



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**POVRCHOVÉ ZMĚNY V ZÁVISLOSTI NA PARAMETRECH
FDM TISKU**

SURFACE CHANGES BASED ON FDM PRINTING PARAMETERS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jiří Čada

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Jiří Čada**
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:

Povrchové změny v závislosti na parametrech FDM tisku

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Stavba experimentální 3d tiskárny pro technologii FDM tisku. Návrh, provedení a vyhodnocení testů změn na povrchu výrobku po průchodu materiálu tryskou. Základními parametry by měla být teplota a rychlost protlačování. Součástí práce bude i doporučení rozsahu pracovních hodnot pro testované materiály.

Cíle diplomové práce:

- rešerše zvolené problematiky
- konstrukce a výroba experimentální 3d tiskárny
- návrh testovaných parametrů
- provedení a vyhodnocení experimentů
- vyhodnocení výsledků a doporučení do budoucna

Seznam literatury:

CHOI, S.H. a S. SAMAVEDAM. Modelling and optimisation of Rapid Prototyping. Computers in industry. (47): 39-53. ISSN 166-3615.

ZEMČÍK, Oskar a Jan DVOŘÁČEK. A Distribution of Temperature Field in the FDM Printhead. In: NEWTECH 2011: The International Conference NEWTECH 2011 on Advanced Manufacturing Engineering. Brno: Litera, 2011, s. 115-119. ISBN 978-80-214-4267-2.

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

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

Heat flow fundamentals. Ansys Theory reference: v. 13 [online]. 2011. Southpointe: Ansys, Inc. [cit. 2011-07-14]. Dostupné z: www.ansys.com

PABLA, B.S. a M. ADITHAN. CNC Machines. 2. New Delhi: New Age International, 2008, 140 s. ISBN 9788122420197.

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

PÍŠKA, Miroslav. Speciální technologie obrábění. 1. Brno: CERM, 2009, 246 s. ISBN 978-80-214-4025-8.

ŽENÍŠEK, Josef. Teorie a konstrukce výrobních strojů. Vyd. 1. Praha: SNTL, 1988, 399 s. ISBN 04-233-88.

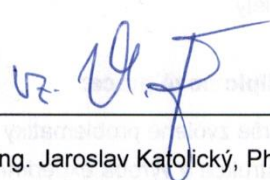
Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16.

V Brně, dne 9. 11. 2015



prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu





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

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá stavbou modifikované RepRap 3D tiskárny Rebel II, která pracuje na principu Fused Deposition Modeling technologie a výběrem vhodných kritérií pro tisk. Hlavní zaměření je na teplotu tištěného materiálu a rychlost tisku pro tři vybrané materiály. Materiály byly vybrány podle dostupnosti na trhu a jejich využití. Dále je v této práci realizován experiment, který je zaměřený na povrchové změny výrobku a vzhled vlákna po průchodu tryskou.

Klíčová slova

tiskárna Rebel II, 3D tisk, PLA, ABS, TPU, kvalita povrchu

ABSTRACT

This thesis deals with a construction of modified RepRap 3D printer Rebel II which operates with Fused Deposition Modeling technology and selection of suitable criterion for printing. It mainly focuses on the temperature of the material being printed and speed of printing for three selected materials. Materials were selected based on availability in the market and their application. An experiment, focusing on surface changes of products as well as on the look of a fibre after passing through a nozzle, was performed.

Key words

Printer Rebel II, 3D print, PLA, ABS, TPU, surface quality

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ČADA, J. Povrchové změny v závislosti na parametrech FDM tisku. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 63 s. 5 příloh. Vedoucí diplomové práce Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Povrchové změny v závislosti na parametrech FDM tisku** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Bc. Jiří Čada

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Oskaru Zemčíkovi, PhD., za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce, Ing. Petře Sliwkové, Ph.D. za možnost realizovat měření. Také děkuji firmě Intemac Solutions, s.r.o., Kuřim za technickou podporu.

Dále velké poděkování náleží celé mé rodině za podporu a trpělivost po celou dobu mého studia.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH	7
ÚVOD	9
1. RAPID PROTOTYPING	10
1.1 Historie Rapid Prototyping	10
1.2 Metody Rapid Prototyping	10
1.2.1 Stereolitografie – SLA	10
1.2.2 Metoda Selective Laser Sintering - SLS	11
1.2.3 Metoda Fused Deposition Modeling – FDM	12
1.2.4 Metoda Laminated Object Manufacturing – LOM	14
1.2.5 Metoda Three-dimensional printing - 3DP	14
1.2.6 Metoda Multi Jet Modelling - MJM	15
1.2.7 Další technologie RP	15
1.3 RepRap.....	16
2. STAVBA 3D TISKÁRNY	17
2.1 Volba tiskárny	17
2.2 Rám	17
2.3 Elektronika	18
2.3.1 Krokový motor	18
2.3.1 Arduino Mega 2560	19
2.3.2 RAMPS 1.4	19
2.3.3 Ovládací panel s displejem	20
2.3.4 Koncové spínače	20
2.4 Extruder	21
2.5 Vyhřívání stůl	21
2.6 Pojezdy	23
3. PARAMETRY TISKU	24
3.1 Používané materiály pro tisk	24
3.1.1 PLA - PolyLactid Acid	24
3.1.2 ABS – AkrylonitrilButadienStyren	24
3.1.3 TPU - Thermoplastic PolyUrethane	26
3.2 Teplota tisku	26

3.2.1 Teplota tisku PLA	27
3.2.2 Teplota tisku ABS	27
3.2.3 Teplota tisku TPU	28
3.2.4 Porovnání materiálových vlastností	28
3.3 Rychlost tisku	29
3.4 Chlazení HotEndu a výtisku	30
3.5 Výška vrstvy	31
3.6 Výplň součásti	31
3.7 Viditelné stěny tělesa	32
3.8 Podpory, mosty, krajnice	33
3.9 Formát .STL	34
3.10 Generování G-kódu	34
3.10.1 CuraEngine	34
3.10.2 Slic3r	35
4. REALIZACE EXPERIMENTU	36
4.1 Drsnost a vlnitost povrchu	36
4.1.1 Názvy geometrických parametrů	36
4.1.2 Filtry profilu	36
4.1.3 Základní rozdělení profilů	37
4.1.4 Základní délky	37
4.1.5 Definice parametrů profilu povrchu	38
4.1.6 Měření drsnosti a vlnitosti s přístrojem Alicona	39
4.1.7 Měření drsnosti a vlnitosti s přístrojem Form Talysurf Intra 50	43
4.2 Rozměrová přesnost	46
4.3 Vzhled součásti	49
4.4 Vzhled a rozměr vytlačeného vlákna	52
5. DOPORUČENÍ	56
ZÁVĚR	57
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	58
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	61
SEZNAM PŘÍLOH	63

ÚVOD

V této práci jsem se snažil navázat na svoji předchozí bakalářskou práci, kdy se 3D tisk stal mým koníčkem. Protože mám zálibu v těžké vojenské technice a výrobě modelů (obrázek 1.0), tak mi 3D tisk v tomto ohledu velice napomáhá, kdy si z vlastního návrhu nebo již vymodelovaného předmětu staženého z databáze určité pro 3D tisk mohu model realizovat.

Na rychlou výrobu prototypových součástí ve strojírenském průmyslu je kladen velký důraz, jelikož se na takto vyrobených součástích ověřuje buď smontovatelnost dílů do sestavy nebo vyrobitelnost dílů konvenčními metodami.

Počátkem myšlenky RepRap projektu bylo vyrobit 3D tiskárnu, která bude dostupná pro běžné uživatele a bude se umět sama reprodukovat. Tuto myšlenku realizoval Adrian Bowyer a realizoval open-source projekt, díky kterému si mohl každý postavit svojí 3D tiskárnu, kterou mohl dále upgradovat.

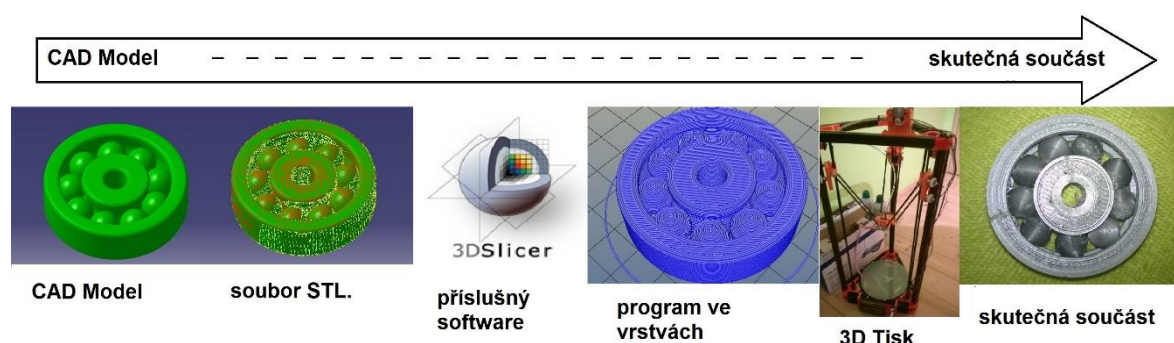
V této diplomové práci se zabývám stavbou modifikované RepRap FDM tiskárny, která nese název Rebel II. Hlavním rozdílem od běžně dostupné stavebnice je změna rozměru tiskové plochy a vylepšení konstrukce pro mé potřeby tisku. V další části této práce je proveden experiment na této tiskárně se třemi různými materiály, dále následuje jeho vyhodnocení. Závěr práce obsahuje doporučení, které vyplývá z provedeného experimentu.



Obr. 1.0 Model tanku T-34/85.

1 RAPID PROTOTYPING

Rapid Prototyping (RP) v sobě zahrnuje množství technologií, které umožňují výrobu prototypu za pomoci 3D tisku. Technologie RP převádí CAD modely za pomoci příslušných software a 3D tiskáren na skutečné součásti, jako je znázorněno na obr. 1.1. Těmito technologiemi se materiál neodebírá, ale naopak se nanáší po jednotlivých vrstvách, dokud nevznikne konečný výrobek, a proto se zařazují mezi aditivní metody výroby. Výroba prototypů touto metodou výrazně zkracuje čas potřebný pro kompletaci a vývoj daného výrobku oproti konvenčním metodám, které materiál odebírají. RP se nepoužívá pouze ve strojírenství, svoje místo si našla ve stavebním průmyslu, uměleckém průmyslu a mnoha dalších [1,2].



Obr. 1.1 Vznik skutečné součásti metodou RP.

1.1 Historie Rapid Prototyping

E. J. Blather v roce 1890 navrhl způsob výroby formy pro topografickou mapu. Tento způsob výroby se zakládal na vrstvení jednotlivých voskových desek, výška jedné vrstvy se v té době rovnala výškové vzdálenosti vrstevnic v určitém měřítku. Tato technologie se postupně vyvíjela a v roce 1987 přišla na trh společnost 3D Systems s první použitelnou technologií Stereo Lithography (SLA)[1,2].

1.2 Metody Rapid Prototyping

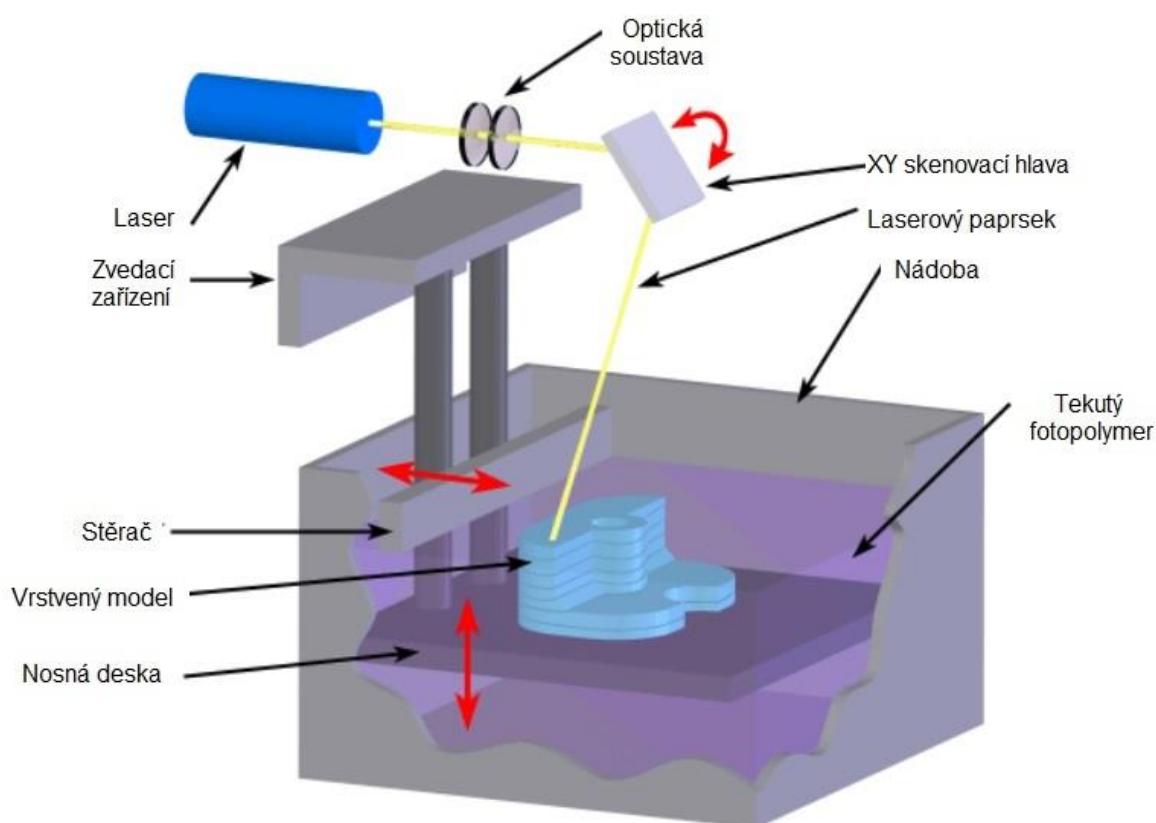
Základní metody výroby technologií Rapid Prototyping používají různé materiály pro výrobu modelu[1]:

- Fotopolymery,
- kovové prášky,
- tekuté a polotekuté plasty,
- papírové materiály.

1.2.1 Stereolitografie – SLA

Stereolitografie je jedna z nejstarších technologií Rapid Prototypingu. Tato technologie je založena na postupném vytváření jednotlivých vrstev tekutého fotopolymeru, popřípadě pryskyřice (obr. 1.2). Fotopolymer se vytvrzuje ultrafialovým laserem, který je veden z dat příslušného software a je zaměřen na příslušné místo v nádobě s fotopolymerem optickou

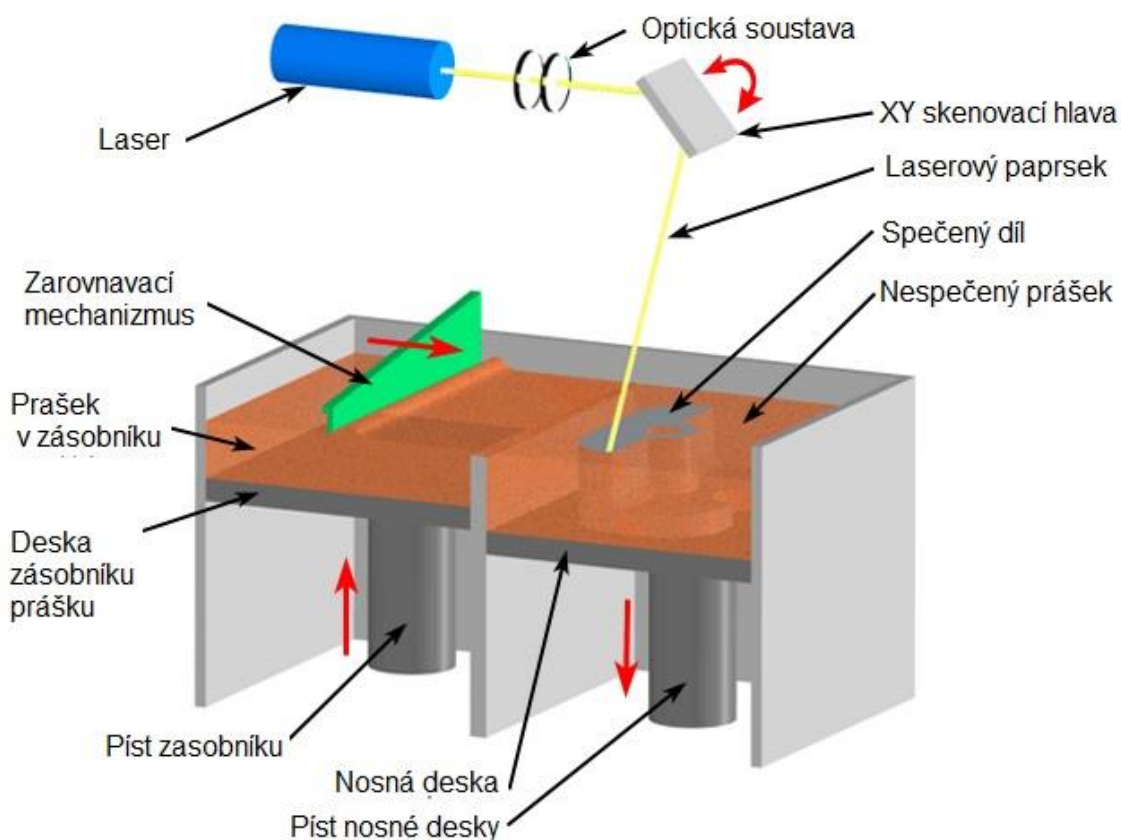
soustavou. Vytvrzování probíhá v 2D vrstvách o tloušťce 0,5-0,15mm tím způsobem, že součást je tvořena na nosné desce, která se zpočátku nachází těsně pod hladinou. Nosná deska se po vytvrzení jedné vrstvy ponoří o hodnotu vrstvy hlouběji do nádoby s fotopolymerem. Před vytvořením další vrstvy je nutné zarovnat hladinu stěračem. Tato technologie dokáže vytvářet milimetrové otvory a miniaturní modely. Je zde zapotřebí vytvářet podpory pro převislé části modelu[1,3].



Obr. 1.2 Tvorba modelu metodou SLA[4].

1.2.2 Metoda Selective Laser Sintering - SLS

Aditivní metoda Selective Laser Sintering (SLS) byla vyvinuta na Texaské univerzitě v Austinu v roce 1986. Tato metoda je založena na roztavení prášku, který se spolu spojí. Roztavení prášku má na svědomí laserový paprsek na bázi CO_2 . Materiál se taví a spéká v inertní atmosféře dusíku nebo argonu. Výsledný model vzniká tím způsobem, že se na nosnou desku nanese vrstva prášku v požadované výšce (0,02mm – 0,5mm) a za pomoci XY skenovací hlavy, která vede paprsek laseru, se prášek roztaví a speče. Nespečený prášek v nádobě se chová jako podpůrný materiál. Po vytvoření jedné vrstvy se za pomoci speciálního mechanismu nanese a zarovná další vrstva prášku tak, že píst zásobníku se zvedne a přitom se píst nosné desky posune o výšku jedné vrstvy níž a následně se prášek zarovná, jak je vyobrazeno na obrázku 1.3 [1,3]



Obr. 1.3 Tvorba modelu metodou SLS [4].

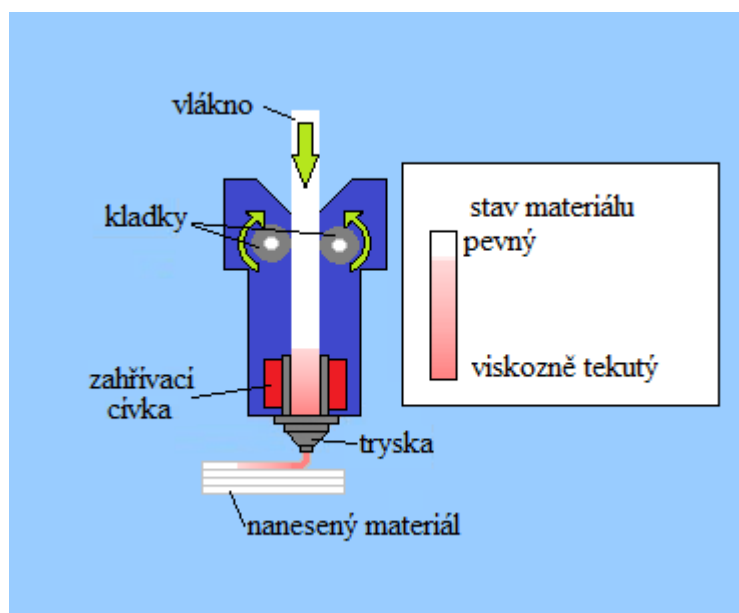
Touto technologií Rapid Prototyping se dají vytvářet modely nejen z kovového prášku, ale i z jakéhokoliv prášku, který se zahřátím roztaví či nataví a posléze ztuhne. Mezi základní modifikace této metody podle materiálu spěkaného prášku patří[3]:

- Laser - Sintering Plastic - model lze vyrobit z různých druhů plastický hmot. Tyto modely se používají jako funkční součásti.
- Laser - Sintering Metal – model se vyrábí ze speciálního kovového prášku a dosahuje 60% teoretické hustoty.
- Laser - Sintering Formsand – model vzniká ze speciálního slévárenského písku.
- Laser Micro Sintering – model se spéká z wolframu, který je nadrcen na velmi malé kousky.

1.2.3 Metoda Fused Deposition Modeling – FDM

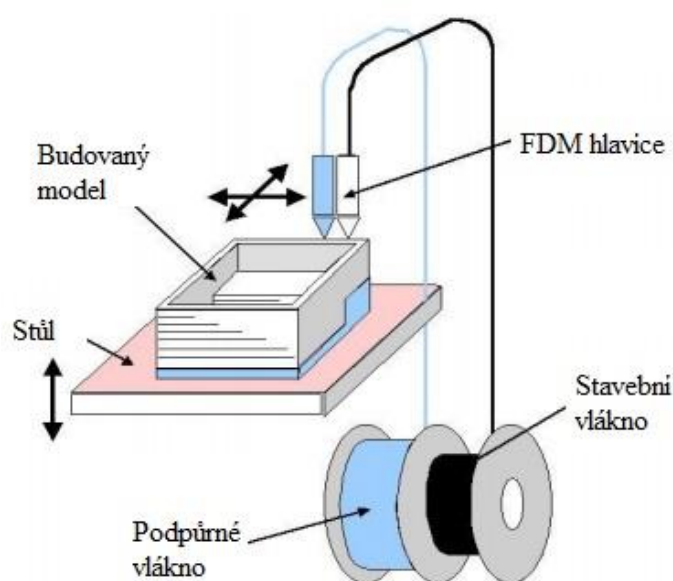
Tato metoda pracuje na principu natavování drátu termoplastu, kovu nebo vosku. Drát se nataví do polotekuté fáze v FDM hlavici a je nanášen pomocí trysky o vhodném průměru na základní materiál. Nanesený polotekutý materiál začne okamžitě tuhnout (obr. 1.4). FDM hlavice se většinou pohybuje v osách X, Y. První vrstva je nanesena na základní desku v drahách vygenerovaných softwarem, pro tvorbu další vrstvy se hlavice posune v ose Z o výšku jedné vrstvy. Touto technologií se nejčastěji vytvářejí modely

z termoplastu ABS a PLA, ale dají se nanášet jakékoliv materiály, které se po zahřátí roztékají a při ochlazení opět tuhnou[5,6].



Obr. 1.4 Princip metody FDM.

Při FDM tisku se musí u modelu s převisy vytvářet podpory, aby se převisy netiskly „do vzduch“. Tyto podpory se u 3D tiskáren s jednou hlavicí vytvářejí ze stejného materiálu jako je materiál stavěcí, a poté se mechanicky oddělují, nebo u 3D tiskáren se dvěma hlavicemi se jednou tryskou nanáší podpurný materiál a druhou stavěcí materiál. V případě použití 3D tiskárny se dvěma hlavicemi se podpory též odstraňují mechanicky nebo se vyplavují vodou nebo speciálními roztoky. Tisk s podpurným materiálem je na obrázku 1.5 [5,6,7].

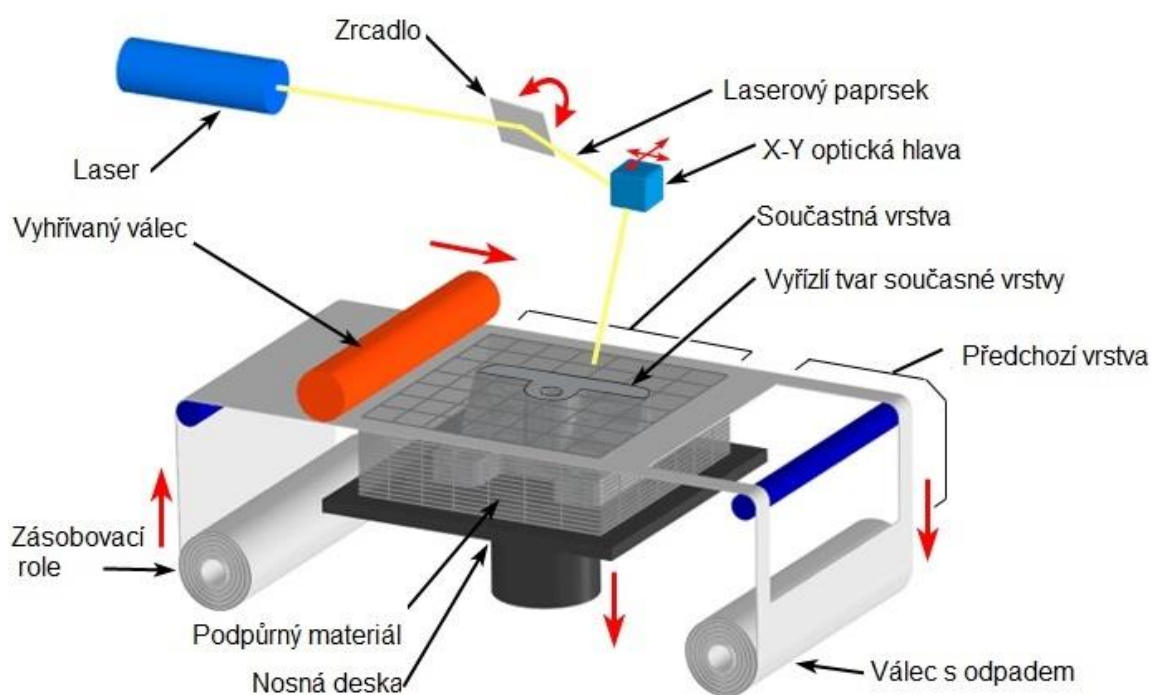


Obr. 1.5 Princip nanášení stavebního a podpurného materiálu[7].

1.2.4 Metoda Laminated Object Manufacturing – LOM

Tato metoda je založena na principu vrstvení materiálu viz. obrázek 1.6. Model je vytvářen nanášením mnoha vrstev plastové folie nebo papíru na nosné desce, která se pohybuje svisle dolů po vrstvách. Tento materiál má z jedné strany vrstvu nátěru, která je přilnavá a přilepí se k předchozí vrstvě. Každou novou vrstvu nejprve přitaví vyhřívaný válec na předchozí vrstvu, poté folii nebo papír vyřízne laserový paprsek, který je vytvořen laserem na bázi CO₂. Dráha laserového paprsku je předem vygenerována za pomoci software. Zbylá folie je rozřezána jako odpad. Poté se nosná deska posune o velikost jedné vrstvy níže a toto celé se opakuje, dokud nedojde k vytvoření celé součástky[3,5].

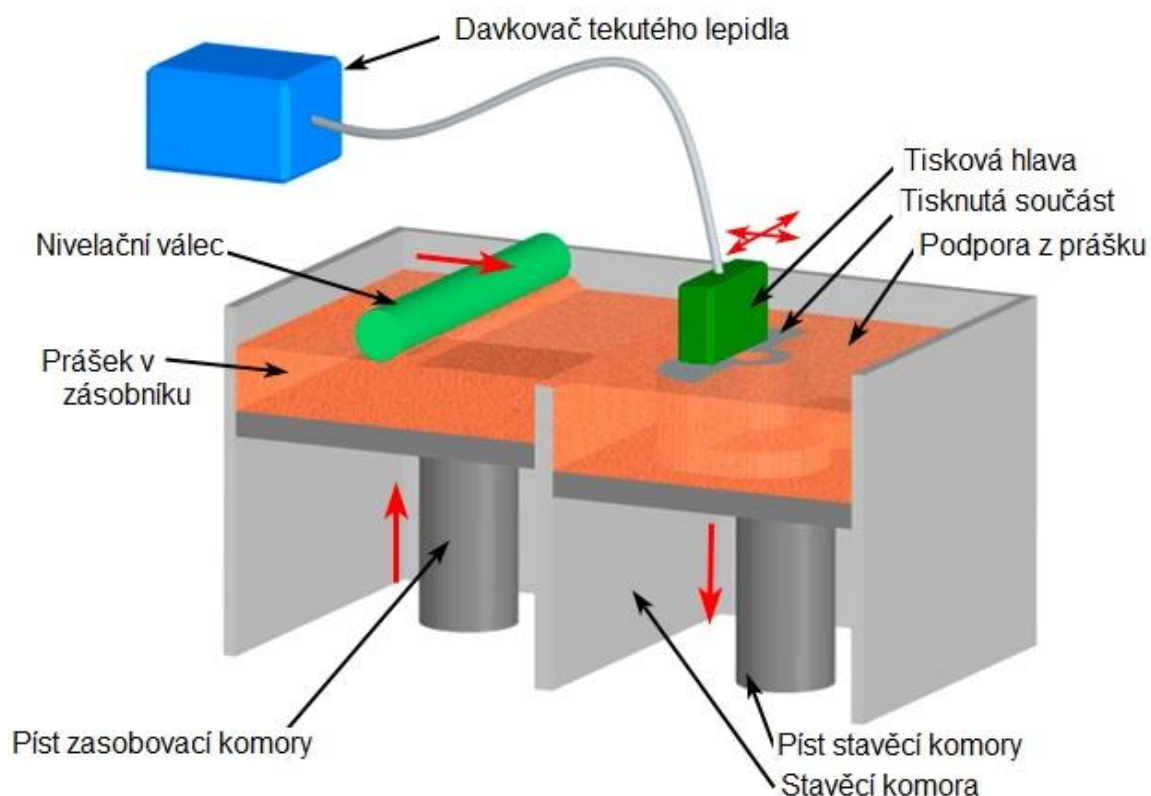
Součásti vytvořené touto metodou mají vlastnosti shodné s dřevěným modelem. Hlavní nevýhodou této metody je špatné využití stavebního materiálu, jelikož vznikne hodně odpadu[5].



Obr. 1.6 Tvorba modelu metodou LOM [4].

1.2.5 Metoda Three-dimensional printing - 3DP

Tato metoda je založena na slepování práškového materiálu za pomoci tiskové hlavy, která vypouští malé kapičky kapaliny, které následně spojují práškový materiál. Tyto kapičky jsou vypouštěny v různých barvách tak, že může vznikat plně barevný model. Tisková hlava přejíždí po zarovnané vrstvě prášku. Takto vytvořené modely jsou spíše použitelné jako výstavní, protože nemají dostatečnou pevnost, aby se daly použít jako modely funkční. Princip metody je zobrazen na obrázku 1.7[3].



Obr. 1.7 Tvorba modelu metodou 3DP [4].

1.2.6 Metoda Multi Jet Modelling - MJM

Multi-Jet Modelling je technologie založena na vystřelování drobných kapek termoplastu (stavební materiál) a vosku (podpurný materiál). Kapky se nanáší hlavicí s mnoha set tryskami těsně vedle sebe. Po dopadu na nanášený materiál kapky okamžitě tuhnou. Když je celá součást hotová, tak se vosk, jakožto podpurný materiál, vyplaví horkou vodou nebo speciálními rozpouštědly[3,5,8].

1.2.7 Další technologie RP

Hot Plot – Tato technologie je založena na technologii LOM s tím rozdílem, že zde místo laserového paprsku vyřezává obrys v dané vrstvě řezací elektroda, která je rozžhavena na takovou teplotu, aby prořízla speciální polystyrenovou folii o tloušťce 1mm[5].

Solid Creation System (SCS) – Tato metoda vznikla spoluprací dvou japonských firem. SCS technologie má základy ve stereolitografii pouze s tím rozdílem, že se zde dají vytvořit mnohem větší modely[5].

Stereos – Metoda, která je opět založená na principu stereolitografie, ale pro vytvrzení pryskyřice využívá laser na bázi HeCd nebo Ar. Výhodou této metody je jednoduchá zaměnitelnost nádoby s pryskyřicí[5].

Shape Melting – U této technologie se nanáší slitiny na bázi niklu za pomoci elektrického oblouku na vytvářenou součást. Materiál je nanášen po vrstvách a hlavní výhodou této technologie je, že nejsme omezeni tvarem a rozměry součásti[5].

1.3 RepRap

První myšlenku vytvořit RepRap (Replicating Rapid Prototyper) měl Brit Adrian Bowyer v roce 2004. Vytvořil 3D tiskárnu, která dokázala tisknout potřebné 3D komponenty pro stavbu další 3D tiskárny. Tento projekt se stal open-source, což znamenalo, že si každý mohl postavit svojí RepRap tiskárnu, poté ji zdokonalovat a následně svá vylepšení zveřejnit[9,10].

RepRap je založen na FDM technologii, takže nejruznější komponenty jsou vyrobeny z plastu. Proto jsou někdy 3D tiskárny nazývány jako samo reprodukcující se. Oproti průmyslově vyráběným tiskárnám za desítky tisíc korun vyjdou tyto tiskárny finančně levněji a to na několik tisíc korun. Na obrázku 1.8 je jedna z mnoha RepRap 3D tiskáren, tiskárna typu Delta[9,10].



Obr. 1.8 Tiskárna typu Delta [4].

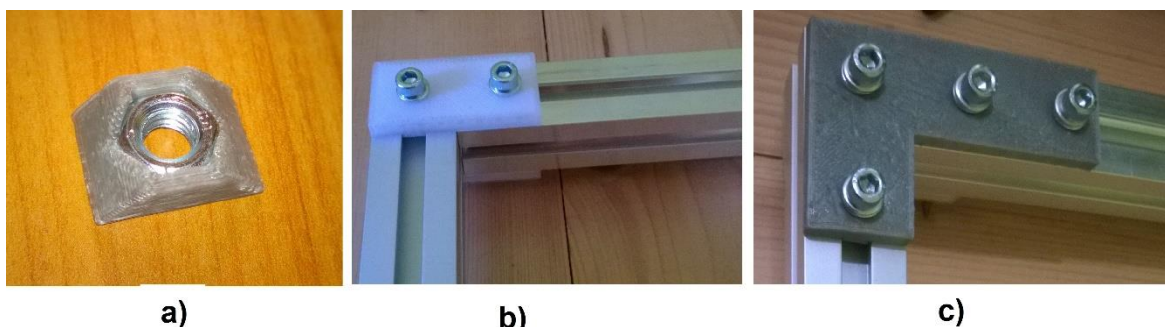
2 STAVBA 3D TISKÁRNY

2.1 Volba tiskárny

Jako základní tiskárnu pro tuto práci byla vybrána tiskárna typu Rebel, a to konkrétně druhé generace s tím, že bude modifikována od klasické stavebnice, která se dá pořídit v internetových obchodech. Tiskárna Rebel II byla vybrána také proto, že je jedna z nejrozšířenějších tiskáren v České republice a je k ní zpracováno mnoho návodů a vylepšení. Díly na vytisknutí pro tuto tiskárnu se dají stáhnout na internetových stránkách (například <http://www.rebelove.org/>), čímž splňuje konstrukci typu RepRap. Taktéž zbytek dílů je běžně dostupný v internetových či kamenných obchodech. Modifikace běžně dostupné tiskárny by měla vycházet z větších rozměrů tiskového prostoru a jiné konstrukci vyhřívaného stolu.

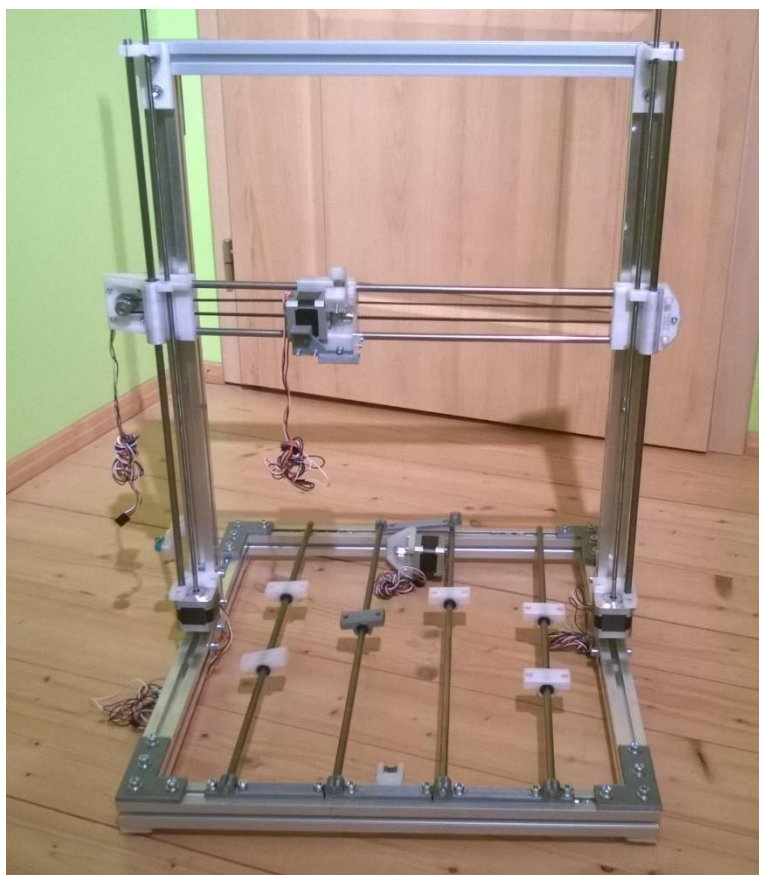
2.2 Rám

Základem této tiskárny je rám z hliníkových profilů nazývaných Kombi stojka od firmy A+A Pardubice spol. s r.o. Velikost rámu byla volena s ohledem na dosažení velikosti tiskové plochy 400x400mm. Základní rám se skládal z pěti kusů Kombi stojky o délce 500mm a dvou kusů o délce 600mm. Tyto díly byly za pomoci originálně vytisknutých rohových dílů spojeny a následně k nim byl přišroubován horní část rámu. Rám byl spojen šrouby s imbusovou hlavou M6x14 a maticemi M6 zalisovanými do předem vytištěných dílů, které mají negativní tvar profilu Kombi stojky (obr. 2.1a). Po sešroubování rámu musely být originální rohové spoje (obr.2.1b) nahrazeny většími díly, které zajistily větší tuhost sestaveného rámu (obr. 2.1c).



Obr. 2.1 a) Matice M6 zalisovaná ve vytištěném dílu, b) originální rohový díl, c) upravený rohový díl.

Dále jsou na hlavním rámu přišroubovány upravené držáky pojezdových tyčí a držáky krokových motorků. Pojezdové tyče byly zvoleny 4 oproti originálnímu řešení Rebel II z důvodu možnosti tisknout velké díly, které budou mít větší hmotnost, a tím by se mohl stůl mírně prohnut, což by bylo nežádoucí. Základní rám včetně pojezdů a krokových motorků je na obrázku 2.2.



Obr. 2.2 Rám včetně pojezdů.

2.3 Elektronika

Hlavními prvky elektroniky jsou krokové motorky, tištěné desky Arduino mega 2560 a RAMPS 1.4 na ně napojené drivery pro krokové motorky DVR8825. Dále sem patří přídatný display s možností úprav nastavení tisku a koncové spínače pro zajištění polohy.

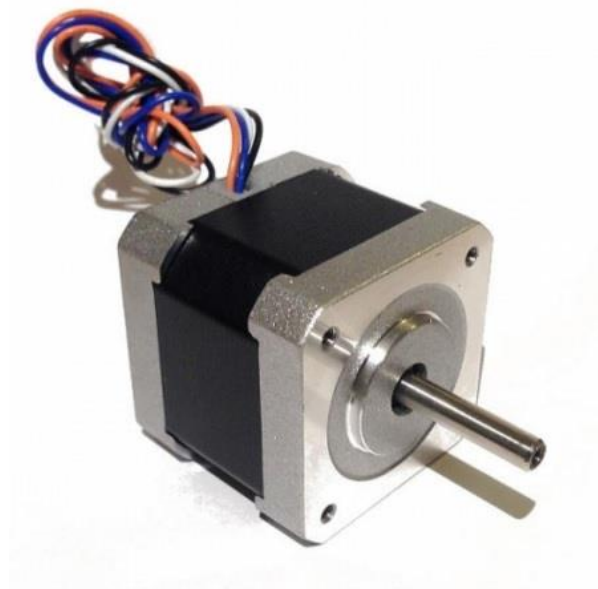
2.3.1 Krokový motor

Krokové motorky na 3D tiskárně zajišťují hlavní pohyby tiskárny, a proto jsou její nedílnou součástí. Zajišťují pohyb extruderu po příčnici v ose X za pomoci řemene, pohyb vyhřívaného stolku v ose Y za pomoci řemene, zvedání příčnice s extruderem za pomoci závitových tyčí v ose Z a podávání filamentu do trysky.

Na tuto tiskárnu bylo použito 5 kusů krokových motorků řady SX od firmy MICROCON, s.r.o. s označením SX17-1005VLQCEF (obr. 2.3), které mají tyto parametry[11]:

- krouticí moment: 0,52 Nm,
- typ příruby: NEMÁ 17,
- jmenovitý proud, sériové zapojení: 1A,
- délka motorku: 40mm,
- hmotnost: 0,3kg,
- výstupní hřídel: $\varnothing 5\text{mm}$,
- délka kroku: $1,8^\circ$,

- tolerance kroku: $\pm 0,1^\circ$,
- délka kabelu: 1000mm, zakončeno 4 pinovým konektorem.



Obr. 2.3 Krokový motorek SX17-1005VLQCEF[12].

2.3.1 Arduino Mega 2560

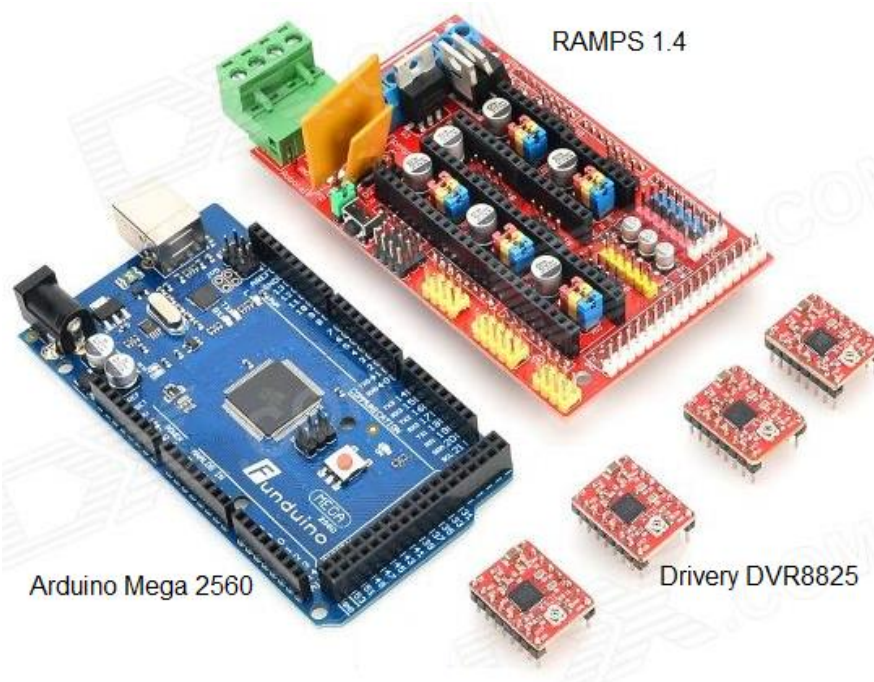
Arduino Mega 2560 je vývojová deska s mikroprocesorem ATmega2560. V 3D tiskárnách se používá nejčastěji ve spojení s RAMPS 1.4. Tato deska musí v sobě mít nahrána firmware pro příslušnou RepRap tiskárnu, tento firmware se na desku nahraje pomocí vývojového prostředí z počítače po propojení USB kabelem typu B. Základní parametry Arduino Mega 2560[13,14]:

- pracovní napětí: 5V,
- vstupní napětí: 7-12V,
- vstupní nap. max.: 6-20V,
- I/O piny: 54,
- analogové vstupy: 16,
- flash paměť: 256 KB.

2.3.2 RAMPS 1.4

Zkratka RAMPS je odvozena z počátečních písmen anglického názvu RepRap Arduino Mega Pololu Shield. Je to takzvaný shield (přídavný modul) pro Arduino Mega 2560, tyto dvě desky jsou spolu sendvičově spojené přes řadu konektorů. Na RAMPS se připojují všechny ovládací, ovládané a signální prvky, v případě tiskárny Rebel II je osazena 4 driverů DVR8825 pro ovládání signálu do krokových motorků. Na desku jsou připojeny tři

hlavní výkonové prvky, a to ovládání ohřívání stolku, ohřívání trysky Hotendu a zdroj pro ventilátor na chlazení Hotendu, dále pak dva termistory, které hlídají teplotu trysky v Hotendu a teplotu stolku. Je zde připojeno i všech 5 krokových motorků. Tuto desku lze rozšířit o mnoho přídavných doplňků. RAMPS, Arduino a drivery jsou na obrázku 2.4 [15].



Obr. 2.4 Elektronika pro řízení tiskárny [16].

2.3.3 Ovládací panel s displejem

Ovládací panel s displejem je připojen pomocí rozšiřovacího modulu do RAMPS a propojen dvěma plochými připojovacími kabely. Celé zařízení obsahuje LCD informační display, čtečku se slotem na SD kartu, centrální STOP tlačítko, otočný volič a malý reproduktor.

Na LCD display se zobrazuje aktuální teplota stolku, aktuální teplota trysky a požadované teploty, dále je zde informace o stavu tisknuté součásti, a to hlavně procento dokončené součásti, souřadnice trysky od nulového bodu a celkový čas tisku.

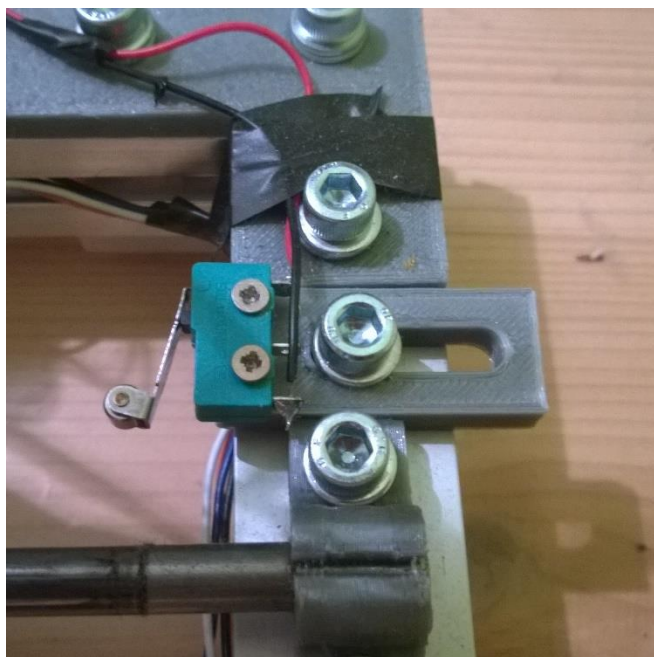
Díky tomu, že tento panel obsahuje čtečku se slotem pro SD karty, nemusí být tiskárna stále připojena USB kabelem k počítači, ale stačí nahrát vygenerovaný G-kód na SD kartu a z té v tiskárně program spustit.

Ovládací panel lze použít i k základnímu nastavení již během tisku, a to například úpravou teploty stolku či trysky, rychlosti tisku, intenzity chlazení, rychlosti podávání filamentu do trysky atd.

2.3.4 Koncové spínače

Koncové spínače jsou na tiskárně dohromady 3 a všechny slouží pro nastavení nulového bodu souřadného systému tiskárny. Největší vliv na tisk má koncový spínač osy Z, ten se

nastavuje v setinách milimetrů a určuje počáteční vzdálenost mezi tryskou a plochou vyhřívaného stolku. Tato vzdálenost se nastavuje pomocí papíru vloženého mezi trysku a vyhřívaný stůl, papír by měl být mírně přitlačený tryskou ke stolku tak, že s ním jde s určitým odporem hýbat. Tloušťka papíru se poté zadá do programu pro generaci drah trysky. Pro tuto 3D tiskárnu musel být vytvořen originální držák pro koncový spínač osy Y (obrázek 2.5).



Obr. 2.5 Držák koncového spínače osy Y.

2.4 Extruder

Extruder se na 3D tiskárně Reble II skládá z pěti hlavních komponent, těmi jsou Hotend, lineární ložiska, vytisknuté tělo extruderu, korkový motorek a přítlačný mechanismus filamentu na ozubnici. Na extruder je dále přišroubován větrák pro chlazení tisknutého modelu.

Hotend, označovaný jako E3D V5, je zařízení, v němž se mění stav filamentu z pevného na viskózně tekutý, který je vhodný pro tisk. O tuto změnu stavu se stará ohřívací tělísko, které je napájené a řízené z RAMPS a které dostává zpětnou vazbu o teplotě díky termistoru. Termistor i ohřívací tělísko jsou připevněné v hliníkové kostce, která přenáší teplo na trysku.

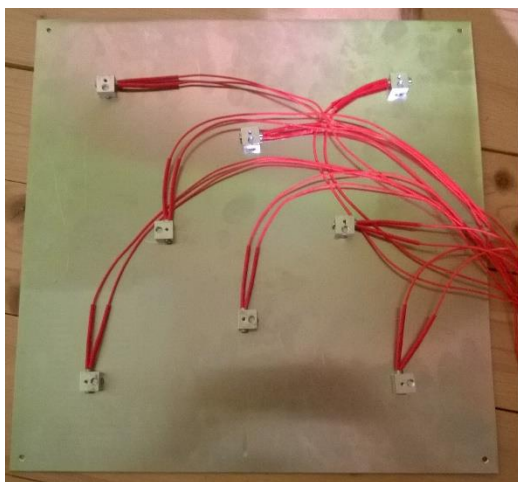
Do Hotendu je filament tlačěn otáčením ozubnice na krokovém motorku, do kterého z druhé strany tlačí přítlačný mechanismus pro zmenšení možnosti prokluzu filamentu na ozubnici.

2.5 Vyhřívání stůl

Běžně dostupný vyhřívaný stůl pro tuto tiskárnu byl nahrazen stolem vlastní konstrukce, který je vyhříván ohřívacími tělisky, která jsou upevněna v hliníkových kostkách původně určených pro Hotend. Tyto kostky byly upraveny tak, aby se daly připevnit šrouby M6 se zapustnou hlavou k hliníkové desce o tloušťce 2mm, ve které byly v určité formaci vyvrtány díry.

Celý stůl se skládá se základní hliníkové desky o tloušťce 3mm pro velkou celkovou tuhost stolu, na tuto desku jsou přišroubované držáky lineárních ložisek pro pojezd v ose Y. V rozích této desky jsou 4 šrouby M6x40, na kterých je přidělaná samotná topná deska s ohřívacími tělísy umístěnými v hliníkových kostkách. Jelikož by se na tuto desku kvůli šroubům se zápusnou hlavou nedalo tisknout, je přes ní dána odnímatelná 2mm silná hliníková deska, na které je nalepená kaptonová páska a na tu se bude provádět samotný tisk.

Na vyhřívání stolu bylo prvně použito 8 ohřívacích tělísek o celkovém výkonu 320W, které stolek nezvládaly vytopit na 100 °C za požadovaný čas 15minut (obrázek 2.6). Proto byla přidána ohřívací tělíska na celkový počet 12 ohřívacích tělísek o celkovém výkonu 480W a bylo pozměněno i rozmístění na topné desce.



a)



b)

Obr. 2.6 a) Pohled na rozmístění tělísek, b) vrchní strana se zapuštěnými a zabroušenými šrouby.

Ohřívání stolku je zapojeno do tří samostatně zapnutelných okruhu, které se dají manuálně ovládat kolébkovými spínači (obrázek 2.7). Spínání ohřívání stolku zajišťuje RAMPS, které má aktuální teplotu díky dvěma termistorům připevněných k topné desce, jeden termistor je připevněn ve středu desky a druhý v hliníkové kostce jednoho z ohřívacích tělísek. Mezi těmito termistory lze libovolně přepínat, ale funkční je vždy pouze jeden. Jelikož by topný výkon 480W nevydržela proudová pojistka v RAMPS, je vytápění spínáno relátkem, které je ovládáno z RAMPS.



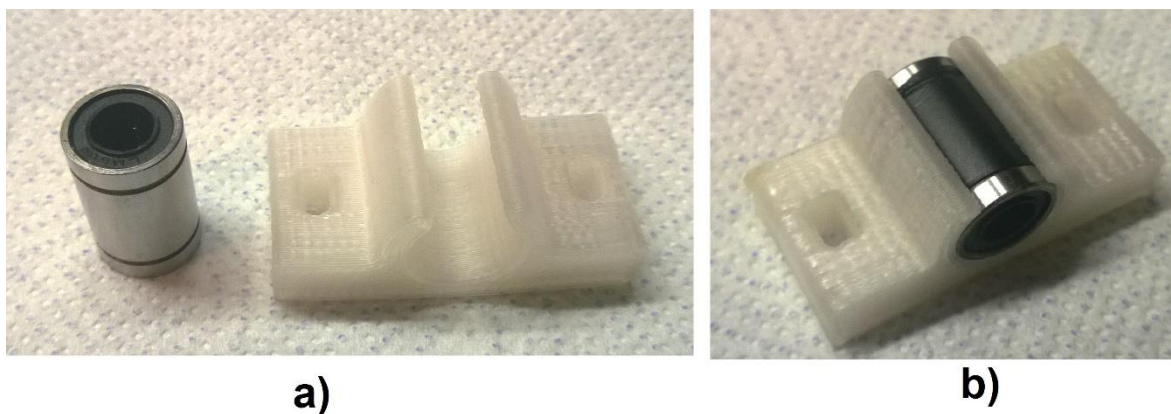
Obr. 2.7 Ovládání topných okruhu stolku (vlevo), možnost přepínání mezi termistory stolku (vpravo).

2.6 Pojezdy

Pojezdy jsou na originální tiskárně Rebel II řešeny dvěma způsoby, které se liší pouze v materiálu pojezdových tyčí. V levnějším případě se používá tzv. hlazenka neboli kruhová ocelová tyč tažená za studena, a v dražší variantě se využívá kalené a následně broušené tyče. Hlazenka má svoji hlavní nevýhodu v tom, že se v ní po delším čase vytvoří stopy po lineárních ložiskách, které mají následně vliv na nepřesnost tisknutého dílu a zvětšení vibrací celé sestavy.

Na realizované tiskárně jsou použity 4 pojezdové tyče pro vyhřívaný stolek (osa Y) kvůli možnosti tisknout větší díly, a tím i větší vahou zatěžovat stolek, který by se mohl pod vahou tištěného dílu prohýbat. Dále je použito po dvou pojezdových tyčí pro osy X a Z jako je na původní tiskárně Rebel II. Z důvodu dosažení celkově nízké ceny 3D tiskárny jsou všechny pojezdové tyče realizovány z kruhové ocelové tyče tažené za studena.

Pojezdy na tiskárně jsou složeny z pojezdových tyčí a lineárních ložisek s označením LM8UU, tato ložiska jsou uložena v různých vytisknutích držácích, viz obrázek 2.8.



Obr. 2.8 a) Lineární ložisko s uložením pro pojezd stolku, b) lineární ložisko s vytisknutým dílem dané v sestavě.

Po pojezdech v ose X se pohybuje extruder, v ose Y vyhřívaný stůl, za pomoci krokového motorku, na kterém je nasazená ozubená řemenice T2,5 s 16 zuby do které zapadá ozubený řemen T2,5, který je na obou koncích připevněn k předmětu, se kterým má pohybovat (extruder, stolek).

3 PARAMETRY TISKU

3.1 Používané materiály pro tisk

Materiály pro FDM tiskárny se nejčastěji dodávají ve formě drátu navinutém na cívkách v průměrech 1,75mm a 3mm, v některých případech je součástí extruderu zařízení na zpracování materiálu ve formě granulovaného polotovaru.

3.1.1 PLA - PolyLactid Acid

PLA je termoplast, který se získává z rostlinných škrobů. Tím pádem je lehce odbouratelný, a proto méně škodí přírodnímu prostředí. Je to jeden z nejvíce používaných materiálů pro FDM tisk. Jeho výhody a nevýhody se často porovnávají s dalším nejčastěji používaným materiálem pro tisk FDM metodou, a to s ABS. Hlavní výhodou je nižší teplota tavení plastu a tím i menší energetická náročnost tisku, jako další z hlavních výhod se bere malá teplota vyhřívaného stolku. Teplota nahřátí stolku se pohybuje maximálně do 40 °C, v některých případech se stolek nenahřívá vůbec. Další z výhod PLA bývá, že se při chladnutí tištěného dílu nedeformuje.[17,18]

PLA má nevýhodu oproti ABS v tom, že začíná měknout při nižších teplotách, které se pohybují kolem 60 °C, tato teplota se nazývá teplota skelného přechodu. Tento termoplast se vyznačuje vyšším třením v extruderu a proto je náchylnější na dokonalé povedení Hotendu, kvůli vyššímu tření může nastat ucpání extruderu, což znamená zastavení tisku a znehodnocení výtisku. Tento materiál se dá brousit, vrtat a jinak obrábět, ale pouze za intenzivního chlazení, kvůli nízké teplotě skelného přechodu. Ruční broušení je bezproblémové[17,18,19].

Vzdušná vlhkost není dobrá pro PLA, tento plast ji do sebe nasává ze vzduchu, a tím degraduje svoje vlastnosti při tisku. V extrémním nasycení vlhkosti do vlákna se může stát, že se při tisku bude ozývat lupání, které bude způsobeno přeměnou vzdušné vlhkosti ve vlákne na páru, což může být vidět i na nekvalitním povrchu výtisku. Tento problém se dá řešit vhodným skladováním strunového materiálu nebo vysoušením. Vysoušení se dá provádět v pecích při teplotě okolo 75 °C po dobu jedné hodiny. V tomto případě hrozí, že se při špatné teplotě vysoušení drát na cívce speče a je dále nepoužitelný[18].

Vlastnosti pro PLA od výrobce Fillamentum (Příloha 1):

- měrná hmotnost: 1,24 g/cm³,
- tažnost: 6%,
- pevnost: 53 MPa,
- pracovní teplota: 190 - 210 °C,
- teplota podložky: max. 45 °C.

3.1.2 ABS – AkrylonitrilButadienStyren

ABS je termoplast, který se hojně využívá v mnoha podobách a mnoha užití. Jeho hlavní využití je jak v automobilovém průmyslu, tak i u RepRap 3D tiskáren. Je to jeden z nejvíce užívaných materiálů pro FDM tisk. Jeho hlavní výhodou je odolnost proti vyšším teplotám než u PLA, teplotu skelného přechodu má okolo 100 °C, další výhodou oproti PLA je jeho

houževnatost. Jako další výhodu má odolnost proti chemikáliím, a to hlavně kyselině, vybraným uhlovodíkům a olejům. Při porušení dílu z ABS plastu se dá dílec slepit za pomoci rozpouštědel nebo polykrylátovými lepidly. Tento termoplast potřebuje menší sílu na protlačení extruderem, a tím zabraňuje ucpání HotEndu, protože má nižší součinitel tření[20,21,22].

Nevýhoda ABS plastu spočívá v tom, že musí být vytlačován při vyšších teplotách, a to okolo 230 °C, což je energeticky více náročné, další nevýhodou je nutnost vyhřívání stolku. Stolek se musí nahřívat na teplotu přibližně 110 °C. Chladnutí tohoto plastu provázejí velké deformace, což se nejčastěji projevuje u rozměrných součástí, a to praskáním nebo oddělením od vyhřívání stolku a následným znehodnocení výtisku. Tento jev se dá zmírnit tím, že nebudeme tisknutý předmět chladit, další možností je na tisknutou plochu stolu před tiskem nanést nějaký přípravek pro lepší udržení součásti na vyhřívání stolku. Nejčastěji se používá Kaptonová páska s dalším přípravkem, který se nanese na pásku. Bylo vyzkoumáno, že nejlepší je používat lak na vlasy nebo kousky ABS plastu rozpuštěné v acetonu[17,21].

Tento termoplast vytváří při jeho nahřátí nepříjemné výpary, které mohou být pro člověka a zvířata nebezpečné, proto se doporučuje při tisku dobře větrat, což může mít za následek změnu teploty výtisku a jeho následné znehodnocení tím, že se začne deformovat. Tyto výpary mohou způsobit potíže s dýcháním nebo malátnost[21].

Vlastnosti pro ABS od výrobce Fillamentum (Příloha 2):

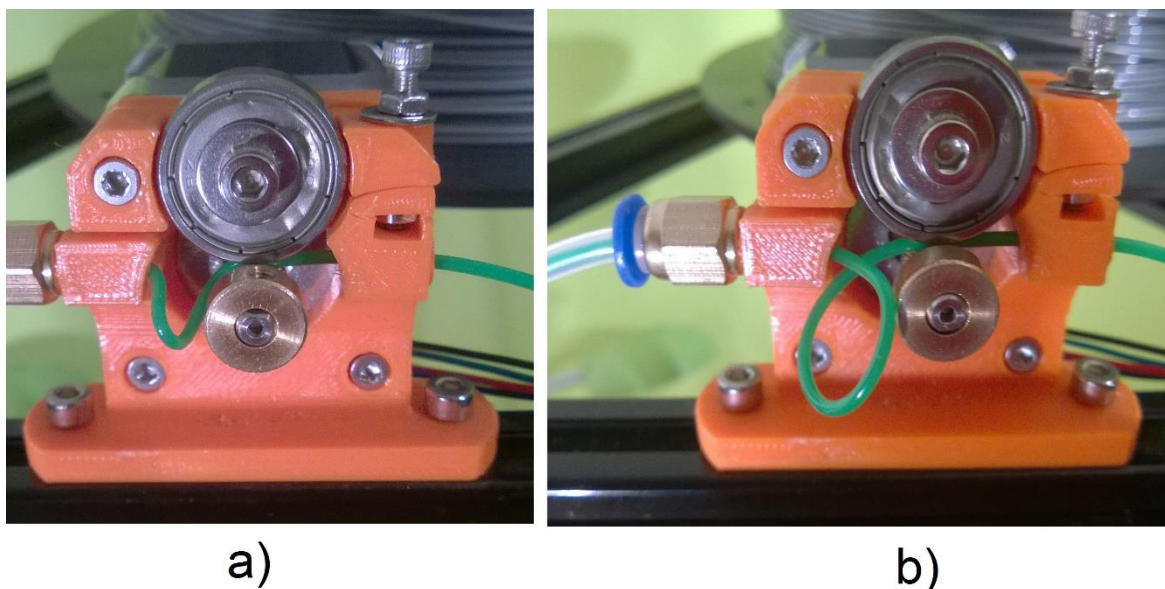
- měrná hmotnost: 1,04 g/cm³,
- tažnost: 22%,
- pevnost: 36 MPa,
- pracovní teplota: 220 - 240 °C,
- teplota podložky: 80 - 100 °C.

ABS plast se používá i jako základ pro další materiály, těmi jsou např.[23,24]:

- ABSplus – Tento materiál nemá tak velké deformace způsobené teplotním rozdílem jako ABS. Neabsorbuje vlhkost a je o 40% pevnější.
- ABS-M30 – Může nabývat až o 70% větší pevnosti v tahu než obyčejné ABS. Je odolnější vůči nárazu a ohebnější. Spojení jednotlivých vrstev je taktéž větší.
- PC-ABS – Je to směs, ve které se kombinuje ohebnost ABS a pevnost polykarbonátu.
- ABSi – Materiál s vysokou odolností proti nárazu.
- ASB-ESD7 – Tento plast se využívá díky své odolnosti vůči elektrostatice, velké využití má v elektroprůmyslu.

3.1.3 TPU - Thermoplastic PolyUrethane

TPU je kaučukový termoplast, který se používá pro výrobu ochranných pouzder nebo průmyslových produktů. Tento flexibilní polymer odolává teplotám až do 80 °C. Jeho tisk je velmi obtížný z důvodu jeho velké pružnosti tisknuté struny. Nejvíce náchylné místo na znehodnocení tisku je mezera mezi zubatíci podávající filament a otvorem v extruderu, do kterého vstupuje. Tato mezera musí být co nejmenší, protože když má filament v HotEndu veliký odpor, může se filament v této mezeře nahromadit a dále se přestat posouvat do HotEndu. Výsledný jev je poté takový, že se z tiskové struny vytvoří smyčka, která vystupuje touto mezerou ven, viz obrázek 3.1. Jeho výhodou je odolnost proti olejům a tukům a také odolnost proti otěru[25,26].



Obr. 3.1 Vytvoření smyčky u podavače materiálu napojeného bowdenem k HotEndu a) počátek vytvoření smyčky, b) následné vytlačování struny mimo bowden.

Doporučené teploty pro TPU[26]:

- pracovní teplota: 230 - 250 °C,
- teplota podložky: 60 °C.

3.2 Teplota tisku

Nastavení správné teploty je pro každý materiál jiné a bývá doporučeno výrobcem filamentu v určitém rozmezí. Udržení správné teploty trysky je zásadní problém, o toto se stará řídicí elektronika tiskárny. Příliš malá teplota způsobí obtížné vytlačení filamentu tryskou a někdy i jeho pohybu zamezí. Nízká teplota též způsobuje špatné spojení jednotlivých vrstev na sebe, čímž se výrobek stává křehkým. Příliš velká teplota způsobuje nechtěné vytékání materiálu z trysky a tím na modelu, při volných přejezdech bez tisku, způsobuje nežádoucí „pavučinu“, poté tento materiál chybí při najetí na dráhu, kde má být součást tisknuta.

3.2.1 Teplota tisku PLA

Hlavní problematikou této práce je vliv teploty tisku na povrch výrobku. Jako doporučená teplota pro tisk PLA termoplastu je 190-210 °C, jako referenční teplotu volím střední hodnotu tohoto rozsahu, a to 200 °C. Další z teplot pro test budou odstupňovány po 15 °C. Pro test PLA byly zvoleny tyto teploty:

- 175 °C,
- 200 °C,
- 215 °C,
- 230 °C,
- 245 °C,
- 260 °C.

Tyto teploty byly zvoleny z předešlé zkušenosti s materiálem PLA, který při teplotě menší než 175 °C začíná matnět a filament do HotEndu vstupuje s většími problémy.

S vyššími teplotami začíná být povrch tištěného materiálu lesklejší a více náchylný na rychlost tisku a intenzitu chlazení.

Vyhřívaný stůl není nutné při tisku PLA zapínat, při tisku měl stůl pokojovou teplotu, a to asi 21,5 °C.

3.2.2 Teplota tisku ABS

Teploty pro tisk ABS plast se pohybují ve vyšších hodnotách, proto se zde musí upravit stupnice použitých teplot oproti PLA. Doporučené teploty pro tisk od výrobce Fillamentum je pohybují v rozmezí 220-240 °C. Jako referenční teplotu volím 235 °C a další teploty odstupňovány jako v předchozím případě po 15 °C.

Pro test ABS byly zvoleny tyto teploty:

- 205 °C,
- 220 °C,
- 235 °C,
- 250 °C,
- 265 °C,
- 280 °C.

Tyto teploty byly zvoleny podle podobných kritérií jako u PLA plastu. Při teplotách kolem 205 °C se ABS tiskne obtížně. Při této teplotě se vrstvy nespojují a výtisk bývá nepoužitelný.

S vyššími teplotami je ABS plast náchylnější na teplotní deformace vlivem změny teplot v okolí a také se odpařuje více škodlivých látek.

Pro tisk ABS je nutné zapnout vyhřívání stolu, teplota byla zvolena maximální doporučená, tedy 100 °C.

3.2.3 Teplota tisku TPU

Pro tisk z TPU byly opět zvoleny hodnoty teplot podle doporučeného intervalu od 230 °C do 250 °C. Jako základní teplota pro tisk byla zvolena teplota 250 °C, která se nachází v horní hodnotě intervalu. Teploty byly opět voleny po 15 °C.

Pro test TPU byly zvoleny tyto teploty:

- 220 °C,
- 235 °C,
- 250 °C,
- 265 °C,
- 280 °C,
- 295 °C.

Tisk při teplotách nižší než 250 °C bude náchylný na dobré podávání filamentu zubaticí do extruderu. Muže se stávat, že filament nebude podáván do extruderu, ale začne vybočovat mimo něj.

Při vyšších teplotách, které se při tomto testu budou dosahovat, se může stát, že se spálí teflonová vložka HodEndu, která je umístěna v Breaku.

Teplota vyhřívaného stolku při tisku TPU je nastavena na doporučených 60 °C.

3.2.4 Porovnání materiálových vlastností

V tabulce 3.1 jsou uvedeny základní vlastnosti materiálů, které se používají pro tisk FDM technologií.

Tab. 3.1 Vlastnosti materiálů [33,34,35].

Materiál	Pevnost v tahu [Mpa]	Modul pružnosti v tahu [Mpa]	Poměrné prodloužení na mezi kluzu [%]	Pevnost v ohybu [Mpa]	Modul pružnosti v ohybu [Mpa]	Teplota měknutí [°C]
ABS	22	1627	6	41	1834	90
ABS plus	37	2320	3	53	2250	96
PC-ABS	34	1810	5	59	1740	110
Nylon 12	48	1282	30	69	1276	82
ULTEM	71,6	2150	5,9	115,1	2300	153
PLA	57,8	3300	3,8	55,3	2300	50
TPU	54,1	123,6	382	6,2	148,9	-

3.3 Rychlost tisku

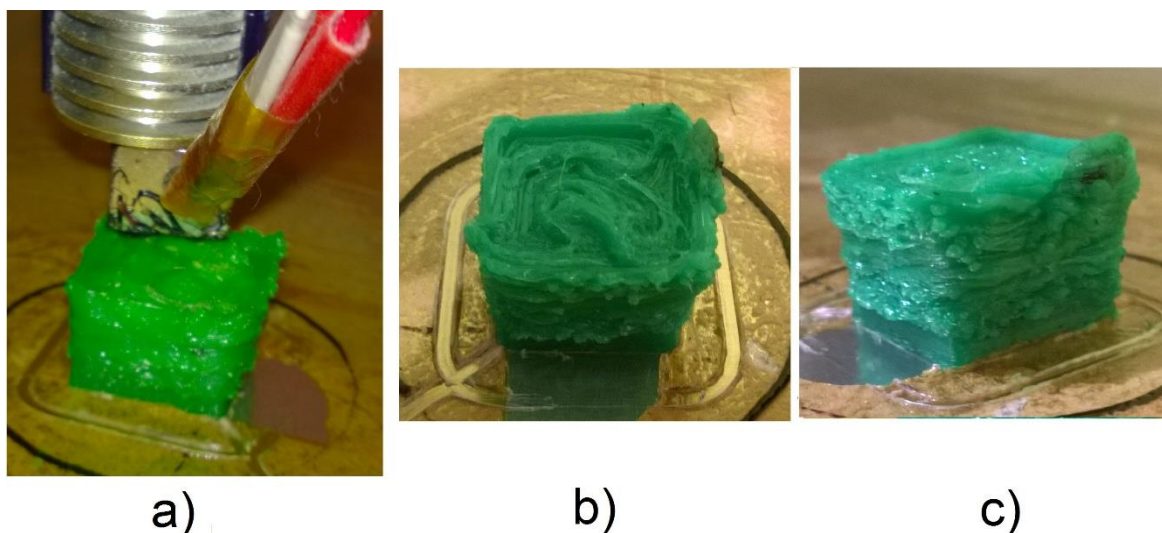
Rychlost tisku na RepRap tiskárnách se udává od 40 mm/s do 120 mm/s a někdy i více. Rychlost tisku je závislá na setrvačných silách pochybujících se částí, u tiskárny Rebel II je to vyhřívaný stůl a extruder.

Velikost setrvačných sil je závislá na hmotnosti pohybujícího se tělesa, a na změně jeho rychlosti. Když je tato síla příliš velká, může nastat přeskočení kroku na krokovém motorku, který nemá na potřebné zpomalení takové proudové nastavení. Další problém, který může nastat při velké rychlosti, je přeskočení ozubeného řemene na řemenici, která je poháněna z krokového motorku. Tomu se dá většinou zabránit dostatečným dopnutím ozubeného řemene. Obě tyto závady mají vliv na znehodnocení tisku.

Správná rychlost tisku je u každé tiskárny různá, její nastavení záleží na tuhosti konstrukce, možnosti reakce na změnu rychlosti u krokových motorků a zkušenosti obsluhy tiskárny.

Rychlost pro tiskárnu Rebel II je doporučena na 80 mm/s. Tato modifikovaná tiskárna je touto rychlostí schopna tisknout, i když má takto nadměrně velký a hmotný stůl oproti originálně doporučovanému vyhřívanému stolku.

Jednou z hlavních problematik této práce je rychlost protlačování materiálu. Tato rychlost souvisí s rychlostí tisku, protože kdyby se při zvětšování rychlosti protlačování souměrně nezvedala rychlost tisku, materiál by se hromadil na podložce stolku a výtisk by byl nepoužitelný, viz obrázek 3.2.



Obr. 3.2 Rychlost protlačování nesouměrná s rychlostí tisku a) tisk součásti a kolize vytištěného materiálu s tryskou, b) vrchní strana nedokončeného dílce, c) boční strany nedokončeného dílce.

Rychlost tisku také ovlivňuje čas, po který se požadovaná součást tiskne. Při tisku velkých součástí může rozdíl v časech tisku být i v hodinách, a to je nepřehlédnutelné při energetické náročnosti tiskárny na její chod.

Dalším faktorem, který zásadně ovlivňuje rychlost tisku, je kvalita vytisknuté součásti. Jak už rozměrová, tak i vzhledová.

Pro vyrobení vzorků byly zvoleny tyto rychlosti:

- 30 mm/s,
- 60 mm/s,
- 90 mm/s.

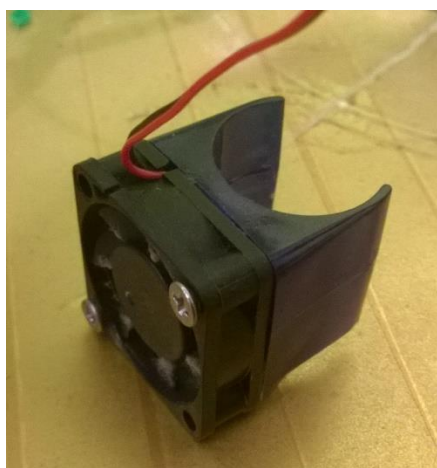
Tyto rychlosti byly zvoleny na základě doporučené rychlosti, a to tak, že pomalejší rychlost byla o polovinu snížena a vyšší rychlost byla dána oproti doporučené o polovinu výše.

3.4 Chlazení HotEndu a výtisku

Chlazení výtisku je zapotřebí hlavně u PLA plastu, kdy se musí chladit zejména u menších výtisků, kdy čas na dokončení jedné vrstvy je příliš malý na to, aby se stal plast pevnější a unesl další vrstvu.

Chlazení výtisku je prováděno za pomoci větráčku o rozměrech 40x40mm, který je připevněn na přišroubovaném pomocném držáku na extruderu. Otáčky větráčku jsou řízeny podle řídicího programu, ale dají se pomocí ovládacího panelu nastavit i během tisku.

Větráček chlazení trysky o rozměrech 20x20mm je napojený na stejný ovládací signál jako větráček pro chlazení tisku. Tento větráček je připevněn k plastovému dílci, který obepíná chladič HotEndu (obrázek 3.3). Oba dva větráčky se dají nezávisle na sobě vypínat za pomoci rozpojení konektoru.



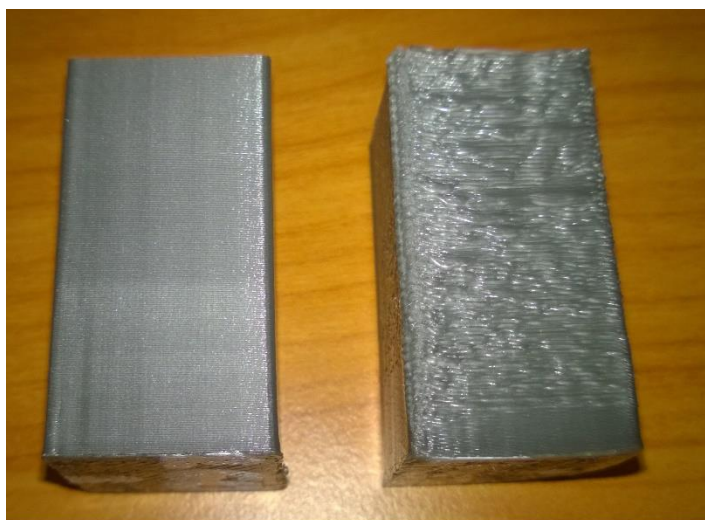
a)



b)

Obr. 3.3 a) Větráček 20x20 s držákem na HotEnd, b) Větráček přídělaný na HotEndu.

Pro tisk z ABS plastu bylo zapnuté pro všechny testované teploty pouze chlazení HotEndu. Při vyšších teplotách u tisku PLA muselo být použito výkonného chlazení externím ventilátorem. Na obrázku 3.4 je vidět rozdíl při použití výkonného externího chlazení při rychlosti tisku 40mm/s a tisknutelné teplotě 260 °C.



a)

b)

Obr. 3.4 a) Při použití externího chlazení, b) pouze s chlazením na tiskárně.

3.5 Výška vrstvy

Výška vrstvy je dalším z klíčových parametrů při nastavení tisku. Tato výška se pohybuje od hodnot 0,05 mm až po velikost průměru trysky, i když se maximální hodnota výšky vrstvy často nepoužívá. Je to výška mezi tiskovou plochou stolku a další vytištěnou vrstvou v ose Z. Tato hodnota nám ovlivňuje hlavně drsnost povrchu součásti, která bude v této práci jednou z hlavních problematik. Drsnost povrchu tisknuté součásti se zvětšuje se zvětšující se výškou tisknuté vrstvy a naopak. Další z faktorů, které ovlivňuje výška vrstvy, je čas potřebný na tisk. V tomto případě se ze zmenšující se výškou vrstvy prodlužuje čas potřebný pro vytvoření součásti, a to i v řádu hodin. Výška vrstvy má také vliv na vzhled součásti, což souvisí hlavně s drsností povrchu.

Pro výrobu vzorků byla volena výška vrstvy 0,15 mm s tím, že byla použita tryska o průměru 0,5 mm.

3.6 Výplň součásti

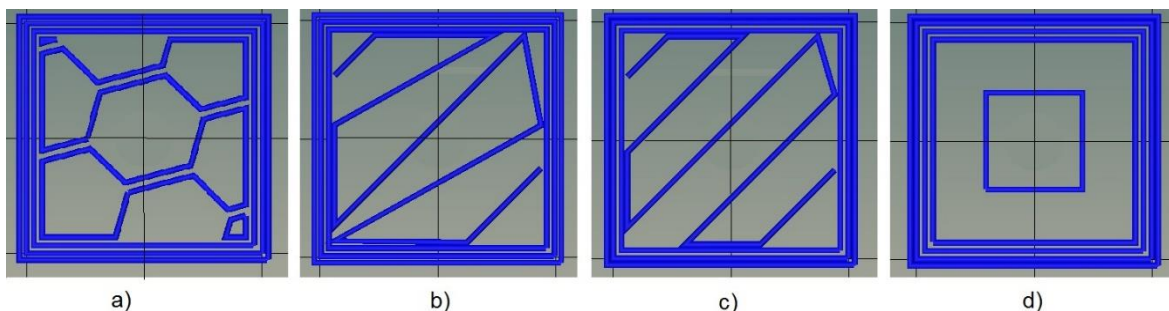
Výplň součásti je doplňkový faktor, který má vliv hlavně na pevnost vyrobeného dílu. Pro díly, které se budou následně používat jako koncový produkt, se dává výplň 50-70 % z pevnostního důvodu, pro díly, které slouží pouze jako předloha nebo dekorace, se výplň součásti používá od 20-40 %.

Další věc na co má výplň součásti vliv, je smršťování součásti během chladnutí. Její funkcí je zabránit smršťování, a tím propadání venkovních stěn do modelu.

Jak hodně bude součást vyplněna, záleží i na úspoře materiálu a také i na úspoře času potřebného pro zhotovení součásti. To znamená, že čím méně materiálu se použije, tím více klesá čas potřebný na tisk a také cena součástí.

Výplň se dá za pomoci software nastavit v různých tvarech, nastavit lze také hustotu výplně. Na obrázku 3.5 jsou znázorněny některé z možných tvarů výplně.

Pro tisknuté vzorky byla použita jednotná výplň, a to 20 % z důvodu ušetření materiálu a potřebného času pro tisk. Tvary výplně byl použit typ honeycomb.



Obr. 3.5 Typy tvaru výplně a)honeycomb, b)line c)rectilinear d)concentric.

3.7 Viditelné stěny tělesa

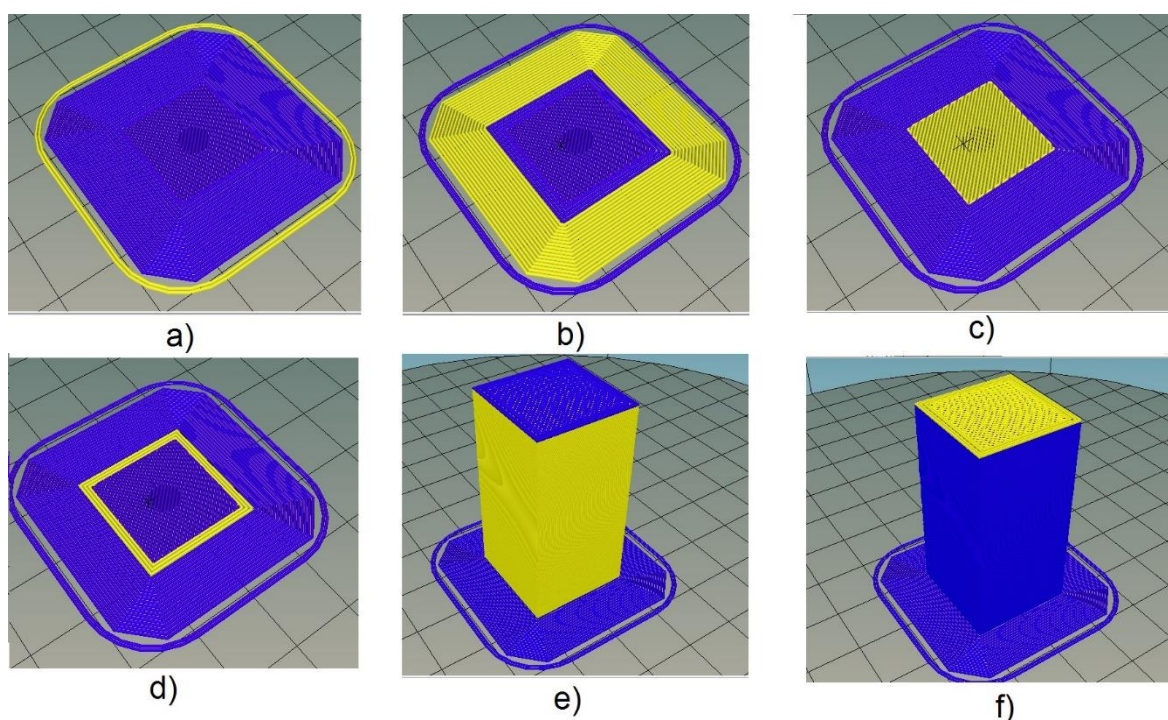
Viditelné stěny tělesa se skládají ze tří základních typů, spodní stěny, bočních stěn a vrchní stěny.

Spodní stěna neboli základna ležící na tisknuté ploše stolku, je jedna z nejdůležitějších stěn na modelu, protože drží po zbytek celého tisku model na stolku. Spodní stěna bývá jedna z nejkvalitnější vyrobených ploch, protože jednotlivá položená vlákna se po stole dobře rozlejí. Rozlité vlákna má špatný vliv na okraj spodní vrstvy, kde se vytváří hrana. Tato hrana je nežádoucí a musí se odstranit dalším opracováním. Zamezení vytvoření hrany se dá docílit různými způsoby, například zkosit spodní hrany modelu po celém obvodu nebo pečlivým doladěním teplot a výšky první vrstvy v ose Z. Před první vrstvou se také ve stejné výšce osy Z tiskne lem. Tento lem má za úkol vyčistit trysku a připravit ji pro následný tisk, jeho tvar bývá o několik milimetrů posunutý od obvodu první vrstvy. Obvykle stačí tento lem vytvořit pouze jednou smyčkou kolem základny, u malých výtisků je vhodné tuto smyčku provést vícekrát.

Další stěnou na výrobku je stěna boční. Tako stěna se skládá z vytisknutých vrstev, na nichž je vidět postupné skládání vrstev při tisku. Nejčastěji se tato stěna vytváří ze tří drah, přičemž ta nejvíce ven z výrobu se tiskne pomalejší rychlostí než zbylé dvě. U tenkostěnných výrobků se používá nižší počet drah pro vytvoření stěny.

Vrchní stěna neboli strop je stěna s nejmenší kvalitou, je to tím, že vlákno, které vylézá z trysky, se může opřít pouze o stěny a výplň ve výtisku. Tam kde není opora, je vlákno kladeno „do vzduchu“. Její kvalita je tudíž závislá na hustotě výplně. Aby se tomuto efektu zamezilo, pro zlepšení povrchu se pokládá několik vrchních vrstev na sebe

Pro tisk vzorku byla použita jedna smyčka kolem modelu pro vyčištění trysky, 3 vrstvy spodní stěny, 3 řady vláken pro boční stěny a 3 vrstvy pro uzavírací vrchní stěnu. Samotné stěny tělesa a lem jsou na obrázku 3.6.



Obr. 3.6 a)lem pro vyčištění trysky, b)krajnice pro lepší udržení součásti na stole, c)dráha pro tisk základny d)počátek stavby bočních stěn, e)stavba bočních stěn f) dráha vrchní stěny.

3.8 Podpory, mosty, krajnice

Podpory

Podpory se u výtisků vyrobených FDM technologií musí stavět tam, kde se nacházejí převislé hrany nebo šikmé stěny. U těchto prvků by bez použití podpor mohlo docházet k bortění a deformaci, což by pro výsledný model nebylo příznivé. Převisům a velmi šikmým stěnám se snažíme vyvarovat už při vlastním návrhu 3D modelu. Další možností jak zamezit stavbě podpor je vhodné zvolení základny.

Podpůrný materiál může mít dvě podoby, jedna z nich je, že se podpory staví ze stejného materiálu jako je samotný výrobek. U tohoto typu podpor je výhodou to, že tiskárna nemusí mít druhý extruder pro tisk podpůrného materiálu. Nevýhodou je následné odlamování, které se většinou provádí ručně a může se při něm poškodit výrobek samotný. Druhá možnost je použití podpůrného materiálu, který je k tomu speciálně určen. Má odlišné vlastnosti oproti stavěcímu materiálu a také se dá snáze odstranit. Některé podpůrné materiály jsou rozpustné ve vodě nebo v látkách k rozpouštění určených, jiné využívají své křehkosti materiálu a dají se jednoduše odlomit.

Mosty

Stavba mostů u FDM technologie se využívá tam, kde by se materiál tiskl tzv. „do vzduchu“, což je technicky nemožné. Most vzniká mezi dvěma pevnými stranami, mezi které se má natáhnout tištěné vlákno. Toto vlákno se kvůli své teplotě a váze mezi pevnými oporami prohne, proto je vhodné mosty tisknout pouze na malé vzdálenosti. Na větší vzdálenosti se musí využít podpory, které tyto mosty podeprou.

Mosty lze vytvářet dvěma způsoby, jedna metoda uvádí rychlý přejezd mostu se slabým vláknem, které rychle chladne a tím se tolik neprověsí, druhá technika je založena na pomalejší rychlosti a navýšení průtoku materiálu tryskou, díky tomu by měl být most tužší a méně se prohnut. Vhodné vytvoření mostu zaleží na použitém materiálu, teplotě tisku a zkušenostech obsluhy[27].

Krajnice

Krajnice je pruh materiálu, který se nanáší v první vrstvě tisku a je připojený k obvodu první vrstvy základny. Tato krajnice se obvykle definuje za pomoci počtu objektů kolem obvodu výrobku. Díky použití krajnice se u velkých výrobků dá zamezit jejich odtržení od stolku, na který se výrobek tiskne. U velkých výtisků nebo u materiálů, které trpí na velkou deformaci při chladnutí, je vhodné tento okraj neboli brim použít. Krajnici je po dokončení tisku nutno mechanicky odstranit. Krajnice je vyobrazena na obrázku 3.6b).

3.9 Formát .STL

STL je zkratka formátu souboru pocházející ze slova STereoLithography, který vytvořila firma 3D Systems. Tento formát dat je hlavně využíván pro 3D tisk[28,29].

STL formát popisuje pouze těleso za pomoci trojúhelníků, které znázorňují povrch součástí. Tyto trojúhelníky mají zapsané souřadnice vrcholů v kartézském souřadném systému a pro orientaci plochy je zde přidán i normálový vektor plochy. Dnes už každý 3D program pro modelování umí export dat do formátu STL, ale odebírá modelu určité vlastnosti, například barvu, hmotnost a jiné[28,29].

Abychom měli správně připravený model pro tisk, nesmí být v jeho trojúhelníkové žádné chyby. Nejčastějšími chybami jsou otočené normálové vektory trojúhelníků nebo chybějící trojúhelníky v síti. Tyto chyby si většinou dokáže příslušný program pro tisk opravit sám[28,29].

Existují dvě základní reprezentace STL formátu, a to Binární a ASCII. ASCII soubor je většinou větší než Binární z toho důvodu, že obsahuje lépe čitelný kód o rozmístění trojúhelníků[28,29].

3.10 Generování G-kódu

Programy pro generování G-kódu pro tiskárnu jsou veřejně ke stažení na internetu. Pracují na principu převodu souboru z STL na G-kód, který je určený přímo pro tiskárnu.

3.10.1 CuraEngine

CuraEngine je Open Source program, o který se stará společnost Ultimaker. Je to nástroj, který nám rozřeže model po vrstvách a vytvoří dráhy pro tisk. Má vlastní princip vytváření drah trysky, ze kterých následně s požadovanými parametry tisku vytvoří G-kód pro tiskárnu[30,31].

Tento software se hodí spíše pro tiskárny, které využívají podávání struny bowdenem a tiskárny typu Delta[30].

3.10.2 Slic3r

Slic3r pracuje na podobném principu jako CuraEngine, rovněž rozřezává model pro vrstvách a generuje dráhy nástroje. Tento software byl vyvinut v roce 2011 úplně od základu, nekopíruje žádný předcházející program a je stále vyvíjen. Jeho hlavní výhodou je přehlednost programu a přednastavené důležité parametry pro tisk, takže je pro začínající uživatele s 3D tiskem výhodou[32].

Oba tyto generátory G-kódů obsahuje softwarový balíček pro připojení a ovládání tiskárny Repetier-Host. Tiskárna díky slotu na SD kartu nemusí být s tímto programem spojena a stačí pouze vygenerovaný G-kód na SD kartě vložit do tiskárny.

4 REALIZACE EXPERIMENTU

Experiment se bude prováděn na vytištěných kvádrech za daných teplot a rychlostí. Na těchto kvádrech se bude měřit drsnost a vlnitost povrchu a dále pak rozměrová přesnost. Další část experimentu bude posouzení vzhledu a rozměru samostatně vytlačeného vlákna tryskou.

4.1 Drsnost a vlnitost povrchu

Jelikož povrch vytištěných součástí není dokonale hladký, byla provedena měření drsnosti a vlnitosti.

Drsnost a vlnitost povrchu byla měřena na poslední tisknuté straně od počátku tisknutí vrstvy. Měření bylo provedeno podle normy ČSN EN ISO 4288 (Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda a postupy pro posuzování struktury povrchu), která uvádí pravidla pro stanovení parametrů struktury povrchu.

Podle normy ČSN EN ISO 4287, která udává definice a parametry pro určování struktury povrchu, jsou stanoveny výrazy nezbytné pro měření drsnosti a vlnitosti povrchu.

4.1.1 Názvy geometrických parametrů

Názvy geometrických parametrů[36]:

P-parametr - je to parametr vypočítaný za pomoci základního profilu,

R-parametr - je parametr, který se vypočítá z profilu drsnosti,

W-parametr - je parametr, který se vypočítá z profilu vlnitosti.

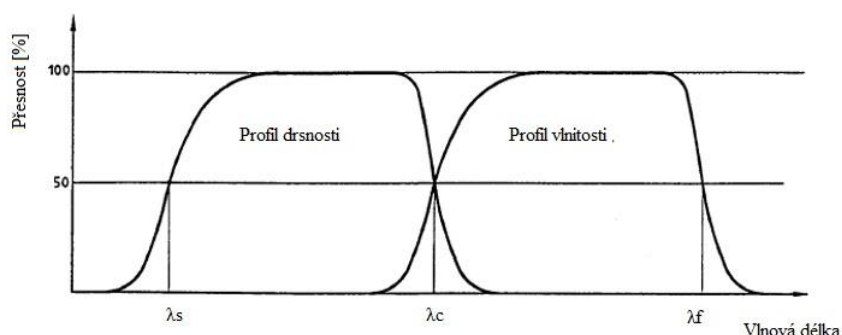
4.1.2 Filtry profilu

Filtry se rozdělují na dlouhovlnné a krátkovlnné složky profilu (obr 4.1)[36].

λ_s filtr profilu – tento filtr definuje rozhraní mezi drsností a kratšími složkami vln, které jsou přítomny na povrchu.

λ_c filtr profilu – tento filtr definuje rozhraní mezi drsností a vlnitostí.

λ_f filtr profilu – tento filtr definuje rozhraní mezi vlnitostí a dalšími složkami vln, které jsou přítomny na povrchu.



Obr. 4.1 Přenosová charakteristika profilu drsnosti a vlnitost[36].

4.1.3 Základní rozdělení profilů

Při měření drsnosti a vlnitosti jsou důležité definice profilů[36]:

Skutečný profil – je to povrch, který omezuje těleso a odděluje ho od okolního prostředí.

Profil povrchu – je to profil, který vznikne jako průsečnice dané roviny a skutečného profilu. Tato rovina se většinou volí kolmo na rovinu rovnoběžnou se skutečným povrchem.

Profil drsnosti – tento profil vznikne s použitím filtru profilu λ_c , k potlačení dlouhovlnných složek, ze základního profilu. Z tohoto profilu se hodnotí parametry drsnosti povrchu.

Profil vlnitosti – tento profil je odvozený postupným aplikováním filtru profilu λ_f a filtru profilu λ_c na základním profilu. Tyto filtry profilů potlačují dlouhovlnné a krátkovlnné složky profilu.

4.1.4 Základní délky

Základní délka pro měření je specifikována ve výrobní dokumentaci pokud tomu tak není, musí se základní délka zvolit dle postupu, který určuje norma.

Základní délka l_p , l_r , l_w – je to délka ve směru osy X, která se používá pro rozpoznání nerovností, které charakterizují základní profil[36].

Vyhodnocovaná délka l_n – je délka ve směru osy X, která se používá pro posuzování vyhodnoceného profilu[36].

Pro vyhodnocení vlnitosti není implicitně udávaná vyhodnocovací délka.

Pro vyhodnocení parametru drsnosti je dán přesný postup pro získání vyhodnocované délky drsnosti l_n . Tento postup udává norma ČSN EN ISO 4288. Pro měření na vytištěných součástech byl použit postup pro periodický profil drsnosti.

Pro povrchy s periodickým profilem drsnosti se použije tento postup[37]:

„a) Na povrchu s neznámou drsností se graficky odhadne parametr R_{Sm} .

b) Pro odhadnutý parametr R_{Sm} použitím tabulky 4.1 se určí doporučená hodnota mezní vlnové délky cut-off.

c) Je-li to nezbytné, tj. ve sporném případě, se změří hodnota R_{Sm} za použití hodnoty mezní vlnové délky cut-off, určeno podle b).

d) Jestliže hodnota R_{Sm} z kroku c) odpovídá podle tabulky 4.1 menší nebo větší hodnotě mezní vlnové délky cut-off, než v kroku b), použije se menší nebo větší hodnota mezní vlnové délky cut-off.

e) Získá se reprezentativní měření žádaných parametrů při použití hodnoty mezní vlnové délky (základní délky) odhadnuté v předchozích krocích.“

R_{Sm} (průměrná šířka prvků profilu) je to aritmetický průměr šířek jednotlivých prvků v profilu rozsahu základní délky[36].

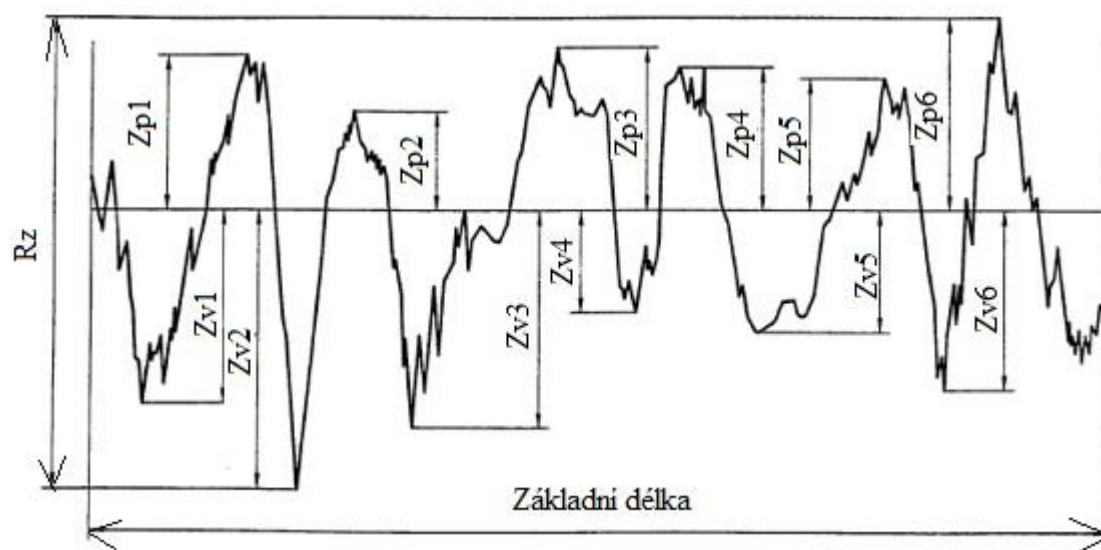
Tab. 4.1 Základní délky drsnosti pro měření R-parametrů periodických profilů[37].

RSm [mm]	Základní délka drsnosti l_r [mm]	Vyhodnocovaná délka drsnosti l_n [mm]
$0,013 < RSm \leq 0,04$	0,08	0,4
$0,04 < RSm \leq 0,13$	0,25	1,25
$0,13 < RSm \leq 0,4$	0,8	4
$0,4 < RSm \leq 1,3$	2,5	12,5
$1,3 < RSm \leq 4$	8	40

4.1.5 Definice parametrů profilu povrchu

U vytištěných dílů byly měřeny pouze parametry největší výška profilu a průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu.

Největší výška profilu (P_z , R_z , W_z) je součet nejnižšího místa prohlubně Z_v a nejvyššího výstupku Z_p v měřené součásti v rozsahu základního profilu, viz obrázek 4.2[36]



Obr. 4.2 Největší výška profilu drsnosti[36].

Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu (P_a , R_a , W_a) je to aritmetický průměr všech absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky. To je znázorněno na obrázku 4.3[36].

Je to jedno z nejpoužívanějších parametrů pro měření drsnosti povrchu v České republice.

Tato hodnota je dána vztahem pro drsnost:

$$Ra = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx \quad (1)$$

Kde: l_r = základní délka drsnosti [mm]

$Z(x)$ = hodnot pořadnice [μm]

Obdobně pro vlnitost:

$$Wa = \frac{1}{l_w} \int_0^{l_w} |Z(x)| dx \quad (2)$$

Kde: l_w = základní délka vlnitosti [mm]

$Z(x)$ = hodnot pořadnice [μm]



Obr. 4.3 Grafické znázornění parametru Ra [38].

4.1.6 Měření drsnosti a vlnitosti s přístrojem Alicona

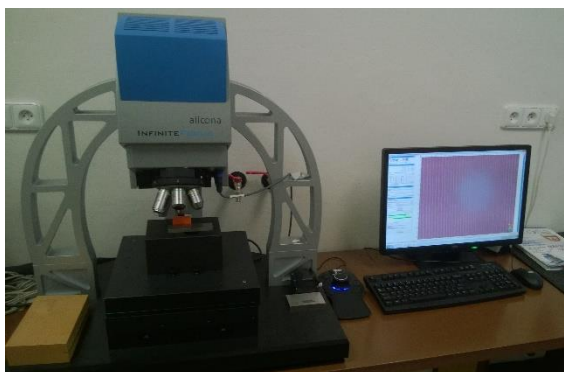
Drsnost a vlnitosti povrchu byla měřena bezkontaktní optickou metodou na zařízení Alicona IFM G4 (obrázek 4.4a). Toto zařízení pracuje na principu zaostřování povrchu v jednotlivých hladinách a tím skládá detailní snímek měřeného povrchu.

Pro materiály PLA a TPU byly měřeny parametry drsnosti a vlnitosti povrchu (Ra , Rz , Wa , Wz) a pro ABS byly vyhodnocovány pouze parametry vlnitosti povrchu (Wa , Wz) z důvodu příliš vlnitého povrchu součástí. Na snímání všech součástí byl vybrán objektiv o zvětšení 2,5x.

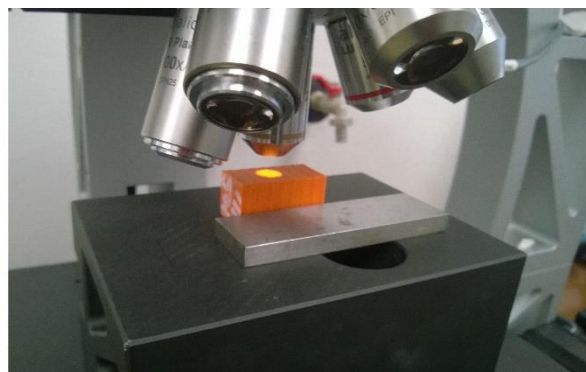
Pracovní postup při měření:

- vhodné uložení vzorku na podložku (obrázek 4.4b),
- výběr příslušného objektivu podle doporučení výrobce,
- nastavení vhodného osvětlení (polarizované světlo),
- přizpůsobení expozice a kontrastu za pomoci software,
- výběr měřeného pole,

- zadání horní a dolní hranice snímaného povrchu,
- spuštění samotného měření,
- kontrola nasnímaného povrchu,
- určení souřadného systému na naměřeném povrchu,
- volba parametrů, které mají být zobrazeny a jejich uložení do protokolu o měření.



a)



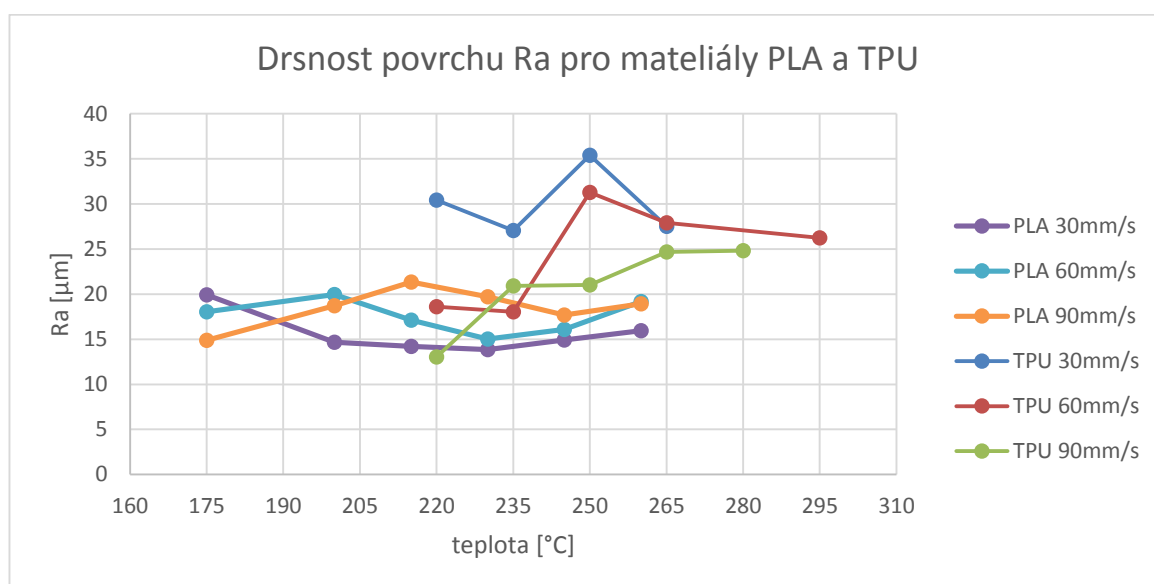
b)

Obr. 4.4 a) Průběh měření na zařízení Alicona IFM G4, b) vzorek umístěný pod objektivem.

Drsnost povrchu R_a pro materiál PLA se s rostoucí teplotou téměř nemění a je v rozmezí maximálně $7 \mu\text{m}$, a to pro největší rychlost tisku 90 mm/s . Při nižší teplotě ($175 \text{ }^\circ\text{C}$) byl materiál vytlačován přes trysku s velkými problémy. Stačilo totiž, aby se v místnosti, kde byla tiskárna umístěna, začal pohybovat vzduch, který o trochu snížil teplotu trysky a tisk byl zastaven, kvůli teplotě materiálu, který už nebylo schopné přes trysku protlačit.

Pro materiál TPU a jeho referenční teplotu $250 \text{ }^\circ\text{C}$ byla drsnost povrchu R_a nejhorší pro pomalou a normální rychlost tisku. Pro rychlost tisku 90 mm/s R_a mírně roste s každou přidanou teplotou. Obecně pro tento materiál platí, že se stoupající teplotou roste také drsnost povrchu R_a .

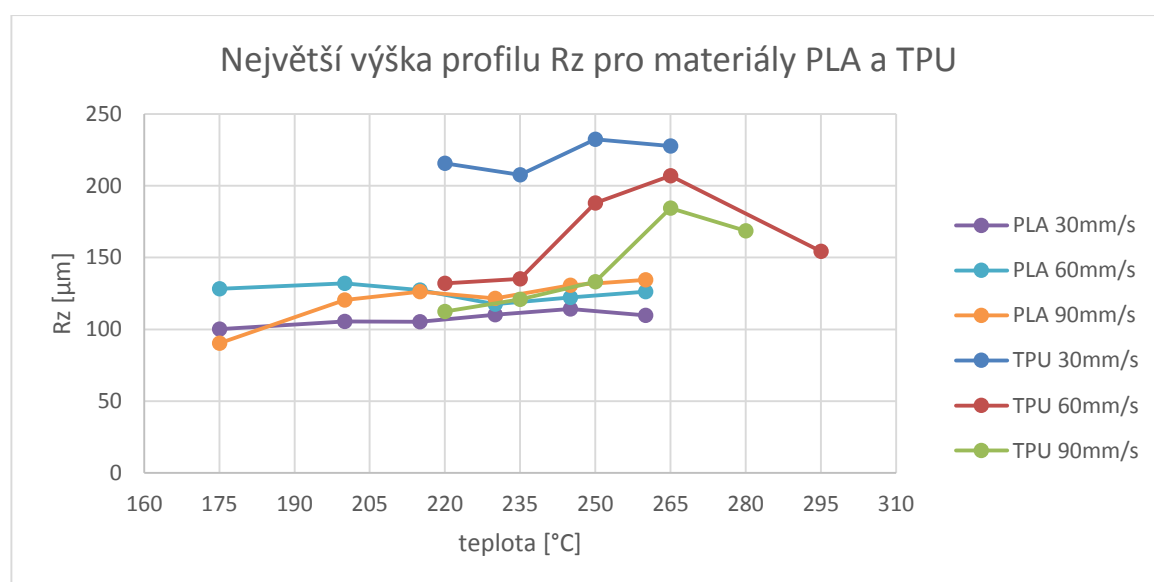
Drsnost povrchu pro materiály PLA a TPU je na obrázku 4.5.



Obr. 4.5 Drsnost povrchu pro materiály PLA a TPU

Největší výška profilu (obrázek 4.6) se u materiálu PLA, podobně jako u parametru Ra, téměř s rostoucí teplotou nemění. Hodnota parametru Rz je pouze posunuta do vyšších hodnot oproti parametru Ra. Tudiž jsou hodnoty nejvyšší výšky profilu v závislosti na rostoucí teplotě téměř konstantní.

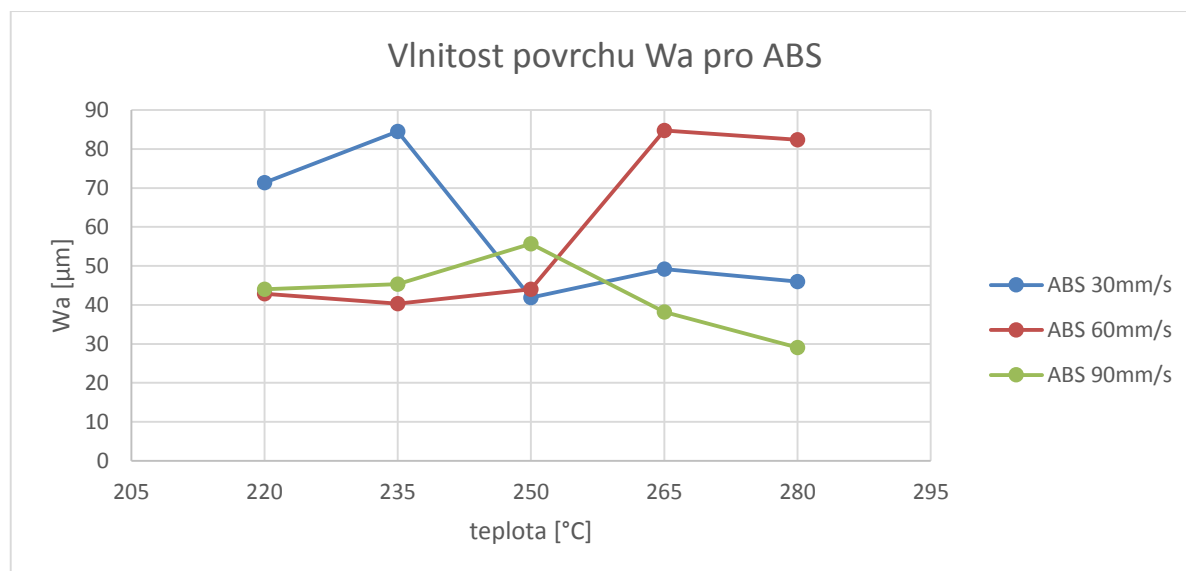
U materiálu TPU je největší výška profilu Rz pro nejnižší rychlost 30 mm/s nejvyšší z naměřených, a je téměř konstantní oproti normální a nízké rychlosti tisku. Pro rychlost tisku 60 mm/s parametr Rz od teploty 235 °C narůstá až do teploty 265 °C a poté klesá k hodnotám při tisku na nízké teploty.



Obr. 4.6 Největší výška profilu Rz pro materiály PLA a TPU.

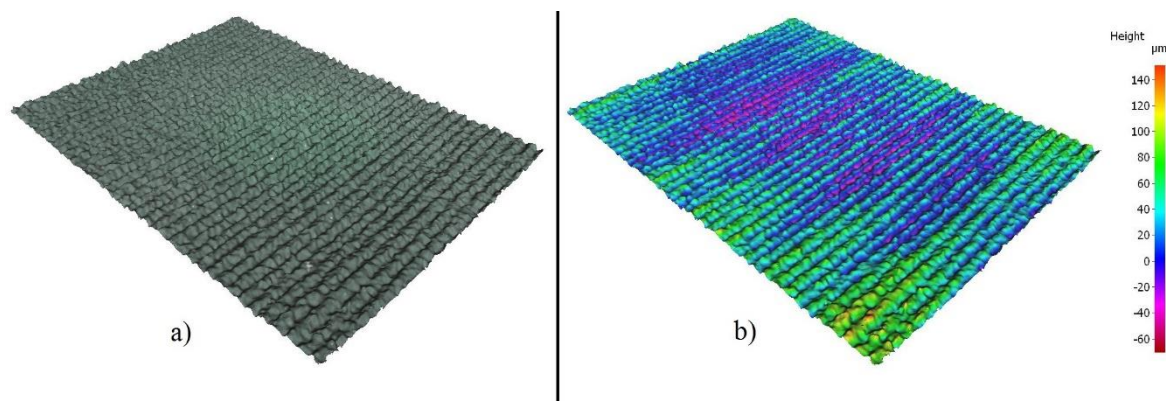
Pro materiál ABS byla vyhodnocena pouze vlnitost povrchu z důvodu její nadměrné velikosti oproti drsnosti povrchu. U nejvyšší rychlosti tisku se vlnitost povrchu nějak zásadně se stoupající teplotou neměnila. Pro rychlost tisku 30 mm/s začíná vlnitost při nízkých teplotách na hodnotách okolo 80 μm a poté mezi teplotami 235-250 $^{\circ}\text{C}$ rapidně klesá. Naopak je to s normální rychlost tisku, kde se vlnitost povrchu od teploty 250 $^{\circ}\text{C}$ zvyšuje až na dvojnásobnou hodnotu. Na obrázku 4.7 je vyobrazen graf s průměrnou aritmetickou úchylkou posuzovaného profilu W_a pro materiál ABS.

Největší výška profilu W_z má podobný trend jako parametr vlnitosti povrchu W_a s tím rozdílem, že parametr W_z je řádově posunut o vyšších hodnot.



Obr. 4.7 Vlnitost povrchu W_a pro materiál ABS.

U materiálu TPU se některé vzorky snímaly velice obtížně, některé nešlo nasnímat vůbec, a to z důvodu jejich lesklého povrchu. Jednalo se především o vzorky tištěné při teplotách 280 $^{\circ}\text{C}$ a 295 $^{\circ}\text{C}$. Pro vzorky tisknuté rychlostí 90 mm/s z PLA bylo při snímání použito polarizované světlo pro lepší nasnímání povrchu. Nasnímaný povrch vzorku z PLA materiálu tisknutý při teplotě 200 $^{\circ}\text{C}$ a rychlosti 90 mm/s je na obrázku 4.8. Tabulky s naměřenými hodnotami jsou v příloze 3.



Obr. 4.8 a) Nasnímaný povrch vzorku přístrojem Alicona IFM G4, b) topograficky upravený povrch softwarem.

4.1.7 Měření drsnosti a vlnitosti s přístrojem Form Talysurf Intra 50

Měření drsnosti a vlnitosti povrchu byla provedena podobně jako v předchozím případě. Pro materiál PLA a TPU byla měřena drsnost povrchu a pro materiál ABS pouze vlnitost povrchu.

Měření probíhalo na přístroji Form Talysurf Intra 50 (obrázek 4.9). Na rozdíl od předchozího optického měření, tento drsnoměr měří dotykovým způsobem. Pro měření byl použit hrot s vrcholovým úhlem 60° a poloměrem špičky hrotu $5\text{ }\mu\text{m}$.

Tento přístroj disponuje měrnou délkou až 50mm a úchylkou přímosti na této délce $0,40\text{ }\mu\text{m}$.

Pracovní postup při měření dotykovým drsnoměrem:

- uchycení vzorku do svěráku,
- vysunutí měřícího ramene o dostatečnou vzdálenost,
- umístění vzorku pod měřící hrot,
- nastavení správné přitlačné síly hrotu na vzorek,
- vhodné nastavení toho, co bude předmětem měření (drsnost nebo vlnitost povrchu),
- spuštění samotného měření,
- uložení měření do protokolu,
- vertikální vyjetí hrotu od vzorku,
- odebrání vzorku ze svěráku.

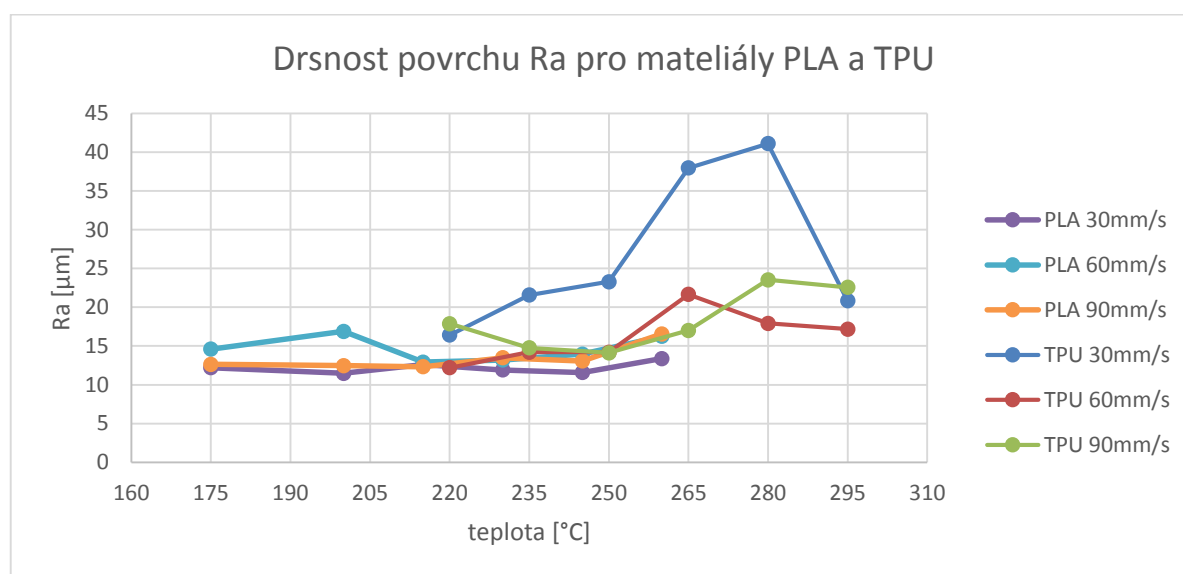


Obr. 4.9 Průběh měření na přístroji Form Talysurf Intra 50.

Drsnost povrchu R_a pro materiál PLA měřená dotykovým drsnoměrem se podstatě nemění pro všechny testované rychlosti tisku. Největší dosahovaný rozdíl v naměřených hodnotách je asi $4\mu\text{m}$. Nejnižší naměřenou hodnotu drsnosti povrchu R_a má PLA při nejnižší rychlosti tisku 30 mm/s což se už prokázalo u měření optickou metodou.

Pro materiál TPU je viditelné, že při vyšších teplotách na nízké rychlosti tisku se drsnost povrchu R_a rapidně zvyšuje a s maximální tisknutelnou teplotou ($295\text{ }^\circ\text{C}$) náhle klesá. Pro normální a velkou rychlost tisku jsou hodnoty drsnosti povrchu oproti měření optickou metodou nižší. To může být způsobeno tím, že hrot dotykového drsnoměru nekopíroval přesný povrch součásti, a tím se nedostal i do nejnižších bodů na měřeném profilu. Tento problém nastává kvůli tvaru měřícího hrotu.

Na obrázku 4.10 je vyobrazena závislost drsnosti povrchu R_a na teplotě pro různé rychlosti tisku a materiály PLA a TPU měřená dotykovou metodou.

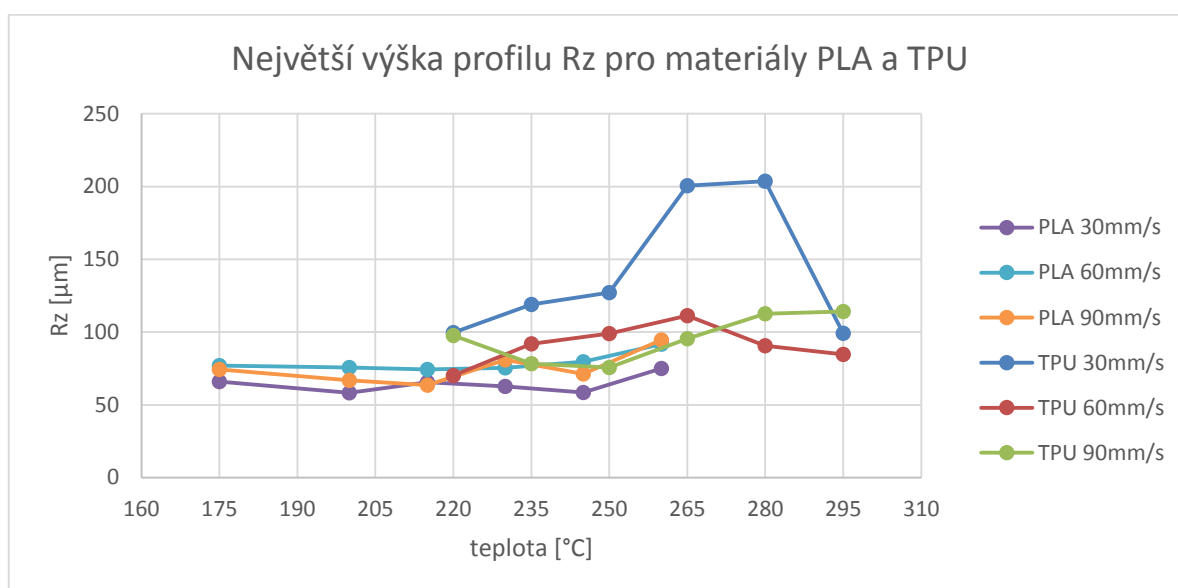


Obr. 4.10 Drsnost povrchu pro materiály PLA a TPU měřená dotykovou metodou.

Největší výška profilu R_z pro materiál PLA dosahuje nejnižších hodnot pro nejmenší rychlost tisku, podobně jako u parametru drsnosti povrchu R_a . S rostoucí teplotou a rychlostí tisku se zvyšuje i největší výška profilu, i když ne moc výrazně.

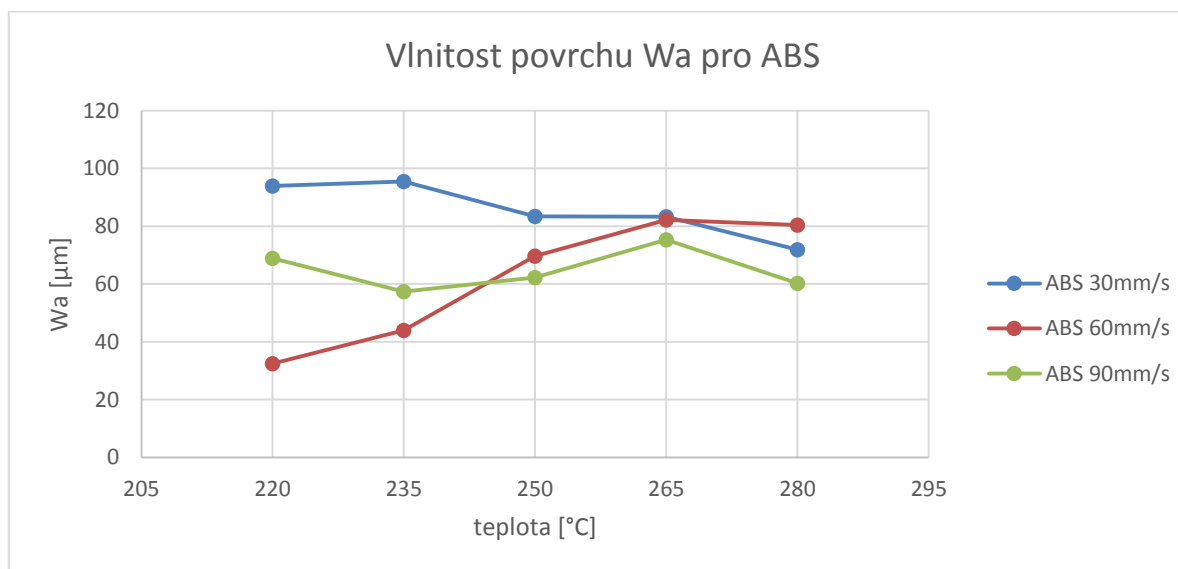
Pro materiál TPU se parametr R_z dostává do maximálních hodnot při teplotách tisku $265\text{ }^\circ\text{C}$ až $280\text{ }^\circ\text{C}$, poté klesá na svojí běžnou hodnotu. Největší výška profilu pro normální a velkou rychlost kopíruje drsnost povrchu s tím rozdílem, že je posunuta do větších hodnot. Tento trend je patrný pro všechny hodnoty.

Největší výška profilu R_z naměřená dotykovou metodou pro materiály PLA a TPU je vyobrazena na obrázku 4.11.



Obr. 4.11 Největší výška profilu Rz pro materiály PLA a TPU měřená dotykovou metodou.

Vlnitost povrchu W_a pro materiál ABS (obrázek 4.12) je pro rychlost tisku 60 mm/s rostoucí se zvyšující se teplotou tisku a dosahuje maximální hodnoty okolo 80 μm . Pro nejvyšší testovanou rychlost je vlnitost povrchu W_a téměř konstantní v rozmezí asi 18 μm . U nejnižší použité rychlosti má vlnitost povrchu v závislosti na teplotě klesající tendenci, což je patrné i při samotném pohledu na vzorky.

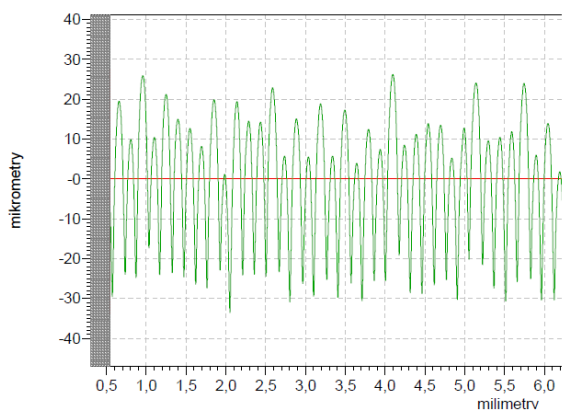


Obr. 4.12 Vlnitost povrchu W_a pro materiál ABS naměřená dotykovou metodou.

Dotykový drsnoměr byl použit poté, co se kvůli lesklému povrchu materiálu TPU s vysokou teplotou tisku nedal povrch vzorků nasmínat optickou metodou. Pro materiál TPU zde byly naměřeny všechny hodnoty drsnosti povrchu.

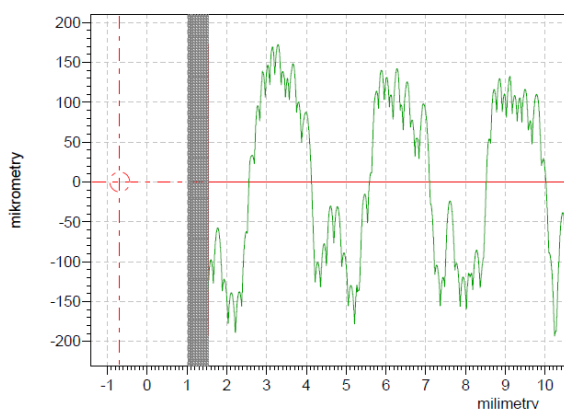
Na obrázku 4.13 jsou znázorněny naměřené profily drsnosti a vlnitosti povrchů pro zkušební vzorky. Tabulky s naměřenými hodnotami jsou v příloze 4.

Změněný profil



a)

Změněný profil



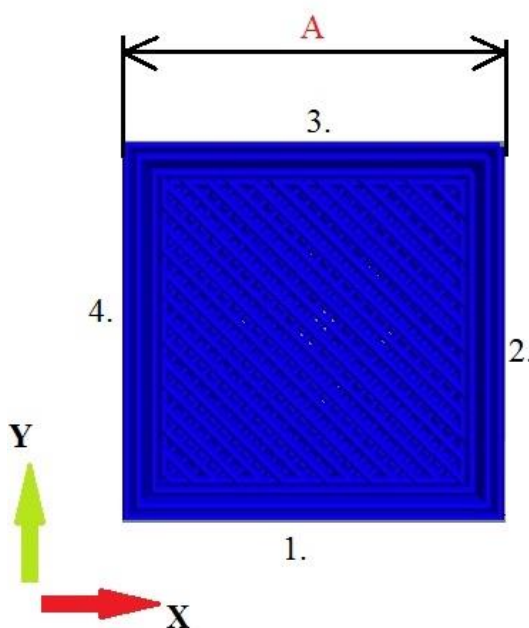
b)

Obr. 4.13 a) Změněný profil drsnosti povrchu R_a pro vzorek z PLA při 245 °C, b) Naměřený profil vlnitosti W_a povrchu pro vzorek z ABS při 235 °C.

4.2 Rozměrová přesnost

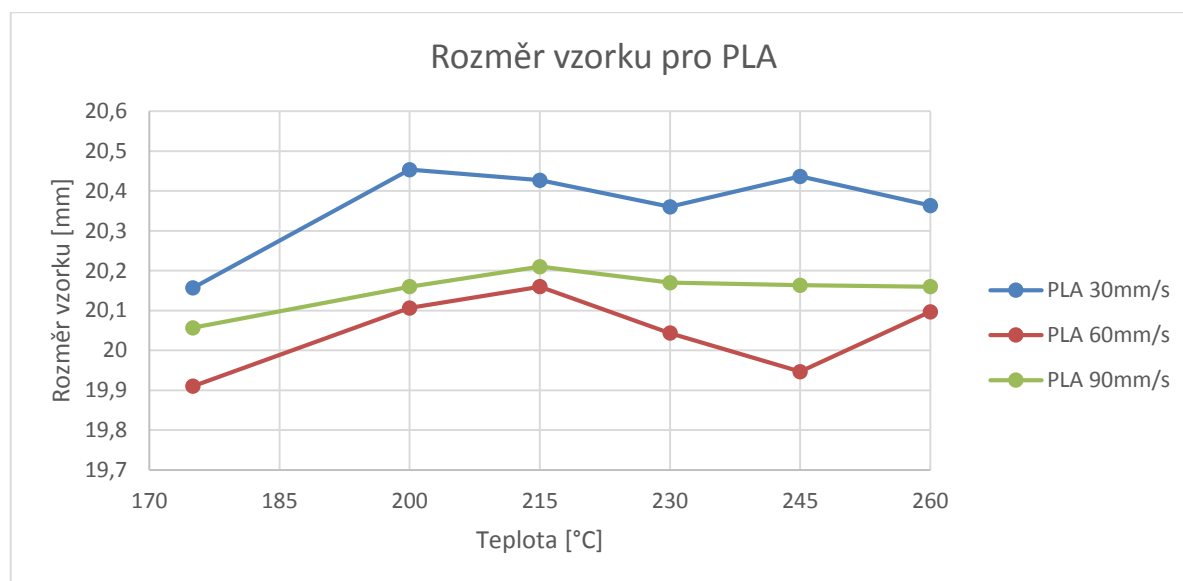
Rozměrová přesnost byla měřena digitálním posuvným měřítkem na dvě desetinná místa. Rozměr byl měřen na vyteklém vzorku v ose X tiskárny (osa extruderu). Tyto stěny se tiskly jako druhá a čtvrtá v pořadí, tím pádem je na poslední stěně tisk ukončen a posunut o vrstvu výše.

Jmenovitá vzdálenost těchto stěn je 20 mm. Měřená vzdálenost stěn je označena kótou A na obrázku 4.14. Tabulky s naměřenými hodnotami jsou v příloze 5.



Obr. 4.14 Zakótovaná vzdálenost A a pořadí tisknutí stěn.

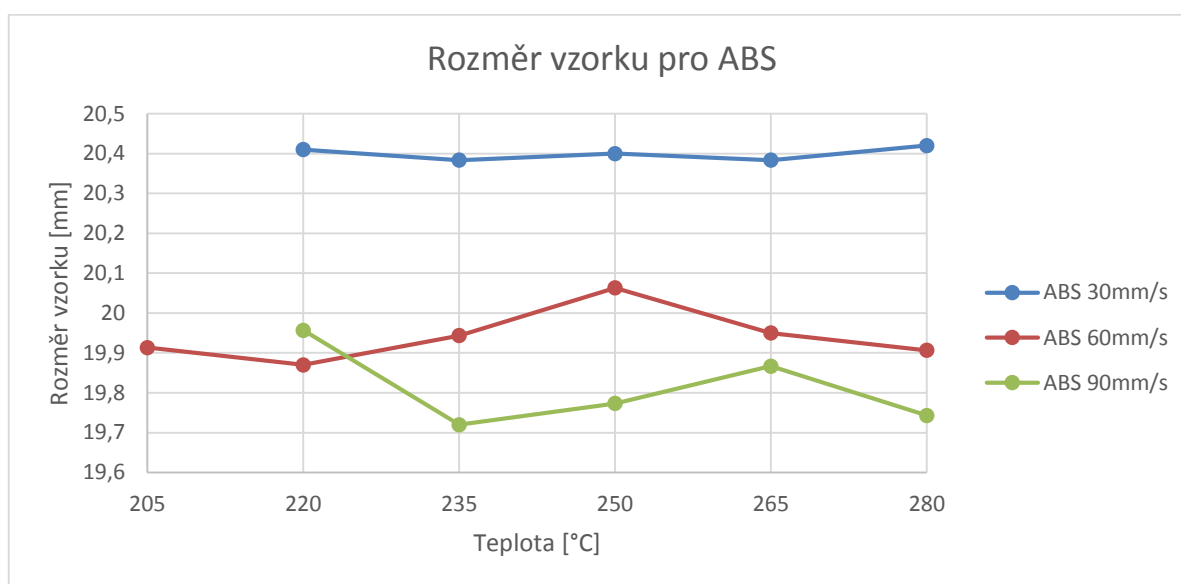
Rozměrová přesnost pro PLA materiál v ose X je nejlepší pro normální rychlost tisku 60 mm/s. Nejblíže se při této rychlosti tisku k jmenovité hodnotě rozměru přiblížil vzorek, který byl vyroben při teplotě 230 °C. Z obrázku 4.15 je patrné, že se zvětšující se rychlostí tisku je výrobek méně přesný. Totéž platí i pro nižší rychlost tisku s tím, že rozměrová nepřesnost je ve vyšších hodnotách. Pro všechny rychlosti u PLA materiálu obecně platí, že se zvyšující se teplotou tisku rozměrová přesnost razantně nemění. Pouze pro teplotu 175 °C má rozměrová přesnost jiný trend, a to z důvodu obtížného vytlačování materiálu tryskou při takto nízké teplotě.



Obr. 4.15 Rozměrová přesnost v ose X pro materiál PLA.

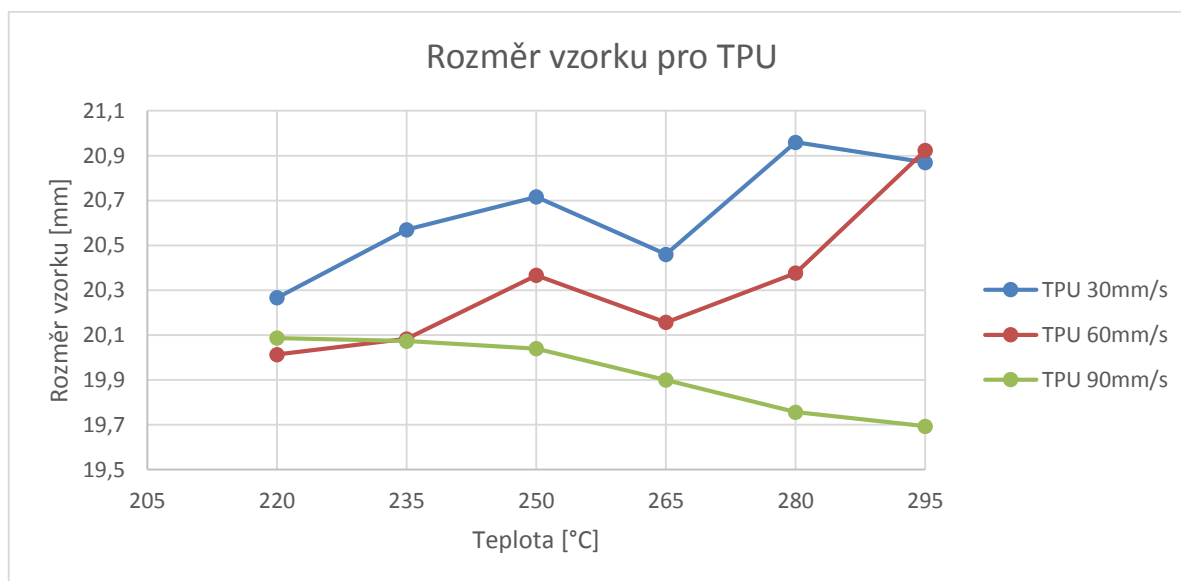
Pro materiál ABS byl měřen i vzorek, který se tiskl za teploty 205 °C při rychlosti 60 mm/s. Z důvodu malé teploty potřebné pro tisk je ale tento vzorek svojí kvalitou nepoužitelný. Zde je tendence rozměrové přesnosti v ose X podobná jako v případě tisku z PLA materiálu. Nejpřesnější výtisky jsou za normální rychlosti tisku (60 mm/s). Jediný rozdíl nastává u největší testované rychlosti tisku (90 mm/s), kdy vzorky mají menší rozměr, než je rozměr jmenovitý.

Na obrázku 4.16 je znázorněna rozměrová přesnost vzorků v ose X v závislosti na teplotě pro testované rychlosti.



Obr. 4.16 Rozměrová přesnost v ose X pro materiál ABS.

Pro TPU materiál a rozměrovou přesnost vzorků neplatí, jako u předchozích materiálů, konstantní rozměrová přesnost se zvyšující se teplotou tisku. Pro nejnižší rychlost tisku je rozdíl ve vzdálenosti stěn až 0,7 mm, kdy nejpřesnější vzorek je vytisknut při teplotě 220 °C a nejméně přesný při teplotě 280 °C. Ten samý trend je viditelný z obrázku 4.17 pro normální rychlost tisku (60 mm/s) s tím rozdílem, že největší rozdíl ve vzdálenosti stěn je okolo 1 mm. Nejméně přesný vyrobený vzorek je při teplotě 295 °C s průměrnou hodnotou vzdálenosti stěn 20,92 mm. Pro nejvyšší rychlost tisku jde úchylna od jmenovité hodnoty rozměru do záporných hodnot s tím, že nejpřesněji vyrobený vzorek je při referenční teplotě 250 °C.



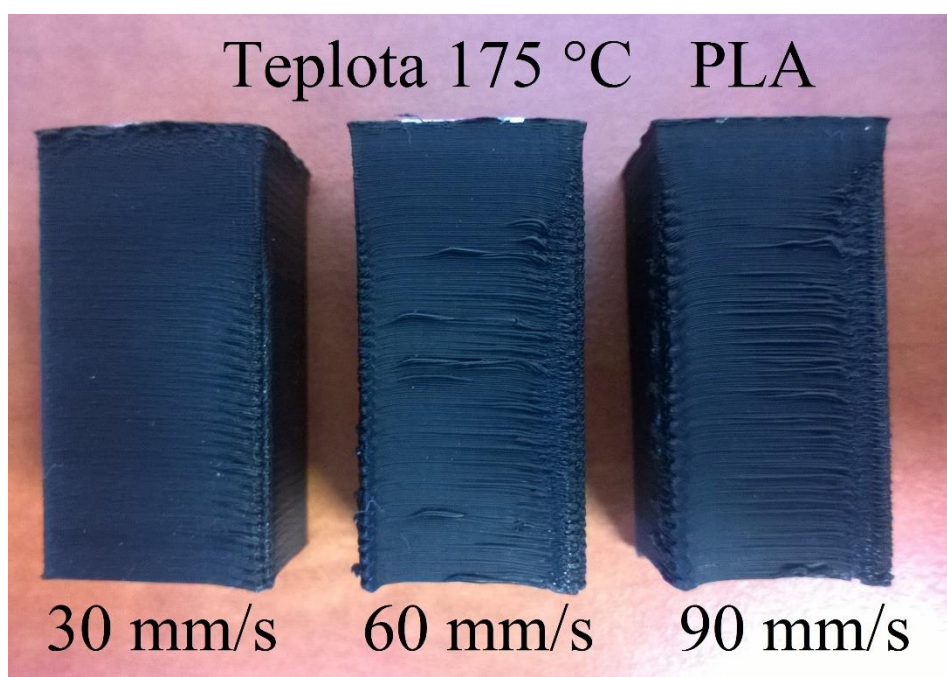
Obr. 4.17 Rozměrová přesnost v ose X pro materiál ABS.

4.3 Vzhled součástí

V tomto bodě je posuzován vizuální vzhled stěn vytištěných vzorků. Hlavní pozornost bude věnována na spojení vrstev, tvorbu rohů, celistvost stěny a vzorku.

U materiálu PLA a teploty 175 °C bylo velmi náročné tyto vzorky vytisknout, a to z důvodu malého tečení materiálu při této teplotě, kdy plast není dostatečně rozežhát. Pro znehodnocení tisku stačil pouze malý pokles teploty trysky.

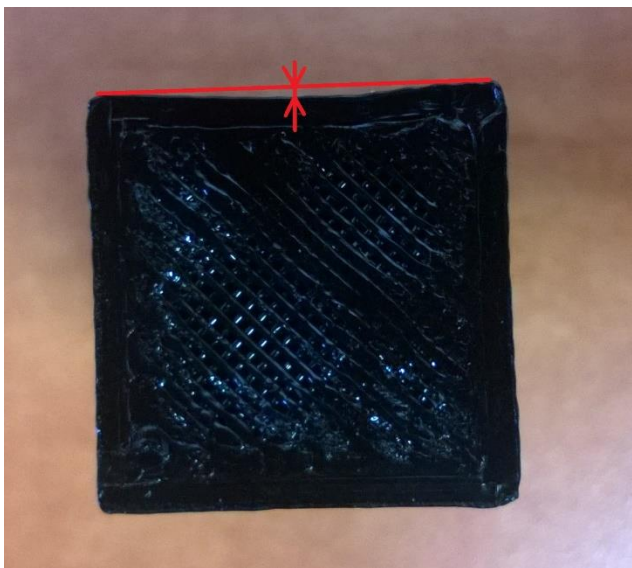
Na obrázku 4.18 jsou viditelné vady na všech třech vzorcích s tím, že nemají dostatečně spojené vrstvy, které vystupují ven ze vzorku. Počáteční a koncové rohy při tisku vrstvy vystupují ven ze vzorku, dále jsou vzorky matné pro nedostatečnou teplotu tisku. Příklad s vystouplými rohy nastal i u vzorků pro všechny rychlosti tisku při teplotě 215°C. Na teploty vyšší bylo použito externí chlazení tisknutého vzorku stolním ventilátorem, čímž se zamezilo tisknutí další vrstvy na vrstvu předchozí, neochlazenou.



Obr. 4.18 Vzhled vzorků vyrobených při teplotě 175 °C z materiálu PLA.

Při vysoké teplotě tisku je na vzorcích viditelné propadnutí stěny dovnitř vzorku. To je způsobeno velkou teplotní deformací po vyhladnutí a použitím malé výplně. Tento případ je znázorněn na obrázku 4.19. Stěny jsou od teploty 200 °C a více lesklé.

Všechny ostatní kvádry z PLA, které nebyly zmíněny, mají použitelný vzhled pro svojí další funkci.



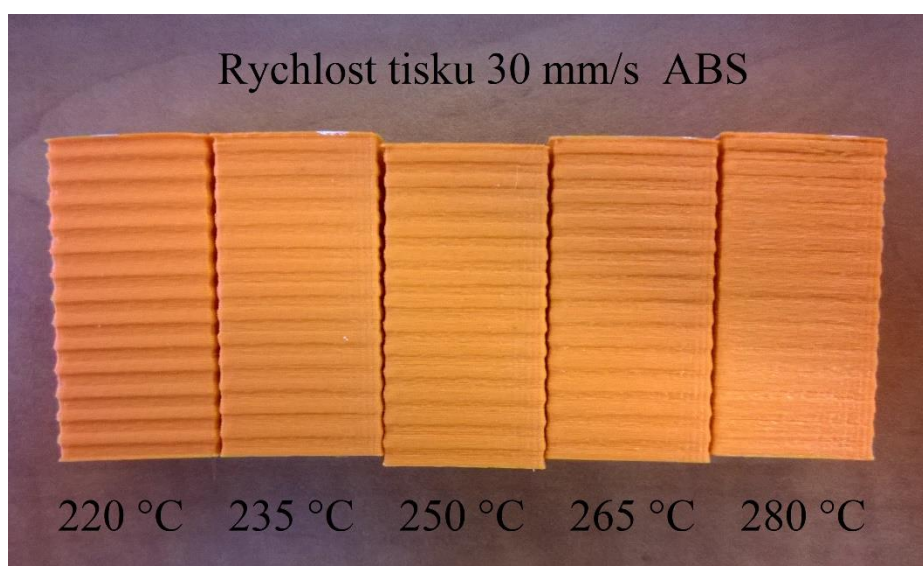
Obr. 4.19 Propadlá stěna u PLA.

Vzorky z ABS plastu se nepodařilo vytisknout pro teplotu 205 °C při nízké a vysoké rychlosti tisku. Pouze pro normální rychlost tisku se podařilo vytisknout vzorek, který ale není plně dokončen a je k dalšímu testování nepoužitelný. Je to obdobné jako u PLA plastu kde se filament kvůli nízké teplotě trysky nestíhá dostatečně prohřát na stav použitelný pro tisk. Tento vzorek je na obrázku 4.20.



Obr. 4.20 Nepoužitelný vzorek z ABS při teplotě 205 °C.

Vzorkové kvádry tisknuté při nízké rychlosti tisku (30 mm/s) vykazují značnou pravidelnou vlnitost. Tato vlnitost se objevuje pouze na vzorcích z ABS materiálu a se zvyšující se teplotou tisku pohledově mizí, což ukazuje obrázek 4.21.



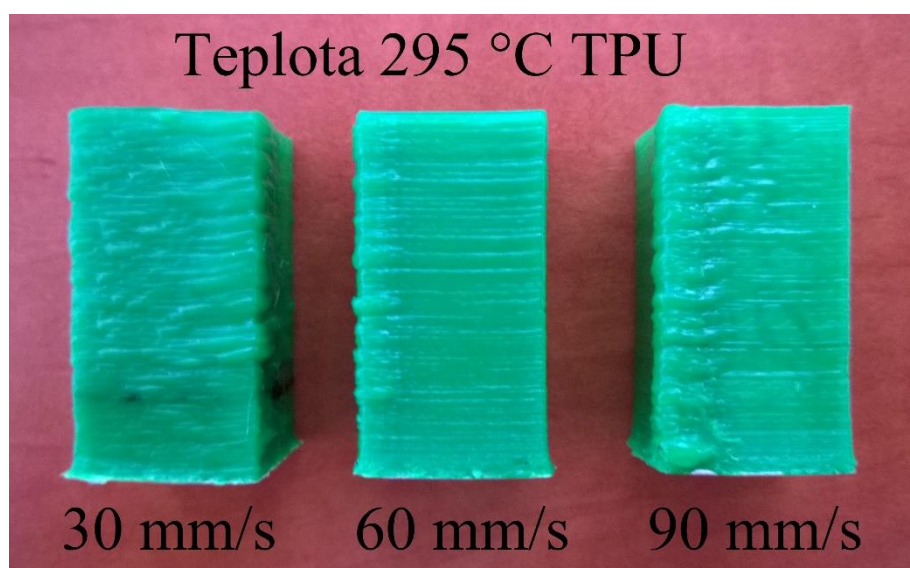
Obr. 4.21 Vzhled vzorků vyrobených rychlostí 30 mm/s z materiálu ABS.

Na vzorcích z ABS materiálu se stoupající teplotou a rychlostí tato vlnitost mizí, ale nastává problém s vystouplými a vyteklymi rohy ven ze součástí. U normální rychlosti tisku je to pouze na jednom rohu do teploty 250 °C, na dalších vzorcích tento případ nastává na dvou rozích. U nejvyšší rychlosti tisku jsou zreformované i tři rohy, což je způsobeno tím, že předchozí nanesená vrstva nestihla dostatečně vychladnout a je na ní nanesena vrstva další. Této chybě by se dalo vyvarovat tím, že by se tiskla větší součást, u které by vrstvy dostatečně vychladly. Nebylo zde použito chlazení výtisku z důvodu velké tepelné deformace materiálu při rychlém ochlazení, kdy docházelo k praskání vzorku a předčasnému odlepení od vyhřívaného stolku.

Všechny vzorky z ABS, kvůli své povrchové vlnitosti, nesplňují standard pro další využití.

Pro materiál TPU a teplotu 220 °C se od sebe oddělují tři tištěné dráhy stěn, ale materiál ve vrstvách je spojen. To samé platí i pro druhou testovanou teplotu 235 °C, ale pouze pro normální a vysokou rychlost tisku. Jako referenční teplota byla vybrána teplota 250 °C, kdy se vrstvy i obvodové dráhy stěn dobře spojily. U vzorků tištěných vysokou rychlostí je počáteční roh vždy rozteklý a vystouplý což z nich dělá nepoužitelné výtisky pro běžné užití, ostatní stěny a rohy jsou v pořádku.

Kvádry tištěné maximální teplotou 295 °C jsou taktéž nepoužitelné pro další funkci, mají vystupující vrstvy ze stěny, a proto jsou nerovné a hrubé. Je to způsobeno vysokou teplotou tisku, kdy stačil pouze malý impulz k tomu, aby materiál samovolně vytékal tryskou. Neforemné rohy a stěny při této teplotě jsou na obrázku 4.22.



Obr. 4.22 Vzhled vzorků vyrobených při teplotě 295 °C z materiálu TPU.

Použitelné vzorky, které splňují vzhledový standard, jsou pouze při malé rychlosti tisku a to od teploty 235 °C po teplotu 265 °C, dále pak kvádry při normální rychlosti tisku o teplotách tisku 250 °C a 265 °C. Ostatní vzorky jsou vzhledově nepoužitelné.

4.4 Vzhled a rozměr vytlačeného vlákna

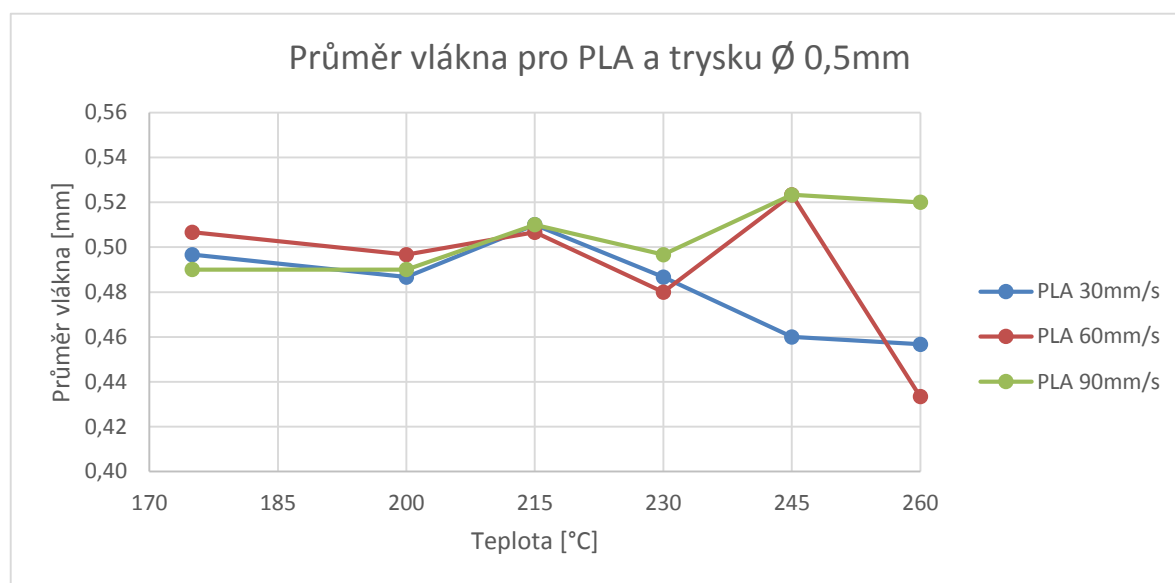
Vzhled a rozměr vlákna jsou prověřovány pouze pro PLA materiál, protože se předpokládá, že vlákna ostatních materiálů se budou chovat podobě s rostoucí teplotou a rychlostí vytlačování.

Vlákna jsou vytlačována stejně, jako byly tisknuty vzorky, tedy tryskou o průměru 0,5 mm. Pro tisk jednotlivých vláken byl vytvořen jednoduchý G-kód, ve kterém se měnila pouze teplota a rychlost protlačování.

M107	;vypnutí chlazení
M104 S200	;nahřátí trysky extruderu na 200°C
G28	;najetí do nulové polohy
G1 X50 Y50 Z1 F5000	;najetí do pozice pro nahřátí na požadovanou teplotu
M109 S250	;nastavení požadované teploty trysky (zde 250 °C)
G21	;nastavení jednotek na milimetry
G90	;absolutní polohování
M106 S180	;zapnutí chladicího ventilátoru
G92 E0	;nastavení polohy filamentu v extruderu
G1 E2 F2400	;naplnění trysky plastem
G1 X50 Y50 Z0 E2 F1800	;začátek tisku a změna rychlosti vytlačování (zde pro rychlost tisku 60 mm/s)
G1 X60 Y50 Z0 E3	;přichycení vlákna ke stolku
G1 X195 Y50 Y1 E12	;tisk samotného vlákna
G1 E10	;vyprázdnění trysky od plastu
M106 S0	;vypnutí chladicího ventilátoru

Průměr vlákna byl měřen ve třech místech vlákna digitálním posuvným měřidlem s přesností na dvě desetinná místa. Z těchto tří hodnot byl vypočten průměr a byl zapsán do tabulky 4.1.

Pro rychlost vytlačování úměrnou rychlostí tisku 90 mm/s se průměr vlákna nijak výrazně nemění a je konstantní v maximálním rozmezí 0,03 mm. Pro normální rychlost tisku nastává zlom při 230 °C, kdy průměr vlákna stoupá a při 245 °C se dostává na maximální naměřený průměr. S další testovanou rychlostí opět strmě klesá na nejnižší naměřenou hodnotu průměru vlákna, a to 0,43 mm. U nejmenší rychlosti tisku také nastává zlom ale až při teplotě vytlačovaného vlákna 215 °C, kdy průměr vlákna klesá se stoupající teplotou tak, jak ukazuje obrázek 4.23.



Obr. 4.23 Průměr vlákna pro materiál PLA.

Tab. 4.1 Průměr vlákna pro trysku Ø 0,5mm při změně rychlosti a teploty.

30mm/s				
Teplota [°C]	1. měření [mm]	2. měření [mm]	3. měření [mm]	průměr [mm]
175	0,5	0,5	0,49	0,50
200	0,52	0,47	0,47	0,49
215	0,52	0,5	0,51	0,51
230	0,48	0,48	0,5	0,49
245	0,47	0,45	0,46	0,46
260	0,47	0,45	0,45	0,46
60mm/s				
Teplota [°C]	1. měření [mm]	2. měření [mm]	3. měření [mm]	průměr [mm]
175	0,52	0,47	0,53	0,51
200	0,49	0,49	0,51	0,50
215	0,51	0,51	0,5	0,51
230	0,47	0,48	0,49	0,48
245	0,53	0,53	0,51	0,52
260	0,44	0,43	0,43	0,43
90mm/s				
Teplota [°C]	1. měření [mm]	2. měření [mm]	3. měření [mm]	průměr [mm]
175	0,49	0,47	0,51	0,49
200	0,51	0,48	0,48	0,49
215	0,52	0,5	0,51	0,51
230	0,5	0,49	0,5	0,50
245	0,52	0,53	0,52	0,52
260	0,55	0,51	0,5	0,52

Vzhled vláken byl snímán optickým zařízením Alicona IFM G4, podobě jako u měření drsnosti vzorků. Dále byla vlákna položena pod mikroskop se snímacím čipem pro možnost pořizování snímků.

Všechna vlákna nasnímaná zařízením Alicona nevykazovala žádné vady, jak je vyobrazeno na obrázku 4.24a). Jsou zde viditelné pouze kousky materiálu, které nejsou jednotně probarvené. Pod mikroskopem byla nalezena pouze jedna vada, při teplotě 260 °C a rychlosti tisku 60 mm/s viz obrázek 4.24b). Fotografie z mikroskopu je více kontrastní kvůli osvětlení vlákna ze spodu.



a)



b)

Obr. 4.24 Vzhled vlákna na zařízení Alicona, b) vada objevená pod mikroskopem.

5. DOPORUČENÍ

Pro trysku průměru 0,5mm a výšku vrstvy 0,15 mm z provedeného experimentu vyplývá, že pro PLA plast od firmy Fillamentum se výrobky dají tisknout jakoukoli teplotou nad 200 °C s tím, že se musejí dostatečně chladit a při vyšších teplotách tisku se mohou deformovat. Kvůli tomu bych pro tento plast doporučil tisknout teplotou 200 °C, která byla vybrána jako referenční teplota a zároveň spadá do intervalu teplot, které doporučuje i výrobce. Při této teplotě (200 °C) splňují výrobky standard pro kvalitu povrchu při všech testovaných rychlostech. Při tisku z PLA plastu nebyl zapnut vyhřívaný stolek a měl pokojovou teplotu okolo 21,5 °C.

Pro výrobky z materiálu ABS nelze tuto modifikovanou 3D tiskárnu doporučit pro žádnou z testovaných teplot ani rychlostí, jelikož se na všech vzorcích objevovala příliš velká vlnitost povrchu. Tento problém se nepodařilo vyřešit ani výměnou různých komponent tiskárny, které by tuto vlnitost mohly způsobovat.

U výrobku z TPU materiálu splňují standard pro kvalitu povrchu pouze 4 výrobky. A to za teplot tisku 235 °C, 250 °C a rychlosti tisku 30 mm/s a 60 mm/s. Tyto teploty spadají do intervalu 230 – 250 °C, který doporučuje výrobce pro tisk. Tyto teploty tisku se potvrdily jako správné a mohu je tedy doporučit. Pro tisk vzorků z TPU byla teplota stolku nastavena na 60 °C.

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo realizovat cenově dostupnou RepRap 3D tiskárnu. Jako základ byla vybrána tiskárna nazývaná Rebel II, která je modifikována s ohledem na tisknutelný prostor. Na této tiskárně se provedla výroba vzorků pro další experiment. Hlavní pozornost byla směřována na rychlost protlačování materiálu tryskou, což souvisí s rychlostí tisku, dále pak na tři různé materiály a jejich teplotu tisk.

V první části této práce je popsána historie 3D tisku a základní metody, které využívají různé technologie a materiály pro výrobu součástí. Je zde popsán projekt RepRap, který je v současné době velice rozrostlý a využívaný lidmi, kteří si nemohou dovést drahou průmyslovou 3D tiskárnu.

V druhé části je popsána stavba mnou vybrané tiskárny. Jsou zde popsány má vylepšení a odlišnosti od běžné stavebnice. Hlavní odlišením je konstrukce vyhřívaného stolku a velikost prostoru pro tisk. Při návrhu se počítalo s použitelným prostorem pro tisk o velikosti 400x400x500 mm, které nebylo nakonec dosaženo a použitelné rozměry pro tisk jsou 350x360x460 mm.

V další části této práce jsou popsány materiály, které budou při experimentu použity. Pro tisk vzorků na experimentu byly vybrány dva nejpoužívanější materiály pro tiskárny a to PLA a ABS, jako třetí byl pro svou flexibilitu vybrán materiál TPU. Dále jsou zde navrženy testované teploty a rychlosti tisku.

V závěru práce byl proveden experiment, ve kterém se měří drsnost a vlnitost povrchu optickou a dotykovou metodou, rozměrová přesnost a vzhled součástí. Z tohoto experimentu vyplývá:

- pro materiál PLA je nejvhodnější použít teplotu 200 °C pro všechny testované rychlosti bez nutnosti vyhřívaného stolku,
- materiál ABS není možný touto modifikovanou tiskárnou tisknout v požadované kvalitě, a to z důvodu špatně zvolených komponent tiskárny,
- TPU se dá tisknout v požadované kvalitě při teplotách tisku 235-250 °C, rychlosti tisku 30 – 60 mm/s a při teplotě vyhřívaného stolku 60 °C.

Dále bylo provedeno měření průměrů jednotlivých vláken u materiálu PLA, která do teploty 230 °C nevykazují výrazné změny ve svém rozměru.

Do budoucna bych doporučil pozměnit komponenty tiskárny tak, aby se na ní dal bez problémů tisknout i ABS materiál.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. MMSPEKTRUM. *Nekonvenční metody obrábění 9. díl* [online]. 2008 [vid. 2016-02-24]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-9-dil.html>
2. JTEC/WTEC panel on rapid prototyping in Europe and Japan: final report. Baltimore, MD: Published and Distributed by Rapid Prototyping Association of the Society of Manufacturing Engineers, in cooperation with International Technology Research Institute, Loyola College in Maryland, c1997, v. <1- >. ISBN 18-837-1244-0.
3. ÚST FSI VUT V BRNĚ. *Aditivní technologie – metody Rapid metody Rapid Prototyping Prototyping* [online]. [vid. 2016-03-02]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/podklady/sto_bak/cv_STV_04_Aditivni_techologie_metody_Rapid_Prototyping.pdf
4. DTRESOURCE. *Rapid Prototyping* [online]. 2015 [vid. 2016-03-02]. Dostupné z: <http://dtresource.com/rapid-prototyping.html>
5. MMSPEKTRUM. *Nekonvenční metody obrábění 10. díl* [online]. 2008 [vid. 2016-03-08]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-10-dil.html>
6. 14220. *Přehled a principy základních metod* [online]. 2013 [vid. 2016-03-08]. Dostupné z: <http://www.14220.cz/technologie/3d-tisk-metody/>
7. TEECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI, KATEDRA VÝROBNÍCH SYSTÉMŮ. *Přehled technik využívaných při Rapid Prototyping* [online]. 2012 [vid. 2016-03-08]. Dostupné z: http://www.kvs.tul.cz/download/rapid_prototyping/P%C5%99ehled%20technik%20vyu%C5%BE%C3%ADvan%C3%BDch%20p%C5%99i%20Rapid%20Prototyping.pdf
8. STRATEGIE. *3D tisk na postupu* [online]. 2012 [vid. 2016-03-15]. Dostupné z: <http://strategie.e15.cz/special/3d-tisk-na-postupu-768146>
9. REPRAP. *RepRap* [online]. 2016 [vid. 2016-03-15]. Dostupné z: <http://reprap.org/>
10. 3D RUCK. *Was ist RepRap?* [online]. 2011 [vid. 2016-03-15]. Dostupné z: <http://3druck.com/drucker-und-produkte/was-ist-reprap-24318/>
11. MICROCON. *Microcon PRODEJ* [online]. 2000 [vid. 2016-03-22]. Dostupné z: <http://www.microcon.cz/index.html>
12. GET3D. *Silnik krokowy SX17-1005LQCEF* [online]. 2016 [vid. 2016-03-22]. Dostupné z: <http://get3d.pl/sklep/silnik-krokowy-sx17-1005lqcef/>
13. REPRAP. *Arduino MEGA* [online]. 2016 [vid. 2016-03-22]. Dostupné z: http://reprap.org/wiki/RepRap/cs#Arduino_MEGA

14. GMELECTRONIC. *Vývojový kit ARDUINO Arduino MEGA2560* [online]. 2016 [vid. 2016-03-22]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/vyvojovy-kit-arduino-arduino-mega2560-p772-006>
15. REPRAP. *RAMPS* [online]. 2016 [vid. 2016-03-22]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/RepRap/cs#RAMPS>
16. DX. *3D Printer 2560r3+ramps1.4* [online]. 2016 [vid. 2016-04-12]. Dostupné z: http://www.dx.com/p/3d-printer-2560r3-ramps1-4-control-boards-kit-w-4988-driver-blue-red-313794#.Vwy_0fmLTIU
17. 3D-TISK. *PLA* [online]. 2014 [vid. 2016-04-12]. Dostupné z: <http://www.3d-tisk.cz/pla/>
18. REPRAP. *PLA* [online]. 2015 [vid. 2016-04-12]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/PLA>
19. EASY CNC. *Tiskové materiály - PLA* [online]. 2016 [vid. 2016-04-12]. Dostupné z: <https://www.easycnc.cz/inpage/pla/>
20. 3D-TISK. *ABS* [online]. 2014 [vid. 2016-04-12]. Dostupné z: <http://www.3d-tisk.cz/abs/>
21. REPRAP. *ABS* [online]. 2015 [vid. 2016-04-12]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/ABS>
22. PLEXIPLAST. *Prodej a zpracování ABS plastu* [online]. 2015 [vid. 2016-04-12]. Dostupné z: <http://www.plexiplast.cz/abs.html>
23. EVEKTOR. *Rapid prototyping* [online]. 2016 [vid. 2016-04-12]. Dostupné z: <http://www.evektor.cz/cz/rapid-prototyping>
24. MATERIALISE. *FDM: Materiály a datové listy* [online]. 2106 [vid. 2016-04-12]. Dostupné z: <http://www.materialise.cz/fdm-materialy-datove-listy>
25. REPRAP. *TPU* [online]. 2014 [vid. 2016-04-12]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/TPU>
26. SHAPINGBITS. *TPU 3D PRINTING* [online]. 2016 [vid. 2016-04-12]. Dostupné z: <http://www.shapingbits.com/3d-printing-guide/tpu-3d-printing/>
27. ZAHRADNÍK, Petr. *Přemost'ování v 3D tisku* [online]. 2014 [vid. 2016-04-19]. Dostupné z: <http://www.zahradniksebavi.cz/post/premostovani-v-3d-tisku>
28. HRONCMIR. *Práce s 3D modely ve formě meshí* [online]. 2016 [vid. 2016-04-20]. Dostupné z: <https://edux.fit.cvut.cz/courses/BI-3DT/tutorials/mesh/start>

29. WIKIPEDIA. *STL (file format)* [online]. 2016 [vid. 2016-04-20]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/STL_\(file_format\)](https://en.wikipedia.org/wiki/STL_(file_format))
30. REPRAP. *Cura* [online]. 2015 [vid. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/Cura>
31. GITHUB. *CuraEngine* [online]. 2016 [vid. 2016-04-20]. Dostupné z: <https://github.com/Ultimaker/CuraEngine>
32. REPRAP. *Slic3r* [online]. 2016 [vid. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/Slic3r>
33. STRATASYS. *Compare FDM Materials* [online]. 2016 [vid. 2016-04-26]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/materials/fdm/compare-fdm-materials>
34. 3DMODELS. *PLA-plast pro 3D tisk* [online]. 2015 [vid. 2016-04-26]. Dostupné z: <http://cz.wiki3dmodels.info/technika/pla-plast-pro-3d-tisk/>
35. ELASTHANE™. *Thermoplastic Polyether Polyurethane* [online]. 2012 [vid. 2016-04-26]. Dostupné z: [https://www.dsm.com/content/dam/dsm/medical/en_US/documents/elasthane\(tm\)-tpu-product-sheet.pdf](https://www.dsm.com/content/dam/dsm/medical/en_US/documents/elasthane(tm)-tpu-product-sheet.pdf)
36. ČSN EN ISO 4287: *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Český normalizační institut, 1999.
37. ČSN EN ISO 4288: *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda a postupy pro posuzování struktury povrchu*. Český normalizační institut, 1999.
38. JM KARRER. *LA MESURE DES ETATS DE SURFACE* [online]. 2015 [vid. 2016-04-26]. Dostupné z: <http://jm.karrer.free.fr/documents/ES1.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Význam
2D	Dvourozměrný
3D	Trojrozměrný
3DP	Three-dimensional printing
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
Ar	Argon
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
CAD	Computer Aided Aesign
CO₂	Oxid uhličitý
ČSN	Česká státní norma
EN	Evropská norma
FDM	Fused Deposition Modeling
G-kód	Název programovacího jazyka
GPS	Global Positioning System
HeCd	Helium cadmium
ISO	International Organization for Standardization
LCD	Liquid Crystal Display
LOM	Laminated Object Manufacturing
MJM	Multi Jet Modelling
NaOH	Hydroxid sodný
Pa6	Nylon
PC	Polykarbonát
PLA	Polylaktid
RAMPS	RepRap Arduino Mega Pololu Shield
REPRAP	Replicating Rapid-prototype
RP	Rapid Prototyping
SCS	Solid Creation System
SD	Secure Digital
SLA	Stereolithography
SLS	Selective Laser Sintering

Zkratka	Význam
STL	Stereolitografie- formát souboru
TPU	Thermoplastic PolyUrethane

Symbol	Jednotka	Popis
A	[mm]	rozměr vzorku v ose X
ln	[mm]	Vyhodnocovaná délka
lp	[mm]	Základní délka základního profilu
lr	[mm]	Základní délka profilu drsnosti
lw	[mm]	Základní délka profilu vlnitosti
Pa	[mm]	Průměrná aritmetická úchylka základního profilu
Pz	[μm]	Největší výška profilu základního profilu
Ra	[mm]	Průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti
RSm	[mm]	Průměrná šířka prvků profilu
Rz	[μm]	Největší výška profilu drsnosti
Wa	[mm]	Průměrná aritmetická úchylka profilu vlnitosti
Wz	[μm]	Největší výška profilu vlnitosti
Z (x)	[μm]	hodnot pořadnice
Zp	[μm]	Hloubka nejnižší prohlubně
Zv	[μm]	Výška nejvyššího výstupku
λs	[-]	filtr profilu
λc	[-]	filtr profilu
λf	[-]	filtr profilu

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Technický list pro materiál PLA
Příloha 2	Technický list pro materiál ABS
Příloha 3	Naměřené hodnoty drsnosti na vlnitosti povrchu přístrojem Alicona
Příloha 4	Naměřené hodnoty drsnosti na vlnitosti povrchu přístrojem Form Talysurf Intra 50
Příloha 5	Rozměrová přesnost v ose X

PŘÍLOHA 1 – TECHNICKÝ LIST PRO MATERIÁL PLA



Technical data sheet - PLA Extrafill

Product:	PLA Extrafill		
Diameters:	1,75 mm	or	2,85 mm (+/- 0,05 mm)
Lengths:	255 m	or	95 m
Weight:	> 0,75 kg		
Material:	Polylactic acid		
Color:	wide variety of colours according to the color range		

Information:

- High quality filaments with the trade name PLA Extrafill used for the FFF (also known as FDM) 3D printing technology.
- The advantage of this material is that it can be used in 3D printers easily, that it allows a high quality of printing even in tricky details and an excellent lamination of the printed object.
- PLA filament is made of natural ingredients and is easily biodegradable by composting.
- PLA Extrafill is manufactured from material, which fulfill FDA requirements.
- Fillamentum guarantees high precision of filament dimension within the tolerance +/- 0,05 mm, which is strictly controlled throughout the production.

Properties of PLA filaments for 3D printing:

Specific Gravity (ASTM D1505):	1,24 g/cm ³
Ductility (ASTM D638):	6 %
Strength (ASTM D638):	53 MPa
Working temperature:	190 - 210 °C
Hot pad:	max. 45 °C



Filaments PLA Extrafill for 3D printing are produced on the extrusion line with a continuous measurement of the outer diameter of 1,75 mm (or 2,85 mm).

Tolerance for diameters +/- 0,05 mm.

Package:

Filaments PLA Extrafill are wound on a plastic spool and packaged in a cardboard box. The box is marked by label, unless otherwise noted.

Total weight including packaging is 1 kg, the weight of filament is 0,75 kg.

In case of questions please contact us at the following address:

PARZLICH s.r.o.

nám. Míru 1217

768 24 Hulin

Czech Republic

www.parzlich.cz | www.fillamentum.com

email: helpdesk@fillamentum.com | gsm: + 420 725 929 736

PŘÍLOHA 2 - TECHNICKÝ LIST PRO MATERIÁL ABS



Technical data sheet - ABS Extrafill

Product:	ABS Extrafill		
Diameters:	1,75 mm	or	2,85 mm (+/- 0,05 mm)
Lengths:	300 m	or	120 m
Weight:	> 0,75 kg		
Material:	Acrylonitrile butadiene styrene		
Color:	wide variety of colours according to the color range		

Information:

- High quality filaments with the trade name ABS Extrafill used for the FFF (also known as FDM) 3D printing technology.
- ABS filament is a polymer, which is ideal for the production of the first functional samples before serial production for functional prototyping, manufacturing tools, but also for the production of goods for everyday use.
- The advantage of this material is that it can be used in 3D printers easily, that it allows a high quality of printing even in tricky details and an excellent lamination of the printed object.
- ABS Extrafill is manufactured from material, which fulfill FDA requirements.
- Use of the ABS material in the food industry is dependent on the final product and responsibility for use on a processor ABS Extrafill. ABS is not intended for medical applications.
- Fillamentum guarantees high precision of filament dimension within the tolerance +/- 0,05 mm, which is strictly controlled throughout the production.



Properties of ABS filaments for 3D printing:

Specific Gravity (ASTM D1505):	1,04 g/cm ³
Ductility (ASTM D638):	22 %
Strength (ASTM D638):	36 MPa
Working temperature:	220 - 240 °C
Hot pad:	80 - 100 °C

Filaments ABS Extrafill for 3D printing are produced on the extrusion line with a continuous measurement of the outer diameter of 1,75 mm (or 2,85 mm).

Tolerance for diameters +/- 0,05 mm.

Package:

Filaments ABS Extrafill are wound on a plastic spool and packaged in a cardboard box. The box is marked by label, unless otherwise noted.

Total weight including packaging is 1 kg, the weight of filament is 0,75 kg.

In case of questions please contact us at the following address:

PARZLICH s.r.o.

nám. Míru 1217

768 24 Hulín

Czech Republic

www.parzlich.cz | www.fillamentum.com

email: helpdesk@fillamentum.com | gsm: + 420 725 929 736

PŘÍLOHA 3 – NAMĚŘENÉ HODNOTY DRSNOSTI NA VLNITOSTI POVRCHU PŘÍSTROJEM ALICONA

Tab. 6.1 Naměřené hodnoty drsnosti a vlnitosti přístrojem Alicona pro materiál PLA.

30mm/s PLA					
Teplota [°C]	Ra [μm]	Rz [μm]	Wa [μm]	Wz [μm]	poznámka
175	19,912	100,14	2,06	4,71	
200	14,6783	105,52	6,26	20,29	
215	14,1931	105,23	3,33	11,24	
230	13,8398	110,19	2,08	4,9	
245	14,9158	114,14	4,4	14,43	
260	15,9594	109,6	1,69	5,7	
60mm/s PLA					
Teplota [°C]	Ra [μm]	Rz [μm]	Wa [μm]	Wz [μm]	poznámka
175	18,05	128,33	4,44	13,69	
200	19,94	131,91	8,37	28,56	
215	17,12	127,35	7,55	23,52	
230	15,03	117,6	9,78	31,16	
245	16,07	122,22	8,47	24,69	
260	19,19	126,23	3,83	11,95	
90mm/s PLA P=polarizované světlo					
Teplota [°C]	Ra [μm]	Rz [μm]	Wa [μm]	Wz [μm]	poznámka
175	14,87	90,41	5,88	18,9	P
200	18,7	120,31	4,66	14,21	P
215	21,34	126,14	8,99	28,59	P
230	19,71	121,61	8,79	28,05	P
245	17,67	130,69	6,3	19,83	P
260	18,93	134,53	6,12	19,89	P

Tab. 6.2 Naměřené hodnoty vlnitosti přístrojem Alicona pro materiál ABS.

30mm/s ABS		
Teplota [°C]	Wa [μm]	Wz [μm]
220	71,4	119,76
235	84,49	129,25
250	41,9	93,65
265	49,23	80,89
280	45,97	112,13
60mm/s ABS		
Teplota [°C]	Wa [μm]	Wz [μm]
220	71,4	119,76
235	84,49	129,25
250	41,9	93,65
265	49,23	80,89
280	45,97	112,13
90mm/s ABS		
Teplota [°C]	Wa [μm]	Wz [μm]
220	44,01	120,76
235	45,31	118,72
250	55,66	148,09
265	38,1896	90,2
280	29,08	81,58

Tab. 6.3 Naměřené hodnoty drsnosti a vlnitosti přístrojem Alicona pro materiál TPU.

30mm/s TPU					
Teplota [°C]	Ra [μm]	Rz [μm]	Wa [μm]	Wz [μm]	poznámka
220	30,44	215,61	29,6	65,27	
235	27,04	207,7	16,02	83,64	
250	35,38	232,29	26,51	95,31	
265	27,5	227,59	15,47	50,83	
280	-	-	-	-	nenaměřeno
295	-	-	-	-	nenaměřeno
60mm/s TPU					
Teplota [°C]	Ra [μm]	Rz [μm]	Wa [μm]	Wz [μm]	poznámka
220	18,59	132,05	15,33	48,55	
235	18,04	135,17	6,9	20,88	
250	31,27	188,05	12,68	35,43	
265	27,92	207,01	11,56	67,63	
280	-	-	-	-	nenaměřeno
295	26,23	154,27	15,4	58,89	
90mm/s TPU					
Teplota [°C]	Ra [μm]	Rz [μm]	Wa [μm]	Wz [μm]	poznámka
220	13,02	112,39	3,12	9,54	
235	20,9	120,86	3,46	14,57	
250	21,02	133,16	4,03	13,57	
265	24,67	184,41	12,32	37,92	
280	24,81	168,48	33,88	103,91	
295	-	-	-	-	nenaměřeno

PŘÍLOHA 4 - NAMĚŘENÉ HODNOTY DRSNOSTI NA VLNITOSTI POVRCHU PŘÍSTROJEM FORM TALYSURF INTRA 50

Tab. 6.4 Naměřené hodnoty drsnosti a vlnitosti přístrojem Form Talysurf Intra 50 pro materiál PLA a TPU.

30mm/s PLA		
Teplota [°C]	Ra [μm]	Rz [μm]
175	12,21	65,98
200	11,47	58,32
215	12,59	65,55
230	11,91	62,61
245	11,59	58,55
260	13,38	75,06
60mm/s PLA		
Teplota [°C]	Ra [μm]	Rz [μm]
175	14,59	76,99
200	16,88	75,56
215	12,92	74,34
230	13,19	75,33
245	13,95	79,51
260	16,25	91,71
90mm/s PLA		
Teplota [°C]	Ra [μm]	Rz [μm]
175	12,64	74,33
200	12,47	66,79
215	12,33	63,52
230	13,49	81
245	13,06	71,27
260	16,56	94,51

30mm/s TPU		
Teplota [°C]	Ra [μm]	Rz [μm]
220	16,42	99,71
235	21,57	118,96
250	23,29	127,19
265	37,98	200,57
280	41,11	203,71
295	20,84	99,06
60mm/s TPU		
Teplota [°C]	Ra [μm]	Rz [μm]
220	12,2	70,21
235	14,2	91,94
250	14,21	99,03
265	21,65	111,3
280	17,92	90,54
295	17,17	84,58
90mm/s TPU		
Teplota [°C]	Ra [μm]	Rz [μm]
220	17,87	97,59
235	14,76	78,31
250	14,12	75,71
265	17,02	95,43
280	23,53	112,61
295	22,56	114,09

Tab. 6.5 Naměřené hodnoty vlnitosti přístrojem Form Talysurf Intra 50 pro materiál ABS.

30mm/s ABS	
Teplota [°C]	Wa [μm]
220	93,9
235	95,51
250	83,42
265	83,28
280	71,89
60mm/s ABS	
Teplota [°C]	Wa [μm]
220	32,46
235	43,96
250	69,67
265	82,14
280	80,41
90mm/s ABS	
Teplota [°C]	Wa [μm]
220	68,85
235	57,37
250	62,22
265	75,29
280	60,27

PŘÍLOHA 5 – ROZMĚROVÁ PŘESNOST V OSE X

Tab. 6.6 Rozměrová přesnost v ose X pro PLA.

30mm/s PLA				
Teplota [°C]	1. měření [mm]	2. měření [mm]	3. měření [mm]	průměr [mm]
175	20,18	20,1	20,19	20,16
200	20,45	20,42	20,49	20,45
215	20,46	20,39	20,43	20,43
230	20,34	20,36	20,38	20,36
245	20,46	20,4	20,45	20,44
260	20,35	20,33	20,41	20,36
60mm/s PLA				
Teplota [°C]	1. měření [mm]	2. měření [mm]	3. měření [mm]	průměr [mm]
175	19,89	19,89	19,95	19,91
200	20,07	20,08	20,17	20,11
215	20,16	20,16	20,16	20,16
230	20,04	19,99	20,1	20,04
245	19,97	19,88	19,99	19,95
260	20,05	20,06	20,18	20,10
90mm/s PLA				
Teplota [°C]	1. měření [mm]	2. měření [mm]	3. měření [mm]	průměr [mm]
175	19,94	20,24	19,99	20,06
200	19,98	20,02	20,48	20,16
215	20,17	20,15	20,31	20,21
230	20,15	20,12	20,24	20,17
245	20,08	20,1	20,31	20,16
260	20,11	20,1	20,27	20,16

Tab. 6.7 Rozměrová přesnost v ose X pro ABS.

30mm/s ABS				
Teplota [°C]	1. měření [mm]	2. měření [mm]	3. měření [mm]	průměr [mm]
220	20,42	20,4	20,41	20,41
235	20,41	20,37	20,37	20,38
250	20,47	20,38	20,35	20,40
265	20,43	20,35	20,37	20,38
280	20,44	20,37	20,45	20,42
60mm/s ABS				
Teplota [°C]	1. měření [mm]	2. měření [mm]	3. měření [mm]	průměr [mm]
205	20,17	19,82	19,75	19,91
220	19,98	19,82	19,81	19,87
235	19,91	20	19,92	19,94
250	20,04	20,14	20,01	20,06
265	19,99	19,88	19,98	19,95
280	19,88	19,87	19,97	19,91
90mm/s ABS				
Teplota [°C]	1. měření [mm]	2. měření [mm]	3. měření [mm]	průměr [mm]
220	19,95	19,97	19,95	19,96
235	19,71	19,71	19,74	19,72
250	19,78	19,72	19,82	19,77
265	19,84	19,89	19,87	19,87
280	19,75	19,57	19,91	19,74

Tab. 6.8 Rozměrová přesnost v ose X pro TPU.

30mm/s TPU				
Teplota [°C]	1. měření [mm]	2. měření [mm]	3. měření [mm]	průměr [mm]
220	20,29	20,24	20,27	20,27
235	20,55	20,57	20,59	20,57
250	20,76	20,66	20,73	20,72
265	20,42	20,39	20,57	20,46
280	21,03	20,92	20,93	20,96
295	20,79	20,93	20,89	20,87
60mm/s TPU				
Teplota [°C]	1. měření [mm]	2. měření [mm]	3. měření [mm]	průměr [mm]
220	19,99	20,02	20,03	20,01
235	20,09	20,07	20,09	20,08
250	20,4	20,35	20,35	20,37
265	20,23	20,15	20,09	20,16
280	20,32	20,44	20,37	20,38
295	20,88	20,93	20,96	20,92
90mm/s TPU				
Teplota [°C]	1. měření [mm]	2. měření [mm]	3. měření [mm]	průměr [mm]
220	19,97	20,1	20,19	20,09
235	20,01	20,09	20,12	20,07
250	20,09	20	20,03	20,04
265	19,88	19,86	19,96	19,90
280	20,56	19,41	19,3	19,76
295	19,81	19,55	19,72	19,69