

Porovnání mechanických a povrchových vlastností dílů vyrobených aditivními technologiemi

Bc. Václav Přivřel

Diplomová práce
2017



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Václav Přivřel**
Osobní číslo: **T15395**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Porovnání mechanických a povrchových vlastností dílů vyrobených aditivními technologiemi**

Zásady pro vypracování:

- 1. Vypracování literární rešerše na danou problematiku.**
- 2. Výroba a příprava zkušebních těles.**
- 3. Provedení experimentů.**
- 4. Vyhodnocení naměřených výsledků**
- 5. Závěr.**

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího diplomové práce.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Martin Bednařík, Ph.D.
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

2. ledna 2017

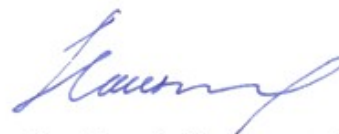
Termín odevzdání diplomové práce:

12. května 2017

Ve Zlíně dne 26. ledna 2017



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.
děkan



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užit své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 11. května 2017


.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno,

v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezahnuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídně k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá porovnáním mechanických a povrchových vlastností zkušebních těles, která byla vyrobena třemi odlišnými aditivními technologiemi. Dále práce porovnává vizuální kvalitu tisku mezi jednotlivými metodami. Zkušební tělesa byla zhotovena aditivními technologiemi Fused Deposition Modeling, Selective Laser Sintering a PolyJet.

Klíčová slova: Aditivní technologie, 3D tisk, mechanické vlastnosti, FDM, PJ, SLS, kvalita tisku.

ABSTRACT

This master thesis deals with comparison of mechanical and surface properties of the testing bodies, which were produced by three different additive technology. The thesis than compare the visual quality of printing between the individual methods. The testing bodies were made by additive technology Fused Deposition Modeling, Selective Laser Sintering and PolyJet.

Keywords: Additive technology, 3D printing, mechanical properties, FDM, PJ, SLS.

Děkuji tímto Ing. Martinu Bednaříkovi, Ph.D. za cenné připomínky, ochotu a rady při vypracování diplomové práce. Dále děkuji Ing. Pavlu Stokláskovi za rady při praktické části práce a také rodině a přítelkyni za podporu během celého studia.

Prohlašuji, že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků, je-li to uvedeno na základě licenční smlouvy, budu uveden jako spoluautor. Dále prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně, 11. 5. 2017

.....
Podpis studenta

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 ADITIVNÍ TECHNOLOGIE	12
1.1 HISTORIE.....	12
1.2 PRINCIP TECHNOLOGIE.....	13
1.2.1 3D Model.....	14
1.2.2 Převod do formátu .STL.....	15
1.2.3 Rozdělení na vrstvy.....	16
1.2.4 Tisk výrobku.....	17
1.2.5 Postprocesing.....	17
1.3 BUDOUCNOST 3D TISKU.....	17
2 DRUHY ADITIVNÍCH TECHNOLOGIÍ	20
2.1 METODY NA BÁZI PEVNÝCH MATERIÁLŮ.....	20
2.1.1 Fused Deposition Modeling – FDM.....	20
2.1.2 Laminated Object Manufacturing – LOM.....	21
2.1.3 Multi Jet Modeling – MJM.....	22
2.1.4 Selective Laser Sintering – SLS.....	23
2.1.5 Direct Metal Laser Sintering – DMLS.....	24
2.1.6 3D Printing – 3DP.....	25
2.2 METODY NA BÁZI KAPALNÝCH MATERIÁLŮ.....	26
2.2.1 Stereolitografie – SLA.....	26
2.2.2 Solid Ground Curing – SGC.....	27
2.2.3 PolyJet - PJ.....	28
2.3 POROVNÁNÍ VÝHOD A NEVÝHOD JEDNOTLIVÝCH VÝROBNÍCH METOD.....	29
3 ZKOUŠENÍ MATERIÁLŮ	30
3.1 MECHANICKÉ ZKOUŠKY STATICKÉ.....	30
3.1.1 Zkouška tahem.....	30
3.1.2 Zkouška ohybem.....	33
3.2 MECHANICKÉ ZKOUŠKY DYNAMICKÉ.....	34
3.2.1 Zkouška rázem v ohybu.....	34
3.2.2 Rázová zkouška pádem.....	36
3.3 ZKOUŠKY TVRDOSTI.....	37
3.3.1 Tvrdost podle Brinella.....	37
3.3.2 Tvrdost podle Vickerse.....	37
3.3.3 Tvrdost podle Rockwella.....	38
3.3.4 Tvrdost Shore.....	38
3.3.5 Instrumentovaná zkouška tvrdosti - DSI.....	39
3.4 MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU.....	40
3.4.1 Výškové parametry.....	40
3.4.2 Přístroje pro měření drsnosti.....	41
II PRAKTICKÁ ČÁST	42
4 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	43
5 PŘÍPRAVA A VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLĚS	44

5.1	ZKUŠEBNÍ TĚLESA ZHOTOVENÁ METODOU FDM.....	44
5.1.1	3D tiskárna Stratasys Fortus 900mc.....	44
5.1.2	Materiál ABS-M30.....	45
5.2	ZKUŠEBNÍ TĚLESA ZHOTOVENÁ METODOU SLS	46
5.2.1	3D tiskárna EOS P396	46
5.2.2	Materiál PA 2200	47
5.3	ZKUŠEBNÍ TĚLESA ZHOTOVENÁ METODOU PJ.....	48
5.3.1	3D tiskárna OBJET EDEN 250.....	48
5.3.2	Materiál VeroGray	49
5.4	VÝROBA TĚLES PRO VIZUÁLNÍ POROVNÁNÍ KVALITY TISKU	50
6	PROVEDENÍ EXPERIMENTŮ	52
6.1	ZKOUŠKY MECHANICKÉ STATICKÉ	52
6.1.1	Zkouška tahem	52
6.1.2	Zkouška ohybem	55
6.2	ZKOUŠKY MECHANICKÉ DYNAMICKÉ	58
6.2.1	Zkouška rázem v ohybu	58
6.2.2	Rázová zkouška pádem	65
6.3	INSTRUMENTOVANÁ ZKOUŠKA TVRDOSTI DSI	68
6.3.1	Indentanční křivky	69
6.3.2	Vtisková tvrdost H_{IT} a tvrdost podle Vickerse HV	72
6.3.3	Vtiskové tečení C_{IT}	74
6.4	MĚŘENÍ DRSNOSTI ROVINNÝCH PLOCH.....	75
6.4.1	Drsnost povrchu pro metodu FDM	76
6.4.2	Drsnost povrchu pro SLS	80
6.4.3	Drsnost povrchu pro PJ	83
6.5	VIZUÁLNÍ POROVNÁNÍ KVALITY TISKU	87
7	DISKUSE VÝSLEDKŮ	94
	ZÁVĚR	98
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	99
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	102
	SEZNAM OBRÁZKŮ	104
	SEZNAM TABULEK.....	108
	SEZNAM PŘÍLOH.....	110

ÚVOD

Aditivní technologie podléhá v posledních letech velkému rozvoji a zdokonalování. Jednotlivé druhy technologií mají velké specifické uplatnění ve výrobě nejen plastových, ale i kovových dílů. Hlavním principem tohoto způsobu výroby je tvorba trojrozměrného finálního výrobku, který je skládán z navršování vrstev daného materiálu. Samotný výrobní proces se skládá z vytvoření modelu v CAD softwaru, který je následně převeden do STL formátu. Tento standardní formát je importován do výrobního zařízení, kde probíhá tisk součástí. Posledním krokem výroby je konečná úprava výrobku, známá také pod názvem postprocessing.

Aditivní technologie nalézají využití ve všech různých technologických odvětvích, ať už se jedná o letecký, automobilový, vojenský nebo kosmický průmysl. Velké uplatnění mají dále ve zdravotnictví a designu architektury staveb. Pomocí těchto technologií se dají vyrobit velmi přesné a složité tvary, které by se nedaly například zhotovit klasickými konvenčními způsoby. S poměrně velkým nárůstem využití těchto technologií na trhu je důležité znát, jak se liší vlastnosti vyrobených součástí při použití odlišné technologie výroby.

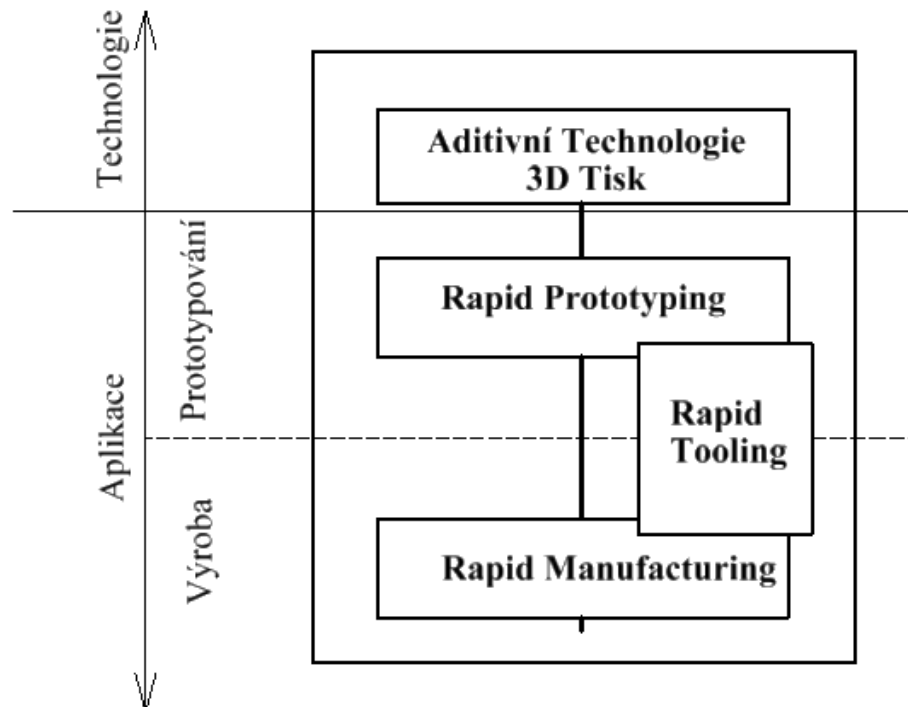
Cílem této práce je provést a vyhodnotit povrchové a mechanické zkoušky pro zkušební vzorky, které byly vyrobeny odlišnými aditivními technologiemi. Získané výsledky mohou sloužit jako aspekty při volbě mezi technologiemi 3D tisku pro výrobu budoucích prototypů. Měření všech připravených zkušebních vzorků proběhlo na Fakultě technologické UTB ve Zlíně a v Regionálním výzkumném centru CEBIA-Tech, které sídlí na Fakultě aplikované informatiky UTB ve Zlíně.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ADITIVNÍ TECHNOLOGIE

Aditivní technologie výroby neboli 3D tisk je označována zkratkou AM z anglického additive manufacturing a dále se dělí do dvou hlavních aplikačních úrovní: rapid prototyping a rapid manufacturing [1].

Rapid prototyping (RP) se zabývá výrobou prototypů modelů nebo maket. Při ní je většinou testována určitá vlastnost součásti a nejedná se tedy o konečný výrobek. Naopak aplikace rapid manufacturing (RM) se soustředí na výrobu finálních produktů. Mezi tyto dvě hlavní aplikace se řadí metoda rapid tooling (RT), která se zaměřuje na výrobu nářadí nebo měřidel. Do této metody patří výroba finálních produktu i výroba prototypů [1].



Obr. 1. Hlavní rozdělení aditivní technologie [1].

1.1 Historie

Už je tomu více než 25 let, co aditivní výroba začala pronikat do světa. Počátkem roku 1980 začal pracovat Chuck Hull, který je mimo jiné považován za jednoho z otců počátků aditivní výroby, na metodě vrstveného modelování pomocí vytvrditelných monomerů. V roce 1984 mu byl udělen patent na zařízení, které vyrábí trojrozměrné objekty pomocí technologie s názvem Stereolithografie (SLA). V roce 1986 Chuck Hull s kolektivem založil firmu 3D Systems corporation, která patří v dnešní době k největším organizacím působícím v oblasti 3D tisku a v listopadu roku 1987 byl v Deatroitu na veletrhu AutoFact od-

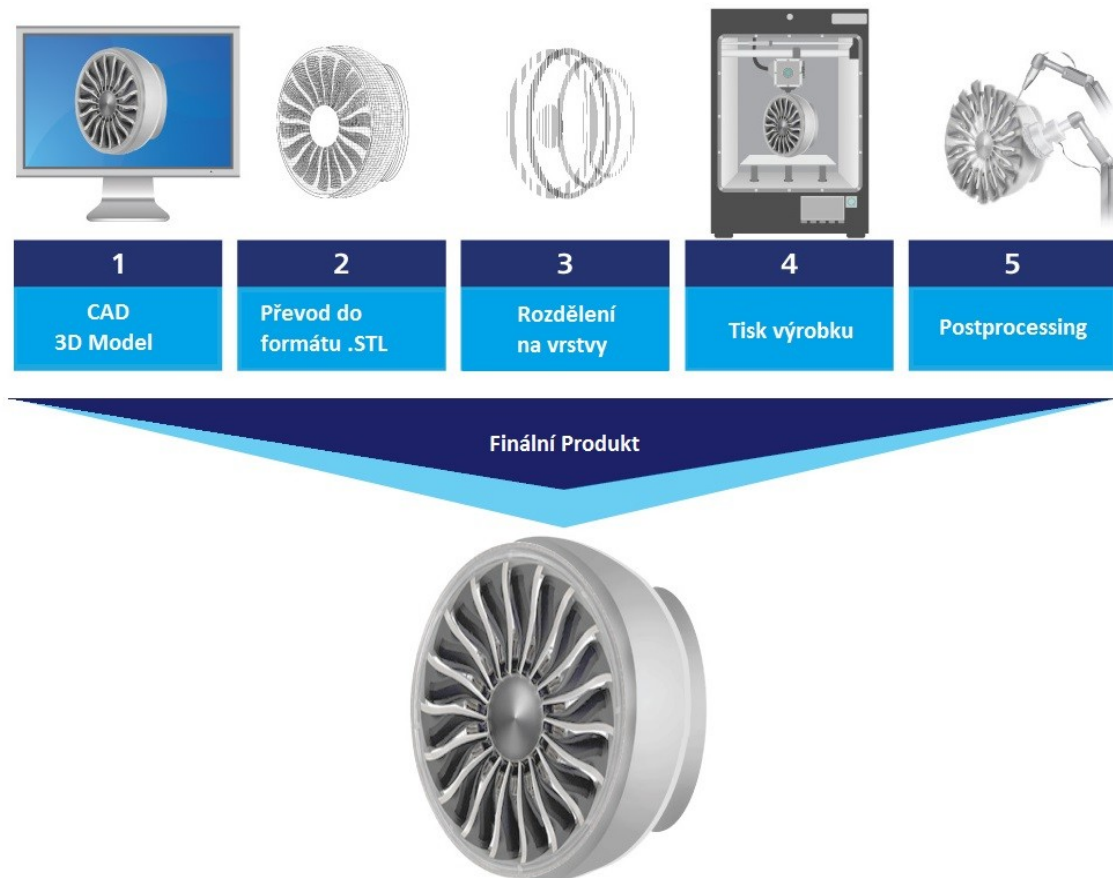
halen první stroj založený na principu stereolitografie. Do Evropy byl příchod těchto strojů zaznamenán kolem roku 1990 [1, 2].

O další vývoj aditivní výroby se postaral Carl Deckard, který pracoval na universitě v Texasu. V roce 1989 mu byl uznán patent na technologii Selective Laser Sintering (SLS). Téhož roku v Německu Hans Langer vyvinul EOS systémy, které jsou v dnešní době uznávané po celém světě. Mezi prvotní zakladatele aditivních technologií může být také zahrnut spoluzakladatel společnosti Stratatys Inc. Scott Crump. V roce 1992 dostala tato společnost patent na technologii Fused Deposition Modelling (FDM) a je jeho držitelem dodnes [2].

1.2 Princip technologie

Všechny výrobní aditivní technologie jsou založeny na principu postupného nanášení jednotlivých vrstev materiálu stejné tloušťky. Tvarování vrstev probíhá dvojrozměrně v rovině X-Y. Třetí výsledný rozměr vzniká postupným kladením do směru Z. V současné době se obvykle nejvíce využívají vrstvy o tloušťce 0,1 až 0,05 mm. Stroje, které se používají pro makroskopické komponenty, mají minimální tloušťku vrstvy 0,0016 mm. Pro mikroskopické komponenty se tloušťky vrstev mohou pohybovat až v rozsahu 5 nm [1].

Výrobní proces aditivní technologie se skládá z jednotlivých specifických kroků. Nejprve je nutné zhotovit 3D model požadovaného výrobku pomocí CAD softwaru nebo zpětným skenováním součásti 3D skenerem. Takto vytvořený virtuální model musí být převeden do datového formátu .STL a rozdělen na jednotlivé vrstvy. V dalším kroku probíhá samotný tisk výrobku. Poslední částí procesu je finální úprava výrobku, tedy postprocessing. Příklad výrobního procesu je zobrazen na Obrázku číslo 2 [1, 3].



Obr. 2. Proces aditivní výroby [4].

1.2.1 3D Model

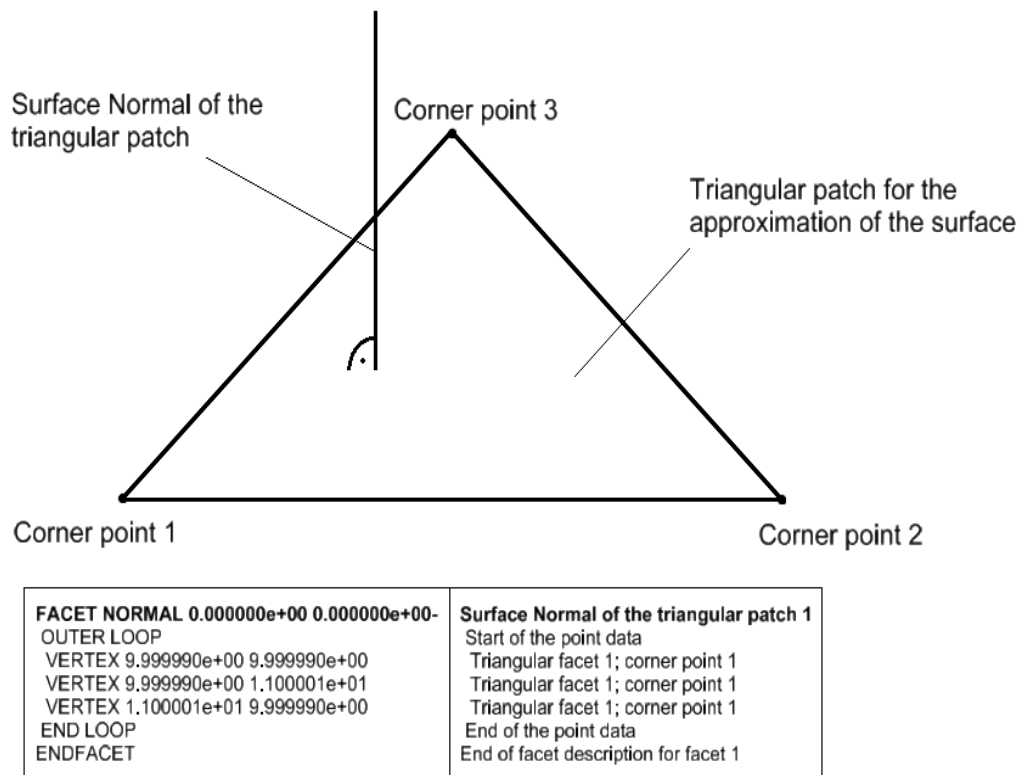
Výroba modelů a prototypů prostřednictvím aditivních procesů vyžaduje, aby geometrie součásti byla k dispozici jako záznam 3D dat. Toho lze dosáhnout ve většině průmyslových aplikací konstrukcí pomocí 3D CAD systémů nebo použitím měřících technologií. Tvorba modelu probíhá nezávisle na výrobě a je vhodné, aby byla sdílena celým konstrukčním týmem například za účelem provedení pevnostních výpočtů, FEM analýzy či při plánování výroby. Struktura a datové prvky rozhodují o vysokém stupni kvality CAD systému a jeho kompatibilitě s jinými systémy přes daná rozhraní. CAD systém dále definuje typ, rozsah a kvalitu aditivního procesu [1, 3].

Získávání 3D dat pomocí měřících technologií je oproti klasickému modelování opačný postup, při němž je znám fyzický model. Naměřená data mohou být převedena na 3D CAD model pomocí speciálních programů. Jedná se o převod bodových dat o nižší geometrické hodnotě na povrchová data vyšší geometrické hodnoty. V oblasti strojírenství se tímto způsobem zabývá obor reverzní inženýrství. Speciální měřící technologií je získávání 3D dat z

počítačové tomografie (CT), která je stále více využívána v technickém průmyslu. Skenování pomocí CT skeneru se používá například pro nedestruktivní testování a také pro tvorbu 3D dat. Získaná CT data mohou být převedena na 3D objemový model, který lze použít pro procesy aditivní výroby [1].

1.2.2 Převod do formátu .STL

Po vytvoření 3D modelu je nutné tato data převést do požadovaného formátu, který podporuje 3D tisk. Jako standardní formát se používá formát .STL. Byl vyvinut společností 3D Systems, která jej využívala pro svou první technologii SLA. Princip převodu do formátu .STL je nahrazení CAD modelu velkým počtem trojúhelníkových elementů. Objemové trojúhelníkové prvky vykazují nejméně dva povrchy, vnitřní a vnější. Data STL jsou dána normálovým vektorem a souřadnicemi tří vrcholů každého elementu. Rozlišují se dva druhy souborů formátu .STL, binární soubor a ASCII soubor. Oproti binárnímu souboru má ASCII soubor výhodu snazšího čtení a kontroly dat. Naopak nevýhodou je velká velikost souboru [1, 3].



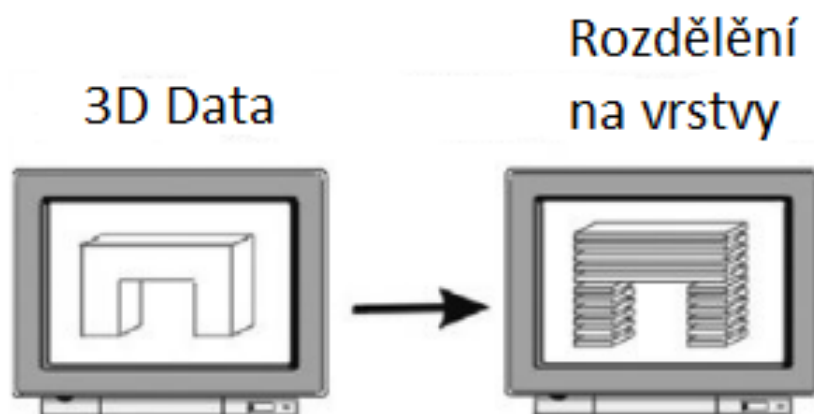
Obr. 3. Trojúhelníkový prvek datového souboru ASCII [1].

Převod do .STL formátu je asi nejjednodušší a nejkratší úsek celého procesního řetězce. Nicméně u velmi komplexních modelů spolu s extrémně nízkým výkonem PC může převod trvat až několik hodin. V opačném případě by měl převod do souboru .STL trvat jen několik minut. Nevýhodou .STL formátu je, že obsahuje pouze informace o geometrii součásti. Informace o barvě, textuře materiálu a další charakteristiky fyzického modelu ve formátu chybí [3].

V průběhu transformace dat vnitřní geometrie 3D CAD modelu do formátu .STL může dojít k různým chybám. Mezi nejobvyklejší patří: mezery mezi trojúhelníkovými elementy, obrácené normály ploch, degenerování plochy a průnik nebo zdvojení hran mezi trojúhelníkovými elementy [1].

1.2.3 Rozdělení na vrstvy

Dříve než dojde k samotnému tisku výrobku, musí být virtuální model rozdělen na jednotlivé vrstvy. K tomu úkonu slouží generování informací o každé vrstvě, jenž je založeno čistě na počítačově orientovaném CAD modelu, který je virtuálně pomyslně řezán do vrstev stejné tloušťky pomocí matematických metod. Vypočítaná virtuální informační vrstva slouží ke generování fyzické vrstvy v zařízení aditivní výroby. Součet jednotlivých vygenerovaných vrstev tvoří celkový model [1].



Obr. 4. Generování jednotlivých vrstev z 3D dat [1].

Generování informací jednotlivých vrstev je rozděleno do tří kroků [1]:

- popis geometrie pomocí záznamu 3D dat,
- generování geometrických informací z každé vrstvy,
- znázornění geometrických informací v každé vrstvě.

1.2.4 Tisk výrobku

Tato část procesu je u většiny aditivních technologií plně automatizována. Stavba výrobku se z hlediska fyzikálního principu liší dle použití aditivní technologie. Celý proces stavby může trvat v řádu až několik hodin v závislosti na velikosti a počtu součástek, které mají být vyrobeny. Celkový počet součástek a jejich velikost je omezena velikostí výrobního zařízení. Po ukončení tisku může většina aditivních systémů předat informaci uživateli prostřednictvím elektronické komunikace, že stavba výrobku byla dokončena [3].

1.2.5 Postprocessing

Posledním úkonem v celém procesním řetězci výroby je tzv. postprocessing. Jedná se obvykle o souhrn manuálních dokončovacích operací, které následují po vytisknutí výrobku. Operace postprocessingu se mohou lišit druhem použité výrobní metody, tvaru a požadovaných vlastností výrobku [3].

Do operací postprocessingu se nejčastěji zařazuje odstraňování podpor, pokud výrobek vyžadoval jejich použití. Dále lze všechny vytištěné výrobky obrábět, lakovat, leštit, galvanicky pokovit, brousit, barvit, tmelit, napouštět infiltranty atd. Tyto finální úpravy se využívají k zpřesnění výrobku, dosažení lepšího vizuálního vzhledu, usnadnění montáže a případně k lepší ostrosti barev [5].

1.3 Budoucnost 3D tisku

Mikrokomponenty

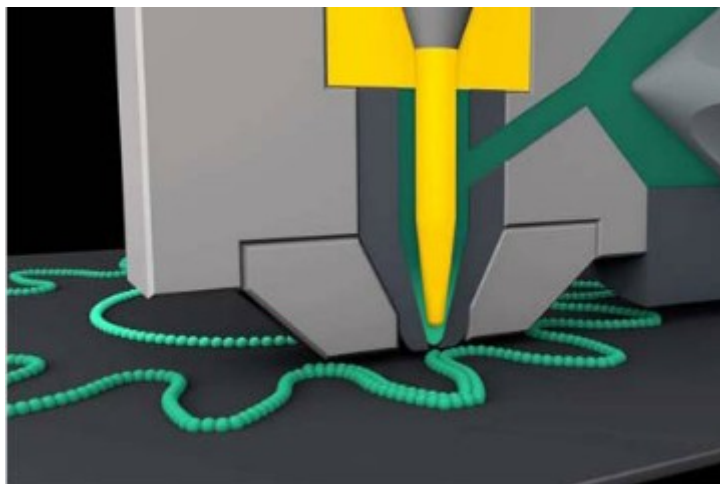
Tvorba mikrokomponentů s charakteristickými rozměry asi 10 až 100 μm se aktivně vyvíjí už nějakou dobu v Hannoveru, Lausanne, Mnichově, Vídni nebo také na předních univerzitách v USA a Japonsku. Aplikace jsou poměrně vzácné a týkají se především plastových komponentů. Výroba z miniaturních plastových dílů je většinou založena na principu laserové stereolitografie [1].

Contour Crafting

Technologii Contour Crafting vyvinul Dr. Behrokh Khoshnevis na Universitě v jižní Californii. Tato metoda využívá robotické počítačem ovládané technologie k vytvoření velmi velkých objektů, jako jsou například budovy. Vytlačování materiálu musí mít dokonalou přesnost a probíhá bez jakéhokoli odpadu. Řídící počítač umožňuje vytváření hladkých rovinných povrchů různých tvarů. Tento proces kombinuje proces vytlačování pro vytvoření ploch a způsob vstříkávání pro vybudování jádra objektu [1].

Freeformer

Jeden z předních výrobců vstříkovacích strojů Arburg vyvinul nový stroj pro zpracování plastů nazývaný Freeformer, který využívá nově patentované výrobní technologie k vytvoření 3D objektů z CAD dat bez nutnosti použití forem. Tuto technologii od ostatních odlišuje použití taktované trysky, která se otevírá a zavírá až 100 násobně za sekundu a zanechává pouze kapičky z plastické hmoty k vytvoření požadovaného výrobku vrstvu po vrstvě. V průběhu výstavby zůstává vypouštěcí jednotka na jednom místě a dochází k pohybu nosné desky ve třech až pěti osách. Freeformer umožňuje vytvářet složité geometrie za použití různých druhů plastů i barev ve stejnou dobu [1].



Obr. 5. Freeformer [1].

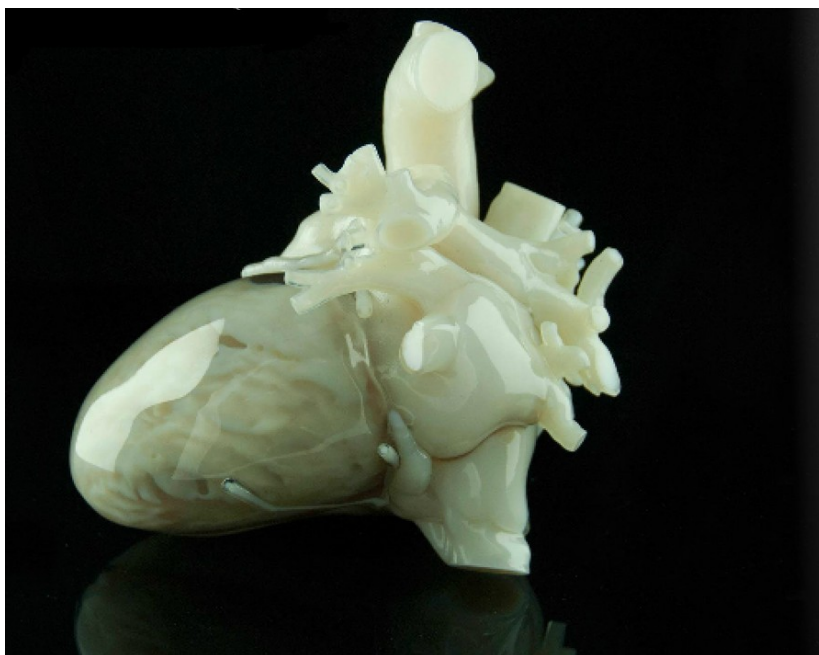
Free molding

Jedná se o novou technologii, která umožňuje výrobu širokého spektra produktů v různých objemech s různými povrchy. Pro tuto technologii se využívá jako stavební materiál recyklovaný plast. Rozpětí využití produktů se pohybuje od zahradního nábytku a domá-

cích výzdob až po módní doplňky a další dekorativní předměty. Náklady na výrobu procesu jsou výrazně nižší než u známých výrobních metod. Použití drahých těžkých ocelových forem je nahrazeno lehčími levnějšími formami z různých materiálů. Tato technologie byla vynalezena projektantem Yaronem Elyasim a je chráněna registrovaným patentem [1].

Zdravotnictví

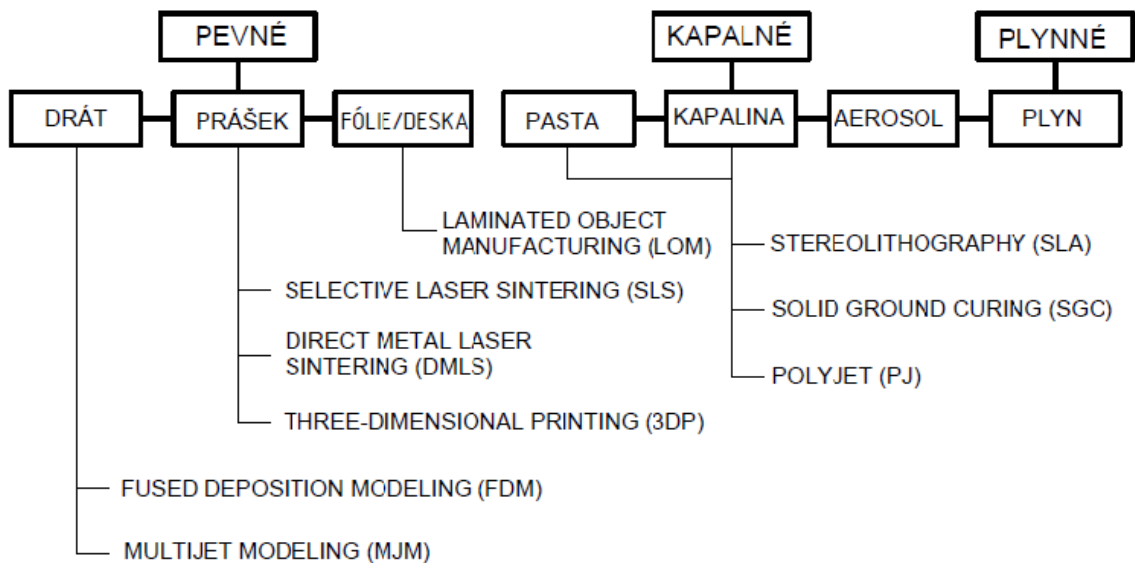
Aditivní metody úspěšně pronikají i do zdravotnictví stále častěji. Stále více vědců spolu s doktory experimentuje s tzv. biotiskem. V tomto případě tedy tiskárny pracují s biologickými materiály. V současné době se 3D tisk využívá ve zdravotnictví nejčastěji pro výrobu zdravotnických pomůcek, modelů orgánů, protéz či implantátů na míru. V poslední době se podařilo výzkumnému týmu v Madridu vyvinout tisk lidské kůže. Vědci do budoucna doufají, že budou schopni vyrobit například orgány, jako jsou ledviny nebo srdce. To by znamenalo velký pokrok ve zdravotnictví [6].



Obr. 6. 3D tištěný model srdce [6].

2 DRUHY ADITIVNÍCH TECHNOLOGIÍ

Aditivní technologie lze rozdělit do tří skupin. Každou skupinu charakterizuje jiná forma skupenství vstupního materiálu. Jedná se o formu pevnou, kapalnou a plynnou. Pevný vstupní materiál se dále může dělit na drát, prášek, fólie nebo desky. Kapalná forma vstupního materiálu se dá rozdělit na pastu, kapalinu a aerosol. Na Obr. 7 jsou uvedeny pouze nejvyužívanější metody aditivní výroby, které jsou dále představeny [1].



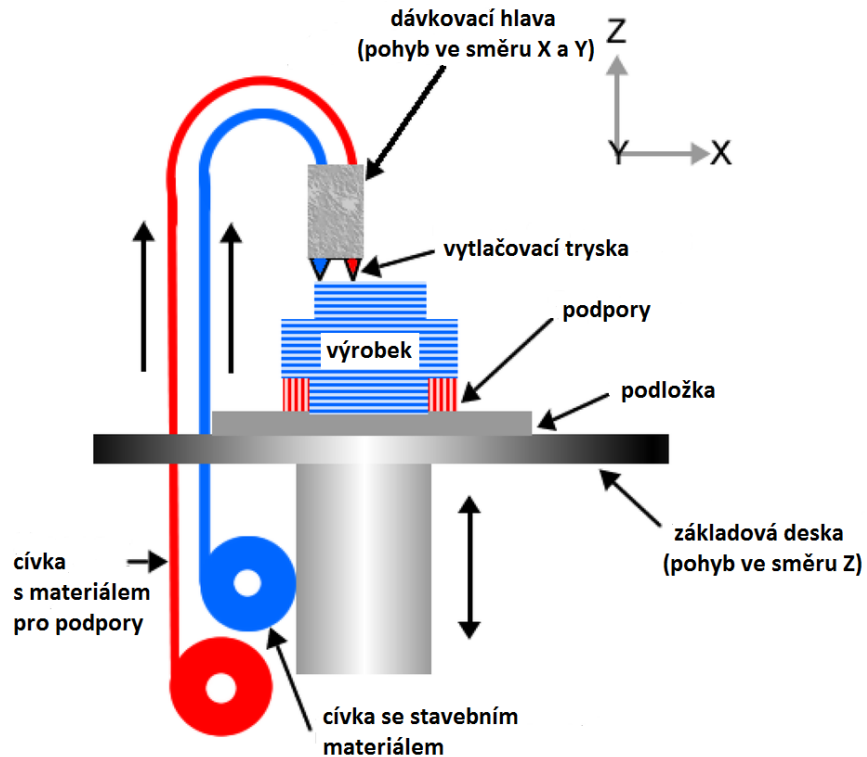
Obr. 7. Rozdělení aditivních technologií [1].

2.1 Metody na bázi pevných materiálů

2.1.1 Fused Deposition Modeling – FDM

Metoda FDM využívá postupného natavování drátu z termoplastu, který je navinut na cívce. Z cívky je za využití kladek vtačován skrze vyhřívanou trysku, a poté je vrstven na pracovní podložku. Pro zhotovení výrobku jsou využívány dráty z ABS, polykarbonátu, vosku nebo elastomerních materiálů atd. V průběhu tisku se daný materiál zahřívá v hlavě elektricky vyhřívané trysky na teplotu těsně pod bodem tání a je nanášen na předchozí vrstvu. Kladení jednotlivé vrstvy probíhá v rovině X, Y dokud tisková hlava nedokončí vrstvu výrobku. Poté se pracovní stůl posune dolů o tloušťku vrstvy v ose Z a celý proces

probíhá znovu. Metoda FDM je charakteristická možností stavění podpor, které jsou odstraňovány v rámci postprocessingu. Pro odstranění podpor je možné využít spolehlivého systému Water Works, který podpurný materiál vymývá pomocí přídavku chemikálií [1, 5].



Obr. 8. Princip metody FDM [7].

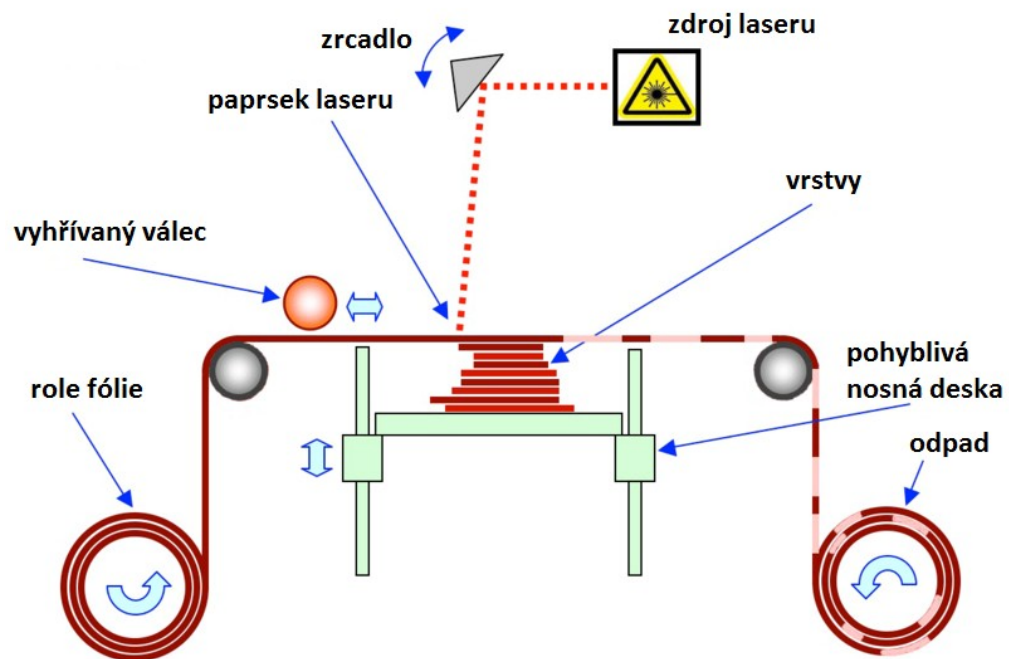
Součásti, které byly zhotoveny touto metodou, nalézají využití při designových testech a testech funkčnosti nově navržených výrobků. Jelikož je pevnost využívaných materiálů poměrně vysoká, lze tyto součásti při testování vystavit takovému zatížení, které se vyskytuje v reálném provozu [5].

2.1.2 Laminated Object Manufacturing – LOM

Součásti vyrobené za použití metody LOM se skládají z velkého množství fólií, které jsou na sebe postupně nalepovány. Kontura výrobku je dále ořezává do požadovaného tvaru pomocí CO₂ laseru. Součást se zhotovuje na svisle se pohybující nosné desce. Vlastní výrobní proces probíhá tak, že se na vrstvu, která byla nanášena a vyřezána, natáhne papírová fólie s danou vrstvou polyethylenu. Ta je následně přitlačena vyhřívanými válci a tím dojde ke slepení obou vrstev. V dalším kroku laser vyřeže požadovaný obrys zhotovené vrstvy. Přebytečný odpad ve formě odřezané fólie je paprskem laseru rozřezán na čtverce a

později odstraněn. Po zhotovení jedné vrstvy se podložka sníží ve směru Z o tloušťku fólie a výrobní proces se znovu opakuje [8].

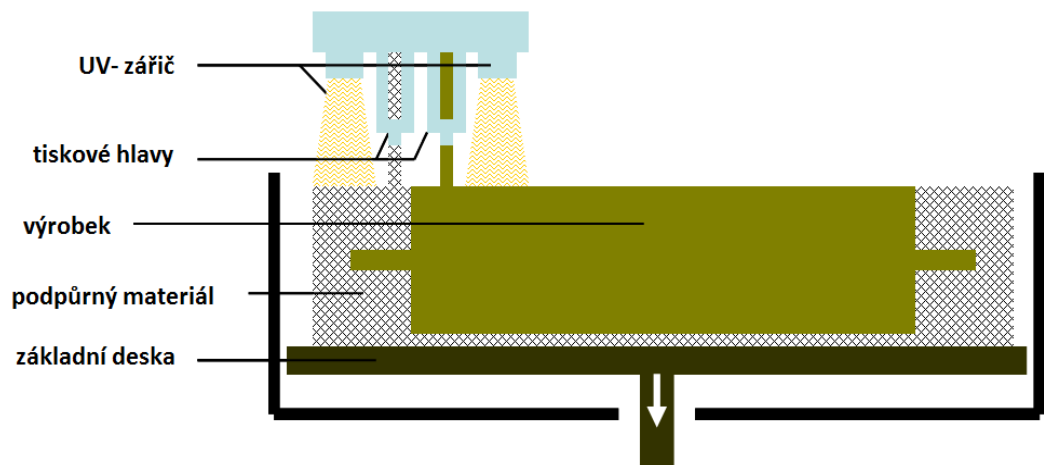
Takto vytvořenou součást lze finálně upravovat klasickými obráběcími metodami jako je soustružení, vrtání a frézování. Aby se zapříčinilo zvětšování rozměrů součásti vlivem vlhkosti, musí být její povrch opatřen silikonovým, uretanovým či epoxidovým nástřikem [5].



Obr. 9. Princip metody LOM [9].

2.1.3 Multi Jet Modeling – MJM

Principem metody MJM je nanášení na sebe jednotlivých vrstev termopolymeru. Toho je docíleno pomocí speciální tiskové hlavy, která obsahuje 352 trysek uspořádaných vedle sebe. Množství objemu materiálu, který má být nanesen, se řídí pro jednotlivou trysku samostatně pomocí programu. Výrobek je stavěn na základní nosné desce. Tisková hlava tvoří výrobek pohyby nad základní nosnou deskou v osách X a Y. S dokončením každé vrstvy se základní deska sníží o požadovanou tloušťku vrstvy směrem dolů v ose Z. Po nanesení termoplastického materiálu dochází k téměř okamžitému ztuhnutí s již nanesenou předchozí vrstvou. Vysoký počet trysek zaručuje rychlost pokládání a rovnoměrné nanesení materiálu do pracovního prostoru zařízení [5, 10].

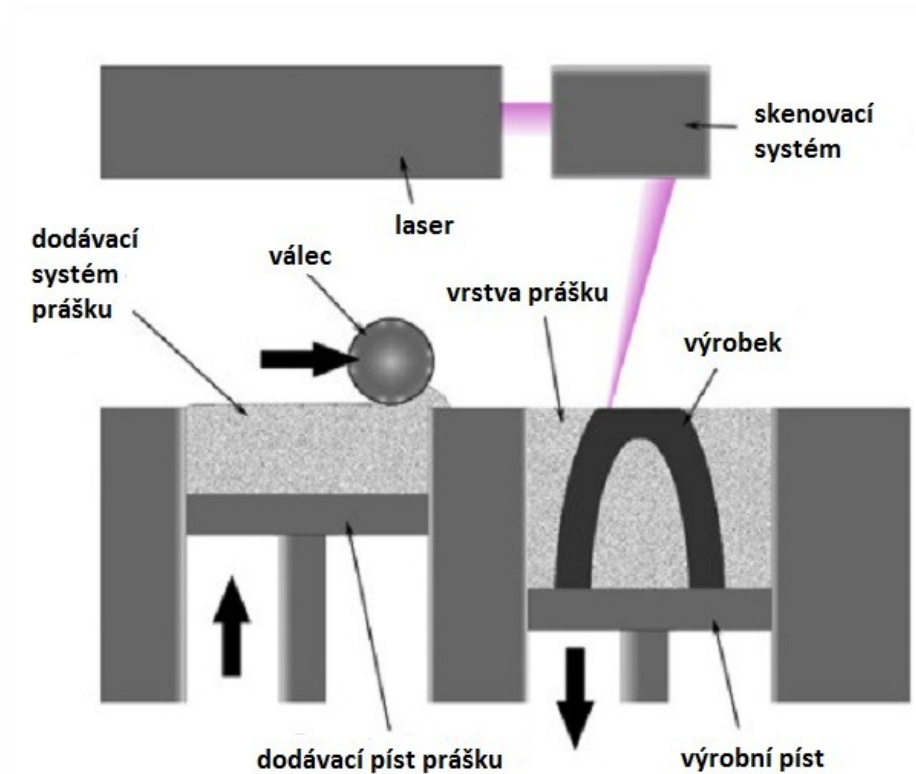


Obr. 10. Princip metody MJM [10].

2.1.4 Selective Laser Sintering – SLS

Při tvorbě součásti metodou SLS je jako první na pracovní podložku položena počáteční vrstva z práškového materiálu, která je následně působením CO₂ laseru tavena. Spékání probíhá pouze v požadované oblasti. U okolního prášku ke spékání nedochází a slouží jako podpůrný materiál. Po dokončení první vrstvy se nosná deska posune směrem dolů o tloušťku vrstvy a probíhá kladení další vrstvy pomocí válečkového mechanismu. Tento způsob spékání se opakuje až do zhotovení výsledného výrobku [5].

Jako materiál pro výrobu součásti nejčastěji slouží kovový, plastový, keramický a pryžový prášek nebo speciální písky. Zrnitost těchto materiálů se pohybuje mezi 20 až 100 μm. Do oblasti postprocessingu u metody SLS patří zejména: odstranění podpor, leštění, obrábění, broušení, tryskání atd. Metoda SLS se široce uplatňuje hlavně v oblasti výroby nástrojů a forem pro tvorbu plastových, keramických nebo kovových součástí [5].



Obr. 11. Princip metody SLS [10].

2.1.5 Direct Metal Laser Sintering – DMLS

Metoda DMLS byla vyvinuta v roce 1994 jako první komerční metoda pro výrobu kovových dílů v samotném procesu. Principem této metody je nános velmi tenkých vrstev kovového prášku, které jsou následně taveny laserovým paprskem. Zrna využívaného prášku mají v průměru 20 μm . Množství objemu prášku určeného pro jednu vrstvu nastavuje dávkovací zařízení. Nastavená vrstva prášku je rozprostírána na ocelovou pracovní desku pomocí keramického břitu. V dalším kroku je kovový prášek v místě ozáření laserem nataven a díky dobrému odvodu tepla ocelové pracovní desky tuhne do pevného stavu velmi rychle. Aby byl vyráběný díl chráněn před oxidací, vyplňuje se pracovní komora dusíkem [8].

Díky možnosti nanášení tenkých vrstev ve srovnání s metodou SLS má DMSL vyšší rozlišení detailů a umožňuje vyrábět složité tvary výrobků. Součásti vyrobené touto metodou nacházejí využití např.: v leteckém, automobilovém nebo elektronickém průmyslu. Metoda DMLS se také uplatňuje v medicíně při výrobě implantátů [5].



Obr. 12. Příklad součásti vyrobené metodou DMLS [11].

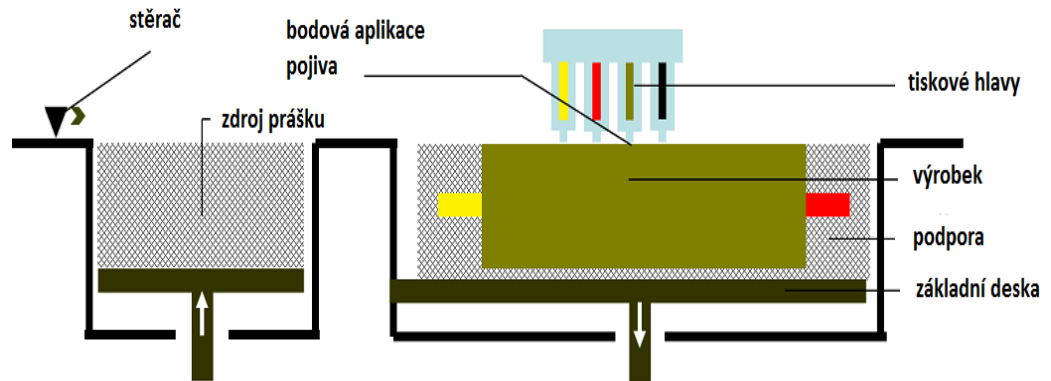
Nejčastěji využívané kovové prášky [5]:

- Nerezová ocel EOS GP1,
- Slitina bronz-nikl DM 20,
- Ocel DS 20,
- Titan EOS Ti 64 / Ti64ELI,
- Kobalt chrom EOS CC MP1,
- Martenzitická ocel EOS MS1.

2.1.6 3D Printing – 3DP

Metoda 3DP funguje na podobném principu jako metoda SLS, tedy na slinování práškových materiálů. Jedná se o výrobní postup, který je založen na selektivním vrstvení inkoustového tisku z velmi jemných kovových, fermezových, kompozitních či keramických prášků spojených speciálními pojivy. Po dokončení výrobního procesu se přebytek prášku odstraní odsátím a může být znovu použit pro výrobu nových komponentů. V průmyslu výrobní zařízení, která fungují na principu této metody, dosahují nejrychlejších výrobních časů s vysokou kvalitou povrchu výsledného výrobku – rozlišení až 600 x 540 dpi. Pro vylepšení mechanických vlastností je možné na povrch modelů nanést speciální infiltranty.

Součásti vyrobené touto metodou nacházejí využití zejména v pevnostním testování a pro vizuální účely, např.: při prezentování nebo představování designu nových výrobků [5, 12].

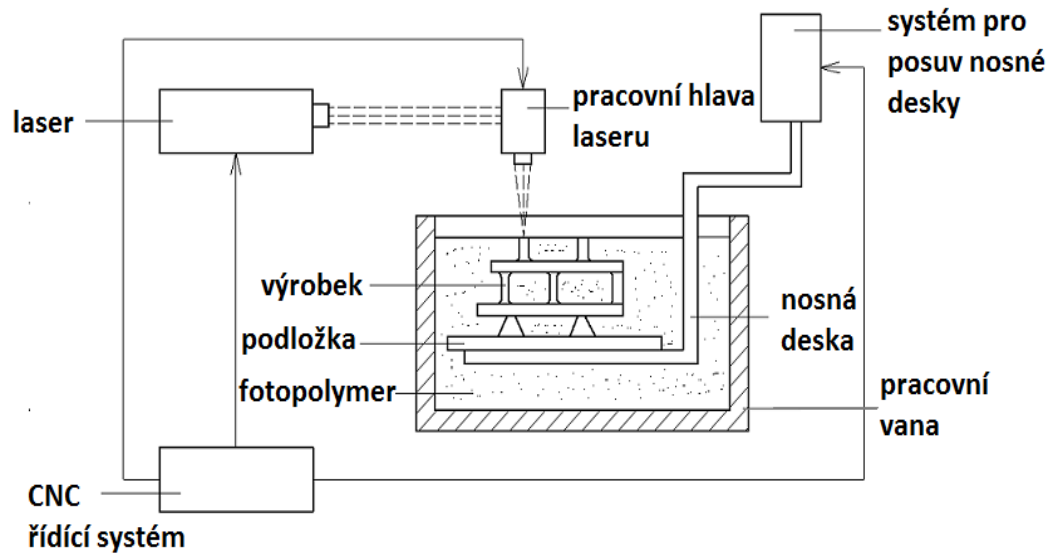


Obr. 13. Princip metody 3DP [12].

2.2 Metody na bázi kapalných materiálů

2.2.1 Stereolitografie – SLA

Metoda SLA je nejstarší ze všech metod 3D tisku a jejím tvůrcem je společnost 3D Systems. Hlavním principem je tvorba trojrozměrného výrobku postupným vytvrzováním polymerního materiálu, který je ozařován UV laserem. Laser je řízen pomocí počítačových dat a ozařuje polymerní hladinu pomocí komplikované optické soustavy. Výrobek je tvořen na pracovní nosné desce umístěné v počátku výrobního procesu pod hladinou polymeru. Pracovní hlava laseru se pohybuje v osách X a Y nad pracovní vanou na základě informací o geometrii jednotlivých vrstev z 3D modelu. Po ozaření a vytvrzení každé vrstvy se vždy pracovní základní deska ponoří o danou tloušťku do lázně a proces se znovu opakuje. Odstranění podpěr, další vytvrzování výrobku v UV peci a finální úprava povrchu jsou procesní kroky, které se konají mimo výrobní SLA zařízení a jsou nezbytně důležité pro výrobu vysoce kvalitních součástí [1, 13].

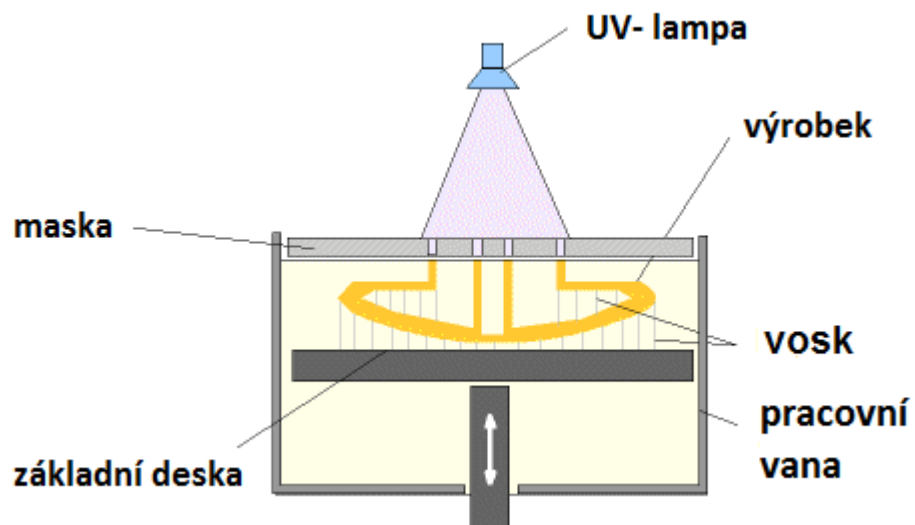


Obr. 14. Princip metody SLA [13].

Metoda SLA dosahuje velkých přesností a na rozdíl od jiných metod dokáže u vyráběných součástí tvořit milimetrové otvory či velmi malé prvky. Však mezi nevýhody této technologie patří pomalé výrobní časy a slabá tepelná odolnost vyrobené součásti. Metoda SLA se využívá zejména v automobilovém průmyslu ve formě testovacích modelů nebo technických prototypů. Dále pak jako tvorba forem u vstřikovacích a licích technologií [1, 5, 10].

2.2.2 Solid Ground Curing – SGC

Při výrobě metodou SGC je vytvrzován fotocitlivý polymer pomocí UV lampy. Na rozdíl od metody SLA se celá vrstva vytváří najednou. Osvícení UV lampy je provedeno skrz negativní masku, kterou je většinou skleněná destička. Při výrobě součásti se nejdříve vytvoří negativní maska a následně se osvětluje polymerní materiál, který po osvětlení hned tvrdne. Materiál, který osvětlen nebyl, je vakuově odsáván a místo něj je prostor vyplněn voskem. Dále je vytvořený povrch ofrézován na danou tloušťku vrstvy a je znovu nachystán pro nános další vrstvy. Vosk, který vyplnil meziprostor, zůstává ve výrobku až do konce procesu. Poté je v rámci postprocessingu chemicky odstraněn kyselinou citronovou. Při výrobě mohou být umístěny součásti nad sebou, aby výrobní stroj dosahoval větší produktivity. Díky odfrézování materiálu po každé vrstvě dochází k vysoké přesnosti hlavně v ose Z [1, 13].



Obr. 15. Princip metody SGC [14].

Součásti vyrobené touto metodou slouží jako geometrické a technické prototypy nebo jako modely pro prezentace k představení designu nových výrobků. Dále se tato metoda uplatňuje ve zdravotnictví při výrobě chirurgických pomůcek či tvoření zakázkových protéz přímo na míru pacienta [1, 5].

2.2.3 PolyJet - PJ

Metoda PolyJet patří mezi výkonné technologie 3D tisku, který vyrábí hladké, přesné součástky, prototypy a nástroje. Tento způsob tisku vyvinutý firmou Objet pracuje s rozlišením mikroskopické vrstvy s přesností na 0,1 mm, a proto může vyrábět velmi tenké stěny různých složitých tvarů pomocí nejširší škály dostupných materiálů. Metoda PolyJet funguje na podobném principu jako inkoustový tisk, však místo nanášení kapek inkoustu na papír nanáší kapalný fotopolymer na stavební základní desku [15].

Příprava tisku probíhá pomocí softwaru, který automaticky vypočítá umístění fotopolymerní a nosného materiálu z 3D CAD souborů. Poté probíhá samotný tisk, při němž trysky tiskárny nanesou drobné kapičky fotopolymerní, které jsou okamžitě vytvrzovány UV zářením. Vytvořené vrstvy se postupně hromadí na základní stavební desku, na kterou lze vytisknout jeden nebo několik přesných 3D výrobků. Převisy nebo složité tvary vyžadují stavbu podpor, které se po vytištění výrobku odstraňují. Oddělení podpor probíhá snadno při omývání výrobku pod vodou nebo v roztoku lázně [15].

2.3 Porovnání výhod a nevýhod jednotlivých výrobních metod

Všechny výrobní technologie, které byly představeny, jsou z hlediska jejich výhod a nevýhod zhodnoceny v Tab. 1.

Tab. 1. Porovnání výhod a nevýhod jednotlivých výrobních metod [1, 5, 13, 15].

Metody na bázi tuhých materiálů		
Zkratka	Výhody	Nevýhody
FDM	široká možnost volby materiálu, nevznikají škodlivé emise	výrobek nevykazuje stejné mechanické vlastnosti v různých směrech, dokončovací operace
LOM	snadné obrábění modelu	vznik nežádoucích výparů, nižší přesnost součástí
MJM	velmi tenké vrstvy materiálu, nevznikají škodlivé emise	výrobek nevykazuje stejné mechanické vlastnosti v různých směrech, dokončovací operace
SLS	výkonný zdroj laseru, prášek v neroztaveném stavu slouží jako podpora, široká možnost volby materiálu	náročné zařízení z hlediska energetiky a prostoru, nebezpečí rozptýlení kovového prášku, nutnost zařazení dokončovacích operací
DMLS	výkonný zdroj laseru, znovu využití nespotebovaného prášku, široká možnost volby materiálu	náročné zařízení z hlediska energetiky a prostoru, nebezpečí rozptýlení kovového prášku, nutnost zařazení dokončovacích operací
3DP	vysoká kvalita rozlišení povrchu výsledného výrobku	drsny povrchy vzhledem k velikosti částic prášku
Metody na bázi kapalných materiálů		
Zkratka	Výhody	Nevýhody
SLA	velká přesnost detailů na modelu, možnost tvorby tenkých stěn	toxické vlastnosti fotopolymeru, slabá tepelná odolnost výrobku, dokončovací vytvrzování výrobku, dlouhý čas výrobního procesu
SGC	možnost odfrézovat poškozené vrstvy	malá možnost volby materiálu
PJ	velmi dobrá přesnost, široká škála materiálů	horší materiálové vlastnosti

3 ZKOUŠENÍ MATERIÁLŮ

Volba materiálu pro zhotovení různých výrobků a zařízení je založena na znalostech vlastností materiálů. Jedná se zejména o vlastnosti mechanické, technologické, fyzikální a chemické. Před volbou každého materiálu výrobku je důležité provést rozbor těch vlastností, které budou pro danou součást nejdůležitější. To závisí hlavně na provozním účelu součásti a prostředí, kde se bude výrobek vyskytovat. Pro samotnou volbu materiálu je potřebné vyjádřit vyžadované vlastnosti v podobě čísel. Vyjádřením vlastností materiálu číselnými hodnotami či materiálovými charakteristikami se zabývá obor, který se nazývá zkoušení materiálu [16].

K základním a nejvyužívanějším zkouškám patří zkoušky mechanické. Ty jsou nejčastěji děleny dle charakteru zatěžování na zkoušky statické a dynamické. Pro experimentální určování libovolných mechanických charakteristik musí být z daného zkoušeného materiálu zhotovena zkušební tělesa a probíhá zkoušení vlivu zatěžovací síly na tato tělesa. Rozměry zkušebních těles a samotný průběh zkoušky se musí řídit dle dané normy. Pro Českou republiku je označení normy ČSN. Evropské normy, které se postupně začleňují do norem naší republiky, mají označení ČSN EN. Další převzaté normy od celosvětové organizace International Organisation for Standardization mají označení ČSN ISO [16].

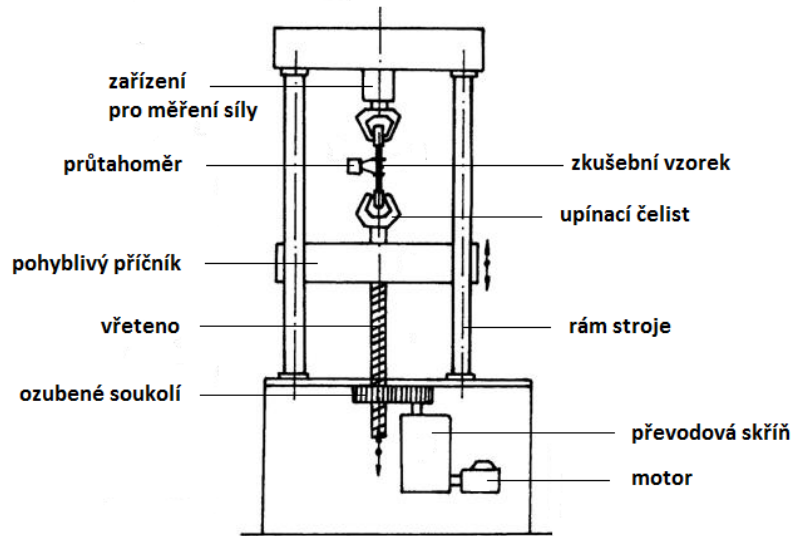
3.1 Mechanické zkoušky statické

3.1.1 Zkouška tahem

Princip zkoušky

Principem tahové zkoušky je deformování zkušebního tělesa jednoosým protahováním konstantní rychlosti ve směru hlavní podélné osy až do jeho porušení nebo do doby, kdy protažení nebo tahové napětí dosáhnou předem zvolené hodnoty. Pro zkoušení plastových materiálů se řídí tahová zkouška dle normy ČSN EN ISO 527 [17].

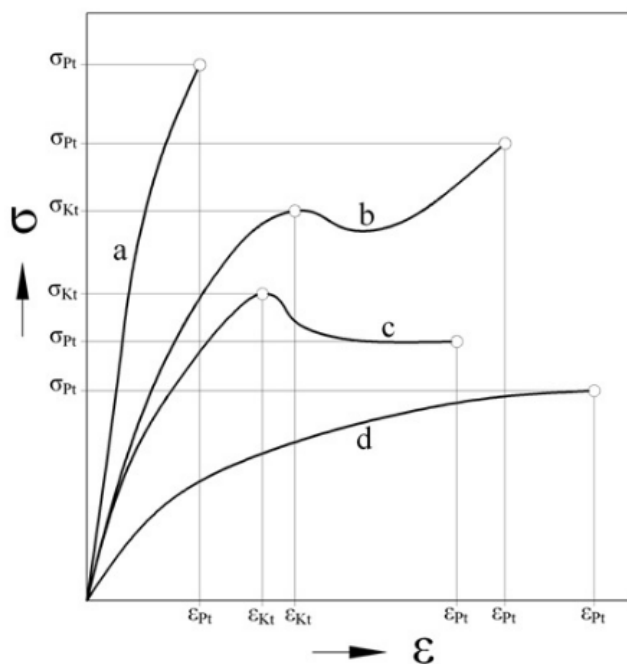
Zkouška tahem se provádí na univerzálním zkušebním stroji. Stroj je tvořen pevným rámem, v jehož horní části je umístěno zařízení pro měření síly. K tomuto zařízení je jedním koncem upnuto zkušební těleso a druhým koncem je uchyceno k pohyblivému příčnicku. Když je příčnick uведен motorem přes převodovou skříň a vřeteno do pohybu, dochází k postupnému zatěžování a deformaci zkušebního tělesa [16].



Obr. 16. Univerzální zkušební stroj [16].

Tahové diagramy

Průběh tahových diagramů je velmi závislý na rychlosti zatěžování a teplotě. Z hlediska časové závislosti deformačního chování u plastů nemohl být zaveden pojem tažnost, tak jako u kovů, kdy se výpočet zakládá na deformacích trvalých. U plastů se využívá pojem prodloužení při přetržení, který zahrnuje deformace pružné i trvalé. Základní čtyři typy tahových diagramů vyskytujících se u polymerního materiálu jsou zobrazeny na Obr. 16 [18].



a - křivka pro křehké materiály

b - křivka pro houževnaté materiály s napětím na mezi kluzu σ_{kt} nižším než napětí při přetržení σ_{pt}

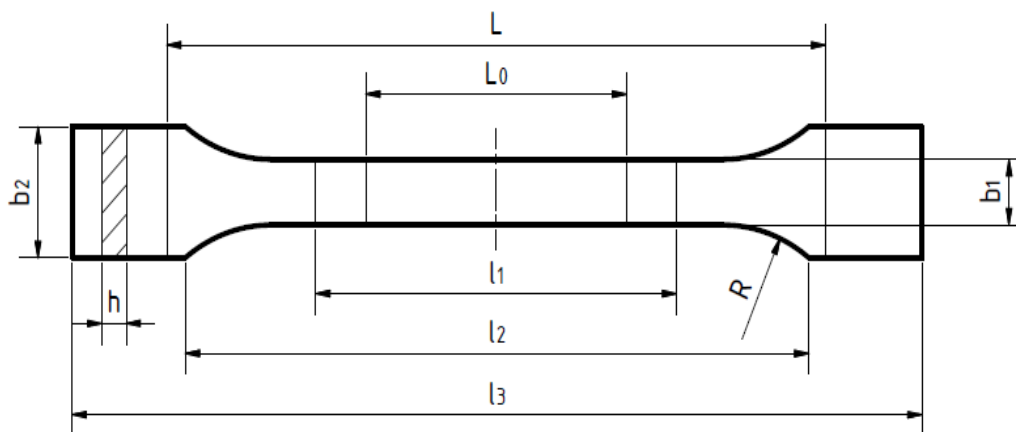
c - křivka pro houževnaté materiály s napětím na mezi kluzu σ_{kt} vyšším než napětí při přetržení σ_{pt}

d - houževnaté materiály bez meze kluzu

Obr. 17. Křivky charakterizující napětí deformace pro polymerní materiály [18].

Zkušební těleso

Tvar spolu s rozměry zkušebních vzorků pro tahové zkoušky jsou stanoveny normou. Nejvíce se využívají zkušební vzorky ve tvaru oboustranných lopatek. Tento tvar je zvolen záměrně z důvodu dostatečného a pevného upnutí zkušební vzorku do čelistí zkušebního zařízení a napětí je koncentrováno do zúžené části vzorku [19].



Obr. 18. Zkušební těleso pro tahovou zkoušku [17].

Tab. 2. Rozměry zkušebních vzorků dle normy [17].

Parametr	Rozměry [mm]	
	Typ 1A	Typ 1B
Typ zkušební vzorku	Typ 1A	Typ 1B
b_1 - šířka zúžené pracovní části	$10 \pm 0,2$	$10 \pm 0,2$
b_2 - šířka upínací části	$20 \pm 0,2$	$20 \pm 0,2$
l_1 - délka zúžené pracovní části	80 ± 2	$60 \pm 0,2$
l_2 - vzdálenost mezi širšími částmi	104 až 113	106 až 120
l_3 - celková vzdálenost	≥ 150	≥ 150
L_0 - počáteční měřená délka	$50 \pm 0,5$	$50 \pm 0,5$
L - počáteční vzdálenost čelistí	115 ± 1	$l_2 \begin{smallmatrix} +5 \\ 0 \end{smallmatrix}$
h - tloušťka zkušební vzorku	$4 \pm 0,2$	$4 \pm 0,2$
R - poloměr zkušební vzorku	20 až 25	≥ 60

3.1.2 Zkouška ohybem

Princip zkoušky

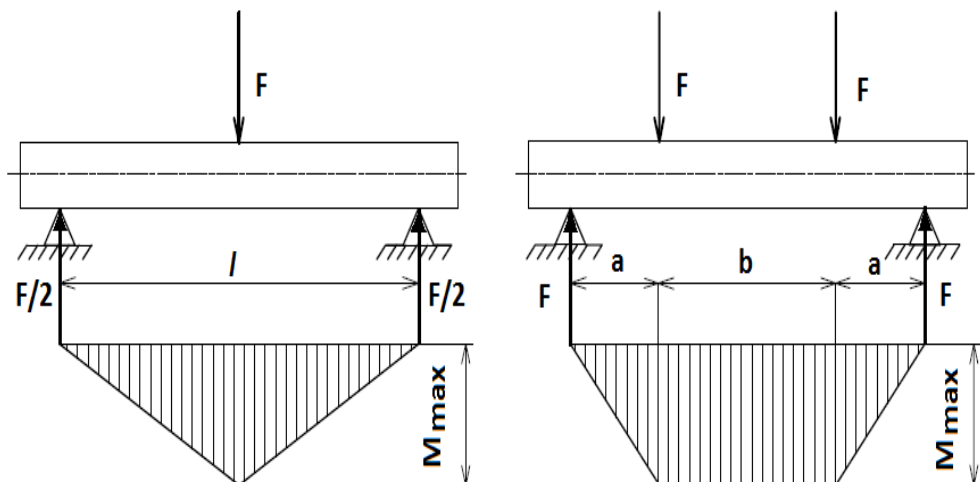
Při zkoušce ohybem je zkušební těleso položeno na dvě opory, kterými bývají zpravidla válečky. Zkušební stroj postupně tlakově zatěžuje zkušební vzorek. Vrchní část přípravku pro ohybovou zkoušku může tvořit jen jeden trn, který působí zatížením uprostřed zkušebního vzorku (třibodový ohyb), nebo mohou být použity dva trny umístěné symetricky ke středu zkušebního vzorku (čtyřbodový ohyb). Pro plastové materiály se zkouška řídí normou ČSN EN ISO 178. Cílem ohybové zkoušky je získat závislost síly vzhledem k průhybu zkušebního tělesa. Průhyb je měřen snímacím zařízením. Napětí při průhybu není konstantní, ale dochází k jeho změně. Maximální tahové napětí působí proti zatěžovacímu přípravku na povrch zkušebního tělesa. Ve směru ke středu vzorku se napětí snižuje až na nulovou hodnotu, a poté dosahuje záporných hodnot, tzn., má tlakový charakter. Pevnost v ohybu je určena maximální hodnotou tahového napětí, které působí na povrch zkušebního vzorku v okamžiku lomu. Smluvní pevnost v ohybu R_{mo} je pak vyjádřena vztahem [16]:

$$R_{mo} = \frac{M_{max}}{W_o} [MPa] \quad (1)$$

kde

M_{max} ... maximální ohybový moment.

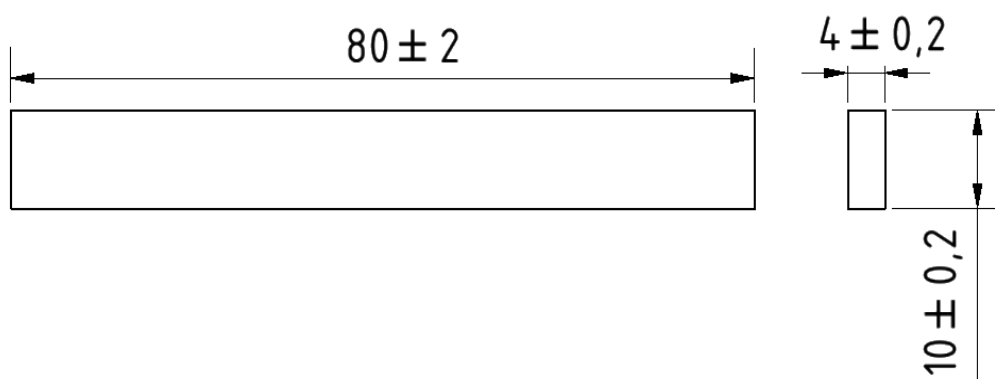
W_o ... průřezový modul.



Obr. 19. Princip ohybové zkoušky [16].

Zkušební těleso

Pro zkoušku ohybem se využívají dle normy přednostní zkušební vzorky, viz Obr. 20. Pokud není možné využít rozměry přednostního zkušební vzorku, využívají se ostatní zkušební vzorky. U těchto vzorků je nutné zachovat poměr délky a tloušťky $l/h = 20 \pm 1$. Dále je nutné zachovat poměry tloušťky a šířky, které jsou uvedeny v Tab. 3. Pro určení výsledku zkoušky je minimální počet zkušebních vzorků 5. K zvýšení přesnosti měření může být využito více zkušebních vzorků [20].



Obr. 20. Přednostní zkušební těleso pro ohybovou zkoušku [20].

Tab. 3. Poměr tloušťky a šířky ostatních zkušebních vzorků [20].

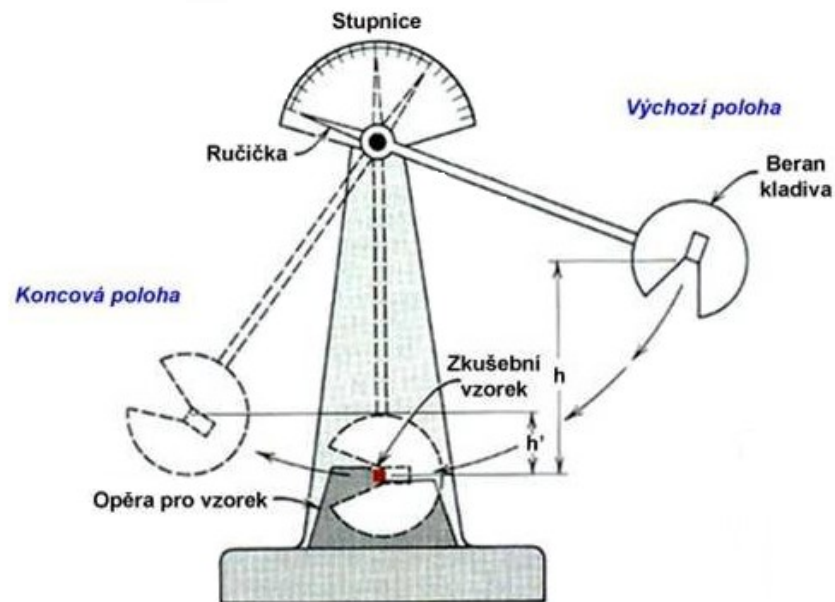
Jmenovitá tloušťka h [mm]	Šířka b [mm]
$1 < h \leq 3$	$25 \pm 0,5$
$3 < h \leq 5$	$10 \pm 0,5$
$5 < h \leq 10$	$15 \pm 0,5$
$10 < h \leq 20$	$20 \pm 0,5$
$20 < h \leq 35$	$35 \pm 0,5$
$35 < h \leq 50$	$50 \pm 0,5$

3.2 Mechanické zkoušky dynamické

3.2.1 Zkouška rázem v ohybu

Při zkoušce rázem v ohybu je zkušební vzorek, který je umístěný na oporách, přeražen pomocí nárazu beranu kyvadlového kladiva. Práce, která byla spotřebována na přeražení

zkušební vzorku, je dána rozdílem potenciálních energií. Rázové zkoušky v ohybu se provádějí na přístrojích Charpy, které se liší rozsahem dle typu zkoušeného materiálu a podle rozměrů zkušebních těles. Výsledné naměřené hodnoty by se měly vždy nacházet mezi 10 % až 80 % rozsahu měřicí stupnice přístroje [22].

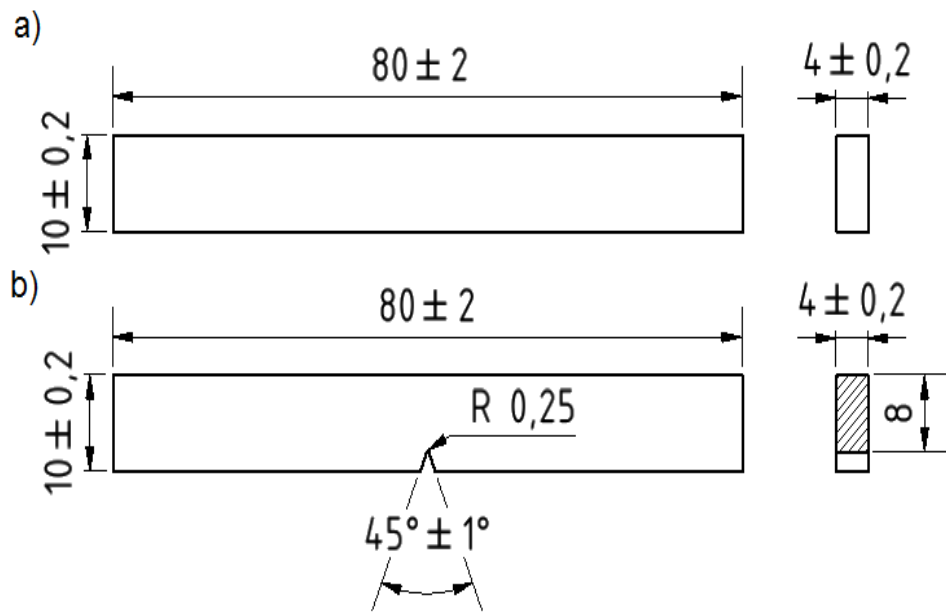


Obr. 21. Princip zkoušky rázem v ohybu [23].

Pro zkoušku rázem v ohybu se využívají normalizované vzorky, které jsou opatřeny U a V vrubem. Pokud je hloubka vrubu více než 20 % tloušťky zkušební vzorku, tak už má zanedbatelný vliv na houževnatost. Rozšíření informací o lomovém chování polymerních materiálů lze docílit zkoušením těles opatřených oboustranným vrubem nebo případně otvorem. Nejčastěji je využíván vrub o šířce 2 mm a hloubce 3,3 mm s poloměrem zaoblení 0,2 mm. U malých zkušebních vzorků jsou vruby menší. Pokud jde o vrstevnatý materiál, vruby se vytvářejí až do třetiny jejich tloušťky [22].

Tab. 4. Rozměry zkušebních těles dle normy [22].

Zkušební těleso	Délka l [mm]	Šířka b [mm]	Tloušťka h [mm]	Vzdálenost podpěr [mm]
Velké	120	15	10	70
Střední	80	4	10	70
Malé	50	6	4	40



Obr. 22. Příklad vzorků pro rázovou zkoušku v ohybu: a) zkušební těleso bez vrubu, b) zkušební těleso s V vrubem [24].

3.2.2 Rázová zkouška pádem

Padostroje měří jiným způsobem rázovou houževnatost polymerních materiálů. Eliminují hlavně nedostatky, které mají kyvadlové přístroje, jako jsou volba energie nebo rychlost vykonané deformace. Principem rázové zkoušky pádem je spuštění padajícího tělesa volným pádem na zkušební vzorek. Kinetická energie padajícího tělesa může být libovolná. Závisí však na jeho hmotnosti a rychlosti, která je ovlivněna výškou pádu. Padajícím tělesem na zkušební vzorek může být ocelová kulička nebo padací čidlo, jejichž hmotnosti lze dodatečně korigovat přidáváním závaží. Při zkoušení se hledá taková zátěž, při které dojde k přelomení nejméně 50 % ze všech zkušebních vzorků z počtu série deseti vzorků. Energie vynaložená k přelomení zkušebního vzorku se vypočítá ze vztahu [22]:

$$W = G \cdot h \quad (2)$$

kde

G... tíha závaží [g].

h... výška pádu [mm].

3.3 Zkoušky tvrdosti

Pojem tvrdost se definuje jako odolnost materiálu vůči vnikání tvrdšího tělesa. Jedná se poměrně o rychlou a levnou mechanickou zkoušku. Princip zkoušek tvrdosti je založen na vtlačování vnikajícího tělesa do povrchu zkoušeného vzorku za působení dané síly. Je možné rozlišovat dva druhy měření tvrdosti. První způsob měření je označován jako indentační a při vtlačení indentoru do materiálu vznikají trvalé plastické deformace. Tento druh měření je určen zejména pro kovy a keramiku. Druhý způsob měření pracuje na principu elastické interakce povrchu zkoušeného materiálu a je využíván zejména pro plasty a pryže [19, 16].

3.3.1 Tvrdost podle Brinella

Princip tvrdosti dle Brinella závisí na vtlačení ocelové kuličky, která je kalená, do zkušebního vzorku zatěžující silou. Po odlehčení zatížení je měřen průměr vzniklého vtisku. Doba zatěžování vzorku o určité velikosti působící síly závisí na druhu zkoušeného materiálu. Pro železné materiály je doba zatížení od 10 až do 15 vteřin a pro neželezné materiály od 10 až do 180 vteřin [21].

Brinellovo tvrdostní číslo HB se počítá ze vztahu [16]:

$$HB = \frac{2F}{[\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})]} \quad (3)$$

kde

F... zatěžující síla [N].

D... průměr kuličky [mm].

d... průměr vtisku [mm].

Vztah (3) platí pouze, pokud naměřený průměr vtisknutí d se nachází v rozmezí $(0,3-0,6)D$. Aby bylo tohle rozmezí dodrženo, je v normách předepsána pro různé materiály zatěžovací konstanta [16].

3.3.2 Tvrdost podle Vickerse

Měření tvrdosti dle Vickerse je založeno na vtlačování indentoru do zkoušeného materiálu. Indentor pro tuto metodu je čtyřhranný jehlan, který má vrcholový úhel 136° . Po vtlačení se měří vzniklá stopa mikroskopicky. Při zkoušení materiálu je zatížení přizpůsobeno

geometrickým a morfologickým okolnostem a obvykle dosahuje menších hodnot než 5 N. Hodnota tvrdosti podle Vickerse HV se dá vyjádřit dle vztahu [19]:

$$HV = \frac{F}{A} = \frac{1,8544 \cdot F}{d^2} \quad (4)$$

kde

F... zatěžující síla [N].

A... plocha vtisknutí [mm²].

d... aritmetický průměr dvou úhlopříček [mm].

3.3.3 Tvrdość podle Rockwella

Způsob měření tvrdosti podle Rockwella pochází z USA. Princip měření tvrdosti spočívá na základě hloubky vniknutí indentoru ve tvaru kuličky nebo diamantového kužele s vrcholovým úhlem 120°. To probíhá při určitém zatížení danou silou. Rockwellova metoda nemá přepočtové tabulky tvrdosti. Výsledná naměřená tvrdost je odečtena ze stupnice hloubkoměru, který je součástí zkušebního zařízení. U této metody není zatěžovací konstanta, avšak pro každý druh zkoušeného materiálu je předepsána zatěžující síla a jednotlivý indentor. Při každé kombinaci se využívá označení velkého písmena za značkou HR. Například metoda HRA, kde indentorem je jehlan se zatěžující silou 600 N, je určena pro velmi tvrdé materiály. Označení HRB využívá indentor ve tvaru kuličky o průměru 1/16" se zatížením 1000 N a využití metody je pro mosaz či ocele nižší pevnosti. Dále HRC má za indentor jehlan se zatížením 1500 N a využívá se u vysoce pevné oceli. Pro velmi měkké materiály se používá metoda označována HRE s kuličkovým indentorem o průměru 1/8" a zatížením 1000 N [16].

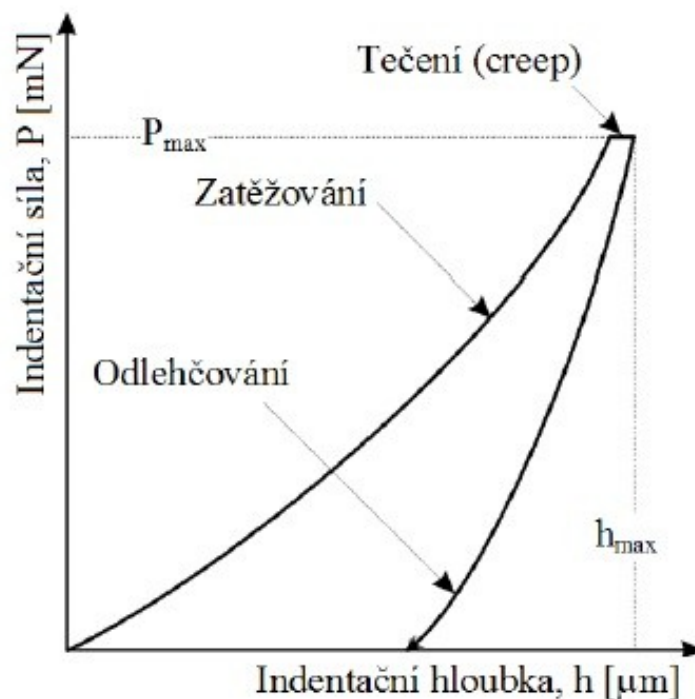
3.3.4 Tvrdość Shore

Metoda Shore patří v praxi mezi nejvyužívanější metody. Dle rozsahu se pro měkké materiály využívá hlavně metoda měření Shore A a naopak pro materiály tvrdší Shore D. Metoda Shore A využívá jako vlačovací hrot komolý kužel a metoda Shore D komolý kužel s kulatým vrchlíkem. Vlačovací hroty jsou vlačeny do zkoušeného materiálu pomocí pružiny. Míra tvrdosti se určuje na základě hloubky vlačení hrotu a je klasifikována stupnicí od 0 až po 100. Zkušební vzorky pro obě metody Shore musí mít minimální tloušťku 6 mm. Naměřené výsledky se při metodě Shore A odečítají 3 vteřiny po dotknutí vlačova-

ného tělesa se zkušebním vzorkem. Hodnota tvrdosti Shore D se odečítá až po 15 vteřinách od začátku měření [19].

3.3.5 Instrumentovaná zkouška tvrdosti - DSI

Principem této metody je zaznamenávání okamžité změny hloubky průniku vtiskovacího indentoru do zkoušeného tělesa a narůstání či pokles zatížení, které působí během celého procesu zkoušení. Jako vyhodnocení dat slouží grafický popis v podobě indentační křivky. Indentační cyklus se dělí do dvou fází. V první fázi cyklu probíhá zatěžování indentoru silou definovanou rychlostí. Ve druhé fázi cyklu probíhá postupné snižování zatěžující síly až na nulu. Tato fáze je označována jako odlehčování. Aby šlo při tomto měření zkoumat i creepové chování, musí se mezi zatěžovací a odlehčovací fází vložit prodleva, kdy je zkušební těleso vystaveno maximální zatěžující síle [25].



Obr. 23. Indentační křivka [25].

Pomocí instrumentované zkoušky tvrdosti - DSI lze vyhodnotit tyto hlavní parametry [25]:

- Vtisková tvrdost H_{IT} ,
- Tvrdost podle Vickerse HV,
- Indentační modul E_{IT} ,
- Redukovaný modul E_r ,
- Komplexní modul E^* ,

- Vtiskové tečení C_{IT} ,
- Vtisková relaxace R_{IT} .

3.4 Měření drsnosti povrchu

Drsností povrchu se rozumí souhrn nerovností daného povrchu s relativně nízkou vzdáleností, které vznikly při výrobě či jejím vlivem. Definici, která popisuje termíny a parametry povrchu, stanovuje norma ČSN EN ISO 4287 [26].

Měření drsnosti lze provádět pomocí metod kvalitativních nebo metod kvantitativních. Metody kvalitativní jsou založeny na porovnávání mezi vzorkovnicí a skutečným povrchem. Jedná se celkem o zastaralou metodu, při které se využívají druhy vzorkovnic povrchů nebo komparační mikroskopy. Metody kvantitativní využívají princip matematického popisu parametrů povrchu, k čemuž se v dnešní praxi používají obvykle tzv. profilometry. Ty mimo drsnosti umožňují měřit také vlnitost a většinou i tvar [26].

3.4.1 Výškové parametry

Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu P_a , R_a , W_a

Jedná se o aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky [27].

$$P_a, R_a, W_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (5)$$

Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu P_q , R_q , W_q

Kvadratický průměr pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky je dán vztahem [27]:

$$P_q, R_q, W_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l |Z^2(x)| dx} \quad (6)$$

Šikmost posuzovaného profilu P_{sk} , R_{sk} , W_{sk}

Je to podíl průměrné hodnoty třetích mocnin pořadnic $Z(x)$ a třetí mocniny hodnoty P_q , R_q , W_q v rozsahu základní délky [27].

$$R_{sk} = \frac{1}{R_q^3} \left[\frac{1}{lr} \int_0^{lr} |Z^3(x)| dx \right] \quad (7)$$

Špičatost posuzovaného profilu Pku, Rku, Wku

Stanovuje podíl průměrné hodnoty čtvrtých mocnin pořadnic $Z(x)$ a čtvrté mocniny hodnoty Pq, Rq, Wq v rozsahu základní délky [27].

$$Rku = \frac{1}{Rq^2} \left[\frac{1}{lr} \int_0^{lr} |Z^4(x)| dx \right] \quad (8)$$

3.4.2 Přístroje pro měření drsnosti

Přístroje kontaktní

Měření pomocí kontaktních přístrojů spočívá ve snímání měřeného povrchu pomocí upraveného hrotu. Nasnímané souřadnice jsou dále počítačově zpracovávány. Kontaktní přístroj je složen z mechanické a elektronické části [26].

Mechanická část kontaktního přístroje je složena ze stolku, na který se umísťuje měřený vzorek, a z ramena vybaveného snímacím hrotem. Ten se pohybuje danou konstantní rychlostí a provádí snímání nerovnosti povrchu. Elektronická část transformuje mechanický signál generovaný snímacím hrotem, který snímá nerovnosti měřené plochy na elektrický signál. Ten je poté zpracováván pomocí číselné hodnoty příslušného parametru drsnosti nebo v podobě grafického záznamu příslušné nerovnosti povrchu. Přenos dat do PC probíhá většinou pomocí USB nebo COM rozhraní [26].

Správnost výsledku měření je zejména ovlivněna poloměrem zaoblení snímacího hrotu, vrcholovým úhlem snímacího hrotu, přítlačnou silou a rychlostí změny měřicí síly. V tradiční strojírenské praxi mají kontaktní metody na rozdíl od bezkontaktních metod výhodu ve větší toleranci vůči znečištění povrchu, a proto jsou zatím upřednostňovány [26].

Přístroje bezkontaktní

Bezkontaktní přístroje se využívají především v laboratorním či vědeckém prostředí a využívají bezkontaktních snímačů. Nejčastěji se využívá laserových nebo CLA snímačů. Princip CLA snímače je založen na rozkladu bílého světla, které je rozkládáno a pomocí optiky je směřováno na měřený povrch. Optika rozkládá bílé světlo dle vlnových délek a v jednotlivém bodě povrchu je zaostřována jen určitá vlnová délka. Světlo odražené z povrchu měřeného tělesa prochází otvorem, který propouští jen světlo zaostřené vlnové délky. Spektrometrem se dále vychyluje světlo na maticový senzor, kde je jednotlivým bodům přiřazena prostorová poloha, která se počítačově zpracuje a vyhodnotí. Nasnímané prostorové polohy se dále zpracují speciálními softwary, které umožňují zpracování 3D dat [26].

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem diplomové práce bylo vypracovat literární studii se zaměřením na aditivní technologie a dále porovnat mechanické a povrchové vlastnosti dílů, které byly vyrobeny právě třemi odlišnými metodami aditivní výroby. Zkušební tělesa byla zhotovena metodami Fused Deposition Modeling, Selective Laser Sintering a PolyJet.

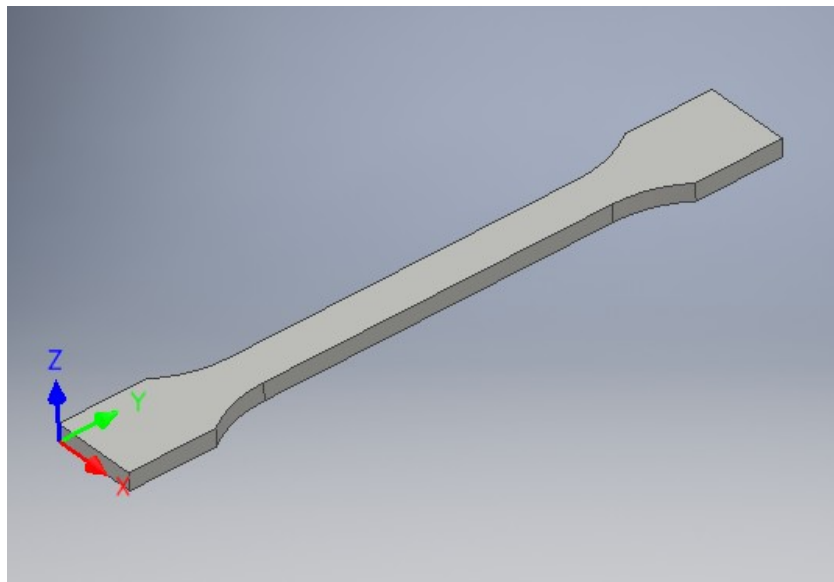
Zásady pro vypracování diplomové práce byly následující:

1. Vypracování literární rešerše na danou problematiku.
2. Výroba a příprava zkušebních těles.
3. Provedení experimentů.
4. Vyhodnocení naměřených výsledků.
5. Závěr.

5 PŘÍPRAVA A VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLĚS

Aby mohly být provedeny mechanické a povrchové zkoušky, byla zhotovena zkušební tělesa dle příslušných norem. Tato tělesa byla vyrobena třemi odlišnými aditivními technologiemi: FDM, SLS a PJ.

Aby došlo k přesnějšímu posouzení jednotlivých mechanických a povrchových vlastností, byla zkušební tělesa tisknuta se stejnou orientací polohy. Při samotném tisku vzorků byla nejprve nanесena první vrstva do roviny X - Y, a následně došlo k opakovanému nanесení další vrstvy ve směru osy Z až do zhotovení finálního dílu. Orientace tisku při výrobě zkušebních těles je zobrazena na Obr. 24.

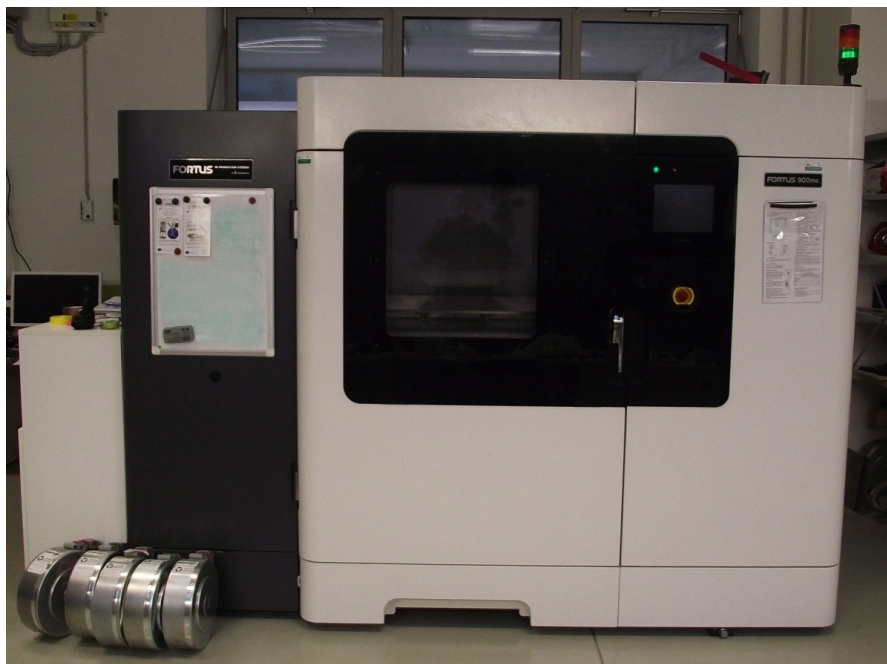


Obr. 24. Orientace tisku zkušebních těles.

5.1 Zkušební tělesa zhotovená metodou FDM

5.1.1 3D tiskárna Stratasys Fortus 900mc

Zkušební tělesa, která byla vyrobena metodou FDM, byla zhotovena 3D tiskárnou Stratasys Fortus 900mc. Jedná se o nejvýkonnější FDM systém, který přináší mimořádně rychlý a přesný tisk. Tato tiskárna disponuje širokými materiálovými možnostmi a velkým stavebním prostorem. Nepřerušovanou výrobu zajišťují duální zásobníky na materiál, které jsou zhotoveny z biokompatibilních, teplotně nebo chemicky odolných materiálů. Touto tiskárnou lze tisknout ve třech tloušťkách vrstev. Jde tak nastavit potřebný poměr mezi jemnými detaily a rychlostí tisku. Technické parametry 3D tiskárny jsou uvedeny v Tab. 5 [28].



Obr. 25. 3D tiskárna Stratasys Fortus 900mc.

Tab. 5 Technické parametry 3D tiskárny Stratasys Fortus 900mc [29].

Rozměry pracovního prostoru [mm]	914 x 610 x 914
Materiálové možnosti	ABS, ABS-M30, ABS-ESD7, PC-ABS, ASA, PC, FDM Nylon 12, ULTEM 9085, ULTEM 1010, PPSF
Celkové rozměry 3D tiskárny [mm]	2772 x 1683 x 2027
Hmotnost [kg]	2896
Tloušťka vrstvy [μm]	330, 254, 178

5.1.2 Materiál ABS-M30

Jedná se o speciálně navržený materiál pro 3D tiskárny, které pracují na principu FDM technologie. Oproti standardnímu ABS má tento materiál větší pevnost v tahu a ohybu. Díly vyrobené z tohoto materiálu disponují větší odolností, hladkostí a lepší schopností tvořit malé povrchové detaily než klasické ABS. Materiál ABS-M30 je ideální pro výrobu koncepčních modelů prototypů, součástí, přípravků a příslušenství. Vybrané vlastnosti toho materiálu jsou uvedeny v Tab. 6 [30].

Tab. 6. Vlastnosti materiálu ABS-M30 [30].

Hustota [kg/m ³]	1040
Teplota skelného přechodu [°C]	108
Modul pružnosti v tahu [Mpa]	2400
Modul pevnosti v ohybu [Mpa]	2300
Tvrdost Shore D	50

5.2 Zkušební tělesa zhotovená metodou SLS

5.2.1 3D tiskárna EOS P396

Výroba zkušebních těles metodou SLS byla uskutečněna na 3D tiskárně EOS P 396. Jedná se o stroj se střední velikostí pracovní komory. Tato tiskárna je schopna slinovat několik druhů plastických materiálů. Oproti předchozímu modelu stroje EOSINT P 395 došlo u 3D tiskárny EOS P 396 k zlepšení z hlediska rychlosti a účinnosti. Dle výrobce novější zařízení spotřebuje o 38 procent méně energie a tiskne až o 32 procent rychleji. To je částečně zapříčiněno použitím nového CO₂ laseru. Technické parametry této 3D tiskárny jsou uvedeny v Tab. 7 [31].



Obr. 26. 3D tiskárna EOS P396.

Tab. 7. Technické parametry 3D tiskárny EOS P396 [31].

Rozměry pracovního prostoru [mm]	340 x 340 x 600
Materiálové možnosti	Nylon 11 (přírodní, černý a elastomerní polyamid), Nylon 12 (bílý, přírodní, černý, plněný sklem, plněný hliníkem, plněný uhlíkovými vlákny) a polystyren
Celkové rozměry 3D tiskárny [mm]	1840 x 1175 x 2100
Hmotnost [kg]	1060
Tloušťka vrstvy [μm]	60

5.2.2 Materiál PA 2200

Bílý jemný prášek PA 2200 na bázi polyamidu 12 poskytuje široké využití s velmi vyváženým profilem vlastností. Typické aplikace tohoto materiálu jsou plně funkční komponenty o vysoké kvalitě. Vzhledem k vynikajícím mechanickým vlastnostem materiálu se často používá jako náhradní materiál pro konvenční vstřikovací materiály. Materiál PA 2200 má následující vlastnosti [32]:

- víceúčelové využití materiálu,
- vysoká pevnost a tuhost,
- dobrá chemická odolnost,
- výborné dlouhodobé konstantní chování,
- vysoká selektivita a detaily rozlišení,
- různé možnosti dokončovacích operací (např. pokovení).

Tab. 8. Vlastnosti materiálu PA 2200 [33].

Hustota [kg/m ³]	930
Teplota tání [°C]	176
Modul pružnosti v tahu [Mpa]	1700
Modul pevnosti v ohybu [Mpa]	1500
Tvrdość Shore D	75

5.3 Zkušební tělesa zhotovená metodou PJ

5.3.1 3D tiskárna OBJET EDEN 250

Tisk zkušebních vzorků metodou PolyJet probíhal ve 3D tiskárně OBJET EDEN 250. Tato 3D tiskárna umožňuje vyrábět jakýkoliv druh geometrie. Modely vyrobené na tomto stroji se vyznačují hlavně dobrou hladkostí, odolností, jemnými detaily a vynikající povrchovou úpravou. Při výrobě dílů využívá podpurného materiálu, který je spolu se stavebním materiálem dodáván v kazetových zásobnících. Podpurný materiál lze po vyjmutí výrobku ze stroje snadno manuálně odstranit. Tiskárna je poměrně malé velikosti, takže je vhodná i pro běžné kancelářské prostředí. Technické parametry 3D tiskárny OBJET EDEN 250 jsou uvedeny v Tab. 9 [34].



Obr. 27. 3D tiskárna OBJET EDEN 250.

Tab. 9. Technické parametry 3D tiskárny OBJET EDEN 250 [33].

Rozměry pracovního prostoru [mm]	250 x 250 x 200
Materiálové možnosti	Materiály modelu: VeroBlack, VeroBlue, VeroWhite, VeroGray, FullCure 720 Podpůrné materiály: FullCure 705, Non-toxic gel
Celkové rozměry 3D tiskárny [mm]	870 x 735 x 1200
Hmotnost [kg]	280
Tloušťka vrstvy [μm]	režim High Quality - 16 režim High Speed - 30

5.3.2 Materiál VeroGray

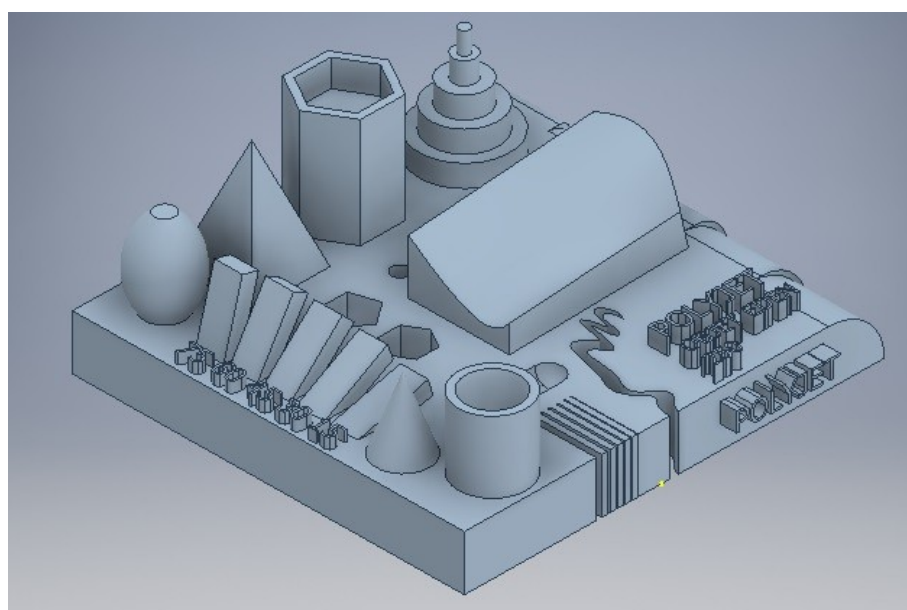
Jedná se o materiál určený pro aditivní technologii PolyJet. Výrobky z materiálu VeroGray dosahují kvalitních hladkých povrchů s vysoce jemnými detaily a dobrým vizuálním vzhledem. Z tohoto důvodu se tento materiál využívá hlavně pro tisk vysoce přesných prezentačních modelů, menších dílů s komplexními funkcemi, zdravotnických prostředků a elektronických pouzder či komponentů. V Tab. 10. jsou uvedeny některé vlastnosti materiálu VeroGray [35].

Tab. 10. Vlastnosti materiálu VeroGray [36].

Hustota [kg/m^3]	1170 - 1180
Teplota skelného přechodu [$^{\circ}\text{C}$]	52 - 54
Modul pružnosti v tahu [Mpa]	2000 - 3000
Modul pevnosti v ohybu [Mpa]	1900 - 2500
Tvrdość Shore D	83 - 86

5.4 Výroba těles pro vizuální porovnání kvality tisku

Stejným způsobem jako u zkušebních vzorků bylo zhotoveno těleso pro vizuální porovnání kvality tisku pro každou aditivní technologii zvlášť. Aby bylo možné porovnávat kvalitu tisku jednotlivých 3D tiskáren, byly na model umístěny různé kvalitativní geometrické prvky. Jedná se například o geometrické plochy pod různými úhly, zaoblení se zvětšujícím se rádiusem, různé druhy otvorů, umístění písma na vodorovnou a svislou plochu atd. 3D model pro vizuální porovnání kvality tisku byl navržen v programu Autodesk Inventor Professional 2016.

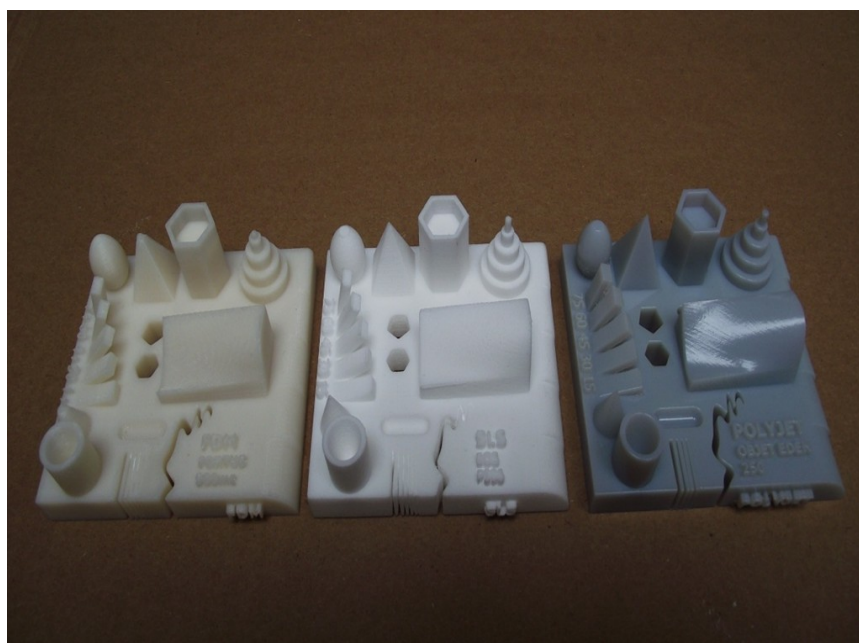


Obr. 28. 3D model tělesa pro vizuální porovnání kvality tisku.

Z důvodu různých geometrických tvarů a přesahů na tělese byl při tisku metod FDM a PJ využit podpurný materiál. Na tělese vyrobeného metodou FDM byl využit podpurný materiál SR-30. Jeho odstraňování probíhalo na chemicko-ultrazvukovém principu v lázni rozpustného koncentrátu Watterwoks P 400 SC. Na tělese, které bylo zhotoveno metodou PJ, byl použit podpurný materiál FullCure 705. Jeho odstranění probíhalo manuálně pod tekoucí vodou. Detail tělesa pro posouzení vizuální kvality tisku s neodstraněným podpurným materiálem je zobrazen na Obr. 29.



Obr. 29. Detail tělesa s neodstraněným podpůrným materiálem.



Obr. 30. Tělesa pro vizuální porovnání kvality tisku.

6 PROVEDENÍ EXPERIMENTŮ

Provedení zkoušek na všech připravených vzorcích proběhlo dle příslušných norem v rámci Fakulty technologické UTB ve Zlíně a v Regionálním výzkumném centru CEBIA-Tech.

Naměřené hodnoty byly zaznamenávány do tabulek, v nichž byl následně vypočítán aritmetický průměr (9) a směrodatná odchylka (10). Z těchto hodnot byly vyneseny příslušné grafy.

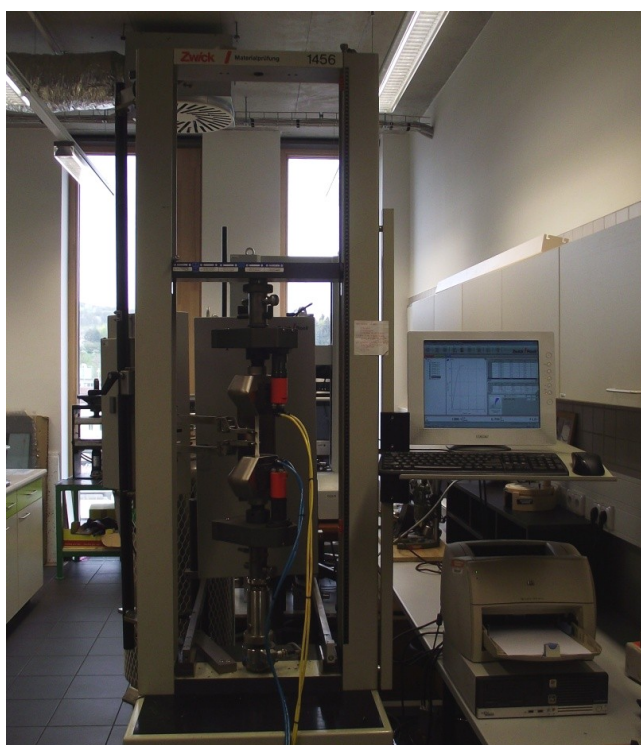
$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (9)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (10)$$

6.1 Zkoušky mechanické statické

6.1.1 Zkouška tahem

Zkouška tahem probíhala dle normy ČSN EN ISO 527 Plasty – Stanovení tahových vlastností na univerzálním zkušebním stroji Zwick 1456. Počet zhotovených zkušebních těles byl od každé jednotlivé metody tisku deset. Rychlost zatěžování byla nastavena na 50 mm/min.



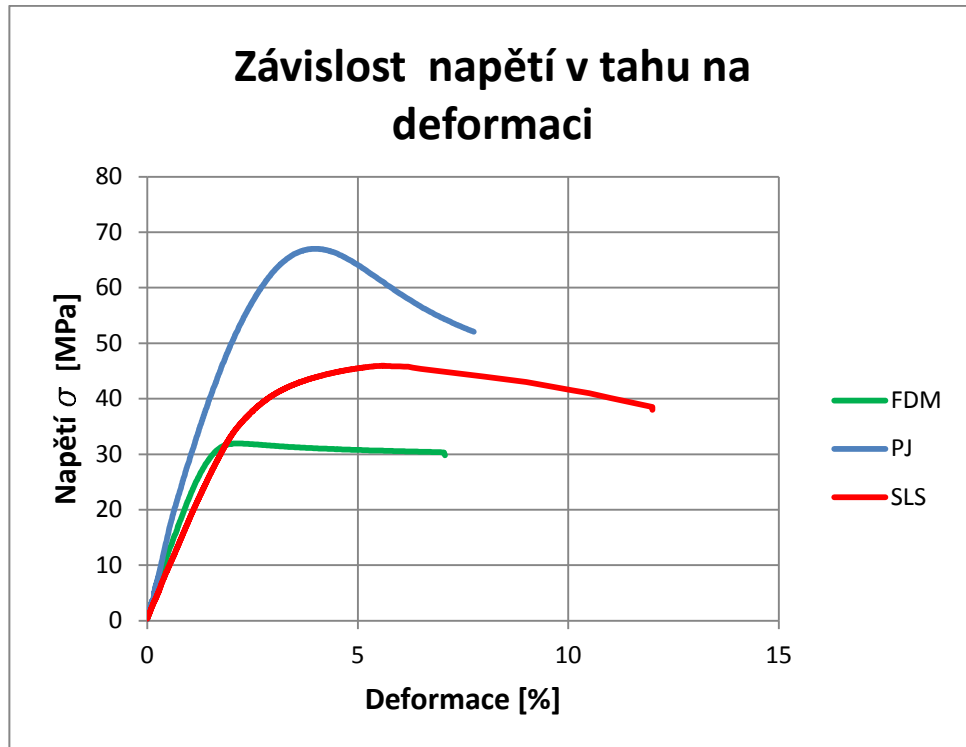
Obr. 31. Univerzální zkušební stroj Zwick 1456.

Testované vzorky, které byly vyrobeny odlišnými aditivními technologiemi, byly zatěžovány podél hlavní podélné osy konstantní rychlostí. Vybranými porovnávanými parametry tahové zkoušky byl modul pružnosti a mez pevnosti v tahu. Naměřené hodnoty jednotlivých parametrů pro každé měření byly uvedeny do Tab. 11.

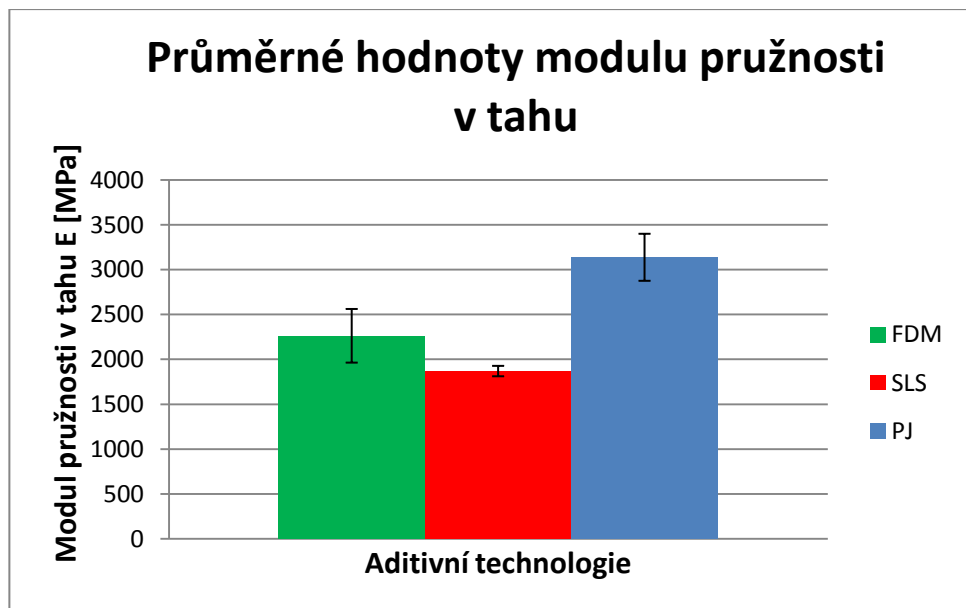
Tab. 11. Modul pružnosti a mez pevnosti v tahu.

Č. m.	FDM (ABS - M30)		SLS (PA 2200)		PJ (VeroGray)	
	E [MPa]	σ_m [MPa]	E [MPa]	σ_m [MPa]	E [MPa]	σ_m [MPa]
1	2440	31,9	1823	47,4	3087	67,0
2	1883	32,3	1820	50,3	2589	67,2
3	1899	32,5	1873	50,7	3087	65,9
4	2540	32,7	1890	48,7	3628	67,9
5	2423	32,5	1871	49,9	3303	66,7
6	1984	32,5	1855	47,8	3058	66,6
7	2052	32,1	1862	48,4	3205	67,2
8	2726	32,3	2023	48,9	2992	67,3
9	2511	32,3	1833	48,5	3186	66,9
10	2285	32,3	1853	46,9	3244	66,4
\bar{x}	2274,3	32,3	1870,3	48,8	3137,9	66,9
s	299,6	0,2	58,2	1,2	262,4	0,6

Pro měření číslo 1 je na Obr. 32 zobrazena závislost napětí v tahu na deformaci, která popisuje charakteristické chování v podobě tzv. deformačních křivek pro každou posuzovanou aditivní technologii. Pomocí deformačních křivek lze dále určovat jednotlivé pevnostní charakteristiky.



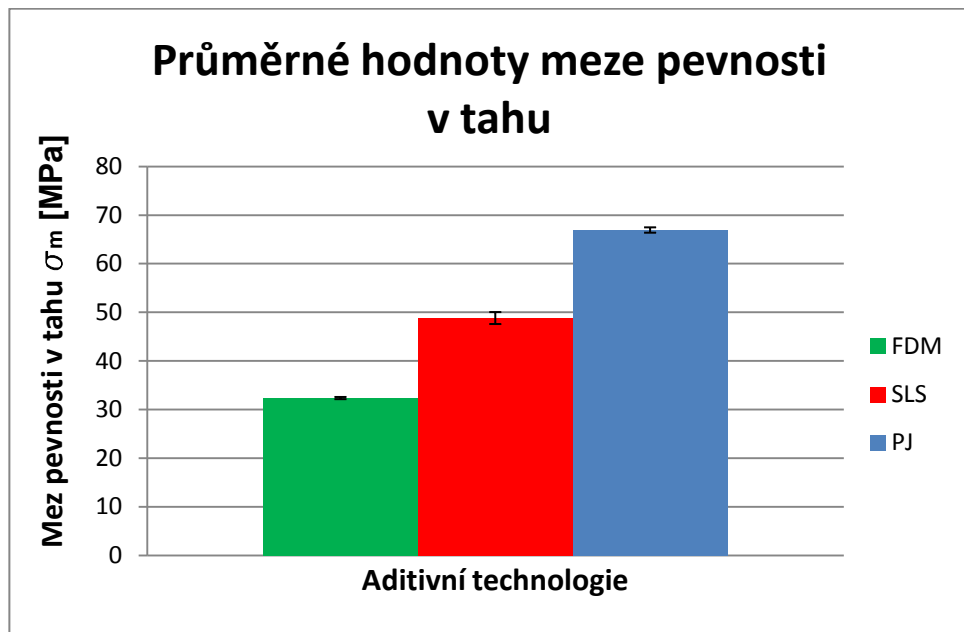
Obr. 32. Závislost napětí v tahu na deformaci.



Obr. 33. Průměrné hodnoty modulu pružnosti v tahu.

Z naměřených výsledků, viz Obr. 33 je patrné, že nejvyšší průměrná hodnota modulu pružnosti v tahu byla naměřena u zkušebních těles, která byla vyrobena aditivní technologií PJ, a to 3137,9 MPa. Naopak nejnižší průměrná hodnota byla naměřena u metody SLS 1870,3 MPa. Z chybových křivek zobrazených na grafu vyplývá, že naměřené hodnoty technologie FDM vykazují největší směrodatnou odchylku, tzn. největší odchýlení naměřených hodnot od průměru. Při srovnání hodnot modulu pružnosti v tahu jednotlivých ma-

teriálu, které udávají výrobci, viz Tab. 6, Tab. 8 a Tab. 10, přesahuje technologie PJ hodnoty udávané výrobcem přibližně o 5 %. Technologie SLS přesahuje hodnotu udávanou výrobcem o 10 % a metoda FDM vykazuje o přibližně 5 % menší průměrnou hodnotu modulu pružnosti v tahu, než udává výrobce.



Obr. 34. Průměrné hodnoty meze pevnosti v tahu.

Z Obr. 34 je zřejmé, že nejvyšší průměrné hodnoty meze pevnosti v tahu dosáhla technologie PJ a nejnižší hodnoty byly naměřeny u metody 3D tisku FDM. Technologie PJ vykazuje průměrnou hodnotu pevnosti v tahu 66,9 MPa a u technologie FDM dosáhla průměrná hodnota meze pevnosti v tahu pouze 32,3 MPa. Metoda SLS vykazuje druhou nejvyšší pevnost v tahu, která je cca o 28 % menší než u metody PJ.

6.1.2 Zkouška ohybem

Zkouška ohybem probíhala znovu na univerzálním zkušebním stroji Zwick 1456, který byl opatřen přípravkem pro trojbodový ohyb, viz Obr. 35. Prováděné měření se řídilo dle normy ČSN EN ISO 178 Plasty – Stanovení ohybových vlastností. Počet zhotovených zkušebních těles byl od každé jednotlivé metody tisku deset. Rychlost zatěžování byla stanovena na 2 mm/min.

Testované vzorky, které byly vyrobeny odlišnými aditivními technologiemi, byly zatěžovány staticky trojbodovým ohybem konstantní rychlostí. Vybranými porovnávanými parametry ohybové zkoušky byl modul pružnosti v ohybu a mez pevnosti v ohybu. Naměřené hodnoty jednotlivých parametrů pro každé měření byly uvedeny do Tab. 12.

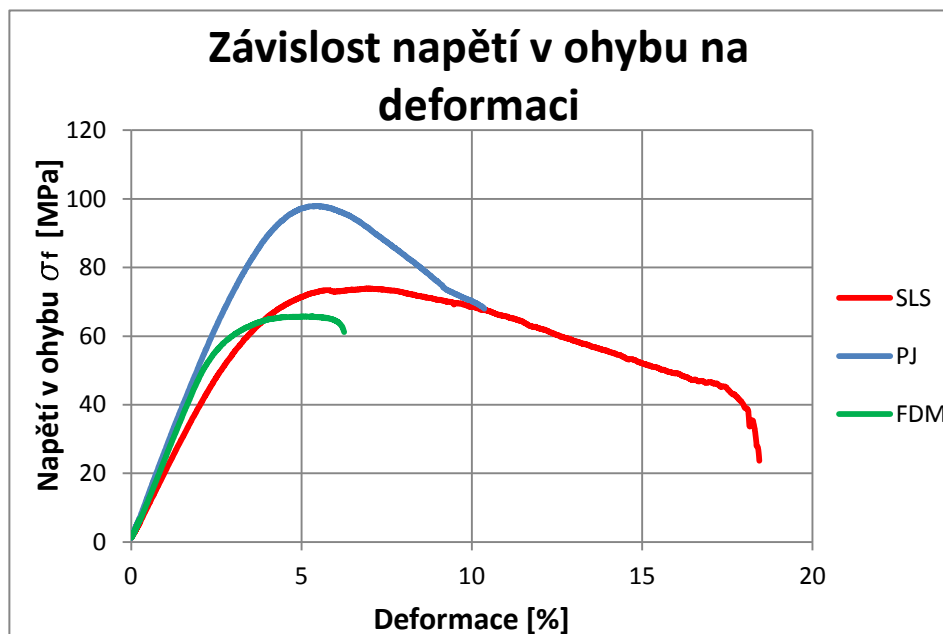


Obr. 35. Přípravek pro zkoušku ohybem.

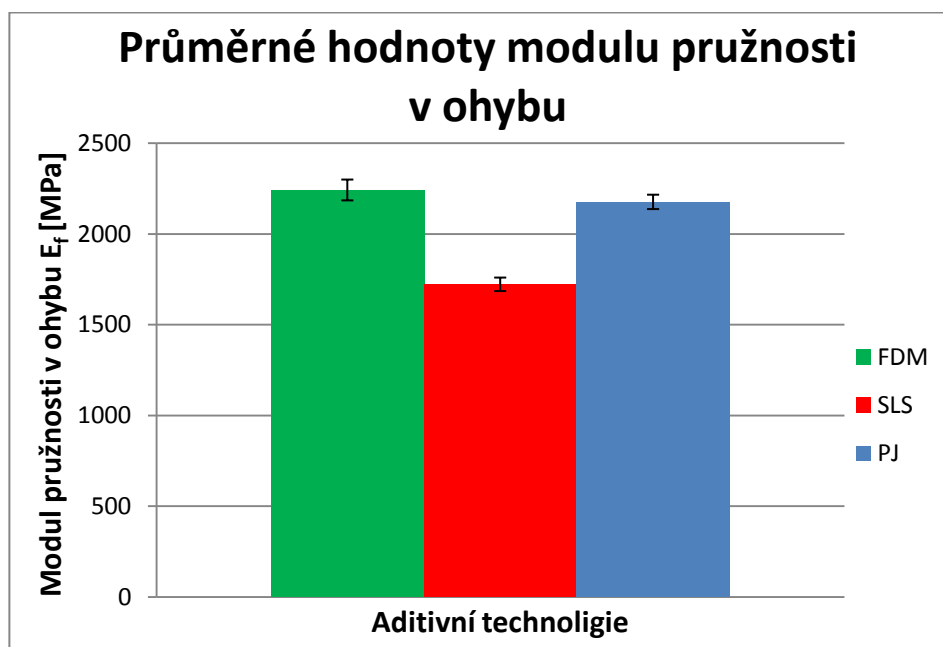
Tab. 12. Modul pružnosti a mez pevnosti v ohybu.

Č. m.	FDM (ABS - M30)		SLS (PA 2200)		PJ (VeroGray)	
	E_f [MPa]	σ_{fm} [MPa]	E_f [MPa]	σ_{fm} [MPa]	E_f [MPa]	σ_{fm} [MPa]
1	2148	65,7	1733	73,9	2261	97,9
2	2201	66,3	1688	74,6	2195	97,1
3	2196	65,6	1738	74,2	2159	96,2
4	2247	65,4	1734	74,2	2122	97,9
5	2222	64,3	1763	73,9	2158	98,5
6	2316	65,6	1759	74,9	2160	97,6
7	2293	65,8	1735	73,3	2148	97,4
8	2303	65,9	1640	73,1	2173	97,4
9	2297	65,2	1735	74,7	2220	97,2
10	2199	66,6	1697	73,4	2169	95,6
\bar{x}	2242,2	65,6	1722,2	74,0	2176,5	97,3
s	57,5	0,6	37,1	0,6	39,7	0,8

Pro měření číslo 1 je na Obr. 36 zobrazena závislost napětí v ohybu na deformaci, která popisuje charakteristické chování v podobě tzv. deformačních křivek pro každou posuzovanou aditivní technologii.



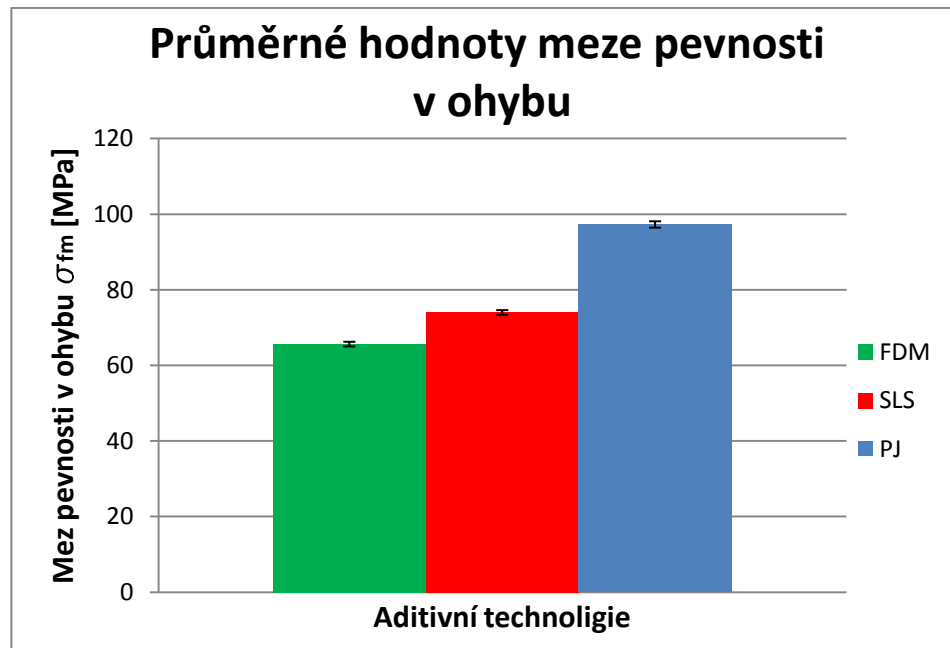
Obr. 36. Závislost napětí v ohybu na deformaci.



Obr. 37. Průměrné hodnoty modulu pružnosti v ohybu.

Naměřené výsledky modulu pružnosti v ohybu ukazují dle Obr. 37, že aditivní technologie FDM a PJ dosáhly téměř stejných výsledků, ale vyšší průměrné hodnoty dosáhla technologie FDM, a to 2242,2 MPa. Nejnižší průměrná hodnota modulu pružnosti v ohybu byla

naměřena u metody SLS 1722,2 MPa. Při srovnání modulu pružnosti v ohybu jednotlivých materiálu, jež udávají výrobci, viz Tab. 6, Tab. 8 a Tab. 10, technologie PJ odpovídá udávaným hodnotám výrobce. Technologie SLS přesahuje hodnotu udávanou výrobcem o cca 15 % a metoda FDM vykazuje o přibližně 2,5 % menší průměrnou hodnotu modulu pružnosti v ohybu, než udává výrobce.



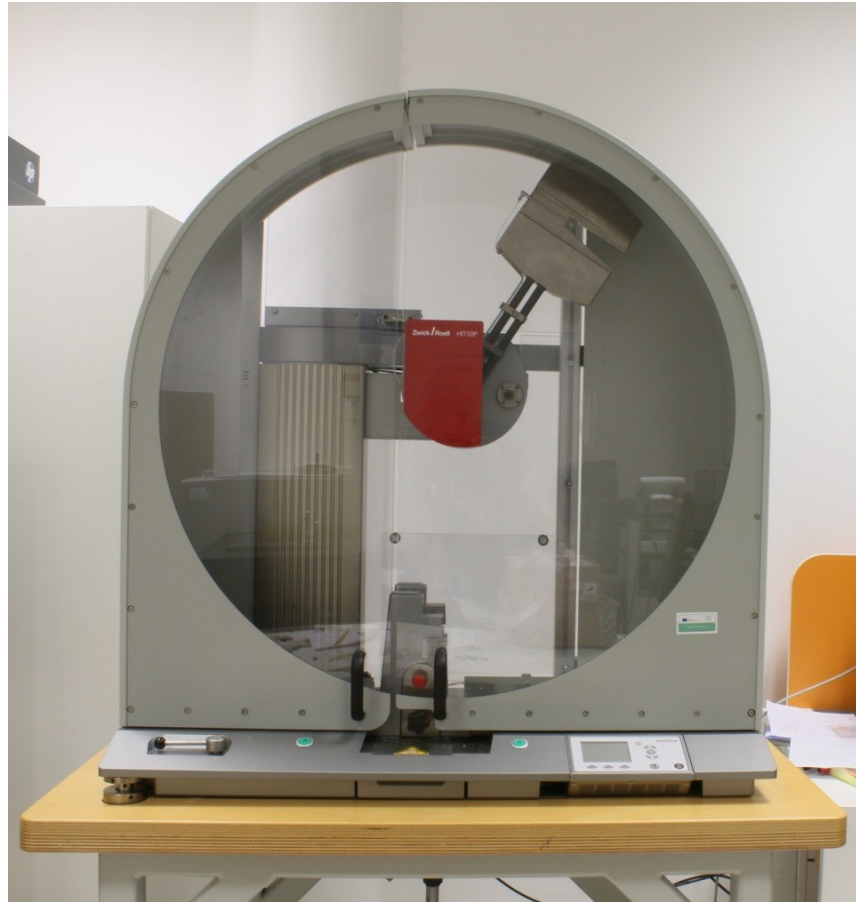
Obr. 38. Průměrné hodnoty meze pevnosti v ohybu.

Z Obr. 38 je zřejmé, že nejvyšší průměrné hodnoty meze pevnosti v ohybu dosáhla technologie PJ a nejnižší hodnoty byly naměřeny u metody 3D tisku FDM. Technologie PJ vykazuje průměrnou hodnotu pevnosti v ohybu 97,3 MPa a u technologie FDM dosáhla průměrná hodnota meze pevnosti v tahu pouze 65,6 MPa. Aditivní technologie SLS vykazuje druhou nejvyšší pevnost v ohybu, která je cca o 26 % menší, než u metody PJ.

6.2 Zkoušky mechanické dynamické

6.2.1 Zkouška rázem v ohybu

Zkouška rázem v ohybu byla provedena na zkušebním stroji Zwick/ Roell HIT 50P dle normy ČSN ISO 179 Plasty - Stanovení rázové houževnatosti Charpy. Zkouška se prováděla pro zkušební tělesa bez vrubu a tělesa, která byla opatřena V vrubem do hloubky 2 mm. Od každé aditivní technologie bylo zkoušeno deset vzorků. Počáteční energie kladi-va byla nastavena na 50 J.



Obr. 39. Zkušební stroj Zwick/ Roell HIT 50P.

Tvorba V vrubů na jednotlivých vzorcích pro zkoušku rázem v ohybu byla provedena dle normy na vrubovacím zařízení CEAST, který pracuje na manuálním principu a je vybaven odměřováním pomocí digitálního mikrometru. Tento přístroj je zobrazen na Obr. 40.



Obr. 40. Vrubovací zařízení CEAST.

Vybranými porovnávanými parametry zkoušky rázem v ohybu pro vzorky bez vrubu byla maximální síla a rázová houževnatost. Pro vzorky s vrubem to byla maximální síla a vrubová houževnatost. Výsledné hodnoty pro jednotlivá měření jsou uvedeny pro vzorky bez vrubu v Tab. 13 a pro vzorky s vrubem v Tab. 14.

Tab. 13. Výsledky maximální síly a rázové houževnatosti pro tělesa bez vrubu.

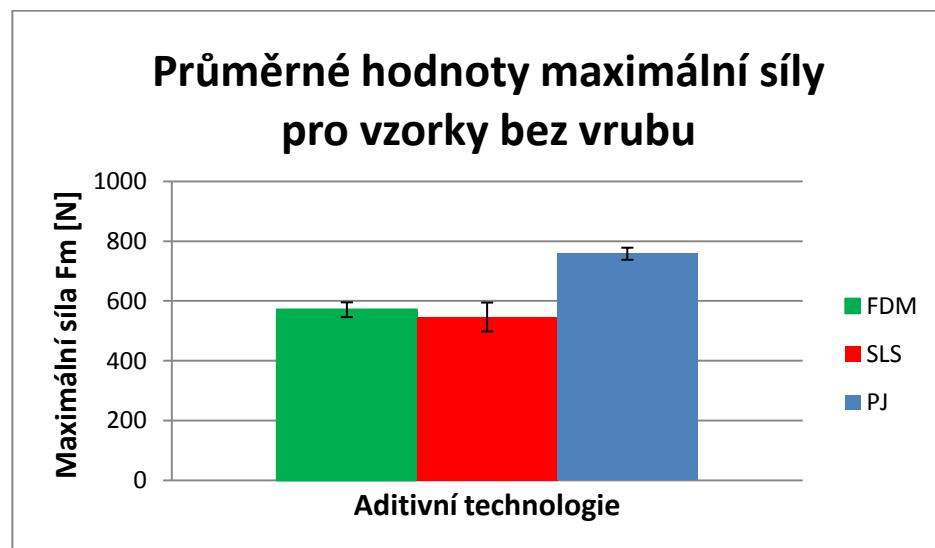
Č. m.	FDM (ABS - M30)		SLS (PA 2200)		PJ (VeroGray)	
	F _m [N]	A _n [kJ/m ²]	F _m [N]	A _n [kJ/m ²]	F _m [N]	A _n [kJ/m ²]
1	586,5	19,5	617,3	22,8	787,3	19,7
2	584,8	20,0	451,7	11,5	722,2	17,2
3	523,4	16,7	544,4	18,2	767,7	19,9
4	605,0	22,0	589,5	19,7	745,6	19,1
5	579,2	17,3	605,2	20,9	758,0	19,3
6	554,7	18,9	539,2	18,1	774,2	19,1
7	576,3	19,6	499,3	13,2	782,6	19,5
8	591,4	21,9	567,2	17,6	738,1	17,8
9	566,8	19,2	542,3	16,4	755,5	18,6
10	541,9	18,0	511,0	14,8	751,4	18,9
\bar{x}	571,0	19,3	546,7	17,3	758,3	18,9
s	24,7	1,8	48,3	3,5	20,3	0,8

Na Obr. 41 je zobrazena závislost síly na čase při rázové zkoušce v ohybu pro vzorky bez vrubu jednotlivých aditivních technologií. Je možné pozorovat, že samotný nárůst a pokles síly při přeražení vzorku probíhá za velmi krátký čas - cca 1 ms. Tato závislost je zobrazena pro měření č. 1. Je patrné, že hodnoty maximálních sil v grafu neodpovídají naměřeným hodnotám. To je dáno tím, že software testXpert II při průběhu zkoušky naměří velké množství bodů, které pak při tvorbě výsledné křivky filtruje.



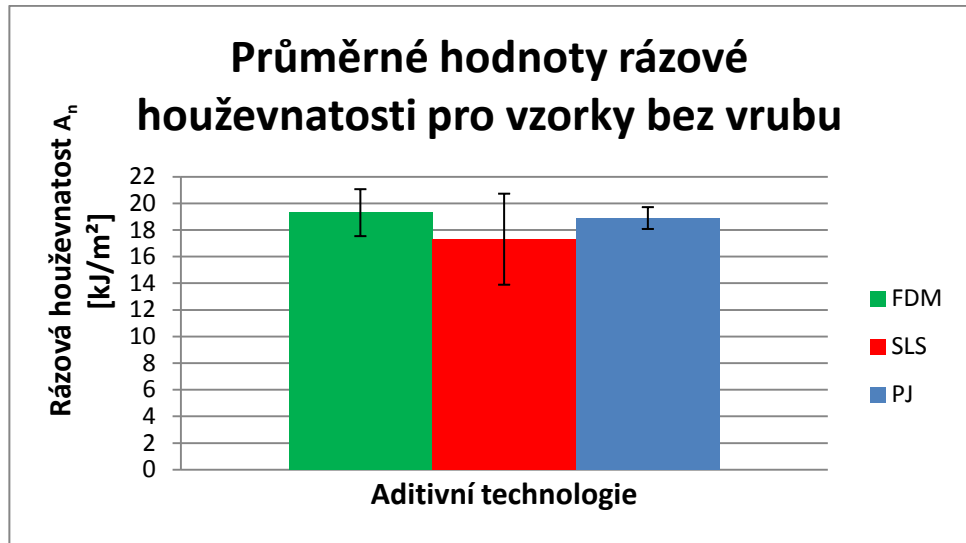
Obr. 41. Závislost síly na čase při rázové zkoušce v ohybu pro vzorky bez vrubu.

Z Obr. 42 je zřejmé, že největší průměrná hodnota maximální síly potřebné pro přeražení zkušební vzorku bez vrubu byla naměřena u zkušebního tělesa, které bylo vyrobeno metodou PJ. Dosahovala průměrné hodnoty 758,3 N. Nejmenší průměrná hodnota maximální síly 546,7 N byla naměřena při měření aditivní technologie SLS.



Obr. 42. Průměrné hodnoty maximální síly pro vzorky bez vrubu.

Rázová houževnatost udává odolnost materiálu vůči působení síly rázem a je vyjádřena jako množství energie, která je potřebná k přeražení tělesa. Nejvyšších průměrných hodnot rázové houževnatosti pro vzorky bez vrubu dle Obr. 43. dosáhla technologie FDM, a to průměrné hodnoty $19,3 \text{ kJ/m}^2$. Nejmenší rázovou houževnatost vykazovala metoda SLS s průměrnou hodnotou $17,3 \text{ kJ/m}^2$.

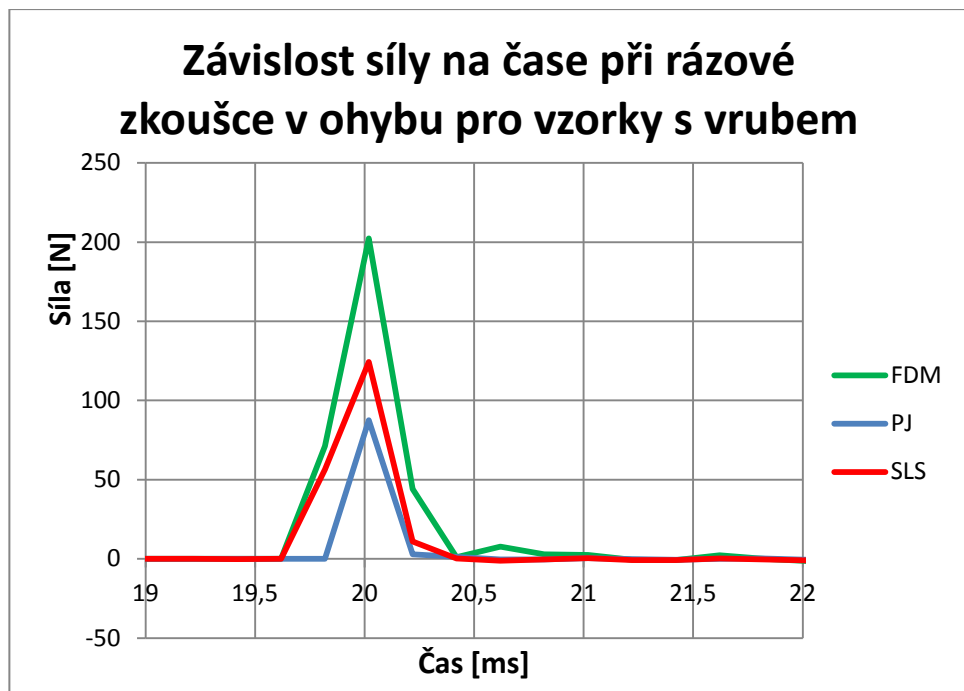


Obr. 43. Průměrné hodnoty rázové houževnatosti pro vzorky bez vrubu.

Tab. 14. Výsledky maximální síly a vrubové houževnatosti pro tělesa s vrubem.

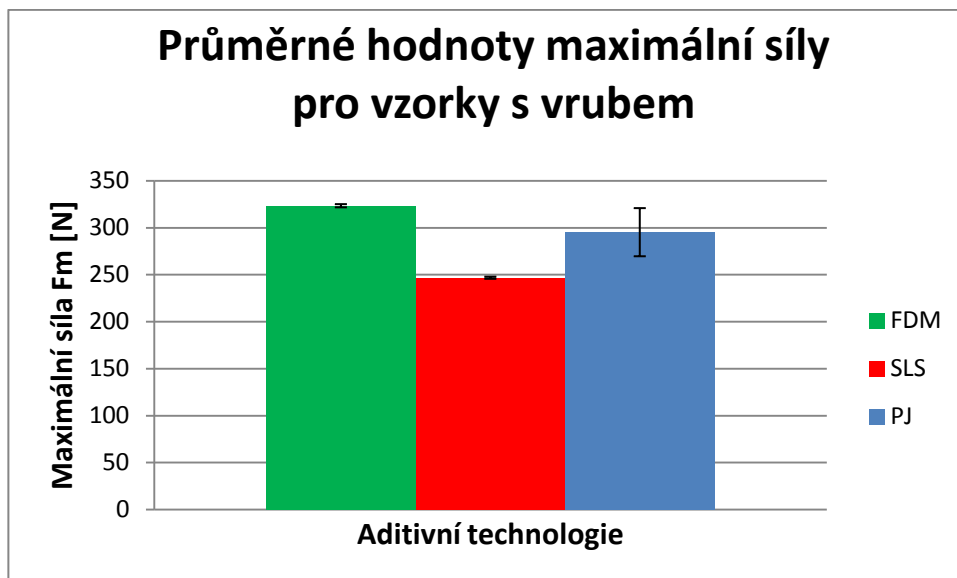
Č. m.	FDM (ABS - M30)		SLS (PA 2200)		PJ (VeroGray)	
	F_m [N]	A_k [kJ/m ²]	F_m [N]	A_k [kJ/m ²]	F_m [N]	A_k [kJ/m ²]
1	322,7	7,5	246,5	4,5	323,2	2,1
2	319,3	9,1	246,5	4,6	239,5	1,8
3	323,9	7,4	245,9	4,5	312,2	2,7
4	324,6	7,5	247,2	4,6	268,5	1,9
5	324,7	7,2	246,7	4,6	288,7	2,3
6	323,2	7,5	249,3	4,5	311,7	2,6
7	323,9	7,5	244,9	4,5	315,7	2,6
8	322,0	8,4	246,8	4,6	298,2	2,5
9	324,7	7,3	246,1	4,6	309,9	2,4
10	324,6	7,5	247,4	4,5	287,5	2,2
\bar{x}	323,4	7,7	246,7	4,6	295,5	2,3
s	1,701	0,6	1,2	0,1	25,6	0,3

Obr. 44 popisuje závislost síly na čase při rázové zkoušce v ohybu pro vzorky s vrubem jednotlivých aditivních technologií při měření č. 1. Z grafu je možné pozorovat, že u vzorku vyrobeného metodou PJ došlo k přeražení dvakrát rychleji, než je tomu u technologie FDM. Dále je patrné, že hodnoty maximálních sil v grafu neodpovídají naměřeným hodnotám. To je dáno tím, že software testXpert II při průběhu zkoušky naměří velké množství bodů, které pak při tvorbě výsledné křivky filtruje.



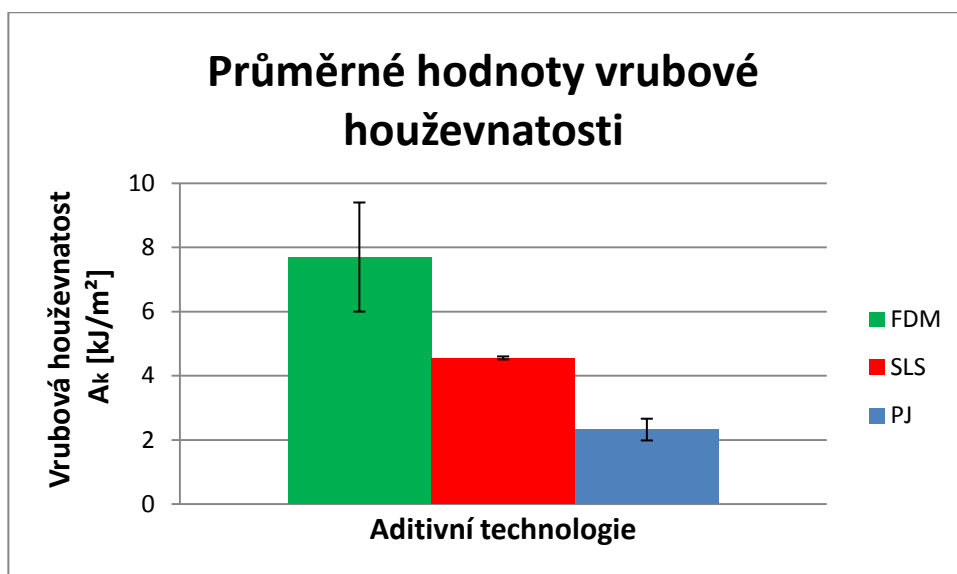
Obr. 44. Závislost síly na čase při rázové zkoušce v ohybu pro vzorky s vrubem.

Naměřené výsledky dle Obr. 45 ukazují, že největší hodnoty maximální síly potřebné pro přeražení zkušebních vzorků opatřených vrubem byly naměřeny u zkušebních těles vyrobených metodou FDM s průměrnou hodnotou 323,4 N. Nejmenší průměrná hodnota maximální síly 246,7 N byla naměřena při měření aditivní technologie SLS. Dále je z výsledků patrné, že přítomnost V vrubu způsobila pokles maximální síly u všech aditivních technologií.



Obr. 45. Průměrné hodnoty maximální síly pro vzorky s vrubem

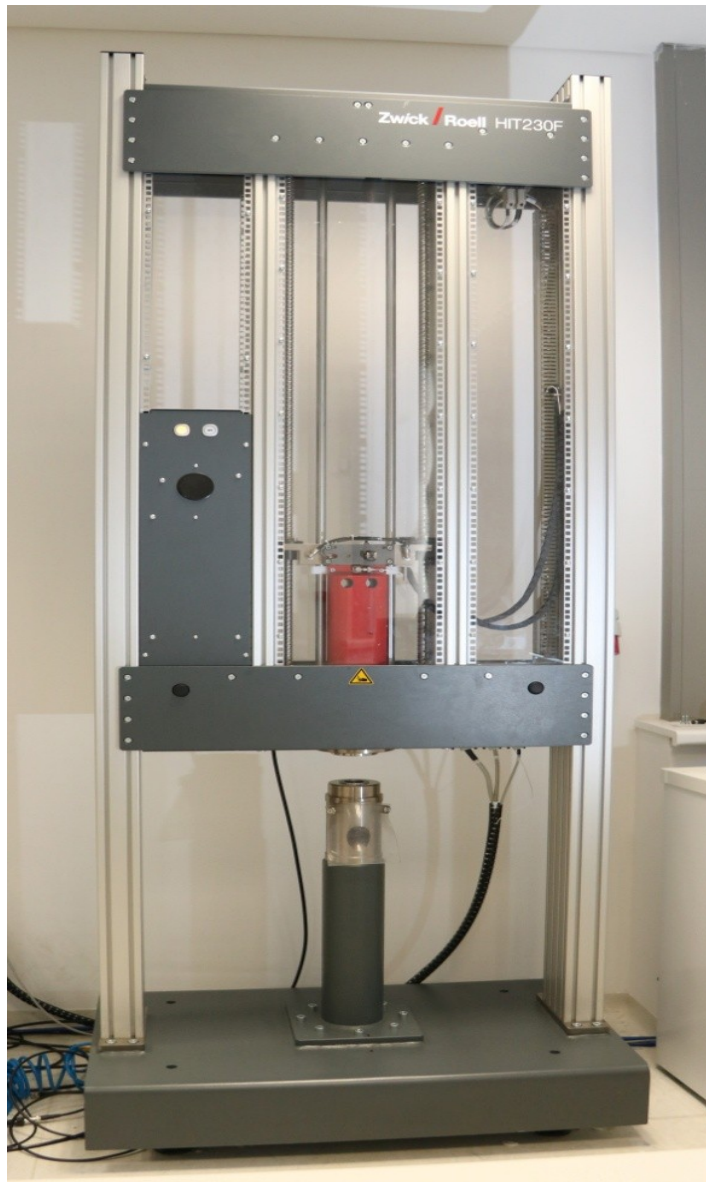
Z Obr. 46 vyplývá, že nejvyšších průměrných hodnot vrubové houževnatosti pro vzorky dosáhla technologie FDM, jejíž naměřená průměrná hodnota byla $7,7 \text{ kJ/m}^2$. Nejmenší vrubovou houževnatost vykazovala metoda PJ s průměrnou hodnotou $2,3 \text{ kJ/m}^2$. Z výsledků je dále patrný velký pokles vrubové houževnatosti u všech metod 3D tisku oproti hodnotám při měření rázové houževnatosti. To je dáno v důsledku koncentrace napětí v okolí V vrubu. Oproti měření vzorků s vrubem zaznamenala metoda PJ největší pokles vrubové houževnatosti ze všech aditivních technologií, který činil oproti rázové houževnatosti rozdíl až o 88 %.



Obr. 46. Průměrné hodnoty vrubové houževnatosti.

6.2.2 Rázová zkouška pádem

Rázová zkouška pádem se prováděla na zkušebním stroji Zwick/ Roell HIT 230F dle normy ČSN EN ISO 6603 Plasty - Stanovení chování tuhých plastů při víceosém rázovém namáhání. Počet zkušebních těles byl pro každou aditivní metodu deset. Počáteční energie tlouku padostroje byla nastavena na 100 J.



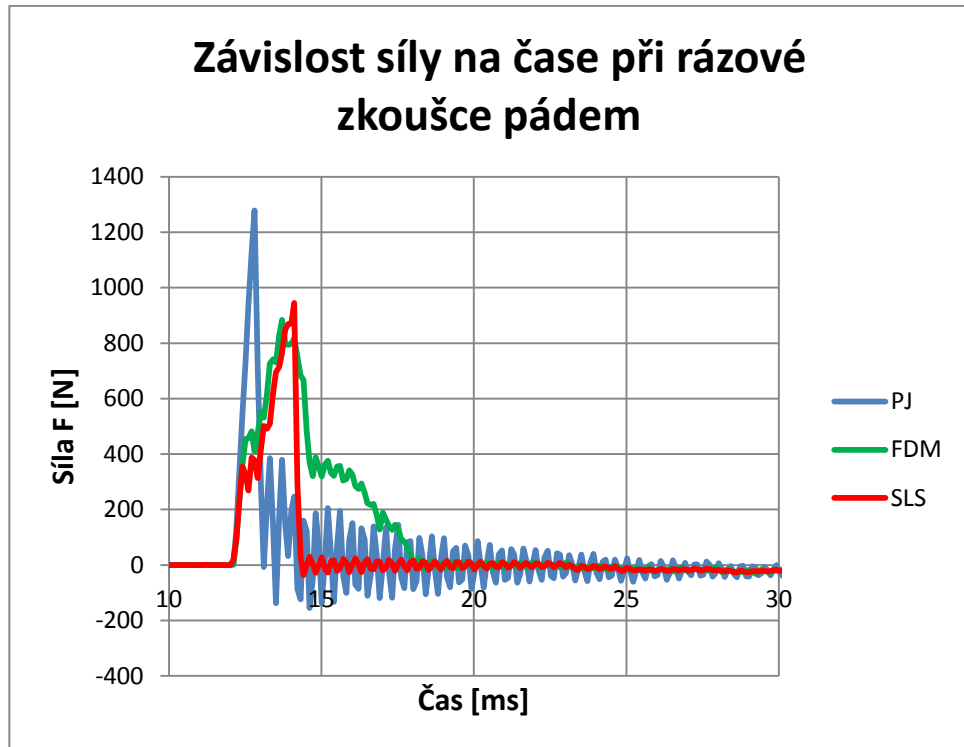
Obr. 47. Zkušební stroj Zwick/ Roell HIT 230F.

Vybranými porovnávanými parametry rázové zkoušky pádem pro jednotlivé aditivní technologie byla maximální síla F_m a energie při průrazu vzorku E_p . Výsledné hodnoty pro jednotlivá měření jsou uvedeny v Tab. 15.

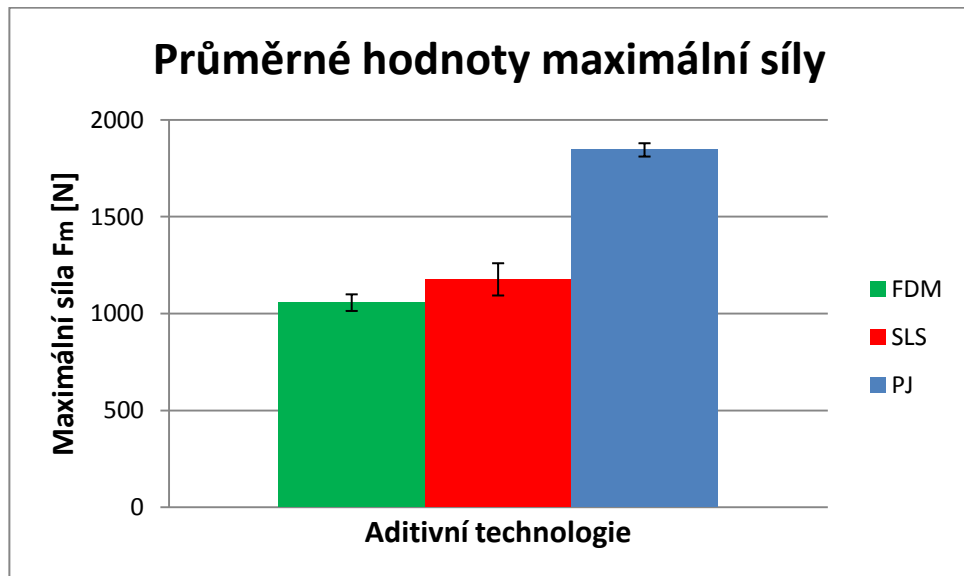
Tab.15. Výsledky maximální síly a energie při průrazu.

Č. m.	FDM (ABS - M30)		SLS (PA 2200)		PJ (VeroGray)	
	F _m [N]	E _p [J]	F _m [N]	E _p [J]	F _m [N]	E _p [J]
1	1114,3	2,5	1223,8	2,5	1879,6	1,9
2	1066,4	3,7	1310,5	2,6	1800,5	2,0
3	989,4	4,9	1157,6	3,1	1788,4	1,9
4	1086,7	3,5	1015,8	2,3	1865,9	1,8
5	1101,6	3,0	1227,3	2,9	1836,1	1,9
6	992,5	4,2	1162,2	2,5	1812,5	1,9
7	1038,1	3,4	1128,1	2,6	1868,7	1,9
8	1082,8	3,8	1205,9	3,1	1876,5	1,9
9	1033,5	3,5	1238,6	2,4	1858,3	2,0
10	1061,2	3,9	1098,5	2,6	1864,8	1,9
\bar{x}	1056,7	3,7	1176,8	2,7	1845,1	1,9
s	42,9	0,7	83,2	0,3	33,5	0,1

Pro měření č. 1 je na Obr. 48 zobrazena závislost síly na čase při rázové zkoušce pádem jednotlivých aditivních technologií. Z grafu vyplývá, že každá metoda 3D tisku vykazuje odlišný průběh síly při průrazu vzorku. Dále je patrné, že hodnoty maximálních sil v grafu neodpovídají naměřeným hodnotám. To je dáno tím, že software testXpert II při průběhu zkoušky naměří velké množství bodů, které pak při tvorbě výsledné křivky filtruje.

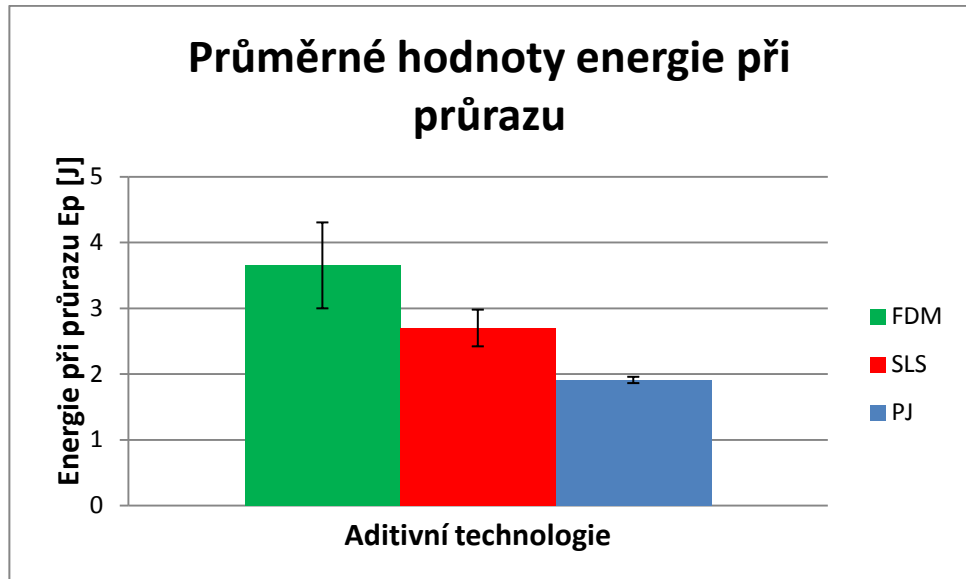


Obr. 48. Závislost síly na čase při rázové zkoušce pádem.



Obr. 49. Průměrné hodnoty maximální síly.

Nejvyšší průměrné hodnoty maximální síly při proražení vzorku u rázové zkoušky pádem dosahovala dle Obr. 49. technologie PJ. Průměrná naměřená hodnota pro tuto metodu byla 1845,1 N. Nejnižší průměrná hodnota maximální síly při proražení vzorku 1056,7 N byla naměřena pro metodu FDM.



Obr. 50. Průměrné hodnoty energie při průrazu.

Z Obr. 50 vyplývá, že největší průměrná hodnota energie při průrazu byla naměřena u technologie FMD 3,7 J. Naopak nejnižší průměrná hodnota energie při průrazu dosahovala aditivní technologie PJ, konkrétně 1,9 J. Metoda SLS dosáhla cca o 26 % menší energie při průrazu než aditivní technologie FDM.

6.3 Instrumentovaná zkouška tvrdosti DSI

Instrumentovaná zkouška tvrdosti DSI probíhala dle normy ČSN EN ISO 6507-1 na zkušebním přístroji Micro Combi Tester od společnosti CSM Instruments. Vnikající indentor byl čtyřboký diamantový jehlan s vrcholovým úhlem 136°. Počet měření bylo 10 pro každé aplikované zatížení a každou aditivní technologii. Mezi vybranými parametry Instrumentované zkoušky tvrdosti byla vybrána pro vyhodnocení vtisková tvrdost, tvrdost podle Vickersse a vnikající tečení.



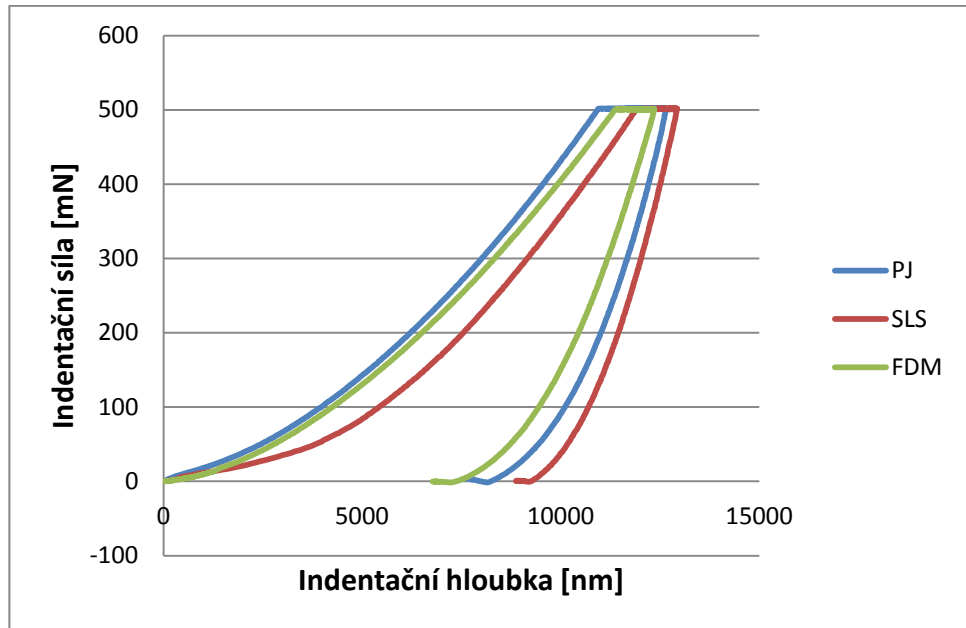
Obr. 51. Zkušební přístroj Micro Combi Tester [37].

Volba parametrů provedené zkoušky:

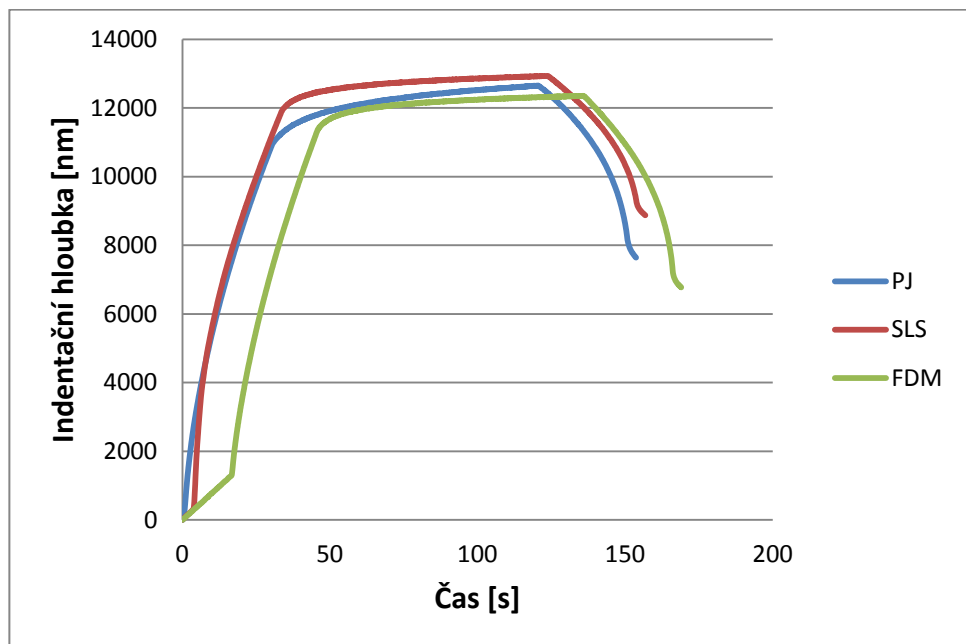
- aplikované zatížení - 0,5 N, 2 N a 5 N,
- doba výdrže na maximálním zatížení - 90 s,
- Poissonovo číslo - 0,3.

6.3.1 Indentační křivky

Indentační křivky jsou při měření tvrdosti metodou DSI základním zdrojem informací. Jedná se o změnu hloubky indentace v závislosti na průběhu času. Následující obrázky zobrazují indentační křivky závislosti průběhu indentační síly na narůstající indentační hloubce a závislosti indentační hloubky na čase. Pro náš případ tyto křivky popisují průběh pro tři různé aplikované zatěžující síly 0,5 N, 2 N a 5 N na každém druhu zkoumané aditivní technologie. Obr. 52 a Obr. 53 zobrazují indentační křivky pro měření č. 3 při zatížení 0,5 N.

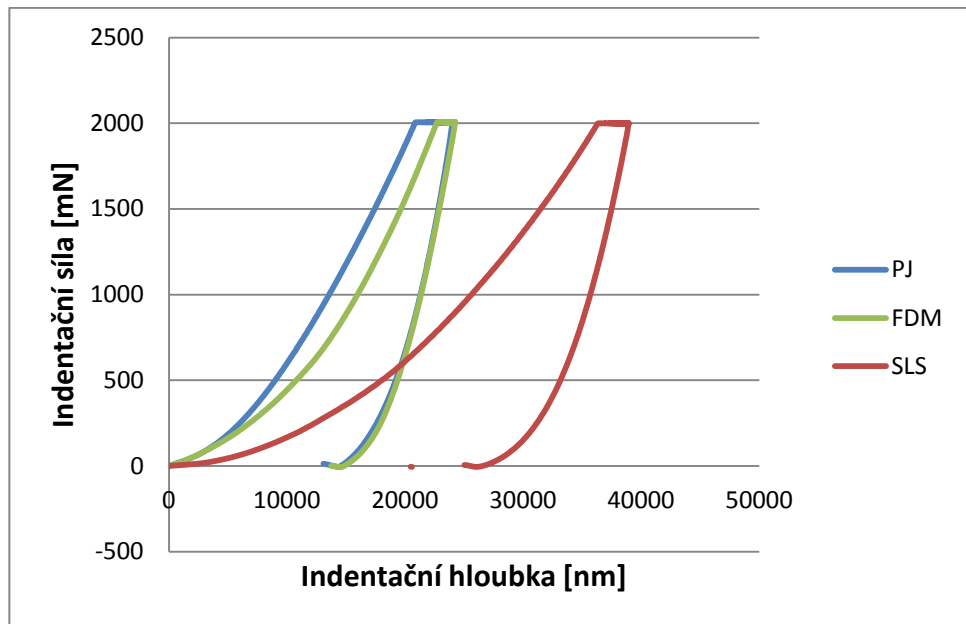


Obr. 52. Indentační křivky pro zatížení 0,5 N.

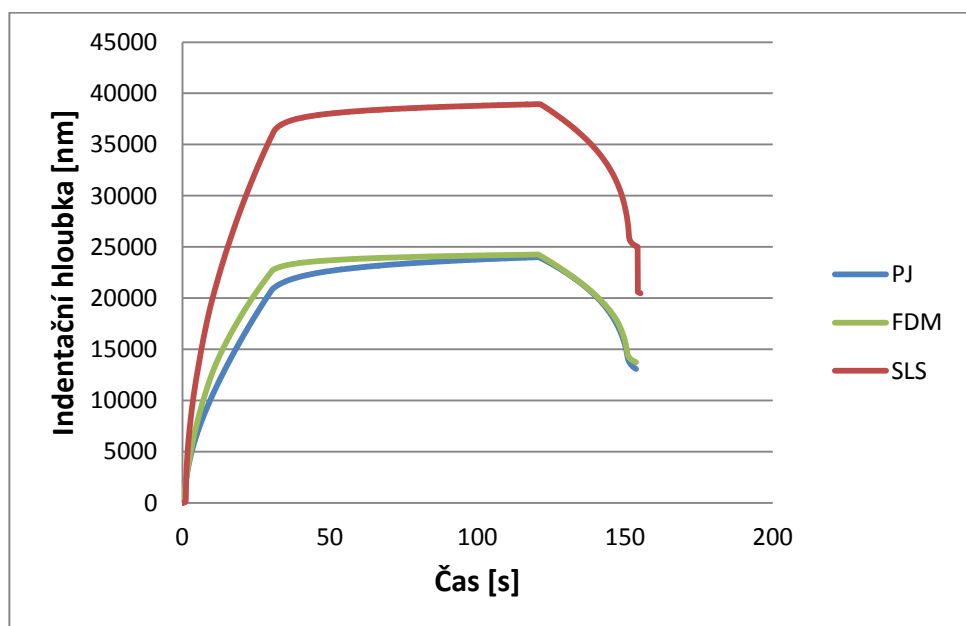


Obr. 53. Indentační křivky pro zatížení 0,5 N.

Na Obr. 54 a Obr. 55 jsou zobrazeny vybrané indentační křivky pro měření č. 3 při zatížení 2 N. Z průběhu závislosti indentační síly na indentační hloubce je patrné, že při stejném aplikovaném zatížení metoda SLS vykazuje oproti metodám FDM a PJ zřetelně větší indentační hloubku.

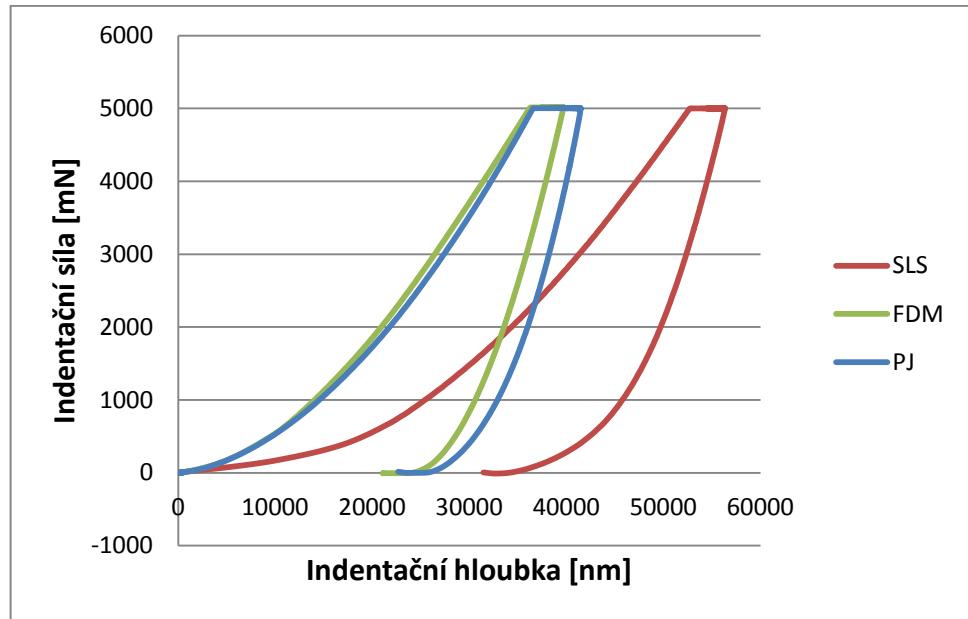


Obr. 54. Indentační křivky pro zatížení 2 N.

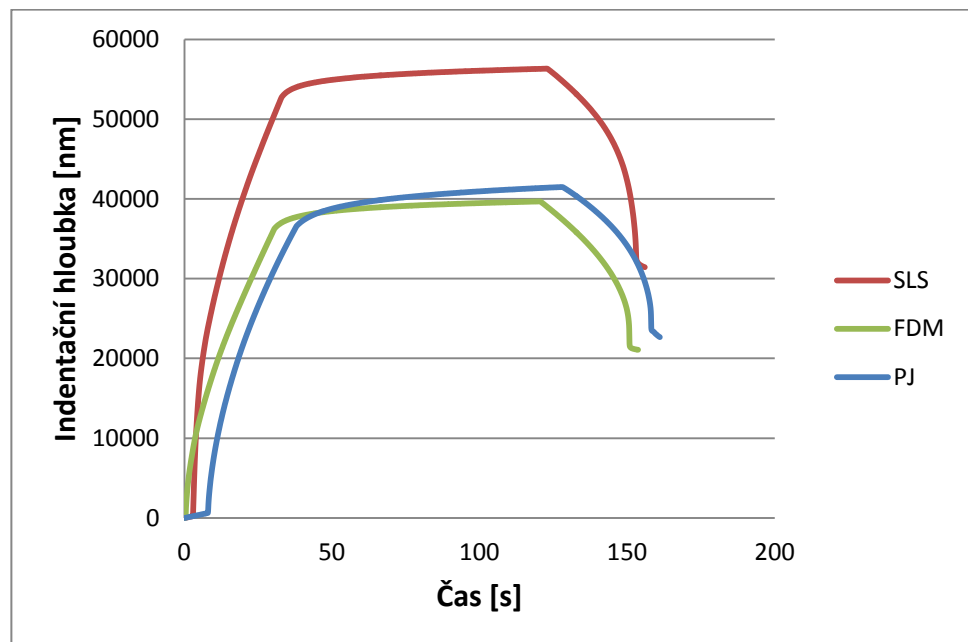


Obr. 55. Indentační křivky pro zatížení 2 N.

Obr. 56 a Obr. 57 zobrazují vybrané indentační křivky pro měření č. 3 při zatížení 5 N. Z průběhu indentačních křivek vyplývá, že aditivní technologie FDM a PJ vykazují podobné mikro-mechanické vlastnosti. Oproti těmto technologiím metoda SLS vykazuje mikro-mechanické vlastnosti znatelně horší.



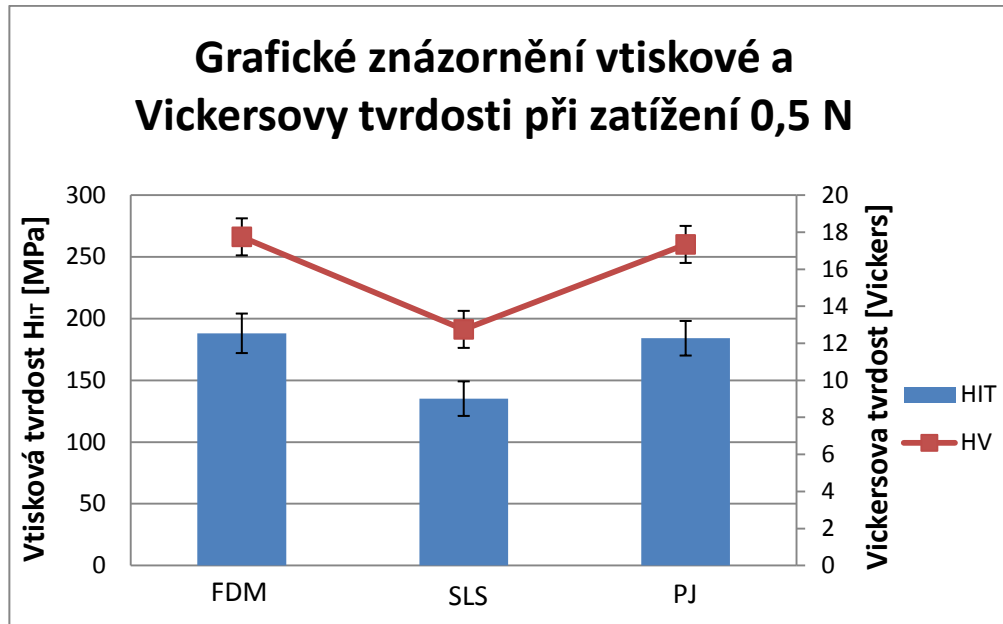
Obr.56. Indentační křivky pro zatížení 5 N.



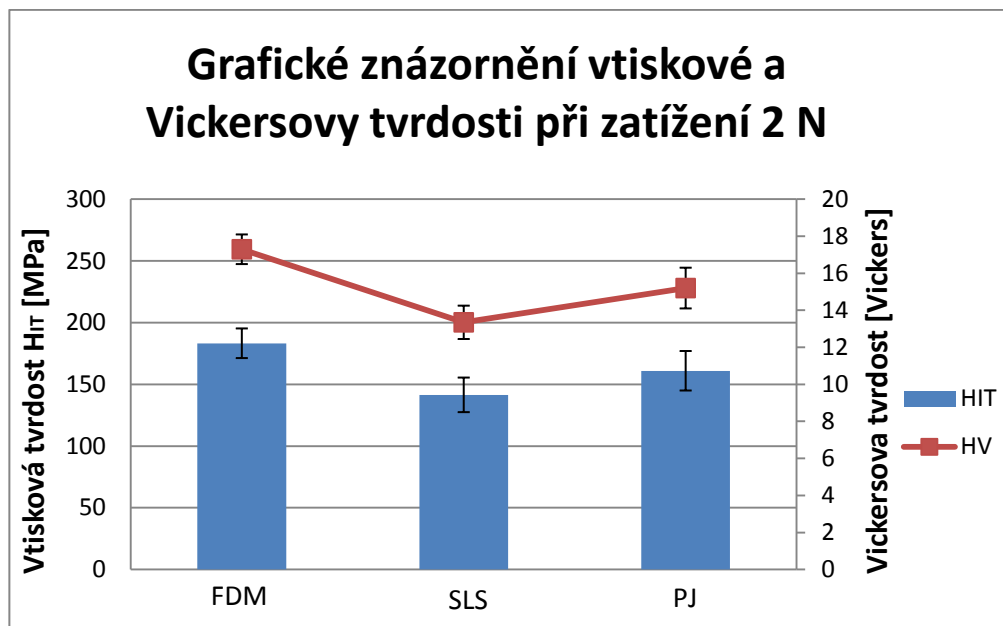
Obr. 57. Indentační křivky pro zatížení 5 N.

6.3.2 Vtisková tvrdost H_{IT} a tvrdost podle Vickerse HV

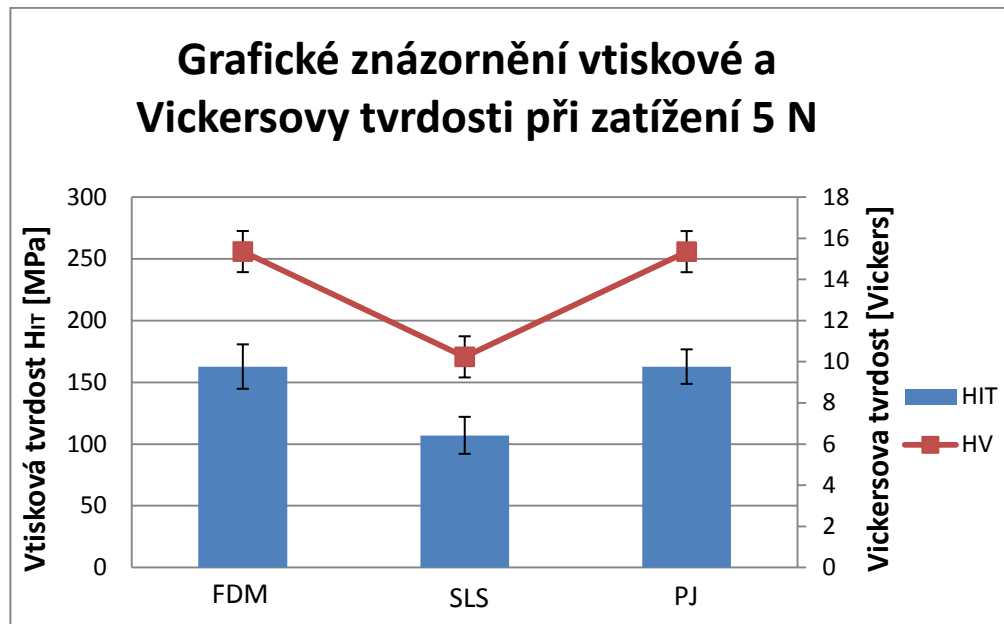
Naměřené výsledky vtiskové a Vickersovy tvrdosti pro jednotlivé zatížení 0,5 N, 2 N, 5 N pro jednotlivé typy aditivních technologií jsou graficky zobrazeny na Obr. 58, Obr. 59 a Obr. 60.



Obr. 58. Vtiskové a Vickersovy tvrdosti pro zatížení 0,5 N.



Obr. 59. Vtiskové a Vickersovy tvrdosti pro zatížení 2 N.



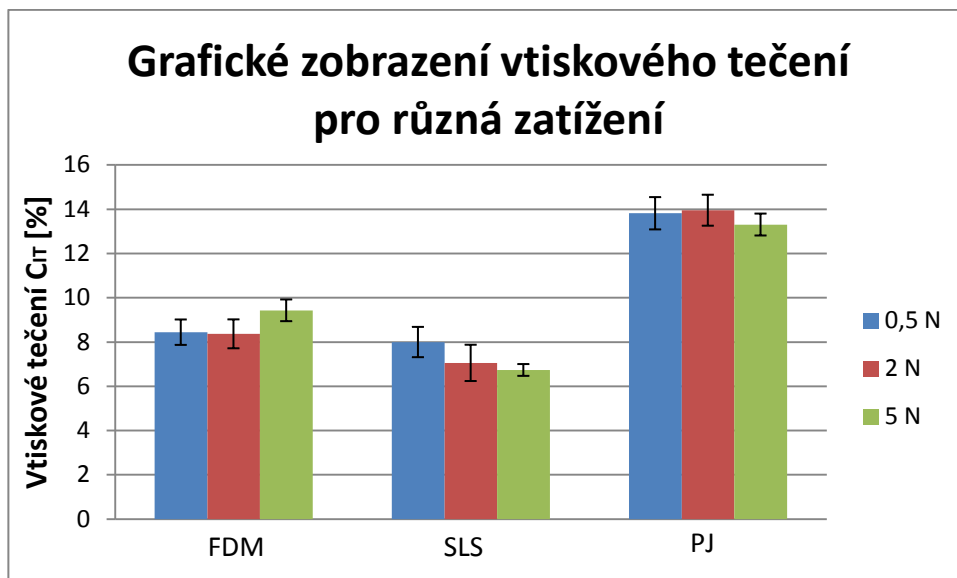
Obr. 60. Vtiskové a Vickersovy tvrdosti pro zatížení 5 N.

Z vyhodnocených výsledků plyne, že celkově největší vtisková a Vickersova tvrdost byla naměřena u metody FDM a nejnižší byla vyhodnocena u metody SLS. Konkrétně nejvyšší vtisková i Vickersova tvrdost metody FDM byla zaznamenána při zatížení 0,5 N a dosahovala hodnot 188,1 MPa a 17,7 HV. Nejnižší hodnoty metody SLS vtiskové tvrdosti 106,9 MPa a Vickersovy tvrdosti 10,2 HV byly naměřeny při aplikovaném zatížení 5 N.

Dále je z naměřených výsledků patrné, že při nejvyšším zatížení 5 N u metod FDM a SLS došlo k poklesu obou hodnot tvrdosti. U metody FDM tomu bylo cca o 14 %, u metody SLS nastal pokles u obou hodnot tvrdosti až o 25%.

6.3.3 Vtiskové tečení C_{IT}

Pomocí Instrumentované zkoušky tvrdosti DSI bylo dále vyhodnocováno vtiskové tečení (creepové chování) pro různé zatěžující síly. Z výsledků vynesných do grafu na Obr. 61 vyplývá, že největší hodnota vtiskového tečení byla naměřena pro technologii PJ při aplikovaném zatížení 2 N a dosáhla průměrné hodnoty 13,9 %. Druhou nejvyšší hodnotu vtiskového tečení vykazovala metoda FDM, která však má tuto hodnotu cca o 5 % nižší než metoda PJ.



Obr. 61. Vtiskové tečení pro různá zatížení

6.4 Měření drsnosti rovinných ploch

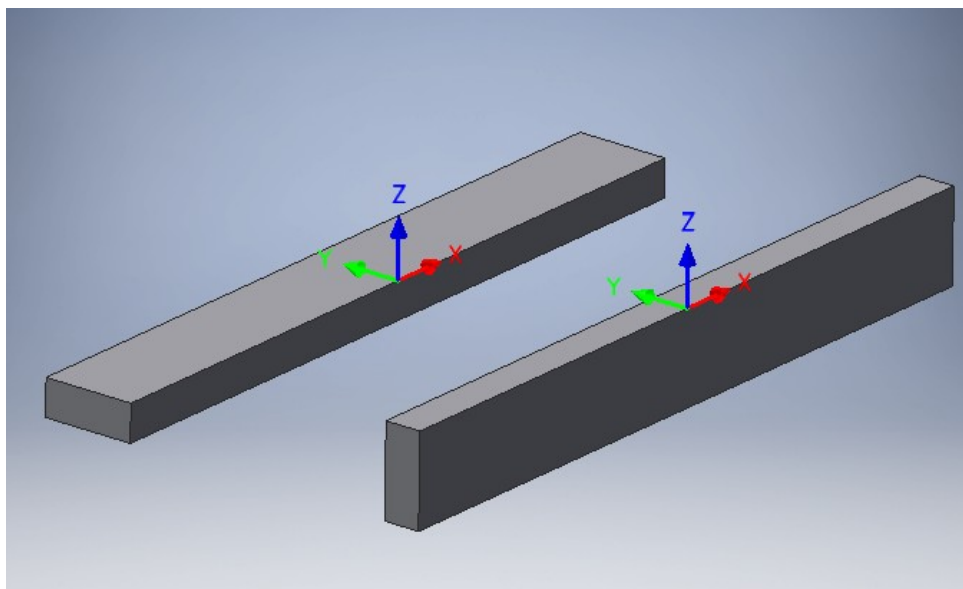
Pro měření drsnosti povrchu rovinných ploch jednotlivých vzorků byl použit 3D drsnoměr Taylor Hobson Talysurf CLI 500, který dokáže analyzovat kvalitu jakosti povrchu jak pro 2D profil řezu, tak i pro 3D plochu. Tento přístroj dále umožňuje měřit jakost povrchu buď indukčním dotykovým způsobem, nebo způsobem bezdotykovým. Rychlé automatické měření probíhá díky automatizovanému posuvu ve všech osách přístroje.



Obr. 62. 3D drsnoměr Taylor Hobson Talysurf CLI 500.

Pro porovnání drsnosti rovinných ploch mezi jednotlivými aditivními technologiemi bylo provedeno měření na každém vzorku jednotlivé technologie. Měřena byla horní vodorovná

plocha vzorku a boční svislá menší plocha vzorku vždy v ose X a Y, viz Obr. 62. Vybranými porovnávanými parametry kvality jakosti povrchu byla průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu Ra a největší výška profilu Rz. Vyhodnocení drsnosti povrchu probíhalo dle normy ČSN ISO 4287.



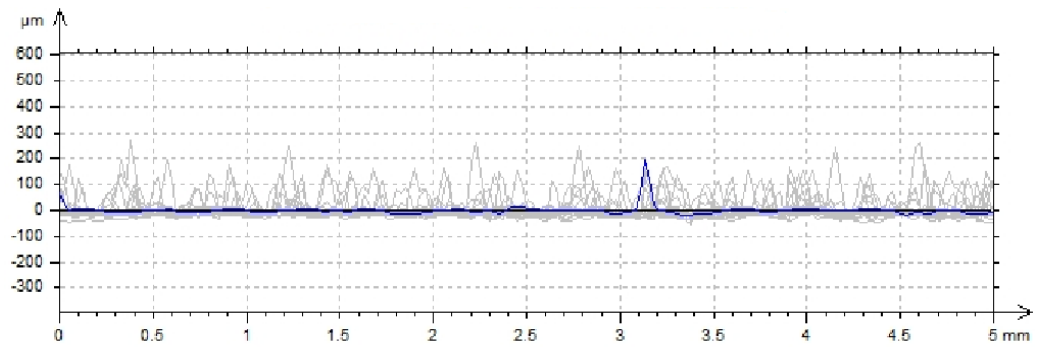
Obr. 63. Měřené drsnosti povrchu vodorovné a svislé plochy vzorku.

6.4.1 Drsnost povrchu pro metodu FDM

Na vodorovné větší ploše vzorku, který byl zhotoven metodou FDM, byla jakost povrchu měřena v pásmu 5 x 5 mm. Na svislé menší ploše vzorku v pásmu 5 x 3 mm. Naměřené výsledky parametrů jakosti povrchu Rz a Ra byly zapsány pro každou plochu a směr X, Y do příslušných tabulek. Nasnímaný povrch vzorku vodorovné i svislé plochy byl zobrazen ve 2D řezech jednotlivých profilů drsnosti a v 3D pohledu.

Tab. 16. Hodnoty drsnosti profilu Rz a Ra vodorovné plochy v ose X pro aditivní technologii FDM.

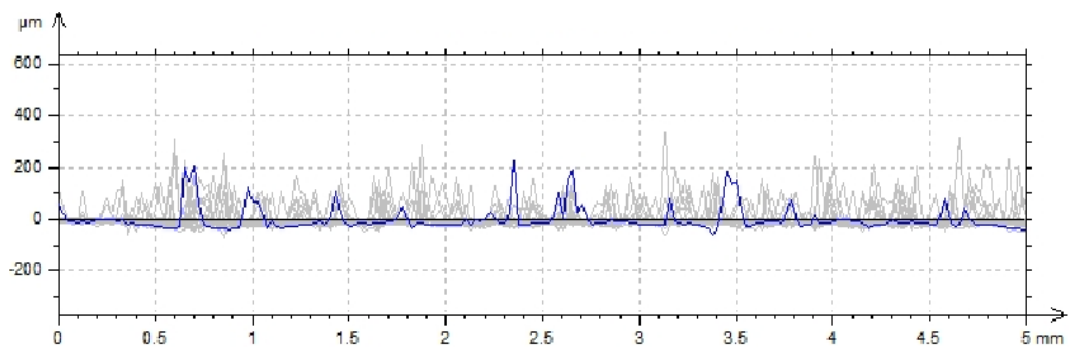
Parametr	Průměrná drsnost [μm]	Std dev [μm]	Min [μm]	Max [μm]
Rz	93,35	36,71	45,27	190,67
Ra	15,24	6,54	7,36	30,64



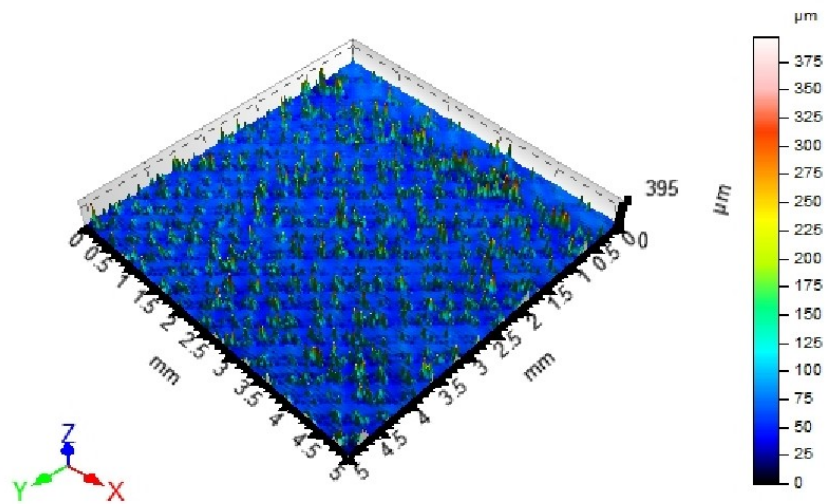
Obr. 64. Zobrazení profilů drsnosti pro vodorovnou plochu FDM v ose X.

Tab. 17. Hodnoty drsnosti profilu Rz a Ra vodorovné plochy v ose Y pro aditivní technologii FDM.

Parametr	Průměrná drsnost [µm]	Std dev [µm]	Min [µm]	Max [µm]
Rz	126,72	21,49	76,90	164,44
Ra	17,85	3,84	11,69	27,17



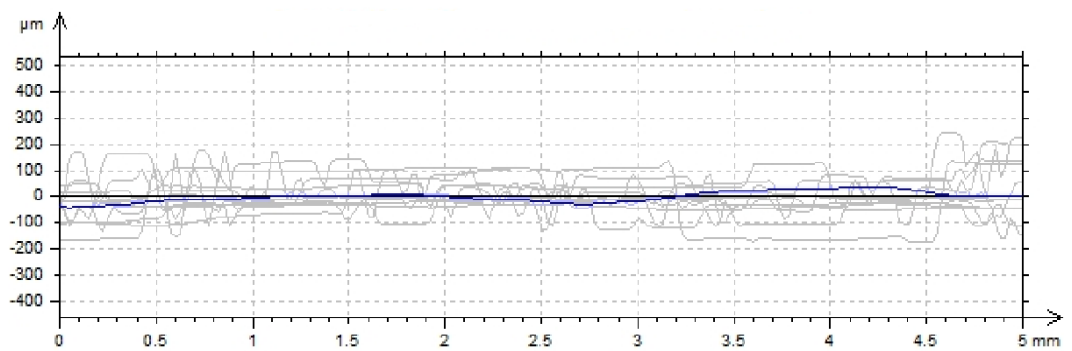
Obr. 65. Zobrazení profilů drsnosti pro vodorovnou plochu FDM v ose Y.



Obr. 66. 3D pohled nasnímané vodorovné plochy metody FDM.

Tab. 18. Hodnoty drsnosti profilu Rz a Ra svislé plochy v ose X pro aditivní technologii FDM.

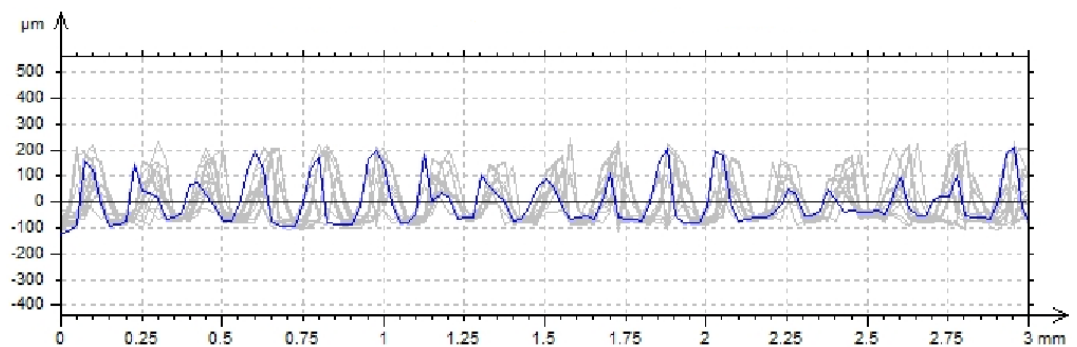
Parametr	Průměrná drsnost [μm]	Std dev [μm]	Min [μm]	Max [μm]
Rz	67,53	43,97	5,31	143,29
Ra	11,72	7,28	1,66	22,73



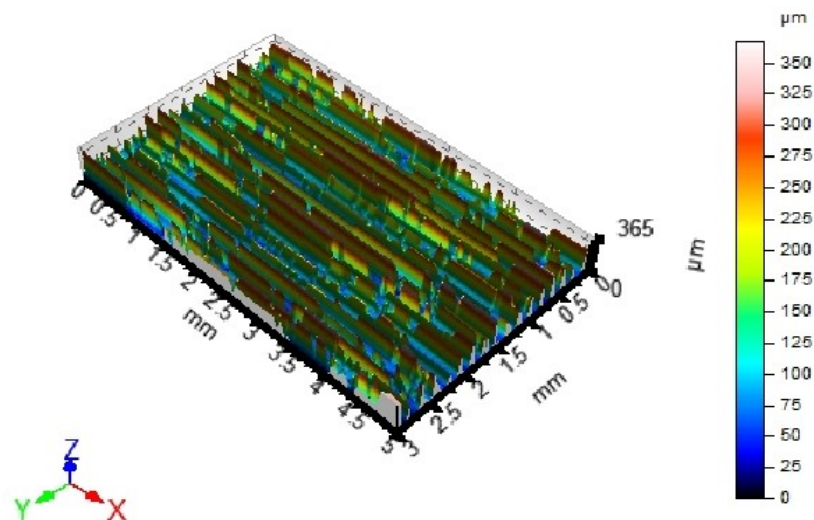
Obr. 67. Zobrazení profilů drsnosti pro svislou plochu FDM v ose X.

Tab. 19 Hodnoty drsnosti profilu Rz a Ra svislé plochy v ose Y
pro aditivní technologii FDM.

Parametr	Průměrná drsnost [μm]	Std dev [μm]	Min [μm]	Max [μm]
Rz	249,40	27,49	189,01	293,26
Ra	57,65	7,41	44,44	70,36



Obr. 68. Zobrazení profilů drsnosti pro svislou plochu FDM v ose Y.



Obr. 69. 3D pohled nasnímané svislé plochy metody FDM.

Z naměřených výsledků plyne, že největší naměřená drsnost vzorku zhotoveného metodou FDM se vyskytuje na boční svislé ploše v ose Y, která vykazuje průměrnou aritmetickou úchylku posuzovaného profilu Ra 57,65 μm a největší průměrnou výšku profilu

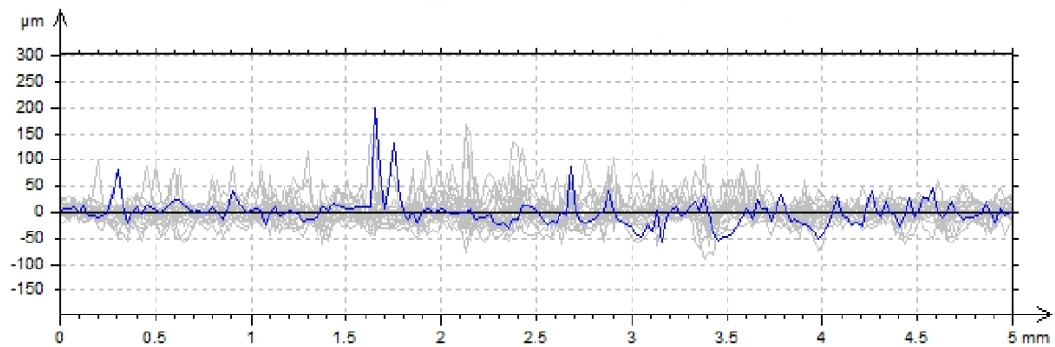
Rz 249,40 μm . Jedná se o velký nárůst drsnosti povrchu, který je dán výrobním principem nanášení jednotlivých vrstev této aditivní technologie.

6.4.2 Drsnost povrchu pro SLS

Vzorky vyrobeny SLS metodou byly měřeny na vodorovné ploše v pásmu 5 x 5 mm a svislé menší ploše vzorku v pásmu 5 x 3 mm. Jednotlivé naměřené výsledky parametrů jakosti povrchu Rz a Ra byly zapsány pro každou plochu a směr X, Y do tabulek. Nasnímaný povrch vzorku vodorovné i svislé plochy byl zobrazen ve 2D řezech jednotlivých profilů drsnosti a v 3D pohledu.

Tab. 20. Hodnoty drsnosti profilu Rz a Ra vodorovné plochy v ose X pro aditivní technologii SLS.

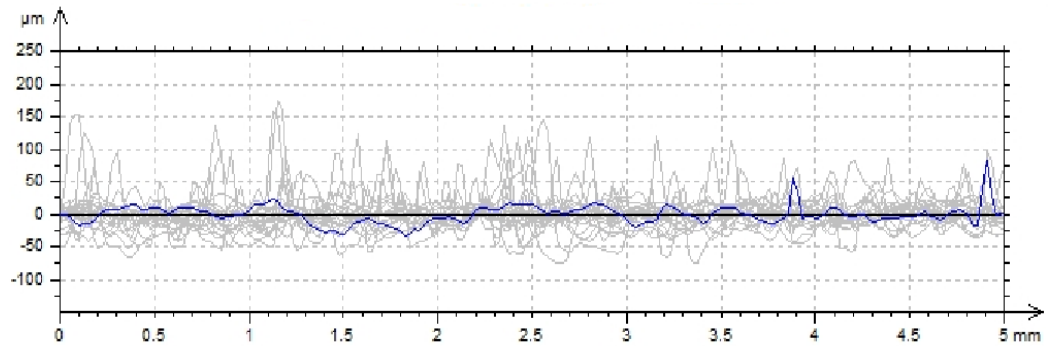
Parametr	Průměrná drsnost [μm]	Std dev [μm]	Min [μm]	Max [μm]
Rz	74,29	11,73	42,07	95,01
Ra	12,52	1,89	7,97	15,47



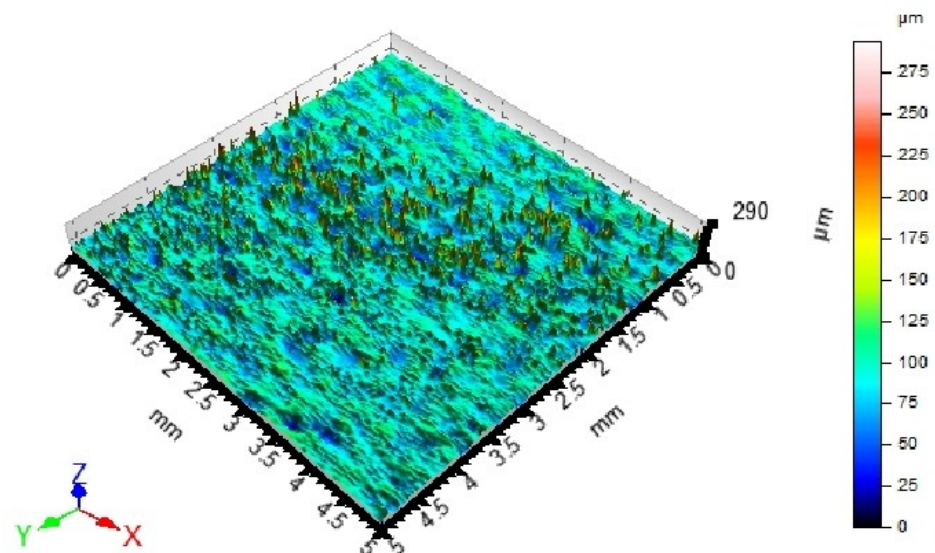
Obr. 70. Zobrazení profilů drsnosti pro vodorovnou plochu SLS v ose X.

Tab. 21. Hodnoty drsnosti profilu Rz a Ra vodorovné plochy v ose Y pro aditivní technologii SLS.

Parametr	Průměrná drsnost [μm]	Std dev [μm]	Min [μm]	Max [μm]
Rz	59,98	28,38	27,37	142,08
Ra	10,91	5,23	5,44	29,09



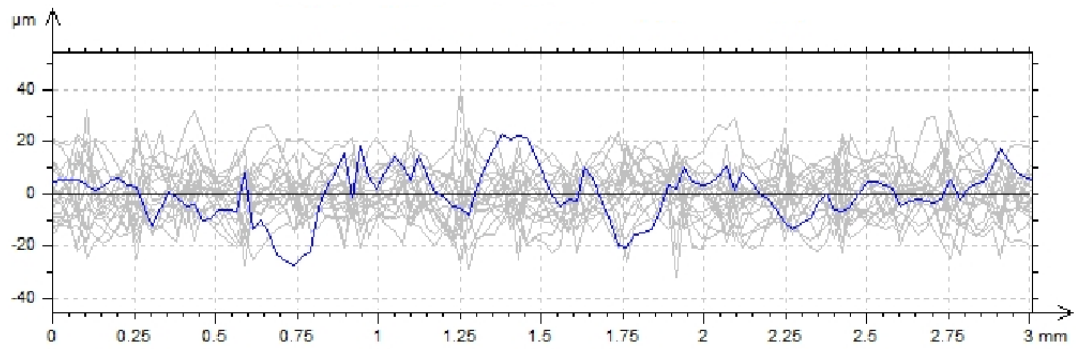
Obr. 71. Zobrazení profilů drsnosti pro vodorovnou plochu SLS v ose Y.



Obr. 72. 3D pohled nasnímané vodorovné plochy metody SLS.

Tab. 22. Hodnoty drsnosti profilu Rz a Ra svislé plochy v ose X pro aditivní technologii SLS.

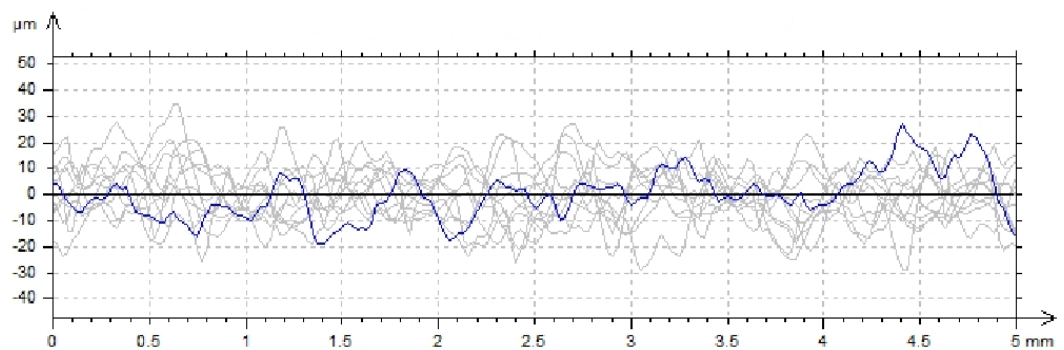
Parametr	Průměrná drsnost [μm]	Std dev [μm]	Min [μm]	Max [μm]
Rz	25,85	4,83	16,57	35,24
Ra	5,21	1,06	3,12	7,21



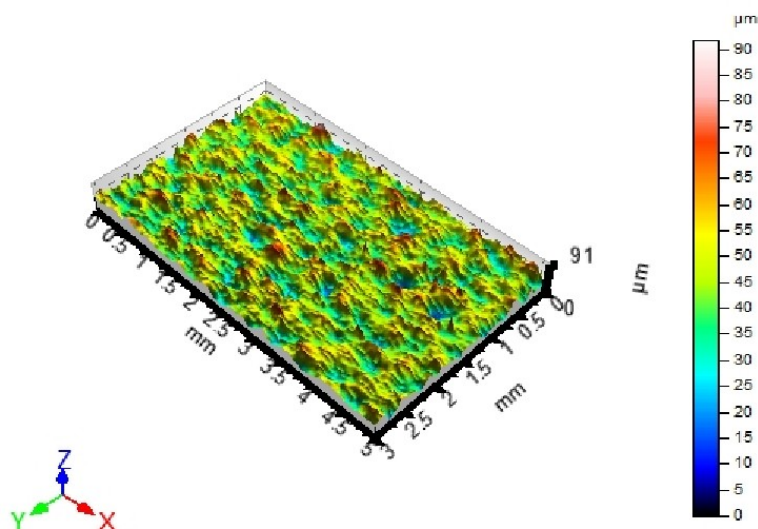
Obr. 73. Zobrazení řezů drsnosti pro svislou plochu SLS v ose X.

Tab. 23. Hodnoty drsnosti profilu Rz a Ra svislé plochy v ose Y
pro aditivní technologii SLS.

Parametr	Průměrná drsnost [μm]	Std dev [μm]	Min [μm]	Max [μm]
Rz	20,31	3,95	15,85	28,91
Ra	4,63	0,86	3,76	6,93



Obr. 74. Zobrazení řezů drsnosti pro svislou plochu SLS v ose Y.



Obr. 75. 3D pohled nasnímané svislé plochy metody SLS.

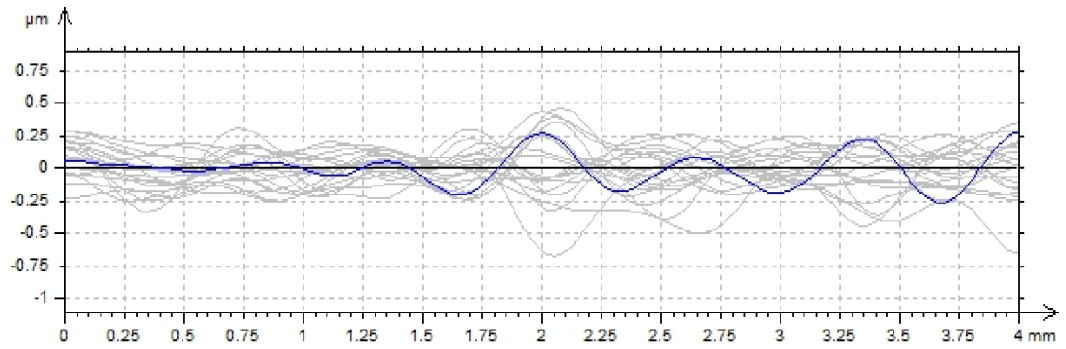
Naměřené výsledky ukazují, že nižší hodnoty drsnosti byly naměřeny na svislé ploše vzorku v ose Y, která dosahuje průměrnou aritmetickou úchylku posuzovaného profilu R_a 4,63 μm a největší průměrnou výšku profilu R_z 20,31 μm . Dále z výsledků plyne, že vodorovná plocha vykazuje oproti svislé zhruba dvakrát větší hodnoty drsnosti. To může být způsobeno při tvorbě finální vrstvy vzorku spékáním práškového materiálu.

6.4.3 Drsnost povrchu pro PJ

Měření jakosti povrchu pro vzorky, které byly vyrobeny metodou PJ, probíhalo na vodorovné ploše v pásmu 5 x 4 mm a na svislé ploše vzorku v pásmu 5 x 3 mm. Jednotlivé naměřené výsledky parametrů jakosti povrchu R_z a R_a byly zapsány pro každou plochu a směr X, Y do tabulek. Nasnímaný povrch vzorku vodorovné i svislé plochy byl zobrazen ve 2D řezech jednotlivých profilů drsnosti a v 3D pohledu.

Tab. 24. Hodnoty drsnosti profilu R_z a R_a vodorovné plochy v ose X pro aditivní technologii PJ.

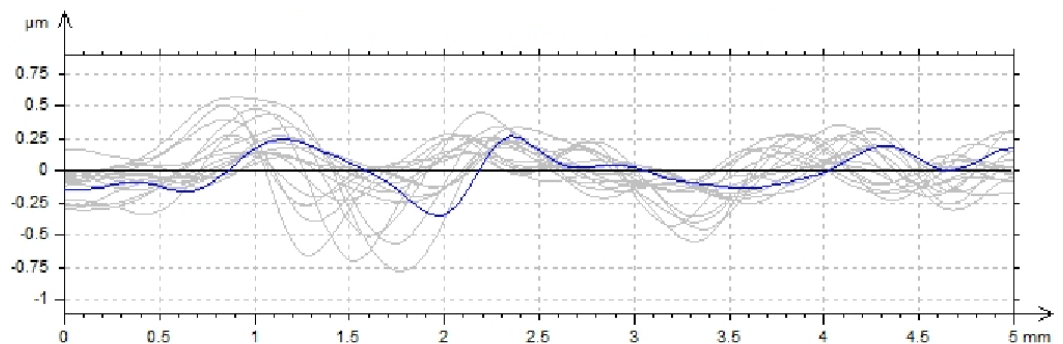
Parametr	Průměrná drsnost [μm]	Std dev [μm]	Min [μm]	Max [μm]
R_z	0,16	0,05	0,09	0,24
R_a	0,04	0,01	0,02	0,06



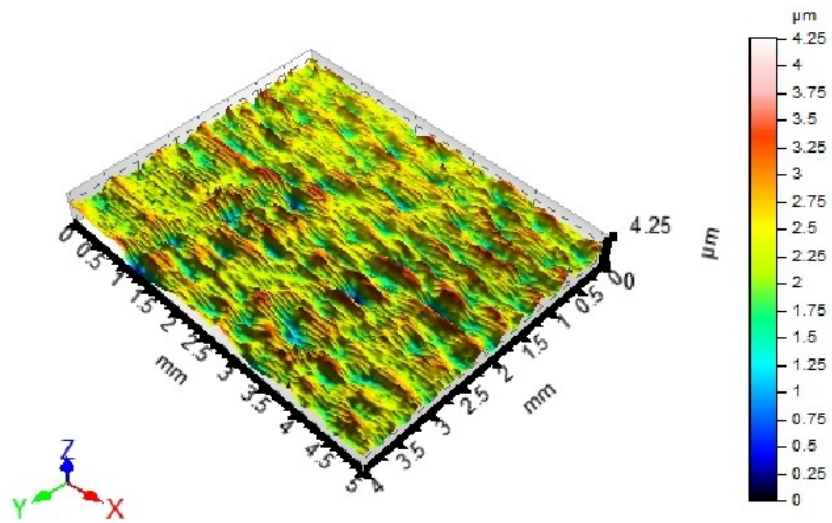
Obr. 76. Zobrazení profilů drsnosti pro vodorovnou plochu PJ v ose X.

Tab. 25. Hodnoty drsnosti profilu Rz a Ra vodorovné plochy v ose Y pro aditivní technologii PJ.

Parametr	Průměrná drsnost [μm]	Std dev [μm]	Min [μm]	Max [μm]
Rz	0,14	0,04	0,09	0,24
Ra	0,04	0,01	0,03	0,07



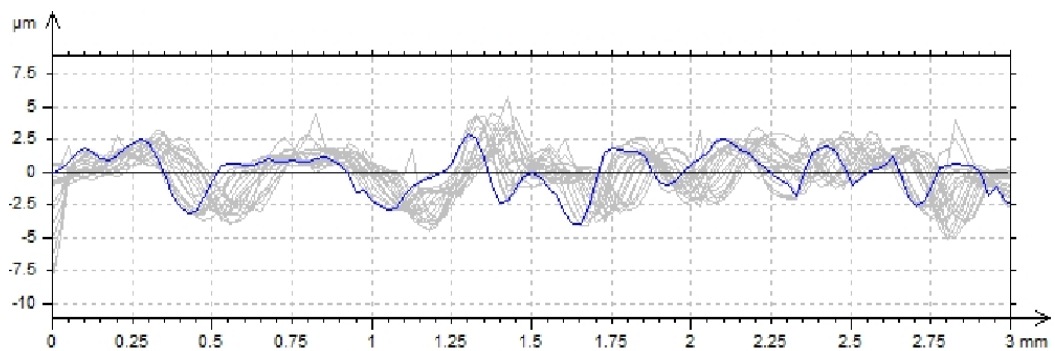
Obr. 77. Zobrazení profilů drsnosti pro vodorovnou plochu PJ v ose Y.



Obr. 78. 3D pohled nasnímané vodorovné plochy metody PJ.

Tab. 26. Hodnoty drsnosti profilu Rz a Ra svislé plochy v ose X pro aditivní technologii PJ.

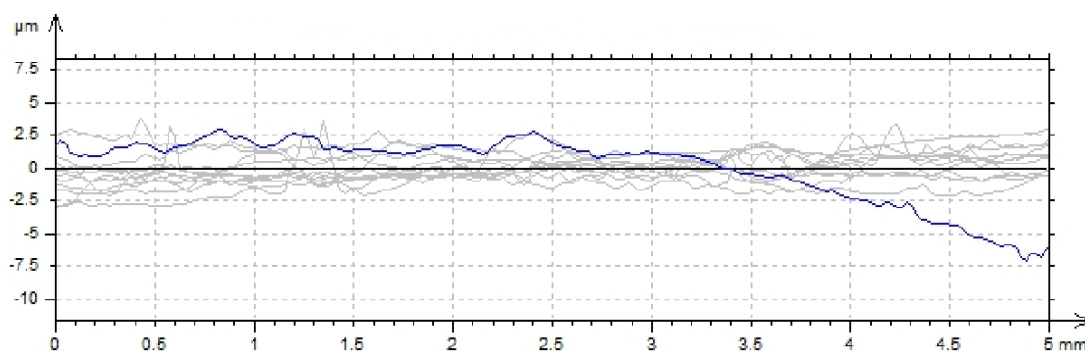
Parametr	Průměrná drsnost [μm]	Std dev [μm]	Min [μm]	Max [μm]
Rz	4,98	0,45	4,11	5,95
Ra	1,13	0,08	0,98	1,26



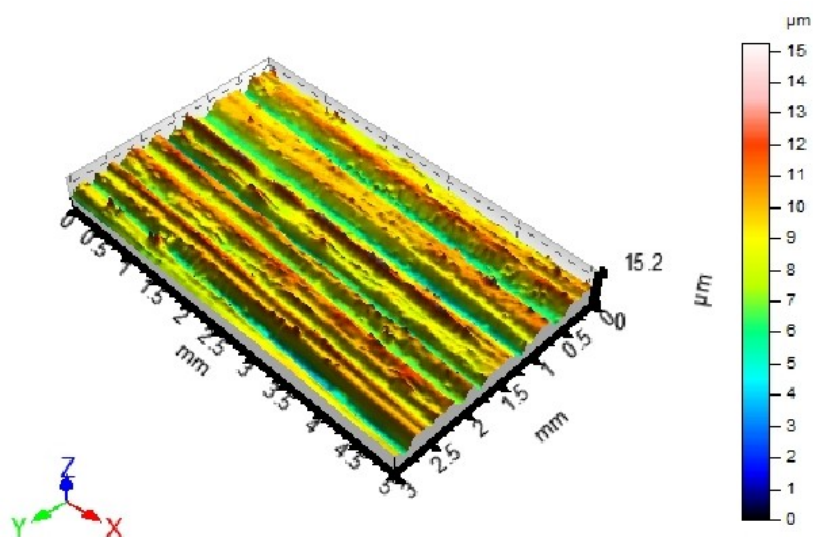
Obr. 79. Zobrazení profilů drsnosti pro svislou plochu PJ v ose X.

Tab. 27. Hodnoty drsnosti profilu Rz a Ra svislé plochy v ose Y pro aditivní technologii PJ.

Parametr	Průměrná drsnost [μm]	Std dev [μm]	Min [μm]	Max [μm]
Rz	0,96	0,46	0,30	1,78
Ra	0,19	0,09	0,07	0,34



Obr. 80. Zobrazení profilů drsnosti pro svislou plochu PJ v ose Y.



Obr. 81. 3D pohled nasnímané svislé plochy metody PJ.

Dle naměřených výsledků jakosti povrchu je patrné, že aditivní technologie PolyJet dosahuje velmi malých hodnot drsnosti. Vodorovná plocha vzorku vykazuje lepší hodnoty jakosti povrchu než svislá. V ose X dosahuje průměrnou aritmetickou úchylku posuzovaného profilu Ra 0,04 μm a největší průměrnou výšku profilu Rz 0,16 μm . V ose Y pak dosahuje

stejnou průměrnou aritmetickou úchylku posuzovaného profilu Ra 0,04 μm a největší průměrnou výšku profilu Rz 0,14 μm . Takto vyrobenou plochu lze například srovnávat s plochami, které byly vyrobeny klasickými dokončovacími způsoby lapováním, honováním, superfinišováním či velmi jemným broušením.

6.5 Vizuální porovnání kvality tisku

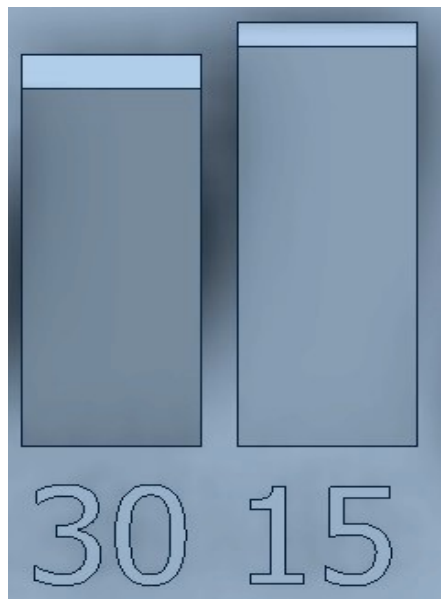
Tělesa pro vizuální porovnání kvality tisku byla mezi sebou porovnávána v šesti vybraných problémových úsecích. Kvalita tisku byla srovnávána v rámci schopnosti, jak každá aditivní technologie dokázala zhotovit úsek v závislosti na zkonstruovaném vstupním 3D modelu. Úseky na zkoumaných tělesech byly snímány pomocí mikroskopové kamery DigiMicro 5.0. a fotoaparátu Canon PowerShot SX60 HS.



Obr. 82. Mikroskopová kamera DigiMicro 5.0.

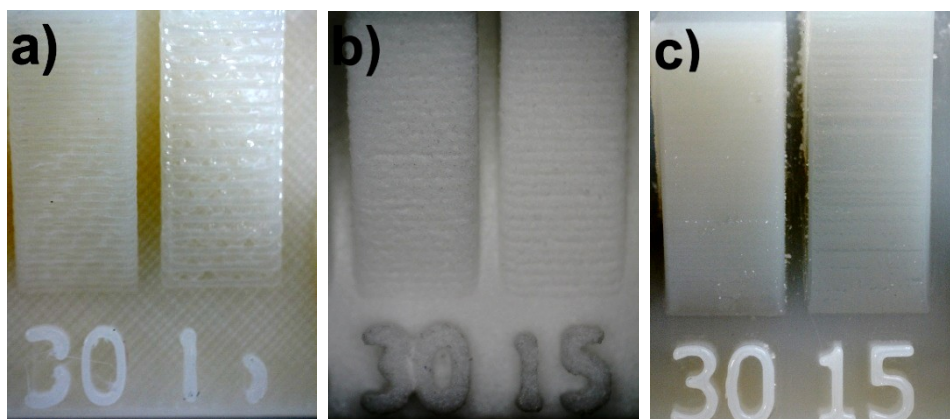
Posuzovaný úsek číslo 1 - kvalita písma

První posuzovaný úsek je zaměřen na porovnání kvality písma. Jedná se o malý číselný popis sklopených obdélníků pod jednotlivými úhly. Na Obr. 83 je zobrazen posuzovaný úsek na 3D modelu.



Obr. 83. Posuzovaný úsek č.1 na 3D modelu.

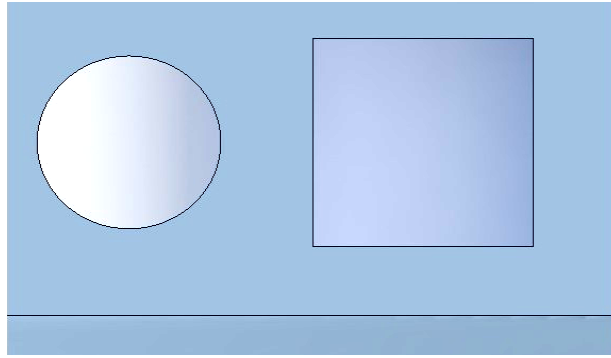
Z Obr. 84 a) je patrné, že technologie FDM nezvládla zcela vytisknout kompletně tvar číslic a má tedy problémy s tiskem menšího písma. Na Obr. 84 b) metoda SLS sice zhotovila kompletní čísla, ale jejich kvalita je nízká. V mezerách mezi číslicemi dochází ke spékání jednotlivých tvarů, a proto tam zůstává přebytečný materiál. Nejlépe dokázala zhotovit číslice metoda PJ, která je zobrazena na Obr. 84 c). Číslice zhotoveny touto metodou jsou ve velmi dobré kvalitě a nejvíce se přibližují vstupnímu 3D modelu.



Obr. 84. Posuzovaný úsek č.1 a) FDM, b) SLS, c) PJ.

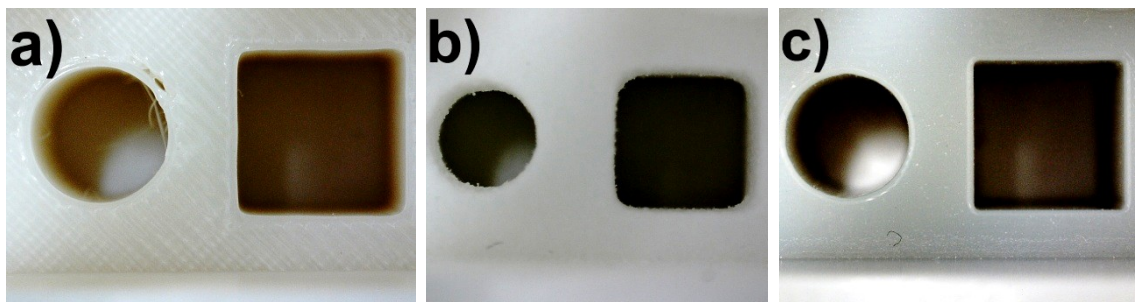
Posuzovaný úsek číslo 2 - otvory

Ve druhém úseku byla porovnávána kvalita tisku otvorů. Jedná se o kruhový otvor o průměru 5 mm a čtvercový otvor s délkou hrany 6 mm, které jsou zobrazeny na Obr. 85.



Obr. 85. Posuzovaný úsek č. 2 na 3D modelu.

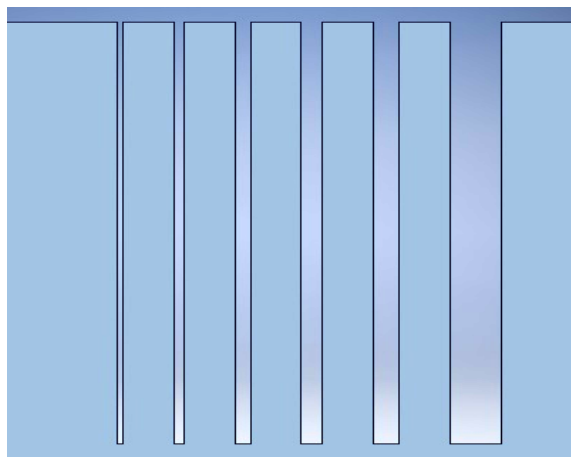
Na Obr. 86 a) je vidět, že metoda FDM s čtvercovým otvorem neměla vážné problémy, naopak u kruhového otvoru vznikla u obvodu malá prasklina a jemné ořepky, které by se musely odstranit v rámci postprocessingu. U technologie SLS došlo v důsledku tisku ke značnému zmenšení rozměrů otvorů a také došlo k poškození jejich geometrického tvaru, viz Obr. 86 b). Metoda PJ dosáhla dle Obr. 86 c) nejlepšího výsledků ze všech metod.



Obr. 86. Posuzovaný úsek č. 2 a) FDM, b) SLS, c) PJ.

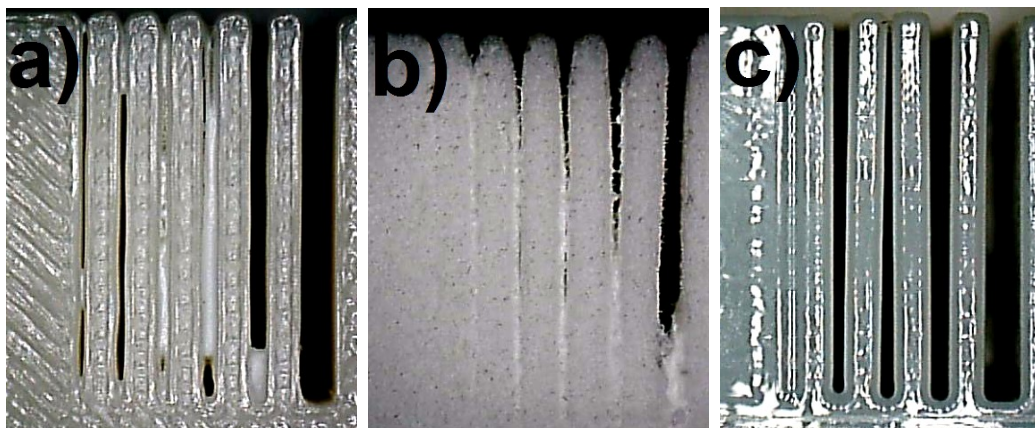
Posuzovaný úsek číslo 3 - stupňované mezery

Třetí posuzovaný úsek porovnává kvalitu tisku aditivních technologií na šesti odstupňovaných mezerách šířky 0,1 až 1 mm, které jsou zobrazeny na Obr. 86.



Obr. 87. Posuzovaný úsek č. 3 na 3D modelu.

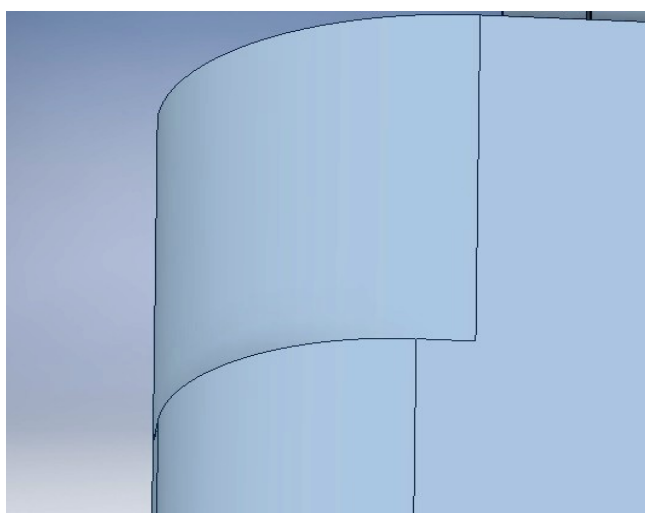
Aditivní technologie FDM, viz Obr. 88 a), zvládla vytisknout bez nedostatků pouze nejširší mezeru. U tenčích mezer docházelo k nežádoucímu zaplňování mezer materiálem. Metoda SLS, která je zobrazena na Obr. 88 b), nedokázala zhotovit dle vstupního 3D modelu ani jednu mezeru. Technologií PJ se podařilo vytisknout bez nežádoucího spojení materiálu 4 z 6 mezer, viz Obr. 88 c). U ostatních dvou mezer došlo k plnému zaplnění materiálem.



Obr. 88. Posuzovaný úsek č.3 a) FDM, b) SLS, c) PJ.

Posuzovaný úsek číslo 4 - rádiusy

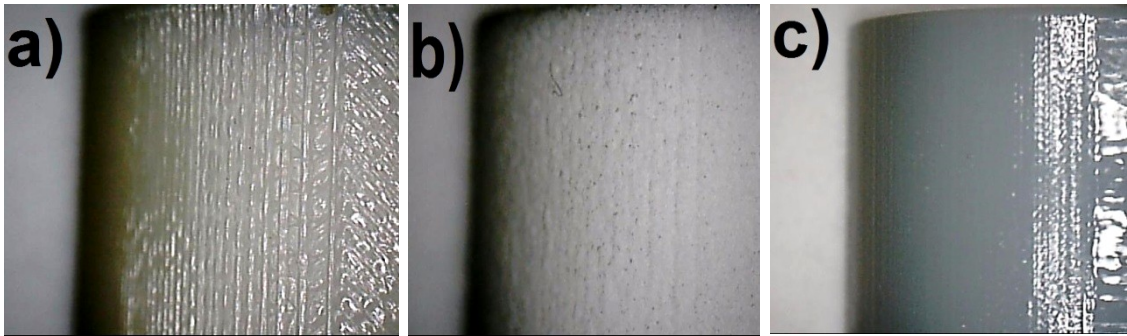
Posuzovaný úsek č. 4 byl zaměřen na schopnost aditivních metod tisknout rádiusy. Na testovacím tělese bylo rozmístěno 5 rádiusů od nejmenšího R 2, až po největší R 10. Z pěti odstupňovaných rádiusů, které byly na porovnávaných tělesech vytvořeny, byl porovnáván největší rádius R 10, u kterého došlo při tisku k nejvíce patrným změnám. Tento úsek na vstupním 3D modelu zobrazuje Obr. 89.



Obr. 89. Posuzovaný úsek č. 4 na 3D modelu.

Zhotovením rádiusu R 10 pomocí technologie FDM, viz Obr. 90 a), došlo k vytvoření poměrně hrubšího povrchu, než je tomu u metody SLS Obr. 90 b), avšak dle Obr. 90 c) do-

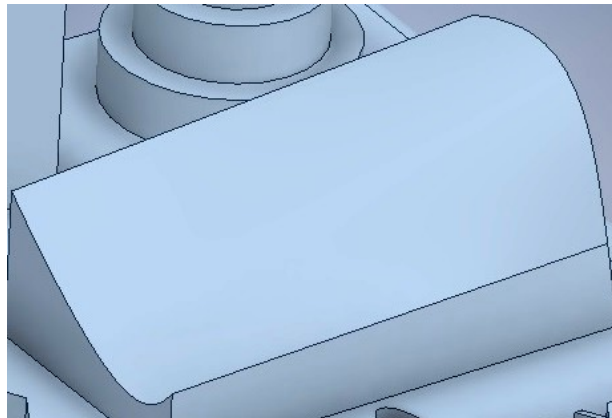
sáhla metoda tisku PJ nejhladšího povrchu na zkoumaném rádiusu ze všech posuzovaných aditivních technologií.



Obr. 90. Posuzovaný úsek č. 4 a) FDM, b) SLS, c) PJ.

Posuzovaný úsek číslo 5 - obecná plocha

Předmětem posuzovaného úseku č. 5 bylo zhotovení obecné plochy, která činí často aditivním technologiím při tisku komplikace. Úsek č. 5 je na 3D modelu zobrazen na Obr. 91.



Obr. 91. Posuzovaný úsek č. 5 na 3D modelu.

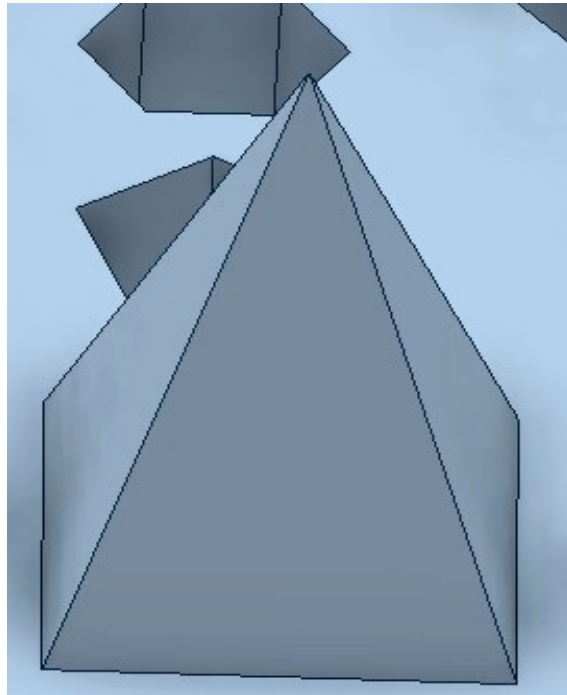
Obecná plocha vytištěná aditivní technologií FDM, viz Obr. 92 a), se vyznačuje zvětšenou hrubostí plochy a dále se na okrajových hranách plochy vyskytují malé zuby. Metoda 3D tisku SLS dle Obr. 92 b) stejně jako u metody FDM vykazuje tvoření zubů na hranách obecné plochy navíc se znatelnými ořepky. I když na Obr. 92 c) jsou rozeznatelné jednotlivé vrstvy a plocha zhotovená metodou PJ není zcela hladká, tak v porovnání s ostatními metodami 3D tisku zvládla zhotovit obecnou plochu nejlépe.



Obr. 92. Posuzovaný úsek č. 5 a) FDM, b) SLS, c) PJ.

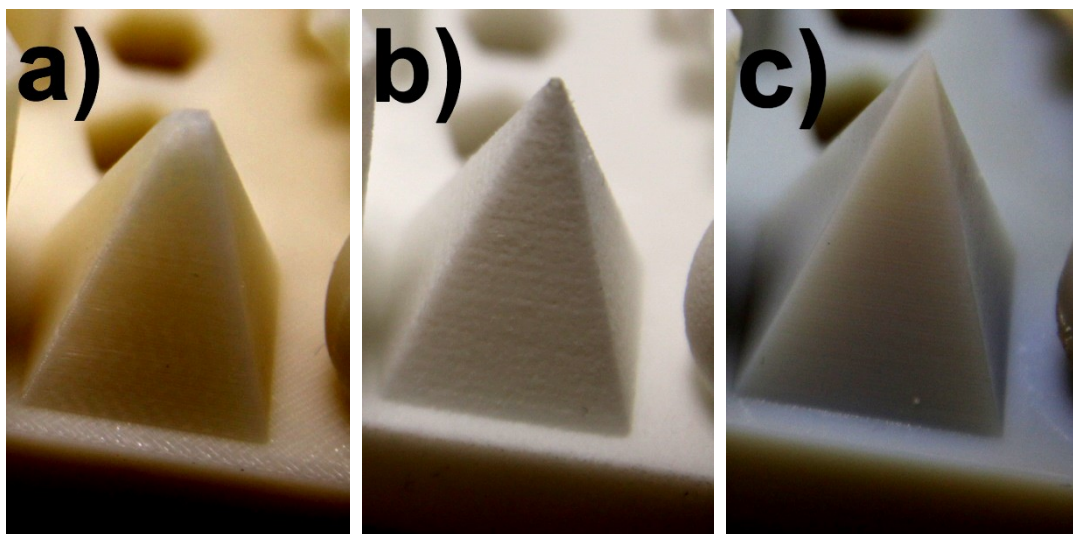
Posuzovaný úsek číslo 6 - ostré vrcholy

Předmětem porovnávání úseku č. 6 byla schopnost jednotlivých aditivních technologií vytvořit ostré vrcholy na geometrických útvarech. Pro jednotlivá porovnání byl vybrán čtyřboký jehlan. Zobrazení úseku č. 6 pro 3D model je na Obr. 93.



Obr. 93. Posuzovaný úsek č. 6 na 3D modelu.

Z Obr. 94 a) je patrné, že technologie FDM má velké problémy s tvorbou ostrých vrcholů a nebyla schopna vytvořit ostrý vrchol čtyřbokého jehlanu. Oproti metodě FDM dopadla tvorba ostrého vrcholu u metody SLS lépe, viz Obr. 94 b), avšak pořád se znatelnými nedostatky. Aditivní technologie PJ, která je zobrazena na Obr. 94 c), dokázala nejlépe zhotovit ostrý vrchol čtyřbokého jehlanu dle vstupního 3D modelu ze všech posuzovaných metod tisku.



Obr. 94. Posuzovaný úsek č. 6 a) FDM, b) SLS, c) PJ.

7 DISKUSE VÝSLEDKŮ

Diplomová práce se zabývá porovnáním mechanických a povrchových vlastností aditivních technologií FDM (materiál ABS-M30), SLS (materiál PA 2200), PJ (materiál Vero-Gray). U všech mechanických zkoušek byl počet měřených vzorků 10 pro každou metodu 3D tisku. Pro měření povrchových vlastností postačil 1 zkušební vzorek od každé aditivní technologie. Jednotlivé výsledky zkoušek byly vyhodnoceny a graficky znázorněny. Pro přehlednost byly všechny výsledky zapsány do souhrnné Tabulky 28.

V první části experimentu byla provedena zkouška tahem. Vyhodnocovanými parametry byl modul pružnosti v tahu a mez pevnosti v tahu. Nejvyšší průměrná hodnota modulu pružnosti v tahu byla naměřena u aditivní technologie PJ, viz Tab. 28. Naopak nejmenší průměrná hodnota modulu pružnosti v tahu byla zaznamenána pro metodu SLS. Nejvyšší průměrnou hodnotu pevnosti v tahu vykazovala metoda PJ a naopak nejnižší technologie FDM. Po porovnání modulu pružnosti v tahu s hodnotami materiálů, které udává výrobce, viz Tab. 6, Tab.8 a Tab. 10 nastal největší rozdíl u metody SLS, kde byla naměřena průměrná hodnota modulu pružnosti v tahu o 10 % vyšší, než udává výrobce.

Při zkoušce ohybem byl modul porovnáván v pružnosti v ohybu a byla zkoumána mez pevnosti v ohybu. Nejvyšší průměrná hodnota modulu pružnosti v ohybu byla naměřena u aditivní technologie FDM, viz Tab. 28. Nejmenší průměrnou hodnotu modulu pružnosti ohybu vykazovala metoda SLS. Nejvyšší průměrnou hodnotu pevnosti v ohybu vykazovala metoda PJ a naopak nejnižší technologie FDM. Po porovnání modulu pružnosti v ohybu s hodnotami materiálů, které udává výrobce, viz Tab. 6, Tab. 8 a Tab. 10 nastal největší rozdíl u metody SLS, kde byla naměřena průměrná hodnota modulu pružnosti v ohybu o 15 % vyšší, než udává výrobce.

Porovnávání výsledků rázové zkoušky v ohybu probíhalo pro vzorky bez vrubu a vzorky, které byly opatřeny V vrubem. Nejvyšší průměrnou hodnotu rázové houževnatosti vykazovala dle Tab. 28 technologie FDM. Nejvyšší průměrná hodnota maximální síly pro vzorky bez vrubu byla zaznamenána u metody PJ. Zhotovení V vrubu na zkušebních vzorcích způsobilo u všech technologií velký pokles maximální síly a houževnatosti. Největší pokles houževnatosti po vytvoření vrubu byl zaznamenán u metody PJ. Oproti rázové houževnatosti byla u této technologie naměřena o 88 % menší hodnota vrubové houževnatosti.

Při rázové zkoušce pádem byla vyhodnocována maximální síla a energie při průrazu vzorku. Nejvyšší hodnota maximální síly dle Tab. 28 byla naměřena pro metodu PJ s nejmenší

hodnotou energie při průrazu. Oproti tomu nejmenší hodnota maximální síly byla naměřena pro technologii FDM s největší hodnotou energie při průrazu.

Jako další zkouška v experimentální části práce byla provedena Instrumentovaná zkouška tvrdosti DSI, která probíhala pro jednotlivé aditivní technologie při aplikovaném zatížení 0,5 N, 2 N a 5 N. Pro jednotlivé druhy zatížení byly sestrojeny indentační křivky, které slouží jako základní zdroj informací z průběhu měření. Vyhodnocovanými parametry Instrumentované zkoušky tvrdosti DSI byla vtisková tvrdost, Vickersova tvrdost a vtiskové tečení. Největší průměrné hodnoty vtiskové a Vickersovy tvrdosti, viz Tab. 28, dosáhla technologie FDM při zatížení 0,5 N. Naopak nejnižší průměrné hodnoty vtiskové a Vickersovy tvrdosti byly naměřeny u metody SLS při zatížení 5 N, jak už bylo zřejmé z indentačních křivek. Při porovnání vtiskového tečení dosáhla nejvyšších průměrných hodnot technologie PJ při zatížení 2 N, což je přibližně o 5 % více, než bylo naměřeno u technologie FDM.

Při měření drsnosti rovinných ploch aditivních technologií byla porovnáována průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu Ra a největší výška profilu Rz vodorovné a svislé boční plochy vzorku vždy ve směru X a Y. Nejlepších hodnot jakosti povrchu, viz Tab. 28, dosáhla aditivní technologie PJ. Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu Ra vodorovné plochy v ose X i Y dosáhla stejné hodnoty 0,04 μm . Takto kvalitní drsnost povrchu lze srovnávat např. s klasickými velmi jemnými dokončovacími způsoby při obrábění. Nejvyšší hodnoty drsnosti povrchu byly naměřeny na svislé boční ploše ve směru Y u zkušebních těles, která byla vyrobena metodou FDM. To je způsobeno při výrobním procesu této metody nanášením jednotlivých vrstev na sebe.

Jako poslední v experimentální části bylo provedeno porovnání vizuální kvality tisku jednotlivých aditivních technologií. Porovnávání probíhalo v šesti vybraných úsecích mezi vstupním 3D modelem a danou aditivní technologií. Na vstupním modelu byly záměrně zkonstruovány různé geometrické útvary, které z hlediska kvality tisku mohou způsobovat jednotlivým aditivním metodám problémy. Porovnávaný úsek č. 1, viz. Obr. 84, byl zaměřen na kvalitu tisku písma. Technologie FMD nezvládla zhotovit některé části malého písma. Metoda SLS vykazovala spékání mezi jednotlivými znaky. Nejlépe byl úsek č. 1 zhotoven technologií PJ. Posuzovaný úsek č. 2 na Obr. 86 se věnoval schopnostem aditivních technologií tisknout kruhový a čtvercový otvor. Metody FDM i SLS vykazovaly po vytištění otvorů nedostatky, metoda PJ však nikoli. Úsek č. 3, viz Obr. 88, porovnával kvalitu 3D tisku pro 6 odstupňovaných mezer šířky 0,1 až 1 mm. Nejvíce mezer kvalitně vytiskla

technologie PJ. Posuzovaný úsek č. 4. byl zaměřen na zhotovení obecné plochy. Z porovnávaných aditivních technologií dle Obr. 90 byla obecná plocha nejlépe vyrobená technologií PJ. V porovnávaném úseku č. 5 dle Obr. 92 se posuzoval tisk zhotoveného rádiusu R 10. Rádus dokázala znovu nejlépe zhotovit aditivní technologie PJ. Poslední úsek č. 6, viz Obr. 94, byl zaměřen na tisk ostrého vrcholu na čtyřbokém jehlanu. Ukázalo se, že FDM má značné problémy při tisku malých a ostrých vrcholů. Vrchol jehlanu nejlépe znovu zhotovila aditivní technologie PJ.

Z hlediska celkového hodnocení drsnosti rovinných ploch a vizuální kvality tisku dopadla jednoznačně nejlépe aditivní technologie PolyJet. Je nutné však podotknout, že velká většina 3D tiskáren pracujících na principu této technologie disponuje malým pracovním prostorem. Pokud by bylo požadováno tisknout součást o větších rozměrech, je vhodné zvolit dle požadovaných geometrických útvarů na výrobku mezi metodou SLS a FDM.

Dle mého názoru naměřené hodnoty jednotlivých vyhodnocovaných parametrů závisí především na principu tisku jednotlivých aditivních metod, které se vzájemně liší. Dále na vlastnostech vstupního materiálu a na možnostech tloušťky kladené vrstvy každé metody 3D tisku, což se projevilo zejména na jakosti povrchu bočních ploch vzorků a na vizuálním posuzováním kvality tisku. Pokračování při řešení práce by se mohlo například zabývat podrobným zkoumáním struktury vzniklých lomů jednotlivých zkušebních těles.

Tab. 28. Souhrn naměřených průměrných hodnot mechanických a povrchových zkoušek pro posuzované aditivní technologie.

ZK.	Vyhodnocovaný parametr	Aditivní technologie		
		FDM	SLS	PJ
Zk. Tahem	Modul pružnosti v tahu E [MPa]	2274,3	1870,3	3137,9
	Mez pevnosti v tahu σ_m [MPa]	32,3	48,8	66,9
Zk. Ohybem	Modul pružnosti v ohybu E_f [MPa]	2242,2	1722,2	2176,5
	Mez pevnosti v ohybu σ_{fm} [MPa]	65,6	74,0	97,3
Ráz. zk. pádem	Maximální síla F_m [N]	1056,7	1176,8	1845,1
	Energie při průrazu E_p [J]	3,7	2,7	1,9

ZK.	Vyhodnocovaný parametr	Aditivní technologie		
		FDM	SLS	PJ
Ráz. zkouška v ohybu	Maximální síla F_m [N] (vzorky bez vrubu)	571,0	546,7	758,3
	Rázová houževnatost A_n [kJ/m ²]	19,3	17,3	18,9
	Maximální síla F_m [N] (vzorky s vrubem)	323,4	246,7	295,5
	Vrubová houževnatost A_k [kJ/m ²]	7,7	4,6	2,3
Instrumentovaná zkouška tvrdosti DSI	Vtisková tvrdost H_{IT} [MPa] při 0,5 N	188,1	135,1	184,2
	Vtisková tvrdost H_{IT} [MPa] při 2 N	183,2	141,4	160,9
	Vtisková tvrdost H_{IT} [MPa] při 5 N	162,7	106,9	162,7
	Vickersova tvrdost HV [Vickers] při 0,5 N	17,7	12,8	17,3
	Vickersova tvrdost HV [Vickers] při 2 N	17,3	13,3	15,2
	Vickersova tvrdost HV [Vickers] při 5 N	15,4	10,2	15,4
	Vtiskové tečení C_{IT} [%] při 0,5 N	8,4	8,0	13,8
	Vtiskové tečení C_{IT} [%] při 2 N	8,4	7,0	13,9
	Vtiskové tečení C_{IT} [%] při 5 N	9,4	6,7	13,3
Drsnost povrchu rovinných ploch	Ra [μ m] pro vodorovnou plochu vzorku v ose X	15,24	12,52	0,04
	Rz [μ m] pro vodorovnou plochu vzorku v ose X	93,35	74,29	0,16
	Ra [μ m] pro vodorovnou plochu vzorku v ose Y	17,85	10,91	0,04
	Rz [μ m] pro vodorovnou plochu vzorku v ose Y	126,72	59,98	0,14
	Ra [μ m] pro svislou boční plochu vzorku v ose X	11,72	5,21	1,13
	Rz [μ m] pro svislou boční plochu vzorku v ose X	67,53	25,85	4,98
	Ra [μ m] pro svislou boční plochu vzorku v ose Y	57,65	4,63	0,19
	Rz [μ m] pro svislou boční plochu vzorku v ose Y	249,40	20,31	0,96

ZÁVĚR

Hlavním cílem diplomové práce bylo porovnat mechanické a povrchové vlastnosti odlišných aditivních technologií. Pro porovnání těchto vlastností byly vybrány v současné době často využívané metody 3D tisku Fused Deposition Modeling, Selective Laser Sintering a PolyJet, z kterých byla dle příslušných norem zhotovena zkušební tělesa pro jednotlivé zkoušky. Všechny výsledky provedených experimentů byly pro lepší přehlednost shrnuty v Tabulce 28.

Z naměřených výsledků mechanický zkoušek vyplynulo, že aditivní technologie PJ dosáhla nejlepších výsledků z hlediska pevnosti v kombinaci s nízkou houževnatostí a druhou nejlepší mikrotvrdostí. Metoda 3D tisku FDM vykazovala nejnižší pevnost, nejvyšší houževnatost spolu s nejvyššími hodnotami mikrotvrdosti. U technologie SLS byly naměřeny druhé nejvyšší hodnoty pevnosti a houževnatosti, avšak nejnižší hodnoty mikrotvrdosti.

Porovnávání povrchových vlastností aditivních technologií vycházelo z výsledků drsnosti rovinných ploch a z vizuální kvality tisku. Výrazně nejlepší jakost povrchu byla naměřena u technologie PJ. Druhou nejlepší jakost povrchu vykazovala technologie SLS. Pro hodnocení vizuální kvality tisku jednotlivých aditivních technologií bylo navrženo speciální těleso s různými geometrickými prvky, na němž bylo pro porovnání vybráno 6 úseků, které dělají 3D tisku často problémy. Ve všech porovnávaných úsecích byla jako nejkvalitnější vyhodnocena metoda PJ.

Naměřené výsledky této práce mohou sloužit dle účelu budoucích vyráběných dílů jako aspekt při volbě mezi těmito posuzovanými aditivními technologiemi, samozřejmě za použití stejných vstupních materiálů.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] GEBHARDT, Andreas a Jan-Steffen HÖTTER. *Additive manufacturing: 3D printing for prototyping and manufacturing*. Munich: Hanser Publishers, 2016. ISBN 978-1-56990-582-1.
- [2] 3D PRINTING INDUSTRY. *History of 3D printing* [online]. © 2017. [Cit. 2017-02-15]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/history/>
- [3] CHUA, C.K, *Rapid Prototyping: Principles and applications*, 2nd ed. Hackensack: World Scientific, 2005, 420 s. ISBN 981-238-120-1.
- [4] Deloitte University Press. *3D opportunity for aerospace and defense* [online]. © 2014. [Cit. 2017-02-20]. Dostupné z: <https://dupress.deloitte.com/dup-us-en/focus/3d-opportunity/additive-manufacturing-3d-opportunity-in-aerospace.html>
- [5] *Speciální technologie výroby - Aditivní technologie Rapid Prototyping* [online]. [Cit. 2017-03-02]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/podklady/sto_bak/cv_STV_04_Aditivni_technologie_metody_Rapid_Prototyping.pdf
- [6] MESKÓ, B. 12 Things We Can 3D Print in Medicine Right Now. *3D Printing Industry* [online]. 26. 2. 2015. [Cit. 2017-03-02]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/12-things-we-can-3d-print-in-medicine-right-now-42867/>
- [7] SIDAMBE, A. Biocompatibility of Advanced Manufactured Titanium Implants—A Review. *MDPI* [online]. 19. 12. 2014. [Cit. 2017-03-04]. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1996-1944/7/12/8168/htm>
- [8] ŘASA, J.; KEREČANINOVÁ, Z. Nekonenční metody obrábění 10. díl: Rapid Prototyping. *MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM* [online]. 17. 12. 2008. [Cit. 2017-03-04]. Dostupný také z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonecni-metody-obrabeni-10-dil>
- [9] *Additive Manufacturing* [online]. [Cit. 2017-03-06]. Dostupné z: <https://www.cs.cmu.edu/~scoros/cs15869-s15/lectures/02-3dPrinting.pdf>
- [10] Skillitindia. *TECHNOLOGY 3D PRINTING* [online]. [Cit. 2017-03-07]. Dostupné z: <http://www.skillitindia.com/3d-printing/>
- [11] Make Part Fast. *Oil drillers use additive manufacturing to create drilling parts* [online]. © 2017. [Cit. 2017-03-09]. Dostupné z:

- <http://www.makepartsfast.com/oil-drillers-use-additive-manufacturing-to-create-drilling-parts/>
- [12] Medfab. *3D-Printing (3DP)* [online]. © 2017. [Cit. 2017-03-09]. Dostupné z: <http://medfab.de/3d-druck-verfahren/3d-printing-3dp/>
- [13] ŘASA, J.; KEREČANINOVÁ, Z. Nekonenční metody obrábění 9. díl : 9 Rapid Prototyping. *MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM* [online] 19. 11. 2008. [Cit. 2017-03-09]. Dostupný také z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonenncni-metody-obrabeni-9-dil>
- [14] *Solid Ground Curing (SGC)* [online]. [Cit. 2017-03-10]. Dostupné z: <http://lkt.mb.uni-magdeburg.de/html/sgc/eindex.html>
- [15] Stratasys. *PolyJet Technology* [online]. © 2017. [Cit. 2017-03-12]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/3d-printers/technologies/polyjet-technology>
- [16] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I. 2.*, opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, c2003. ISBN 80-7204-283-1.
- [17] ČSN EN ISO 527-1. *Plasty- Stanovení tahových vlastností*. Praha: Český normalizační institut, 1997. 15 s.
- [18] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II. 2.* opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
- [19] *Statické zkoušky krátkodobé* [online]. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, © 2012 [Cit. 2017-03-23]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_09.pdf
- [20] ČSN EN ISO 178. *Plasty – Stanovení ohybových vlastností*. Praha: Český normalizační institut, 2000. 15 s.
- [21] CONVERTER. *Zkouška tvrdosti dle Brinella* [online]. © 2002. [Cit. 2017-03-23]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/jednotky/tvrdost-brinell.htm>
- [22] *Dynamické zkoušky* [online]. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, © 2012 [cit. 2017-03-23]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_11.pdf
- [23] *Vybrané vlastnosti vrstvených ocelí* [online]. [Cit. 2017-03-24]. Dostupné z: <http://www.sharplife.eu/index.php/noze-vseobecne/doc-ing-michal-cerny-csc/24-vybrane-vlastnosti-vrstvenych-oceli>
- [24] ČSN EN ISO 179-1. *Plasty- Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy*. Praha: Český normalizační institut, 2010. 24 s.
- [25] OVSÍK, Martin. *Výzkum možností nových metod měření tvrdosti polymerů*. Zlín, 2013. 196 s. Disertační práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická.

- [26] M & B Calibr. *Měření drsnosti* [online]. [Cit. 2017-03-25]. Dostupné z: <http://www.mbcaltibr.cz/mereni-drsnosti.html>
- [27] ČSN EN ISO 4287. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu. Praha: Český normalizační institut, 1997. 24 s.
- [28] Stratasys. *Fortus 900mc* [online]. © 2017. [Cit. 2017-04-02]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/3d-printers/production-series/fortus-900mc>
- [29] Stratasys. *The production series* [online]. [Cit. 2017-04-02]. Dostupné z: http://www.objet.cz/uploads/files/stratasysproduction_pdf.pdf
- [30] BUILDPARTS. *ABS M30* [online]. © 2014. [Cit. 2017-04-02]. Dostupné z: <http://www.buildparts.com/materials/abs-m30>
- [31] 3R SYSTEMS. *EOS P 396* [online]. © 2014. [Cit. 2017-04-06]. Dostupné z: <http://www.3rsystems.cz/en/3d-print/3d-print-plastic/equipment/eos-p396>
- [32] EOS. *Plastic Materials for Additive Manufacturing* [online]. [Cit. 2017-04-06]. Dostupné z: <https://www.eos.info/material-p>
- [33] EOS. *PA 2200 performance* [online]. [Cit. 2017-04-06]. Dostupné z: <http://eos.materialdatacenter.com/eo/en>
- [34] 3D SYSTEM SUPERSTORE. *Objet Eden 250 Superior 3D Printer* [online]. © 2017. [Cit. 2017-04-08]. Dostupné z: <https://3dprintersuperstore.com.au/products/objet-eden250-superior-3d-printer>
- [35] Stratasys. *Rigid Opaque* [online]. © 2017. [Cit. 2017-04-08]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/materials/polyjet/rigid-opaque>
- [36] Stratasys. *PolyJet Materials Data Sheet* [online]. [Cit. 2017-04-08]. Dostupné z: http://global72.stratasys.com/~/_media/Main/Files/Material_Spec_Sheets/MSS_PJ_PJMaterialsDataSheet.pdf#_ga=1.192676330.1767927551.1492159159
- [37] Smtnet. *Micro Intender* [online]. © 2017. [Cit. 2017-04-10]. Dostupné z: https://www.smtnet.com/company/idex.cfm?fuseaction=view_company&company_id=53901&component=catalog&catalog_id=17481

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

3D	Three Dimensional
3DP	Three Dimensional Printing
A_k	Vrubová houževnatost
A_n	Rázová houževnatost
AM	Additive manufacturing
CAD	Computer Aided Design
C_{IT}	Vtiskové tečení
CLA	Chromatic Lenght Aberration
CT	Computer Tomography
ČSN	Česká technická norma
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
DSI	Depth Sensing Indetation
E	Modul pružnosti v tahu
E_f	Modul pružnosti v ohybu
E_p	Energie při průrazu
F	Síla
FDM	Fused Deposition Modeling
FEM	Finite Element Method
F_m	Maximální síla
H_{IT}	Vtisková tvrdost
HV	Tvrdost dle Vickerse
JP	Jetted Photopolymer
LOM	Laminated Object Manufacturing
MJM	Multi Jet Modeling
SCS	Solid Creation Systems

SGC	Solid Ground Curing
SLA	Stereolitografie
SLS	Selective Laser Sintering
STL	Standard Triangulation Language
R	Poloměr
Ra	Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu
RP	Rapid Prototyping
RT	Rapid Tooling
Rz	Největší výška profilu
Std dev	Standartní odchylka
s	Směrodatná odchylka
UTB	Univerzita Tomáše Bati
UV	Ultrafialové záření
σ	Napětí
σ_m	Mez pevnosti v tahu
σ_{fm}	Mez pevnosti v ohybu
\bar{x}	Aritmetický průměr

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Hlavní rozdělení aditivní technologie.....	12
Obr. 2. Proces aditivní výroby.....	14
Obr. 3. Trojúhelníkový prvek datového souboru ASCII.....	15
Obr. 4. Generování jednotlivých vrstev z 3D dat.....	16
Obr. 5. Freeformer.....	18
Obr. 6. 3D tištěný model srdce.....	19
Obr. 7. Rozdělení aditivních technologií.....	20
Obr. 8. Princip metody FDM.....	21
Obr. 9. Princip metody LOM.....	12
Obr. 10. Princip metody MJM.....	23
Obr. 11. Princip metody SLS.....	24
Obr. 12. Příklad součásti vyrobené metodou DMLS.....	25
Obr. 13. Princip metody 3DP.....	26
Obr. 14. Princip metody SLA.....	27
Obr. 15. Princip metody SGC.....	28
Obr. 16. Univerzální zkušební stroj.....	31
Obr. 17. Křivky charakterizující napětí deformace pro polymerní materiály.....	31
Obr. 18. Zkušební těleso pro tahovou zkoušku.....	32
Obr. 19. Princip ohybové zkoušky.....	33
Obr. 20. Přednostní zkušební těleso pro ohybovou zkoušku.....	34
Obr. 21. Princip zkoušky rázem v ohybu.....	35
Obr. 22. Příklad vzorků pro rázovou zkoušku v ohybu: a) zkušební těleso bez vrubu, b) zkušební těleso s V vrubem.....	36
Obr. 23. Indetační křivka.....	39
Obr. 24. Orientace tisku zkušebních těles.....	44

Obr. 25. 3D tiskárna Stratasys Fortus 900mc.....	45
Obr. 26. 3D tiskárna EOS P396.....	46
Obr. 27. 3D tiskárna OBJET EDEN 250.....	48
Obr. 28. 3D model tělesa pro vizuální porovnání kvality tisku.....	50
Obr. 29. Detail tělesa s neodstraněným podpůrným materiálem.....	51
Obr. 30. Tělesa pro vizuální porovnání kvality tisku.....	51
Obr. 31. Univerzální zkušební stroj Zwick 1456.....	52
Obr. 32. Závislost napětí v tahu na deformaci.....	54
Obr. 33. Průměrné hodnoty modulu pružnosti v tahu.....	54
Obr. 34. Průměrné hodnoty meze pevnosti v tahu.....	55
Obr. 35. Přípravek pro zkoušku ohybem.....	56
Obr. 36. Závislost pevnosti v ohybu na deformaci.....	57
Obr. 37. Průměrné hodnoty modulu pružnosti v ohybu.....	57
Obr. 38. Průměrné hodnoty meze pevnosti v ohybu.....	58
Obr. 39. Zkušební stroj Zwick/ Roell HIT 50P.....	59
Obr. 40. Vrubovací zařízení CEAST.....	59
Obr. 41. Závislost síly na čase při rázové zkoušce v ohybu pro vzorky bez vrubu.....	61
Obr. 42. Průměrné hodnoty maximální síly pro vzorky bez vrubu.....	61
Obr. 43. Průměrné hodnoty rázové houževnatosti pro vzorky bez vrubu.....	62
Obr. 44. Závislost síly na čase při rázové zkoušce v ohybu pro vzorky s vrubem.....	63
Obr. 45. Průměrné hodnoty maximální síly pro vzorky s vrubem.....	64
Obr. 46. Průměrné hodnoty vrubové houževnatosti pro vzorky s vrubem.....	64
Obr. 47. Zkušební stroj Zwick/ Roell HIT 230F.....	47
Obr. 48. Závislost síly na čase při rázové zkoušce pádem.....	67
Obr. 49. Průměrné hodnoty maximální síly.....	67
Obr. 50. Průměrné hodnoty energie při průrazu.....	68

Obr. 51. Zkušební přístroj Micro Combi Tester.....	69
Obr. 52. Indentační křivky pro zatížení 0,5N.....	70
Obr. 53. Indentační křivky pro zatížení 0,5 N.....	70
Obr. 54. Indentační křivky pro zatížení 2 N.....	71
Obr. 55. Indentační křivky pro zatížení 2 N.....	71
Obr. 56. Indentační křivky pro zatížení 5 N.....	72
Obr. 57. Indentační křivky pro zatížení 5 N.....	72
Obr. 58. Vtiskové a Vickersovy tvrdosti pro zatížení 0,5 N.....	73
Obr. 59. Vtiskové a Vickersovy tvrdosti pro zatížení 2 N.....	73
Obr. 60. Vtiskové a Vickersovy tvrdosti pro zatížení 5 N.....	74
Obr. 61. Vtiskové tečení pro různé zatížení.....	75
Obr. 62. 3D drsnoměr Taylor Hobson Talysurf CLI 500.....	75
Obr. 63. Měřené drsnosti povrchu vodorovné a svislé plochy vzorku.....	76
Obr. 64. Zobrazení profilů drsnosti pro vodorovnou plochu FDM v ose X.....	77
Obr. 65. Zobrazení profilů drsnosti pro vodorovnou plochu FDM v ose Y.....	77
Obr. 66. 3D pohled nasnímané vodorovné plochy metody FDM.....	78
Obr. 67. Zobrazení profilů drsnosti pro svislou plochu FDM v ose X.....	78
Obr. 68. Zobrazení profilů drsnosti pro svislou plochu FDM v ose Y.....	79
Obr. 69. 3D pohled nasnímané svislé plochy metody FDM.....	79
Obr. 70. Zobrazení profilů drsnosti pro vodorovnou plochu SLS v ose X.....	80
Obr. 71. Zobrazení profilů drsnosti pro vodorovnou plochu SLS v ose Y.....	81
Obr. 72. 3D pohled nasnímané vodorovné plochy metody SLS.....	81
Obr. 73. Zobrazení řezů drsnosti pro svislou plochu SLS v ose X.....	82
Obr. 74. Zobrazení řezů drsnosti pro svislou plochu SLS v ose Y.....	82
Obr. 75. 3D pohled nasnímané svislé plochy metody SLS.....	83
Obr. 76. Zobrazení profilů drsnosti pro vodorovnou plochu PJ v ose X.....	84

Obr. 77. Zobrazení profilů drsnosti pro vodorovnou plochu PJ v ose Y.....	84
Obr. 78. 3D pohled nasnímané vodorovné plochy metody PJ.....	85
Obr. 79. Zobrazení profilů drsnosti pro svislou plochu PJ v ose X.....	85
Obr. 80. Zobrazení profilů drsnosti pro svislou plochu PJ v ose Y.....	86
Obr. 81. 3D pohled nasnímané svislé plochy metody PJ.....	86
Obr. 82. Mikroskopová kamera DigiMicro 5.0.....	87
Obr. 83. Posuzovaný úsek č.1 na 3D modelu.....	88
Obr. 84. Posuzovaný úsek č.1 a) FDM, b) SLS, c) PJ.....	88
Obr. 85. Posuzovaný úsek č.2 na 3D modelu.....	89
Obr. 86. Posuzovaný úsek č.2 a) FDM, b) SLS, c) PJ.....	89
Obr. 87. Posuzovaný úsek č.3 na 3D modelu.....	89
Obr. 88. Posuzovaný úsek č.3 a) FDM, b) SLS, c) PJ.....	90
Obr. 89. Posuzovaný úsek č.4 na 3D modelu.....	90
Obr. 90. Posuzovaný úsek č.4 a) FDM, b) SLS, c) PJ.....	91
Obr. 91. Posuzovaný úsek č.5 na 3D modelu.....	91
Obr. 92. Posuzovaný úsek č.5 a) FDM, b) SLS, c) PJ.....	92
Obr. 93. Posuzovaný úsek č.6 na 3D modelu.....	92
Obr. 94. Posuzovaný úsek č.6 a) FDM, b) SLS, c) PJ.....	93

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Porovnání výhod a nevýhod jednotlivých výrobních metod.....	29
Tab. 2. Rozměry zkušebních vzorků dle normy.....	32
Tab. 3. Poměr tloušťky a šířky ostatních zkušebních vzorků.....	34
Tab. 4. Rozměry zkušebních těles dle normy.....	35
Tab. 5. Technické parametry 3D tiskárny Stratasys Fortus 900mc.....	45
Tab. 6. Vlastnosti materiálu ABS-M30.....	46
Tab. 7. Technické parametry 3D tiskárny EOS P396.....	47
Tab. 8. Vlastnosti materiálu PA 2200.....	48
Tab. 9. Technické parametry 3D tiskárny OBJET EDEN 250.....	49
Tab. 10. Vlastnosti materiálu VeroGray.....	49
Tab. 11. Modul Pružnosti a mez pevnosti v tahu.....	53
Tab. 12. Modul pružnosti a mez pevnosti v ohybu.....	56
Tab. 13. Výsledky maximální síly a rázové houževnatosti pro tělesa bez vrubu.....	60
Tab. 14. Výsledky maximální síly a vrubové houževnatosti pro tělesa s vrubem.....	62
Tab. 15. Výsledky maximální síly a energie při průrazu.....	66
Tab. 16. Hodnoty drsnosti profilu Rz a Ra vodorovné plochy v ose X pro aditivní technologie FDM.....	76
Tab. 17. Hodnoty drsnosti profilu Rz a Ra vodorovné plochy v ose Y pro aditivní technologie FDM.....	77
Tab. 18. Hodnoty drsnosti profilu Rz a Ra svislé plochy v ose X pro aditivní technologie FDM.....	78
Tab. 19. Hodnoty drsnosti profilu Rz a Ra svislé plochy v ose Y pro aditivní technologie FDM.....	79
Tab. 20. Hodnoty drsnosti profilu Rz a Ra vodorovné plochy v ose X pro aditivní technologie SLS.....	80

Tab. 21. Hodnoty drsnosti profilu Rz a Ra vodorovné plochy v ose Y pro aditivní technologii SLS.....	80
Tab. 22. Hodnoty drsnosti profilu Rz a Ra svislé plochy v ose X pro aditivní technologii SLS.....	81
Tab. 23. Hodnoty drsnosti profilu Rz a Ra svislé plochy v ose Y pro aditivní technologii SLS.....	82
Tab. 24. Hodnoty drsnosti profilu Rz a Ra vodorovné plochy v ose X pro aditivní technologii PJ.....	83
Tab. 25. Hodnoty drsnosti profilu Rz a Ra vodorovné plochy v ose Y pro aditivní technologii PJ.....	84
Tab. 26. Hodnoty drsnosti profilu Rz a Ra svislé plochy v ose X pro aditivní technologii PJ.....	85
Tab. 27. Hodnoty drsnosti profilu Rz a Ra svislé plochy v ose Y pro aditivní technologii PJ.....	86
Tab. 28. Souhrn naměřených průměrných hodnot mechanických a povrchových zkoušek pro posuzované aditivní technologie.....	94

SEZNAM PŘÍLOH