

UNIVERZITA PARDUBICE
FAKULTA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ
KATEDRA POLYGRAFIE A FOTOFYZIKY

Hodnocení kvality tisku
RepRap 3D tiskárny

Jaromír Čapek

Diplomová práce

2016

Univerzita Pardubice
Fakulta chemicko-technologická
Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jaromír Čapek**
Osobní číslo: **C12762**
Studijní program: **N3441 Polygrafie**
Studijní obor: **Polygrafie**
Název tématu: **Hodnocení kvalitu 3D tisku na RepRap tiskárně**
Zadávací katedra: **Katedra polygrafie a fotofyziky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

- 1) Nastudujte a popište metody tvorby třírozměrných objektů pomocí metod "additive manufacturing".
- 2) Podrobně popište technologie tisku pomocí tiskáren RepRap využívající metodu termálního extruderu. Popište základní konstrukční prvky a využívané materiály. Rovněž popište, jak se hodnotí kvalita 3D tisku.
- 3) Proveďte experiment zaměřený na hodnocení kvality 3D tisku na vybrané 3D tiskárně. Stanovte vhodné hodnotící kritéria a na jejich základě porovnejte vybrané skupiny vstupních parametrů.
- 4) Získané výsledky přehledně zpracujte ve formě závěrečné práce

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Ondrej Panák

Katedra polygrafie a fotofyziky

Konzultant diplomové práce:

Ing. Marek Žehra

Datum zadání diplomové práce:

29. února 2016

Termín odevzdání diplomové práce:

13. května 2016



prof. Ing. Petr Kalenda, CSc.
děkan

L.S.



prof. Ing. Petr Němec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 29. února 2016

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 8. 9. 2016.

Jaromír Čapek

Děkuji tímto ing. Ondreji Panákovi, Ph.D. a ing. Marku Žehrovi za cenné rady, připomínky a pomoc, které mi poskytli jako vedoucí a konzultant mé diplomové práce. Dále bych rád poděkoval ing. Luboši Prokúpkovi, Dr. za možnost využít zkušebního zařízení na oddělení syntetických polymerů, vláken a textilní chemie a za veškerou pomoc s tím související. V neposlední řadě děkuji manželce a dětem za trpělivou podporu a vedení tiskárny Svoboda Press, s.r.o. za vstřícnost po dobu studia.

ANOTACE

Tato diplomová práce se zabývá hodnocením kvality tisků zhotovených na RepRap 3D tiskárnách založených na metodě tisku FDM. Teoretická část shrnuje základní principy a přehled metod 3D tisku s důrazem na metodu FDM a zde používané materiály. Dále popisuje parametry použité k hodnocení kvality tištěné produkce.

Experimentální část se zabývá hodnocením výtisků zhotovených na 3D tiskárnách Prusa i3 a Rebel II. V této práci jsou navrženy a vytištěny zkušební výtisky a následně provedeno hodnocení se zaměřením na pevnost, rozměrovou přesnost a kvalitu povrchu.

Klíčová slova: 3D tisk, Rep Rap, mechanické zkoušky, rozměrová přesnost, drsnost povrchu

ANNOTATION

This diploma thesis deals with the assessment of the quality of production printed on RepRap 3D printers based on the printing method FDM. The theoretical part summarizes the basic principles and gives an overview of 3D printing methods with the emphasis on the FDM method and the materials used in it. It also describes the parameters used to evaluate the quality of printed production.

The experimental part focuses on the evaluation of the printed samples made on 3D printers Prusa i3 and Rebel II. In this work the samples are designed, printed, and subsequently evaluated with regard to strength, dimensional accuracy and surface quality.

Key words: 3D print, RepRap, mechanical tests, dimensional accuracy, surface roughness

Obsah

1	ÚVOD	9
2	TEORETICKÁ ČÁST	10
2.1	3D tisk	10
2.1.1	Rapid prototyping (RP)	10
2.1.2	Příprava dat pro 3D tisk	11
2.2	Metody 3D tisku	12
2.2.1	Stereolitografie (SLA)	13
2.2.2	Solid ground curing (SGC)	15
2.2.3	MultiJet printing/modelling (MJP/MJM)	15
2.2.4	Selective laser sintering (SLS)	16
2.2.5	3D Printing (3DP)	18
2.2.6	Selective laser melting (SLM)	20
2.2.7	Laminated object manufacturing (LOM)	21
2.3	Metoda FDM	23
2.3.1	Princip tisku pomocí FDM	23
2.3.2	Materiály pro FDM	24
2.3.3	Spojování vláken materiálu	28
2.3.4	Tvorba objektu	30
2.3.5	Projekt RepRap	32
2.4	Hodnocení kvality FDM 3D tisku	33
2.4.1	Pevnost objektu	33
2.4.2	Kvalita povrchu	35
2.4.3	Rozměrové vlastnosti	36
3	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	39
3.1	3D tiskárny pro experiment	39
3.1.1	Popis konstrukce	39
3.1.2	Software	41
3.1.3	Tiskový materiál	42
3.2	Testování pevnosti	42
3.2.1	Příprava vzorků	42
3.2.2	Přehled vytištěných vzorků	44

3.2.3	Podmínky měření pevnosti	45
3.3	Testování rozměrové přesnosti	46
3.3.1	Příprava vzorků	46
3.3.2	Přehled vytištěných vzorků	47
3.4	Testování vlastností povrchu	48
3.4.1	Podmínky experimentu	48
3.4.1	Příprava vzorků	49
4	VÝSLEDKY A DISKUZE	51
4.1	Měření pevnosti	51
4.2	Rozměrová přesnost	54
4.3	Vlastnosti povrchu	56
5	ZÁVĚR	61
	SEZNAM OBRÁZKŮ	66
	SEZNAM TABULEK	67
	PŘÍLOHY	68

1 ÚVOD

3D tisk je moderní a rychle se rozvíjející technologie, která zpočátku umožnila urychlit a zlevnit výrobu prototypů nejrůznějších výrobků pro ověření jejich vlastností a snadnější zavedení do sériové výroby. Vzhledem ke svým unikátním vlastnostem, kterými tato technologie disponuje, může být využita i na výrobu zcela funkčních produktů, které by ani doposud běžně používanými výrobními prostředky nemohly být zhotoveny. 3D tisk nachází široké uplatnění ve strojírenství, lékařství, v automobilovém, leteckém či kosmickém průmyslu a v mnoha dalších oblastech. Své uplatnění nachází i ve vědě a výzkumu.

Výhoda 3D tisku také spočívá v rozmanitosti metod, kterými je tisk realizován. V případě výrobků vyznačujících se vysokou kvalitou a pevností, zhotovených například z kovu či keramiky, vyžaduje celkem drahé zařízení a je energeticky náročný. Na druhou stranu zahrnuje i zařízení pro tvorbu objektů z termoplastů jako jsou například ABS (akrylonitrilbutadienstyren) nebo PLA (kyselina polymléčná). Tato zařízení pracují na principu roztavení plastu a jeho protlačení tryskou, jenž vytváří objekt. V tomto případě se brzy zformovaly po celém světě komunity nadšenců a kutilů, které dokázaly vytvořit levná a dostupná zařízení, téměř pro každého. Velký význam mají tyto tiskárny například ve školství, kdy se žáci a studenti seznámí s touto moderní technologií a to včetně stavby a zprovoznění takového zařízení již na základních či středních školách.

Tyto tiskárny samozřejmě vzhledem k důrazu, který je kladen na pořizovací hodnotu, mají své limity v přesnosti a spolehlivosti. Jsou neustále předmětem pokusů o zlepšení nejen těchto vlastností, ale například i hlučnosti a to vše samozřejmě při zachování rozumné pořizovací ceny.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 3D tisk

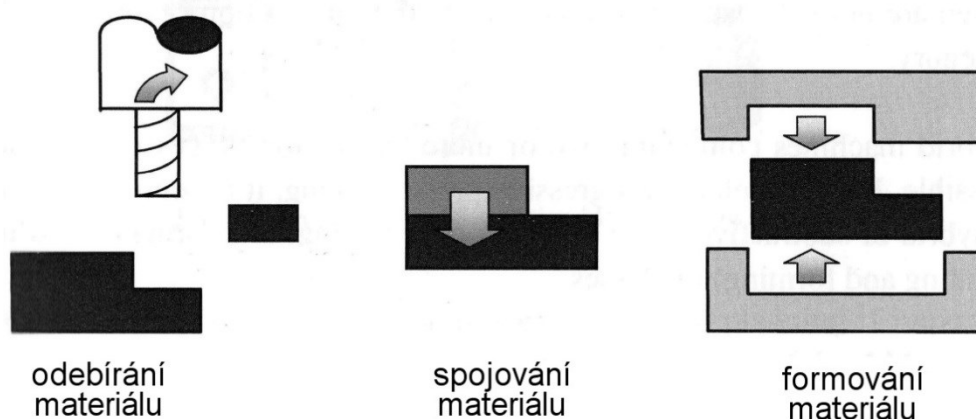
2.1.1 Rapid prototyping (RP)

Rapid prototyping je obecně souhrnný název pro veškeré výrobní postupy, které umožňují rychlejší výrobu prototypů, než kdyby bylo použito standardního výrobního postupu. Prototyp je první materiálová vizualizace, která může být využita na posouzení nejen tvarových a vzhledových vlastností či možnosti smontování, ale i funkčních. Vzhledem k vývojovým postupům je potřeba vyrobit i několik prototypů, než výrobek splňuje požadované vlastnosti. Významnou roli hraje prototyp i v marketingu, kdy může být zákazníkovi předvedeno několik tvarových i vzhledových variant budoucího výrobku [1]. Z těchto důvodů je velmi důležité, aby použité metody pro výrobu prototypů, byly co nejrychlejší a nejlevnější.

V polovině 80. let vyvinula společnost 3D Systems stereolitografii (SLA), což byla metoda výroby dílu využívající vrstvení materiálu na sebe a umožňující vytvářet velmi tvarově složité objekty obsahující i dutiny. Do té doby byly díly vyráběny zpravidla konvenčním způsobem a tedy naopak odebráním materiálů z polotovaru (subtraktivní), případně formovou výrobou, kdy je ovšem potřeba vyrobit nejprve formu. Metoda výroby dílu použitá firmou 3D Systems se nazývá aditivní (additive manufacturing – AM). Přehled základních výrobních postupů znázorňuje obr. 1, na kterém je uprostřed zachycen způsob výroby pomocí spojování materiálu, kam lze metodu AM zařadit [2].

Firmu 3D Systems následovaly další společnosti a na trhu se brzy objevila široká řada technologií pracujících na stejném principu. Pro tyto zařízení používáme souhrnný název 3D tiskárny [2].

Dnes tedy zpravidla pojmy rapid prototyping (RP), additive manufacturing (AM) a 3D tisk (3D Print), chápeme jako zcela záměnné a bývají používány při popisování stejného výrobního procesu [2].



Obr. 1 Přehled základních výrobních postupů [2]

2.1.2 Příprava dat pro 3D tisk

Ke zhotovení každého objektu pomocí technologie 3D tisku potřebujeme jeho počítačový 3D model. Existuje velké množství počítačových datových formátů popisujících 3D objekt, zpravidla každý software pro tvorbu 3D objektu a jeho popis používá svůj standard. Jako příklad můžeme uvést formát DXF (AutoCAD), 3DS (AutoDesk) nebo OBJ (Wavefront Technologies).

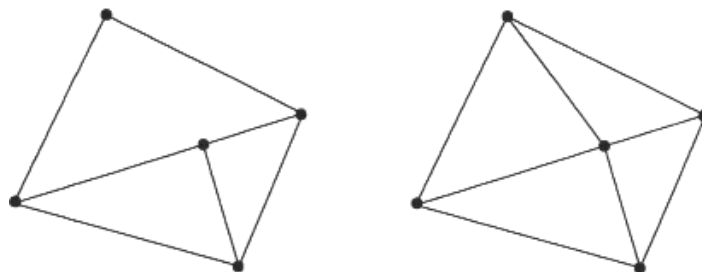
Pro získání datového souboru popisujícího reálný 3D objekt máme dvě možnosti. První je tvorba pomocí softwaru pro modelování 3D objektů a druhou získání dat pomocí 3D skeneru. Důležité je, aby model byl objemově uzavřený.

Software můžeme dále dělit podle jeho vhodnosti na tvorbu spíše přírodních nebo uměleckých objektů, jako jsou postavy lidí či zvířat (např. software Blender, DAZ Studio, Wings 3D, AutoDesk 3DS Max) a na tvorbu hlavně konstrukčních částí strojů nebo budov (např. software AutoCAD, SketchUp nebo OpenSCAD).

3D skener je zařízení které je schopno analyzovat daný objekt a vytvořit jeho počítačový model. Dochází k tomu buď dotykovou, nebo bezdotykovou formou. V prvním případě je výhodou nízká cena a snadná manipulace, nevýhodou je nižší rychlost skenování a nebezpečí poškození skenovaného objektu dotykovou sondou, která kopíruje povrch objektu a odečítá prostorové souřadnice. Mnohem rozšířenější bezkontaktní skenery získávají informace o objektu nejčastěji na základě vyhodnocení odraženého laserového nebo ultrazvukového vlnění [3]. Výstup ze skeneru může mít podobu optimalizované polygonální sítě (STL), tzv. mraku bodů, řezů (body), obrysově křivky (body), barevné mapy odchylek oproti CAD modelu (obrázek) nebo protokolu měření (formáty ASC, CSV PDF) [4].

Nejrozšířenějším typem datového formátu pro 3D objekty, se kterými pracují zařízení pro 3D tisk je formát STL vyvinutý společností 3D Systems. Všechny ostatní formáty jsou zpravidla převedeny právě na tento formát.

Formát STL (zkratka bývá interpretována jako **ST**ereo**L**itography, **ST**andard **T**riangulation **L**anguage nebo **ST**andard **T**essellation **L**anguage [5]) popisuje povrch objektu pomocí sítě trojúhelníků, které jsou definovány pomocí souřadnic tří vrcholů a normálového vektoru, jenž vždy směřuje ven z povrchu objektu. Základním pravidlem při popisu povrchu je, aby trojúhelníky k sobě vždy přiléhaly vrcholy. Tuto skutečnost ilustruje obr. 2.



Obr. 2 STL formát – pravidlo vrcholů, vlevo špatně, vpravo správně.[5]

Množství trojúhelníků, které definují povrch objektu především u zakřivených ploch, určuje detailnost vykreslení. Je třeba ovšem myslet na omezení dané tiskové technologie a při tvorbě modelu netvořit příliš malé detaily nebo ostré hrany. Nepřípustné pro objekt jsou i nekonečně tenké plochy nebo dotyk částí objektů pouze jejich hranou či jednotlivými body. Informace o objektu jsou v STL souboru specifikovány pomocí ASCII nebo binárního kódování [6].

Soubor ve formátu STL je ve výrobním procesu 3D tisku dále zpracováván. Pro úspěšné vytištění objektu je třeba model softwarově rozdělit (rozřezat) na tenké vrstvy. Pro každou tuto vrstvu je následně vygenerován řídicí kód pro ovládání pracovního členu 3D tiskárny, což nejčastěji bývá tryska s roztaveným materiálem nebo optický člen řídicí laserový paprsek. Tato operace probíhá již přímo v řídicím softwaru tiskárny nebo je použit ještě další softwarový mezistupeň. Více bude tato problematika diskutována v následujících kapitolách.

2.2 Metody 3D tisku

Následující text představuje základní metody používané pro tvorbu objektů pomocí 3D tisku. Zaměřuje se na základní a nejvíce používané metody. Tyto technologie pracují na velmi podobném principu. Rozdíl je především ve způsobu tvorby jednotlivých vrstev a ve formě materiálu, který zpracovávají.

První skupinou jsou technologie pracující s materiálem v tekutém stavu kdy pomocí fotopolymerace dochází k tvorbě objektu (metoda SLA - stereolitografie). Dále se jedná o technologie FDM (fused deposition modeling), FFF (fused filament fabrication) kde sice materiál vstupuje v pevném stavu, ale je roztaven a objekt je tvořen pomocí tekutého materiálu, který následně opět ztuhne [7]. Dalším zástupcem je skupina technik IJP (ink jet printing), MJP (multi jet printing), MJM (multi jet modelling), které jsou velmi podobné, a v některých případech je používán pevný polymer, který je udržován ve vyhřívaném zásobníku v tekutém stavu a v jiném případě je použit tekutý fotopolymer vytvrzovaný zpravidla UV zářením [8].

Druhou skupinu tvoří technologie pracující s materiálem v práškovém stavu. U metod SLS (selective laser sintering, SLM (selective laser melting) nebo DMLS (direct metal laser sintering) dochází ke spojení částic materiálu pomocí energie laserového záření nebo elektronového paprsku. [7].

Třetí skupinou jsou metody 3D tisku pracující s materiálem ve formě tenkých vrstev materiálu, které jsou následně spojeny lepením. Tuto skupinu reprezentuje především metoda LOM (laminated object manufacturing) [7].

Existuje velké množství technologií 3D tisku, které neustále vznikají, některé se rozšířily, jiné zanikají, případně na své rozšíření teprve čekají. Takovou technologií je například tisk z materiálu obsahujícího živé buňky, který by měl umožnit tisk živých tkání a následně celých orgánů [9]. Dalším využitím je tisk ze stavebních materiálů, jako je beton a následně tisk budov [10]. 3D tisk nachází uplatnění i v oblasti umění, kde autoři dokáží kombinovat běžně nepoužívané materiály a technologie. Například Markus Kayser vytvořil svá díla na Sahaře, kde jako tiskový materiál sloužil písek a zdroj záření nutný k jeho roztavení nahradilo sluneční světlo koncentrované pomocí optické soustavy [11]. Metoda FDM není v následujícím přehledu blíže popsána a bude podrobněji rozebrána v samostatné kapitole.

2.2.1 Stereolitografie (SLA)

Stereolitografie je jedna z nejstarších metod 3D tisku. Vyvinula jí firma 3D Systems u jejichž počátků stál v roce 1986 výzkumný pracovník Charles W. Hull a podnikatel Raymond S. Freed. První komerční systém byl uveden na trh v roce 1988 (někdy uváděno již v roce 1987) [2].

Objekt se vytváří z tekutého materiálu, který obsahuje směs monomerů (z kterého je vytvářen objekt) a fotoiniciátoru. Účinkem, nejčastěji UV záření, dojde k rozpadu fotoiniciátoru na radikály, které spustí tzv. radikálovou polymerační reakci. Ta má za následek propojení monomerů a vytvoření pevné polymerní vrstvy. Důležité je, aby docházelo k dokonalému zesíťování původně tekutého monomeru pouze v ozářeném místě a jen do hloubky, která odpovídá stavební vrstvě tvořeného objektu. V poslední době se objevují monomery síťující pomocí kationtové polymerace, tyto materiály mají lepší mechanické a fyzikální vlastnosti, ale vyžadují delší expoziční časy nebo výkonnější zdroje záření [2].

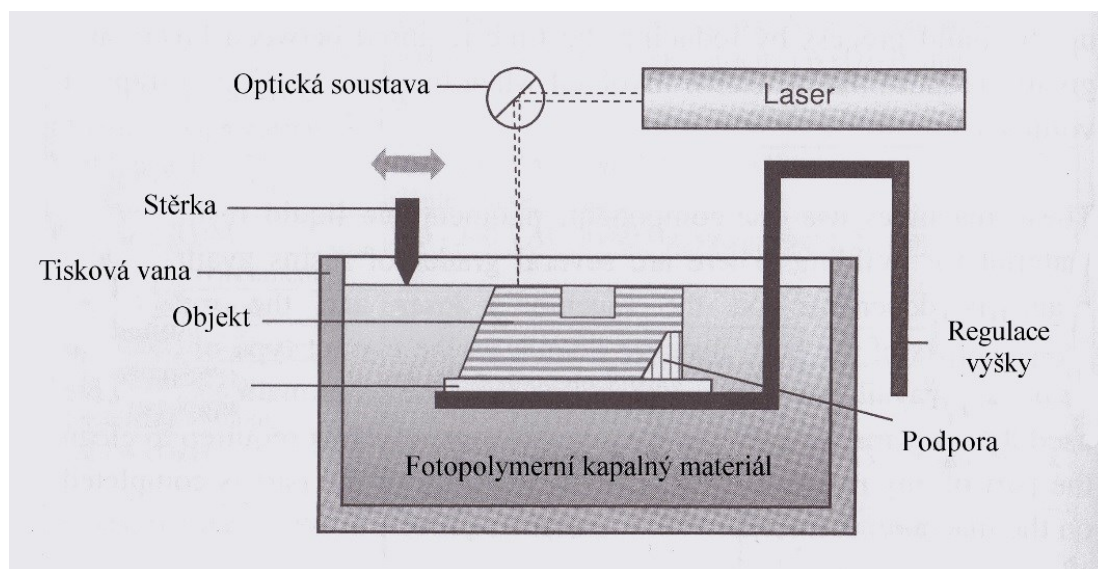
Po osvětlení dojde k poklesu objektu o výšku vrstvy, uhlazení hladiny polymeru a novému osvětlení. Zdrojem záření je laser, jehož paprsek je přesně směřován pomocí optické soustavy na hladinu polymeru, tak aby došlo ke správné expozici [12]. Paprsek při vstupu do materiálu ztrácí energii, vytvrzený objem tak má tvar přibližného paraboloidu (obr. 3) což nemá vliv na vnitřní strukturu materiálu, protože se paraboly překrývají, ale na bočních stěnách objektu vzniká typická textura složená z boků paraboloidů o výšce jedné vrstvy [13].



Obr. 3 Parabolický profil vytvářený laserem a bok objektu zhotoveného SLA [13]

SLA tiskárny jsou k dispozici ve velkém rozsahu velikostí od malých ($250 \times 250 \times 250$ mm) po velké ($1500 \times 750 \times 550$ mm) a poskytují jeden z nejlepších povrchů ze všech metod. Nevýhodou je nutnost tvorby podpor, které jsou ze stejného materiálu a musí se tedy navrhovat pro snadné odstranění jen jako podpůrné konstrukce. Hotový objekt zpravidla také vyžaduje dodatečné vytvrzení, po samotné výrobě je vytvrzen pouze z 65–90 % [2, 14].

Největším výrobcem je stále firma 3D Systems. Rozšířené tiskárny iPro™ 8000 a ProX™ 950 pracují s výškou vrstvy 0,05–0,15 mm a požívají jako zdroj energie laser o vlnové délce 354,7 nm a výkonu 1450 mW. Maximální rychlost tisku je v případě perimetru (hranic) objektu 3,5 m/s a v případě výplně 25 m/s [2].



Obr. 4 Princip metody SLA [2]

Materiály používané při této metodě jsou velmi různorodé. Zpočátku se používaly materiály na bázi akrylátu, které se vyznačovaly velkou smržitelností a následnou rozměrovou nepřesností. Byly nahrazeny epoxidy a především pryskyřicemi plněnými kovovými nebo keramickými částicemi. Tyto částice značně ovlivňují výsledné vlastnosti. Firma 3D Systems nabízí širokou škálu materiálů pod souhrnným obchodním názvem Accura® Stereolithography Materials. Vybrané vlastnosti vybraných materiálů jsou shrnuty v tabulce 1 [15, 16].

Tabulka 1 Vlastnosti materiálů pro SLA [16]

	Pevnost v tahu [MPa]	Pevnost v ohybu [MPa]	Tvrдость [Shore D]	Teplotní odolnost [°C]
Accura 55	50	77	86	53
Accura 25	38	58	80	63
Accura BlueStone	67	154	92	284
Accura PEAK	78	127	86	78

2.2.2 Solid ground curing (SGC)

Tato metoda je velmi podobná metodě SLA a využívá i stejné materiály. Základem je opět vytvrzení tekutého polymeru, ale celá vrstva je zde vytvářena najednou pomocí zdroje UV záření přes negativní masku. Maska je zpravidla skleněná destička, na kterou je elektrostaticky nanese barva. Osvícený polymer zesítuje, neosvícený tekutý polymer je odsáván, vzniklý meziprostor se vyplní voskem a povrch je ofrézován na požadovanou výšku vrstvy. Vosk slouží jako podložka pro novou vrstvu a současně vytváří podpůrnou konstrukci, která je na konci výroby objektu odstraněna. Výhodou je snadné přerušení tisku a případné odstranění chybné vrstvy. Nevýhodou je především rychlost tisku. [14, 17, 18].

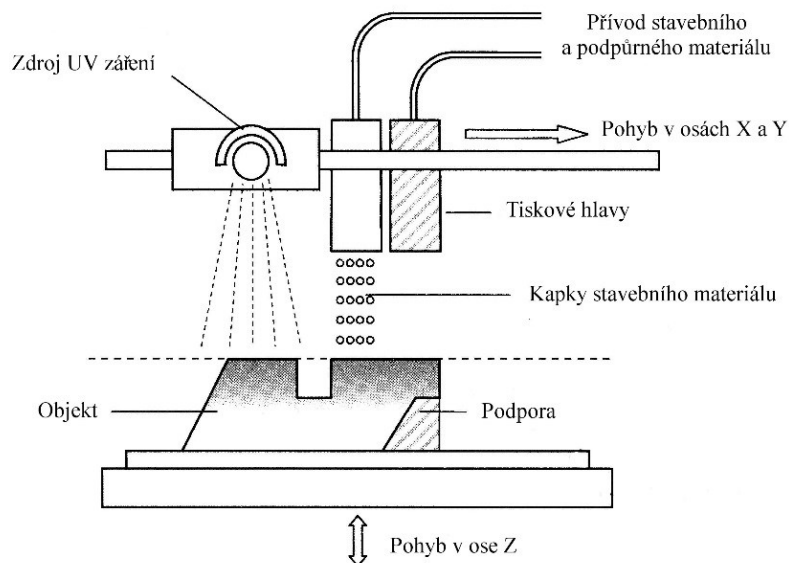
2.2.3 MultiJet printing/modelling (MJP/MJM)

MJP je další technika 3D tisku používající k tvorbě objektu tekutý polymer. Jedná se buď o roztavený materiál, který je za běžné teploty v pevném stavu anebo o fotopolymer který je vytvrzen pomocí UV záření jako v případě technologie SLA (technologie PolyJet). Metoda bývá také někdy označována MultiJet modelling (MJM) případně InkJet printing (IJP) [2].

Základem této technologie je tisková hlava obsahující několik desítek až stovek trysek generujících kapičky polymeru. Každá z trysek je řízena počítačem a dochází na ní ke generování kapky jen tehdy, má-li tvořit objekt. Tisková hlava se pohybuje nad nosnou deskou ve směru osy. Je-li tištěný objekt širší než tisková hlava, posouvá se ve směru osy Y tak, aby se vytvořil celý objekt. U některých zařízení obstarává pohyb v ose Y stavební podložka. Velký počet trysek zaručuje rychlé a rovnoměrné nanášení materiálu. Nanášený roztavený polymer ztuhne při styku s už naneseným materiálem téměř okamžitě. U variant používajících fotopolymer je vrstva vytvrzena UV zářením. Po vytvoření vrstvy klesne podložka s vytvářeným objektem o výšku vrstvy. Podpůrný materiál bývá z materiálů s nižší teplotou tání a je následně rozpuštěn. Tento materiál se používá i v případě fotopolymeru [19, 20]. Firma Stratasys se svojí produktovou řadou PolyJet začíná používat na podpůrné konstrukce materiál, který je rychle rozpustný ve vodní lázni [21].

Tato tisková metoda je velmi efektivní a tvorba objektů velmi rychlá. Výsledné objekty se vyznačují jednou z nejvyšších přesností z používaných technologií 3D tisku. Nevýhodou je malý stavební prostor. Kombinace malého stavebního prostoru a vysoké přesnosti předurčuje využití metody ve šperkařství a všude tam kde je potřeba výroba malých a velmi přesných objektů. Tiskárny firmy 3D Systems řady ProJet™ dosahují rozlišení 375–750 DPI v osách X a Y. V tomto případě se vzhledem k velkému množství trysek v řadě v pravidelných vzdálenost používá často termín rozlišení, ale někdy se s tímto termínem vyjadřujícím schopnost tisku nejmenších možných detailů setkáváme i u jiných metod. Výška vrstvy činí 0,016–0,032 mm [2, 17].

Hlavním výrobcem tiskáren a materiálů je zde opět firma 3D Systems, která dodává materiály řady VisiJet®. Dalším výrobcem je firma Solidscape s materiály řady Indura. Tyto dvě řady materiálů jsou zástupci termoplastů. Zástupci výrobců fotopolymerních materiálů jsou firma DSM Somos s materiály řady Somos®, firma Huntsman s materiály RenShape® a firma Objet Geometries s materiály řady FullCure, Vero a Tango. Přehled základních mechanických vlastností těchto dvou skupin materiálů používaných u této metody jsou v tabulce 2 [22].



Obr. 5. Princip metody MJM [2]

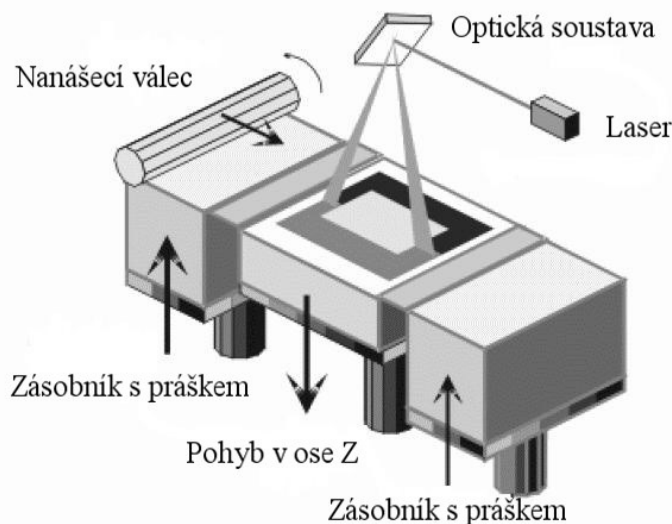
Tabulka 2 Přehled mechanických vlastností materiálů pro MJM [22]

	Termoplasty	Fotopolymery
Pevnost v tahu [MPa]	1,46–60,30	1,46–60,30
Prodloužení [%]	10,40–218,00	0,56–30,00
Pevnost v ohybu [MPa]	63,20–92,80	33,00–154,00
Tvrдость [Shore D]	81	63–97
Teplotní odolnost [°C]	46–56	42–85

2.2.4 Selective laser sintering (SLS)

Technologie SLS je jedna z prvních v oblasti 3D tisku. V roce 1987 vznikla firma DTM Corporation, která se zabývala vývojem SLS tiskárny. Tato firma odkoupila patent od University Texas v Austinu, kde Carl Deckard v roce 1989 vyvinul tuto metodu. V roce 1992 uvedla první použitelné zařízení na trh a v roce 2001 byla koupena firmou 3D Systems. Tato technologie využívá spékání práškového materiálu pomocí laseru. Laser ozařuje materiál, který tvoří objekt. Materiál je ve formě prášku a působením laseru dojde k jeho spečení. Neozářený prášek zůstává mimo objekt a slouží jako podpora. Při této metodě tedy není potřeba generovat podporu a tím pádem ani složité odstraňovat. Musí se ovšem myslet na otvory, kterými může být prášek vysypán z vnitřních uzavřených dutin objektu. Po dokončení vrstvy dojde k poklesu podložky s objektem o výšku vrstvy a na povrch je nanesen pomocí nanášecího válce nová vrstva materiálu. Objekty takto vytvořené vykazují vyšší pevnost než při použití metody SLA [2, 12].

Jako zdroj záření slouží většinou pulzní plynný CO₂ laser, používající vlnové délky 1000–1070 nm. Doba trvání pulzu je 0,1–200 ms o maximální energii 110 J a pulzní frekvenci 0,1–500 Hz [23]. Při sintrování (možno se setkat i s označením spékání či slinutí) dochází vlivem zahřátím práškového materiálu na vysokou teplotu, ale pod jeho teplotu tání, ke spojení částic pomocí povrchové difuze [2].



Obr. 6 Princip metody SLS [24]

Profesionální zařízení i u této technologie vyrábí firma 3D Systems. Její produktová řada nese označení Pro™ a cena začíná v přepočtu na 5 milionech Kč. Velikost stavební plochy se pohybuje od 381 × 330 × 457 mm do 550 × 550 × 750 mm. Používá CO₂ laser o výkonu v rozmezí 30–200 W. Výška vrstvy činí 0,08 až 0,15 mm. Rychlost tvorby objektu činí 900–5000 cm³/hod. [2, 25]. Další společností je firma Prodways. Její produktová řada ProMakers nabízí zařízení s podobnými vlastnostmi a srovnatelnou cenou [26].

V roce 2014 se na trhu objevily tiskárny Ice1 a Ice9 od firmy Norge Systems. Jejich cena se pohybuje v přepočtu kolem 260 000 Kč a 500 000 Kč, takže by měly být mnohem dostupnější pro širší segment trhu. Tyto tiskárny mají velikost stavební plochy 300 × 300 × 450 mm v případě Ice9 a v případě Ice1 se jedná o 200 × 200 × 250 mm. U modelu Ice9 činí výkon laseru 40 W a výška vrstvy 0,1 až 0,15 mm. Jako zdroj energie slouží běžných 220 V z elektrické sítě [25].

Existuje zde i volně šiřitelný projekt OpenSLS, který vytvořil tiskárnu z běžně dostupných (i cenově) komponent. Jako materiál bývá používán nylonový prášek. Pokusné objekty byly vytvořeny pomocí laseru o výkonu 400 mW, výška vrstvy činí 0,15 mm a rychlost tisku dosáhla hodnoty 58 mm/s [27].

Jako materiál lze použít jakýkoli prášek, který působením tepla měkne. Můžou být použity termoplasty jako například polykarbonát nebo polystyren. V případě kovů se může jednat například o molybdenový prášek, kde velikost částic činí 3–5 μm, nebo směs mědi a niklu o velikosti částic

10–30 μm a poměru 9:1. Dalším možným kovovým materiálem jsou ocelové prášky v polymerním pojivu. Používá se i slévárenský písek pro vytvoření pískových forem pro lití [12, 28].

Hlavními výrobci materiálů jsou firma 3D Systems (řady DuraForm®Plastic, LaserForm®Metal) a firma EOS (např. Alumide PA 12, CarbonMide PA 12, PEEK HP3 nebo Direct Metal 20). Přehled základních mechanických vlastností je v tabulce 3 [22].

Tabulka 3 Přehled mechanických vlastností materiálů pro SLS [22]

Pevnost v tahu [MPa]	19–470
Prodloužení [%]	1,4–151,1
Pevnost v ohybu [MPa]	30–89
Tvrdość [Rockwell L]	10–20
Teplotní odolnost [°C]	179–188

K této metodě existuje velmi podobná alternativa **Direct metal laser sintering (DMLS)**, kterou propaguje především firma EOS a která zpracovává výhradně kovové materiály. Tato firma produkuje řadu tiskáren pod označením EOSINT M2xx. Například tiskárna EOSINT M270 využívá CO₂ laser o výkonu 200 W, výška vrstvy činí 0,02 mm a velikost tiskového prostoru je 250 × 250 × 215 mm. Tato firma vyvinula i speciální materiály. Tři nejpoužívanější jsou Direct Metal 20 (práškový materiál na bázi bronzu), nerezová ocel GP1 a nástrojová ocel MS1 [29].

Některé vlastnosti těchto materiálů shrnuje tabulka 4.

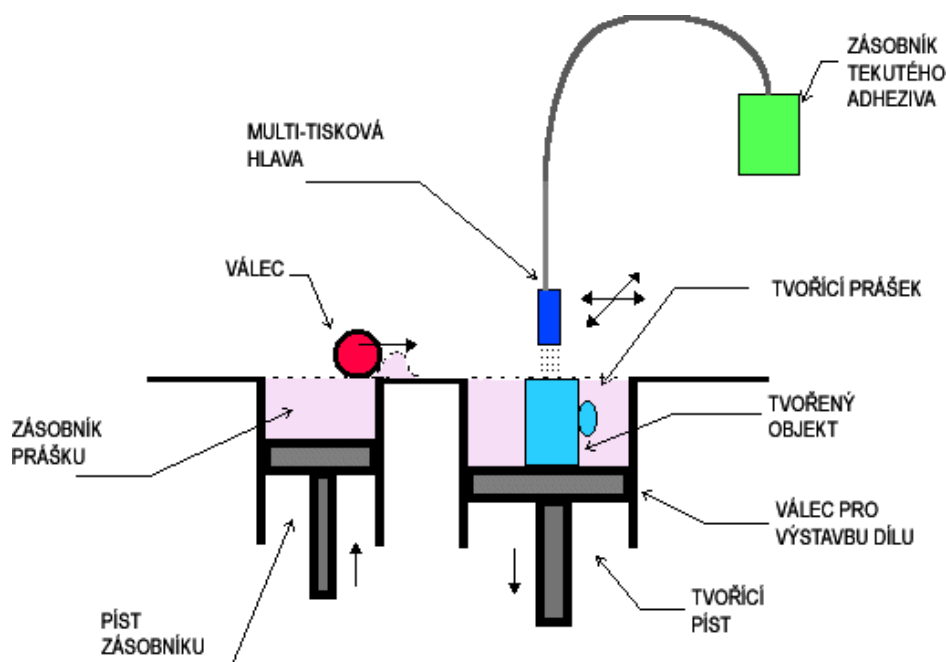
Tabulka 4 Vlastnosti materiálů pro DMLS [29]

	Direct Metal 20	Nerezová ocel GP1	Nástrojová ocel MS1
Min. tloušťka stěny [mm]	0,6	0,4	0,4
Mez pevnosti [MPa]	400	900	1100
Mez kluzu [MPa]	200	500	1000
Modul pružnosti [GPa]	80	190	180
Tvrdość	120 HV (Vickers)	23–33 HRC (Rockwell)	36–39 HRC (Rockwell)

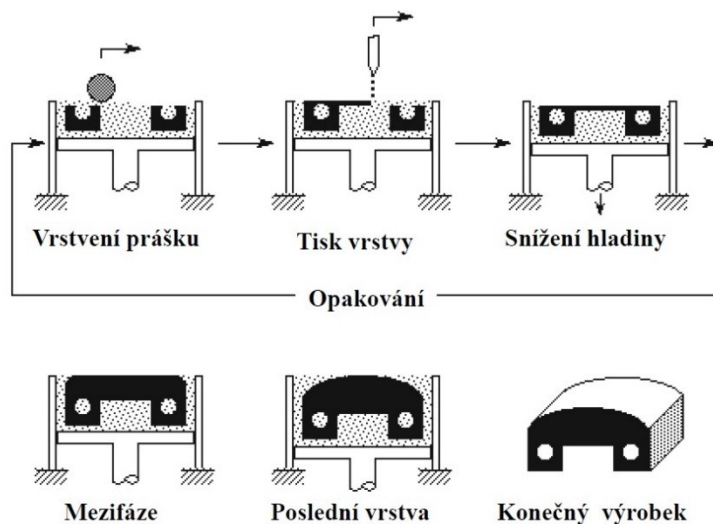
2.2.5 3D Printing (3DP)

3DP je skupina velmi podobných technologií, které jsou principiálně podobné s metodou SLS. Místo spojení materiálu ve formě prášku pomocí laseru, je tento prášek spojen pojivem. Toto pojivo je nanášeno pomocí klasické Ink Jet tiskové hlavy s vysokým rozlišením, jenž se používá v běžných 2D tiskárnách. Stejně jako u SLS nebo SLM se nanáší vrstva práškového materiálu, která je následně selektivně spojena podle tvaru objektu a následuje pokles tiskové podložky o výšku vrstvy a nanesení nového materiálu. Metoda tedy také nevyžaduje tvorbu podpor, tvoří je nespojený materiál. Tato metoda patří mezi pomalejší [17].

Nejvýznamnější firmou v této technologii je Z-Corporation, která ovšem od roku 2012 již také spadá po společnost 3D Systems. Hodnota rozlišení v osách X a Y je u jejich výrobků uváděna 600 Dpi a výška vrstvy činí 0,1 mm [30, 31].



Obr. 7 Princip metody 3DP [18]



Obr. 8 Proces výroby pomocí metody 3DP [18]

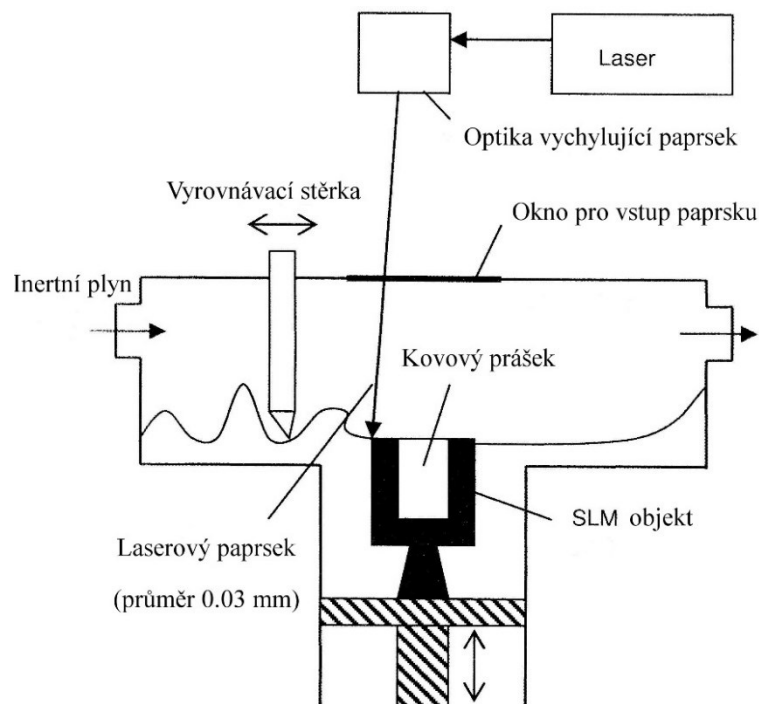
Materiály používané při této technologii jsou nejčastěji elastomery, kompozity, keramika a neželezné kovy. V případě kovů se jedná nejčastěji o výrobu tvarově složitých hliníkových dílů využívaných v automobilovém průmyslu. U objektů z kovů dochází po vytištění k vypálení, kdy se pojivo vypálí, a částice kovu jsou pomocí sinterování spojeny k sobě. Keramické materiály slouží pro výrobu forem na odlévání dílů v podstatě z jakéhokoli kovu [30, 31].

2.2.6 Selective laser melting (SLM)

Metoda je velmi podobná metodě SLS, jen nedochází ke spékání (slnutí) práškového materiálu, ale k jeho roztavení, spojení a následnému ztuhnutí. Dojde tedy k naprosté změně skupenství. Takto vytvořený objekt je mnohem pevnější a rozměrově přesnější než u SLS. Hlavním výrobcem je firma SLM Solutions GmbH. Výška vrstvy činí 0,02 mm až 0,2 mm v případě výkonnějšího zdroje energie. Rychlost tisku se pohybuje zhruba v rozmezí 15 cm³ až 70 cm³ za hodinu [2]. Jako zdroj tavení materiálu se používá ytterbium dopovaný vláknový laser o vlnové délce 1070 až 1090 nm a výkonu od 50W do několika kW [32]

Materiály zahrnují téměř všechny kovy, např.: nerezovou nástrojovou ocel, titan, hliník a další různé neželezné kovy v práškovém stavu.

Jako příklad použití můžeme uvést výrobu zlatých zubních korunek a můstků, při které se používá práškové zlato o velikosti částic od 4 μm do 45 μm [32].

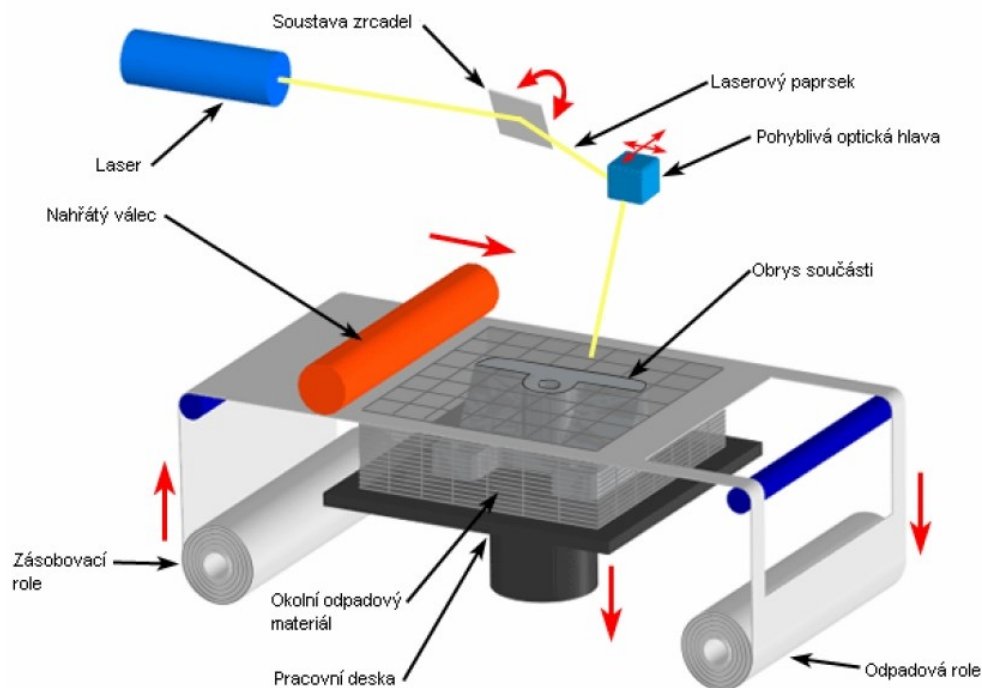


Obr. 9 Princip metody SLM [2]

Další variantou je **Electron beam melting (EBM)** u které je laserové záření nahrazeno elektronovým paprskem. Výhodou je absence pohyblivé optické zaměřovací soustavy, paprsek je vychylován pomocí elektrického pole. Celý proces probíhá ve vakuu za zvýšené teploty, čímž je dosaženo vynikající kvality. Hlavním výrobcem této technologie je firma Arcam, která byla založena v roce 1997. Firma vyvinula materiály obsahující například titan, kobalt, chrom, hliník, měď, nerezovou ocel či beryllium. Velikost stavebního prostoru je 200 × 200 × 180 mm a výška vrstvy činí 0,05 až 0,2 mm. Vyrobené díly jsou především určeny pro letecký a kosmický průmysl, své místo najdou i v medicíně pro výrobu kostních a kloubových implantátů [33, 34].

2.2.7 Laminated object manufacturing (LOM)

Počátky této technologie spadají do roku 1985, kdy jí vynalezl Michael Faygin pracující ve firmě Helisys Inc. Tato firma se dostala do finančních potíží a zanikla. Téměř okamžitě založil Michael Faygin v roce 2000 společnost Cubic Technologies, která se stala nejdůležitějším výrobcem zařízení pracujících na základě této technologie. Tato metoda je založena na principu vrstvení lepidivého materiálu. Materiál je nanesen na stavební podložku, pomocí CO₂ laseru je vyřezán příslušný tvar tištěného objektu odpovídající dané vrstvě a následně dojde k přitlačení vyhříváním válcem, čímž dojde k aktivaci lepidla na spodní straně materiálu a zafixování vrstvy na podložce (zalaminování). Následně dojde k poklesu stavební podložky o výšku vrstvy, což je v tomto případě tloušťka materiálu a nanese se nová vrstva. Po vyříznutí obrysu dojde opět k zalaminování vrstvy, která se tímto pevně spojí s předchozí vrstvou. Tímto způsobem je vystaven celý objekt. Přebytný materiál slouží zároveň jako podpora, ale jeho odstranění je náročné a pro snadnější manipulaci může být rozřezán laserem na menší díly v rámci výroby objektu. Materiál je zpravidla navinut na roli a dochází k rychlému převíjení a příprava nové vrstvy je časově nenáročná. Tato metoda je velmi rychlá, protože laser vyřezává jen obrys objektu a je vhodná pro velké objekty, nevýhodou je velké množství odpadního nevyužitého materiálu [2, 35].



Obr. 10 Princip metody LOM [15]

Dvě nejrozšířenější tiskárny firmy Cubic Technologies jsou typ LOM-1015Plus™ a LOM-2030H™. Následující tabulka 5 shrnuje jejich základní vlastnosti.

Tabulka 5 Přehled parametrů tiskáren firmy Cubic Technologies [2]

	LOM-1015Plus™	LOM-2030H™
Maximální velikost objektu [mm]	381 × 254 × 356	813 × 559 × 508
Maximální váha objektu [kg]	32	204
Výkon a typ laseru	25 W, CO ₂	50 W, CO ₂
Průměr laserového paprsku [mm]	0,20 – 0,25	0,20 – 0,25
Tloušťka materiálu [mm]	0,08 – 0,25	0,08 – 0,25
Šířka role materiálu [mm]	až 356	až 711
Potřebný prostor pro tiskárnu [m]	3,66 × 3,66	4,88 × 3,66

Na českém trhu je také dostupná tiskárna firmy Solidimension. Jedná se o model Solido SD 300 a vyznačuje se malými kompaktními rozměry srovnatelnými s běžnými inkoustovými nebo laserovými tiskárnami. Vzhledem k tomu může být umístěna například v kanceláři. Její princip je lehce odlišný. Tiskárna si odvine z role materiál na výrobu jedné vrstvy a následně pomocí lišty s tryskami rozprašujícími lepidlo přilepí materiál k základní desce. Místo laseru disponuje tiskárna vyřezávacím nožem, který vyřeže do nalepené folie obrys vrstvy modelu. Poté je pomocí 3 per nanesena speciální tekutina na plochu v místech, která nemají být součástí modelu a nebudou slepena. Základní deska klesne o výšku materiálu s lepidlem dolů, tiskárna si odvine další pruh materiálu a přilepí ho na stávající vrstvu. Po dokončení objektu je možné okolní materiál snadno odstranit. Tiskárna Solido SD 300 má vnější rozměry 450 × 725 × 415 mm a hmotnost 40 kg. Maximální velikost objektu je 160 × 210 × 135 mm a výška vrstvy činí 0,168 mm [36].

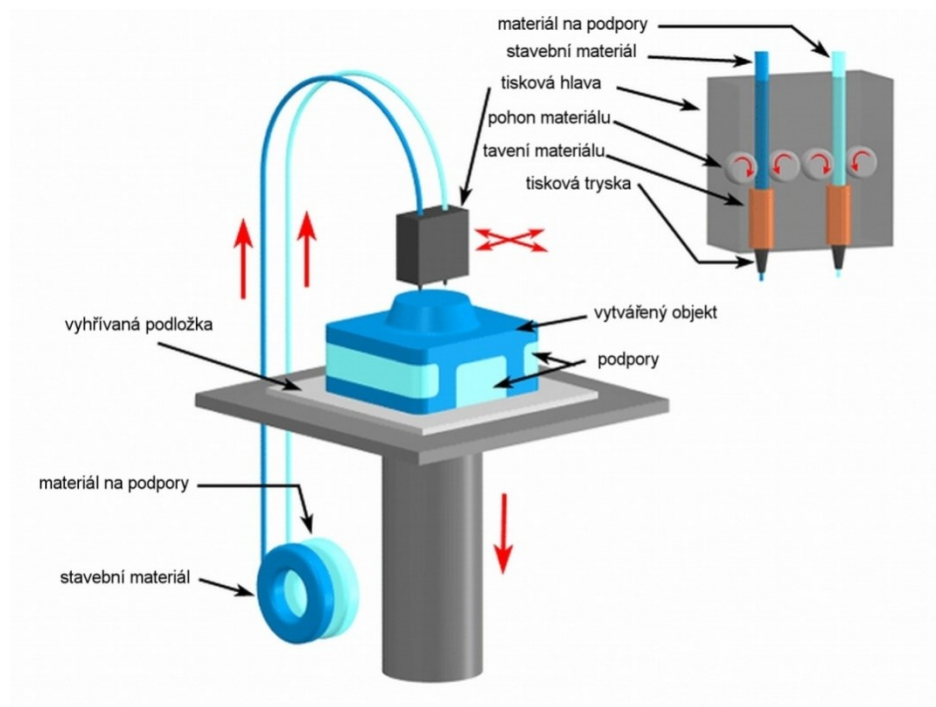
Materiálem pro tisk je nejčastěji, papír a polymerní folie. Je možné použít i tenké kovové folie. Tyto materiály mají na spodní straně naneseno teplem a tlakem aktivované lepidlo. V případě modelu z papíru má výsledný objekt dřevěný vzhled, snadno se opracovává, ale je vhodné objekt nalakovat.

2.3 Metoda FDM

2.3.1 Princip tisku pomocí FDM

Tato technologie je jednou z nejvíce rozšířených. Metodu včetně názvu si patentovala firma Stratasys a proto se lze setkat i označením FFF (Fused Filament Fabrication) [2]. Materiál je roztaven a tryskou nanášen ve formě tenkého vlákna na stavební plochu. Nanášený materiál se okamžitě ochlazuje, spojuje s předchozí vrstvou a tuhne. Výroba objektu opět probíhá po jednotlivých tenkých vrstvách. Zpravidla bývá vláknem vytvořen nejprve vnější obrys objektu v dané vrstvě. Následuje provedení výplně, která nemusí vyplňovat 100 % objemu objektu, ale může mít formu lehké vnitřní konstrukce, pro úsporu materiálu, odlehčení objektu a zrychlení tisku. Výška vrstvy se pohybuje již od 0,05 mm. Po dokončení vrstvy dochází buď k poklesu stavební plochy, nebo k zvednutí tiskové hlavy o výšku vrstvy a tvorbu vrstvy nové [38].

Z principu metody vyplývá nutnost vytváření podpor. V případě, že je tiskárna osazena jednou tiskovou hlavou, je možné podporu vytvářet například ve formě pilířů ze stejného materiálu jako hlavní objekt. Po tisku poté podpory mechanicky opatrně odstranit. Disponuje-li tiskárna dvěma hlavami, může být druhá hlava využita na tisk stejným materiálem, ale jinou barvou, nebo jiným materiálem, který je rozpustný například ve vodě a pomocí tohoto materiálu vytvářet snadno odstranitelné podpory. Druhou tiskovou hlavu, ale lze použít pro tisk jiným materiálem samotného objektu a objekt tedy může být složen ze dvou materiálů o různých vlastnostech [37].



Obr. 11 Princip metody FDM [37]

2.3.2 Materiály pro FDM

Materiál pro tisk metodou FDM je zpravidla termoplastický polymer, který je v některých případech kombinován s částicemi jiného materiálu. Nejrozšířenějšími materiály jsou ABS (akrylonitril butadien styren) a PLA (kyselina polylactonová – polyactic acid). Nabídka vhodných materiálů je velmi široká, následující výčet uvádí jen ty nejpoužívanější na 3D tiskárnách kategorie RepRap (pojem RepRap je více prodiskutován v kapitole 2.3.5). Materiál je používán ve formě tenké struny (drátu) navinutém na cívce. Nejčastěji používané průměry jsou 1,75 mm a 3,00 mm. Méně často je používán materiál ve formě pelet nebo již vytvořených ozubených tyčinek, které se za sebe automaticky zapojují v podavači. U materiálu používaného při metodě FDM ve formě struny se nejčastěji používá pojmenování filament, řidčeji drát nebo vlákno [39].

ABS (akrylonitril butadien styren)

Odolný amorfní termoplastický kopolymer, který vyniká dobrou odolností vůči mechanickému poškození. Je tuhý, houževnatý, málo nasáklavý, zdravotně nezávadný. Je odolný vůči kyselinám, louhům, uhlovodíkům, olejům, tukům. Zpracovávat ho lze až do teploty 280°C, poté dochází k chemickému rozkladu. Nevýhodou je vysoká hodnota smrštění, která se pohybuje od 0,3 do 0,7 %. Materiál se dá i lehce mechanicky opracovávat [40]. Typická teplota na trysce tiskového stroje se pohybuje od 210 °C do 260°C. Pro správné přichycení první vrstvy při tisku bývá často používána vyhřívaná stavební podložka a její teplota se pohybuje od 90°C do 110°C [41]. Materiál ABS se dodává v mnoha variantách a následující přehled udává jen některé, ale naznačuje možnosti použití.

- **ABS Plus:** pevnost v tahu až o 40 % vyšší než standardní ABS [42].
- **ABSi:** pro tisk průhledných objektů. Uplatňuje se obzvláště v automobilovém a leteckém průmyslu a při výrobě lékařských přístrojů [40].
- **ABS M30:** pevnost v tahu o 25 – 70 % vyšší než standardní ABS, která umožňuje tisk plně funkčních dílů. V případě výroby prototypů dílů jsou testy těchto výtisků mnohem více realistické v porovnání s vlastnostmi sériově vyráběných dílů za použití technologie vstřikování [40].
- **ABS-ESD7:** jedná se o materiál s disipativními vlastnostmi (je schopen nahromaděný náboj pomalu rozptýlovat po celém povrchu materiálu), který je určen pro aplikace, kde by mohl statický náboj poškodit další součásti či vést k explozi.[40].

PLA (kyselina polylactonová – polyactic acid)

Semikrystalický termoplastický polymer, vyráběn z obnovitelných zdrojů jako například kukuřičný škrob nebo cukrová třtina. Jeho výhodou je schopnost se pomocí účinků povětrnosti a mikrobiálních procesů rozštěpit na oligomery a následně až na samotné monomery. Je tedy zcela ekologický. Další jeho výhodou je velmi malá hodnota smrštění z důvodu minimální rozpínavosti při ohřevu.[43]. Tato vlastnost umožňuje tisk rozměrově větších objektů bez následných deformací vzniklých chladnutím

a rovněž rozměrová přesnost je vyšší. Další výhodou, jež z této vlastnosti plyne, je možnost absence vyhřívané podložky. V praxi se ovšem podložka vyhřívá na teplotu do 60 °C a to především u objektů, které nemají příliš rozměrnou základnu.

Teplota na trysce se pohybuje v rozmezí od 180 °C do 220°C. Teplota skelného přechodu T_g tohoto materiálu se pohybuje od 60 °C do 65 °C což má za následek, že objekty nejsou příliš teplotně odolné a jejich využití je především vhodné pro výrobu modelů než funkčních dílů. Materiál rovněž vykazuje vyšší hodnotu koeficientu tření v roztaveném stavu a vyžaduje tedy pro přísun materiálu motor s dostatečným krouticím momentem. [44, 45].

PC (polykarbonát)

Materiál, jehož výhodou je vysoká pevnost, nárazu odolnost a tepelná odolnost. Jeho aplikace v RepRap tiskárnách je na hranici použití z důvodů ještě větší tendence ke kroucení při chladnutí než v případě ABS a vyšší teplotě tání, která vyžaduje teplotu na trysce přibližně 270 °C, při vyšších rychlostech tisku až 300 °C. Hodnota teploty skelného přechodu T_g je zhruba 150 °C. Teplota vyhřívané podložky se pohybuje od 120 °C do 130 °C. Jedná se o materiál velmi hygroskopický, který je tedy zapotřebí skladovat v suchém prostředí (ideálně ve vzduchotěsném obalu). Vlhkost způsobuje tvoření bublin při vytlačování materiálu a následně horší kvalitu tisku. [46, 47].

K dispozici je i materiál vytvořený kombinací polykarbonátu a ABS (PC-ABS), který výhodně kombinuje vlastnosti obou materiálů. [40].

PA (polyamid, nylon)

Materiál je vhodný pro 3D tisk součástí pro pokročilé aplikace. Lze vytvářet pokročilé prototypy a vlastní nástroje, které se vyznačují značnou houževnatostí a vysokou odolností při cyklickém namáhání. Další výhodou je chemická odolnost. Materiál vyžaduje vyšší teplotu na trysce jako v případě polykarbonátu, teplota vyhřívané podložky se pohybuje od 100 °C do 110 °C. Nevýhodou tohoto materiálu je sklon k nedostatečnému spojení vrstev objektu a může docházet k rozpadu výtisku na jednotlivé vrstvy. [40, 48].

PETG (polyetylen tereftalát – glykol)

Dokonale transparentní amorfni kopolyester, který vyniká dobrou odolností vůči mechanickému poškození. Je tuhý, houževnatý, odolný proti nízkým i vysokým teplotám, minimálně nasákavý a zdravotně nezávadný. Je odolný vůči zředěným roztokům kyselin a zásad. Teplota na trysce se pohybuje od 210 °C do 240 °C a teplota skelného přechodu T_g je přibližně 80 °C. Tyto vlastnosti řadí materiál PETG svými tiskovými vlastnostmi mezi ABS a PLA. Teplota vyhřívané podložky je doporučována kolem 60 °C, ale není nutná. Bývá uváděna silná přilnavost k podložce a obtížné snímání hotového objektu. [49, 50].

TPE (termoplastický elastomer)

Termoplastické elastomery (TPE) jsou směsi vyrobené z tvrdých termoplastických polymerů s měkkým kaučukovým materiálem. Typický TPE je měkký a pružný. Výsledný objekt je pevný a pružný zároveň. V současné době existuje značné množství různých druhů termoplastických elastomerů. Nejčastěji používanými pro tisk jsou TPE-E (kopolyesterová směs) a TPE-U (termoplastický polyuretan). Nejčastěji se teplota nastavená na trysce pohybuje mezi 200 °C – 240 °C. Doporučená teplota podložky je v rozmezí 80 °C – 100 °C. [51].

Materiály používané na podpory

V případě tisku objektu, který vyžaduje podpurné konstrukce, jež zabrání pokládání vlákna do prázdného prostoru, existují dva možné přístupy. První přístup využívá pro podporu stejný materiál jako pro samotný objekt. Druhý přístup využívá jiný materiál (za předpokladu 3D tiskárny jež obsahuje dvě tiskové hlavy) a nejčastěji jsou používány dva následující.

- **HIPS: High Impact Polystyren** – je houževnatý polymer složený z polystyrenu a kaučuku. Tento materiál je kvůli obsahu kaučuku velmi náchylný na stárnutí a nedoporučuje se tento materiál používat na venkovní aplikace. Teplota na trysce je kolem 240 °C a teplota podložky je doporučena 100 °C. Tento materiál se používá nejčastěji v kombinaci s ABS, kdy jsou následně podpory vytvořené z materiálu HIPS rozpuštěny v limonenu. V případě, že požadavky kladené na výsledný objekt jsou bližší materiálu HIPS, lze tisknout podpory z ABS a ty následně rozpustit v acetonu. Není to však příliš častá aplikace. Jako materiál pro tisk objektu může být použit i PLA, ale zde může být nevýhodou vysoká teplota podložky nutná pro HIPS, jež je vyšší než teplota měknutí PLA a záleží tedy především na charakteru tištěného objektu. [49, 52].
- **PVA: polyvinyl alkohol** – materiál, který bývá použit výhradně pro tisk podpor. Jeho výhodou je velmi snadná rozpustnost ve vodě. Tato vlastnost je současně jeho nevýhodou a vyžaduje skladování v suchém prostředí. Teplota na trysce se pohybuje v rozmezí 160 °C – 200 °C a teplota podložky 0 °C – 50 °C. Je tedy vhodný pro kombinaci jak s ABS tak s PLA a případně i jinými materiály. [49, 52].

Tabulka 6 Vybrané vlastnosti základních materiálů pro FDM [40, 49, 51, 58, 59]

	Pevnost v tahu [MPa]	Tažnost [%]	Hustota [kg/m ³]	Teplota tání [°C]	Teplota skelného přechodu T _g [°C]
ABS	27 – 65	1,5 – 110	1010 – 1210	270 – 300	85 – 125
PLA	10 – 60	1,5 – 380	1210 – 1430	150 – 160	45 – 65
PC	55 – 75	100	1200 – 1220	267	150
PA	40 – 50	200 – 300	1130	225	45
HIPS	20 – 50	25 – 60	1050	230	100
PVA	67 – 100	0 – 300	1190 – 1310	163	62

Ostatní tiskové materiály

Existuje celá řada řidčeji používaných materiálů používaných na RepRap 3D tiskárnách, ale i pro aplikace na mnohem sofistikovanějších zařízeních využívajících pro tisk metodu FDM.

Velká skupina těchto materiálů je založena na přidávání pevných částic do různých polymerů bez vzájemné chemické reakce.

Pro tisk pomocí RepRap tiskáren jsou nejčastěji využívány materiály plněné dřevěnými nebo křídovými částicemi. Je to z důvodu abrazivních vlastností částic, které příliš nepoškozují (neopotřebovávají) mosazné trysky používané v těchto tiskárnách.

V případě dřeva jako plnidla se jedná například o materiály Laywoo-D3 nebo WPC (wood plastic kopolymer). Výsledný vzhled objektu napodobuje celodřevěné výrobky. Teplota tisku se pohybuje v rozmezí 180 °C – 240 °C a ovlivňuje výsledný vzhled. Za nižší teploty je objekt světlejší za vyšší teploty naopak tmavší. Podíl dřevěného prášku se pohybuje kolem 40 %. [52, 53].

Příkladem materiálu obsahujícího křídové plnidlo je Laybrick. Výsledný objekt připomíná povrch keramiky. Teplota tisku se pohybuje v rozmezí 160 °C – 210 °C a ovlivňuje konečný povrch. Za teploty nepřesahující 195 °C je povrch výtisku hladký, při teplotě 210 °C naopak hrubý. Nevýhodou materiálu je vysoká křehkost výsledného objektu. [54, 55].

Vývoj materiálů použitelných při tisku technologií FDM, jenž ale nejsou příliš vhodné pro použití na RepRap tiskárnách se zaměřuje na materiály s lepšími termálně mechanickými vlastnostmi, než jaké dosahují samotné polymery. Výzkum je veden ve dvou hlavních směrech, kombinace polymerů s kovy a kombinace polymerů s keramickým materiálem. [56].

V počátečních fázích výzkumu se experimentovalo s kovy s nízkou teplotou tání bez jakéhokoliv polymerního pojiva, ale docházelo k problémům v důsledku nízké viskozity a povrchového napětí roztaveného kovu. Tyto vlastnosti měly za následek především potíže s ucpáváním trysky při tisku. Výzkum se tedy zaměřil na kombinaci polymerů a kovového či keramického materiálu ve formě prášků. [7].

Železo/nylon – filament je vytvořen ze směsi práškového železa o velikosti částic 20 – 50 μm a práškového nylonu o velikosti částic 500 – 800 μm. Výsledný materiál dosahuje především vyšší tepelné vodivosti než samotný polymer. Tepelná vodivost samotného nylonu činí 0,23 Wm⁻¹K⁻¹, samotného železa 72 Wm⁻¹K⁻¹ a například směs obsahující 40 % Fe 0,99 Wm⁻¹K⁻¹. [58].

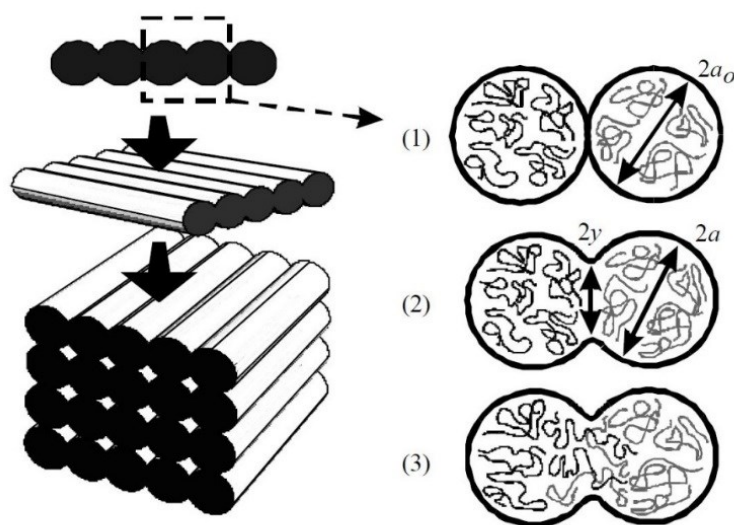
Železo/ABS a měď/ABS – filament je tvořen směsí práškového železa nebo mědi o velikosti částic 10 – 45 μm a práškového ABS. Výsledný materiál opět dosahuje především vyšší tepelné vodivosti než samotný polymer. Tepelná vodivost směsi obsahující 30 % Cu je přibližně 2,6 Wm⁻¹K⁻¹. [56].

Keramika/polymer – jedná se o keramické částice rozptýlené v polymerním pojivu. Díky polymeru lze provést tisk na tiskárně FDM, následně je vytištěný objekt vystaven účinku vysoké teploty, polymerní pojivo vypálené a keramické částice pospojovány následkem sintrování. Jako materiály jsou zkoušeny například nitrid siřičitý (Si₃N₄), křemičité sklo, karbidy wolframu, oxid hlinitý (Al₂O₃) nebo piezoelektrické keramické materiály (směs dvou tuhých roztoků zirkoničitanu olovnatého – PbZrO₃ a titaničitanu olovnatého – PbTiO₃). [7].

2.3.3 Spojování vláken materiálu

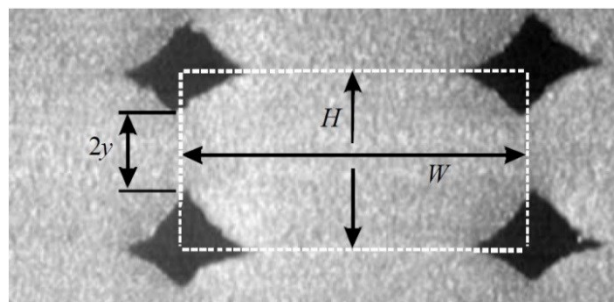
Spojení nanášených vláken je základním předpokladem pro vytvoření objektu metodou FDM a kvalita tohoto spojení rozhoduje o mechanických vlastnostech tištěného objektu.

Důležitou roli má vzájemná vzdálenost pokládaných vláken a jejich teplota. Vzájemnou vzdálenost ovlivňují viskózní charakteristika zahřátého materiálu a řídicí programový kód ovládající tiskovou hlavu. Rozeznáváme různé druhy spojení. Pokud dochází jen k povrchovému kontaktu vláken, je pevnost spojení jen nepatrná (Obr. 12 – 1). Jsou-li vlákna tak blízko u sebe, že dochází k částečnému překrytí (vlivem gravitace nebo nastavení dráhy tiskové hlavy) a teplota je nižší než teplota skelného přechodu daného materiálu, pak dochází k těsnému spojení vláken prostřednictvím spojovacího krčku. V tomto případě nedochází k vzájemnému promíchání molekul vláken (Obr. 12 – 2). Jsou-li vlákna tak blízko u sebe, že nastává překrytí a teplota vláken přesahuje teplotu skelného přechodu daného materiálu, dochází k pevnému spojení prostřednictvím molekulární difuze a molekuly z obou vláken se náhodně promísí (Obr. 12 – 3). Důležitá je tedy i teplota bezprostředního okolí tištěného objektu a do jisté míry i dostatečná rychlost tisku, která nedovolí, aby dříve položené vlákno příliš vychladlo.[60, 61].



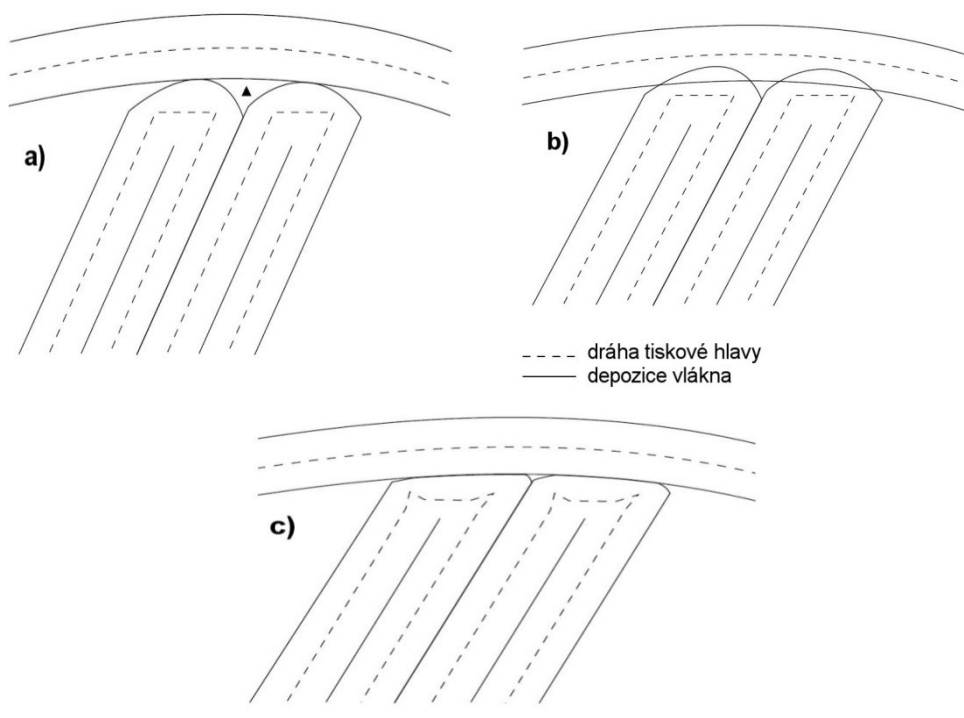
Obr. 12 Proces spojování vláken: 1) povrchový kontakt, 2) růst krčku, 3) molekulární difuze, $2a$ je dvojnásobek poloměru vláken, $2y$ šířka spojovacího krčku [43]

Z důvodu kvalitnějšího spojení materiálu ve všech směrech, nesmí docházet ke vzniku vzduchových mezer mezi vlákny. Vzduchové mezery nicméně nelze zcela vyloučit. Nelze vždy zajistit úplné vyplnění zamýšleného prostoru či plochy. Určitá míra nevyplnění vychází z principu této tiskové metody a závisí na tvaru objektu a následně na vygenerovaném kódu pro řízení tiskové hlavy. Jedním z limitujících faktorů je kruhový až oválný průřez vlákna. Takto nevyplněná místa znázorňuje obr. 13.



Obr. 13 Nevyplněný prostor mezi vlákny. $2y$ – velikost spojovacího krčku, H – výška vlákna, W – šířka vlákna [60]

Další příčinou je tloušťka vlákna a velikost poloměru jeho ohybu, nicméně vhodným algoritmem pro generování dráhy lze velikost nepokryté plochy částečně omezit, jak ukazuje obr. 14. Na obr. 14a) a 14b) je znázorněna základní dráha tiskové hlavy při výplni zakřiveného prostoru kdy dochází k nevyplnění velké části plochy nebo naopak k přeplnění velkým množstvím materiálu. Na obr. 14c) je již modifikovaná dráha, kdy je dosahováno mnohem lepšího vyplnění požadovaného prostoru.

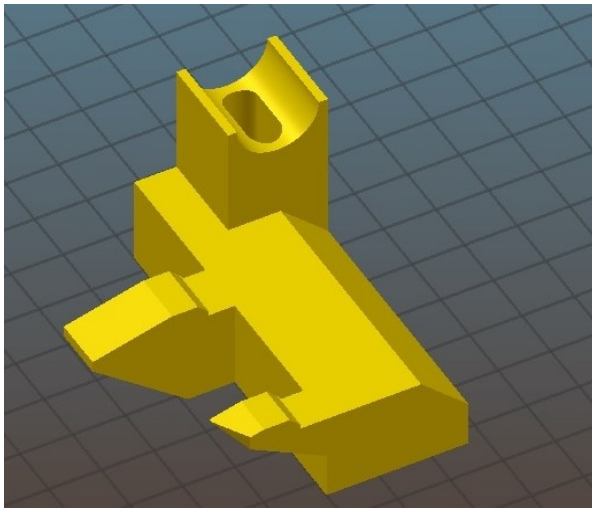


Obr. 14 Závislost vyplnění objektu na dráze tiskové hlavy [62]

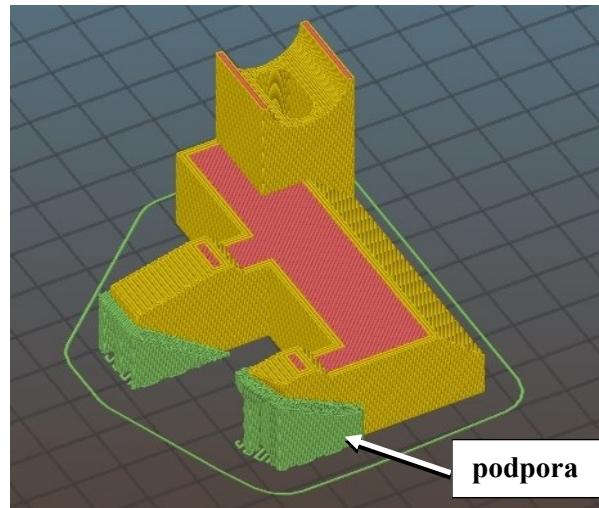
2.3.4 Tvorba objektu

Jak již bylo uvedeno, na počátku tisku objektu je počítačový model ve formátu STL. Při následném softwarovém zpracování definujeme, jakým způsobem objekt vytiskneme. V mnoha případech se netiskne plný objekt, jen je vytištěna jakási skořepina, jejíž tloušťku si nadefinujeme. Vnitřek objektu je vyplněn řidší volitelnou výplní, která ponechává objektu určitou tuhost a pevnost, ale zároveň snižuje množství potřebného materiálu a snižuje dobu tisku.

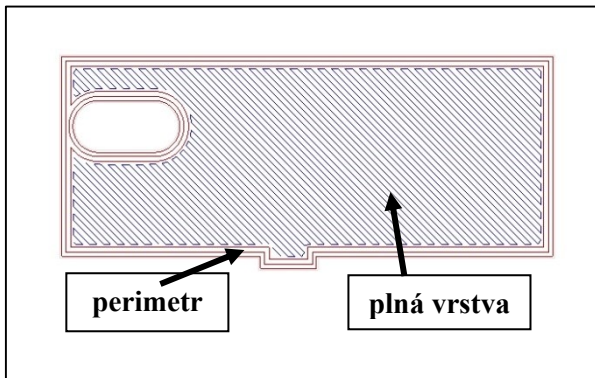
Následně je objekt virtuálně rozřezán na vrstvy, které jsou vysoké, tak jak požadujeme, přičemž se výška pohybuje od 0,05 mm do hodnoty, která by neměla být větší než je průměr trysky na tiskové hlavě. V případě RepRap tiskáren se průměr trysky nejčastěji pohybuje od 0,2 mm do 0,5 mm. Výška vrstvy určuje úroveň detailů, které jsme schopni vytisknout a velikost takzvaného staircase efektu (schodovitost) u zaoblených objektů. Na druhou stranu čím je výška vrstvy nižší, tím je tisk náročnější na čas. Pro každou vrstvu je vygenerován řídicí kód, který definuje pohyb tiskové hlavy a množství vytlačovaného materiálu. Následující obrázky 15 – 18 názorně ukazují demonstrační objekt, pohled na jeho celkové provedení tisku včetně podpor a názorné provedení vrstev. Lze volit počet obvodových vrstev (perimetrů), počet plných spodních a horních vrstev s jejich orientací, hustotu a provedení výplně. Těmito parametry lze ovlivnit výsledné vlastnosti objektu. Obr. 15 až 18 byly vytvořeny pomocí softwaru Sli3er verze 1.2.9.



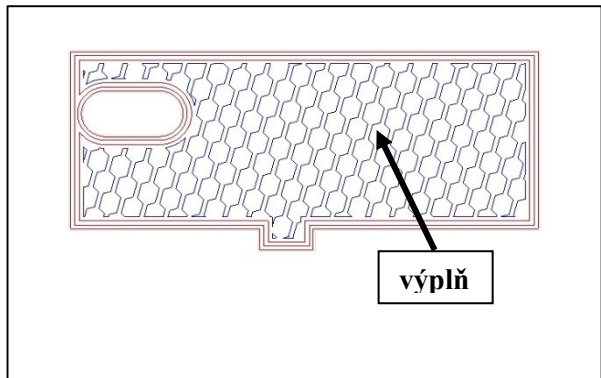
Obr. 15 Tvorba objektu – model tištěného objektu



Obr. 16 Tvorba objektu – tiskový náhled

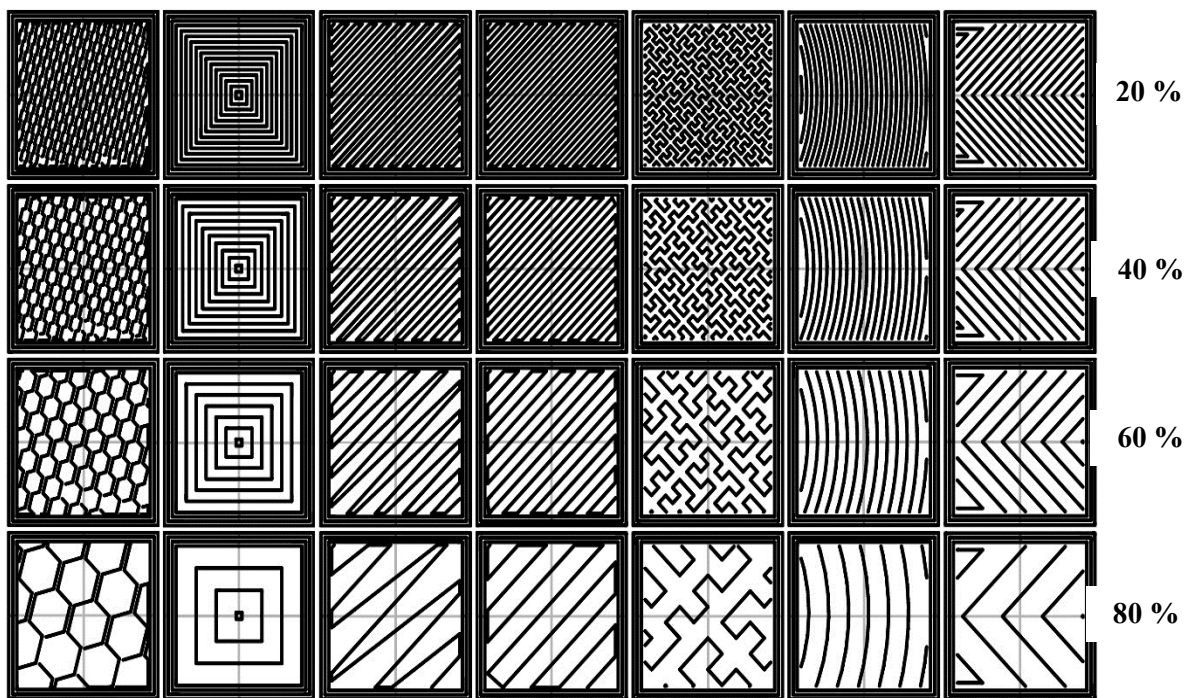


Obr. 17 Tvorba objektu – plná vrstva



Obr. 18 Tvorba objektu – vrstva s výplní

Následující obrázek 19 znázorňuje příklady provedení a hustoty výplně objektu.



Obr. 19 Příklady provedení a hustoty výplně objektu [65]

2.3.5 Projekt RepRap

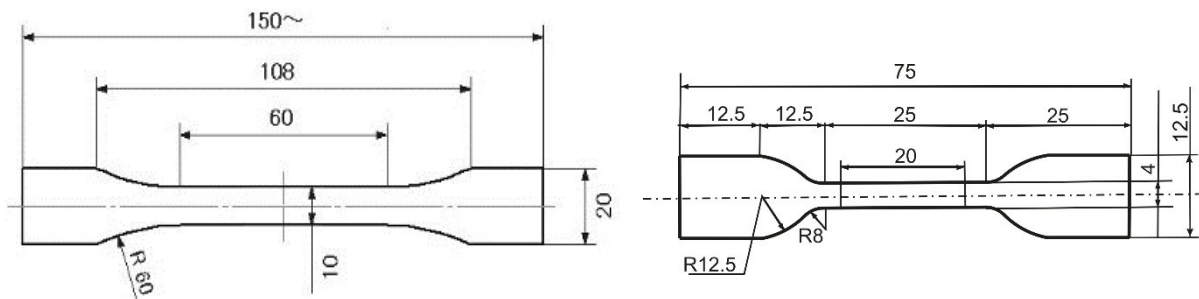
RepRap (replicating rapid prototyper) projekt spustil Adrian Bowyer v roce 2005 na univerzitě v Bathu ve Velké Británii. Jedná se o mezinárodní komunitní projekt, jehož cílem je vytvořit a dále vyvíjet zařízení na rychlou výrobu prototypů, které bude částečně schopno vyrobit samo sebe. Výsledkem byla první Reprap tiskárna Darwin. Vývoj spočívá nejen v hardwaru, ale i v softwaru, který je potřeba jak pro přípravu dat, tak k samotnému řízení tiskárny. Na vývoj hardware se přenesl princip licence využívaný u svobodného softwaru – GNU General Public License (všeobecná veřejná licence GNU). Vývoj konstrukce se zaměřil směrem k co největší dostupnosti v podstatě pro každého. Dokumentace je naprosto otevřená, každý může přispět s nějakou úpravou konstrukce nebo softwaru a tím dochází k neustálému vývoji. Software v těchto konstrukcích, ale nemusí být nutně svobodný. Tyto skutečnosti přispěly k velkému rozšíření jednoduchých 3D tiskáren a jejich zpřístupnění téměř každému [63, 64].

2.4 Hodnocení kvality FDM 3D tisku

2.4.1 Pevnost objektu

Hodnocení pevnosti objektu vyrobeného na 3D tiskárně je důležité v případech kdy je potřeba posoudit zda jeho mechanické vlastnosti vyhovují zamýšlenému účelu.

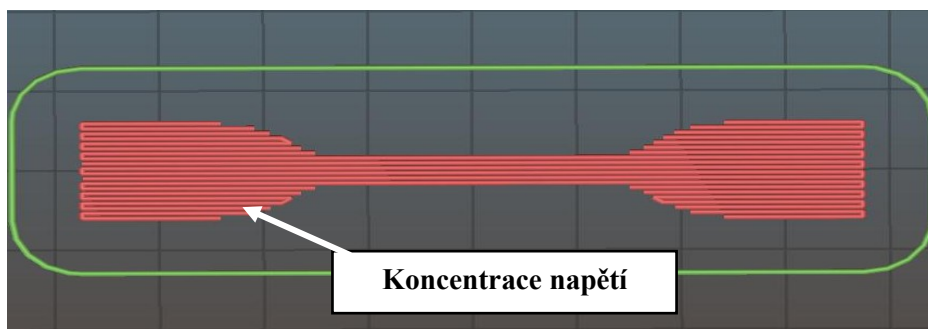
Pro tyto účely se zpravidla provádí měření v souladu s normou ISO 527-2, která je primárně určena pro stanovení charakteristik tvářených a vstříkovaných plastů. Tato norma stanoví několik typů vzorků, přičemž nejpoužívanějšími jsou vzorky označené 1A a 5A. Jejich rozměry jsou patrné z obrázku 20 a doporučená tloušťka u vzorku 1A je minimálně 4 mm a u vzorku 5A 2 mm. [49, 66].



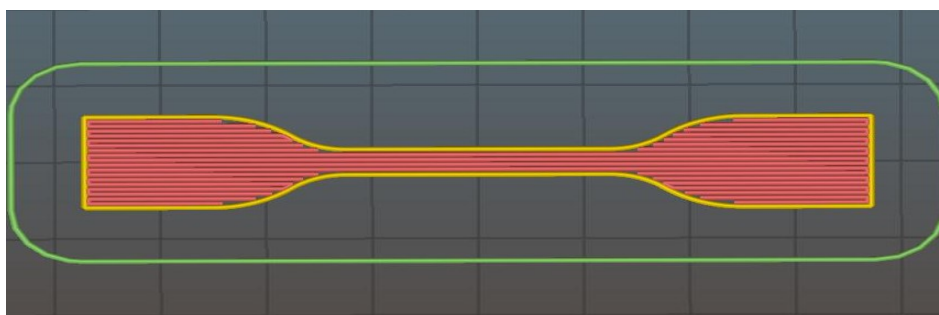
Obr. 20 Vzorky 1A (vlevo) a 5A (vpravo) dle normy ISO 527. [66]

Vzhledem k možnosti volby orientace vláken v objektu, lze vyhodnocovat pevnost s ohledem na pevnost materiálu jako takového, nebo vyhodnocovat míru schopnosti 3D tiskárny spojování jednotlivých vláken.

S. Ahn a kol. [67] ve své práci dokazuje, že hodnota pevnosti ve směru vláken dosahuje hodnoty 80 % oproti výrobku zhotovenému za pomoci technologie lití nebo vstříkování polymerního materiálu (v tomto případě konkrétně ABS). V případě, že zatěžování probíhalo kolmo na průběh vláken, dosahovala hodnota pevnosti jen přibližně 30 %. S. Ahn a kol. [67] také dokazuje, že pokud je standardní tvar vzorku vytisknut tak jak ukazuje obrázek 21, tedy všechna vlákna podélně, dochází k porušení vzorku při zkoušce v nesprávném místě vlivem koncentrace napětí v zaoblené části a je proto nutné buď tvar vzorku modifikovat na zcela obdélníkový, nebo použít alespoň jedno obvodové vlákno na každé vrstvě (perimetr) – obr. 22.

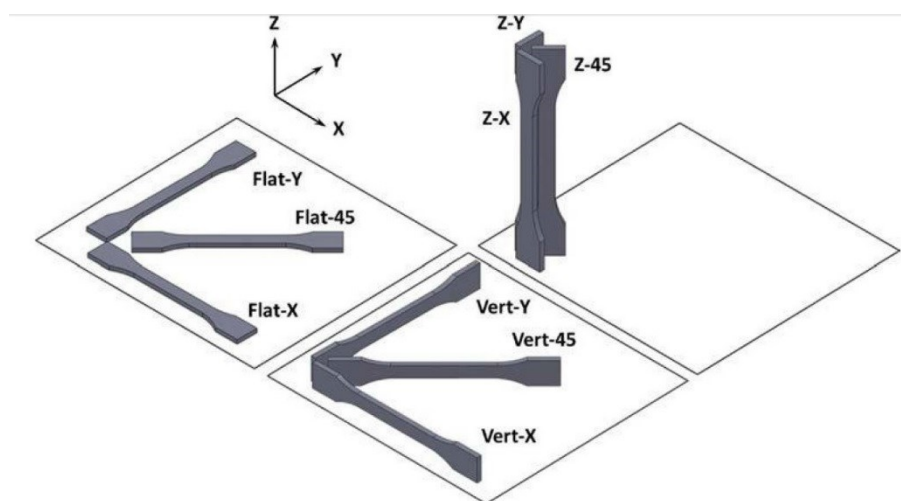


Obr. 21 Model vzorku na test pevnosti bez perimetru



Obr. 22 Model vzorku na test pevnosti s perimetrem

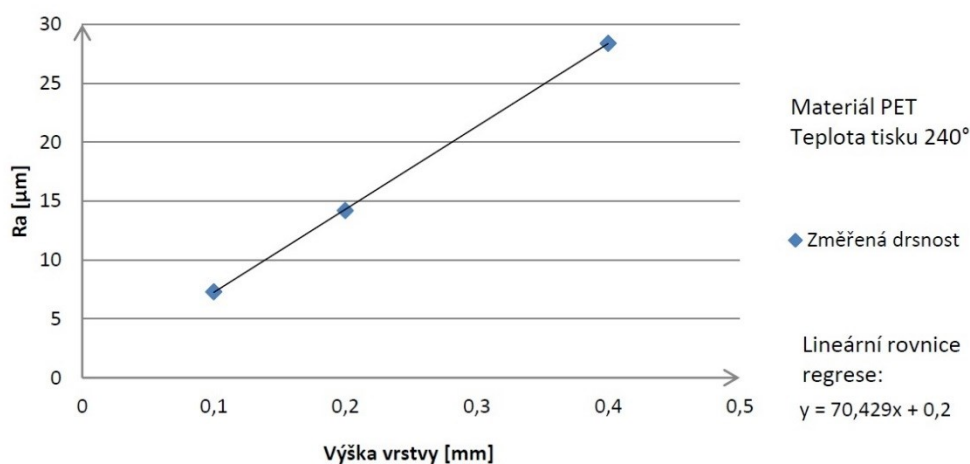
Při tisku testovacích vzorků se tedy téměř vždy používají perimetry a nejrůznější varianty orientace vláken. Případně i různé druhy a hustoty výplně. Tyto experimenty pomáhají stanovit jak daný objekt orientovat na tiskové podložce, jaký použít směr vláken a jak nadefinovat výplň tak, aby výsledný objekt nejlépe splňoval požadavky na něj kladené. Možná umístění na tiskové podložce znázorňuje obrázek 23. Vzorky umístěné nastojato v pravé části obrázku jsou určeny pro test pevnosti spojení jednotlivých vrstev a umožňují tedy vyhodnotit schopnosti dané 3D tiskárny. [68].



Obr. 23 Možnosti umístění zkušební vzorku na tiskové ploše. [68]

2.4.2 Kvalita povrchu

Povrch objektu vytištěného metodou FDM je ovlivněn samotným principem této metody. Povrch modelu je tvořen jednotlivými vlákny materiálu. Pouze strana objektu, která je v kontaktu s tiskovou podložkou vykazuje hladší povrch. Tento jev je obzvláště výrazný pokud je tato podložka vyhřívána a tím dojde k dokonalému spojení vláken. Povrch objektu poté v podstatě kopíruje povrch podložky. Objekt vzhledem k určité nenulové výšce vrstvy trpí v zaoblených oblastech ve vertikálním směru tzv. schodovitostí (staircase effect). Tento jev je tím větší, čím je větší výška vrstvy. Bylo dokázáno, že drsnost povrchu bočních stěn objektu je závislá na výšce vrstvy. [49]. Vzhledem k tomu, že materiál vycházející z trysky má konstantní obsah průřezu, lze předpokládat při nižší výšce vrstvy širší vrchní stranu vlákna a tím i menší drsnost povrchu na vrchní straně objektu.



Obr. 24 Závislost drsnosti povrchu R_a na výšce vrstvy. [49].

Hodnota drsnosti povrchu R_a je definována jako střední aritmetická odchylka od teoretické ideální roviny povrchu a bývá udávána v mikrometrech (μm). Její hodnota bývá získávána pomocí profilometrů, které dělíme na dotykové a bezdotykové. [69].

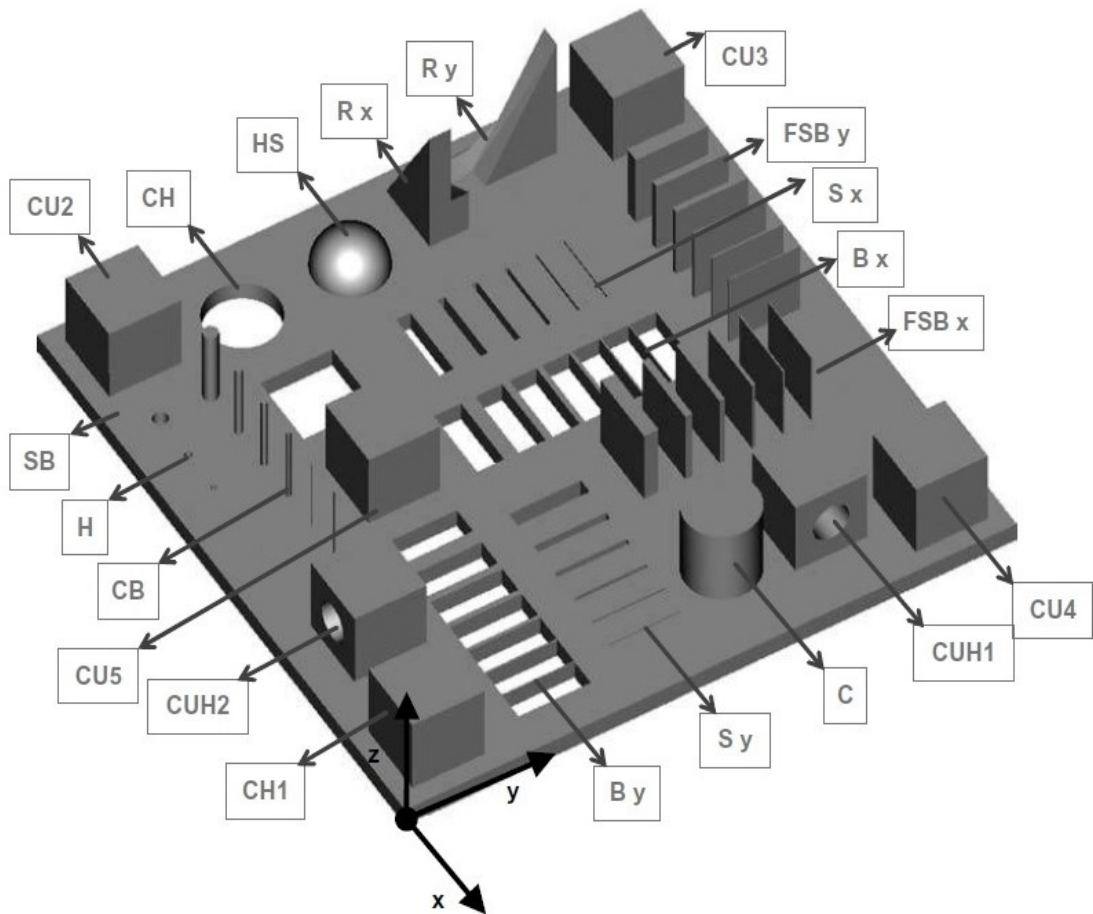
V případě dotykových dochází k pohybu snímacího hrotu po měřeném povrchu. Výchylinky hrotu jsou převedeny na elektrický signál a dále zpracovávány. Přesnost je ovlivněna velikostí snímacího hrotu, rychlostí posuvu a silou dotyku. [69].

U bezdotykových profilometrů spočívá princip měření ve využití světelného paprsku, který se odráží nebo rozptyluje na zkoumaném povrchu. Nesprávná data může měřidlo poskytnout v hraničních oblastech povrchu nebo při náhlé změně profilu, potíže způsobuje i velmi vysoká nebo naopak nízká odrazivost. [70].

Další možností je kvalitativní hodnocení drsnosti povrchu lidskými smysly. Může být použito např. mikroskopu kdy rozlišovací schopnost při použití světelného mikroskopu je přibližně $1 \mu\text{m}$. Hmatem lze u dvou ploch obroběných stejným způsobem rozlišit rozdíl v drsnosti až $R_a = 0,1 \mu\text{m}$. [69].

2.4.3 Rozměrové vlastnosti

Ověření správné rozměrové a geometrické přesnosti je prováděno na testovacích objektech. Jejich podoba je od jednoduché krychle o rozměrech $10 \times 10 \times 10$ mm pro základní ověření rozměrů ve všech osách až po složité objekty, jaký je například na obrázku 25. Tento objekt můžeme použít pro popsání nejrůznějších charakteristik, které jsou sledovány.



Obr. 25 Příklad objektu pro ověření geometrické a rozměrové přesnosti. [71].

Velikost základny **SB** tohoto objektu činí 170×170 mm. To značí, že je použitelný i pro tisk na většině RepRapových tiskárnách, jež se vyznačují maximální tiskovou plochou 200×200 mm. Značnou nevýhodou pro běžné použití ovšem bude tiskový čas, jenž dle údajů z tiskového softwaru tiskáren Prusa i3 a Rebel II bude při výšce vrstvy 0,2 mm přibližně 12 hodin.

CU1, CU2, CU3, CU4 a CU5 jsou krychle o hraně 20 mm. Cílem vyhodnocení jsou jejich rozměry a případné rozdíly v závislosti na umístění na tiskové podložce.

CUH1 a **CUH2** jsou další krychle o hraně 20 mm, které ovšem uvnitř obsahují válcové otvory o průměru 10 mm a orientaci ve směru osy x a osy y . Sleduje se přesnost rozměru a kruhovitost otvoru. Pro ověření rozměrů a kruhovitosti v ose z je určen prvek **CH**.

CB je sada válcových sloupů s osou rovnoběžnou k ose z . Mají průměr a slouží především k ověření proveditelnosti podobných objektů.

Bx a **By** jsou sady mezer v jednotlivých osách x a y o šířkách od 0,3 do 4 mm, které mají prokázat proveditelnost a přesnost rozměru mezery.

Sx a **Sy** jsou sady tenkých a nízkých stěn v jednotlivých osách x a y o tloušťce od 0,3 do 4 mm, které mají prokázat proveditelnost a přesnost tloušťky.

FSBx a **FSBy** jsou sady tenkých bariér v jednotlivých osách x a y o tloušťce od 0,3 do 4 mm, které mají prokázat proveditelnost tisku vyšších tenkých stěn.

H je sada kruhových otvorů o průměru 0,3 do 4 mm a účelem je opět prokázat proveditelnost takto drobných prvků.

C je větší válcový objekt o průměru a výšce 20 mm pro ověření rozměru a kruhovitosti.

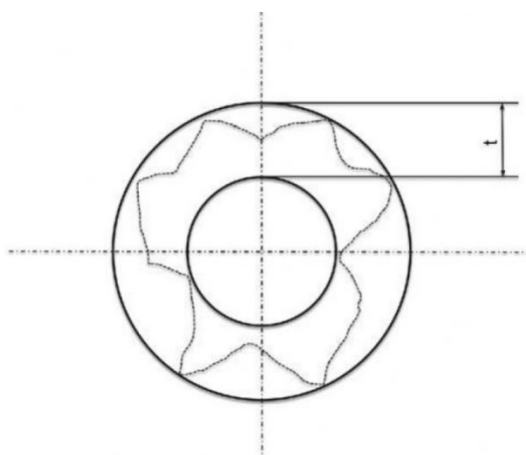
HS je polovina koule o průměru 20 mm, na které se dá zhodnotit míra schodovitosti.

Objekt je ještě doplněn o dva prvky se šikmou plochou **Rx** a **Ry** pro vyhodnocení kvality šikmého povrchu.[71].

Některé další kalibrační objekty mohou obsahovat vysoké prvky pro ověření kolmosti osy z k tiskové podložce nebo sady nejrůznějších šikmých stěn, převisů a mostů pro ověření dalších parametrů.[72].

Vliv na průměr kruhových otvorů a těles má i příprava objektu ve formátu STL. Při vytváření v grafickém programu dochází k proložení kruhového tvaru polygonem, jehož vrcholy leží na požadovaném průměru, ale spojnice vrcholů procházejí vnitřkem. Podle tohoto polygonu je generována dráha tiskové hlavy a je tedy nutno buď rozměr přizpůsobit, nebo při návrhu volit dostatečně velký počet vrcholů, který ovšem zvyšuje velikost datového souboru. [49].

Kruhovitost je definována hodnotou tolerance t , což je vzdálenost mezi kružnicemi o největším a nejmenším naměřeném průměru (obr. 26).[71].



Obr. 26 Definice kruhovitosti. [71].

Velmi výrazný vliv na rozměrovou a geometrickou přesnost má vliv hodnoty lineárního smrštění materiálu, ze kterého je objekt tištěn. Dochází nejen ke změně rozměru, ale také vlivem deformace při chladnutí k chybám v základních geometrických parametrech. Typickým příkladem například v případě materiálu ABS je zvedání krajních rohů při tisku objemnějších objektů.

Tabulka 7 Hodnoty lineárního smrštění pro některé polymerní materiály. [49].

	PC	ABS	PA	HIPS	PVA	PLA	PET
lineární smrštění $\alpha_L [10^6 \times K^{-1}]$	70,2	73,8	72,0	70,0	55,0	30,0	59,4

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část práce je tvořena několika dílčími úkoly. Nejdříve se zaměřuje na změření pevnosti vzájemného spojení jednotlivých tiskových vrstev. K tomuto účelu jsou vytištěny zkušební vzorky. Dalším úkolem byla tvorba a následný tisk testovacích objektů pro posouzení rozměrové přesnosti 3D tisku. Posledním úkolem bylo vyhodnocení povrchu vytištěných objektů pomocí analýzy obrazu. Veškeré objekty byly vytištěny na RepRap tiskárnách Prusa i3 a Rebel II. Tyto dvě tiskárny jsou typickými zástupci používaných nejen RepRap komunitou, ale i modeláři, kutily a nacházejí uplatnění i u menších firem. Právě s ohledem ke skupině uživatelů těchto tiskáren, byly až na měření pevnosti, voleny metody vyhodnocení s ohledem na tuto skutečnost. Tiskárna Prusa i3 byla již k dispozici, tiskárna Rebel II, byla v rámci této práce postavena, nakalibrována a odzkoušena.

3.1 3D tiskárny pro experiment

3.1.1 Popis konstrukce

Při experimentu byly použity dvě 3D tiskárny, spadající do kategorie RepRap. **Prusa i3** (sestavena v roce 2015) a **Rebel II** (sestavena v roce 2016). Základní koncepce obou tiskáren je shodná. Osy pohybu jednotlivých částí tiskárny jsou definovány následně: osa x – umožňuje pohyb doleva a doprava, osa y – pohyb dozadu a dopředu, osa z – pohyb nahoru a dolů.

Tisková hlava je uchycena pomocí lineárních kuličkových ložisek na ocelových vodících tyčích a pohybuje se ve směru osy x . Celá tato sestava je uchycena na dalších vodících tyčích umožňujících pohyb ve směru osy z . Vyhřívaná podložka je opět na vodících tyčích zajišťujících možnost pohybu ve směru osy y . Vše je názorně vidět na obr. 27 a 28. Z hlediska konstrukce je zásadní rozdíl v tuhosti. V případě tiskárny Rebel II jsou použity hliníkové profily, které jsou pevně sešroubovány. Konstrukce je velmi stabilní i při případném přenosu tiskárny. U tiskárny Prusa i3 je základem vertikální rám z hliníkového plechu o tloušťce 6 mm, k němuž je ve spodní části přišroubována základna pro vyhřívanou podložku, vytvořená ze závitových tyčí. Toto spojení nevykazuje takovou tuhost jako v případě tiskárny Rebel II. U tiskárny Rebel II i Prusa i3 je pohyb v ose x zajištěn jedním krokovým motorem přes ozubený řemen. Stejným způsobem je vyřešen i pohyb v ose y . Dva krokové motory a závitové tyče obstarávají pohyb v ose z . Zde obě tiskárny vykazují drobné odlišnosti, které se projevují v maximálním teoretickém rozlišení (tabulka 8).

Tisková hlava je složena z tzv. studené a horké části (často se používá označení extruder a hotend, pojmem extruder je někdy míněna celá tisková hlava). Studená část má za úkol podávat tiskový materiál do hotendu. Nejčastěji je vytvořena z vytištěných dílů a o posun materiálu se stará drážkovaný šroub (zvaný zubatice), jenž je poháněn krokovým motorem. V případě tiskárny Rebel II je šroub poháněn přímo, u Prusi i3 je vloženo převodové ozubené soukolí s převodem do pomala.

Hotend tvoří vodící trubička s pasivním a aktivním chlazením a blok s odporovým ohřívacím tělískem, termistorem a tryskou o průměru 0,4 mm.

Tiskárny jsou osazeny třemi mechanickými koncovými spínači, které slouží pro získání informace o počátku souřadného systému při zahájení tisku.

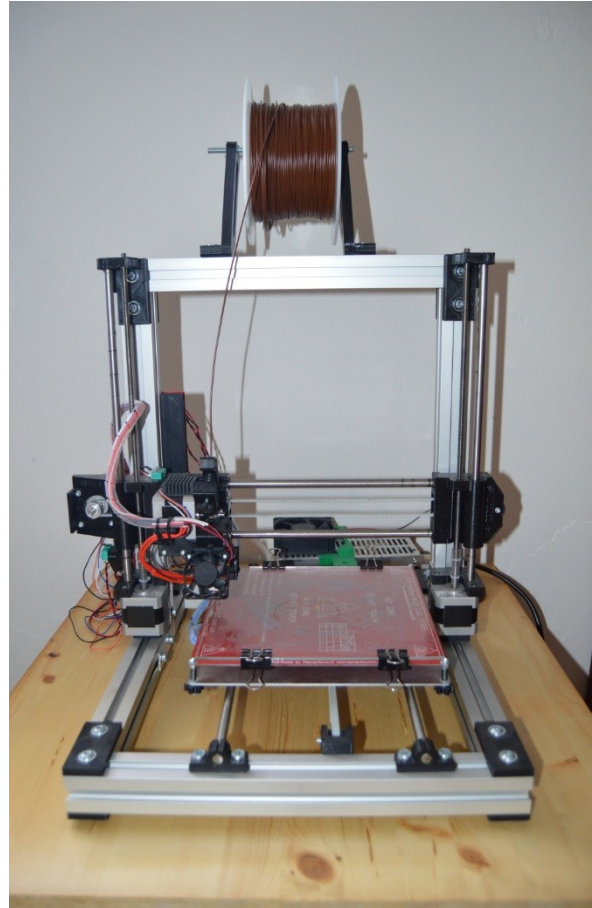
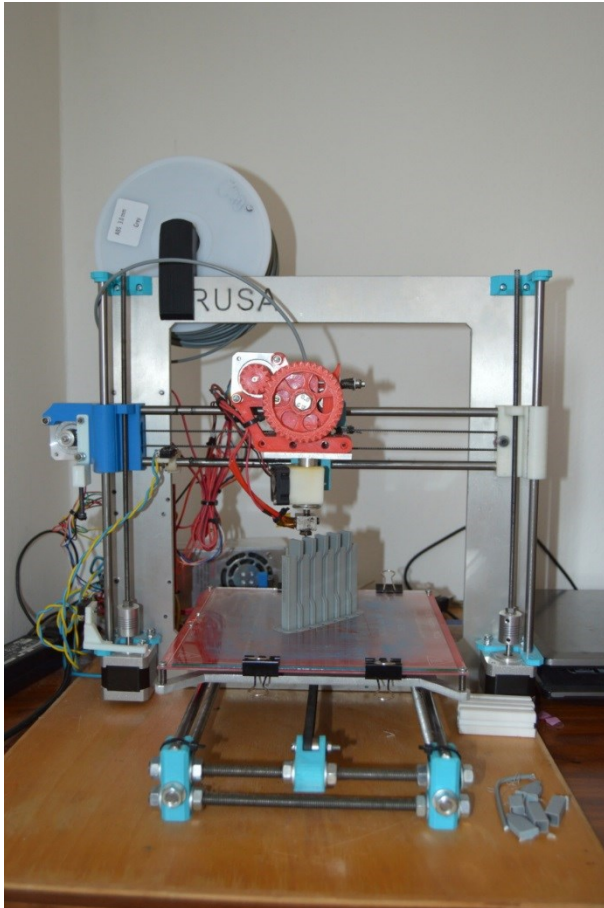
Vyhřívaná tisková podložka je tvořena meandrem cest vytvořených na desce plošného spoje. Jedná se tedy v podstatě o odporový ohřev. Podložka je doplněna termistorem.

Elektronika ovládající celou tiskárnu je vytvořena ze dvou částí. První je elektronická deska Arduino Mega 2560, což je open-source platforma založena na mikrokontroleru ATmega. Druhou částí je tzv. shield RAMPS 1.4, což je rozšiřující deska kompatibilní svými piny s Arduinem Mega a obsahuje přípojné body pro zapojení všech motorů, koncových spínačů, termistorů a topných těles.

Tiskárna je napájena z běžné elektrické sítě 230V/50Hz prostřednictvím spínaného průmyslového zdroje 12V/240W.

Tabulka 8 Přehled základních parametrů tiskáren Rebel II a Prusa i3.

Tiskárna	Rebel II	Prusa i3
Rozměry včetně cívky šířka × hloubka × výška [mm]	420 × 420 × 600	430 × 400 × 520
Průměr materiálu [mm]	1,75	3,00
Max. velikost výtisku [mm]	200 × 200 × 180	200 × 200 × 170
Průměr trysky [mm]	0,4	0,4
Typ ovladače motoru	DRV 8825	A4988
Počet kroků	6400/ot.	3200/ot.
Teoretické rozlišení osy x a y [μm]	6,25	12,50
Teoretické rozlišení osy z [μm]	0,16	0,25
Praktická min. výška vrstvy [mm]	0,05	0,05
Rychlost tisku [mm/s]	30 – 200	30 – 200



Obr. 27 3D tiskárny Prusa i3 (vlevo) a Rebel II (vpravo)

3.1.2 Software

OpenSCAD – program pro tvorbu 3D modelů, objekty se v něm tvoří pomocí vytváření programového kódu. V tomto programu byly vytvořeny zdrojové STL soubory pro veškeré vytištěné objekty použité během experimentu.

NetFabb Basic – kontrola a oprava STL souborů.

Sli3r 1.2.9 – program pro nastavení parametrů tisku (rychlost, výška vrstvy, výplň apod.). Generování tiskového g-kódu pro tiskárnu.

Printrun Pronterface – software, který slouží k řízení 3D tiskárny.

3.1.3 Tiskový materiál

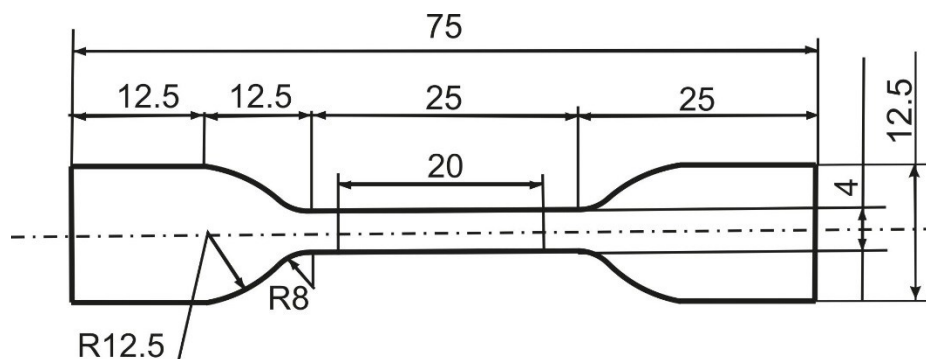
Tiskárna Prusa i3: materiál ABS 3,00 mm, od firmy mkfloria spol. s r. o, označení MKF – ABS F3,0 Šedá. Průměr namátkově změřen digitálním posuvným měřidlem na 20 místech s průměrnou hodnotou 2,95mm, maximální 2,99 mm, minimální 2,93 mm. Teplota na trysce pro všechny zkušební vzorky 243 °C, teplota podložky 110 °C.

Tiskárna Rebel II: materiál ABS 1,75 mm, od firmy mkfloria spol. s r. o, označení ABS 1,75 Grey. Průměr namátkově změřen na 20 místech digitálním posuvným měřidlem s průměrnou hodnotou 1,73mm, maximální 1,75 mm, minimální 1,71 mm. Teplota na trysce pro všechny zkušební vzorky 246 °C, teplota podložky 110 °C.

3.2 Testování pevnosti

3.2.1 Příprava vzorků

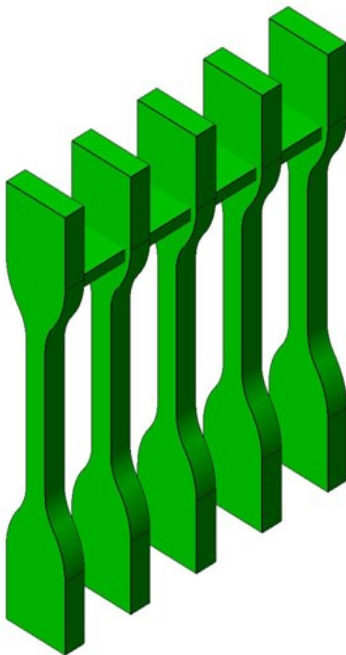
Vzorky pro zkoušku byly navrženy a vytištěny v souladu s normou ISO 527-2, která je primárně určena pro stanovení charakteristik tvářených a vstřikovaných plastů. Tato norma stanoví několik typů vzorků. Byl zvolen typ 5A s tloušťkou 4 mm. Jeho rozměry jsou patrné z obrázku 28. Tento typ byl vybrán s ohledem na jeho velikost. Tisk větších vzorků by trval neúměrně dlouho.



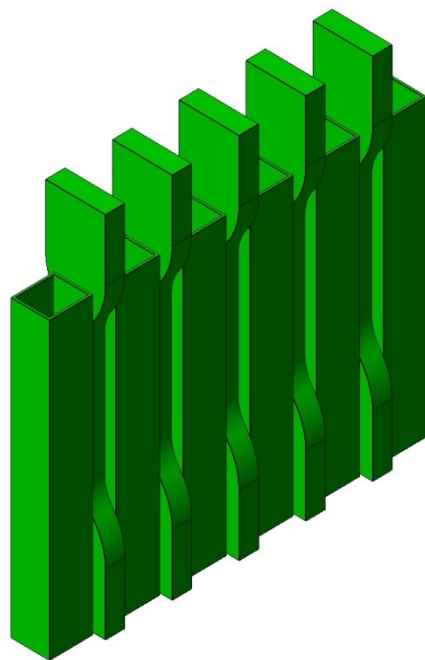
Obr. 28 Vzorek 5A pro zkoušku pevnosti. [66].

Vzorky byly tištěny po 5 ks, z důvodu většího zaplnění tiskové plochy a tím k reálnější simulaci skutečného tisku v praxi.

Při tisku vzorků se vyskytl problém s jejich přilnavostí k tiskové podložce. Vzhledem k jejich orientaci při tisku měla základna jen velmi malou plochu, při tisku vyšších vrstev docházelo při přesunech tiskové hlavy k jejímu kontaktu s výtiskem a následnému odlepení tisku a jeho selhání. První pokus o odstranění tohoto nedostatku demonstruje obrázek 29. Byl namodelován jakýsi most spojující horní části vzorků v části, která není při zkoušce vyhodnocována. Tento most sice umožnil pevně spojit vzorky, ale v oblasti pod ním docházelo k zafixování vzorků v šikmé poloze. Tento problém definitivně odstranilo přidání dutých sloupů, které bránili při tisku vychýlení či úplnému odlepení vzorků (obrázek 30).



Obr. 29 Pokusný návrh vzorků



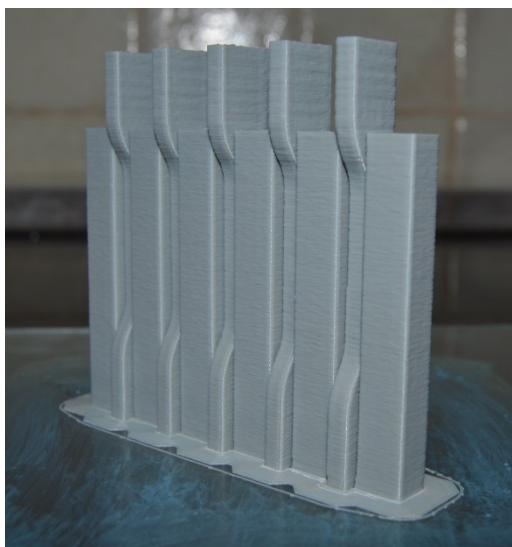
Obr. 30 Konečný návrh vzorků

3.2.2 Přehled vytištěných vzorků

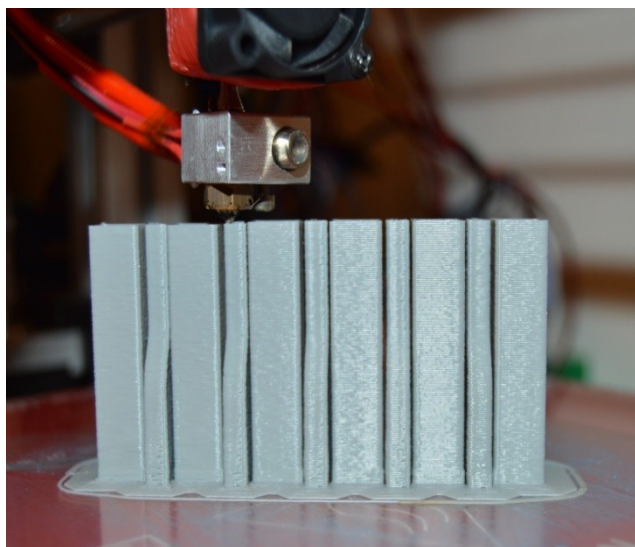
Bylo vytištěno 8 sad vzorků po 10 ks (2×5 ks). Čtyři sady byly vytištěny na tiskárně Prusa i3 a čtyři sady na tiskárně Rebel II. Přičemž byly měněny parametry nastavení tiskárny – rychlost tisku a výška vrstvy. Doba tisku jedné skupiny 5 vzorků se pohybovala v závislosti na nastavení od 110 do 212 minut. Celkový přehled parametrů jednotlivých zkušebních sad je v tabulce 9.

Tabulka 9 Přehled vytištěných vzorků – pevnost.

Tiskárna	Výška vrstvy [mm]	Rychlost tisku [mm/s]	Označení vzorku
Rebel II	0,2	50	R0250
	0,3	50	R0350
		100	R03100
		150	R03150
Prusa i3	0,2	50	P0250
	0,3	50	P0350
		100	P03100
		150	P03150



Obr. 31 Vytištěná sada vzorků



Obr. 32 Průběh tisku vzorků

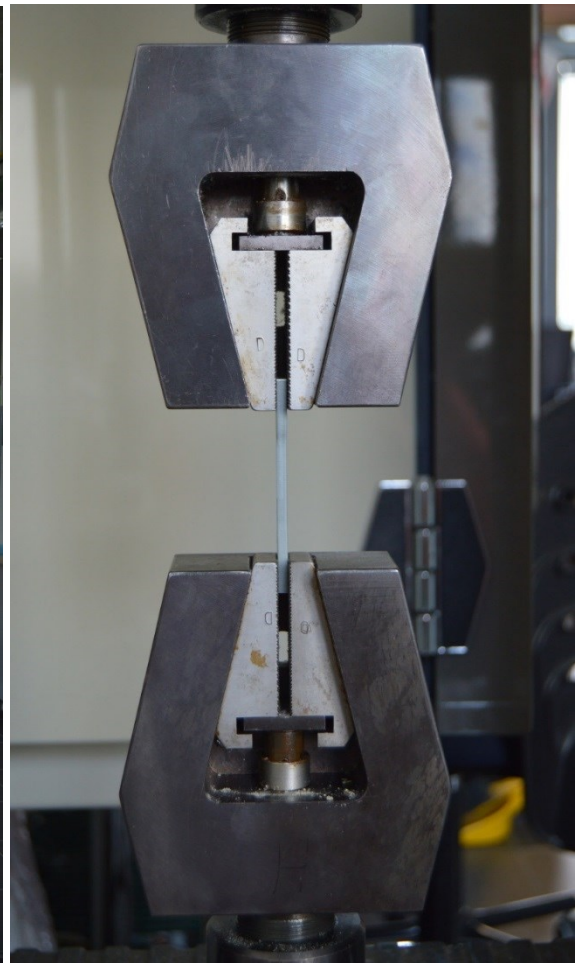
3.2.3 Podmínky měření pevnosti

Testy byly provedeny na zkušebním stroji MTS Adamel Lhomargy 4/M se snímací hlavou 20kN a mechanickými čelistmi. Upínací délka činila 50 mm, rychlost zatěžování 1mm/s.

Během měření se objevil problém s praskáním vzorku již při samotném upínání, upínací plochy vzorku nebyly zcela rovnoběžné (vzorek byl občas lehce zkroucen). Vzorek, který praskl již při upínání nebo téměř ihned po zahájení zkoušky byl vyřazen a nahrazen novým. Cílem bylo získat 5 správně změřených vzorků.



Obr. 33 Zkušební zařízení MTS AL 4/M

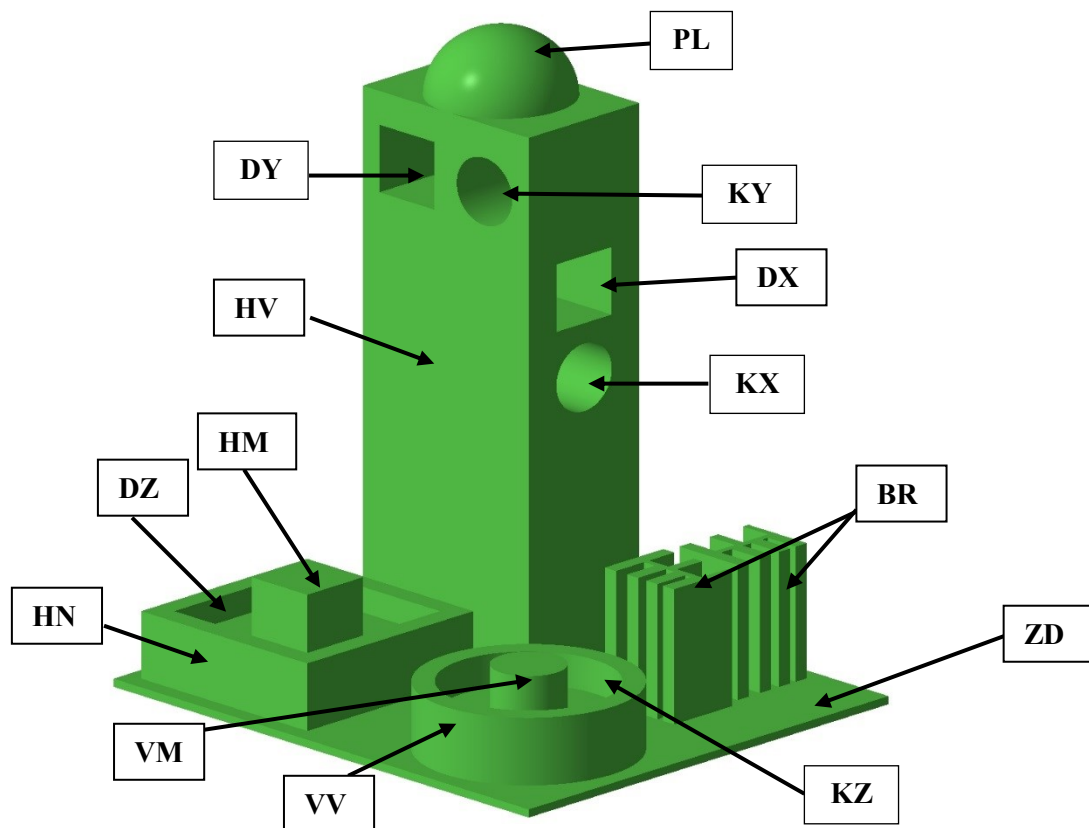


Obr. 34 Detail upnutí vzorku na pevnost.

3.3 Testování rozměrové přesnosti

3.3.1 Příprava vzorků

Pro vyhodnocení správně vytištěných rozměrů byl navržen testovací objekt (obr. 38). Tento objekt je složen z několika menších prvků, z nichž každý je zaměřen na jiný parametr. Přehled všech prvků a vlastností, jež jsou u nich sledovány, obsahuje tabulka 10. Celková velikost a složitost testovacího objektu je navržena tak, aby jeho tisk nebyl příliš časově náročný a nespoteboval mnoho materiálu a byl tudíž vhodný pro využití v RepRap komunitě. Čas tisku se pohyboval v závislosti na nastavení od 201 minut do 254 minut a spotřeba materiálu byla maximálně 6,59 m při průměru 3 mm (Prusa i3) a 18,99 m při průměru 1,75 mm (Rebel II).



Obr. 35 Testovací objekt pro ověření rozměrové přesnosti (popis prvků obsahuje tabulka 10).

Tabulka 10 Přehled sledovaných prvků na objektu pro měření rozměrů.

označení prvku	popis	rozměry [mm] (osy X × Y × Z)	sledovaná charakteristika
ZD	Základna	75 × 65 × 1,2	přesnost
KX	Kruhový otvor, rovnoběžný s osou x, y, z	Ø 10	přesnost, kruhovitost
KY		Ø 10	
KZ		Ø 24	
DX	Dutina – čtvercová, ve směru osy x, y, z	10 (osa y) × 10 (osa z)	přesnost, proveditelnost
DY		10 (osa x) × 10 (osa z)	
DZ		24 (osa x) × 24 (osa y)	
VM	Válec malý a velký	Ø 10	přesnost, kruhovitost
VV		Ø 30	
HN	Hranol nízký, malý a velký	30 × 30 × 11,2	přesnost
HM		10 × 10 × 16,2	
HV		30 × 20 × 81,2	
PL	Polokoule	Ø 20	posouzení vzhledu
BR	Bariéry, tenké stěny a mezery	1 – 4	proveditelnost

3.3.2 Přehled vytištěných vzorků

Celkem bylo vytištěno 6 objektů s různým nastavením výšky vrstvy a rychlostí tisku. Jejich přehled je v tabulce 13.

Tabulka 11 Přehled vytištěných vzorků pro měření rozměrů.

Tiskárna	Výška vrstvy [mm]	Rychlost tisku [mm/s]	Označení vzorku
Rebel II	0,2	100	RM0250
	0,3	100	RM03100
Prusa i3	0,2	50	PM0250
		100	PM02100
	0,3	50	PM0350
		100	PM03100

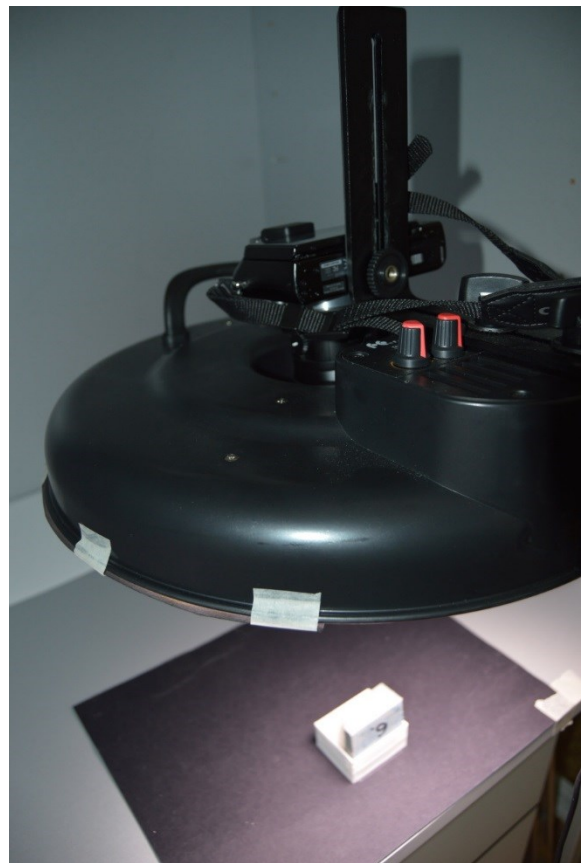
3.4 Testování vlastností povrchu

3.4.1 Podmínky experimentu

Při testování vlastností povrchu bylo využito skutečnosti, že různě vysoká místa reliéfu povrchu různě odrážejí dopadající světlo. Vzorek povrchu byl umístěn ve světelné skříni a nasvícen kruhovým laboratorním světelným zdrojem. Uprostřed zdroje byl nainstalován digitální fotoaparát Olympus PEN lite E-PLJ s makro objektivem s označením Olympus 60 mm 1:2,8 Macro ED MSC Ø 46. Tento fotoaparát snímal zkoumaný povrch ze stále stejné vzdálenosti 210 mm. Rozdíly v odraženém světle se projeví jako rozdílné úrovně jasu ve výsledném snímku. Pro zvýraznění hran nerovností povrchu byly tři čtvrtiny zdroje zastíněny a vytvořeno tak mírně šikmé osvětlení. Podmínky experimentu ilustrují obr. 36 a obr. 37.



Obr. 36 Osvětlení zkoumaného povrchu



Obr. 37 Osvětlení zkoumaného povrchu – detail

Snímky všech testovaných povrchů byly pořízeny vždy ze stejné vzdálenosti a za shodného nastavení fotoaparátu. Velikost snímků byla 4032×2272 pixelů při času expozice $1/200$ s, citlivosti ISO 800 a clonovém čísle F7,1.

Vzhledem k šikmému osvětlení vznikl předpoklad, že intenzita osvětlení a tedy i jas odraženého světla není se vzdáleností od zdroje ve směru šikmosti světla konstantní. Byl tedy vytvořen snímek bílé podložky umístěné ve stejné pozici jako povrch testovaných vzorků. Hodnoty jasu byly uloženy do programu Excel a pro osu snímku rovnoběžnou s jeho výškou byla stanovena rovnice závislosti jasu na vzdálenosti od světelného zdroje. Tato rovnice byla aplikována na obrazová data všech snímků, aby došlo ke kompenzaci vlivu vzdálenosti od zdroje záření.

Pro samotné vyhodnocení byl zvolen vždy stejně velký a stejně umístěný výřez z pořízeného snímku. Charakterizace povrchu se soustředila na dva aspekty: plochu hlubokých strukturálních trhlin na zkoumaném vzorku a tvar reliéfu povrchu. V případě strukturálních trhlin bylo zapotřebí následně z obdržených výsledků určit maximální hodnotu jasu, která nepředstavuje povrchovou nerovnost, ale reprezentuje hluboký defekt zkoumaného povrchu. Vychází se z výchozího předpokladu, že z hluboké trhliny bude získáno odražené světlo o velmi nízkých úrovních jasu.

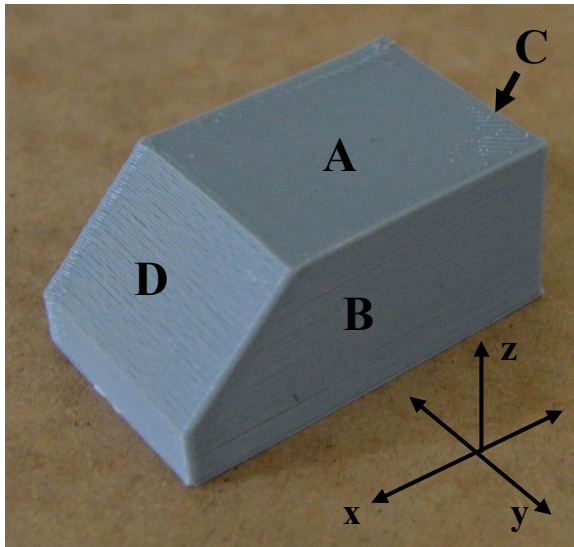
Úprava snímků a analýza obrazových dat byla provedena za použití software Zoner Photo Studio 9, Image J a MS Excel.

3.4.1 Příprava vzorků

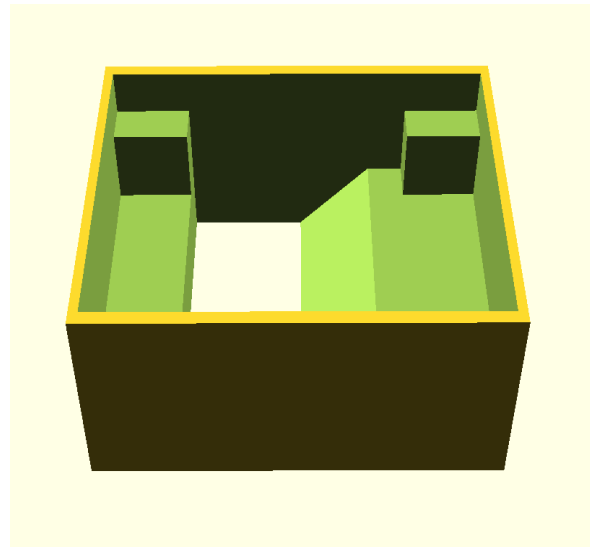
Pro experiment bylo vytištěno 7 vzorků, jejichž přehled a parametry tisku jsou v tabulce 12. Tvar vzorku a plochy pro vyhodnocení jsou patrné z obr. 38 a označeny A, B, C, D. Plochy A, B, C jsou kolmé na pracovní roviny tiskárny, plocha D svírá s tiskovou podložkou úhel 45° . Pro zajištění vždy stejné polohy a vzdálenosti vzhledem k objektivu fotoaparátu, byl navržen a vytištěn speciální podstavec (obr. 39).

Tabulka 12 Přehled vzorků pro testování vlastností povrchu

Tiskárna	Výška vrstvy [mm]	Rychlost tisku [mm/s]	Označení vzorku
Rebel II	0,2	50	RM0250P
	0,3	50	RM0350P
		100	RM03100P
		150	RM03150P
Prusa i3	0,2	50	PM0250P
	0,3	100	PM03100P
		150	PM03150P



Obr. 38 Vzorek na testování vlastností povrchu



Obr. 39 Podstavec pro vzorek

Bližší specifikace ploch A, B, C, D

A – plocha v rovině, kterou tvoří osy pohybu tiskárny x a y . Rozměr 35×30 mm

B – plocha v rovině, kterou tvoří osy pohybu tiskárny x a z . Rozměr 35×23 mm

C – plocha v rovině, kterou tvoří osy pohybu tiskárny y a z . Rozměr 30×23 mm

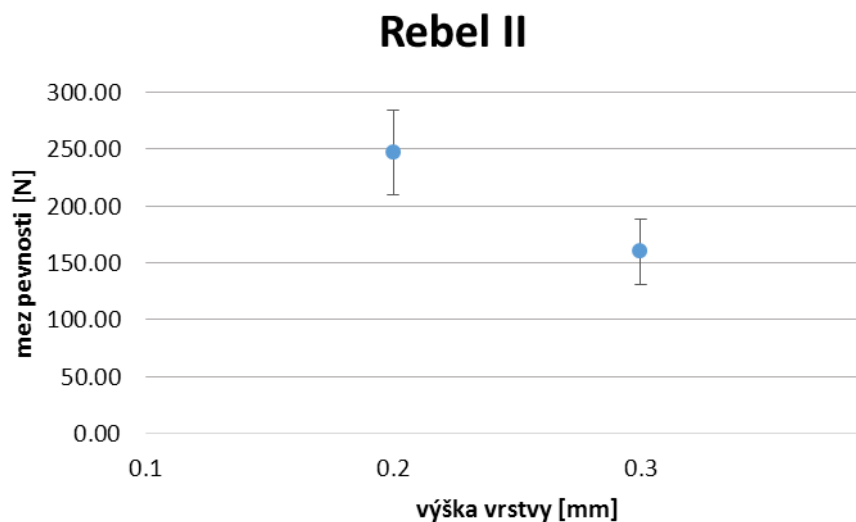
D – plocha, jež svírá s tiskovou podložkou a osou x úhel 45° . Rozměr 20×30 mm

4 VÝSLEDKY A DISKUZE

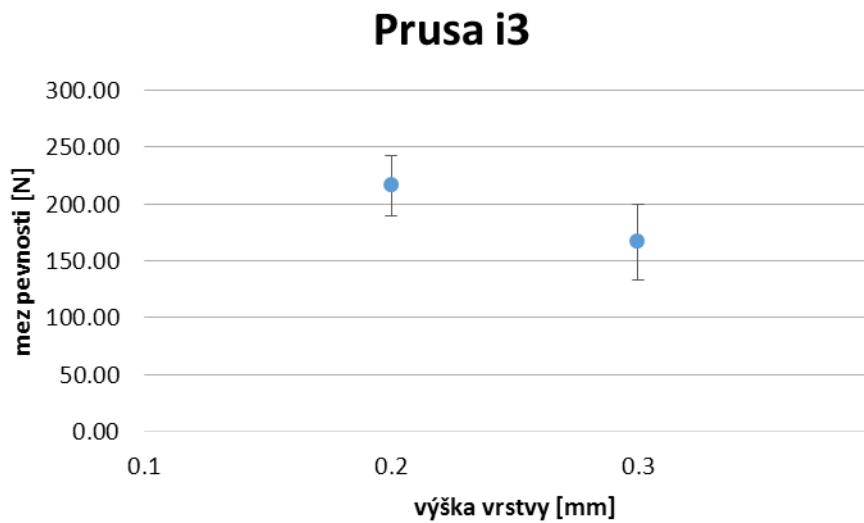
4.1 Měření pevnosti

Vliv výšky vrstvy při konstantní rychlosti tisku:

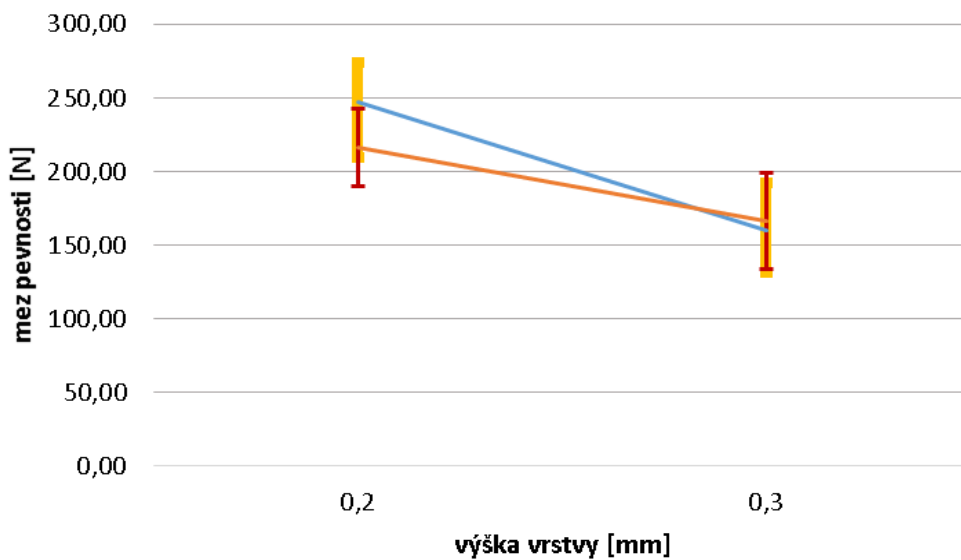
Ze získaných výsledků (umístěny na konci práce jako Příloha I) lze vyvodit závěr, že v případě obou tiskáren je dosaženo větší meze pevnosti při výšce vrstvy 0,2 mm oproti 0,3 mm a při konstantní rychlosti tisku 50 mm/s. Důvodem může být skutečnost, že šířka vlákna je v případě tloušťky 0,2 mm výrazně větší a styčná plocha mezi dvěma vlákny je výrazně větší. Dojde tedy k lepšímu spojení vrstev. Tiskárna Rebel II vykazuje v případě výšky vrstvy 0,2 mm větší průměrné meze pevnosti (246,96 N) než Prusa i3 (216,16 N). Obr. 40 a 41 zobrazují průměrné získané hodnoty včetně chybových úseček vyznačujících dvojnásobnou hodnotu směrodatné odchylky pro jednotlivé tiskárny. Na obr. 42 je porovnání obou tiskáren.



Obr. 40 Závislost meze pevnosti na výšce vrstvy – Rebel II



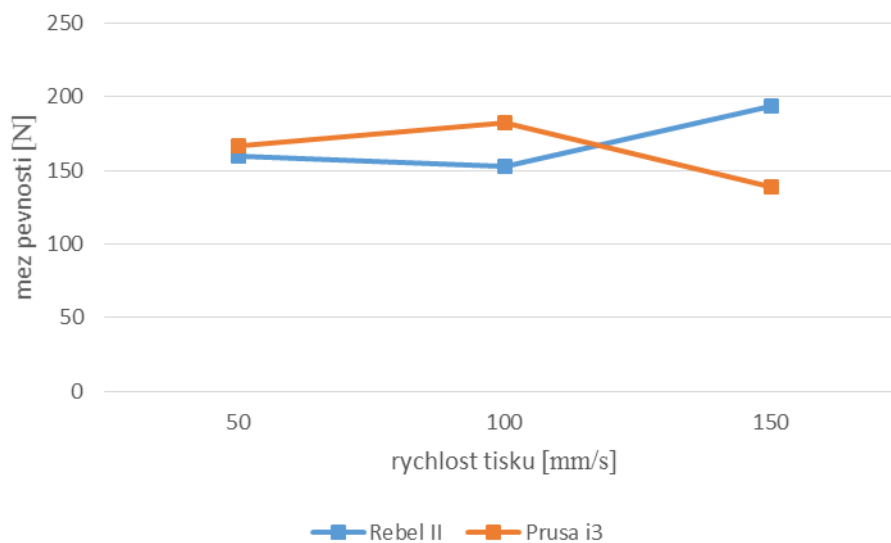
Obr. 41 Závislost meze pevnosti na výšce vrstvy – Prusa i3



Obr. 42 Porovnání závislostí meze pevnosti na výšce vrstvy u obou tiskáren

Vliv rychlosti tisku při konstantní výšce vrstvy:

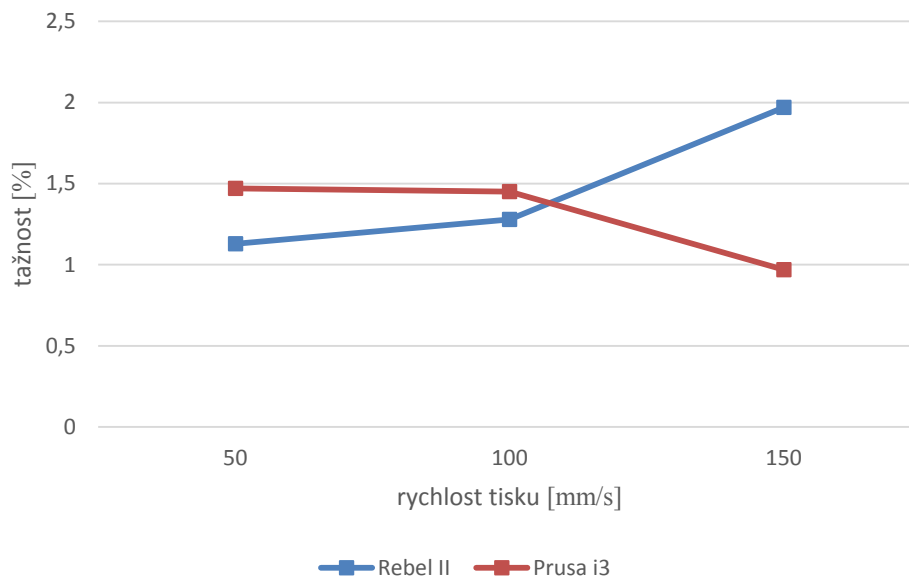
Obě tiskárny vykazují velmi podobné hodnoty meze pevnosti při tisku nejnižší testovanou rychlostí (50 mm/s). Při rychlosti 100 mm/s měly testované vzorky z tiskárny Rebel II o něco horší pevnost, ale procentuální hodnota směrodatné odchylky meze pevnosti je poměrně značných 12,18 %. Lze vyvodit závěr, že až do hodnoty rychlosti 100 mm/s je mez pevnosti z obou tiskáren téměř shodná a dle obr. 43 i konstantní. Při rychlosti tisku 150 mm/s naznačují výsledky mírnou tendenci k nárůstu meze pevnosti u tiskárny Rebel II a u tiskárny Prusa i3 naopak tendenci k poklesu. Předpokladem je, že při vyšších rychlostech dochází k rychlejšímu položení nové vrstvy. Předchozí vrstva tedy nestihne příliš vychladnout a dojde k lepšímu spojení. To se u tiskárny Rebel II potvrdilo. Vysvětlení opačného jevu u tiskárny Prusa i3 je možné hledat v menší tuhosti její konstrukce. Při rychlém tisku dochází vlivem setrvačných sil k většímu rozkmitání tiskové hlavy a jednotlivé vrstvy nemusí být položeny přesně na sebe. Výsledkem je menší efektivní plocha spojení a v důsledku toho výrazný pokles hodnoty meze pevnosti.



Obr. 43 Závislosti meze pevnosti na rychlosti tisku, vrstva 0,3 mm.

Vyhodnocení tažnosti

Hodnoty tažnosti v procentech prodloužení vzorku jsou velmi nízké, pohybují se v hodnotách od 0,97% do 1,97 %. Jak je patrné z obr. 44, závislost tažnosti na rychlosti tisku má obdobný průběh jako v případě meze pevnosti. To potvrzuje předpoklad, že dochází k lepšímu propojení materiálu na rozhraní vrstev při vyšší rychlosti tisku u tiskárny Rebel II. Spojení vrstev u tiskárny Prusa i3 je naopak při rychlosti 150 mm/s křehčí. Je nutno ovšem uvést, že se jedná o průměrné hodnoty tažnosti, u sad vzorků dochází k vysokému rozptylu hodnot a výsledky nelze považovat za významné.



Obr. 44 Závislosti tažnosti na rychlosti tisku, vrstva 0,3 mm.

4.2 Rozměrová přesnost

Měření bylo s ohledem na dostupnost v RepRap komunitě provedeno digitálním posuvným měřidlem ProsKit o rozsahu 0 – 150 mm a přesnosti 0,01 mm. Každý sledovaný rozměr byl změřen 5× v náhodně vybraných místech, rovnoměrně rozložených na měřeném prvku. Kruhovitost byla posuzována pomocí tzv. dvoubodové metody, která je vhodná pokud se deformace kruhového tvaru projevuje jako oválnost. Následující tab. 13 udává procentuální rozdíl spočítaných průměrů jednotlivých rozměrů pro všechny vzorky. Žlutě jsou označeny veškeré odchylky nad + 1 %, červeně všechny nad 1 % záporné. Jednotlivá data pro každé měření včetně výpočtu směrodatné odchylky jsou na konci práce v Příloze II.

Z tabulky 13 je patrné, že při tisku rychlostí 100 mm/s, dosahuje tiskárna Rebel II výrazně vyšší přesnosti než tiskárna Prusa i3. Důvodem je nižší tuhost konstrukce, která se vlivem setrvačných sil rozkmitá, a vrstvy nejsou zarovnané přesně na sebe. Rozměry jednotlivých vrstev jsou shodné, ale vzhledem k nepřesnému zarovnání je výsledný rozměr objektu zvětšený (dutiny naopak zmenšeny).

Většina vnitřních rozměrů (prvky KX, KY, KZ, DX a DY) se vyznačují výrazným zmenšením, obzvláště u rozměrů do 10 mm. Výjimkou je prvek DZ kde hlavně v ose x jsou rozdíly minimální, což je způsobeno většími rozměry.

Při tisku rychlostí 50 mm/s na tiskárně Prusa i3 je dosahováno velké přesnosti, až na výše zmíněné vnitřní rozměry.

Vliv výšky vrstvy je zanedbatelný, výsledky naznačují vyšší přesnost pro vrstvu 0,3 mm, ale rozdíly jsou nepatrné.

Tabulka 13 Rozdíl [%] naměřené hodnoty od teoretické hodnoty u všech vzorků.

Rozdíl [%] naměřené hodnoty od teoretické hodnoty u všech vzorků.							
označení prvku*	Teoretický rozměr [mm]	PM0350	PM0250	PM03100	PM02100	RM02100	RM03100
ZD	75	0,45	0,24	0,06	0,23	0,48	-0,08
	65	0,21	0,12	-0,05	-0,19	-0,05	-0,29
	1,2	4,67	0,67	3,83	5,33	2,00	3,17
KX	10	-5,72	-7,46	-9,25	-5,82	-5,06	-4,10
KY	10	-3,60	-6,70	-7,50	-11,40	-2,88	-4,24
KZ	24	-0,83	-2,97	-3,38	-3,33	-1,50	-2,60
DX	10 (y)	-5,12	-3,94	-7,50	-6,46	-6,02	-3,68
	10 (z)	-3,42	-4,70	-4,96	-7,10	-2,78	-3,84
DY	10 (x)	-3,26	-4,00	-4,72	-5,00	-2,38	-3,58
	10 (z)	-2,26	-3,86	-5,72	-7,36	-2,18	-3,36
DZ	24 (x)	-1,00	-1,81	-1,75	-2,04	-0,27	-0,67
	24 (y)	-1,22	-2,22	-2,15	-2,22	-1,38	-1,62
VM	10	-0,10	1,94	1,78	3,42	-0,62	0,96
VV	30	0,01	-0,95	-0,79	-0,43	-0,30	-0,85
HN	30	0,18	0,07	1,41	0,47	0,53	0,41
	30	-0,13	-0,23	1,29	-0,15	-0,23	0,11
	11,2	0,48	-2,16	1,20	1,32	0,36	-0,59
HM	10	2,97	1,44	4,68	3,76	3,26	2,84
	10	0,74	1,64	4,74	2,68	1,04	0,76
	16,2	0,53	-2,31	1,37	0,20	-0,43	-0,23
HV	30	0,55	0,38	1,23	1,66	1,02	0,99
	20	0,09	0,81	2,31	3,43	0,51	1,70
	81,2	-0,41	-1,80	-0,51	-0,72	-0,12	-0,21

* přehled rozměrů a umístění sledovaných prvků uvádí obr. 35 a tab. 10 v kapitole 3.3.1 Příprava vzorků

Vyhodnocení kruhovitosti

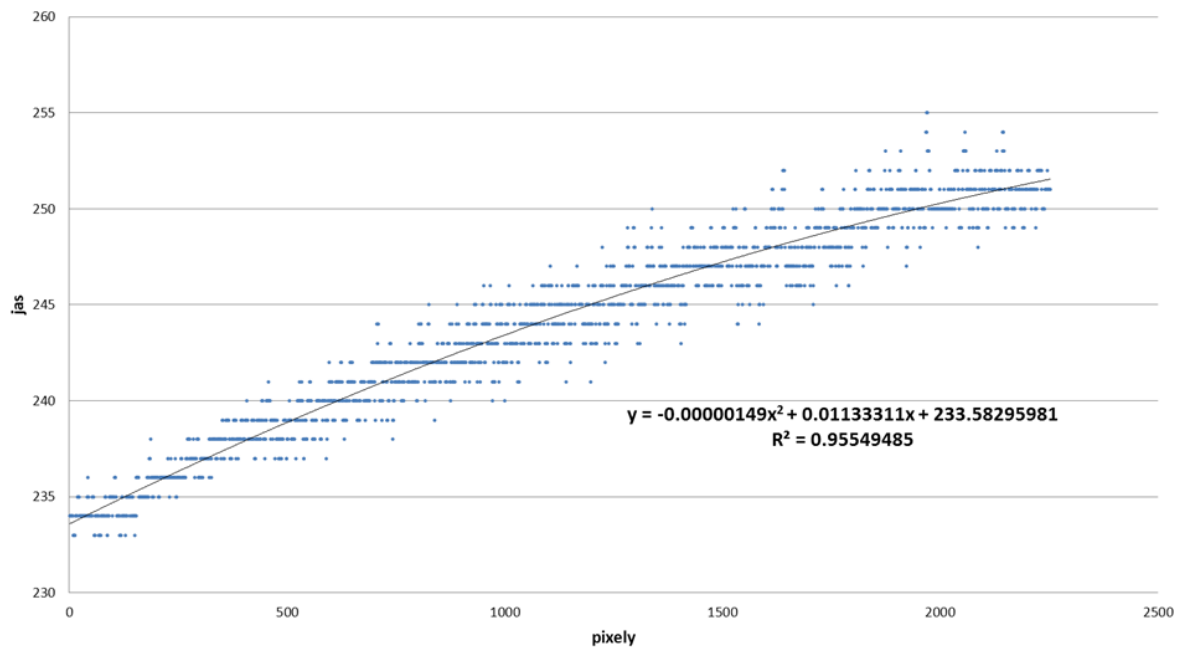
Výsledky kruhovitosti jsou shrnuty v tabulce 14. Kruhovitost t dosahuje u vnitřních rozměrů (prvky KX, KY a KZ) hodnot od 0,07 mm do 0,32 mm. U vnějších rozměrů (prvky VM a VV) 0,01 mm až 0,12. Lze vyvodit závěr, že hodnoty kruhovitosti jsou nižší u vnějších rozměrů. Z výsledků je patrné, že prvky jejichž osa je rovnoběžná s osou z (KZ, VM, VV) vykazují vyšší tvarovou přesnost, než prvky jejichž osa je na osu z kolmá (KX, KY). To je způsobeno pravděpodobně výstavbou otvoru v ose z , kdy dochází ke kladení vláken jednotlivých vrstev ne zcela na sebe.

Tabulka 14 Hodnota kruhovitosti t u všech vzorků

Hodnota kruhovitosti t [mm] u všech vzorků.							
označení prvku	Teoretický rozměr [mm]	PM0350	PM0250	PM03100	PM02100	RM02100	RM03100
KX	10	0,14	0,18	0,05	0,32	0,18	0,14
KY	10	0,09	0,08	0,19	0,17	0,08	0,08
KZ	24	0,07	0,13	0,09	0,10	0,10	0,15
VM	10	0,05	0,12	0,07	0,11	0,11	0,08
VV	30	0,08	0,01	0,09	0,05	0,05	0,08

4.3 Vlastnosti povrchu

Nejprve byla stanovena rovnice závislosti jasu na vzdálenosti od světelného zdroje. Hodnota 0 na ose x reprezentuje nejvzdálenější bod od zdroje. Tato závislost včetně tvaru rovnice je na obr. 45.



Obr. 45 Závislost hodnoty jasu na vzdálenosti od zdroje světla

Plocha strukturálních trhlin

Byla vybrána oblast o velikosti 1200×1200 pixelů. Tedy celkem 1 440 000 pixelů. Při zkoumání získaných snímků byla nalezena maximální hodnota jasů jednotlivých pixelů, která nepředstavovala pouhou nerovnost povrchu, ale strukturální povrchovou trhlinu. Hodnoty jasů pixelů, popisující trhliny v povrchu, byly stanoveny na rozmezí 0 – 90, když hodnota jasů 0 reprezentuje černý pixel a hodnota jasů 255 – bílý pixel. Podíl trhlin na celkové ploše je stanoven v procentech z celkového počtu pixelů ve sledovaném obrazu. Výsledky jsou shrnuty v tabulce 15.

Tabulka 15 Podíl plochy trhlin [%] z celkové plochy sledovaného vzorku

Podíl plochy trhlin [%] z celkové plochy sledovaného vzorku							
označení plochy	R0250P	R0350P	R03100P	R03150P	P0250P	P03100P	P03150P
A	0,0000	0,0047	0,0014	0,0007	0,0000	0,0003	0,0080
B	0,0218	0,2258	0,6508	0,7802	0,0010	0,0048	0,0235
C	0,0000	0,0603	0,0867	0,4863	0,0001	0,0010	0,0004
D	0,0040	0,0113	0,0042	0,0100	0,0006	0,0106	0,1760

Z výsledků je patrná vysoká kvalita povrchu na ploše A u všech vzorků, povrch nevykazuje výrazné trhliny. Stejně je tomu v případě šikmé plochy D, kde až u vzorku P03150P je podíl trhlin 0,1760%.

Tento vzorek je tištěn nejvyšší rychlostí (150 mm/s) na tiskárně Prusa i3 a při podrobnější analýze obrazu je patrné, že výsledek ovlivnila velká nehomogenita povrchu způsobená přerušným vláknem. V tomto případě zřejmě došlo při vysoké rychlosti tisku k nepatrnému vynechání podávaného materiálu.

Plocha B je charakteristická větším podílem trhlin především u tiskárny Rebel II. Tato plocha se vyznačuje největší délkou vláken a ke vzniku trhlin dochází následkem rychlého chladnutí objektu a smrštivosti materiálu. U vzorků tištěných na tiskárně Prusa i3 výsledky tento problém neprokázaly. Problém může být způsoben různým zahřátím materiálu z důvodu odlišného průměru tiskového materiálu.

Plocha C se vyznačuje kratší délkou vlákna než plocha B a ke vzniku větších trhlin dochází jen u vzorku R03150P.

Výsledky ukazují, že výrazně lepší homogenitu povrchu vykazuje tiskárna Prusa i3, kde se hodnoty pohybují od 0,0000 % do 0,1760 %, zatímco u tiskárny Rebel II dosahují až hodnoty 0,7802 %.

Z pohledu vlivu výšky vrstvy je u obou tiskáren dosahováno lepších výsledků v případě 0,2 mm.

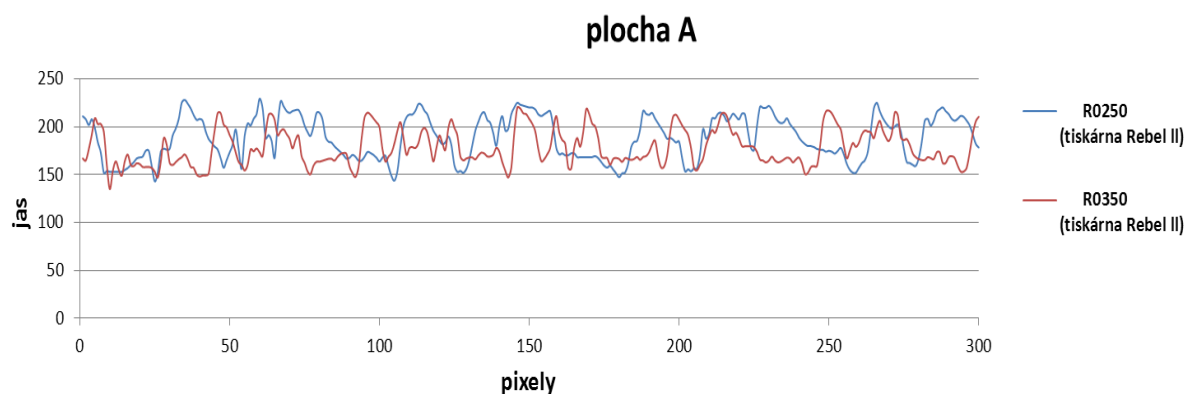
Příloha III na konci práce obsahuje vybrané snímky zkoumaných ploch.

Profil reliéfu povrchu

Pro toto vyhodnocení byla vybrána oblast o velikosti 300×300 pixelů. Tato oblast pocházela vždy ze stejného místa testovaného snímku. Rozkládala se v rozmezí pixelů č. 801 – č. 1100, kde pixel č. 800 leží nejdále od světelného zdroje a pixel č. 1100 leží nejbližší ke světelnému zdroji. Na každý pixel byla aplikována rovnice závislosti úrovně jasu na vzdálenosti od světelného zdroje a následně vynesena graf zobrazující reliéf povrchu v myšleném řezu vedeném středem obrazu kolmém na směr vláken. Získaná data umožňují velké množství možných způsobů vyhodnocení. Lze u každé sledované plochy porovnávat kvalitu povrchu v závislosti na rychlosti tisku, typu tiskárny a výšce vrstvy. Následně lze porovnávat jednotlivé zkoumané plochy vzájemně mezi sebou při shodném nastavení rychlosti tisku a výšce vrstvy a na stejné tiskárně. V následném vyhodnocení byl zvolen pro každou plochu jen jeden sledovaný parametr za konstantního nastavení ostatních. V případě plochy A a D – vliv změny výšky vrstvy, plocha B – vliv změny tiskárny, plocha C – vliv změny rychlosti tisku. Všechny získané grafy pro jednotlivé vzorky obsahuje Příloha IV na konci práce.

Plocha A - porovnání kvality horní plochy

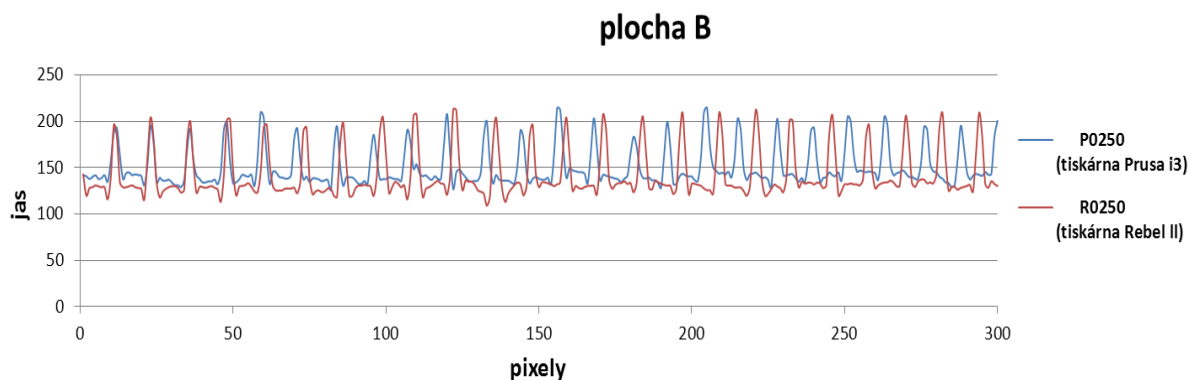
Obr. 46 znázorňuje dva reliéfy plochy A (plocha v rovině, kterou tvoří osy pohybu tiskárny x a y – viz obr. 38), tištěné na tiskárně Rebel II při stejné rychlosti a odlišné výšce vrstvy. Plocha A je tištěna pod úhlem 45° k osám x a y . Její křivky reprezentující profil povrchu mají proto zcela odlišný průběh než v případě ostatních ploch. V případě hodnoty 0,3 mm vykazuje křivka nepatrně nižší rozdíly v úrovni jasu a její průběh vykazuje pozvolnější přechody mezi vlákny než v případě nižší výšky vrstvy. Z toho lze usoudit, že povrch je v případě vyšší výšky vrstvy hladší. Povrch je tvořen menším počtem vláken, jež lépe vyplňují poslední vrstvu objektu.



Obr. 46 Porovnání kvality povrchu plochy A

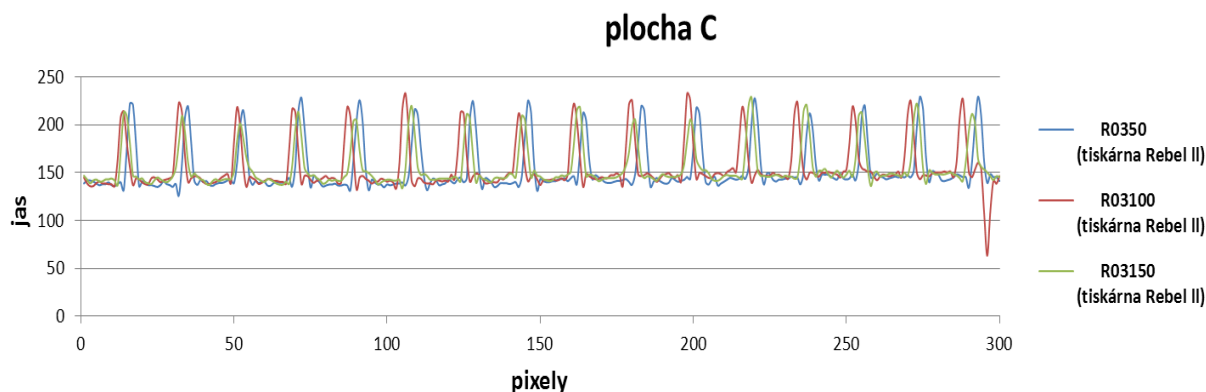
Plocha B - porovnání tiskáren

Na obr. 47 jsou porovnány profily plochy B (plocha v rovině, kterou tvoří osy pohybu tiskárny x a z – viz obr. 38) z obou tiskáren při stejném nastavení tisku. Pro toto vyhodnocení byly zvoleny vzorky s výškou vrstvy 0,2 mm a rychlostí tisku 50 mm/s. Povrch vzorku vytištěného na tiskárně Prusa i3 se vyznačuje nižším rozpětím úrovní jasu oproti tiskárně Rebel II a lze ho tedy považovat za hladší. Z obr. 47 je také vidět, že dochází k posunu vrcholů křivky, které reprezentují horní hranu každého vlákna. To má za následek rozdílné výsledné rozměry.



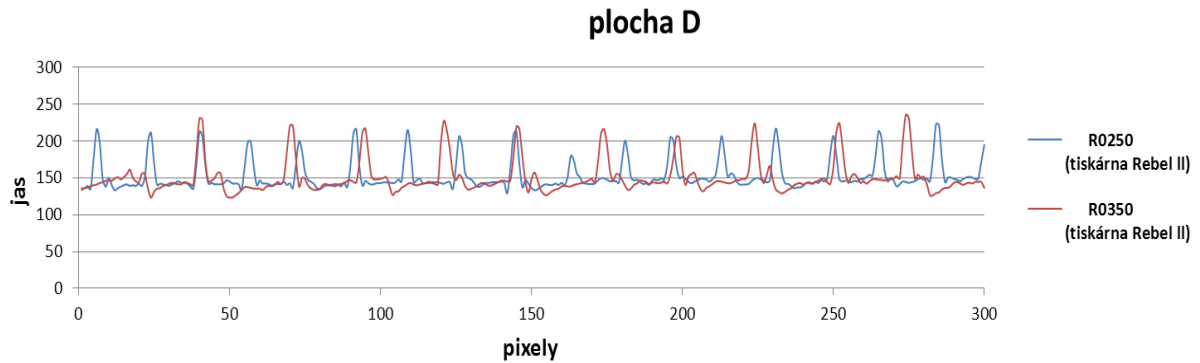
Plocha C - porovnání kvality v závislosti na rychlosti tisku

Profily plochy C (plocha v rovině, kterou tvoří osy pohybu tiskárny y a z – viz obr. 38), které jsou zobrazeny na obr. 48, byly získány ze vzorků tištěných na tiskárně Rebel II při výšce vrstvy 0,3 mm a při odlišných rychlostech tisku. Nevykazují příliš rozdíly v celkových rozdílech jasu. Nicméně vyšší rychlost se projevuje v rozdílných hodnotách jednotlivých vrcholů křivek. Lze vyvodit závěr, že celková drsnost povrchu téměř nezávisí na rychlosti tisku, ale povrch při pomalejším tisku je rovnoměrnější a pravidelnější. V tomto výsledku se zřejmě projevuje rozkmitání konstrukce tiskárny vlivem setrvačných sil při vyšších rychlostech tisku.



Plocha D - porovnání kvality šikmé plochy

Pro porovnání kvality plochy D (plocha, jež svírá s tiskovou podložkou a osou x úhel 45° – viz obr. 38) byly zvoleny vzorky tištěné na tiskárně Rebel II při shodné rychlosti 50 mm/s a rozdílné výšce vrstvy. Tato plocha svírá úhel 45° s tiskovou podložkou a na tvorbě jejího povrchu se tedy uplatňuje vliv pohybu ve všech třech osách. Z analýzy reliéfů na obr. 49 je patrný nižší rozdíl jasů v případě vrstvy 0,2 mm a tedy lze usoudit na menší drsnost povrchu než v případě vrstvy 0,3 mm. Tvorba šikmé plochy při tisku je při nižší výšce vrstvy plynulejší a vykazuje rovnoměrnější povrch.



Obr. 49 Porovnání kvality povrchu plochy D

5 ZÁVĚR

V teoretické části této práce je stručně popsán princip 3D tisku. Je nastíněn vznik této výrobní technologie a jsou shrnuty jednotlivé metody používané při 3D tisku. Podrobněji je v práci uvedena metoda tisku FDM (fused deposition modeling), u které jsou blíže popsány související fyzikální procesy podílející se na tvorbě objektu a přehled základních používaných materiálů. Tyto materiály jsou dále diskutovány podrobněji. Závěr teoretické části se zabývá problematikou hodnocení kvality 3D tisku a shrnuje základní hodnocené parametry.

V úvodu experimentální části je uveden popis konstrukce a parametry použitých 3D tiskáren, včetně softwarového vybavení. Experiment proběhl na tiskárnách Prusa i3 a Rebel II, přičemž druhá jmenovaná byla v rámci této práce sestavena.

Hlavní část experimentu sestávala z vyhodnocení kvality výtisků se zaměřením na pevnost spojení jednotlivých vláken, přesnost rozměrů a kvalitu povrchu. Byly porovnávány výtisky získané tiskem na obou tiskárnách při změně základních parametrů – rychlost tisku a výška tiskové vrstvy.

Pevnost spojení vláken byla ověřena na zkušebním stroji MTS Adamel Lhomargy 4/M. Ze získaných výsledků je patrné, že v případě obou tiskáren je dosaženo větší meze pevnosti při výšce vrstvy 0,2 mm oproti 0,3 mm a při konstantní rychlosti tisku 50 mm/s. Tiskárna Rebel II vykazuje v případě výšky vrstvy 0,2 mm větší průměrné meze pevnosti než Prusa i3.

Pro ověření rozměrové přesnosti byl nejprve navržen vhodný kalibrační objekt. Výsledky ukazují, že v případě nižších rychlostí tisku je přesnější tiskárna Prusa i3, se stoupající rychlostí tisku naopak Rebel II. Tento výsledek je v souladu se skutečností, že tiskárna Prusa i3 vykazuje horší tuhost konstrukce a je více ovlivněna působením setrvačných sil.

Kvalita povrchu byla zkoumána na snímcích vytištěných různě orientovaných zkušebních ploch a jejich následném vyhodnocení v programu ImageJ. Vyhodnocovány byly parametry drsnosti a nehomogenity povrchu. Z výsledků hodnocení drsnosti je patrné, že nelze jednoznačně nalézt kombinaci parametrů tisku, při které by docházelo k nejlepším výsledkům. Vždy záleží na orientaci zkoumané plochy a tedy konkrétní aplikaci. V případě hodnocení homogenity povrchu je patrný vliv rychlosti tisku, kdy při vyšších rychlostech dochází k nerovnoměrnému podávání tiskového materiálu. Veškeré podmínky, zařízení a použité materiály jsou v práci detailně popsány, proto je experiment kdykoliv opakovatelný.

Práce naznačila možnosti rychlého vyhodnocení některých parametrů kvality tisku s přihlédnutím na využití v RepRap komunitě zabývající se 3D tiskem, jako alternativou k profesionálním zařízením. Další směr zkoumání je možno nalézt v rozšíření experimentu na další používané tiskové materiály a jejich vzájemné porovnání.

SEZNAM ZDROJŮ

- [1] BABJAK, Š., KOVÁČ, M. *Analýza komerčních pracovišť rapid prototypingu*. [online]. 2003 [cit. 2016-01-07]. Dostupné z: <http://www.sjf.tuke.sk/transferinovacii/pages/archiv/transfer/6-2003/pdf>
- [2] CHUA, Chee Kai a Kah Fai LEONG. *3D printing and additive manufacturing: principles and applications*. 4th edition of Rapid prototyping. Singapore: World Scientific, 2015. ISBN 978-981-4571-40-1.
- [3] ŠNAJDÁREK, L. *Metody 3D laserového skenování ve výrobním procesu*. Brno 2008. Bakalářská práce. VUT Brno. Vedoucí práce Ing. Opl M.
- [4] ATOS triple scan. [online]. [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <http://www.mcae.cz/atos>
- [5] GRIMM, T. *User's Guide to Rapid Prototyping*, Society of Manufacturing Engineers, 2004, s. 55. ISBN 0-87263-697-6
- [6] The STL Format. [online]. [cit. 2016-03-30]. Dostupné z: http://www.fabbcom/tech/STL_Format
- [7] KRUTH, J.-P., LEU, M. C., NAGAKAWA, T., *Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping*, CIRP Annals, 1998, roč. 47, č. 2, s. 525-540..
- [8] Inkjet printing. [online]. [cit. 2016-4-20]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/ink-jet-printing>
- [9] GILPIN, L., *3D 'bioprinting': 10 things you should know about how it works*. [online]. 2014 [cit. 2016-4-20]. Dostupné z: <http://www.techrepublic.com/article/3d-bioprinting-10-things-you-should-know-about-how-it-works/>
- [10] REIL, O., *3D tisk a jeho využití ve stavebnictví*. [online]. 2014 [cit. 2016-4-20]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/11123-3d-tisk-a-jeho-vyuziti-ve-stavebnictvi>
- [11] KAYSER, M., *Solar Sinter*. [online]. 2011 [cit. 2016-4-20]. Dostupné z: <http://www.markuskayser.com/work/solarsinter/>
- [12] ŘASA, J., KEREČANINOVÁ, Z. *Nekonvenční metody obrábění 9. díl* [online]. 2008 [cit. 2016-4-20]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-9-dil.html>
- [13] 3D tisk – metody. [online]. 2013 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://www.14220.cz/technologie/3d-tisk-metody/>
- [14] KOUBEK, M., *Výroba spotřebních doplňků s využitím technologie Rapid Prototyping*. Brno 2011. Bakalářská práce. VUT Brno. Vedoucí práce Ing. Sedlák J.
- [15] SYSEL, K., *Přehled moderních metod při výrobě prototypových odlitků se zaměřením na kombinaci RP a přesného lití*. Brno 2010. Bakalářská práce. VUT Brno. Vedoucí práce Prof. Ing. Horáček M. CSc.
- [16] Production Printer Materials. [online]. [cit. 2016-03-21]. Dostupné z: <http://www.3dsystems.com/materials/production>
- [17] ŘASA, J., KEREČANINOVÁ, Z. *Nekonvenční metody obrábění 10. díl* [online]. 2008 [cit. 2016-1-16]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-10-dil.html>
- [18] *Přehled technik využívaných při Rapid Prototyping*. Liberec 2012. Technická univerzita v Liberci, fakulta strojní, učební text
- [19] Inkjet printing. [online]. [cit. 2016-04-21]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/ink-jet-printing>

- [20] 3D printing process: MJP. [online]. [cit. 2016-04-21].
Dostupné z: <http://www.3dsystems.com/media/3d-printing-process-mjp>
- [21] How PolyJet work. [online]. [cit. 2016-04-21].
Dostupné z: <http://www.stratasys.com/3d-printers/technologies/polyjet-technology>
- [22] KOTLINSKI, J., *Mechanical properties of commercial rapid prototyping materials*. Rapid Prototyping Journal. 2014, roč. 20, č. 6, s. 499-510.
- [23] SLS – pulsed Nd:YAG laser. [online]. [cit. 2016-01-9].
Dostupné z <http://www.lasag.com/en/products/solid-state-lasers/sls/>
- [24] PANDEY, P. M., *Rapid Prototyping technologies, applications and part deposition plannings*. 2010. Dostupné z: http://web.iitd.ac.in/~pmpandey/MEL120_html/RP_document.pdf
- [25] MOLITCH-HOU, M., *First low cost SLS 3D printers hit the scene*. [online]. 2014 [cit. 2016-01-12]. Dostupné z: <http://3dprintingindustry.com/2014/08/14/first-low-cost-sls-3d-printers-hit-scene/>
- [26] Laser sintering. [online]. [cit. 2016-01-10].
Dostupné z <http://www.prodways.com/en/technologie/laser-sintering/>
- [27] OpenSLS. [online]. [cit. 2016-01-10]. Dostupné z <http://reprap.org/wiki/OpenSLS>
- [28] AMORIM, L. F., et al, *Selective laser sintering of Mo-CuNi composite to be used as EDM electrode*. Rapid Prototyping Journal. 2014, roč. 20, č. 1, s. 59-68.
- [29] SEKERKA, V., *Výroba dílů technologií DMLS a jejich porovnání s jinými konvenčními technologiemi z hlediska ekonomické náročnosti*. Brno 2011. Diplomová práce. VUT Brno. Vedoucí práce Ing. Sedlák J. PhD.
- [30] Z Corporation 3D Printing Technology. [online]. 2005 [cit. 2016-01-12]. Dostupné z: http://www.zcorp.com/documents/108_3D%20Printing%20White%20Paper%20FINAL.pdf
- [31] Technické specifikace Z Corp. [online]. [cit. 2016-01-12].
Dostupné z: <http://www.materialise.cz/technicke-specifikace-z-corp>
- [32] KHAN, M., DICKENS, P., *Selective laser melting (SLM) of pure gold for manufacturing dental crowns*. Rapid Prototyping Journal. 2014, roč. 20, č. 6, s. 471-9.
- [33] EBM. Electron beam Melting. [online]. [cit. 2016-01-13].
Dostupné z: <http://www.arcam.com/technology/electron-beam-melting/>
- [34] Rapid Prototyping – Electron Beam melting. [online]. [cit. 2016-01-13].
Dostupné z: <http://engineershandbook.com/RapidPrototyping/ebm.htm>
- [35] *Rapid Prototyping – Laminated Object Modelling and Computer Aided Manufacturing of Laminated Engineering Materials*. [online]. 2013 [cit. 2016-01-20].
Dostupné z: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1650>
- [36] Solido SD 300. [online]. [cit. 2016-01-20].
Dostupné z: <http://www.solido3d.cz/content/o-tiskarne-technicke-udaje>
- [37] Fused Deposition Modeling (FDM). [online]. [cit. 2016-04-15].
Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>
- [38] ROEBUCK, K. *3D printing: Three dimensional printing*. Emero Pty. Ltd., 2011 ISBN 1743042701.
- [39] FABBSTER je zde... [online]. [cit. 2016-04-16].
Dostupné z: <https://www.easycnc.cz/inpage/fabbster-je-tady/>
- [40] Find your FDM thermoplastic. [online]. [cit. 2016-04-21].
Dostupné z: <http://www.stratasys.com/materials/fdm>

- [41] CANESSA, E., et al, *Low-cost 3D Printing for Science, Education & Sustainable Development*. ICTP – The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics. 2013. ISBN 92-95003-48-9.
Dostupné z: <http://web.archive.org/web/20150402165048/http://sdu.ictp.it/3d/book.htm>
- [42] NOVAKOVA–MARCINCINOVA, L., KURIC, I., *Basic and Advanced Materials for Fused Deposition Modeling Rapid Prototyping Technology*. Manufacturing. and Industrial Engineering. 2012. roč. 11, č. 1, s. 24-27. ISSN 1338-6549
- [43] Tiskový materiál PLA. [online]. [cit. 2016-07-13].
Dostupné z: <https://www.easycnc.cz/inpage/pla/>.
- [44] The Difference Between ABS and PLA for 3D Printing. [online]. [cit. 2016-07-13].
Dostupné z: <http://www.protoparadigm.com/news-updates/the-difference-between-abs-and-pla-for-3d-printing/>.
- [45] PLA. [online]. [cit. 2016-07-13]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/PLA>.
- [46] Printing with clear polycarbonate. [online]. [cit. 2016-07-14].
Dostupné z: <http://hackaday.com/2011/12/30/printing-with-clear-polycarbonate/>.
- [47] Polycarbonate. [online]. [cit. 2016-07-14]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/Polycarbonate>.
- [48] 3D tiskové materiály. [online]. [cit. 2016-07-14].
Dostupné z: <http://www.3dtiskarny.info/recenze/srovnani-3d-tiskovych-strun/>.
- [49] KRATOCHVÍL, T., *3D FDM tiskárna RepRap a parametry tisku*. Brno 2015. Diplomová práce. VUT Brno. Vedoucí práce Ing. Zemčík O. PhD.
- [50] PETG. [online]. [cit. 2016-07-15]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/PETG>.
- [51] Certifikáty a technické listy materiálů. [online]. [cit. 2016-07-15].
Dostupné z: <http://www.filament-pm.cz/>.
- [52] Materiály pro 3D tisk. [online]. [cit. 2016-07-15].
Dostupné z: <http://www.futur3d.net/materialy-pro-3d-tisk>.
- [53] HELLEBRAND, M., *Recyklace plastů pro potřeby 3D tisku*. Brno 2014. Bakalářská práce. VUT Brno. Vedoucí práce Ing. Zemčík O. PhD.
- [54] Laybrick. [online]. [cit. 2016-07-15]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/Laybrick..>
- [55] Laybrick: a new rough 3D printer filament for a sandstone effect. [online]. [cit. 2016-07-15].
Dostupné z: <http://www.3ders.org/articles/20130527-laybrick-a-new-rough-3d-printer-filament-near-zero-warp.html>.
- [56] NIKZAD, M., MASOOD, S. H., SBARSKI, I., *Thermo –mechanical properties of a highly filled polymeric composites for Fused Deposition Modelling*, Materials and Design, 2011, roč. 32, s. 3448-3456.
- [57] MASOOD, S. H., SONG, W. Q., *Thermal charakteristice of a metal/polymer for FDM rapid prototyping*, Assembly Automation, 2005, roč. 25, č. 4, s. 309-315.
- [58] ŽMOLÍK, O., *Recyklace termoplastů pro potřeby 3D tisku*. Brno 2015. Bakalářská práce. VUT Brno. Vedoucí práce Ing. Zemčík O. PhD.
- [59] ŠTANCL, V., *Aplikace metody Fused deposition modeling pro výrobu funkčního příslušenství ručního kuchyňského robota*. Brno 2012. Bakalářská práce. VUT Brno. Vedoucí práce Ing. Jan Dvořáček.
- [60] SUN, Q., G. M. RIZVI, C. T. BELLEHUMEUR a P. GU, *Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments*. Rapid Prototyping Journal. 2008, roč. 14, č. 2, s. 72-80
- [61] BELLEHUMEUR, C., et al., *Modeling of Bond Formation Between Polymer Filaments in the Fused Deposition Modeling Process*. Journal of Manufacturing Process. 2004, roč. 6, č. 2, s. 170-178

- [62] AGARWALA, M., et al., *Structural quality of parts processed by fused deposition*. Rapid Prototyping Journal. 1996, roč. 2, č. 4, s. 14-19
- [63] BOWYER, A., et al., *RepRap – the replicating rapid prototyper*. Robotica. 2011. roč. 29, č. 1, s. 177-191
- [64] HRONČOK, M., *3D tiskárny RepRap: Open-source mašinky, které vám usnadní život*. [online]. 2012 [cit. 2016-04-22].
- [65] Sli3er Manual. Infill Patterns and Density. [online]. [cit. 2016-04-25].
Dostupné z: <http://manual.slic3r.org/expert-mode/infill>
- [66] ČSN EN ISO 527. *Plasty: stanovení tahových vlastností*. Úřad pro technickou normalizaci a metrologii a státní zkušebnictví. Praha. 2012.
- [67] AHN, S. H., et al. *Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS*. Rapid Prototyping Journal. 2002, roč. 8, č. 4., s. 248-257.
- [68] Lee, J., Huang, A., *Fatigue analysis of FDM materials*. Rapid Prototyping Journal. 2013, roč. 19, č. 4., s. 291-299.
- [69] GAJDOŠÍK, D., *Měření drsnosti povrchů se zaměřením na měřicí techniku Mytutoyo SJ 210*. České Budějovice 2015. Bakalářská práce. Jihočeská univerzita. Vedoucí práce PaedDr. Bedřich Veselý, PhD.
- [70] AICHLER, J., *Systém managementu měření*. Brno 2009. Diplomová práce. VUT Brno. Vedoucí práce Ing. Koška P. Ph.D
- [71] POLZIN, CH., et al. *Characterization and evaluation of a PMMA-based 3D printing process*. Rapid Prototyping Journal. 2013, roč. 19, č. 1., s. 37-43.
- [72] JOHNSON, W., et al. *Comparative evaluation of an open-source FDM system*. Rapid Prototyping Journal. 2014, roč. 20, č. 3., s. 205-214.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Přehled základních výrobních postupů [2]	10
Obr. 2 STL formát – pravidlo vrcholů, vlevo špatně, vpravo správně.[5]	11
Obr. 3 Parabolický profil vytvářený laserem a bok objektu zhotoveného SLA [13]	13
Obr. 4 Princip metody SLA [2]	14
Obr. 5 Princip metody MJP [2].....	16
Obr. 6 Princip metody SLS [24].....	17
Obr. 7 Princip metody 3DP [18].....	19
Obr. 8 Proces výroby pomocí metody 3DP [18].....	19
Obr. 9 Princip metody SLM [2]	20
Obr. 10 Princip metody LOM [15]	21
Obr. 11 Princip metody FDM [37].....	23
Obr. 12 Proces spojování vláken [43]	28
Obr. 13 Nevyplněný prostor mezi vlákny [60].....	29
Obr. 14 Závislost vyplnění objektu na dráze tiskové hlavy [62]	29
Obr. 15 Tvorba objektu – model tištěného objektu.....	30
Obr. 16 Tvorba objektu – tiskový náhled.....	30
Obr. 17 Tvorba objektu – plná vrstva.....	31
Obr. 18 Tvorba objektu – vrstva s výplní.....	31
Obr. 19 Příklady provedení a hustoty výplně objektu [65]	31
Obr. 20 Vzorky 1A (vlevo) a 5A (vpravo) dle normy ISO 527. [66]	33
Obr. 21 Model vzorku na test pevnosti bez perimetru.....	34
Obr. 22 Model vzorku na test pevnosti s perimetrem.....	34
Obr. 23 Možnosti umístění zkušební vzorku na tiskové ploše. [68].....	34
Obr. 24 Závislost drsnosti povrchu Ra na výšce vrstvy. [49].	35
Obr. 25 Příklad objektu pro ověření geometrické a rozměrové přesnosti. [71].	36
Obr. 26 Definice kruhovitosti. [71].	37
Obr. 27 3D tiskárny Prusa i3 (vlevo) a Rebel II (vpravo).....	41
Obr. 28 Vzorek 5A pro zkoušku pevnosti. [66].....	42
Obr. 29 Pokusný návrh vzorků.....	43
Obr. 30. Konečný návrh vzorků.....	43
Obr. 31 Vytiskovaná sada vzorků.....	44
Obr. 32. Průběh tisku vzorků.....	44
Obr. 33 Zkušební zařízení MTS AL 4/M.....	45
Obr. 34 Detail upnutí vzorku na pevnost.....	45
Obr. 35 Testovací objekt pro ověření rozměrové přesnosti	46
Obr. 36 Osvětlení zkoumaného povrchu.....	48
Obr. 37 Osvětlení zkoumaného povrchu – detail	48
Obr. 38 Vzorek na testování vlastností povrchu.....	50
Obr. 39 Podstavec pro vzorek.....	50
Obr. 40 Závislost meze pevnosti na výšce vrstvy – Rebel II.....	51

Obr. 41 Závislost meze pevnosti na výšce vrstvy – Prusa i3	52
Obr. 42 Porovnání závislostí meze pevnosti na výšce vrstvy u obou tiskáren	52
Obr. 43 Závislosti meze pevnosti na rychlosti tisku, vrstva 0,3 mm.	53
Obr. 44 Závislosti tažnosti na rychlosti tisku, vrstva 0,3 mm.	54
Obr. 45 Závislost hodnoty jasu na vzdálenosti od zdroje světla	56
Obr. 46 Porovnání kvality povrchu plochy A	58
Obr. 47 Porovnání kvality povrchu plochy B	59
Obr. 48 Porovnání kvality povrchu plochy C	59
Obr. 49 Porovnání kvality povrchu plochy D	60

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Vlastnosti materiálů pro SLA [16]	14
Tabulka 2 Přehled mechanických vlastností materiálů pro MJM [22]	16
Tabulka 3 Přehled mechanických vlastností materiálů pro SLS [22]	18
Tabulka 4 Vlastnosti materiálů pro DMLS [29].....	18
Tabulka 5 Přehled parametrů tiskáren firmy Cubic Technologies [2]	22
Tabulka 6 Vybrané vlastnosti základních materiálů pro FDM [40, 49, 51, 58, 59].....	26
Tabulka 7 Hodnoty lineárního smrštění pro některé polymerní materiály. [49].	38
Tabulka 8 Přehled základních parametrů tiskáren Rebel II a Prusa i3.	40
Tabulka 9 Přehled vytištěných vzorků – pevnost.....	44
Tabulka 10 Přehled sledovaných prvků na objektu pro měření rozměrů.	47
Tabulka 11 Přehled vytištěných vzorků pro měření rozměrů.	47
Tabulka 12 Přehled vzorků pro testování vlastností povrchu.....	49
Tabulka 13 Rozdíl [%] naměřené hodnoty od teoretické hodnoty u všech vzorků.....	55
Tabulka 14 Hodnota kruhovitosti t u všech vzorků	56
Tabulka 15 Podíl plochy trhlin [%] z celkové plochy sledovaného vzorku	57

PŘÍLOHY

Příloha I – výsledky měření pevnosti

Výsledky měření pevnosti – Rebel II.

Vzorek	R0250		R0350		R03100		R03150	
	Mez pevnosti [N]	Tažnost [%]	Mez pevnosti [N]	Tažnost [%]	Mez pevnosti [N]	Tažnost [%]	Mez pevnosti [N]	Tažnost [%]
	225,00	0,80	159,20	0,85	134,80	0,51	198,80	1,88
	229,20	1,07	182,40	2,12	147,20	1,26	177,60	1,93
	267,60	1,15	147,60	0,92	177,00	2,02	205,00	2,09
	257,00	1,16	147,40	0,63	138,20	1,23	202,80	2,01
	256,00	1,31	162,20	1,15	168,20	1,39	186,40	1,95
Průměr	246,96	1,10	159,76	1,13	153,08	1,28	194,12	1,97
Směrodatná odchylka	18,75	0,19	14,31	0,58	18,65	0,54	11,71	0,08
Směrodatná odchylka v %	7,59	17,10	8,96	51,29	12,18	41,92	6,03	4,09

Výsledky měření pevnosti – Prusa i3.

Vzorek	P0250		P0350		P03100		P03150	
	Mez pevnosti [N]	Tažnost [%]	Mez pevnosti [N]	Tažnost [%]	Mez pevnosti [N]	Tažnost [%]	Mez pevnosti [N]	Tažnost [%]
	215,20	0,90	183,20	1,69	168,60	1,54	163,60	0,71
	230,20	1,56	151,20	1,26	188,40	1,19	129,80	0,47
	222,60	1,70	146,80	1,37	201,00	1,47	124,20	1,21
	218,20	1,55	174,80	1,59	182,40	1,74	146,20	1,38
	194,60	1,72	176,70	1,44	171,60	1,32	131,20	1,07
Průměr	216,16	1,49	166,54	1,47	182,40	1,45	139,00	0,97
Směrodatná odchylka	13,31	0,34	16,39	0,17	13,12	0,21	15,98	0,37
Směrodatná odchylka v %	6,16	22,66	9,84	11,67	7,20	14,49	11,50	38,42

Příloha II – naměřené hodnoty rozměrů

Testovací objekt PM0250									
označení prvku	Teoretický rozměr [mm]	Naměřené rozměry [mm] číslo měření 1 – 5					Ø [mm]	Rozdíl [%]	Směrodatná odchylka [mm]
ZD	75	75,37	75,31	75,28	75,36	75,36	75,34	0,45	0,04
	65	65,19	65,08	65,04	65,25	65,12	65,14	0,21	0,08
	1,2	1,25	1,31	1,21	1,23	1,28	1,26	4,67	0,04
KX	10	9,39	9,30	9,66	9,34	9,45	9,43	-5,72	0,14
KY	10	9,64	9,57	9,71	9,56	9,72	9,64	-3,60	0,08
KZ	24	23,85	23,62	23,87	23,88	23,79	23,80	-0,83	0,11
DX	10 (y)	9,43	9,57	9,48	9,54	9,42	9,49	-5,12	0,07
	10 (z)	9,66	9,69	9,62	9,64	9,68	9,66	-3,42	0,03
DY	10 (x)	9,63	9,76	9,57	9,65	9,76	9,67	-3,26	0,08
	10 (z)	9,76	9,80	9,74	9,82	9,75	9,77	-2,26	0,03
DZ	10 (x)	23,92	24,02	23,97	23,00	23,89	23,76	-1,00	0,43
	10 (y)	23,75	23,73	23,67	23,69	23,70	23,71	-1,22	0,03
VM	10	9,95	10,12	9,89	9,97	10,02	9,99	-0,10	0,09
VV	30	30,16	29,92	29,98	30,01	29,95	30,00	0,01	0,09
HN	30	30,12	29,98	30,08	30,14	29,95	30,05	0,18	0,08
	30	29,97	29,94	29,93	29,98	29,99	29,96	-0,13	0,03
	11,2	11,28	11,34	11,24	11,18	11,23	11,25	0,48	0,06
HM	10	10,30	10,35	10,28	10,34	10,22	10,30	2,97	0,06
	10	10,20	10,01	10,08	10,05	10,03	10,07	0,74	0,08
	16,2	16,34	16,05	16,42	16,32	16,30	16,29	0,53	0,14
HV	30	30,18	30,15	30,20	30,18	30,12	30,17	0,55	0,03
	20	20,07	19,98	20,03	19,99	20,02	20,02	0,09	0,04
	81,2	81,02	80,96	80,87	80,73	80,74	80,86	-0,41	0,13

Testovací objekt PM0350									
označení prvku	Teoretický rozměr [mm]	Naměřené rozměry [mm] číslo měření 1 – 5					Ø [mm]	Rozdíl [%]	Směrodatná odchylka [mm]
ZD	75	75,24	75,12	75,23	75,14	75,16	75,18	0,24	0,05
	65	65,14	65,02	65,11	65,07	65,04	65,08	0,12	0,05
	1,2	1,20	1,19	1,23	1,24	1,18	1,21	0,67	0,03
KX	10	9,40	9,12	9,23	9,18	9,34	9,25	-7,46	0,11
KY	10	9,33	9,25	9,29	9,42	9,36	9,33	-6,70	0,07
KZ	24	23,23	23,27	23,37	23,25	23,32	23,29	-2,97	0,06
DX	10 (y)	9,47	9,69	9,65	9,63	9,59	9,61	-3,94	0,08
	10 (z)	9,53	9,51	9,57	9,52	9,52	9,53	-4,70	0,02
DY	10 (x)	9,60	9,64	9,57	9,64	9,55	9,60	-4,00	0,04
	10 (z)	9,66	9,56	9,57	9,65	9,63	9,61	-3,86	0,05
DZ	10 (x)	23,54	23,60	23,56	23,52	23,61	23,57	-1,81	0,04
	10 (y)	23,50	23,37	23,55	23,43	23,49	23,47	-2,22	0,07
VM	10	10,18	10,16	10,25	10,17	10,21	10,19	1,94	0,04
VV	30	29,66	29,79	29,75	29,63	29,74	29,71	-0,95	0,07
HN	30	30,01	30,12	30,05	29,94	29,98	30,02	0,07	0,07
	30	29,94	29,82	29,96	30,01	29,92	29,93	-0,23	0,07
	11,2	10,87	10,92	11,03	11,00	10,97	10,96	-2,16	0,06
HM	10	10,13	10,12	10,18	10,16	10,13	10,14	1,44	0,03
	10	10,18	10,16	10,12	10,15	10,21	10,16	1,64	0,03
	16,2	15,71	15,67	15,89	15,86	16,00	15,83	-2,31	0,14
HV	30	30,01	30,20	30,12	30,16	30,08	30,11	0,38	0,07
	20	20,10	20,13	20,12	20,16	20,30	20,16	0,81	0,08
	81,2	79,71	79,72	79,80	79,71	79,75	79,74	-1,80	0,04

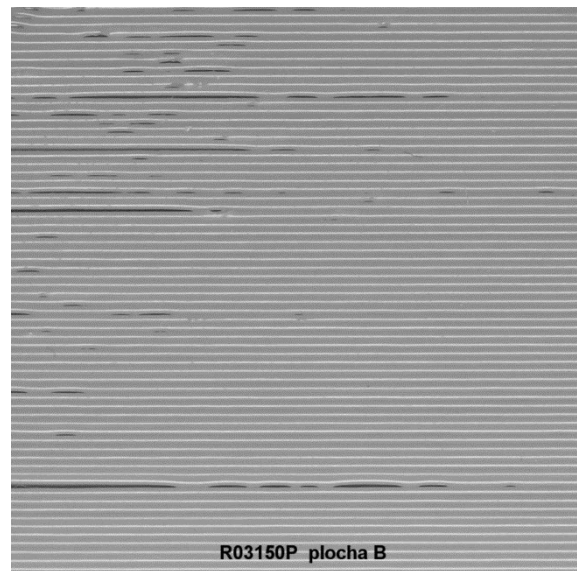
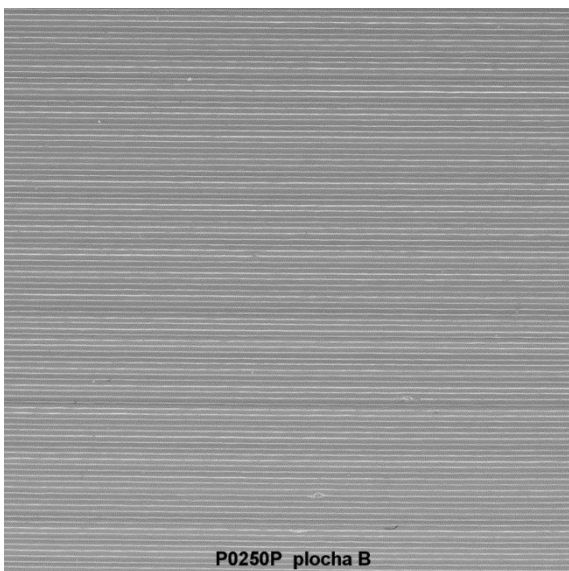
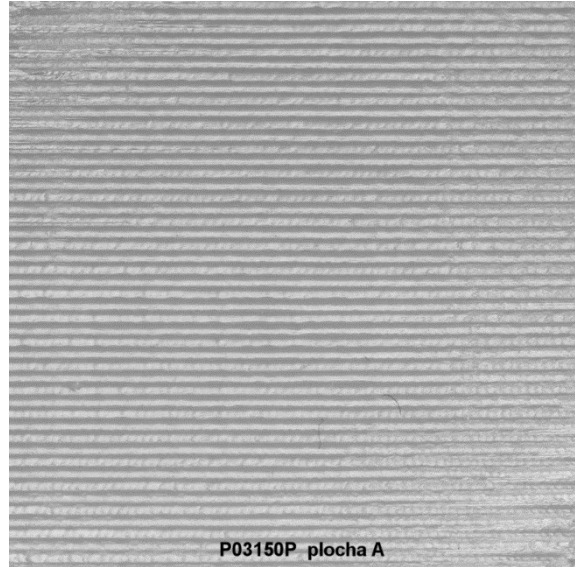
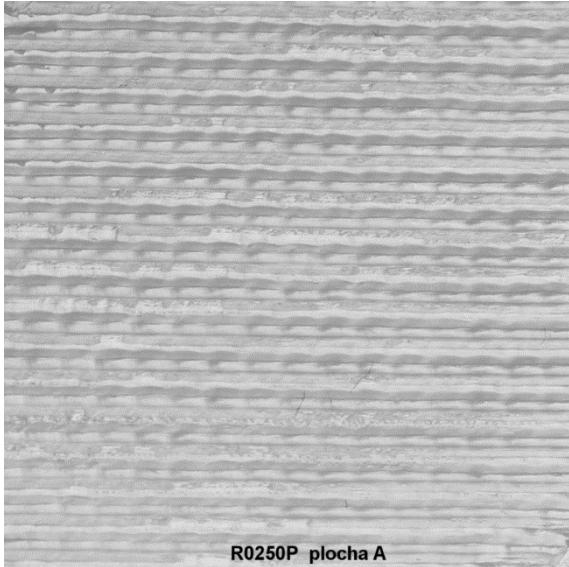
Testovací objekt PM03100									
označení prvku	Teoretický rozměr [mm]	Naměřené rozměry [mm] číslo měření 1 – 5					Ø [mm]	Rozdíl [%]	Směrodatná odchylka [mm]
ZD	75	75,02	75,10	74,98	75,03	75,02	75,04	0,06	0,04
	65	64,98	64,96	64,99	64,96	64,94	64,97	-0,05	0,02
	1,2	1,23	1,22	1,27	1,26	1,25	1,25	3,83	0,02
KX	10	9,07	9,02	9,12	9,05	9,12	9,08	-9,25	0,04
KY	10	9,10	9,48	9,37	9,12	9,18	9,25	-7,50	0,17
KZ	24	23,10	23,28	23,25	23,14	23,17	23,19	-3,38	0,08
DX	10 (y)	9,23	9,27	9,31	9,27	9,17	9,25	-7,50	0,05
	10 (z)	9,42	9,56	9,53	9,49	9,52	9,50	-4,96	0,05
DY	10 (x)	9,54	9,50	9,60	9,49	9,51	9,53	-4,72	0,04
	10 (z)	9,41	9,35	9,48	9,46	9,44	9,43	-5,72	0,05
DZ	24 (x)	23,62	23,61	23,52	23,56	23,59	23,58	-1,75	0,04
	24 (y)	23,39	23,54	23,54	23,57	23,38	23,48	-2,15	0,09
VM	10	10,13	10,11	10,25	10,22	10,18	10,18	1,78	0,06
VV	30	29,82	29,70	29,86	29,68	29,75	29,76	-0,79	0,08
HN	30	30,36	30,52	30,31	30,45	30,48	30,42	1,41	0,09
	30	30,38	30,40	30,36	30,41	30,39	30,39	1,29	0,02
	11,2	11,36	11,33	11,32	11,37	11,29	11,33	1,20	0,03
HM	10	10,41	10,49	10,51	10,44	10,49	10,47	4,68	0,04
	10	10,43	10,50	10,52	10,47	10,45	10,47	4,74	0,04
	16,2	16,20	16,55	16,54	16,39	16,43	16,42	1,37	0,14
HV	30	30,27	30,50	30,47	30,22	30,39	30,37	1,23	0,12
	20	20,33	20,41	20,73	20,45	20,39	20,46	2,31	0,16
	81,2	80,89	80,81	80,68	80,82	80,74	80,79	-0,51	0,08

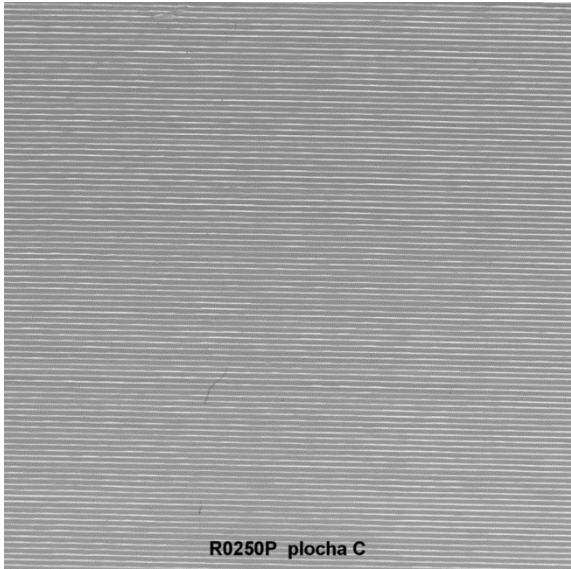
Testovací objekt PM02100									
označení prvku	Teoretický rozměr [mm]	Naměřené rozměry [mm] číslo měření 1 – 5					Ø [mm]	Rozdíl [%]	Směrodatná odchylka [mm]
ZD	75	75,31	75,10	75,06	75,23	75,15	75,17	0,23	0,10
	65	64,98	64,74	64,89	64,82	64,96	64,88	-0,19	0,10
	1,2	1,28	1,33	1,22	1,17	1,32	1,26	5,33	0,07
KX	10	9,15	9,72	9,21	9,78	9,23	9,42	-5,82	0,31
KY	10	8,69	9,02	8,72	9,00	8,87	8,86	-11,40	0,15
KZ	24	23,17	23,09	23,18	23,31	23,25	23,20	-3,33	0,08
DX	10 (y)	9,34	9,21	9,45	9,35	9,42	9,35	-6,46	0,09
	10 (z)	9,34	9,24	9,25	9,33	9,29	9,29	-7,10	0,05
DY	10 (x)	9,53	9,48	9,50	9,51	9,48	9,50	-5,00	0,02
	10 (z)	9,28	9,29	9,34	9,11	9,30	9,26	-7,36	0,09
DZ	24 (x)	23,55	23,47	23,52	23,45	23,56	23,51	-2,04	0,05
	24 (y)	23,51	23,40	23,48	23,52	23,43	23,47	-2,22	0,05
VM	10	10,39	10,28	10,29	10,41	10,34	10,34	3,42	0,06
VV	30	30,01	29,78	29,97	29,80	29,79	29,87	-0,43	0,11
HN	30	30,13	30,11	30,10	30,20	30,17	30,14	0,47	0,04
	30	29,92	29,94	30,01	29,96	29,95	29,96	-0,15	0,03
	11,2	11,43	11,28	11,29	11,34	11,40	11,35	1,32	0,07
HM	10	10,38	10,43	10,42	10,29	10,36	10,38	3,76	0,06
	10	10,29	10,23	10,27	10,25	10,30	10,27	2,68	0,03
	16,2	16,33	16,20	16,08	16,25	16,30	16,23	0,20	0,10
HV	30	30,75	30,58	30,43	30,34	30,39	30,50	1,66	0,17
	20	20,62	20,72	20,71	20,68	20,70	20,69	3,43	0,04
	81,2	80,41	80,65	80,70	80,76	80,69	80,61	-0,72	0,14

Testovací objekt RM02100									
označení prvku	Teoretický rozměr [mm]	Naměřené rozměry [mm] číslo měření 1 – 5					Ø [mm]	Rozdíl [%]	Směrodatná odchylka [mm]
ZD	75	75,37	75,43	75,31	75,39	75,30	75,36	0,48	0,05
	65	64,97	64,91	65,01	65,00	64,96	64,97	-0,05	0,04
	1,2	1,22	1,18	1,24	1,23	1,25	1,22	2,00	0,03
KX	10	9,46	9,33	9,68	9,35	9,65	9,49	-5,06	0,16
KY	10	9,74	9,81	9,66	9,70	9,65	9,71	-2,88	0,07
KZ	24	23,56	23,58	23,76	23,68	23,62	23,64	-1,50	0,08
DX	10 (y)	9,40	9,38	9,39	9,42	9,40	9,40	-6,02	0,01
	10 (z)	9,70	9,76	9,67	9,72	9,76	9,72	-2,78	0,04
DY	10 (x)	9,75	9,60	9,85	9,83	9,78	9,76	-2,38	0,10
	10 (z)	9,75	9,82	9,75	9,77	9,82	9,78	-2,18	0,04
DZ	24 (x)	23,99	23,88	23,92	23,94	23,95	23,94	-0,27	0,04
	24 (y)	23,66	23,69	23,65	23,70	23,64	23,67	-1,38	0,03
VM	10	9,87	9,91	10,08	9,94	9,89	9,94	-0,62	0,08
VV	30	29,87	29,90	29,88	29,96	29,94	29,91	-0,30	0,04
HN	30	30,20	30,05	30,21	30,16	30,17	30,16	0,53	0,06
	30	29,91	29,93	29,94	29,98	29,89	29,93	-0,23	0,03
	11,2	11,23	11,17	11,32	11,20	11,28	11,24	0,36	0,06
HM	10	10,30	10,37	10,29	10,32	10,35	10,33	3,26	0,03
	10	10,09	10,08	10,12	10,10	10,13	10,10	1,04	0,02
	16,2	16,10	16,17	16,08	16,15	16,15	16,13	-0,43	0,04
HV	30	30,35	30,33	30,24	30,27	30,34	30,31	1,02	0,05
	20	20,15	20,04	20,11	20,12	20,09	20,10	0,51	0,04
	81,2	81,02	81,08	81,18	81,16	81,09	81,11	-0,12	0,06

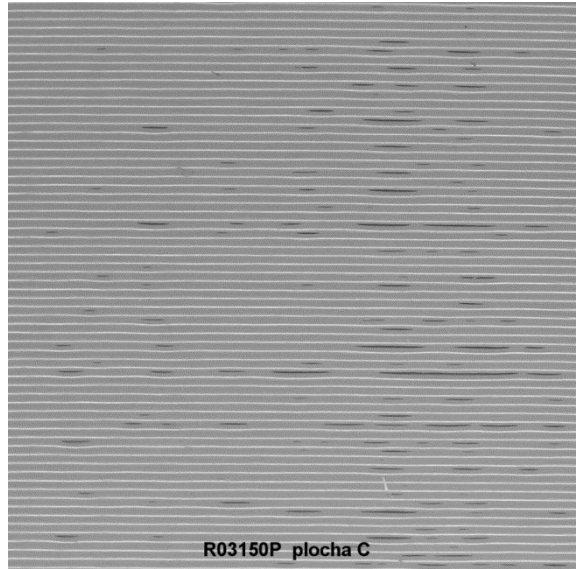
Testovací objekt RM03100									
označení prvku	Teoretický rozměr [mm]	Naměřené rozměry [mm] číslo měření 1 – 5					Ø [mm]	Rozdíl [%]	Směrodatná odchylka [mm]
ZD	75	74,91	74,99	74,92	74,96	74,93	74,94	-0,08	0,03
	65	64,80	64,84	64,79	64,85	64,80	64,81	-0,29	0,03
	1,2	1,24	1,31	1,18	1,25	1,21	1,24	3,17	0,05
KX	10	9,64	9,72	9,45	9,60	9,54	9,59	-4,10	0,10
KY	10	9,58	9,64	9,49	9,56	9,61	9,58	-4,24	0,06
KZ	24	23,30	23,27	23,55	23,26	23,50	23,38	-2,60	0,14
DX	10 (y)	9,71	9,53	9,55	9,68	9,69	9,63	-3,68	0,08
	10 (z)	9,64	9,59	9,61	9,59	9,65	9,62	-3,84	0,03
DY	10 (x)	9,70	9,62	9,56	9,65	9,68	9,64	-3,58	0,05
	10 (z)	9,71	9,65	9,70	9,60	9,66	9,66	-3,36	0,04
DZ	24 (x)	23,86	23,84	23,87	23,80	23,82	23,84	-0,67	0,03
	24 (y)	23,52	23,65	23,60	23,67	23,50	23,61	-1,62	0,07
VM	10	10,08	10,02	10,16	10,17	10,05	10,10	0,96	0,07
VV	30	29,76	29,84	29,69	29,71	29,73	29,75	-0,85	0,06
HN	30	30,13	30,11	30,16	30,10	30,12	30,12	0,41	0,02
	30	30,05	30,02	30,00	30,06	30,04	30,03	0,11	0,02
	11,2	11,26	10,97	11,08	11,12	11,24	11,13	-0,59	0,12
HM	10	10,29	10,34	10,26	10,26	10,27	10,28	2,84	0,03
	10	10,09	10,05	10,07	10,07	10,10	10,08	0,76	0,02
	16,2	16,07	16,30	16,23	16,12	16,09	16,16	-0,23	0,10
HV	30	30,18	30,26	30,46	30,29	30,30	30,30	0,99	0,10
	20	20,34	20,43	20,40	20,18	20,35	20,34	1,70	0,10
	81,2	80,99	81,03	81,01	80,96	81,12	81,03	-0,21	0,07

Příloha III – snímky povrchu

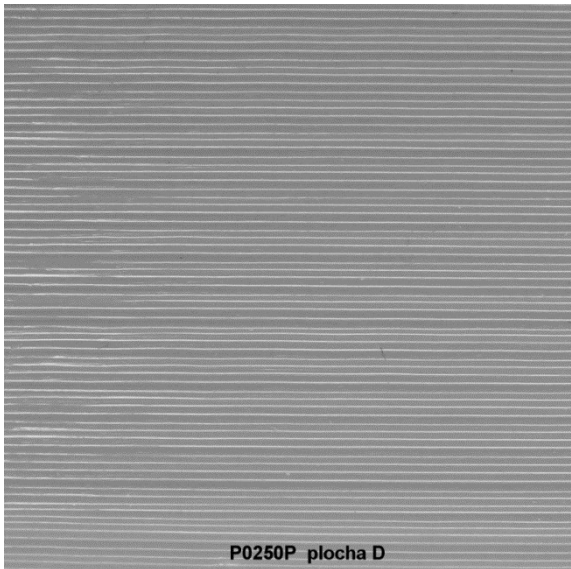




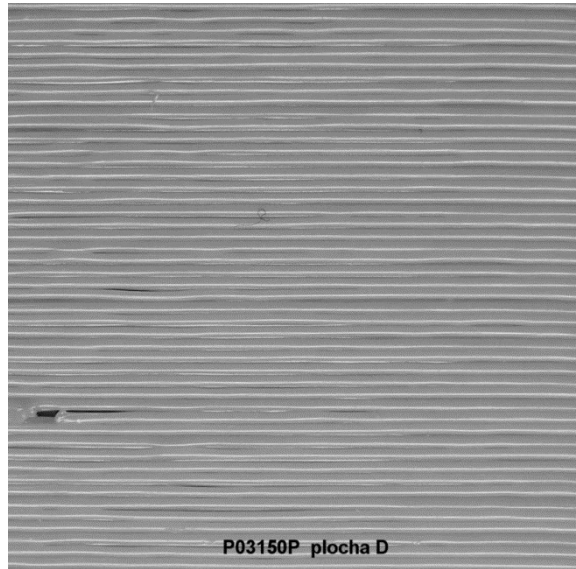
R0250P plocha C



R03150P plocha C



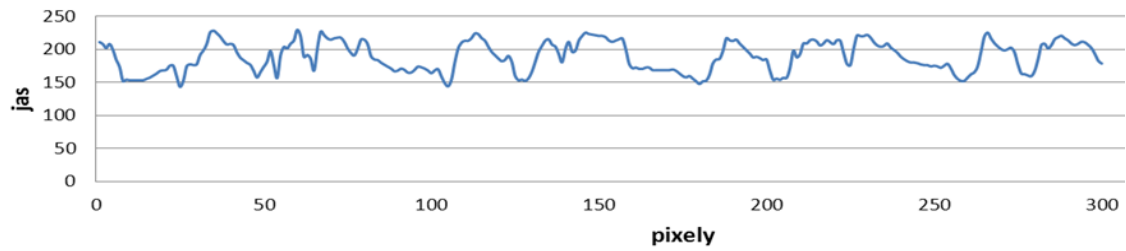
P0250P plocha D



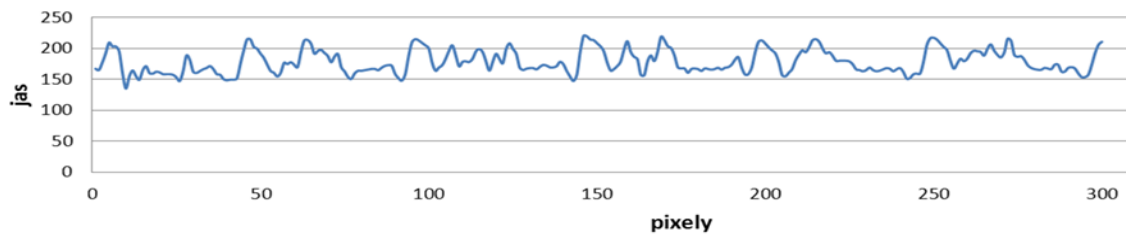
P03150P plocha D

Příloha IV – grafy reliéfu povrchu

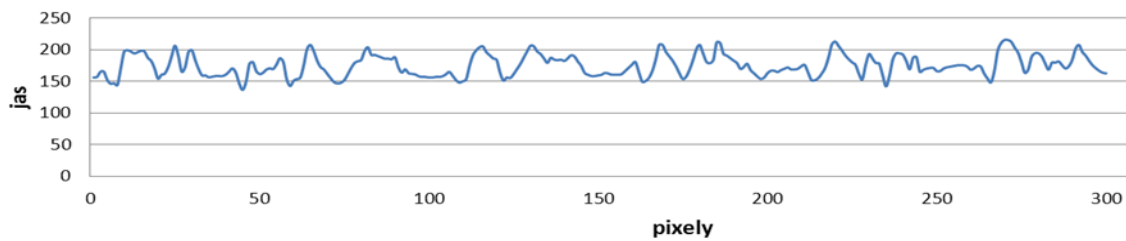
R0250P – plocha A



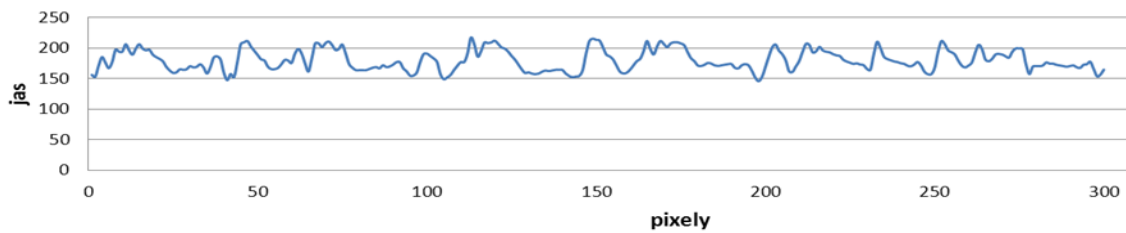
R0350P – plocha A



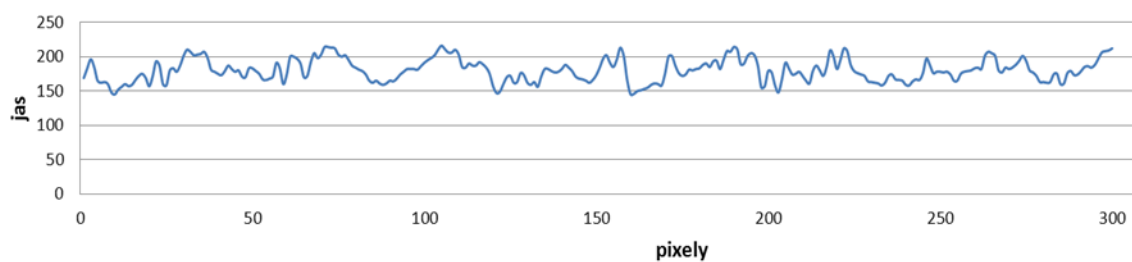
R03100P – plocha A



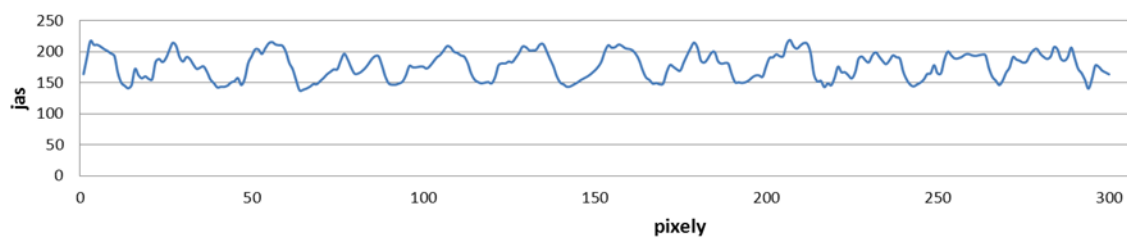
R03150P – plocha A



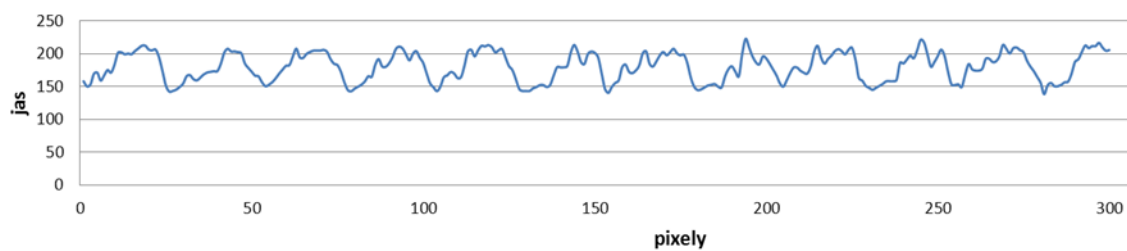
P0250P – plocha A



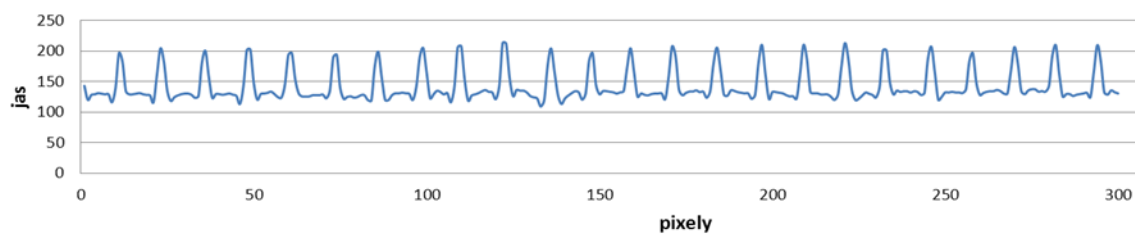
P03100P – plocha A



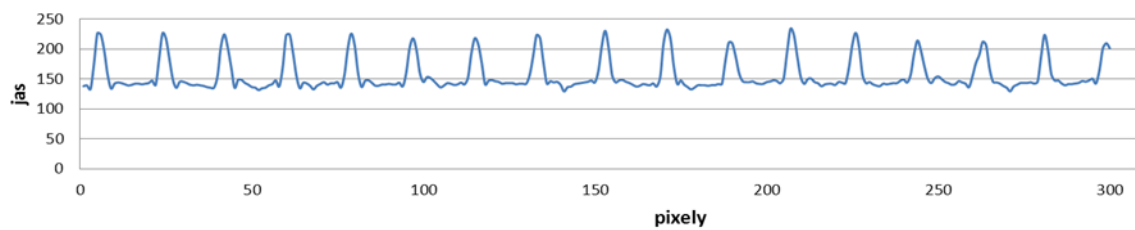
P03150P – plocha A



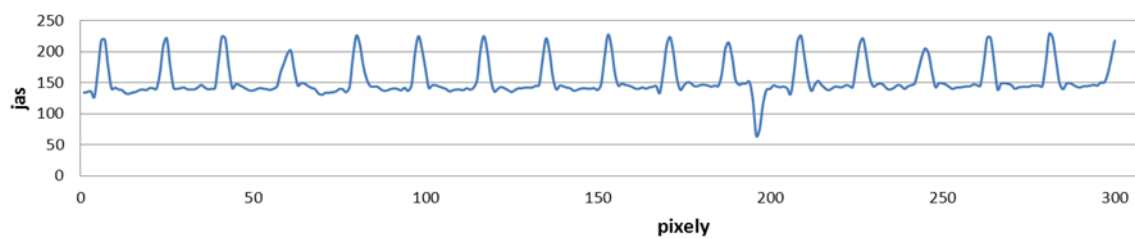
R0250P – plocha B



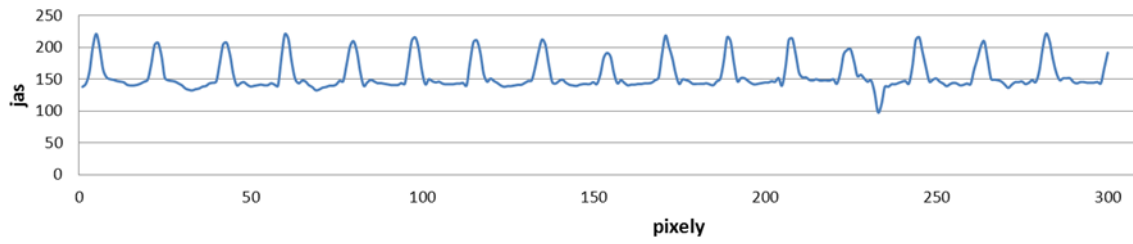
R0350P – plocha B



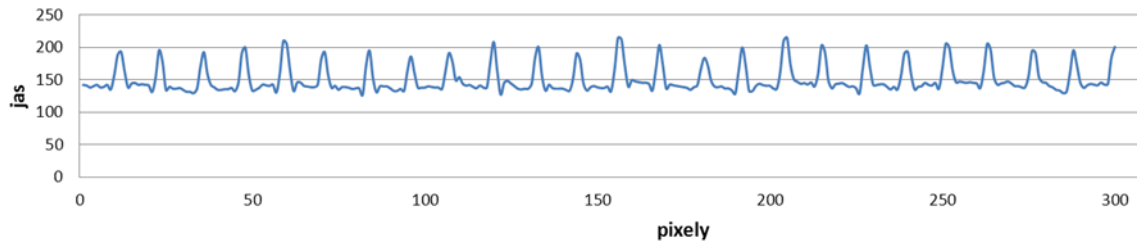
R03100P – plocha B



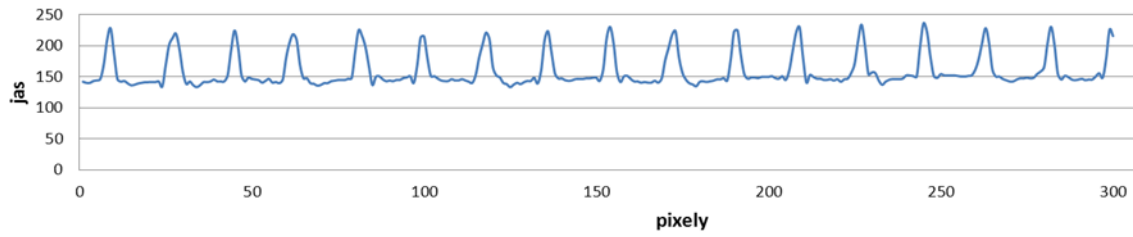
R03150P – plocha B



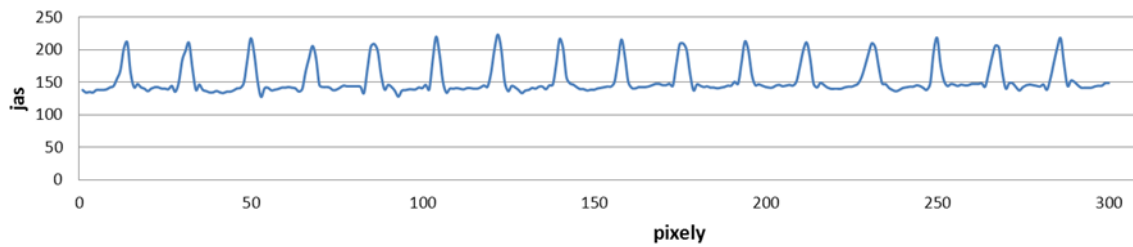
P0250P – plocha B



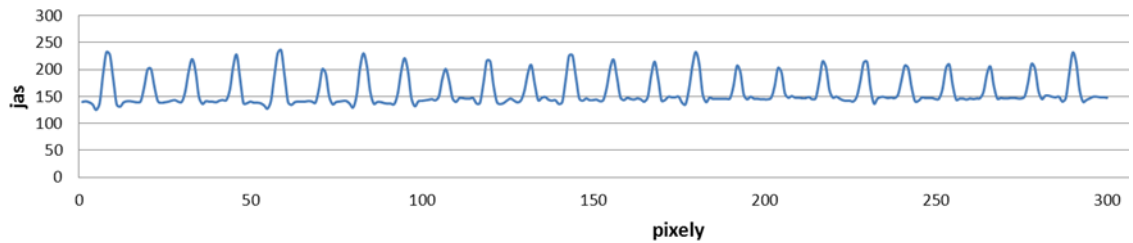
P03100P – plocha B



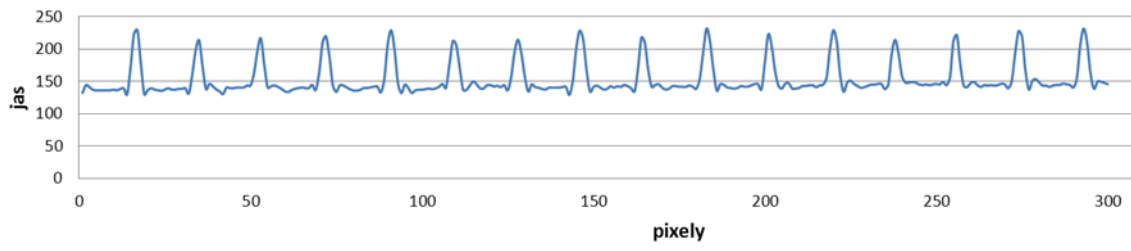
P03150P – plocha B



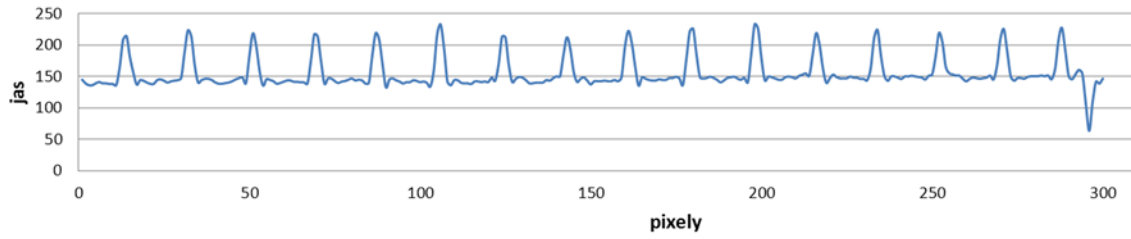
R0250P – plocha C



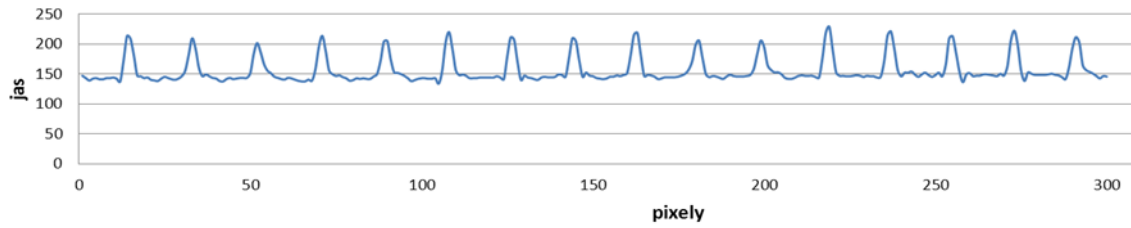
R0350P – plocha C



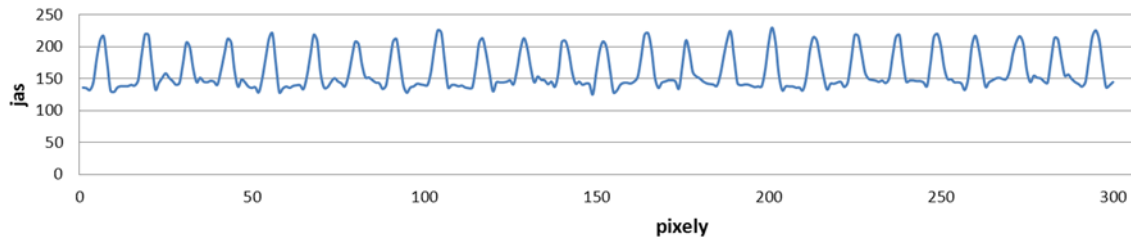
R03100P – plocha C



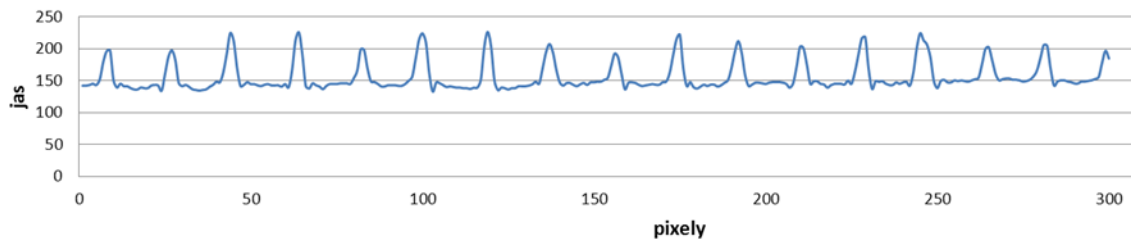
R03150P – plocha C



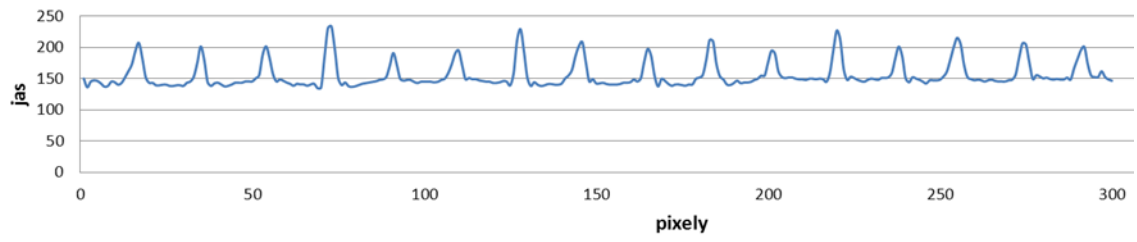
P0250P – plocha C



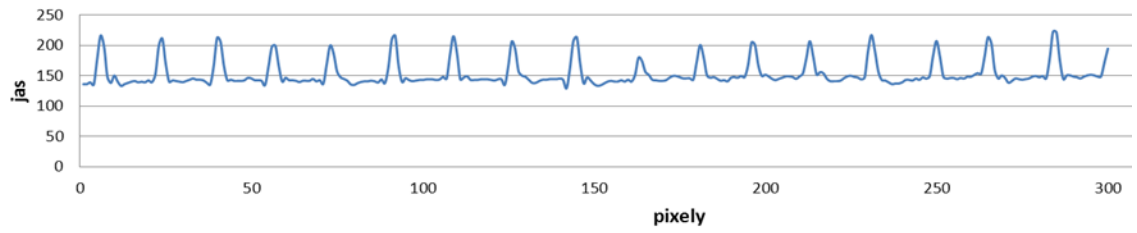
P03100P – plocha C



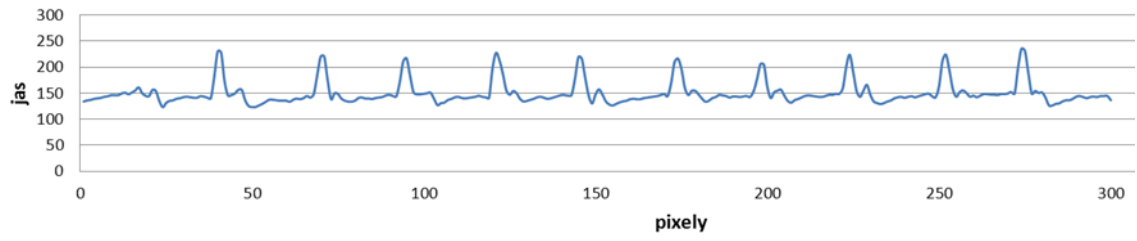
P03150P – plocha C



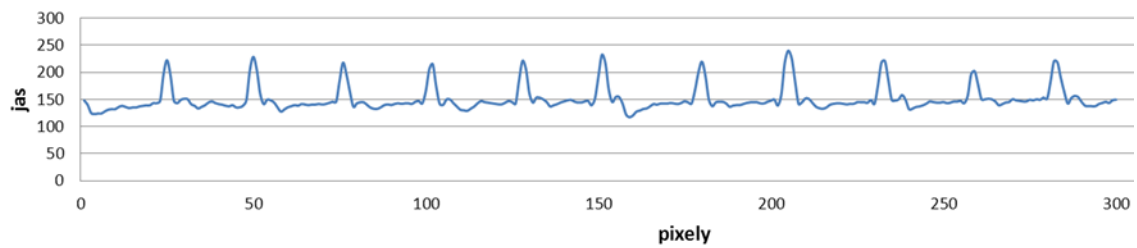
R0250P – plocha D



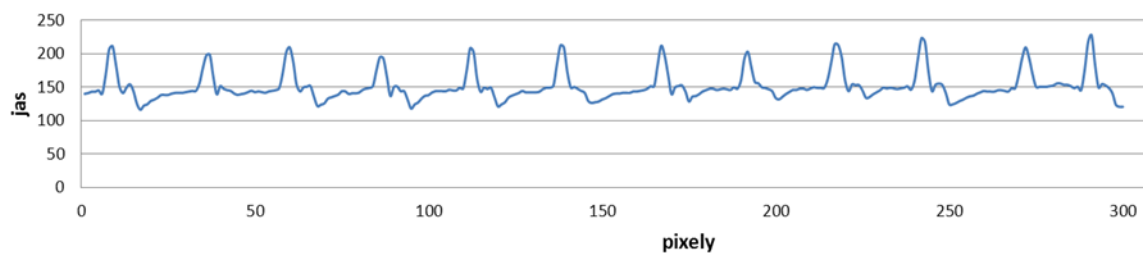
R0350P – plocha D



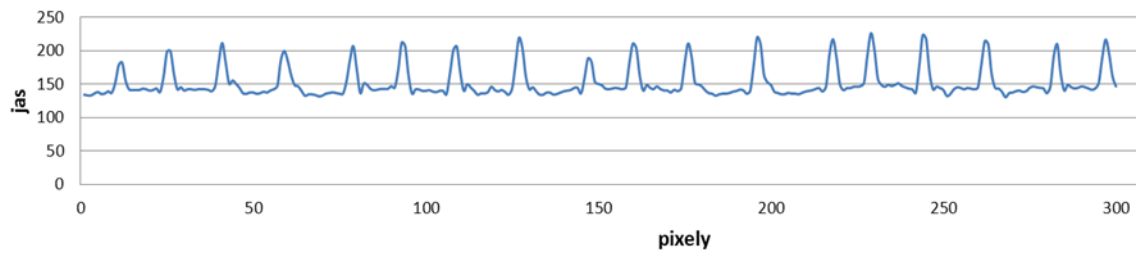
R03100P – plocha D



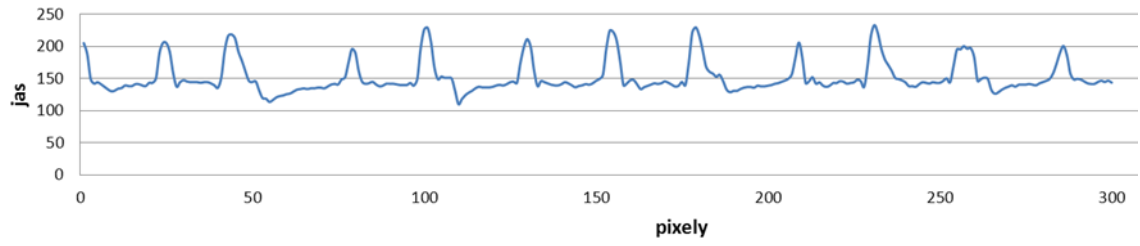
R03150P – plocha D



P0250P – plocha D



P03100P – plocha D



P03150P – plocha D

