminated Object Manufacturing

Při této metodě se model vytvoří z plastových folií nebo z velkého množství vrstev papíru napuštěného zpevňující hmotou. Princip metody LOM je popsán na obr. 1.7. Přes pracovní desku je pomocí dvou navíjecích válců nanесena folie. Nahřátý válec přejíždí přes folii a přitlačí ji k předešlé vrstvě. Laserový paprsek poté ořezává obrys modelu dle zadaného tvaru. Okolní materiál je rozřezán na čtverce a slouží jako podpůrný materiál. Po dokončení vrstvy se pracovní deska posune dolů o tloušťku vrstvy a celý proces se opakuje. Technologie LOM umožňuje výrobu relativně velkých objektů. Při použití papíru je výsledná struktura podobná dřevu [5].

Technologii LOM lze rozdělit podle sledu operací na [4]:

- vyřezávání a lepení (VaL),
- lepení a vyřezávání (LaV).



Obr. 1.7 Princip technologie LOM [5].

Výhody:

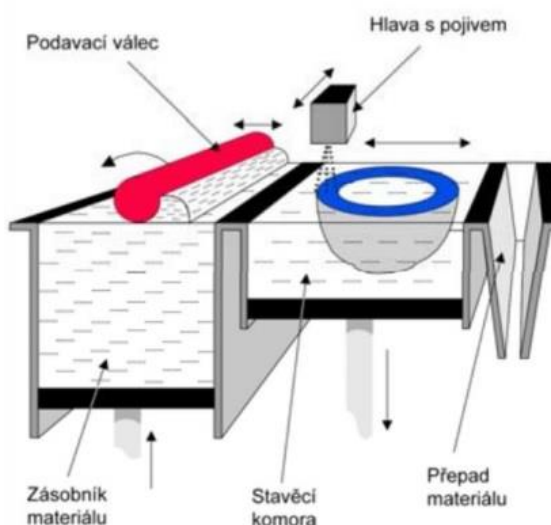
- nízké náklady na materiál a ekologicky nezávadný materiál,
- vysoká rychlost a přesnost výroby součásti,
- není potřebné dodatečné vytvrzování.

Nevýhody:

- pracné odstranění podpor,
- nutná finální úprava modelu,
- stálá spotřeba materiálu – nezávisle na velikosti modelu.

1.2.5 3DP – 3D Printing

Metoda 3DP (obr. 1.8) je podobná technologii SLS, ale místo laseru používá pro vytvrzení tekuté pojivo v pohyblivé hlavě. Hlava s pojivem se pohybuje v osách X a Y nad vrstvou práškového materiálu, který byl pomocí podávacího válce rozprostřen na pracovní desku. Pojivo se pomocí trysky dává dle požadovaného tvaru na základní materiál, kde ihned spolu reagují a tím se základní materiál vytvrzuje. Pracovní deska se posune v ose Z o tloušťku vrstvy a celý proces se opakuje, dokud není hotový celý výrobek. Okolní nespojený materiál slouží jako podpůrný materiál. Tato metoda je dnes díky své jednoduchosti velice rozšířena [1,4].



Obr. 1.8 Princip technologie 3DP [10].

Výhody:

- časově méně náročná metoda,
- vícebarevná technologie,
- vysoká kvalita povrchu výrobku.

Nevýhody:

- převážně jen pro koncepční a designové návrhy.

1.2.6 Ostatní metody

Díky velkému rozmachu Rapid Prototypingu v současnosti existuje okolo dvaceti těchto technologií (EBM, MJS, SGC, MJM,...). V jádru jde ovšem o modifikace dříve zmíněných metod. Liší se především metodou stavění modelu nebo použitým materiálem.

Zajímavá je technologie BPM (Ballistic Particle Manufacturing). Metoda pracuje s roztaveným plastem či voskem, který je pomocí speciální pohyblivé trysky vystřelen ve formě kapek na pracovní desku. Takto je vyrobena celá vrstva modelu.

Pracovní deska se sníží o tloušťku vrstvy a celý proces se opakuje. Technologie se od roku 1997 komerčně nepoužívá [4].

Technologie LENS (Laser Engineered Net Shaping) funguje tak, že laserový paprsek, nasměrovaný na kovový prášek, roztaví tento materiál. Zároveň pomocí inertního plynu (argonu) je další kovový prášek tryskou dopraven do místa roztaveného materiálu. Materiál tuhne ihned po posunutí laserového paprsku. Pohyb v osách X a Y vykonává pracovní deska. Takto se vyrobí celá vrstva a následně se laserová hlava posune o výšku vrstvy směrem v ose Z a celý proces se opakuje. Vytváří se pevně spojená struktura [4].

Tato technologie je obzvlášť vhodná na opravu menších poškozených odlitků. Pokud kus poškozeného výrobku chybí, je tato technologie často finančně a časově méně náročná než výroba nového dílu.

1.3 RepRap

Zkratka RepRap pochází z názvu celosvětového projektu Replicating Rapid Prototyper. Z anglického názvu vyplývá, že se jedná o výrobní zařízení (3D tiskárnu), které je schopno vyrobit (vytisknout) nejen různé 3D výrobky, ale především součásti pro stavbu další 3D tiskárny. Hlavní konstrukční prvky jsou tedy vytisknuty na tomto zařízení. Další potřebný konstrukční materiál je běžně k dostání v klasickém železářství. Tiskárna využívá především technologii FDM s jednou tryskou. Celé zařízení typu RepRap je finančně nenáročné. Náklady na stavbu zařízení jsou obvykle 8 000 – 20 000 Kč. Díky tomu jsou v současnosti tyto tiskárny velice populární i pro amatéry.

Celý projekt RepRap je Open Source. To znamená, že veškeré výrobní podklady a software jsou zdarma k dispozici na stránkách repprap.org a zároveň je zde celý projekt otevřen pro úpravy od veřejnosti z celého světa.

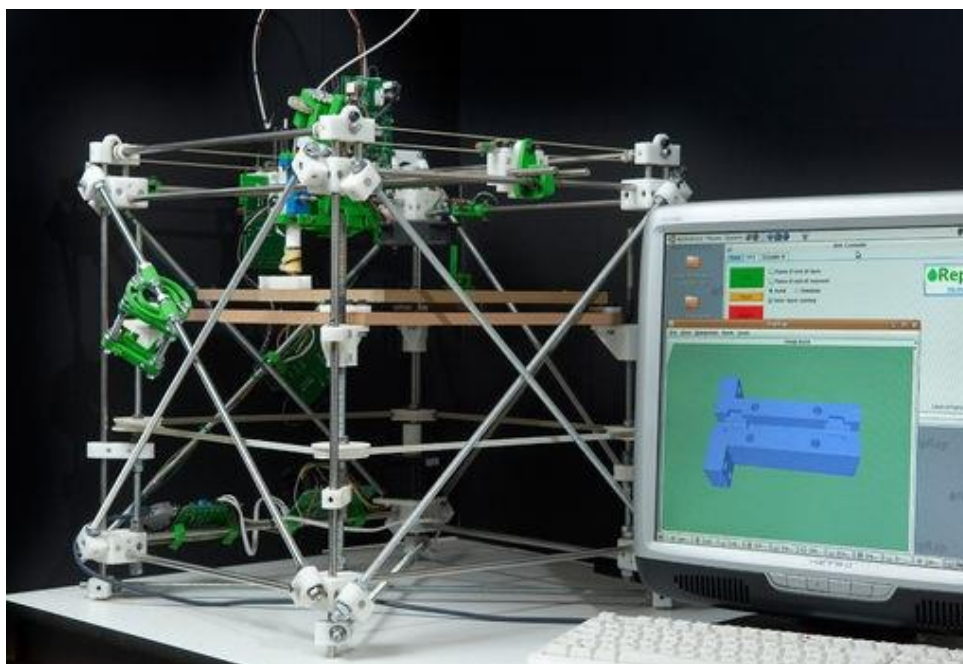
1.3.1 Historie a vývoj projektu RepRap

RepRap pochází z university v Bathu ve Velké Británii, kde Dr Bowyer v roce 2005 poprvé nastínil tento projekt. V roce 2007 se mu podařilo vyrobit první RepRap tiskárnu Darwin. Dalším důležitým milníkem je květen 2008, kdy byla díky první tiskárně vyrobena druhá tiskárna. Na konci roku existovalo již přes 100 tiskáren. V česku se jako jeden z prvních začal o RepRap zajímat Josef Průša. V roce 2011 modifikoval oblíbený model tiskárny Mendel a v roce 2012 navrhl svůj nový model tiskárny Prusa i3, která je dnes nejrozšířenější RepRap tiskárnou na světě [11,12].

Darwin

První model tiskárny byl vyroben v roce 2007. Tiskárna Darwin (obr. 1.9) je symbolicky pojmenovaná po zakladateli evoluční technologie.

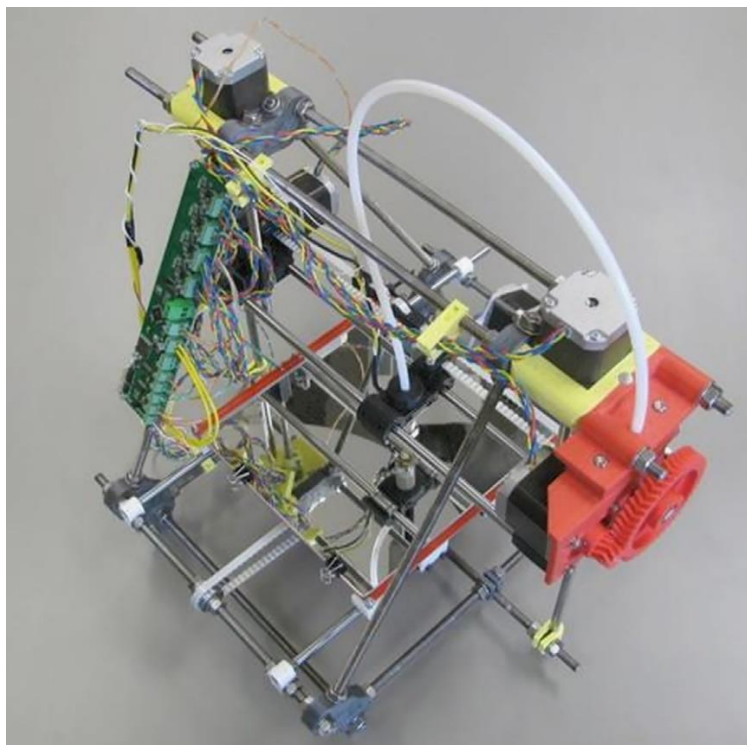
Rám je složen ze závitových tyčí a spojen pomocí plastových dílců. Tiskárna používá kartézský souřadný systém. Pracovní deska s modelem se pohybuje v ose Z díky krovovému motoru a závitové tyči. Tisková hlava se pohybuje v osách X a Y. Tento pohyb je zajištěn pomocí řemenového převodu a také dvou krokových motorů. Tiskárna je značně rozměrná [13].



Obr. 1.9 Tiskárna Darwin [14].

Mendel

Tiskárna Mendel je druhou generací RepRap projektu. Mendel používá také kartézský souřadný systém. Stůl se pohybuje pouze v ose Y a tisková hlava v osách X a Z. Oproti Darwinu je tiskárna kompaktnější a zároveň má větší pracovní plochu. Rám je opět složen ze závitových tyčí a plastových prvků. Tento model existuje v mnoha specifikacích. Na obr. 1.10 je modifikace Prusa–Mendel [15].



Obr. 1.10 Tiskárna Mendel [16].

Prusa i3

Nejoblíbenější tiskárnou je v současnosti Prusa i3. Tuto tiskárnu navrhl český konstruktér 3D tiskáren Josef Průša. Oproti modelu Mendel má tiskárna lepší stabilitu a lze ji snadněji smontovat. Existují dva záhladní typy rámu. První (jednolistový) je vyroben z hliníkového plechu. Tvar rámu je nutné obrobit (laserové řezání, vodní paprsek,...). Druhá varianta je tzv. krabicový rám. Tento rám je dřevěný a dá se vyrobít pouze dřevoobráběcími nástroji. Zároveň tento rám zaručuje tužší konstrukci. Je zde použit opět kartézský souřadný systém, kdy se pracovní deska pohybuje v ose Y a tisková hlavička v osách X a Z [17].

Kossel

Tiskárna Kossel (obr. 1.11) se řadí do skupiny tzv. delta tiskáren. Tyto tiskárny využívají paralelní mechanismus. Rám tvoří hliníkové profily spojené plastovými prvky. Tisková hlava je posouvána pomocí tří ramen, které se pohybují po svislých hliníkových profilech. Pohon je zajištěn řemenovým převodem a třemi krokovými motorky. Pracovní stůl je pevný [18].

Hlavní výhodou tiskárny je velká rychlost polohování tiskové hlavy a velká výška pracovního prostoru.



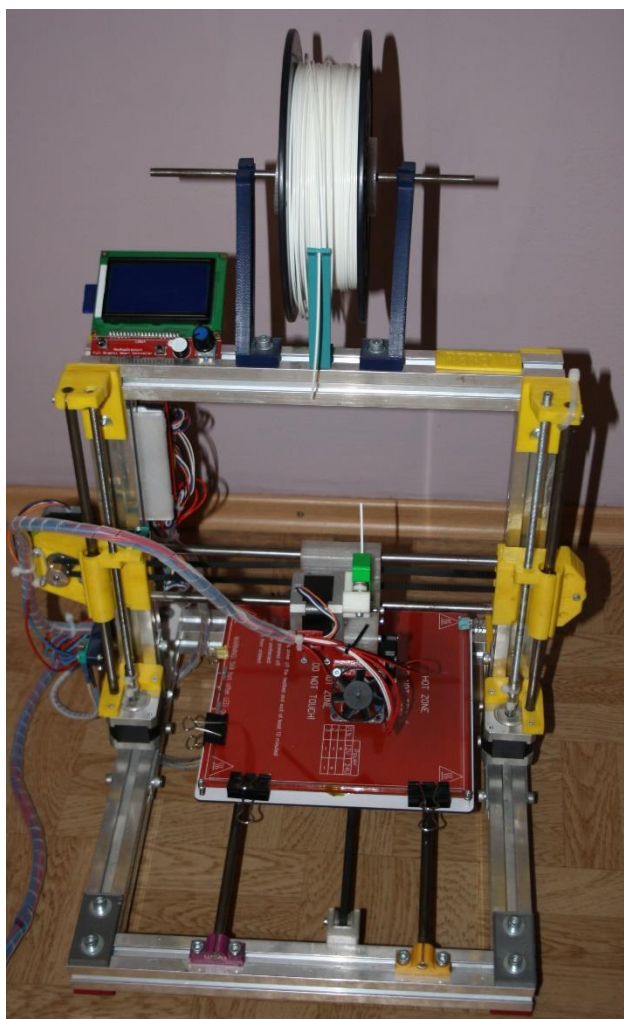
Obr. 1.11 Tiskárna Kossel [18].

2 STAVBA EXPERIMENTÁLNÍ 3D TISKÁRNY

Pro výběr 3D tiskárny byla rozhodující tato hlediska: nízká cena zařízení, jednoduché sestavení tiskárny, tuhost konstrukce a dostatečně ověřená koncepce. Do užšího výběru byly vybrány tiskárny Prusa i3 a Rebel II. Obě dvě tiskárny mají dostatečně ověřenou koncepci a srovnatelné pořizovací náklady. Tiskárna Prusa i3 se sice snadněji montuje, ale konstrukce vykazuje menší tuhost rámu. Byla proto vybrána 3D tiskárna typu Rebel II.

Tiskárna typu Rebel II (obr. 2.1) pochází z dílny českého konstruktéra RepRap tiskáren Davida Lence. Rebel II je druhou generací tiskárny Rebel I. Rebel I měl rám z hliníkových profilů a neobsahoval příliš vytisknutých dílů na RepRap tiskárně. Pohon v ose Z byl zajištěn pomocí jedné závitové tyče a krokového motorku. Tato koncepce byla těžkopádná a příliš se nerozšířila.

Rebel II využívá taktéž hliníkový rám. Spojení rámu je zajištěno vytisknutými plastovými prvky. Pro pohyb tiskové hlavy v ose Z jsou použity dvě závitové tyče a dva krokové motorky. V osách X a Y je pohon zajištěn řemenovým převodem a jedním krokovým motorkem pro každou osu. Pátý krokový motorek posouvá pomocí pastorku tiskový materiál (filament) do tiskové hlavy.



Obr. 2.1 3D tiskárna Rebel II.

Všechny stavební prvky byly nakoupeny jednotlivě. Kvůli tomu, že většina elektroniky byla nakoupena přes internetový obchod Aliexpress z Číny, celkový čas nákupu všech prvků a stavby tiskárny se značně prodloužil na cca dva měsíce. Samotné sestavení zařízení pak trvalo přibližně 12 hodin. Několik dalších dnů pak zabralo doladění tiskového procesu. Na trhu existuje také výrobní sada této tiskárny, ve které jsou všechny potřebné stavební prvky již připraveny na montáž.

Základní parametry tiskárny Rebel II:

- rozměr pracovního prostoru – 200 x 200 x 200 mm,
- rám – hliníkové profily Kombi,
- cena – 8 000 Kč,
- pracovní deska – vyhřívaná hliníková deska Mk3,
- pohon – 5 x krokové motory Nema 17,
- elektronika – Arduino MEGA2560 + Ramps 1.4.

V současnosti již existuje třetí generace tiskárny, tzv. Rebel III. Tento model má dvě tiskové hlavy. Je tedy možné tisknout podpurný a modelovací materiál. Tato koncepce je však stále v základním vývoji [19].

2.1 Konstrukce

Základní rám tiskárny je složen ze sedmi kusů hliníkový profilů stavebnicového systému Kombi od firmy Alupa, s.r.o. Do drážek těchto profilů zapadá hliníkový profil Kombi matice, ze kterého byly obrobena matice M6. Tyto matice následně slouží pro upevnění jednotlivých stavebních prvků na hliníkové profily. Rám je v rozích spojen vytisknutými plastovými prvky. Vertikální část rámu je k horizontální části rámu připojena pomocí ocelových úhelníků. Celý rám je postaven na čtyřech gumových nožičkách a je sešroubován pomocí šroubů M6 a M8.

Na horizontální části rámu jsou pomocí dalších vytisknutých plastových prvků připojeny dvě kalné ocelové tyče o průměru 8 mm. Tyto tyče slouží jako lineární vedení pracovního stolku v ose Y. Po každé tyči se pohybují dvě lineární ložiska LM8UU, která jsou připevněna opět pomocí vytisknutých plastových dílců k spodní straně pracovního stolku. Pohon stolku je zajištěn prostřednictvím ozubeného řemene T2.5 a krokového motorku.

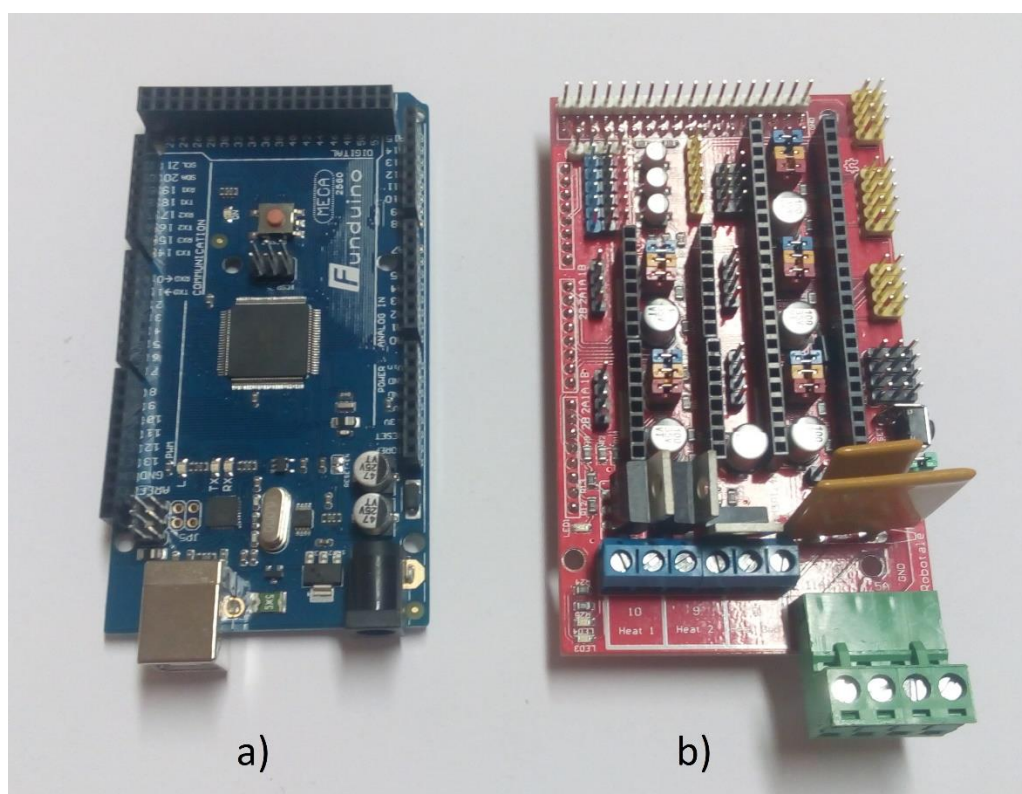
Pohyb v ose Z je obstarán dvěma závitovými tyčemi, které jsou spojeny pružnou spojkou ke dvěma krokovým motorkům. Na závitových tyčích jsou našroubovány mosazné matice. Zároveň jsou matice nalisovány v konstrukci příčnicku. Lineární vedení je zde také zajištěno dvěma kalnými tyčemi se čtyřmi lineárními ložisky LM8UU.

Příčnick je složen ze dvou kalných ocelových tyčí a z vytisknutých plastových konzolí. Kalné tyče spolu s lineárními ložisky tvoří lineární pojezd tiskové hlavy v ose X. Pro pohon je stejně jako v ose Y použitý ozubený řemen T2.5 s řemenicí přidělanou k výstupní hřídeli a krokovém motorku.

V příloze č. 1 je přiložena fotodokumentace sestavené tiskárny.

2.2 Řídící prvky a elektronika

V současnosti existuje několik typů řídicí elektroniky pro tiskárny projektu RepRap. Nejběžnějším typem je kombinace základní desky Arduino Mega 2560 a rozšiřující desky Ramps 1.4. Tato varianta zde byla proto vybrána i díky dobrému poměru cena / výkon. Pohon je zajištěn pomocí pěti krokových motorků.



Obr. 2.2 a) Arduino MEGA 2560, b) Ramps 1.4.

Arduino je platforma řízená procesorem MEGA 2560. Do této desky je nahrán řídicí firmware, který zajišťuje řízení hardwaru. Zde byl vybrán volně šiřitelný firmware Repetier. Na desce je USB konektor pro propojení s PC. Platforma Arduino (obr.2.2a) se používá v kombinaci s modulem Ramps 1.4 (obr.2.2b). K tomuto modulu jsou zapojeny krokové motory, vyhřívaná pracovní deska, extrudér, koncové spínače, a přívodní vodiče. Desku je nutné osadit driversy krokových motorů DRV8825. Hlavní výhodou je cena a jednoduchost. Nevýhodou je pak především poddimenzovaná proudová pojistka a nevhodný tranzistor vyhřívané pracovní desky. Tento tranzistor je vyměněn za tranzistor IRL 3803, který lépe odolává dané zátěži [19].

Na rozšiřující desku Ramps se dá také zapojit druhý extrudér nebo LCD displej. Díky displeji je možné tiskárnu ovládat bez nutnosti mít tiskárnu připojenou přes USB kabel k počítači. Vygenerovaný program se načítá z SD karty, která je vložena do slotu u displeje. U displeje se nachází také rolovací tlačítko, díky němuž se tiskárna ovládá. Pro ovládání pomocí PC byl zvolen software Repetier-Host 1.6.1..

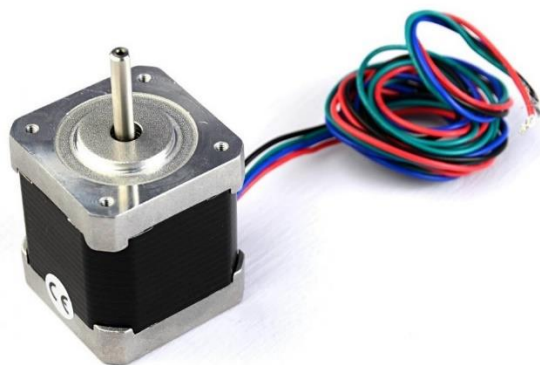
Krokový motor

Tiskárna Rebel II je navržena s krokovými motory NEMA17 - SX17-1003LQEF (obr.2.3a). Díky univerzální přírubě NEMA17, nízké váze, dostatečnému krouticímu momentu a příznivé ceně jsou tyto motory velice vhodné pro RepRap tiskárny. Krokové motorky jsou potřeba pro pohyby v ose X (1ks), v ose Y (1ks), v ose Z (2ks) a pro pohyb filamentu do extrudéru (1ks). Na výstupních hřídelích motorků (osy X a Y) jsou nasazeny ozubené řemenice T2,5.

Parametry motoru NEMA17 – SX17-1003LQEF [20]:

- výrobce Microcon s.r.o.,
- krouticí moment 0,3 Nm,
- krok $1,8^\circ$,
- jmenovitý proud 1 A,
- výstupní hřídel $\varnothing 5$ mm,
- hmotnost 0,2 Kg.

K určení nulového bodu jsou jednotlivé osy opatřeny mechanickými koncovými spínači. Seřízení polohy spínače na ose Z je poměrně složité, jelikož je nutné ustavit spínač s přesností na desetiny až setiny milimetru. To se děje například pomocí papírku o určité tloušťce. Papírek se vloží mezi trysku a tiskovou podložku tak, aby mírně prokluzoval. Spínač se ustaví. Tloušťka papírku se vloží do softwaru tiskárny. Software si vypočítá teoretickou nulovou hodnotu, ze které později vychází.



a)



b)

Obr. 2.3 a) Krokový motor SX17-1003LQEF [20], b) Průmyslový zdroj 12V 350W [21].

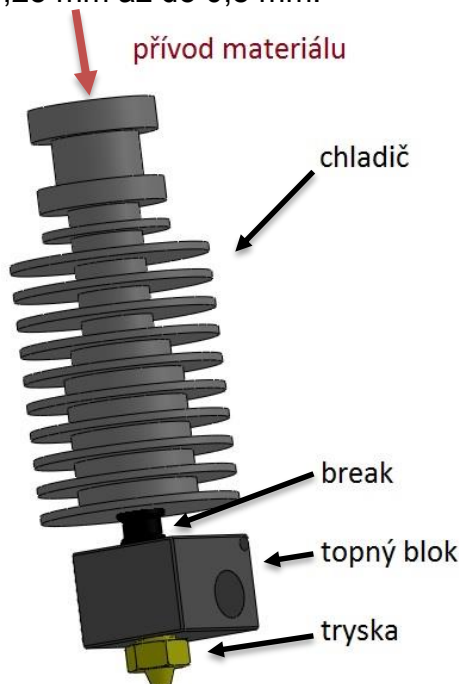
Zdroj

Celá řídicí elektronika je navržena pro stejnosměrné napětí 12V a minimální proud 15–20A. Nejprve byl použit počítačový zdroj o výkonu 250W. Nicméně se ukázalo, že je zejména pro tisk materiálu ABS, kdy je potřeba nahřát pracovní podložku na nejméně 110°C , nedostatečný. Proto byl použit průmyslový zdroj o výkonu 350W (obr.2.3b). Tento zdroj je již dostatečný.

2.3 Tisková hlava

Celá tisková hlava se skládá především z vytisknutého plastového pojezdu extrudéru, krokového motorku a samotného extrudéru (hotendu). Krokový motorek Microcon, který obstarává pohyb tiskové struny do hotendu, je připevněn k plastovému pojezdu extrudéru. Na výstupní hřídel krokového motorku je přišroubovaný ozubený pastorek. K pojezdu je připevněna také plastová páčka přtlaku, která tlačí pomocí pružiny filament na ozubený pastorek a tím zajišťuje neproklouznutí tiskového materiálu. Tato varianta, kdy motorek podává materiál hned u čela extrudéru, se nazývá tzv. přímé podávání. Mimo to existuje i varianta, kdy je motorek uložen mimo konstrukci tiskové hlavy a tiskový materiál je do extrudéru veden v bowdenu. Varianta s bowdenem nemusí při pohybu v ose X přesouvat hmotnost motoru, a proto zde působí při pohybu menší setrvačné síly. Při velkých délkách bowdenu je ovšem horší vedení materiálu díky tření. Po zvážení obou variant bylo vybráno přímé podávání [19].

Samotný extrudér se skládá ze čtyř základních částí (obr. 2.4). Chladič a tzv. break slouží pro vedení tiskového materiálu do topného bloku. Chladič je zde proto, aby odváděl teplo do okolí a filament se v této části nehomogenizoval. Následuje topný blok. Do této části je připevněné topné tělísko a termistor pro měření aktuální teploty. Zde je zvolený tiskový materiál převeden do homogenního stavu a vytlačen přes trysku o určitém průměru na tiskovou podložku. Běžně se používají trysky s průměry od 0,25 mm až do 0,8 mm.



Obr. 2.4 Schéma extrudéru.

Testovací 3D tiskárna byla osazena celokovovou tryskou s PTFE trubičkou. U této konstrukce hotendu je do breaku vložena trubička z PTFE. Tímto je docíleno toho, že konstrukce nemusí být tolik chlazená externím větráčkem. Mimo této varianty se používá také pouze celokovový extrudér nebo PEEKový extrudér. Celokovový extrudér je sice možné použít pro tisk za vyšších teplot, avšak je nutné chla-

dič a break velice chladit externím větráčkem. Bez aktivního chlazení by tiskový materiál změknuł už v části breaku, což je nežádoucí. PEEKový extrudér se takto chladit nemusí, ale zato se hodí jen pro tisk do teplot přibližně 260°C.

2.4 Pracovní podložka

Pracovní stůl je složen z vyhříváné desky MK3 a pojezdové hliníkové desky. K pojezdové desce jsou uchycena lineární ložiska a řemen pojezdu. Deska je vyrobena z hliníkového plechu o tloušťce 2,5mm. Vyhříváná deska je pak pomocí čtyř stavitelných šroubů přichycena k této desce. Vyhříváná hliníková deska slouží pro zvýšení adheze tisknutého výrobku z ABS materiálu. Deska se dá nahřát až na teplotu 120 °C. Samotný tisk se ale provádí na sklo o tloušťce 2 mm, které je pomocí svorek uchyceno k vyhříváné desce. Sklo je použité, protože vyhříváná deska je z výroby mírně prohnutá a její povrch je hrubý. Na očištěné sklo se pro lepší přilnavost nanáší ještě kaptonová páska. Celý povrch je před tiskem očištěn technickým lihem.

2.5 Materiál pro tisk

Základními termoplasty, které se používají pro tisk na RepRap tiskárnách jsou ABS a PLA. Oba dva materiály potřebují odlišné provozní parametry. Mimo tyto materiály se používají především stejné materiály jako u komerčních FDM tiskáren například Hips, PET, Nylon, PVA, atd. Všechny materiály jsou v současnosti k dostání ve velké barevné škále. Nově se začínají používat i pružné materiály, např. TPU. U těchto materiálů je ovšem problémem jejich vedení do extrudéru, jelikož mají tendenci vychylovat se mezi podávacím ozubením a extrudérem.

2.5.1 ABS

Termoplast ABS (Akrylonitrilbutadienstyren) se používá pro tisk nejčastěji. Jedná se o směr monomerů akrylonitrilu, butadienu a styrenu v určitém poměru. Daný poměr zajišťuje ve výsledku velice dobrý poměr mezi pevností v tahu a houževnatostí při zachování přiměřené tuhosti. Kromě pigmentace plastu je možné ABS i povrchově upravovat, jako například galvanicky pokovit. ABS je díky svým vlastnostem velice používaný termoplast v oblastech automobilního, hudebního, chemického a stavebního průmyslu, kdy chceme levný, odolný, barevně stálý plast s vysokou kvalitou povrchu [22].

Hlavní výhody ABS [23]:

- vysoká rázová houževnatost i při nízkých teplotách,
- tlumení zvuku,
- lepení dílů acetylenem a polyakrylátovými lepidly,
- odolnost proti mnoha chemikáliím,
- nízká tepelná vodivost (až do 110°).

Nevýhodou je především nízká odolnost proti povětrnostním vlivům a špatná odolnost proti hoření. Hlavní nevýhodou tohoto materiálu je ovšem náchylnost na deformace při chladnutí. Při tisku ABS materiálu se proto musí použít vyhříváná

deska. Deska se většinou vyhřívá na 100 – 120 °C. Teplota tiskového materiálu v extrudéru je okolo 210 – 250 °C podle použitého druhu ABS. Při tisku je cítit charakteristický mírný zápach pálení plastu, je proto nutné odvětrávání z místnosti. Cena 1kg materiálu se pohybuje v rozmezí 450 – 800 Kč.

2.5.2 PLA

Materiál PLA neboli Polylactid Acid je biologicky odbouratelný materiál. Vyrábí se především z kukuřičného či bramborového škrobu. Oproti ABS se PLA nehodí pro aplikace při teplotách nad 60°C, kdy začíná měknout. Výrobky jsou více křehké než ABS, ale zároveň mají lepší vzhled (lesk). Dále je nutné skladovat PLA v suchém prostředí, jelikož pohlcuje vlhkost. Při tisku se poté v plastu nepravidelně objevují bublinky vody a tím se výrazně zhoršuje kvalita povrchu tištěného objektu. Vlhkost je možné odstranit sušením tiskové struny v peci vyhřáté na teplotu max. 60 °C [24,25].

Výhody PLA [25]:

- šetrný k životnímu prostředí,
- rozměrová stálost při tisku,
- výroba detailnějších výrobků.

U tohoto materiálu se při tisku nemusí používat vyhřívána podložka, protože materiál není tolik náchylný na deformace při chladnutí. Při tisku je cítit podobně jako smažení rostlinného oleje. Materiál je více náchylný k ucpání extrudéru – je nutné chladit trysku a funkční plochy trysky mít přesně obrobene. Pokud se při postprocesingu výrobek například brousí, je nutné brousit za přítomnosti vody, aby docházelo k chlazení modelu a ten se zahřátím nedeformoval. Teplota tisku se pohybuje okolo 180 – 220 °C. Cena za 1kg balení je 400 – 800 Kč [25,26].

2.5.3 Hips

Hips je houževnatý polystyren s přídavkem kaučuku. Toto spojení zajišťuje především zvýšenou rázovou pevnost a lepší tepelnou tvarovatelnost. Velkou výhodou tohoto materiálu je jeho nízká hmotnost a dobrá odolnost vůči chemickým látkám. Proto se často používá v potravinářském průmyslu či jako obalový materiál. Díky příměsi kaučuku je náchylný k stárnutí, proto není vhodné používat tento materiál ve venkovním prostředí [25,27].

Hlavní výhody ABS [28]:

- vhodný pro styk s potravinami,
- výborné elektroizolační vlastnosti,
- dobrá odolnost proti mechanickému rázu.
- malá objemová hmotnost.

Tento materiál je rozpustný v limonenu. Díky tomu se Hips používá především jako podpurný materiál. Odpadá zdoluhavé mechanické odstranění podpor. Objekt se pouze vloží na určitý čas do kapaliny a podpory se rozpustí. Technologické vlastnosti tisku má velmi podobné s materiálem ABS. Je nutné použít desku vyhřátou na 100 – 110 °C. Teplota tištěného materiálu při tisku se pohybuje

v rozmezí 200 – 220 °C. Cena materiálu je v rozmezí 600 – 850 Kč za 1kg. Hips se dodává běžně pouze ve žluté a bílé barvě.

V tabulce 2.1 je uveden přehled mechanických vlastností vybraných materiálů pro experimenty. Hodnoty v tabulce jsou uvedeny pro vzorky z materiálů vyrobené vstříkáním plastů do formy.

Tab. 2.1 Mechanické vlastnosti vybraných materiálů [29].

Mechanické vlastnosti	PLA	ABS	Hips
Modul pružnosti v tahu [GPa]	3,5	2,14	1,91
Pevnost v tahu [MPa]	60	43	16
Prodloužení [%]	3,8	2,7	50
Modul pružnosti v ohybu [MPa]	2,3	2,05	2,00
Pevnost v ohybu [MPa]	57	65	50

Všechny tyto vlastnosti měly vliv při výběrání těchto testovaných materiálů. Samotné tištění vzorků probíhá v uzavřené místnosti v rodinném domě, kde se vyskytují i další osoby kromě obsluhy tiskárny. Proto byl vybrán jako hlavní testovaný materiál ekologicky nezávadný materiál PLA. Materiály ABS a Hips byly zvoleny pro doplňující porovnání.

3 PROVOZNÍ PARAMETRY TISKU

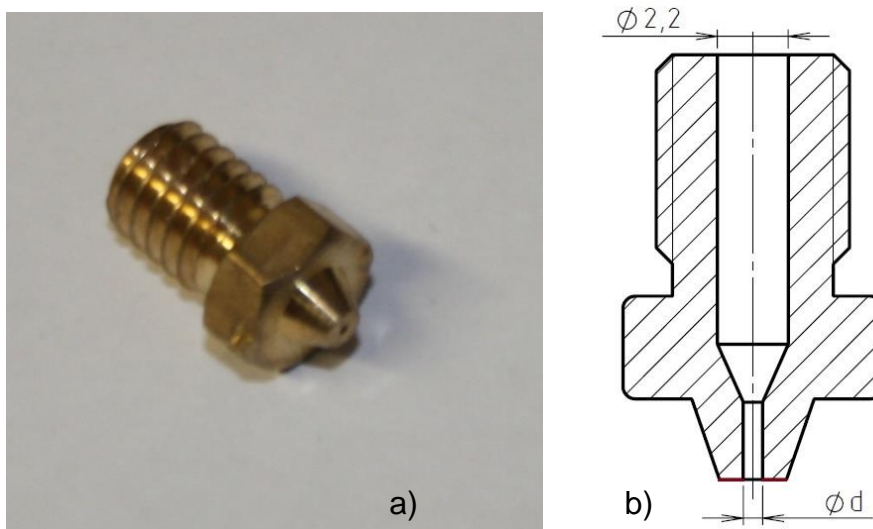
Provozní parametry tisku je soubor tiskových kritérií, která jsou dána principem technologie FDM tisku. Parametry tisku se rozdělují na hlavní parametry (přímo ovlivňují kvalitu a mechanické vlastnosti výsledného výrobku) a pomocné parametry (nepřímo pomáhají k zajištění správného geometrického tvaru výsledného výrobku). Vhodné určení a nastavení provozních parametrů tisku vychází především ze zkušeností uživatele s konkrétní 3D tiskárnou a použitým tiskovým materiálem [30].

3.1 Hlavní parametry tisku

Tyto parametry přímo ovlivňují kvalitu výsledného výrobku a jeho mechanické vlastnosti. Jedná se především o parametry, které vedou k nanášení materiálu z extrudéru na tiskovou plochu za požadovaného pohybu, v definovaném množství, rychlosti a v určité výšce nad podložkou.

3.1.1 Velikost trysky

Velikost trysky je dána průměrem otvoru, kterým se vytlačuje materiál z extrudéru na tiskovou plochu. Běžně se pro RepRap tiskárny používají průměry otvorů od 0,2 mm do 1 mm. Tento otvor musí být kvalitně obrobený, aby roztavený materiál neměl tendenci se po vytlačení stáčet do smyček u hrany trysky. Nezamotané vlákno materiálu by mělo volně vycházet z trysky dle požadovaného pracovního pohybu. Tryska je opatřena závitem M6 pro snadnou výměnu. Výměnu trysky je důležité provádět za horka při teplotě tisku, jinak hrozí unik materiálu kolem závitu. Dále je nutné zajistit přesné dosednutí trysky na čelo breaku. Na obr. 3.1a) je znázorněna tryska pro extrudér typu E3D V6. Důležitá je také malá plocha na špičce trysky. Toto mezikruží slouží při vytlačování materiálu jako hladící břit, který nanesené vlákno uhlazuje. Hladící plocha je obrázku 3.1b) znázorněna červeně.

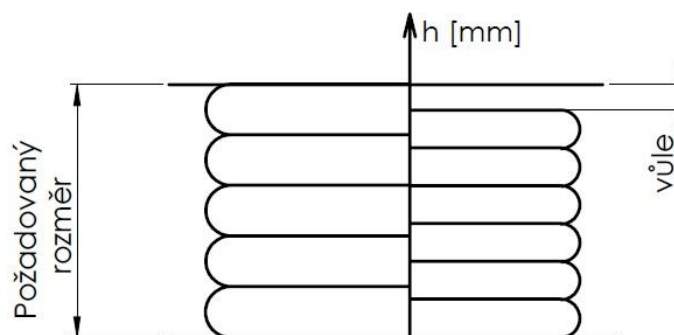


Obr. 3.1 Tryska pro extrudér E3D V6 – a) Výtlačná tryska, b) Řez tryskou.

3.1.2 Výška vrstvy

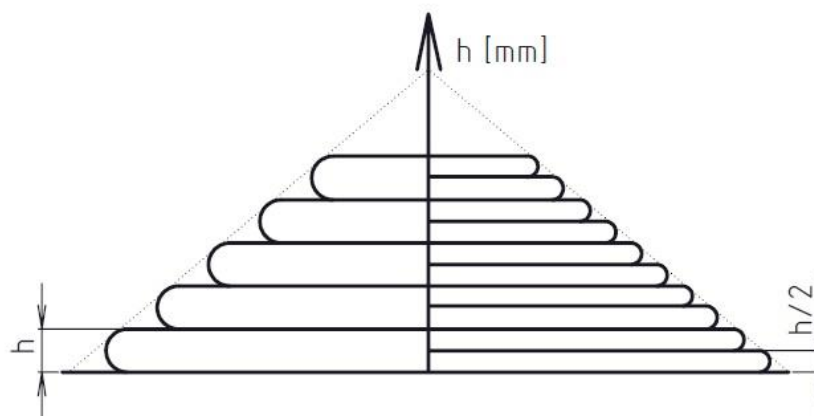
Výška vrstvy je patrně nejvýznamnější parametr, který má přímo vliv na kvalitu ploch a rozměrů tištěného objektu. Výška vrstvy je vzdálenost mezi špičkou trysky extrudéru a pracovní plochou (poslední vrstvou modelu). Pro zvýšení přilnavosti první vrstvy na pracovní podložku je možné nastavit rozdílnou výšku počáteční vrstvy a jinou výšku dalších vrstev. Při ideálním návrhu tištěného objektu je dobré brát zřetel na toto vrstvení a navrhovat rozměry v ose Z v násobku výšky vrstvy. Tímto krokem se odstraní nedotisknutí rozměru předmětu. Na obrázku 3.2 je tento problém rozkreslen. Některé nové softwary již dokáží tento problém odstranit, a to tak, že poslední výšku vrstvy přizpůsobí požadovanému rozměru, aby výsledný model nebyl menší ani větší.

Dle obrázku 3.2 je patné také, že drsnost povrchu bočních stěn přímo závisí na výšce vrstvy. Obecně platí, že čím je větší výška mezi jednotlivými vrstvami, tím je horší drsnost povrchu bočních stěn. Na drsnost povrchu má také značný vliv průměr použité výtlačné trysky. Tyto závislosti jsou předmětem experimentální části této práce.



Obr. 3.2 Schéma nedotisknutí vzorku

Dalším problémem při tisku je schodovitost u tvarových dílců. Schodovitost vzniká již z principu technologie FDM a projevuje se především na šikmých nebo zaoblených plochách. Ve skutečnosti tvarová nebo šikmá plocha není přesně vyrobena, ale jednotlivá vlákna jsou pouze tečně umístěna k této ploše. Schodovitost se nedá úplně odstranit, ale snížením výšky vrstvy se dá zmenšit. Na obr. 3.3 je uvedeno schéma vlivu výšky vrstvy na schodovitost u požadované šikmé plochy.



Obr. 3.3 Vliv výšky vrstvy na schodovitost u požadované šikmé plochy

3.1.3 Rychlost tisku

Obecně platí, že s vzrůstající rychlostí tisku klesá kvalita vytištěných výrobků. Nicméně rychlosti tisku závisí také především na tuhosti jednotlivých prvků tiskárny a na typu tiskárny. Pokud bude tiskárna osazena těžkým pracovním stolem nebo tiskovou hlavou, omezují nám setrvačné síly negativně maximální rychlost tisku. Tento problém nastává především při použití dvou extrudérů – dvou krokových motorků na jedné tiskové hlavě. V tomto případě je výhodnější použít krokový motorek uložený mimo pohyblivou tiskovou hlavu, tiskový materiál do extrudéru vést bowdenem a tím eliminovat větší setrvačné síly.

Nastavení vhodné rychlosti tisku vychází zejména ze zkušeností uživatele s konkrétní tiskárnou.

3.1.4 Teplota tisku

Teplota tisku je důležitá pro přesné dávkování vlákna materiálu po vygenerované dráze vrstvy modelu. Pokud je teplota pro daný materiál příliš malá, filament se v extrudéru nedostatečně roztaví a následně zanechá trysku. Jestliže nedojde k zanesení trysky je možné, že materiál se dostatečně nepropojí s již hotovým modelem a výsledná součást má špatné mechanické vlastnosti. Druhý extrém, příliš vysoká teplota, má důsledek přepalování filamentu již v extrudéru, a to způsobuje rovněž degradaci vlastností materiálu. Je proto vhodné před použitím nového materiálu zvolit několik teplot a porovnat průběh tisku, jakož i vyrobené součásti.

Doporučené teploty tisku jsou udávány výrobcem filamentu. Pro vybrané materiály jsou uvedeny teploty tisku v tabulce 3.1 na straně 34.

3.1.5 Stěny modelu

Rozlišujeme dva základní typy stěn – vnější stěny, které obklopují vytištěný objekt (vyplněno 100% objemu) a výplň (možnost vyplnit v rozmezí 1 – 99%).

Vnější stěny

Vnější stěny jsou všechny viditelné obvodové stěny tělesa. Tyto stěny se rozdělují na [30]:

- Spodní stěna (základna)

Základna je první vrstva materiálu na pracovní podložce. Struktura povrchu kopíruje kvalitu povrchu pracovní podložky. U této vrstvy je nutné zabezpečit dobrou přilnavost vůči podložce, proto je možné nastavit jiné technologické parametry (výška vrstvy, teplota tisku) než u dalších vrstev. K spodní vrstvě také může být připojena pomocná krempa (3.2.3 Pomocná krempa a lem), která se po dokončení tisku musí mechanicky odstranit.

- Boční stěny

Jsou to postranní svislé stěny výrobku. Na těchto stěnách je možné rozpoznat jednotlivé vrstvy modelu. Obvykle se používá šířka třech vláken materiálů, ale pro více namáhaná tělesa je vhodné volit větší šířku.

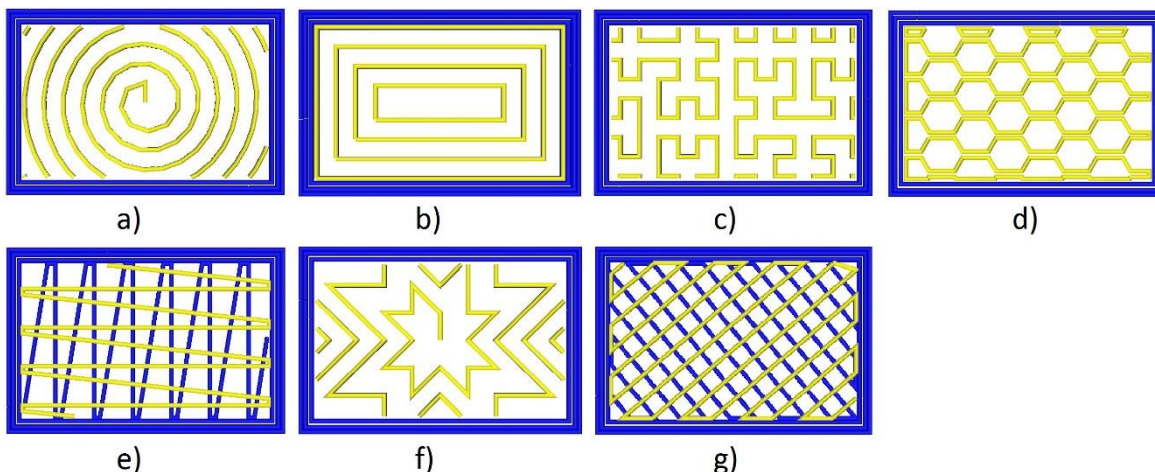
- Horní stěna (strop)

Strop jsou poslední vrstvy modelu, které vertikálně ukončují těleso. Tyto vrstvy se vytvářejí po vrstvách výplně za pomoci mostů (3.2.2 Most). Proto je dobré nastavit větší počet těchto vrstev oproti základně.

U všech vnějších stěn se může nastavit jejich tloušťka nebo počet vrstev. Horní a spodní stěny se utvářejí podle určitých vzorů (obr. 3.4a; b; c; f; g). Tyto vzory jsou totožné se vzory výplně.

Výplň

Z důvodu snížení časové náročnosti tisku a snížení potřebného objemu materiálu se nepoužívá velkoobjemová výplň modelu materiálem. Je možné nastavit určitý procentuální podíl, který má být vyplněn. Aby byly zachovány dobré mechanické vlastnosti modelu, je objem vyplněn pomocí určitých vzorů (obr. 3.4). Výplň také slouží při kompenzaci smrštění obvodových stěn.



Obr. 3.4 Vzory výplně programu Slic3r.

a) Archimedeananchors b) Concentric c) Hilbert Curve d) Honeycomb e) Line
f) Octagramspiral g) Rectilinear.

3.2 Pomocné parametry tisku

Následující parametry tisku nepřímo pomáhají vytvořit tištěný model principem FDM technologie. Jedná se především o zabránění odlepení modelu od podložky, tisknutí do volného prostoru nebo o správné generování g-kódu.

3.2.1 Podpora

Podpora slouží k vytvoření převislých ploch ve volném prostoru modelu. Jestliže převislá plocha navazuje pozvolně na stěny modelu nebo se překonává menší vzdálenost mezi stěnami, je možné tuto mezeru překlenout pouze volným vláknem modelovacího materiálu.

Pokud je tiskárna osazena pouze jedním extrudérem, je podpora vytvořena pomocí modelovacího materiálu. Struktura má menší hustotu výplně než struktura modelu. Zároveň je mezi strukturou podpory a modelu vynechána jedna vrstva materiálu. Toto zaručuje snadnější mechanické oddělení podpory. Je ovšem nutné při odstraňování dbát zvýšené opatrnosti, aby nebyl poškozen vytisknutý model.

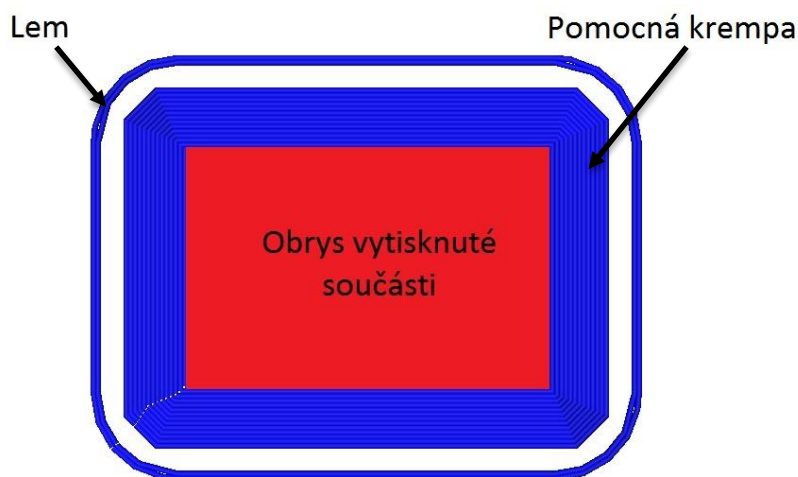
Tiskárna s dvěma extrudéry umožňuje tisknout jednak modelovací materiál a také materiál určený pro stavbu podpor. Jako podpůrný materiál se používají především materiály rozpustné v určitých kapalinách, což usnadňuje jejich odstranění. Hlavními představiteli těchto materiálů jsou Hips (rozpustný v lemonenu) a PVA (rozpustný ve vodě).

3.2.2 Most

Most lze vytvořit, pokud vlákno vedené přes volný prostor jde upevnit k materiálu za volným prostorem. Díky gravitační síle se vlákno prohne, proto se technologie mostů používá u menších mezer. Při velké mezeře je nutné použít podporu. Používají se dva principy vytváření mostů. První princip spočívá v tom, že se při přejezdu přes volný prostor rychlost pohybu sníží a průtok materiálu tryskou se zvýší. Tímto způsobem se vytvoří pevnější most, který není téměř prohnutý. Druhou variantou je při přejezdu zvýšit rychlost pohybu a zároveň snížit průtok materiálu tryskou. Prohnutí mostu se díky zvýšené rychlosti nestačí vytvořit [30,31].

3.2.3 Pomocná krempa a lem

Pomocná krempa se vytváří před začátkem tisku okolo modelu. Jedná se o jednovrstvé smyčky kolem tištěného modelu, které slouží k lepšímu přichycení modelu k pracovní podložce. Krempu je vhodné použít především u rozměrnějších modelů, kdy model je postaven na malé ploše na podložce a má tendenci kvůli smrštění nedržet na podložce. Nastavuje se šířka krempy v milimetrech. Po dokončení tisku je nutné mechanicky odstranit krempu od modelu.



Obr. 3. 5 Schéma dráhy pomocné krempy a lemu

Lem je jako pomocná krempa jednovrstvá smyčka kolem tištěného modelu, ovšem smyčka nepřiléhá k modelu. Hlavním úkolem této smyčky je stabilizace proudu

tisknutého materiálu z trysky. Je nutná při prvním spuštění tiskárny a především při změně materiálu, kdy je vhodné vytvořit více smyček. V ovládacím softwaru se nastavuje počet smyček. Na obr. 3.5 jsou znázorněny pozice krepky a lemu.

3.2.4 Teplota a povrch pracovní desky

Teplota a povrch pracovní desky jsou velmi důležité parametry k zajištění přilnavosti modelu k pracovní podložce během tisku. Kvůli smrštění materiálu při chladnutí vzniká snaha o odlepení modelu od podložky. Správná teplota pracovní podložky, výška první vrstvy a teplota první vrstvy vytlačovaného materiálu toto smrštění kompenzují. Je však nutné při nastavení těchto parametrů brát zřetel především na tisknutý materiál. V tabulce 3.1 jsou uvedeny teploty pracovních podložek pro nejběžněji používané materiály. Zároveň je nutné připravit vhodně povrch pracovní desky. Běžně se na pracovní podložku před tiskem nalepí kaptonová páska, která zvyšuje adhezi mezi podložkou a modelem. Před každým tiskem je v případě tisku například Hips nebo ABS vhodné na podložku nanést malou vrstvu roztoku ABS a acetonu. Díky této vrstvě roztoku se první vrstva tištěného materiálu lépe udrží na podložce.

Tab. 3.1 Doporučené teploty pracovní podložky a tisk u vybraných materiálů [29].

Materiál	Doporučené teploty pracovní podložky [°C]	Doporučené teploty tisku [°C]
ABS	100 – 115	200 – 240
PLA	0 – 40	195 – 210
Hips	90 – 100	195 – 230
PET	60 – 80	215 – 245
PC	90 – 100	210 – 240
PVA	0 – 40	195 – 225

3.2.5 Program pro převod do G-kódu

Neméně důležitým parametrem je i volba programu pro vytváření G-kódu z 3D modelu vytvořeného pomocí CAD programu. Ze zvoleného CAD programu je vyexportováno těleso ve formátu STL. Tento formát souboru popisuje plošné těleso pomocí trojúhelníkové sítě. Už při návrhu modelu a exportování je proto nutné brát na toto zřetel a počítat s určitým omezením.

Pro vytvoření G-kódu se běžně používají programy Slic3r, CuraEngine nebo Skeinforge. Každý z těchto programů generuje program podle jiného algoritmu. Například v Skeinforge je základní nastavení a výpočet programu značně zdlohavé a je nutné důkladné seznámení se softwarem. Oproti tomu u CuraEngine nebo Slic3ru je základní nastavení zcela intuitivní a pochopení programu zabere krátký čas. Také převod do G-kódu je značně rychlejší. Všechny tyto programy mají volné verze, které se dají zdarma stáhnout z internetu. Pro experiment byl zvolen program Slic3r verze 1.2.9.

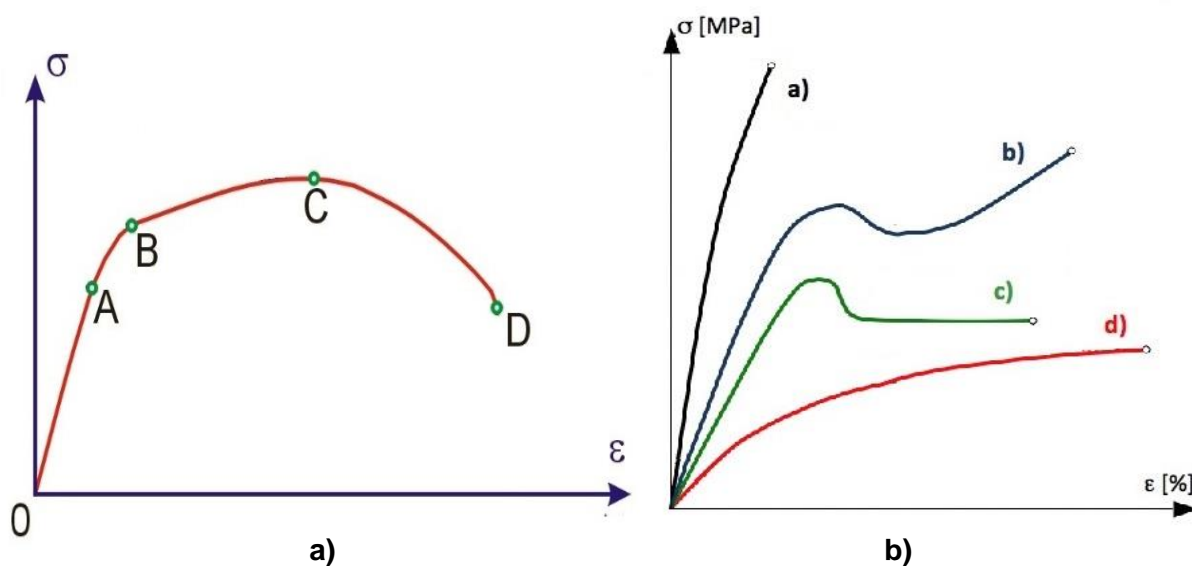
4 REALIZACE EXPERIMENTŮ

Praktická část této práce je zaměřena na provedení testů k určení vlivu průměru trysky extrudéru na kvalitu výsledného výrobku vyrobeného na RepRap 3D tiskárně. První část experimentu se zabývá porovnáním a vyhodnocením mechanických vlastností pro zvolený tištěný materiál PLA. Druhá část je věnována porovnání a vyhodnocení kvality tištěných ploch. Poslední část experimentu je zaměřena na vyhodnocení přesnosti rozměrů jednotlivých prvků a výplně tělesa modelu.

4.1 Mechanické vlastnosti

Porovnání a vyhodnocení mechanických vlastností bude provedeno pomocí tahové zkoušky. Tento experiment je realizován pro velmi rozšířený materiál PLA za určitých předem daných technologických parametrů tisku. Sledované mechanické vlastnosti budou především mez pevnosti a tažnost materiálu.

4.1.1 Tahová zkouška – ČSN EN ISO 297.1



Obr. 4.1 a) Tahový diagram se smluvní mezí kluzu pro ocel,
b) Tahový diagram pro plasty [32].

Testovaný vzorek je upnut ve zkušebním stroji. Následně je zatěžován zvyšující se silou za konstantní rychlosti zatěžování, dokud se vzorek nepřetrhne nebo dokud nedosáhneme přednastavených hodnot. Během testu měříme zatěžující sílu (dynamometrem) a prodloužení vzorku (déлковým snímačem polohy). Z těchto naměřených hodnot je vyhodnocen tahový diagram [33].

Obrázek 4.1a) znázorňuje tvar smluvního tahového diagramu. Tento diagram je pro různé materiály odlišný. Přímka od bodu 0 do bodu A je část, kde platí Hookův zákon. Platí zde, že napětí je přímo úměrné deformaci. Bod A se označuje jako mez úměrnosti. Bod B je nazýván mezí pružnosti. Do tohoto bodu se materiál při zatížení chová elasticky, tzn., že po odlehčení se vzorek vrátí do počáteční délky. Oblast od bodu B do bodu C je oblast, kdy materiál začne plasticky téct a po od-

lehčení se vzorek nevrátí do počáteční délky. Maximum křivky, bod C, je označováno jako mez pevnosti v tahu (vztah 4.1). Jedná se o maximální sílu, kterou vzorek přenese o určitém průřezu. Po překročení bodu C vzniká tzv. krček, což je postupné zmenšení průřezu vzorku až do bodu D, kdy se vzorek přetrhne. Po přetrhnutí vzorku se spočítá tažnost A (vztah 4.2) [33,34].

Vztah pro výpočet meze pevnosti:

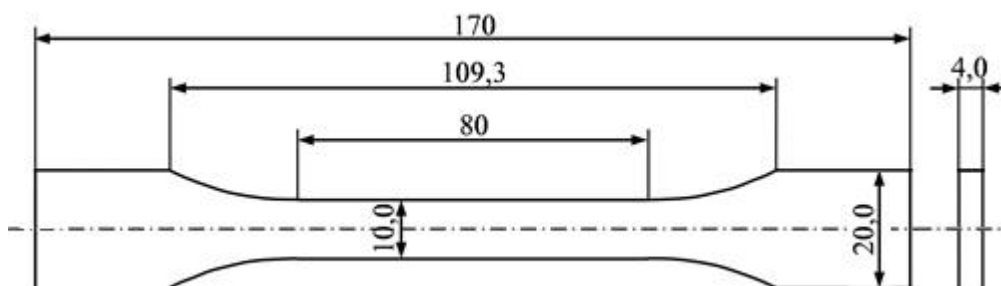
$$R_m = \frac{F}{S} = \frac{F}{a \times b} \text{ [MPa]} \quad (4.1)$$

Vztah pro výpočet tažnosti:

$$A = \frac{L-L_0}{L_0} \times 100 \text{ [%]} \quad (4.2)$$

Na obrázku 4.1b) je znázorněn tahový digram plastů. Černá křivka (a) je typická pro křehké polymery (reaktoplast, amorfnní termoplast, kompozit), modrá a zelená křivka (b;c) jsou charakteristické pro termoplasty a červená křivka (d) znázorňuje závislost pro houževnatý polymer – pryž.

Norma ČSN EN ISO 297–2 předepisuje pro různé zkoušené materiály rozdílné tvary vzorku. Podle testovaného materiálu PLA a vybraného měřicího zařízení byl pro tento experiment vybrán tvar 1A (obr. 4.2). Pro jednotlivé sledované parametry byly stanoveny skupiny 3 ks vzorků.



Obr. 4.2 Tvar vzorku 1A dle ČSN EN ISO 297-2 [35].

Pro stanovení Youngova modulu pružnosti E je normou předepsána rychlost zatěžování 1 mm/min, jelikož ale experiment není primárně zaměřen na stanovení této veličiny, je dle ČSN EN ISO 297–2 rychlost zatěžování s ohledem na zkoušený materiál zvolena 10 mm/min.

4.1.2 Měřicí zařízení

Pro provedení tahové zkoušky byl použit hydraulický zkušební stroj ZD40 (obr. 4.3). Tento stroj disponuje měřicím rozsahem 8 – 400 kN s chybou měření 1 %. Měřicí rozsah dráhy je 0 – 280 mm při chybě měření 0,01 mm. Zařízení je doplněno řídicí jednotkou EDC 60. Pro vyhodnocení dat je měřicí stroj dovybaven o PC s programem M-TEST v1.7. Další technické parametry zařízení jsou uvedeny v příloze č. 2. Po celou dobu měření byla v laboratoři teplota vzduchu 20 °C.

Rozměry všech vzorků byly před zkouškou změřeny a vloženy do programu M-TEST, který vyhodnocuje z naměřených dat pevnost v tahu, tažnost a další mechanické vlastnosti.

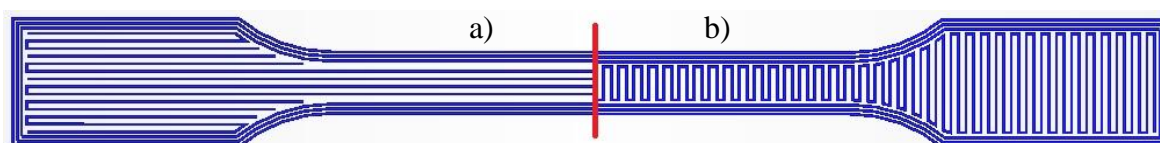


Obr. 4.3 Zkušební stroj ZD40 pro provedení tahové zkoušky

4.1.3 Měřené parametry tisku

Experiment je zaměřen především na vliv průměru trysky extrudéru na mechanické vlastnosti výsledného výrobku. Proto jsou sledované technologické parametry průměr trysky, výška vrstvy a částečně orientace vláken výrobku. Na parametry – teplota tisku a rychlost tisku nebyl tento experiment zaměřen. Celý experiment je proveden pouze s materiálem PLA.

Většina vzorků byla vyrobena s podélně orientovanými vlákny s osou zatížení. Je zřejmé, že tyto vzorky s podélně uloženými vlákny vydrží větší zatížení. Pro jednoduché srovnání byla do experimentu také zahrnuta skupina vzorků s napříč orientovanými vlákny. V praxi se většinou používá kombinace podélně a napříč orientovaných vláken. Rozložení vláken použitých vzorků je znázorněno na obr. 4.4.



Obr. 4.4 Rozložení vláken ve vzorku: a) vlákna podélně, b) vlákna napříč.

Neměnné technologické parametry použité pro veškeré vzorky:

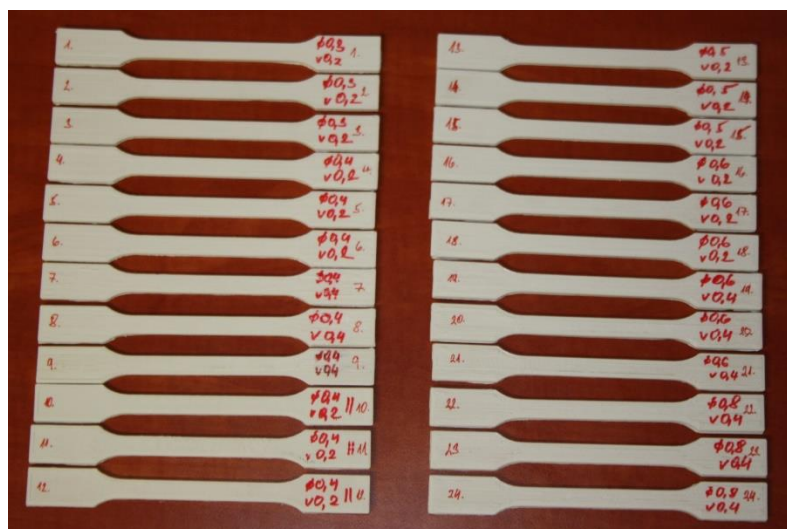
- teplota tisku 220 °C,
- rychlost tisku 35 mm/s,
- teplota pracovní desky 40 °C,
- teplota v místnosti při tisku 20 °C,
- tisková plocha není ofukována,
- použitý extrudér typ E3D V6 s ofukem chladiče,
- materiál bílé PLA – Ø1,75 mm.

Průměr trysky extrudéru má především vliv na množství přiváděného materiálu do objektu. Při každé výměně trysky extrudéru byl proveden základní jednoduchý test, při kterém byla vyrobena krychlička se 100 % výplní. Podle zhodnocené kvality testovaného objektu bylo upraveno množství přiváděného materiálu tak, aby měl vytištěný objekt jednotlivé dráhy spojitě a zároveň tak, aby nedocházelo k brodění trysky v extrémním množství vytlačeného materiálu.

V následující tabulce (tab. 4.1) jsou uvedeny kombinace měřených technologických parametrů jednotlivých skupin vzorků pro vyhodnocení tahové zkoušky. Celkem bylo změřeno a vyhodnoceno 24 vzorků (obr. 4.5).

Tab. 4.1 Tabulka kombinací měřených parametrů.

Číslo skupiny	Orientace vláken	Průměr trysky extrudéru [mm]	Výška vrstvy [mm]
1	podélně	0,2	0,2
2	podélně	0,4	0,2
3	podélně	0,4	0,4
4	napříč	0,4	0,2
5	podélně	0,5	0,2
6	podélně	0,6	0,2
7	podélně	0,6	0,4
8	podélně	0,8	0,4



Obr. 4.5 Vyrobené testovací vzorky před provedením tahové zkoušky.

4.2 Kvalita povrchu tištěných ploch

V další části experimentu byla provedena měření vedoucí ke zjištění kvality povrchu tištěných ploch. Experiment byl proveden pomocí dotykového měřicího přístroje. Testy byly provedeny jednak pro materiál PLA a pro srovnání i s materiály ABS a Hips. Sledované parametry jsou především největší výška profilu R_z a průměrná aritmetická úchylka profilu R_a .

4.2.1 Určení textury povrchu profilovou metodou

Mezinárodní norma ČSN EN ISO 4287 definuje termíny, definice a parametry pro určování textury povrchu profilovou metodou. Níže jsou z normy uvedeny pouze definice, které jsou nezbytné pro vyhodnocení experimentu.

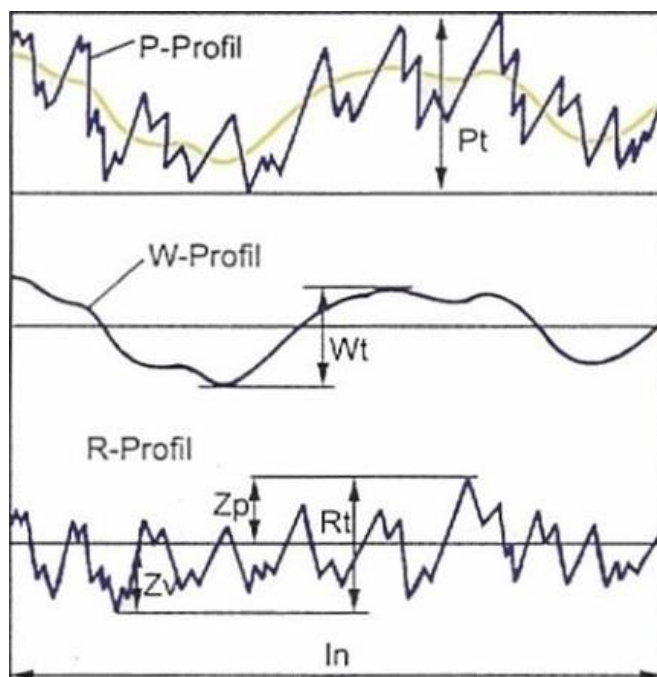
Základní profil – základ pro hodnocení parametrů základního profilu. Je vytvořen z úplného profilu (profil vzniklý dotykovým snímáním povrchu) použitím krátkovlnného filtru λ_s [36].

Profil vlnitosti – profil odvozený postupnou aplikací filtru profilu potlačující dlouhovlnné složky λ_f a krátkovlnné složky λ_c na základní profil. Uplatněním filtru je profil záměrně změněn [36].

Na profil vlnitosti má vliv především tuhost soustavy stroj – nástroj, nevyváženost nástroje, zpevnění materiálu atd.

Profil drsnosti – profil vychází ze základního profilu potlačením dlouhovlnných složek použitím filtru profilu λ_c . Užitím filtru je profil záměrně pozměněn [36].

Na obrázku 4.6 jsou znázorněny ze základního profilu odfiltrované profily vlnitosti a drsnosti.



Obr. 4.6 Základní profil, profil vlnitosti a profil drsnosti [37].

Definice parametrů profilu dle ČSN EN ISO 4287

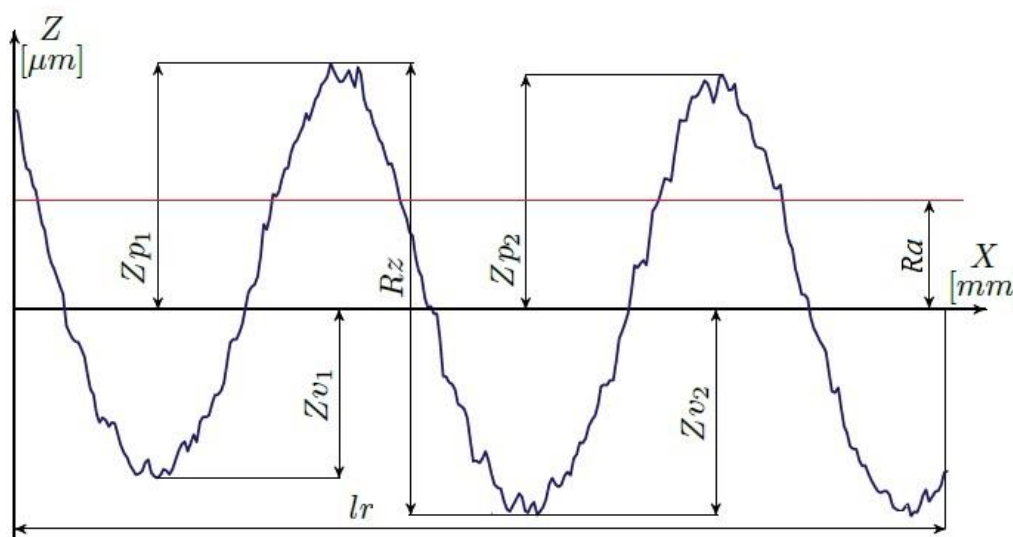
Norma ČSN EN ISO 4287 definuje parametry výškové, délkové a tvarové. Celkem je normou definováno šestnáct parametrů profilu povrchu. Každý z těchto parametrů se dá vyhodnotit jak na základním profilu (P), tak i na profilu vlnitosti (W) nebo na profilu drsnosti (R). Norma také definuje, zda se parametr vyhodnocuje na základní délce nebo na vyhodnocované délce. Základní délka profilu (l_p, l_w nebo l_r) je délka v ose X použita pro rozpoznání nerovností charakterizujících vyhodnocovaný povrch. Vyhodnocovaná délka (l_n) je také délka v ose X, ale je použita pro posouzení vyhodnocovaného profilu. Vyhodnocovaná délka může pro parametry vyhodnocené na profilu drsnosti obsahovat více základních délek. Výsledná hodnota parametru je poté průměrem hodnot z celé délky [36].

Pro vyhodnocení experimentu byly použity pouze dva parametry profilu – R_z a R_a . Níže jsou uvedeny definice obou parametrů dle normy.

Největší výška profilu R_z – jde o součet výšky Z_p nejvyššího výstupku a hloubky Z_v nejnižší prohlubně v rozsahu základní délky [36].

Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu R_a – aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky (obr. 4.7) [36].

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (4.3)$$



Obr. 4.7 Největší výška profilu R_z a průměrná aritmetická úchylka profilu R_a [38].

Jak je vidět z obrázku 4.7, tento parametr nerozlišuje mezi výstupky a prohlubněmi různých tvarů a k popsání charakteristiky povrchu je nevhodný. Nicméně v praxi se používá velmi často, jelikož se dobře hodí pro regulaci výrobního procesu.

4.2.2 Měření parametrů profilu drsnosti – ČSN EN ISO 4287

Norma ČSN EN ISO 4288 se zabývá pravidly a postupy pro posuzování textury povrchu.

V případě, že směr měření není předem uveden, je obrobek pro měření polohován tak, aby směr řezu odpovídal největším hodnotám parametrů drsnosti (R_z , R_a). Tento směr je kolmý k poloze povrchu. Měření se provede na ploše obrobku, kde jsou například vizuálně pozorováním očekávány maximální hodnoty. Na ploše se provede rovnoměrné rozdělení jednotlivých měření pro dosažení nezávislých výsledků [39].

Je-li základní délka uvedena ve výrobní dokumentaci, mezní vlnová délka je vybrána přímo podle této základní délky. Pokud základní délka nebo drsnost není uvedena ve výrobní dokumentaci, postupuje se podle následujícího postupu měření [38].

Nejprve je nutné rozhodnout, jestli je profil drsnosti neperiodický nebo periodický. Podle tohoto rozhodnutí se provede příslušný postup měření. Protože se předpokládá na vzorcích plochy s periodickým profilem drsnosti, je níže uveden pouze postup měření pro tento profil.

Postup měření pro periodický profil drsnosti [39]:

- 1) Na povrchu s neznámou drsností se odhadne parametr R_{Sm} .
- 2) Pro parametr R_{Sm} se dle tabulky 4.2 určí doporučená hodnota mezní vlnové délky cut-off.
- 3) Pokud je to nezbytné, změří se parametr R_{Sm} za užití mezní vlnové délky z bodu 2).
- 4) V případě, že hodnota R_{Sm} z bodu 3) odpovídá dle tab. 4.2 menší nebo větší hodnotě mezní vlnové délky cut-off než v kroku 2), aplikuje se menší nebo větší hodnota mezní vlnové délky cut-off.
- 5) Proveďte se reprezentativní měření vybraných parametrů při použití mezní vlnové délky (základní délky) odhadnuté v předchozích bodech

Tab. 4.2 Souhrn kritérií výběru základní délky drsnosti [39].

R_a [μm], R_z [μm], R_{Sm} [mm]	Základní délka drsnosti l_r [mm]	Vyhodnocovaná délka drsnosti l_n [mm]
$0,006 < R_a \leq 0,02$; $0,025 < R_z, R_{z1max} \leq 0,1$; $0,013 < R_{Sm} \leq 0,04$	0,08	0,4
$0,02 < R_a \leq 0,1$; $0,1 < R_z, R_{z1max} \leq 0,5$; $0,04 < R_{Sm} \leq 0,13$	0,25	1,25
$0,1 < R_a \leq 2$; $0,5 < R_z, R_{z1max} \leq 10$; $0,013 < R_{Sm} \leq 0,4$	0,8	4
$2 < R_a \leq 10$; $10 < R_z, R_{z1max} \leq 50$; $0,4 < R_{Sm} \leq 1,3$	2,5	12,5
$10 < R_a \leq 80$; $50 < R_z, R_{z1max} \leq 200$; $1,3 < R_{Sm} \leq 4$	8	40

4.2.3 Měřicí zařízení

Pro zjištění kvality povrchu byl použit přístroj Form Talysurf Intra 50 (obr. 4.8). Tento přístroj pracuje na principu dotykového snímání textury povrchu. Pro zpracování dat je přístroj od výrobce doplněn o PC s programem Ultra. Data jsou vyhodnocena dle ČSN EN ISO 4288. Délku snímání je možné volit od 0,1 – 50 mm. Přístroj disponuje úchytkou přímosti 0,4 μm na 50 mm. Rychlost měření je nastavitelná v rozmezí od 0,25 mm/s do 10 mm/s.



Obr. 4.8 Měřicí aparatura Form Talysurf Intra 50.

4.2.4 Měřené parametry tisku

Experiment byl proveden převážně s použitými materiály PLA, ABS a Hips. Sledované technologické parametry v tomto experimentu jsou: průměr trysky (vlákna) a výška vrstvy.

Před tiskem zkušebních vzorků byl proveden jednoduchý test, kdy byly vytištěny zkušební modely s rozdílnými parametry tisku. Na základě tohoto testu byly vybrány následující technologické parametry. Boční stěny vzorků byly vyrobeny o šířce tří vláken materiálu. Všechny vzorky byly vyrobeny vzorem rectilinear s výplní 30 – 50 %. Procento výplně bylo nastaveno podle použité trysky. Při použití větší trysky ($\varnothing 0,6$ mm a $\varnothing 0,8$ mm) byla výplň nastavena až na 50 %. Toto nastavení bylo použito, protože při menší procentuální hodnotě výplně, systém generuje krátké dráhy výplně a při vytváření horní stěny (stropu) vznikají velká přemostění vlákna přes volný prostor. Naopak při použití trysek s menším průměrem ($\varnothing 0,25$ mm a $\varnothing 0,3$ mm) byla použita 30% výplň.

Horní stěna, na které se provedlo měření, byla vytištěna vzorem rectilinear. Tloušťka horní stěny je vyrobena pomocí čtyřech posledních vrstev materiálu.

Pro jednotlivé materiály jsou nastavené neměnné parametry uvedeny v tabulce 4.3.

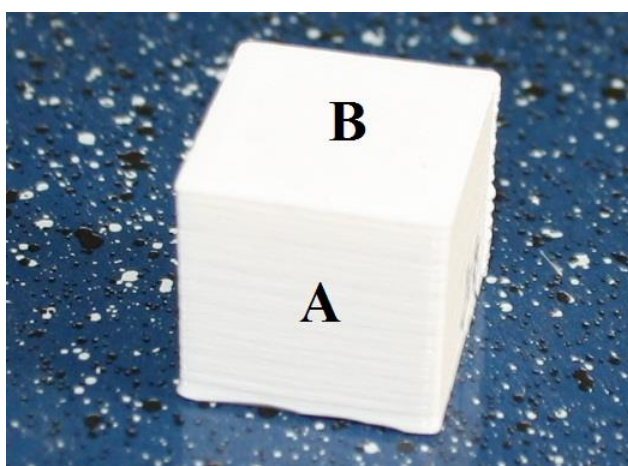
Tab. 4.3 Tabulka použitých technologických parametru pro jednotlivé materiály.

	PLA	ABS	Hips
Teplota tisku [°C]	220	240	235
Rychlost tisku [mm/s]	30	30	25
Teplota pracovní desky [°C]	40	115	105
Chlazení tištěného výrobku	ANO	NE	NE
Průměr filamentu [mm]	1,75		
Použitý extrudér	typ E3D V6 s ofukem chladiče		
Teplota v místnosti při tisku [°C]	20		

Tvar vzorku

Pro ušetření času při tisku byly vybrány vzorky o tvaru krychle s rozměry 20 x 20 x 20 milimetrů. Pro lepší soudržnost tištěného modelu s pracovní podložkou byla kolem vzorku vytištěna pomocná krempa, která byla po dokončení tisku odstraněna. Pro jednotlivé měřené skupiny parametrů byly stanoveny 3 ks vzorků. Modely z každé skupiny byly tištěny naráz.

Měření textury povrchu bylo provedeno na ploše boční – při tisku rovnoběžné s osou Z (označeno plocha A) a na ploše horní (označeno plocha B). Tyto plochy jsou znázorněny na obrázku 4.9.



Obr. 4.9 Měřené plochy na vzorku

V následující tabulce (tab. 4.4) jsou uvedeny kombinace měřených technologických parametrů jednotlivých skupin vzorků pro vyhodnocení jakosti povrchu.

Celkem bylo vyrobeno 135 vzorků. Všechny vzorky byly změřeny a vyhodnoceny na ploše A i B. Dohromady bylo tedy provedeno 270 měření.

Tab. 4.4 Tabulka kombinací měřených parametrů.

	Průměr trysky extrudéru [mm]	Výška vrstvy [mm]	Počet kusů
PLA	0,25	0,15	3
	0,3	0,15; 0,25	6
	0,4	0,15; 0,25; 0,35	9
	0,5	0,15; 0,25; 0,35	9
	0,6	0,15; 0,25; 0,35	9
	0,8	0,25; 0,35; 0,45	9
ABS	0,25	0,15	3
	0,3	0,15; 0,25	6
	0,4	0,15; 0,25; 0,35	9
	0,5	0,15; 0,25; 0,35	9
	0,6	0,15; 0,25; 0,35	9
	0,8	0,25; 0,35; 0,45	9
Hips	0,25	0,15	3
	0,3	0,15; 0,25	6
	0,4	0,15; 0,25; 0,35	9
	0,5	0,15; 0,25; 0,35	9
	0,6	0,15; 0,25; 0,35	9
	0,8	0,25; 0,35; 0,45	9

4.3 Přesnost tvarů jednotlivých prvků a výplně tělesa

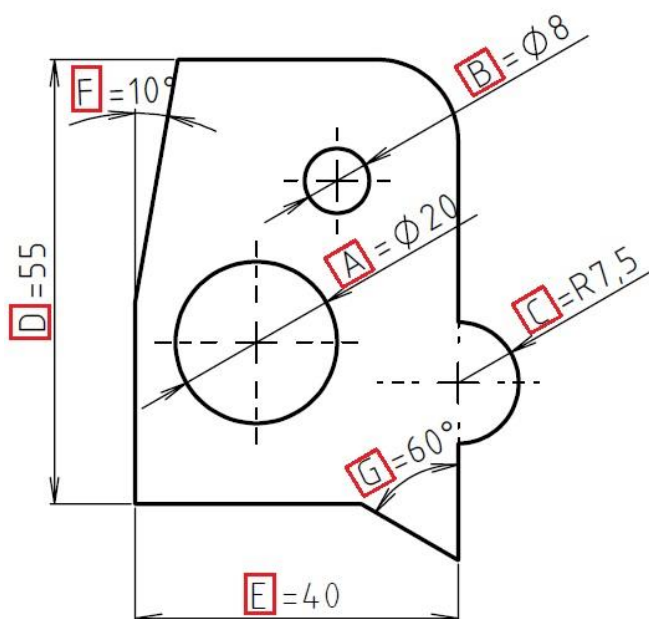
Posledním experimentem bylo provedení měření pro stanovení přesnosti rozměrů tvarů jednotlivých prvků a výplně tělesa. Experiment byl taktéž proveden především s materiálem PLA a pro porovnání také s materiály ABS a Hips.

4.3.1 Tvarová přesnost

Experiment pro zjištění tvarové přesnosti jednotlivých prvků v závislosti na průměru trysky byl navržen jako změření jednotlivých rozměrů tvarů. Základní rozměry byly zvoleny: průměr (poloměr) kruhu, velikost úhlů a délkové rozměry daného vzorku. Měření se provedlo pomocí naskenování tvaru experimentálního vzorku a následně se vyhodnotily úchytky naskenovaného tvaru pomocí grafického softwaru.

Tvar vzorku

Geometrický tvar vzorku byl proto vytvořen tak, aby obsahoval jednoduché základní tvary, u kterých se snadno přeměří jejich velikost. Vzorek obsahuje otvory, různě velké zkosení, zaoblení, vnější půlkruh a také rovnoběžné plochy pro určení délkového rozměru tvaru. Měřené tvarové prvky jsou orientovány rovnoběžně s pracovní plochou. Vzorek je zobrazen na obr. 4.10. Na tomto obrázku jsou také kótou vyznačeny všechny kontrolované tvary vzorku. Pro zrychlení výroby má vzorek tloušťku pouze 2 mm.



Obr. 4.10 Tvar zkušební vzorku.

Měřicí zařízení

Měření bylo realizováno pomocí 2D skeneru Canon CanoScan 9000F Mark II. Tento přístroj skenuje v maximálním rozlišení 4800 x 4800 dpi, což pro provedení experimentu zcela vyhovuje. Pro úpravu naskenované fotografie byly použity programy Zoner Photo Studio 15 a GIMP 2.8.16. Při následném měření a vyhodnocení dat byl užít software SolidWorks 2012.

4.3.2 Měřené parametry tisku

Stejně jako u předešlého experimentu jsou zde sledované parametry průměr trysky (vlákna) a výška vrstvy. Průměry trysek se při experimentu pohybovaly od 0,25 mm do 0,6 mm. Výška vrstvy se pro jednotlivé trysky postupně zvyšovala po 0,1 mm do maximální výšky 0,4 mm. Přehled kombinací parametrů je uveden v tabulce 4.5.

Nastavené neměnné technologické parametry tisku byly zvoleny stejné jako v případě měření kvality povrchu tištěných ploch. Tyto parametry jsou uvedeny v tabulce 4.3 na straně 43. Na rozdíl od předchozích vzorků byl ovšem vzorek vytvořen bez pomocné krepky a při tisku byl mírně chlazen pomocí větráčku.

Tab. 4.5 Tabulka kombinací sledovaných parametrů.

Materiál	Průměr trysky extrudéru [mm]	Výška vrstvy [mm]	Počet kusů
PLA ABS Hips	0,25	0,1; 0,2	6
	0,3	0,1; 0,2; 0,3	9
	0,4	0,1; 0,2; 0,3; 0,4	12
	0,5	0,1; 0,2; 0,3	9
	0,6	0,1; 0,2; 0,3	9

Celkem bylo změřeno a vyhodnoceno 135 vzorků. Část vyrobených vzorků je ukázána na obrázku 4.11.

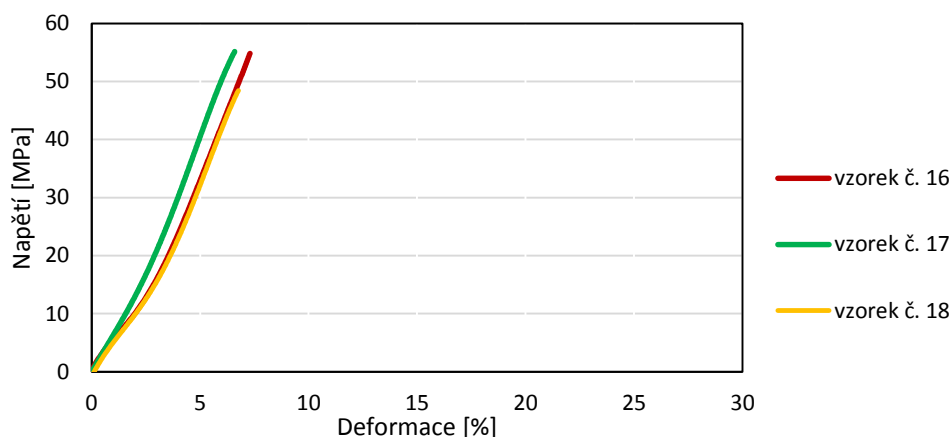


Obr. 4.11 Část vzorků vyrobených pro ověření tvarové přesnosti.

5 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTŮ

5.1 Mechanické vlastnosti

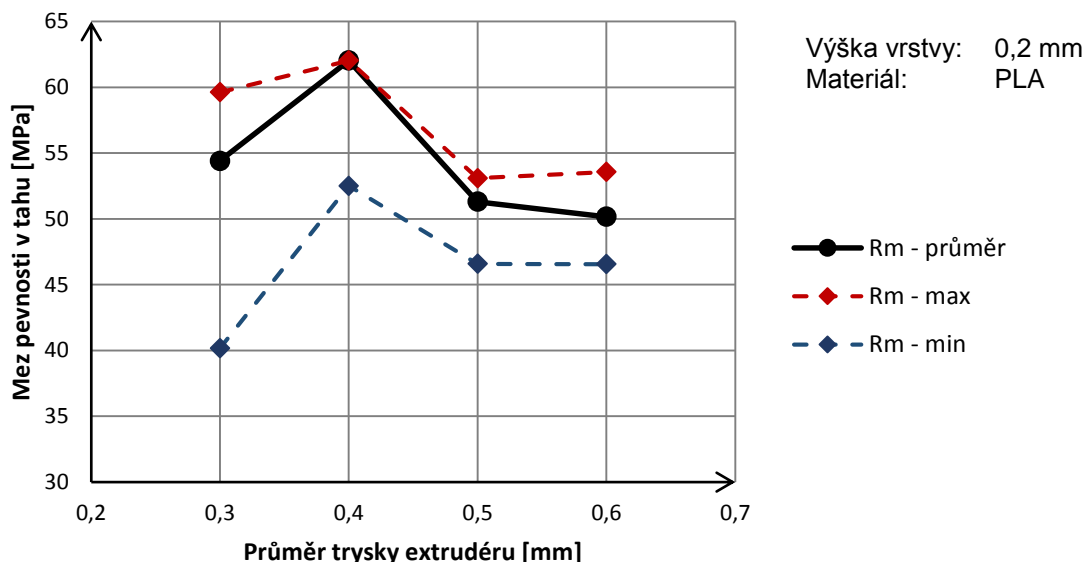
Pro následující porovnání byly vždy ze skupiny tří vzorků vybrány dva lepší vzorky a z nich byl vypočítán aritmetický průměr. Průběh provedené tahové zkoušky je znázorněn na obr. 5.1. Je zřejmé, že u vzorků dochází ke křehkému lomu.



Obr. 5.1 Průběh tahové zkoušky pro vzorky 16, 17 a 18.

5.1.1 Vliv průměru trysky na mez pevnosti v tahu

Pro vyhodnocení této závislosti byly vyrobeny vzorky různých průměrů trysky extrudéru. Experiment byl proveden se vzorky s podélně orientovanými vlákny a vzorky byly vytištěny ve dvou výškách vrstev – 0,2 mm a 0,4 mm.

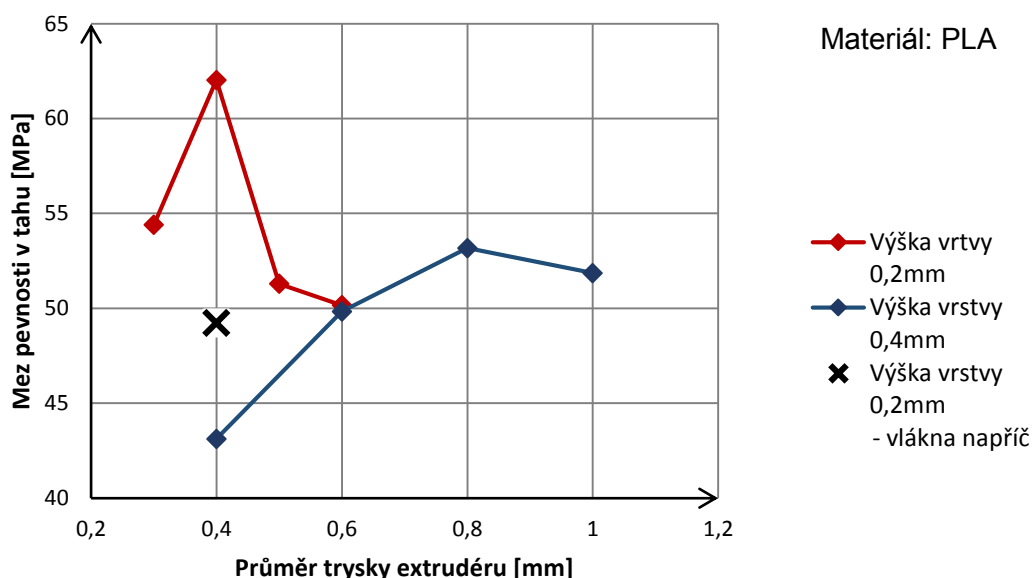


Obr. 5.2 Závislost meze pevnosti v tahu na průměru trysky.

Ze závislosti meze pevnosti v tahu na průměru trysky (obr. 5.2) je patrné, že mez pevnosti roste do okamžiku, kdy se průměr vrstvy rovná dvojnásobku výšky vrstvy. Při větším průměru trysky extrudéru než je dvojnásobek výšky vrstvy, dochází k poklesu meze pevnosti v tahu.

Na následujícím obrázku (5.3) je mimo závislosti meze pevnosti na průměru trysky při výšce vrstvy 0,2 mm také křivka znázorňující vzorky s výškou vrstvy 0,4 mm. Na této křivce je také patrný trend zvyšování meze pevnosti v tahu s rostoucím průměrem trysky do hodnoty, kdy dvojnásobek výšky vrstvy se rovná průměr trysky. Po překročení tohoto poměru meze pevnosti s rostoucím průměrem trysky povolna klesá.

V tomto grafu je také vynesena průměrná hodnota meze pevnosti v tahu pro jednu skupinu vzorků s vlákny rozloženými napříč zkušebním tělesem. Je zřejmé, že vzorky s kolmo orientovanými vlákny s osou zatěžování vykazují přibližně o 20% menší hodnotu R_m než vzorky s podélně orientovanými vlákny. Z důvodu omezení počtu vzorků jsou zde spolu srovnány pouze dvě skupiny vzorků materiálu PLA. Nepochybně ovšem tento rozdíl R_m bude i u dalších použitých průměrů trysky a výšek vrstvy.



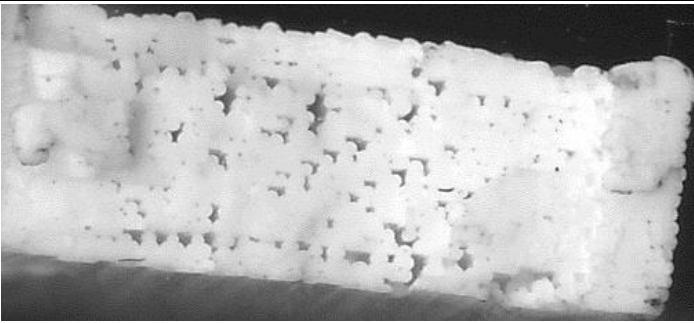
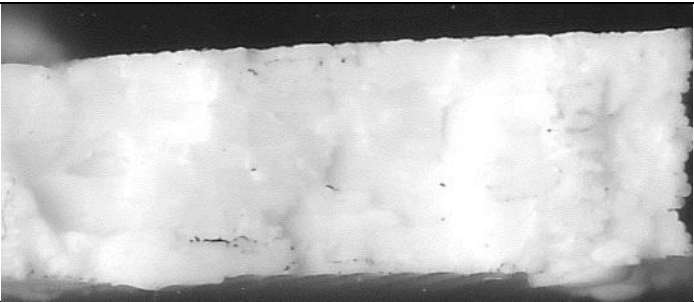
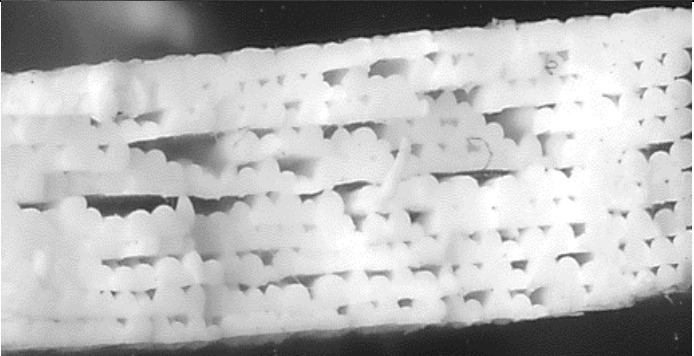
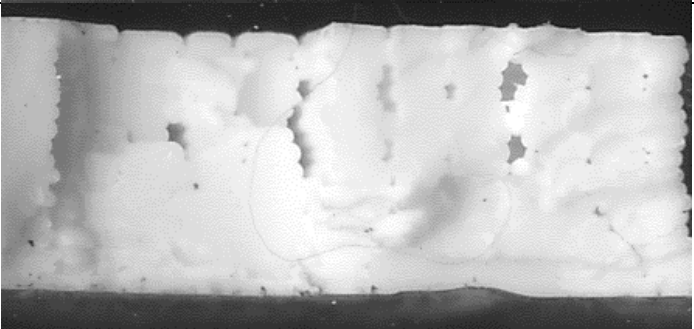

Obr. 5.3 Závislost meze pevnosti v tahu na průměru trysky.

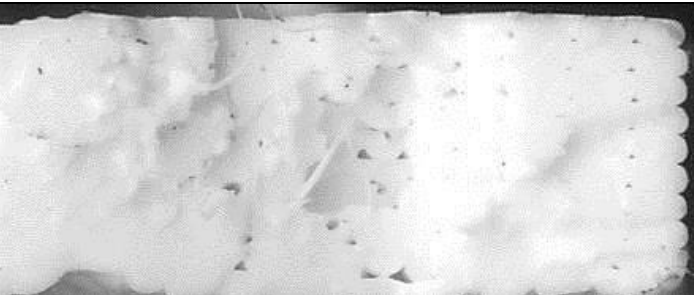
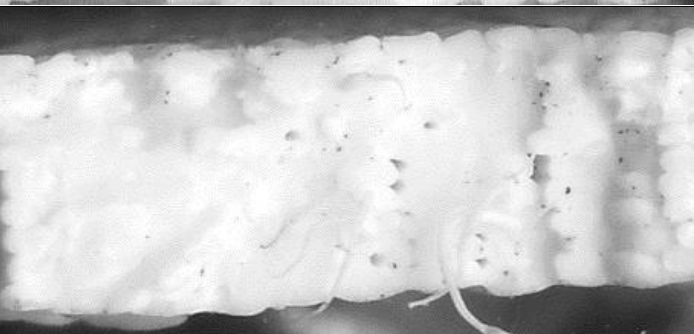
5.1.2 Lomová plocha a pórovitost vzorků

Z technologie FDM vyplývá, že vzorek je vyroben pomocí postupného vrstvení materiálu. Jelikož všechny vrstvy vzorku pro tahovou zkoušku mají stejně orientovaná vlákna, mezi jednotlivými vrstvami vznikají póry. Velikost a počet pórů závisí jednak na průměru vlákna materiálu (průměru výtlačné trysky extrudéru), na výšce vrstvy a také na softwaru, který nám generuje rozestupy mezi jednotlivými drahami pohybu extrudéru.

V tabulce 5.1 jsou zobrazeny lomové plochy vzorků po provedení tahové zkoušky. U všech vzorků lze na lomové ploše pozorovat křehký lom. Z tabulky je také patrná skutečná pórovitost vzorku v místě lomu. Největší pórovitost je viditelná u vzorků ze skupin 1 a 3, kdy výška vrstvy se rovná průměru trysky. U těchto vzorků je také vidět značné spojení pórů ve větší celky. Naopak nejmenší pórovitost je evidentně u vzorků s velkým poměrem výška vrstvy / průměr trysky (vlákna). U vzorků testované skupiny 5 je poznat při přetržení oddělení vláken ve svislém směru. Toto je způsobeno špatným spojením vláken kladených vedle sebe při tisku.

Tab. 5.1 Lomové plochy jednotlivých skupin vzorků s podélně rozloženými vlákny.

Číslo skupiny	Průměr trysky / Výška vrstvy [mm]	Lomová plocha vzorku (zvětšeno 20x)
1	0,2/0,2	
2	0,4/0,2	
3	0,4/0,4	
5	0,5/0,2	
6	0,6/0,2	

7	0,6/0,4	
8	0,8/0,4	

Při teoretickém výpočtu pórovitosti vychází u všech vzorků nezávisle na použité trysce či výšce vrstvy, že by póry měly zabírat přibližně 20% plochy průřezu, prakticky je toto číslo mnohem menší.

Vzorky ze skupin 7 a 8 mají v lomové ploše viditelně částečně natáhnutá vlákna. Tyto vzorky mají oproti ostatním zkušebním vzorků nepatrně větší tažnost.

U vzorku č. 7 (obr. 5.4) došlo při přetržení k částečnému oddělení soudržnosti mezi jednotlivými vrstvami. Toto odtržení podél vrstvy je dáno především technologickými parametry tisku, kdy výška vrstvy tisku se rovná průměru trysky (vlákna). Při tisku došlo k nedostatečnému spojení vrstev. Tento jev je také zřetelný na fotografii lomové plochy v tabulce 5.1. Vzorky ze skupiny 3 vykazují oproti skupině 2 (poloviční výška vrstvy) o cca 15 – 20 % menší hodnoty meze pevnosti v tahu (viz příloha č. 3).



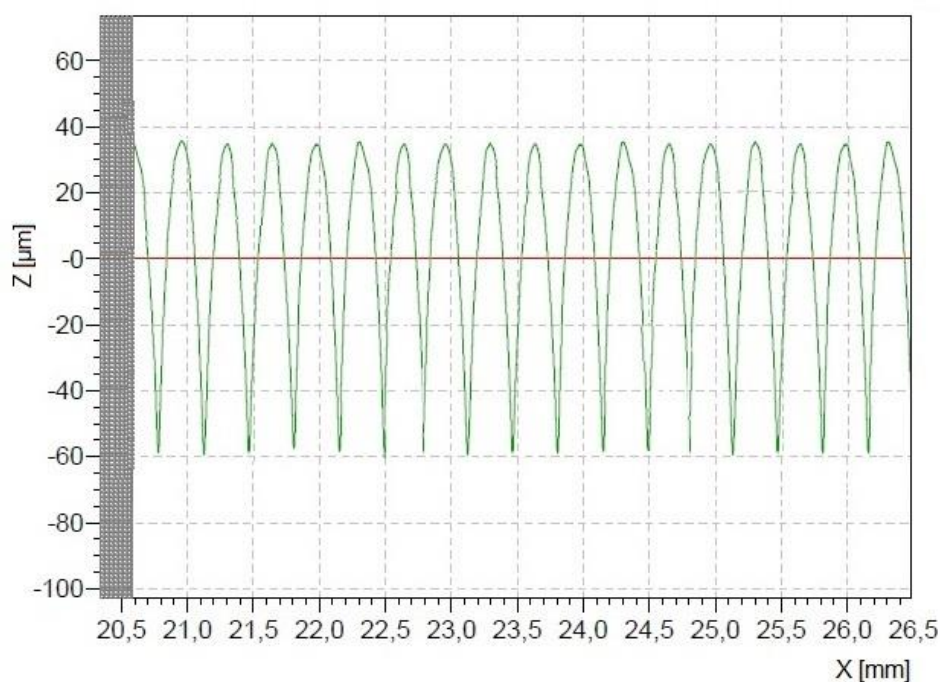
Obr. 5.4 Vzorek 7 po provedení tahové zkoušky.

Dle výrobce filamentu materiál při výrobě dosahuje tažnosti do 4 %. Z obrázku 5.1 je očividné, že vzorky při tahové zkoušce vykazují minimální tažnost. Maximální hodnota tažnosti se u zkoušených vzorků pohybuje do 0,55 % a rozdíly mezi jednotlivými skupinami vzorků jsou minimální. Tento rozdíl tažnosti oproti materiálovým údajům od výrobce je patrně způsoben použitím spodní hranice doporučené teploty při tisku vzorků. Proto bylo vyhodnocení mechanických vlastností omezeno pouze na vyhodnocení meze pevnosti v tahu.

Všechny naměřené hodnoty z provedené tahové zkoušky jsou přiloženy v příloze č. 3.

5.2 Kvalita povrchu tištěných ploch

V této části experimentu je provedeno vyhodnocení závislostí sledovaných parametrů R_a a R_z na výšce tištěné vrstvy a průměru trysky. Z naměřených hodnot dané skupiny byla vždy vypočítána střední hodnota, která byla následně porovnána s ostatními skupinami vzorků.



Obr. 5.5 Změřený profil povrchu na ploše A – vzorek 34 (materiál PLA).

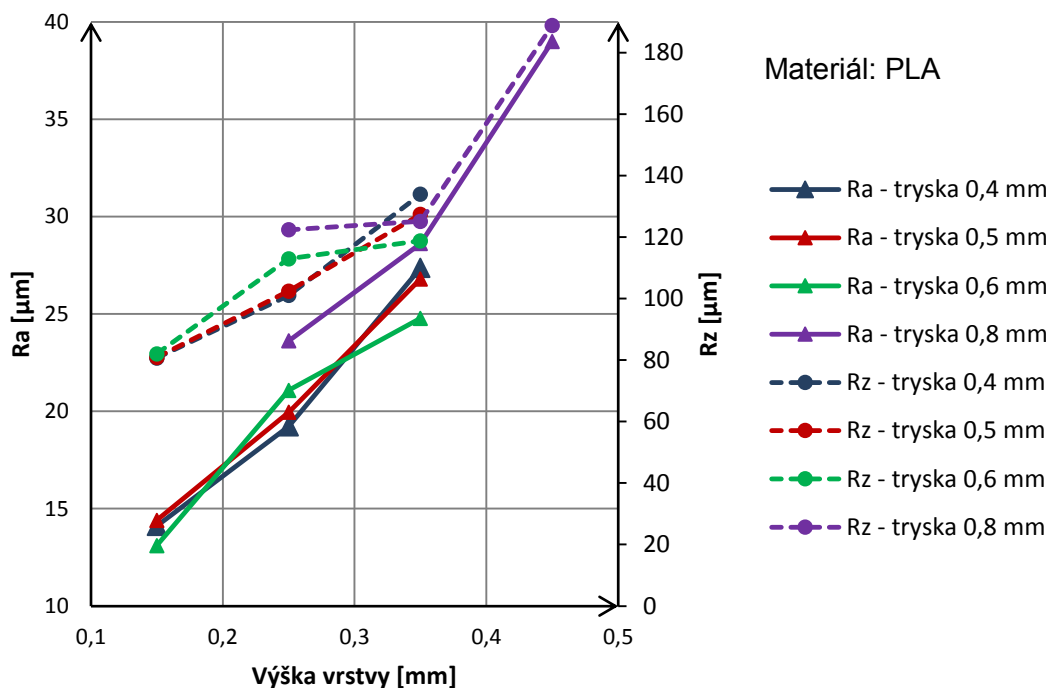
Na obrázku 5.5 je zobrazena část změřeného profilu povrchu na ploše A. Ze změřeného profilu jsou patrné jednotlivé vrstvy kladené postupně na sebe. Jednotlivé výstupky a prohlubně v celém měřeném profilu zásadně nevystupují nad ostatní výstupky a jejich velikost je přibližně po celý změřený průřez konstantní. Vlnitost profilu byla na změřených vzorcích naměřena minimální. Pouze zhruba na třech vzorcích byly naměřeny významné hodnoty vlnitosti. Tyto vzorky byly vyřazeny z experimentu a nahrazeny novými vzorky. Vlnitost profilu povrchu závisí především na tuhosti konstrukce tiskárny a hodnoty se liší stroj od stroje. Proto vyhodnocení závislostí parametrů vlnitosti není obsahem experimentální části práce.

5.2.1 Vliv výšky vrstvy na kvalitu povrchu

Plocha A (boční)

Při srovnání závislosti parametru R_a na výšce vrstvy (obr. 5.6) je patrné, že s rostoucí výškou vrstvy roste (i přes drobné odchylky) téměř lineárně parametr průměrná aritmetická úchylka R_a . Tato závislost je zřejmá i při použití rozdílných průměrů trysek.

Z této závislosti je také patrné, že při použití trysek s menším výstupním průměrem je při stejné výšce vrstvy parametr Ra přibližně stejný. Vliv použité trysky je popsán v kapitole 5.2.2.



Obr. 5.6 Vliv výšky vrstvy na parametry Ra a Rz na ploše A.

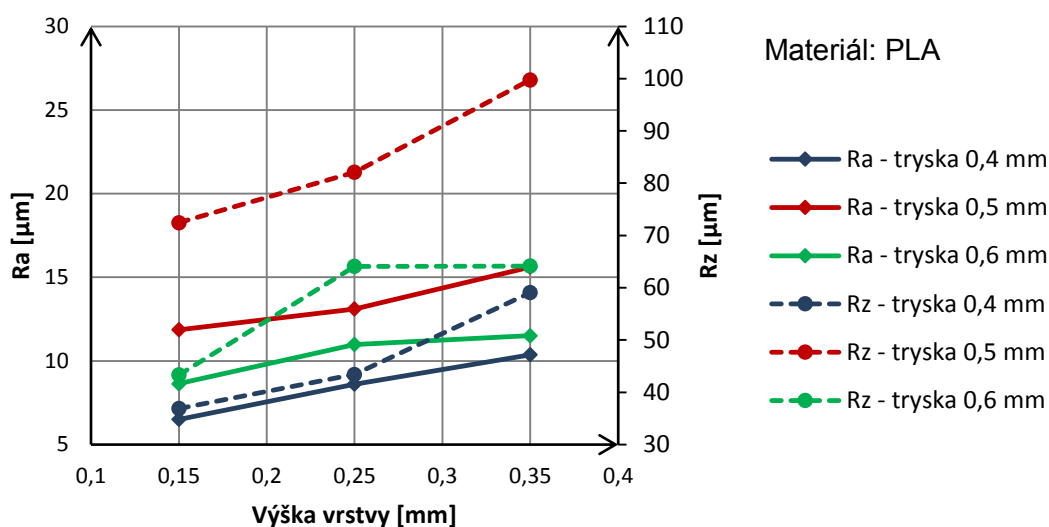
U závislosti parametru profilu Rz na výšce vrstvy je patrný podobný trend jako u závislosti Ra na výšce vrstvy. Z grafu je ale také zřejmé odlišné chování závislosti při použití trysky s výstupním průměrem 0,8 mm. Mezi výškou vrstvy 0,15 mm a 0,25 mm je menší nárůst parametru Rz (cca 5 μm), ale při překocení této výšky vrstvy dochází ke strmému nárůstu (cca o 50 %) nejvyšší výšky profilu Rz. Tento strmý nárůst je zřetelný u všech měření z dané skupiny vzorků.

Plocha B (vrchní)

Na následujícím obrázku 5.7 je znázorněn vliv výšky vrstvy na Ra změřené na ploše B. Zde je také zjevné, že při rostoucí výšce vrstvy se zvětšuje hodnota Ra. Tento trend se dá i zde považovat za prakticky lineární. Na obr. 5.7 je taktéž patrný vliv průměru trysky na hodnocený parametr Ra za určité výšky vrstvy. Překvapivě nejlepších hodnot bylo dosaženo pomocí trysky s průměrem 0,4 mm a nejhorších hodnot tryskou s průměrem 0,5 mm.

Závislost parametru Rz na ploše B je taktéž lineární se vzrůstající tendencí.

Při srovnání kvality povrchu ploch A a B je evidentní, že parametr Ra dosahuje na ploše B menších hodnot než na ploše A. Nejvíce je tento rozdíl patrný při použití větší výšky vrstvy.



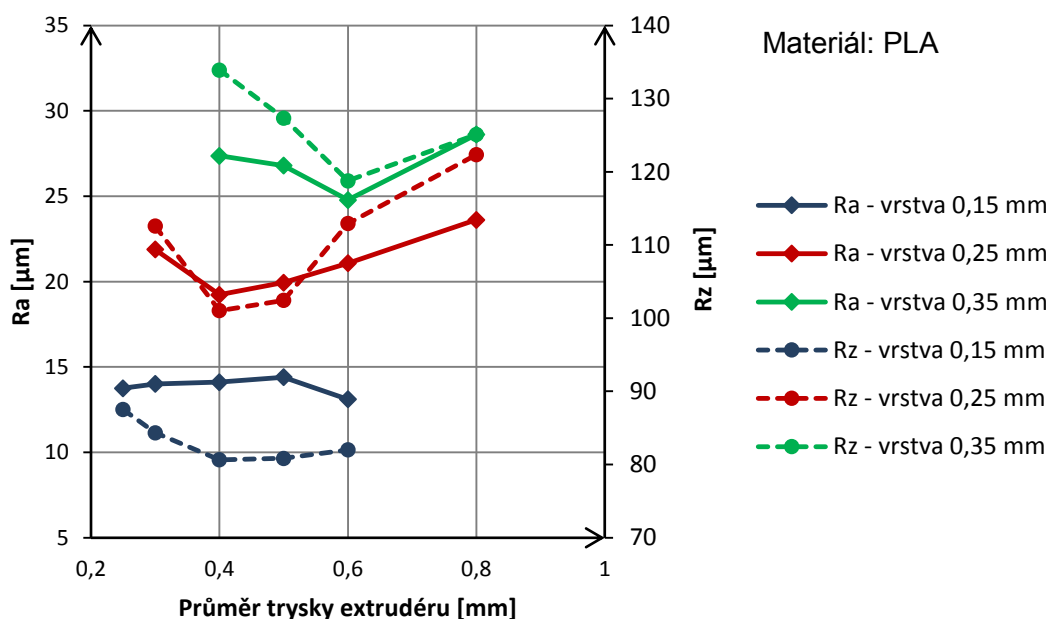
Obr. 5.7 Vliv výšky vrstvy na parametry Ra a Rz na ploše B.

U předešlých grafů (obr. 5.6 a 5.7) byly pro zjištění závislosti použity vzorky pouze se třemi výškami vrstev. Nicméně je evidentní, že pro jiné výšky vrstev bude závislost stejná.

5.2.2 Vliv průměru trysky na kvalitu povrchu

Plocha A (boční)

Na obrázku 5.8 je zobrazen experimentálně zjištěný vliv průměru trysky na Ra měřené na boční stěně vzorku. Bylo zjištěno, že vliv trysky je téměř zanedbatelný. Jak je vidět z grafu, je rozptyl mezi hodnotami pro jednotlivé vrstvy malý. Například při použité výšce vrstvy 0,25 mm je Ra v rozmezí hodnot přibližně od 19 μm do 23 μm.



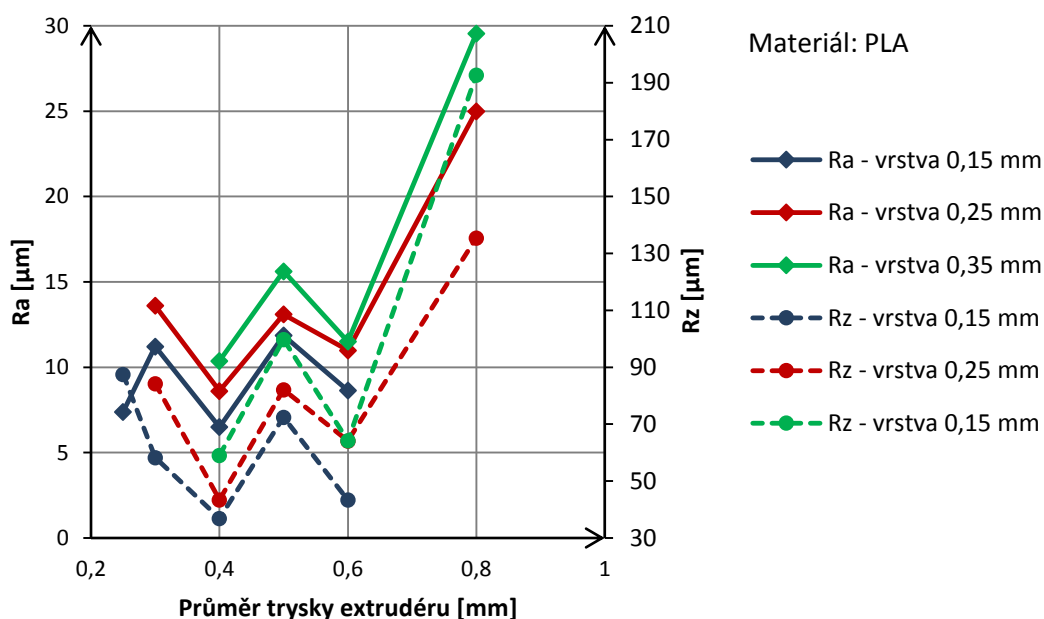
Obr. 5.8 Vliv průměru trysky na parametrech Ra a Rz na ploše A.

Z této závislosti je také viditelný rozdíl Ra v závislosti na použité výšce vrstvy. Pokud se například porovná výška vrstvy 0,15 mm a 0,35 mm, je zde viditelný nárůst o cca 80 – 100 %.

Stejný trend lze poznat v závislosti Rz na průměru trysky extrudéru. Rozpětí naměřených hodnot je pro jednotlivé vrstvy sice větší ($\pm 10 \mu\text{m}$), ale Rz obecně dosahuje vyšších hodnot než Ra. Proto je viditelné kolísání v grafu zanedbatelné.

Plocha B (vrchní)

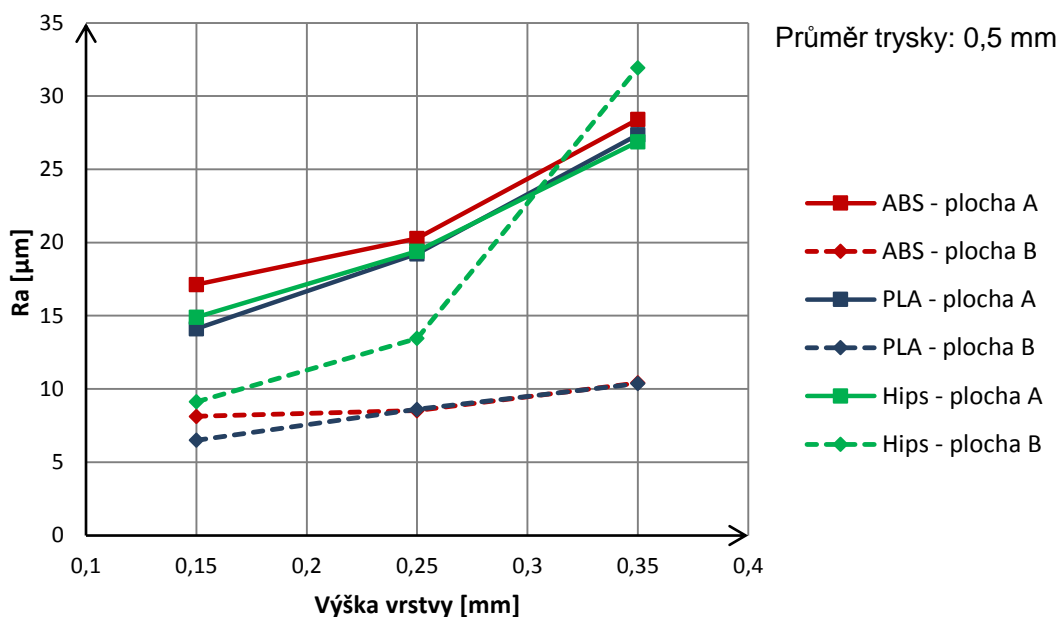
Na následujícím obrázku (obr. 5.9) je viditelný vliv průměru trysky na parametru Ra. Je zde patné kolísání v závislosti na použitém průměru trysky. Při použitém průměru 0,3 mm a 0,5 mm je evidentní nárůst parametru Ra (cca o $5 \mu\text{m}$) bez ohledu na použité tiskové výšky vrstvy oproti použitým tryskám 0,4 mm a 0,6 mm. Toto kolísání je vcelku malé a je zřejmé, že vliv průměru trysky není veliký. U trysky s průměrem 0,8 mm je znát značný nárůst parametru Ra (až o cca 100 %). Zhoršená kvalita povrchu oproti jiným tryskám je poznat už při pohledu na plochu.



Obr. 5.9 Vliv průměru trysky na parametrech Ra a Rz na ploše B.

Z tohoto grafu je stejně jako z obrázku 5.7 patný evidentní vliv výšky vrstvy na kvalitu plochy B. Při zvyšování tloušťky vrstvy se adekvátně zhoršuje hodnocený parametr Ra a naopak. Stejný tvar a tendence závislosti je pozorovatelná i pro závislost Rz na průměru trysky extrudéru.

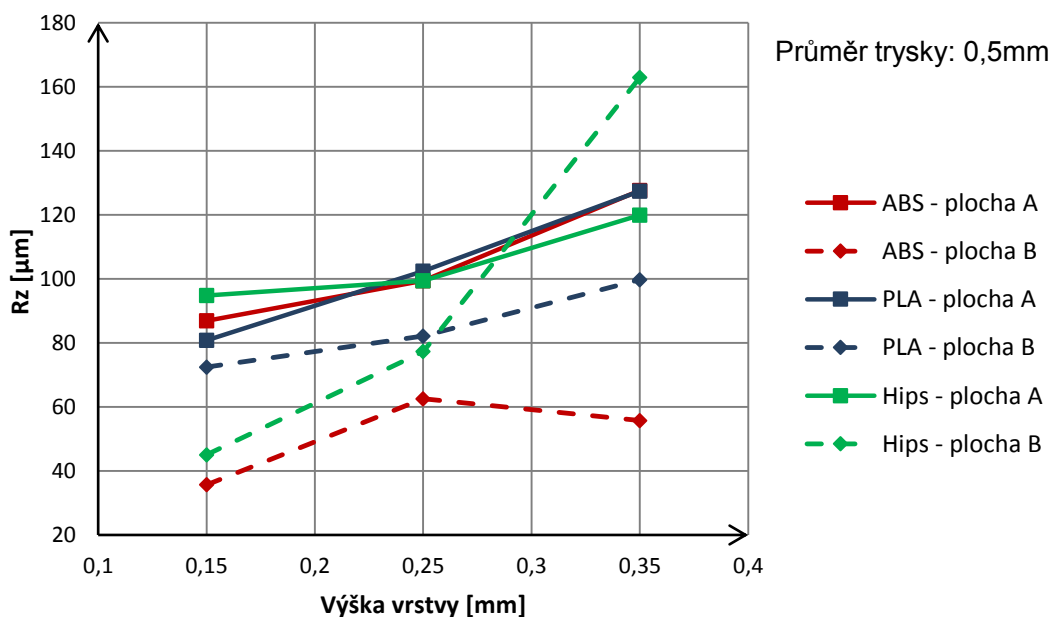
5.2.3 Srovnání PLA s materiály ABS a Hips



Obr. 5.10 Vliv výšky vrstvy na průměrnou aritmetickou úchylku profilu Ra.

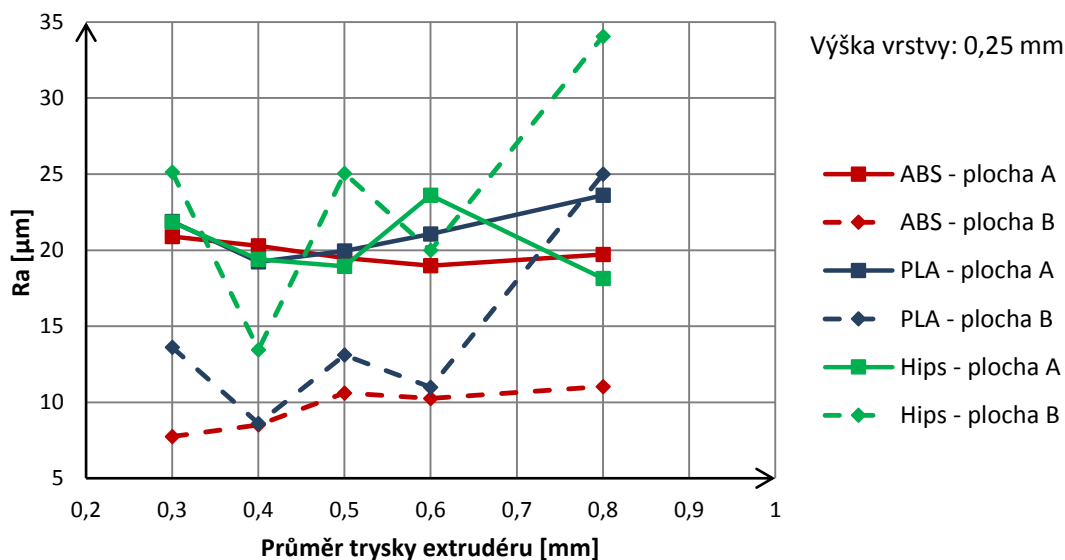
Vzorky vyrobené z materiálů ABS a Hips na ploše A vykazují velmi podobné hodnoty parametrů Ra i Rz jako materiál PLA (obr. 5.10 a obr. 5.11). U vzorků z materiálu ABS je poznat malý nárůst Ra (o cca 2 μm). U všech materiálů je závislost Ra i Rz na výšce vrstvy téměř lineárně rostoucí.

Stejný trend se opakuje i na ploše B. Zde je závislost také lineárně rostoucí, ovšem u vzorků z materiálu Hips při zvyšování výšky vrstvy rostou hodnoty parametrů Ra a Rz strměji než u vzorků z PLA a ABS.

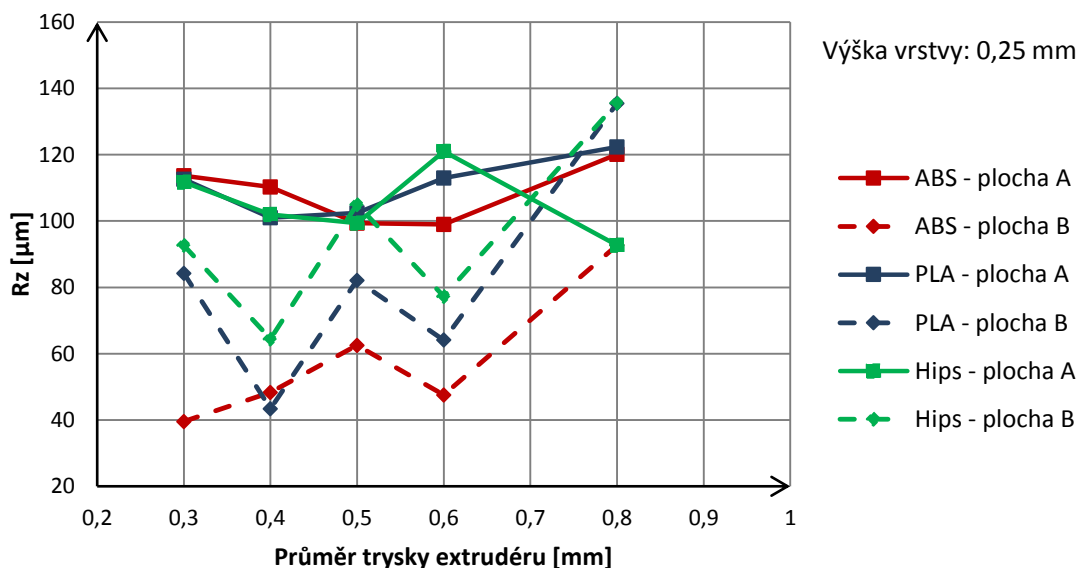


Obr. 5.11 Vliv výšky vrstvy na nejvyšší výšku profilu Rz.

Na dalších dvou grafech (obr. 5.12 a 5.13) je zobrazeno srovnání vlivů průměru trysky na Ra a Rz materiálů PLA, ABS a Hips. Parametr Ra i Rz u všech materiálů v závislosti na průměru trysky na ploše A dosahuje přibližně stejných hodnot (okolo 20 μm). Z porovnávaných materiálů jsou největší výkyvy křivky u materiálu Hips, kde při použití trysky s průměrem větším než 0,6 mm parametry klesají, zatímco u materiálů ABS a PLA rostou.



Obr. 5.12 Vliv průměru trysky extrudéru na průměrnou aritmetickou úchylku profilu Ra.



Obr. 5.13 Vliv průměru trysky extrudéru na největší výšku profilu Rz.

Parametry Ra a Rz na ploše B v závislosti na průměru trysky u vzorků z materiálu Hips kolísají podobně jako vzorky z materiálu PLA (kapitola 5.2.2). Z obr. 5.12 je zřejmé, že vzorky z Hips vykazují obecně vyšší hodnoty Ra, a to až o 60 %. Naopak závislosti vzorků z materiálu ABS prakticky nekolísají a dosahují přibližně stejných hodnot nezávisle na použitém průměru trysky. Značné kolísání závislosti

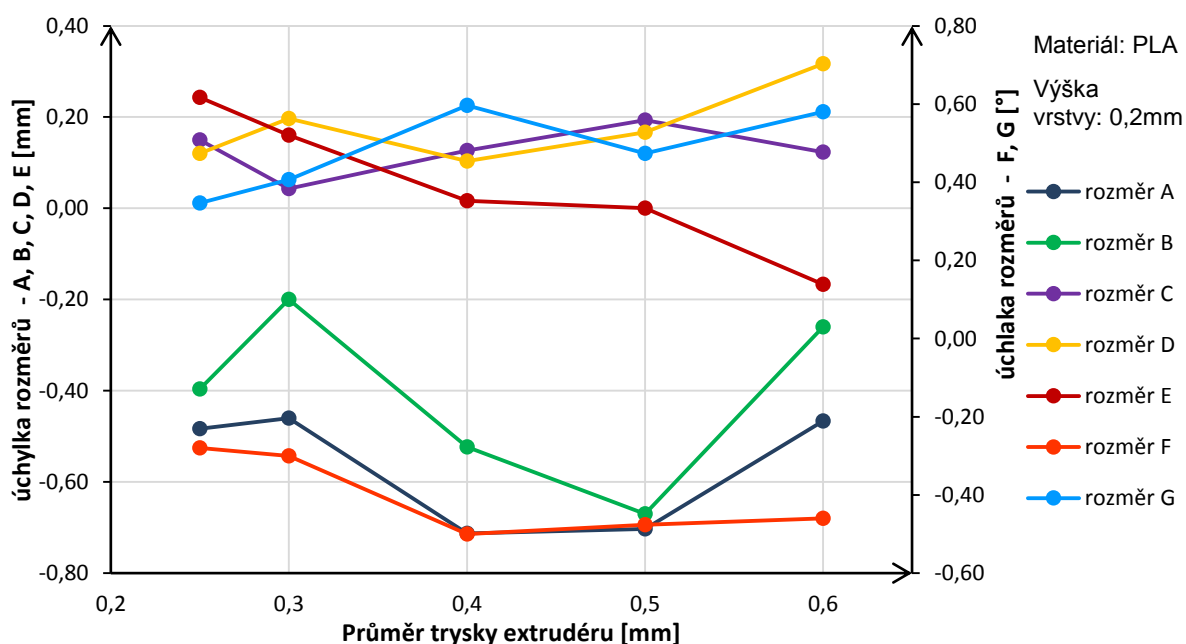
je zřejmé i při hodnocení plochy parametrem Rz (obr. 5.13). Zde rovněž nejhorších hodnot dosahují vzorky z materiálu Hips a nejlepší hodnoty vzorky z materiálu ABS.

Tabulka s naměřenými hodnotami parametrů všech materiálů je připojena v příloze 4. U materiálu ABS při průměru trysky 0,8 mm a výšce vrstvy 0,35 mm a 0,45 mm nedocházelo již při tisku poslední vrstvy k vytvoření celistvé vrstvy, jednotlivá vlákna se spolu špatně spojila a vznikly velké prohlubně na povrchu. Tento problém se nepodařilo odstranit a změnou parametrů tisku. Patrně se jedná o chybu generování drah softwarem. Proto naměřené parametry drsnosti na těchto vzorcích nebyly pro vyhodnocení použity.

5.3 Přesnost tvarů jednotlivých prvků a výplně tělesa

Při vyhodnocování byla z naměřených hodnot jednotlivých skupin vzorků vypočítána průměrná hodnota rozměru tvarů, která byla zanesena do grafických závislostí. Naměřená data jsou připojena v příloze č. 5.

5.3.1 Vliv průměru trysky na přesnost rozměrů jednotlivých prvků



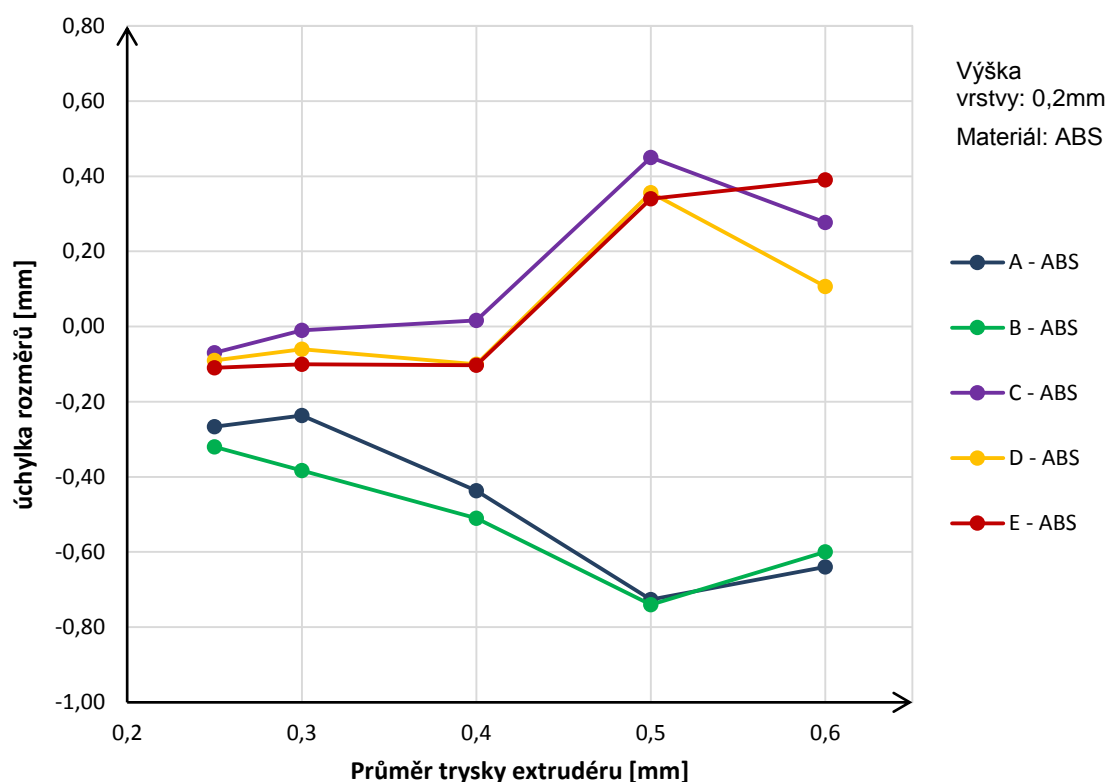
Obr. 5.14 Vliv průměru trysky extrudéru na jednotlivé úchyly rozměrů – PLA.

Po zhotovení závislosti jednotlivých úchylek rozměrů na průměru trysky extrudéru (obr. 5.14) vyplynulo z experimentu především to, že úchyly rozměrů prvků A, B a F (otvory a malý úhel) dosahují záporných hodnot a úchyly rozměru prvků C, D a G (zaoblení, délka vzorku a ostrý úhel) dosahují kladných hodnot.

Úchylka velkého otvoru vzorku (A) se pohybuje v rozmezí -0,45 mm až -0,7 mm. Nejnižší hodnoty úchyly jsou patrné při použití trysky s průměrem 0,3 mm. Naopak při použití větší trysky (0,4 mm a 0,5 mm) úchylka narůstá až o cca 65 %. Překvapivě při aplikaci největší trysky (0,6 mm) úchylka dosahuje přibližně stejné velikosti jako při použití trysky s průměrem 0,3 mm. Stejný tvar závislosti vychází i

při vyhodnocení úchylek rozměru menšího otvoru (B), pouze rozsah nejmenší a největší úchyly je značně větší. Úchylka úhlového rozměru (F) také stoupá při použití trysky s průměrem větším jak 0,3 mm, ale na rozdíl od úchylek A a B při trysce s průměrem 0,6 mm dosahuje stejné velikosti jako trysky s průměry 0,4 a 0,5 mm.

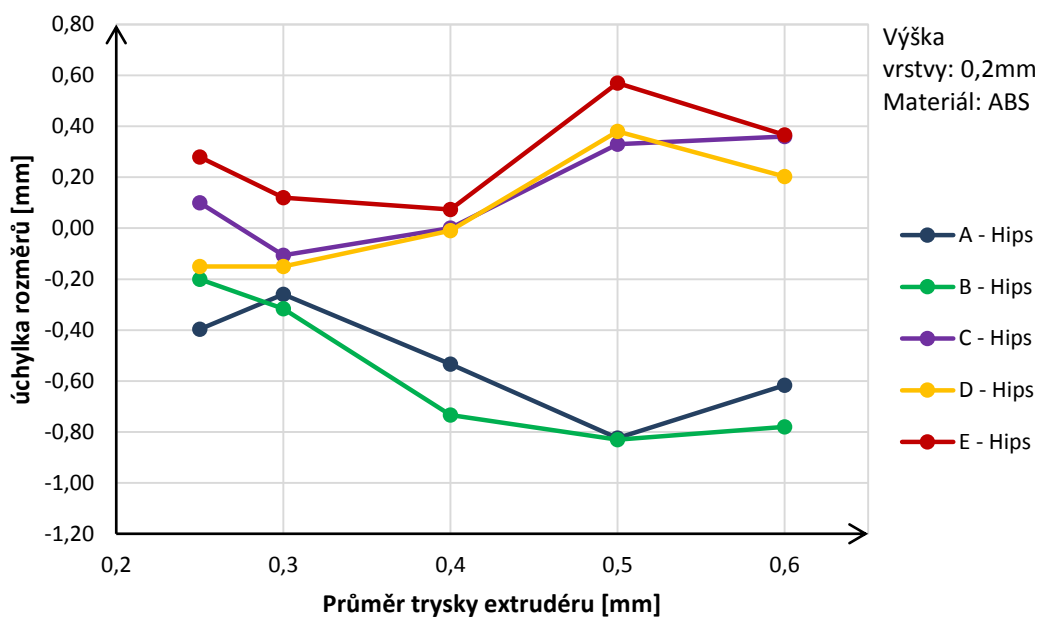
Úchylky rozměrů prvků C, D a G dosahují nezávisle na použitém průměru trysky přibližně stejných hodnot. Malé kolísání těchto hodnot je pouze v rozsahu cca 0,15 mm. Jinak lze závislost považovat téměř za konstantní. Úchylka délkového rozměru E do použitého průměru trysky 0,4 mm klesá až téměř na nulu, poté při zvětšování průměru trysky opět narůstá, už ale v záporných hodnotách.



Obr. 5.15 Vliv průměru trysky extrudéru na jednotlivé úchylky rozměrů – ABS.

Z obrázků 5.15 a 5.16 je patrné, že u vzorků z materiálů ABS a Hips je vliv průměru trysky na jednotlivé úchylky rozměrů z části podobný jako u materiálu PLA. Úchylky A a B jsou v celém rozsahu použitých trysek záporné. Při zvětšování průměru trysky úchylky rostou. Pouze při použití trysky s průměrem 0,6 mm je úchylka oproti trysce 0,5 mm menší. Rozměr prvků C, D a E postupně se zvětšením průměru trysky také roste. Při použití trysky s průměrem do 0,4 mm je úchylka minimální a při zvětšení průměru trysky úchylka roste. Také u těchto rozměrů je při použití trysky 0,6 mm úchylka menší než v případě užití trysky s průměrem 0,5 mm.

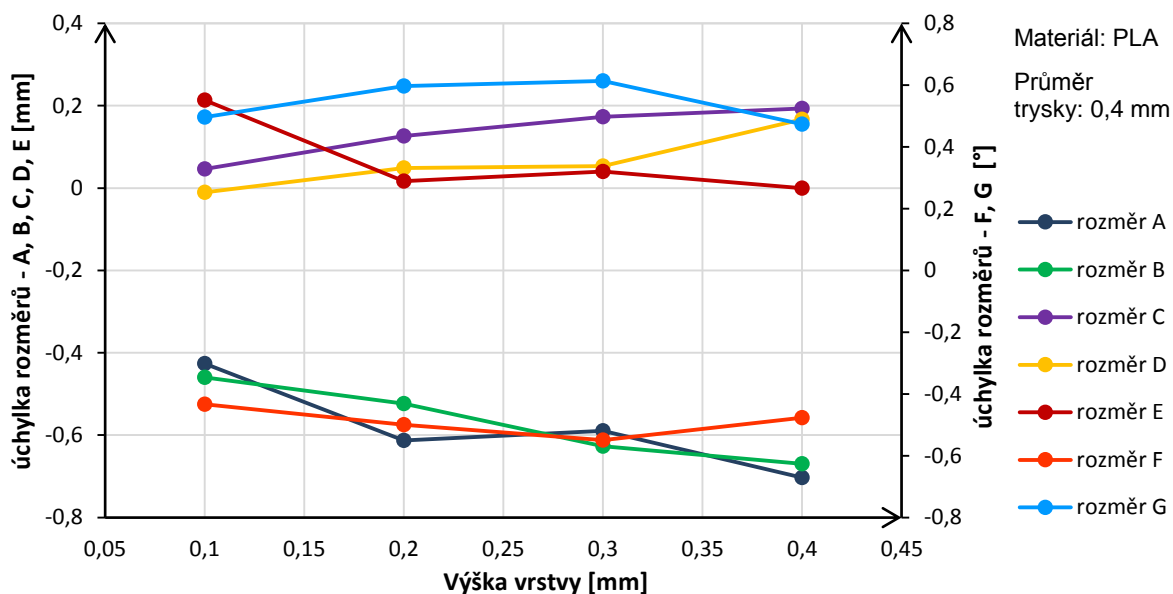
Obecně je zřejmé, že vzorky z materiálu Hips dosahují největších hodnot úchylek a naopak vzorky z materiálu PLA nejmenších hodnot úchylek. Vzorky z PLA vykazují také menší kolísání (rozmezí) úchylek rozměru.



Obr. 5.16 Vliv průměru trysky extrudéru na jednotlivé úchylnky rozměrů – Hips.

Značná záporná úchylnka průměru otvorů (A a B) je způsobena zejména nutným natěsnáním materiálu při tvorbě otvoru. Čím je otvor menší, tím se kladené vlákno musí více natěsnat a průměr otvoru je tím pádem menší. Tyto korekce se nedají do programu Slic3r vložit. Program se generuje podle teoretické dráhy a tím vzniká značná úchylnka vnitřních otvorů. U vnějších zaoblení není tento problém zřetelný.

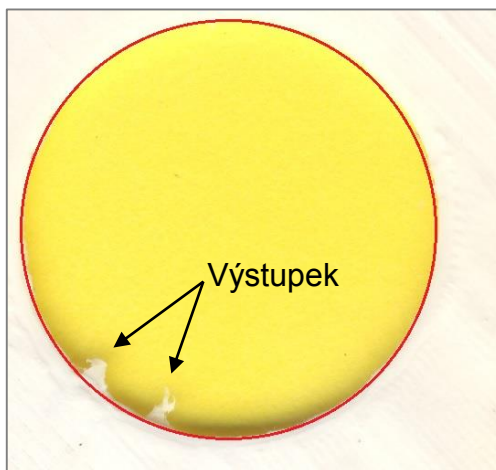
Na následujícím obrázku 5.17 je znázorněn vliv výšky vrstvy na úchylnky rozměrů. Úchylnky rozměrů A, B, C, a D při zvyšování výšky vrstvy postupně pozvolna stoupají. Naopak úchylnka rozměru E (šířka vzorku) při zvyšování výšky vrstvy až na hodnotu 0,2 mm klesá až na nulu a poté při zvýšení vrstvy je téměř pořád nulová.



Obr. 5.17 Vliv výšky vrstvy na jednotlivé úchylnky rozměrů – PLA.

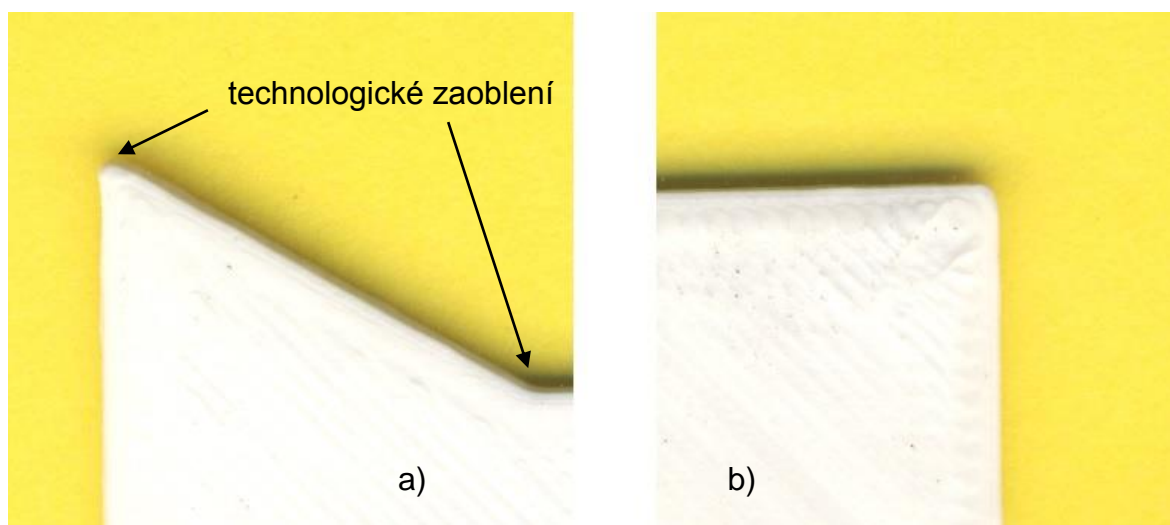
5.3.2 Nepřesnosti tvarů jednotlivých prvků

Při výrobě vzorků se objevily také velké nepřesnosti tvarů. Při tisku s nastavenou výškou vrstvy, která je přibližně stejná jako průměr použité výtlačné trysky, se při tisku obrysu otvoru vyrobí jeden až dva hrbolky (obr. 5.18). Tento nepatřičný výstupek je patrně způsoben špatným napojením tištěných vláken a poté se část vlákna oddělí do volného prostoru. Výstupek se vytváří opakovaně pouze při použití materiálů PLA a ABS. Z obrázku 5.18 je také zřejmé, že odchylka od teoretické kruhovitosti je při tisku prakticky minimální a pro běžné použití dostatečná.

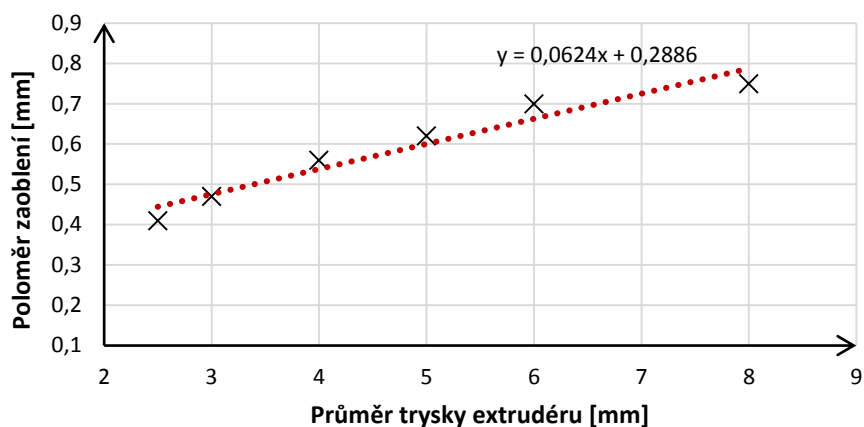


Obr. 5.18 Ukázka drobných výstupků v otvoru A – vzorek 25.

Další nepřesností tvaru je tzv. technologické zaoblení (obr. 5.19a) vyrobené na přechodu dvou ploch. Z principu technologie FDM není možné vyrobit ostrý roh v rovině Z. Velikost nutného zaoblení je přímo úměrná použité výtlačné trysce (obr. 5.20). Při použití trysky s průměrem 0,25 mm se zaoblení vytvoří přibližně o polovinu menší než při tisku tryskou s průměrem 0,8 mm. Maximální poloměr zaoblení při použití trysky s průměrem 0,8 mm je 0,75 mm. Na velikost zaoblení má prakticky nulový vliv výška vrstvy. Mnohem lépe je vidět toto zaoblení na obrázku 5.1b), kde je vytvořeno na pravém úhlu.



Obr. 5.19 Znárodnění technologického zaoblení rohů.

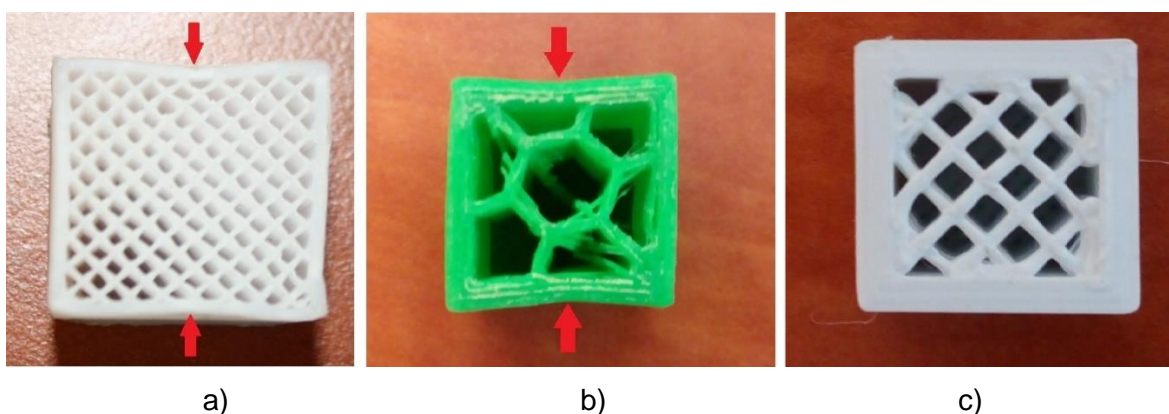


Obr. 5.20 Vliv průměru trysky extrudéru na poloměru technologického zaoblení.

5.3.3 Výplň tělesa

Částečná výplň tělesa se používá při tisku těles pro snížení potřebného množství materiálu a také času. Je důležité při nastavení množství výplně brát zřetel na případné smrštění bočních stěn při chladnutí výrobků. Při tisku vzorků pro zjištění kvality povrchu se toto smrštění negativně projevilo při výchozím návrhu technologických parametrů u části vzorků vyrobených z materiálů ABS a především u vzorků z materiálu Hips. U těchto vzorků z materiálu Hips je nutné při tisku použít alespoň 40% výplň vzor Honeycomb bez ohledu na použitý průměr trysky. Naprosto nevhodné se jeví použití vzorů Concentric a Octagramspiral. U těchto vzorů se projevila deformace bočních stěn a rohů tělesa i při použití 55% výplně.

Vzorky z materiálu PLA (obr. 5.21c) nevykazovaly žádné deformace bočních stěn v závislosti na procentu vyplnění tělesa materiálem. U tohoto materiálu se toto chování dá očekávat, jelikož obecně materiál PLA není při chladnutí náchylný k smrštění.



Obr. 5.21 Ukázka deformace stěny a výplně vzorku

Na obrázku 5.21a) je vzorek vyrobený z materiálu Hips u kterého je poznat deformace bočních stěn. Tato deformace vznikla při chladnutí, kdy výplň špatně kompenzovala smrštění bočních stěn. Stejně chování jde poznat i u zeleného vzorku vyrobeného z materiálu ABS (obr.5.21b). Zde je evidentně zvoleno příliš malé procento výplně vzorku. Vzorky z obrázku 5.21a) a c) jsou vyrobeny stejným procen-

tuálním zaplnění výplně, avšak vzorek z PLA je vyroben pomocí trysky s dvojnásobným průměrem otvoru. Na tomto srovnání je evidentní rozdílné generování drah výplně v závislosti na použitém průměru trysky.

Další problém nastává při tisku vrchních ploch, kdy při uzavírání částečně duté výplně jsou vlákna vedena přes volný prostor. Při použití trysky s průměrem 0,8 mm a výškou vrstvy 0,3 mm a více bylo nutné zvýšit procentuální výplň z důvodu generování pouze krátké dráhy výplně. Tato krátká podpora poté nestačila k podepření následujících vláken vrchních vrstev, kdy se vlákno přetrhne. Tento problém nastal zejména při tisku PLA. Naopak při použití materiálu ABS a Hips se vlákna nepřetrhnou, ale pouze prověsí. Je ovšem nutné nastavit více vrchních vrstev.

Nastavení množství i typu výplně závisí především na velikosti, složitosti a materiálu tištěného modelu. Vliv průměru trysky na tvar výplně se při testech ukázal jako prakticky neznatelný.

5.4 Doporučení provozních parametrů

Z provedení experimentů jednoznačně vyplynulo, že nelze univerzálně doporučit jeden průměr trysky a jednu výšku vrstvy pro všechny výrobky. Vše záleží na aplikaci tištěného výrobku a použitého materiálu.

Co se týče dosažených mechanických vlastností výrobku, je pro materiál PLA nejlepší volit průměr výtlačné trysky přibližně dvakrát větší, než je hodnota výšky vrstvy. Naprosto nevhodné se jeví použití výšky vrstvy odpovídající stejné hodnotě průměru trysky. Zde nedochází k správnému propojení vláken jednotlivých vrstev. Z experimentu také vzešlo, že při použití výrobků s vlákny orientovanými kolmo k ose zatížení je mez pevnosti přibližně o dvacet procent menší než při použití výrobků s vlákny orientovanými rovnoběžně.

Při posouzení kvality povrchu boční plochy výrobku je zásadní parametr výška vrstvy. Zde platí, že čím menší výška vrstvy, tím lepší kvalita povrchu nezávisle na použitém materiálu. Průměr trysky má minimální vliv na kvalitu této plochy. Při požadavku velmi kvalitní vrchní plochy výrobku je dobré taktéž volit menší výšky vrstvy. Na kvalitu této vrchní plochy má značný vliv průměr trysky a také použitý materiál. Znatelně nejhorší kvalita povrchu bez ohledu na použitý průměr trysky vzniká při použití materiálu Hips. Oproti tomu při použití ABS je dosažená kvalita nejlepší a při změně trysky přibližně konstantní. Obecně se dá doporučit tryska s průměrem 0,4 mm. Při použití této trysky dosahuje kvalita povrchu nejlepších hodnot.

Při výběru podle dosahované přesnosti tvarů prakticky nezáleží na výšce vrstvy. Mnohem větší vliv má především průměr trysky a použitý materiál. U vzorků z PLA je dobré volit trysku s průměrem do 0,4 mm. Při použití většího průměru trysky se zvláště pak u vnitřních otvorů výrazně zvyšuje úchylka průměru. Vzorky z ABS a Hips vykazují nejmenší úchyly rozměrů při použití trysky s průměry 0,3 a 0,4 mm. Zvláště u materiálu Hips jsou úchyly rozměrů při užití trysky s velkým průměrem značně vysoké.

Zjednodušeně je tedy možné z těchto experimentů doporučit pro běžné výrobky trysku s průměrem 0,4 mm a výšku vrstvy 0,2 mm.

ZÁVĚR

Hlavní cílem této diplomové práce bylo shrnout získané poznatky domácích FDM 3D tiskáren, uplatnit je při stavbě tiskárny a pomocí experimentů doporučit vhodné provozní parametry tiskárny. V úvodní části práce je zpracovaný přehled metod technologie Rapid Prototyping. Následuje popis konstrukce domácí 3D tiskárny a její sestavení. Kromě toho jsou v práci také popsány jednotlivé provozní parametry tisku a jejich vliv na tiskový proces.

V experimentální části práce jsou provedeny testy pro zjištění vlivu průměru trysky extrudéru 3D tiskárny na kvalitu tištěné součásti. Jednotlivé testy byly zaměřené na pozorování mechanických vlastností, kvality povrchu a rozměrové přesnosti objektu. Pro experimenty byly použity vzorky z materiálu PLA a pro porovnání kvality povrchu a rozměrové přesnosti i vzorky z ABS a Hips.

Z jednotlivých experimentů vyplynulo:

- Průměr trysky extrudéru má minimální vliv na průměrnou aritmetickou úchylku profilu Ra a stejně tak na největší výšku profilu Rz. Zásadní vliv na kvalitu ploch výrobku má použitý tiskový materiál. Vzorky z Hips vykazovaly až o 60% vyšší hodnoty Ra než vzorky z ABS a PLA.
- Parametry Ra a Rz se s rostoucí výškou vrstvy přímo úměrně zvyšují. Tato závislost platí na boční i na horní ploše tištěného objektu.
- Při použití materiálu PLA je vliv průměru trysky na přesnost rozměrů jednotlivých tvarů minimální. Dosahovaná úchylka rozměrů je přibližně 0,3 mm. S klesajícím průměrem vnitřního otvoru se značně zvyšuje záporná úchylka otvoru. U vzorků z ABS a Hips s rostoucím průměrem trysky nad 0,4 mm se úchylky jednotlivých rozměrů zvyšují až o 80 %.
- Nutné technologické zaoblení se přímo úměrně zvyšuje s rostoucím průměrem trysky extrudéru.
- Vzorky s kolmo orientovanými vlákny k ose namáhání mají o 20 % menší hodnotu Rm oproti vzorkům s rovnoběžně orientovanými vlákny k ose namáhání.
- Největší hodnota meze pevnosti (62 MPa) byla naměřena u vzorků, kde se průměr trysky rovnal dvojnásobku výšky vrstvy. Naopak zcela nevhodné je použít stejnou výšku vrstvy jako je průměr trysky extrudéru. V tomto případě dochází k nedostatečnému propojení vláken v jednotlivých vrstvách. U zkoušených vzorků došlo ke křehkému lomu, tažnost byla naměřena prakticky nulová.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. SLOTA, Ján, Martin MANTIČ a Ivan GAJDOŠ. *Rapid Prototyping a Reverse Engineering v strojárstve*. Košice: Strojnícká fakulta, Technická univerzita v Košicích, 2010, 207 s. ISBN 978-80-553-0548-6.
2. ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonvenční metody obrábění 9. díl: Rapid Prototyping. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008, (11) [vid. 2016-02-01]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-9-dil.html>
3. BLANK, Otis. To The Stratosphere & Beyond: 3D Printing & The Future Of Cars. *Speed Hunters* [online]. 2014 [vid. 2016-05-08]. Dostupné z: <http://www.speedhunters.com/2014/12/3d-printing-and-the-future-of-cars/>
4. BENIAK, Juraj. *Systémy Rapid Prototyping*. 1. vydanie. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2014, 134 stran. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 978-80-227-4287-0.
5. HODEK, Josef. *Aditivní technologie: Zpráva o stavu 3D tisku pro Českou technologickou platformu STROJÍTENSTVÍ, o.s.* [online]. 2013 [vid. 2016-02-03]. Dostupné z: <http://www.ctps.cz/cs/uvodni-stranka/soubor-aditivni-technolo-gie/85/>
6. Stereolithography. *Custompart.net* [online]. 2009 [vid. 2016-02-04]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/stereolithography>
7. Selective Laser Sintering. *Custompart.net* [online]. 2009 [vid. 2016-02-04]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/selective-laser-sintering>
8. FDM (Schmelzschichtung). *Visual Leutec 3D* [online]. 2014 [vid. 2016-02-05]. Dostupné z: <http://www.visual-leutec.ch/index.php/3d-druckverfahren1/11-home/10-fdm-schmelzschichtung>
9. 3D TISK. *KOH-I-NOOR* [online]. 2011 [vid. 2016-02-05]. Dostupné z: <http://www.kohinoor.cz/cz/3d-tisk/>
10. SEDLÁK, Josef. *Aditivní technologie – metody Rapid Prototyping*. [online]. [vid. 2016-02-19]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/podklady/sto_bak/cv_STV_04_Aditivni_technologie_metody_Rapid_Prototyping.pdf
11. RepRap History. *RepRap.org* [online]. 2011 [vid. 2016-02-05]. Dostupné z: http://reprap.org/wiki/RepRap_history
12. About. *RepRap.org* [online]. 2014 [vid. 2016-02-05]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/About>
13. RepRapOneDarwin. *RepRap.org*. [online]. 2007 [vid. 2016-03-19]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/RepRapOneDarwin>
14. Darwin. *RepRap Wiki* [online]. 2014 [vid. 2016-03-08]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/Darwin>
15. Mendel. *RepRap Wiki*. [online]. 2015 [vid. 2016-03-19]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/Mendel>

16. SCHELLY, Chelsea, Gerald ANZALONE, Bas Wijnen WIJNEN a Joshua M. PEARCE. Open-source 3-D printing technologies for education: Bringing additive manufacturing to the classroom. *Journal of Visual Languages and Computing* [online]. 2015, 6(28), Pages 226–237 [vid. 2016-04-23]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1045926X15000051>
17. Prusa i3. *RepRap.org* [online]. 2016 [vid. 2016-03-19]. Dostupné z: http://reprap.org/wiki/Prusa_i3
18. Kossel. *RepRap.org* [online]. 2016 [vid. 2016-03-19]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/Kossel>
19. *Rebel 3D: Diskuse o 3D tiskárnách Rebel, RepRap atp.* [online]. [vid. 2016-05-08]. Dostupné z: <http://www.rebelove.org/>
20. *Microcon* [online]. 2016 [vid. 2016-03-19]. Dostupné z: <http://www.microcon.cz/>
21. *Rebel 3D - online obchod* [online]. 2015 [vid. 2016-03-15]. Dostupné z: <http://obchod.rebelove.org/>
22. VEJRAŽKOVÁ, Ivana. *Plasty pro stavebnictví a architekturu 10 – Koextrudované polymery/ABS* [online]. 2008 [vid. 2016-03-19]. Dostupné z: http://www.happymaterials.com/imgs/articles/153-11_10_ABS.pdf
23. TRIBON s.r.o. *ABS (Akrylonitril-Butadien-Styren)* [online]. 2012 [vid. 2016-04-08]. Dostupné z: http://www.georgefischer.cz/produkty/materialy/abs-akrylonitril_butadien_styren
24. PLA. *3D-TISK* [online]. 2014 [vid. 2016-03-19]. Dostupné z: <http://www.3d-tisk.cz/pla>
25. Materiály pro 3D tisk. *Futur3D* [online]. 2014 [vid. 2016-03-19]. Dostupné z: <http://www.futur3d.net/materialy-pro-3d-tisk>
26. PLA. *RepRap.org* [online]. 2015 [vid. 2016-03-19]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/PLA>
27. HIPS – High Impact Polystyrene. *Plastics Direct.* [online]. 2016 [vid. 2016-04-08]. Dostupné z: http://www.plasticsdirect.co.uk/html/HIPS_47.html
28. HIPS - houževnatý polystyren. *EVENTA* [online]. 2013 [vid. 2016-04-08]. Dostupné z: <http://www.elventa.cz/produkty/7/HIPS-houzevnaty-polystyren/>
29. *Plasty Mladeč: Zemědělské družstvo Haňovice* [online]. 2014 [vid. 2016-05-08]. Dostupné z: <http://www.plastymladec.cz/>
30. KRATOCHVÍL, T. *3D FDM tiskárna RepRap a parametry tisku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 72 s, 4 přílohy, CD.
31. HORVATH, Joan. *Mastering 3D Printing*. 1 vyd. Apress, 2014. ISBN 978-1484200261
32. BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. Svitavy, 2014 [vid. 2016-05-08]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>

33. UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE: MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ FAKULTA. *Pevnost a lom látek*. [online]. [vid. 2016-05-08]. Dostupné z: http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/kontinuum/2_6
34. ČSN EN ISO 527-1. *Plasty - Stanovení tahových vlastností: Základní principy*. Praha: Český normalizační institut, 2012. 12s.
35. ČSN EN ISO 527-2. *Plasty - Stanovení tahových vlastností: Zkušební podmínky pro tvářené plasty*. Praha: Český normalizační institut, 2012. 8s.
36. ČSN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha: Český normalizační institut, 2000.
37. Kontrola drsnosti povrchu. *ELUC* [online]. [vid. 2016-05-08]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1102>
38. HARČARÍK, MATEJ. *Hodnocení textury povrchu kontaktní a bezkontaktní metodou*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 40 s.
39. ČSN EN ISO 4288. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu*. Praha: Český normalizační institut, 2000.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Popis
3D	Trojrozměrné
3DP	3D Printing
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
BPM	Ballistic Particle Manufacturing
CAD	Počítačem podporované navrhování
ČSN	Česká státní norma
EBM	Electron Beam Melting
EN	Evropská norma
FDM	Fused Deposition Modeling
HIPS	High Impact Polystyrene
ISO	International Organization for Standardization
LENS	Laser Engineering Net Shaping
LOM	Laminated Object Manufacturing
MJM	Multi-Jet Modeling
MJS	Multiphase Jet Solidification
PC	Polykarbonát
Pc	Osobní počítač
PET	Polyethylentereftalát
PLA	Polylactid Acid
PTFE	Polytetrafluoretylen
PVA	Polyvinylalkohol
Ramps	RepRap Arduino Mega Shield
RepRap	Replicating Rapid prototyper
RP	Rapid Prototyping
SGC	Solid Ground Curing
SLA	Stereolitografie
SLS	Selective Laser Sintering
s.r.o.	Společnost s ručení omezeným

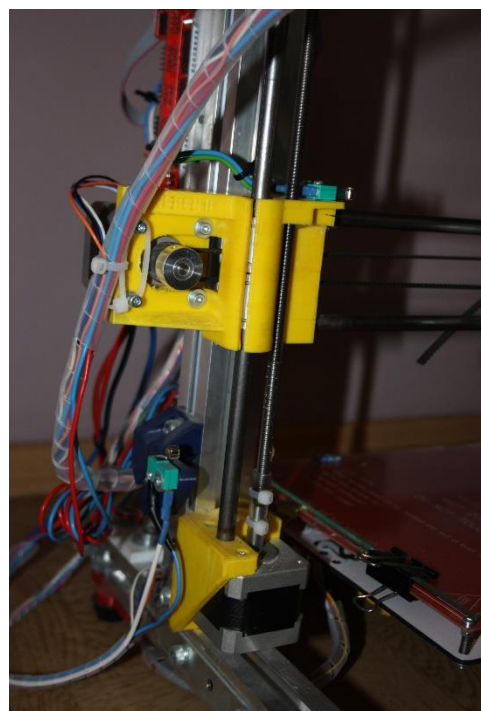
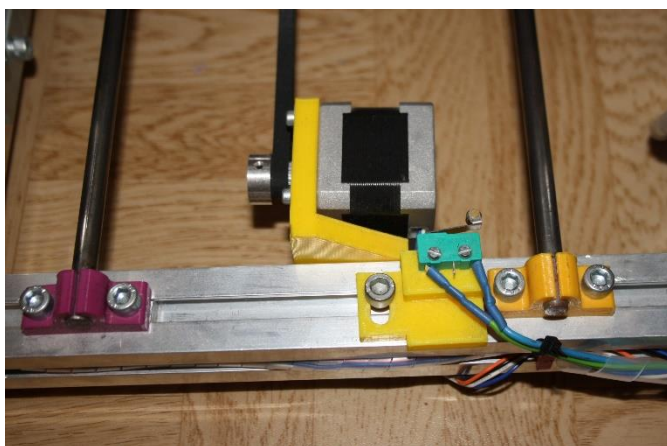
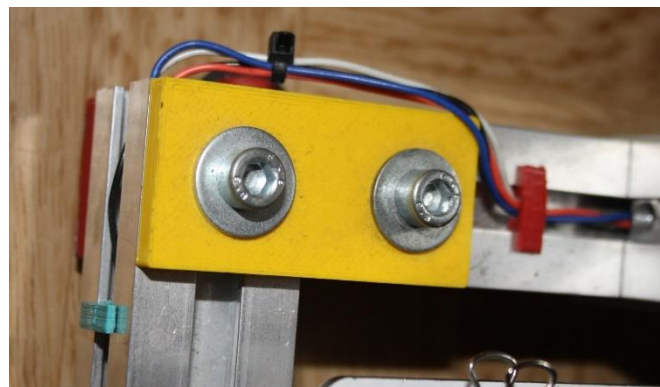
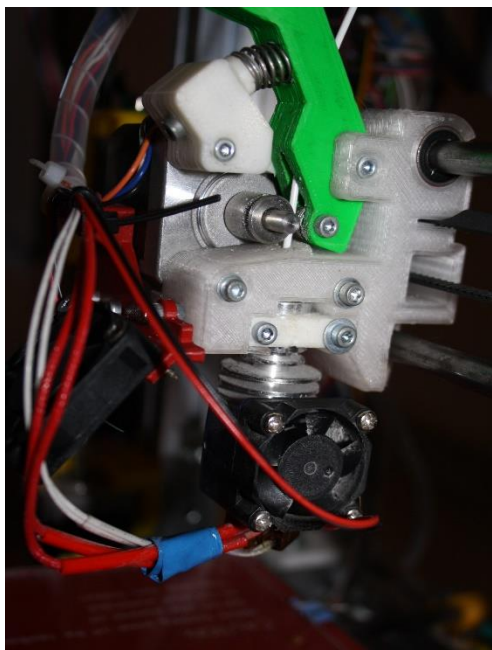
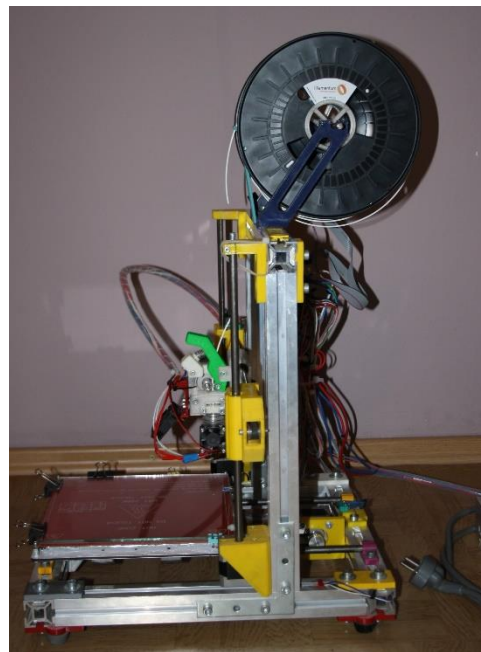
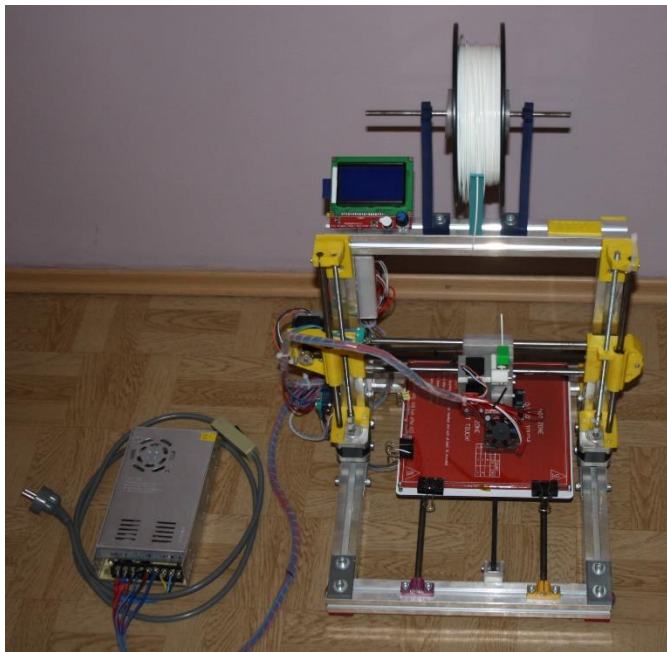
Symbol	Jednotka	Popis
A	[%]	Tažnost
E	[MPa]	Youngův modul pružnosti
F	[N]	Zatěžující síla
L	[mm]	Konečná délka vzorku
I	[mm]	Vyhodnocovaná délka

Symbol	Jednotka	Popis
L₀	[mm]	Počáteční délka vzorku
R_a	[μm]	Průměrná aritmetická úchylka drsnosti
R_m	[MPa]	Mez pevnosti v tahu
R_Sm	[mm]	Střední vzdálenost rýh
R_z	[μm]	Nejvyšší výška profilu drsnosti
S	[mm ²]	Průřez vzorku
Z_p	[μm]	Hloubka nejnižší prohlubně
Z_v	[μm]	Výška nejvyššího výstupku
Z(x)	[μm]	Absolutní hodnota souřadnice
λ_c	[-]	Filtr profilu
λ_f	[-]	Filtr profilu
λ_s	[-]	Krátkovlnný filtr profilu

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Fotodokumentace sestrojené FDM 3D tiskárny Rebel II.
Příloha 2 Hydraulický zkušební stroj ZD40
Příloha 3 Tabulka naměřených hodnot z provedené tahové zkoušky
Příloha 4 Tabulka naměřených hodnot parametrů Ra a Rz na plochách A a B
Příloha 5 Tabulka naměřených rozměrů tvarových prvků

PŘÍLOHA 1 Fotodokumentace sestrojené FDM 3D tiskárny Rebel II.



PŘÍLOHA 2

Hydraulický zkušební stroj ZD40

Stroj umožňuje provádět tahové, tlakové a ohybové zkoušky materiálů do 400 kN s řízením rychlosti zatěžování a programovým zpracováním zkoušek. Je vybaven vestavěným inkrementálním délkovým snímačem polohy příčnicku s rozlišením 0,01 mm a snímačem síly s řídicí jednotkou EDC 60.

Řídicí jednotka EDC 60 je vysoce precizní elektronické zařízení speciálně konstruované pro řízení servo-hydraulických zkušebních strojů. Je vyráběna speciálně pro aplikace řízení zkušebních strojů a využívají ji přední evropští výrobci universálních zkušebních strojů. Jednotka je opatřena programem pro zkoušky kovů s možností provádět zkoušky bez PC u jednoduchých aplikací bez použití průtahoměru.

Technické parametry:

- Výrobce: HBM /SRN/
- Měřicí rozsah: 8 ÷ 400 kN
- Chyba měření síly: 1/100 jmenovitého rozsahu síly, tj. $\pm 1 \%$ odpovídá třídě přesnosti 1
- Měřicí rozsah měření dráhy: 0 ÷ 280 mm
- Chyba měření dráhy: $\pm 0,01$ mm
- sériové rozhraní RS 232 pro komunikaci s nadřazeným PC
- COM1 pro PC s FIFO s maximální rychlostí 115 KB
- inkrementální vstup pro napojení snímače dráhy

Počítač je vybaven programem M-TEST v.1.7 pro tahovou, tlakovou a ohybovou zkoušku kovových materiálů dle EN 10001-2 s vyhodnocením výsledků, grafickým zpracováním.



PŘÍLOHA 3

Tabulka naměřených hodnot z provedené tahové zkoušky

Vzorek	Skupina	Ø Trysky [mm]	Výška vrstvy [mm]	Orientace vlákna	Šířka vzorku [mm]	Výška vzorku [mm]	Mez pevnosti v tahu Rm [MPa]	Aritmetický průměr Rm dvou lepších vzorků skupiny	Rm - max skupiny	Rm - min skupiny	Rozdíl ΔRm	Tažnost A [%]
1	1	0,3	0,2	podélně	10,2	3,99	59,620	54,405	59,620	40,149	19,471	0,426
2	1	0,3	0,2	podélně	10,1	3,9	49,190					0,366
3	1	0,3	0,2	podélně	10,2	3,95	40,149					0,227
4	2	0,4	0,2	podélně	10,25	3,95	62,025	62,025	62,025	52,501	9,524	0,189
5	2	0,4	0,2	podélně	10,25	3,95	52,501					0,09
6	2	0,4	0,2	podélně	10,25	3,95	62,025					0,154
7	3	0,4	0,4	podélně	10,1	3,9	40,112	43,118	43,614	40,112	3,503	0,158
8	3	0,4	0,4	podélně	10,1	3,95	43,614					0,214
9	3	0,4	0,4	podélně	10,15	4	42,621					0,287
10	4	0,4	0,2	napříč	10,1	4,05	48,053	49,232	50,411	44,179	6,232	0,589
11	4	0,4	0,2	napříč	10,25	4,15	50,411					0,265
12	4	0,4	0,2	napříč	10,25	4,05	44,179					0,278
13	5	0,5	0,2	podélně	10,15	3,8	49,500	51,294	53,089	46,575	6,514	0,399
14	5	0,5	0,2	podélně	10,1	3,7	53,089					0,287
15	5	0,5	0,2	podélně	10,15	3,8	46,575					0,414
16	6	0,6	0,2	podélně	10,15	4,1	53,558	49,163	50,768	47,557	6,001	0,458
17	6	0,6	0,2	podélně	10,2	4,15	50,768					0,399
18	6	0,6	0,2	podélně	10,15	4,15	47,557					0,407
19	7	0,6	0,4	podélně	10,2	4	47,941	49,835	51,728	45,001	6,727	0,505
20	7	0,6	0,4	podélně	10,25	4,15	51,728					0,531
21	7	0,6	0,4	podélně	10,15	4,2	45,001					0,498
22	8	0,8	0,4	podélně	10,2	3,9	51,302	53,173	55,044	48,021	7,023	0,575
23	8	0,8	0,4	podélně	10,3	4,05	48,021					0,422
24	8	0,8	0,4	podélně	10,25	4	55,044					0,534

PŘÍLOHA 4

Tabulka naměřených hodnot parametrů Ra a Rz na plochách A a B – materiál PLA

Vzorek	Skupina	Ø Trysky [mm]	Výška vrstvy [mm]	Plocha A		Plocha B	
				Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]
1	1	0,25	0,15	14,24	78,11	9,76	44,33
2	1	0,25	0,15	14,53	93,31	7,12	37,31
3	1	0,25	0,15	12,50	73,14	5,30	29,21
4	2	0,3	0,15	13,16	79,70	10,69	84,24
5	2	0,3	0,15	13,55	78,34	10,88	55,67
6	2	0,3	0,15	15,30	94,98	12,08	69,72
7	3	0,3	0,25	20,61	105,11	14,33	58,25
8	3	0,3	0,25	21,41	109,51	11,97	56,84
9	3	0,3	0,25	23,62	123,14	14,53	77,71
10	4	0,4	0,15	14,30	80,34	7,31	41,56
11	4	0,4	0,15	13,55	76,78	5,16	29,18
12	4	0,4	0,15	14,48	84,84	7,03	39,98
13	5	0,4	0,25	19,53	96,86	9,49	48,26
14	5	0,4	0,25	18,12	92,52	8,44	39,96
15	5	0,4	0,25	20,04	113,71	7,91	42,01
16	6	0,4	0,35	27,38	129,80	9,53	51,62
17	6	0,4	0,35	26,45	123,60	11,23	67,57
18	6	0,4	0,35	28,27	148,32	10,36	58,00
19	7	0,5	0,15	15,99	87,72	12,34	78,26
20	7	0,5	0,15	12,76	73,86	13,81	89,76
21	7	0,5	0,15	14,45	80,96	9,44	49,32
22	8	0,5	0,25	19,66	104,08	19,89	120,92
23	8	0,5	0,25	18,55	93,55	9,04	71,20
24	8	0,5	0,25	21,63	109,66	10,38	54,20
25	9	0,5	0,35	26,64	125,64	16,00	103,66
26	9	0,5	0,35	26,36	129,42	15,24	88,66
27	9	0,5	0,35	27,40	126,98	15,61	106,93
28	10	0,6	0,15	15,24	87,59	8,16	40,65
29	10	0,6	0,15	12,55	73,53	9,12	43,04
30	10	0,6	0,15	11,52	62,82	8,63	46,29
31	11	0,6	0,25	18,66	93,58	10,59	48,49
32	11	0,6	0,25	23,24	128,29	10,68	50,76
33	11	0,6	0,25	21,32	116,93	11,69	93,03
34	12	0,6	0,35	24,19	111,51	10,35	73,01
35	12	0,6	0,35	24,63	114,97	12,68	65,26
36	12	0,6	0,35	25,51	129,84	11,49	54,21
37	13	0,8	0,25	25,19	119,50	29,99	136,55
38	13	0,8	0,25	21,26	121,56	17,96	105,40
39	13	0,8	0,25	24,39	125,98	27,03	164,38
40	14	0,8	0,35	31,25	123,82	29,55	192,66
41	14	0,8	0,35	24,78	120,50	31,25	196,25
42	14	0,8	0,35	29,80	130,99	28,76	184,98
43	15	0,8	0,45	36,82	188,42	35,04	210,56
44	15	0,8	0,45	41,65	179,50	32,59	187,24
45	15	0,8	0,45	38,50	198,50	36,27	193,62

Tabulka naměřených hodnot parametrů Ra a Rz na plochách A a B – materiál Hips

Vzorek	Skupina	Ø Trysky [mm]	Výška vrstvy [mm]	Plocha A		Plocha B	
				Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]
46	16	0,25	0,15	13,28	80,72	14,81	68,35
47	16	0,25	0,15	11,73	70,98	12,25	63,26
48	16	0,25	0,15	11,25	69,67	15,06	74,33
49	17	0,3	0,15	15,71	92,35	10,47	50,16
50	17	0,3	0,15	15,24	101,31	8,17	37,72
51	17	0,3	0,15	13,83	81,80	6,25	36,85
52	18	0,3	0,25	20,28	104,02	11,06	54,88
53	18	0,3	0,25	23,67	122,90	13,46	66,27
54	18	0,3	0,25	21,58	108,15	15,84	72,25
55	19	0,4	0,15	13,14	72,96	8,66	43,26
56	19	0,4	0,15	14,67	94,75	7,80	35,61
57	19	0,4	0,15	16,89	102,03	10,92	47,89
58	20	0,4	0,25	18,18	88,33	22,99	99,13
59	20	0,4	0,25	21,24	121,66	24,55	95,16
60	20	0,4	0,25	18,80	95,87	27,60	120,72
61	21	0,4	0,35	25,60	121,15	31,51	123,35
62	21	0,4	0,35	29,27	136,07	25,35	123,22
63	21	0,4	0,35	25,80	125,27	38,90	142,24
64	22	0,5	0,15	13,98	81,51	6,46	35,00
65	22	0,5	0,15	21,27	113,41	10,05	43,46
66	22	0,5	0,15	15,90	89,60	12,01	56,71
67	23	0,5	0,25	19,00	100,71	21,18	83,01
68	23	0,5	0,25	18,68	93,36	17,15	70,17
69	23	0,5	0,25	19,15	104,12	21,62	78,70
70	24	0,5	0,35	25,85	116,82	43,28	165,44
71	24	0,5	0,35	25,78	128,40	49,20	171,26
72	24	0,5	0,35	25,35	114,45	37,45	151,91
73	25	0,6	0,15	17,01	81,67	24,74	191,02
74	25	0,6	0,15	16,92	91,72	32,91	139,52
75	25	0,6	0,15	21,33	161,05	27,13	159,10
76	26	0,6	0,25	25,80	114,76	46,26	122,36
77	26	0,6	0,25	25,17	144,80	28,26	152,17
78	26	0,6	0,25	19,88	103,40	27,65	132,02
79	27	0,6	0,35	26,17	125,56	32,78	154,65
80	27	0,6	0,35	28,80	155,58	43,69	170,80
81	27	0,6	0,35	26,19	133,45	34,61	163,22
82	28	0,8	0,25	18,27	97,25	28,31	199,83
83	28	0,8	0,25	18,09	90,12	20,04	129,35
84	28	0,8	0,25	18,07	89,06	27,03	164,38
85	29	0,8	0,35	25,69	127,16	29,55	192,66
86	29	0,8	0,35	24,10	112,53	28,45	187,24
87	29	0,8	0,35	23,22	112,26	27,57	209,44
88	30	0,8	0,45	29,65	128,38	34,87	175,26
89	30	0,8	0,45	32,45	155,35	36,86	229,30
90	30	0,8	0,45	31,56	143,27	35,97	206,01

Tabulka naměřených hodnot parametrů Ra a Rz na plochách A a B – materiál ABS

Vzorek	Skupina	Ø Trysky [mm]	Výška vrstvy [mm]	Plocha A		Plocha B	
				Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]
91	31	0,25	0,15	14,81	83,21	6,02	33,06
92	31	0,25	0,15	15,86	82,89	7,91	32,77
93	31	0,25	0,15	14,99	89,45	7,21	31,57
94	32	0,3	0,15	17,94	102,86	7,67	47,47
95	32	0,3	0,15	16,82	105,26	5,99	33,72
96	32	0,3	0,15	17,05	99,63	6,32	40,26
97	33	0,3	0,25	20,90	109,37	11,63	56,36
98	33	0,3	0,25	13,29	89,25	3,87	22,72
99	33	0,3	0,25	26,26	142,37	9,68	48,34
100	34	0,4	0,15	17,02	96,78	8,64	38,56
101	34	0,4	0,15	17,22	102,23	7,62	34,98
102	34	0,4	0,15	17,58	105,64	8,77	35,29
103	35	0,4	0,25	20,17	109,16	8,25	54,37
104	35	0,4	0,25	20,41	111,41	8,79	42,32
105	35	0,4	0,25	19,84	106,31	9,68	55,29
106	36	0,4	0,35	27,05	119,42	10,60	57,86
107	36	0,4	0,35	29,79	138,01	10,22	52,67
108	36	0,4	0,35	28,56	124,30	12,57	60,83
109	37	0,5	0,15	14,01	81,00	7,82	41,45
110	37	0,5	0,15	16,91	92,87	6,66	29,92
111	37	0,5	0,15	16,53	89,42	8,68	39,64
112	38	0,5	0,25	19,54	96,52	9,29	45,08
113	38	0,5	0,25	19,44	102,29	11,94	79,98
114	38	0,5	0,25	19,47	95,26	10,55	58,62
115	39	0,5	0,35	27,01	130,86	6,38	36,53
116	39	0,5	0,35	26,51	124,26	11,95	74,93
117	39	0,5	0,35	27,35	131,24	12,35	86,25
118	40	0,6	0,15	14,88	88,10	9,94	47,08
119	40	0,6	0,15	16,82	101,89	8,59	39,69
120	40	0,6	0,15	15,09	97,83	7,96	29,64
121	41	0,6	0,25	19,16	100,54	12,26	48,20
122	41	0,6	0,25	18,81	97,38	11,25	39,26
123	41	0,6	0,25	19,26	104,61	14,55	55,24
124	42	0,6	0,35	26,85	119,26	17,87	87,31
125	42	0,6	0,35	26,43	126,51	16,35	90,86
126	42	0,6	0,35	26,89	104,87	19,22	84,32
127	43	0,8	0,25	19,59	97,75	15,24	65,23
128	43	0,8	0,25	19,84	107,88	16,38	75,98
129	43	0,8	0,25	19,96	90,51	16,57	61,25
130	44	0,8	0,35	29,18	100,00	22,67	98,62
131	44	0,8	0,35	28,27	140,24	21,48	89,72
132	44	0,8	0,35	30,64	137,29	22,98	101,74
133	45	0,8	0,45	37,95	182,67	27,84	141,98
134	45	0,8	0,45	36,07	170,50	30,08	138,29
135	45	0,8	0,45	35,76	166,46	29,11	122,56

PŘÍLOHA 5

Tabulka naměřených rozměrů tvarových prvků – materiál PLA

Vzorek	Sk.	Ø Trysky [mm]	Výška vrstvy [mm]	Naměřené rozměry						
				A [mm]	B [mm]	C [mm]	D [mm]	E [mm]	F [°]	G [°]
1	1	0,25	0,1	19,52	7,57	15,19	55,10	40,40	9,82	60,35
2	1	0,25	0,1	19,56	7,71	15,27	55,21	40,20	9,73	60,32
3	1	0,25	0,1	19,63	7,67	15,23	55,18	40,31	9,75	60,27
4	2	0,25	0,2	19,52	7,62	15,03	55,09	40,31	9,78	60,36
5	2	0,25	0,2	19,54	7,56	15,20	55,12	40,24	9,72	60,29
6	2	0,25	0,2	19,49	7,63	15,22	55,15	40,18	9,74	60,39
7	3	0,3	0,1	19,54	7,87	15,12	55,15	40,06	9,89	60,25
8	3	0,3	0,1	19,71	7,91	15,09	55,14	40,14	9,65	60,24
9	3	0,3	0,1	19,56	7,79	15,14	55,29	40,00	9,45	60,38
10	4	0,3	0,2	19,60	7,92	15,04	55,23	39,92	9,65	60,36
11	4	0,3	0,2	19,43	7,81	15,11	55,21	39,10	9,73	60,43
12	4	0,3	0,2	19,59	7,67	14,98	55,15	39,15	9,72	60,43
13	5	0,3	0,3	19,69	7,60	15,03	55,01	40,11	9,68	60,41
14	5	0,3	0,3	19,65	7,66	14,97	54,95	40,05	9,78	60,48
15	5	0,3	0,3	19,75	7,50	14,95	54,90	39,98	9,62	60,42
16	6	0,4	0,1	19,66	7,56	15,04	55,02	40,30	9,61	60,48
17	6	0,4	0,1	19,51	7,50	15,07	54,98	40,19	9,53	60,49
18	6	0,4	0,1	19,55	7,56	15,03	54,97	40,15	9,56	60,52
19	7	0,4	0,2	19,44	7,54	15,16	55,21	40,07	9,49	60,60
20	7	0,4	0,2	19,28	7,52	15,14	55,10	39,97	9,48	60,57
21	7	0,4	0,2	19,14	7,37	15,08	55,00	40,01	9,39	60,62
22	8	0,4	0,3	19,41	7,33	14,57	55,00	40,00	9,57	60,61
23	8	0,4	0,3	19,39	7,41	14,82	55,01	40,02	9,39	60,58
24	8	0,4	0,3	19,50	7,38	14,79	55,15	40,10	9,35	60,65
25	9	0,4	0,4	19,09	7,33	14,98	54,87	40,30	9,32	60,64
26	9	0,4	0,4	19,15	7,14	15,05	54,99	40,09	9,35	60,57
27	9	0,4	0,4	19,17	7,45	15,02	54,98	40,14	9,41	60,59
28	10	0,5	0,1	19,14	7,16	15,55	55,30	40,22	9,62	60,51
29	10	0,5	0,1	19,21	7,04	15,14	55,35	40,50	9,60	60,44
30	10	0,5	0,1	19,17	7,20	15,31	55,27	40,34	9,57	60,48
31	11	0,5	0,2	19,36	7,32	15,29	55,09	40,41	9,53	60,43
32	11	0,5	0,2	19,37	7,30	15,03	55,22	40,91	9,58	60,49
33	11	0,5	0,2	19,16	7,37	15,26	55,19	40,52	9,46	60,50
34	12	0,5	0,3	19,00	7,01	15,44	55,61	40,71	9,47	60,53
35	12	0,5	0,3	19,18	7,03	15,57	55,61	40,80	9,52	60,47
36	12	0,5	0,3	18,99	6,97	15,63	55,60	40,69	9,54	60,52
37	13	0,6	0,1	19,36	7,31	15,07	55,27	40,35	9,65	60,43
38	13	0,6	0,1	19,22	7,52	15,09	55,29	40,23	9,62	60,48
39	13	0,6	0,1	19,38	7,24	15,02	55,24	40,31	9,61	60,56
40	14	0,6	0,2	20,19	7,55	15,03	55,31	39,82	9,42	60,53
41	14	0,6	0,2	19,34	8,03	15,15	55,24	39,92	9,46	60,60
42	14	0,6	0,2	19,07	7,95	15,19	55,40	39,76	9,50	60,61
43	15	0,6	0,3	19,14	7,22	15,21	55,34	40,88	9,52	60,55
44	15	0,6	0,3	19,12	7,15	15,20	55,24	40,44	9,48	60,68
45	15	0,6	0,3	19,11	7,49	15,19	55,19	40,52	9,52	60,66

Tabulka naměřených rozměrů tvarových prvků – materiál Hips

Vzorek	Sk.	Ø Trysky [mm]	Výška vrstvy [mm]	Naměřené rozměry						
				A [mm]	B [mm]	C [mm]	D [mm]	E [mm]	F [°]	G [°]
46	16	0,25	0,1	19,58	7,94	15,14	55,06	40,09	9,80	60,29
47	16	0,25	0,1	19,47	7,69	15,02	55,12	40,10	9,75	60,28
48	16	0,25	0,1	19,56	7,72	14,97	55,00	39,99	9,68	60,32
49	17	0,25	0,2	19,64	7,71	14,83	54,77	39,71	9,65	60,36
50	17	0,25	0,2	19,67	7,67	14,79	54,83	39,77	9,69	60,34
51	17	0,25	0,2	19,89	7,66	14,88	54,83	39,88	9,71	60,42
52	18	0,3	0,1	19,63	7,52	14,91	54,51	39,93	9,59	60,27
53	18	0,3	0,1	19,58	7,47	14,89	54,62	39,83	9,69	60,29
54	18	0,3	0,1	19,64	7,43	14,80	54,61	39,85	9,62	60,34
55	19	0,3	0,2	19,80	7,76	14,90	54,55	39,78	9,59	60,37
56	19	0,3	0,2	19,75	7,50	14,89	54,50	39,81	9,52	60,39
57	19	0,3	0,2	19,74	7,59	14,87	54,54	39,80	9,57	60,37
58	20	0,3	0,3	19,50	7,60	14,90	54,59	39,95	9,55	60,45
59	20	0,3	0,3	19,53	7,78	14,96	54,39	39,87	9,56	60,47
60	20	0,3	0,3	19,50	7,72	14,91	54,41	39,85	9,60	60,44
61	21	0,4	0,1	19,48	7,49	15,07	54,32	40,07	9,54	60,46
62	21	0,4	0,1	19,42	7,51	15,40	54,38	39,92	9,49	60,48
63	21	0,4	0,1	19,39	7,47	15,17	54,45	40,05	9,51	60,48
64	22	0,4	0,2	19,62	7,53	14,95	54,60	39,93	9,45	60,49
65	22	0,4	0,2	19,48	7,39	14,97	54,48	39,95	9,42	60,47
66	22	0,4	0,2	19,59	7,55	15,13	54,68	39,81	9,47	60,49
67	23	0,4	0,3	19,60	7,56	14,97	54,34	39,90	9,42	60,52
68	23	0,4	0,3	19,57	7,51	14,88	54,61	39,74	9,34	60,53
69	24	0,4	0,3	19,59	7,50	15,00	54,52	39,85	9,31	60,49
70	24	0,4	0,4	19,23	7,69	14,94	55,20	40,25	9,30	60,51
71	24	0,4	0,4	19,26	7,58	14,95	55,15	40,15	9,34	60,58
72	24	0,4	0,4	19,30	7,42	14,94	55,08	40,14	9,26	60,59
73	25	0,5	0,1	19,09	7,47	15,02	55,26	40,65	9,51	60,47
74	25	0,5	0,1	19,08	7,22	15,21	55,02	40,60	9,53	60,48
75	25	0,5	0,1	19,18	7,29	15,20	55,22	40,51	9,50	60,48
76	26	0,5	0,2	19,23	7,16	15,54	55,30	40,60	9,49	60,53
77	26	0,5	0,2	19,21	7,17	15,60	55,39	40,56	9,42	60,55
78	26	0,5	0,2	19,38	7,08	15,51	55,38	40,52	9,53	60,51
79	27	0,5	0,3	19,08	7,08	15,40	55,15	40,88	9,46	60,56
80	27	0,5	0,3	19,15	7,15	15,74	55,33	40,72	9,53	60,52
81	27	0,5	0,3	19,21	7,09	14,42	55,21	40,76	9,45	60,57
82	28	0,6	0,1	19,62	7,41	15,02	55,01	39,74	9,58	60,37
83	28	0,6	0,1	19,60	7,44	14,94	55,00	39,76	9,57	60,39
84	28	0,6	0,1	19,54	7,46	15,09	54,91	39,77	9,54	60,40
85	29	0,6	0,2	19,43	7,34	15,38	55,16	39,63	9,56	60,58
86	29	0,6	0,2	19,39	7,26	15,11	55,06	39,81	9,47	60,41
87	29	0,6	0,2	19,26	7,30	15,34	55,10	39,88	9,46	60,62
88	30	0,6	0,3	19,65	7,25	15,16	54,99	39,91	9,58	60,39
89	30	0,6	0,3	19,59	7,13	15,13	55,00	40,05	9,46	60,62
90	30	0,6	0,3	19,69	7,26	15,16	54,91	10,11	9,53	60,51

Tabulka naměřených rozměrů tvarových prvků – materiál Hips

Vzorek	Sk.	Ø Trysky [mm]	Výška vrstvy [mm]	Naměřené rozměry						
				A [mm]	B [mm]	C [mm]	D [mm]	E [mm]	F [°]	G [°]
91	31	0,25	0,1	19,31	7,24	15,33	54,56	40,25	9,65	60,35
92	31	0,25	0,1	19,34	7,13	15,07	54,95	40,38	9,74	60,34
93	31	0,25	0,1	19,34	7,31	15,08	54,85	40,40	9,76	60,30
94	32	0,25	0,2	19,61	7,78	14,96	54,74	40,85	9,62	60,49
95	32	0,25	0,2	19,72	7,82	15,99	54,71	40,89	9,64	60,48
96	32	0,25	0,2	19,48	7,80	14,96	54,65	40,90	9,74	60,28
97	33	0,3	0,1	19,87	7,16	15,44	54,81	40,16	9,82	60,27
98	33	0,3	0,1	19,74	7,38	15,42	54,76	40,24	9,80	60,30
99	33	0,3	0,1	19,45	7,22	15,30	54,73	40,23	9,79	60,27
100	34	0,3	0,2	19,73	7,70	14,87	54,56	39,82	9,74	60,27
101	34	0,3	0,2	19,80	7,68	14,95	54,62	39,87	9,72	60,29
102	34	0,3	0,2	19,69	7,67	14,86	54,55	39,82	9,71	60,32
103	35	0,3	0,3	19,97	7,69	15,10	54,64	40,00	9,49	60,37
104	35	0,3	0,3	19,62	7,78	15,08	54,51	40,01	9,42	60,34
105	35	0,3	0,3	19,55	7,58	15,11	54,53	40,01	9,47	60,35
106	36	0,4	0,1	19,46	7,48	15,04	54,36	40,27	9,81	60,39
107	36	0,4	0,1	19,54	7,58	15,31	55,21	40,10	9,79	60,28
108	36	0,4	0,1	19,71	7,59	15,22	55,08	40,28	9,84	60,34
109	37	0,4	0,2	19,60	7,26	14,90	55,09	40,10	9,64	60,57
110	37	0,4	0,2	19,47	7,29	14,82	54,93	40,07	9,79	60,69
111	37	0,4	0,2	19,33	7,25	14,69	54,95	40,05	9,76	60,68
112	38	0,4	0,3	19,24	7,11	14,50	55,00	40,01	9,72	60,69
113	38	0,4	0,3	19,43	7,34	14,90	54,93	40,02	9,65	60,72
114	38	0,4	0,3	19,41	7,29	14,81	54,97	40,01	9,69	60,70
115	39	0,4	0,4	19,45	7,29	15,02	54,87	39,97	9,78	60,81
116	39	0,4	0,4	19,48	7,34	15,04	54,46	39,93	9,61	60,89
117	39	0,4	0,4	19,60	7,39	14,86	54,77	39,86	9,59	60,92
118	40	0,5	0,1	19,24	7,25	15,21	55,20	40,51	9,67	60,72
119	40	0,5	0,1	19,15	7,09	15,19	55,17	40,54	9,62	60,76
120	40	0,5	0,1	19,13	7,13	15,19	55,20	40,54	9,63	60,74
121	41	0,5	0,2	19,19	6,80	15,43	55,44	40,80	9,61	60,80
122	41	0,5	0,2	19,20	6,89	15,39	55,46	40,78	9,63	60,81
123	41	0,5	0,2	19,14	6,94	15,46	55,54	40,72	9,69	60,72
124	42	0,5	0,3	19,44	6,92	15,57	55,29	40,75	9,59	60,69
125	42	0,5	0,3	19,18	6,90	15,64	55,37	40,83	9,57	60,64
126	42	0,5	0,3	19,16	6,83	15,66	55,43	40,84	9,16	60,66
127	43	0,6	0,1	19,46	7,18	15,45	55,05	40,11	9,66	60,40
128	43	0,6	0,1	19,52	7,09	15,33	54,97	40,17	9,68	60,37
129	43	0,6	0,1	19,59	7,10	15,32	54,93	40,19	9,72	60,43
130	44	0,6	0,2	19,44	6,95	15,46	55,10	40,38	9,70	60,60
131	44	0,6	0,2	19,42	6,91	15,52	55,33	40,32	9,64	60,52
132	44	0,6	0,2	19,29	6,89	15,41	55,18	40,40	9,62	60,55
133	45	0,6	0,3	19,00	7,20	15,58	55,25	40,47	9,59	60,62
134	45	0,6	0,3	19,02	7,04	15,63	55,30	40,30	9,58	60,71
135	45	0,6	0,3	19,04	7,01	15,67	55,38	40,32	9,43	60,64