

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

TECHNOLOGIE 3D TISKU

3D PRINTING TECHNOLOGY

AUTOR: Ondřej Vích

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Zdeňka Jeníková, Ph.D.

PRAHA 2018

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vích** Jméno: **Ondřej** Osobní číslo: **411156**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Technologie 3D tisku

Název bakalářské práce anglicky:

3D printing technology

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je sestavit přehled technologií 3D tisků.

Postup:

1. Pomocí jedné zvolené technologie vyrobit vzorky pro testování.
2. Použít různé nastavení parametrů pro tisk tělísek.
3. Provést vybrané zkoušky pro charakterizaci vlastností vzorků při různých podmínkách tisku.
4. Zpracovat výsledky testů a porovnat je s ohledem na nastavené parametry tisku.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Meisner, B., Zilvar, V.: Fyzika polymerů - Struktura a vlastnosti polymerních materiálů, Praha 1987, SNTL
- [2] Gunter, E.: Design with Plastics, Carl Hansen Verlag, Munich 2006
- [3] Osswald, Tim A.: International Plastics Handbook : The resource for Plastics Engineers, Hanser Publishers, Munich, 2006
- [4] Firemní literatura

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Zdeňka Jeníková, Ph.D., ústav materiálového inženýrství FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **03.04.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **30.07.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: _____



Ing. Zdeňka Jeníková, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce



prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

30.4.2018

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně pouze s použitím literatury a pramenů uvedených v seznamu citované literatury.

V Praze dne.....

Podpis autora.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval především vedoucí mé bakalářské práce paní Ing. Zdeňce Jeníkové, Ph.D. za ochotu, věcné připomínky a cenné rady při vypracovávání této práce, a také společnosti Prusa Research s.r.o. za umožnění přístupu k 3D tiskárnám a odborné rady při tisku zkušebních vzorků.

Abstrakt

Bakalářská práce nabízí přehled nejpoužívanějších technologií 3D tisku a zabývá se hodnocením vlivu nastavení různých parametrů při tisku metodou FDM na mechanické vlastnosti výrobku z materiálu PET-G. Zvolené měněné parametry byly vnitřní výplň, hustota vnitřní výplně a teplota tisku. Zjišťovala se pevnost a rázová houževnatost testovacích tělísek a dále u daných vzorků byla zkoumána kvalita vnitřní struktury pomocí světelného mikroskopu při změně nastavených teplot na trysce.

Klíčová Slova

3D tisk, Fused Deposition Modeling (FDM), materiál PET-G, struktura PET-G, pevnost PET-G, rázová houževnatost, snímky mikroskopu

Abstract

Bachelor thesis offers an overview of the most common 3D printing technologies and involve the evaluation of the settings-influence of various parameters in the FDM printing method on the mechanical properties of the PET-G material. The selected change parameters were fill pattern, fill density and printing temperature. The strength and impact strength of the samples were tested and in selected samples the quality of the inner structure was examined by light microscope when changing the set temperatures on the nozzle.

Keywords

3D printing, Fused Deposition Modeling (FDM), PET-G material, structure PET-G, PET-G strength, impact strength, microscope images

Obsah

Seznam použitých symbolů.....	8
Úvod.....	10
Teoretická část:	11
1. Historie 3D tisku.....	11
2. Metody 3D tisku.....	12
2.1. Stereolitografie (SLA)	13
2.2. Selective Laser Sintering (SLS).....	14
2.3. Selective Laser Melting (SLM) a Direct Metal Laser Sintering (DMLS).....	15
2.4. Material Jetting (MJ)	16
2.5. Binder Jetting (BJ).....	17
2.6. Fused Deposition Modeling (FDM)	19
3. Vlastnosti termoplastu.....	21
4. Používané materiály.....	23
4.1.1. Kyselina polyléčná (PLA)	23
4.1.2. Akrylonitril Butadien Styren (ABS)	23
4.1.3. Polykarbonát (PC).....	24
4.1.4. Polyvinyl alkohol (PVA).....	24
4.1.5. Polyethylentereftalát glykol (PET-G).....	25
4.2. Shrnutí vlastností tiskových materiálů.....	25
Praktická část:	26
5. Zkušební vzorky.....	27
5.1.1. Materiál.....	27
5.1.2. Rozměry	27
5.1.3. Vnitřní struktura.....	28
5.1.4. Hustota výplně a povrch	29
5.1.5. Teplota	29
5.2. Shrnutí parametrů vzorků	30
6. Tahová zkouška	31
6.1.1. Vzorky G20	33
6.1.2. Vzorky G50	34
6.1.3. Vzorky G90	36
6.1.4. Vzorky H50	37

6.1.5.	Vzorky R50.....	38
6.1.6.	Vzorky R100.....	40
6.2.	Shrnutí hodnot tahové zkoušky	41
7.	Zkouška rázem v ohybu.....	42
8.	Světelný mikroskop.....	45
9.	Vyhodnocení	48
10.	Závěr.....	50
	Seznam použité literatury	52
	Seznam obrázků a grafů.....	54
	Seznam tabulek.....	55
	Přílohy	56

Seznam použitých symbolů

ABS		Akrylonitril butadien styren
a_c	[kJ/m ²]	Rázová houževnatost
b	[mm]	Šířka
b₁	[mm]	Šířka zúžené části
b₂	[mm]	Šířka konců
BJ		Binder Jetting
DLS		Direct Laser Sintering
DMLS		Direct Metal Laser Sintering
E	[MPa]	Modul pružnosti
E_c	[J]	Spotřebovaná kinetická energie k přeražení tělesa
F	[N]	Síla
FDM		Fused Deposition Modeling
FFF		Fused Filament Fabrication
F_m	[N]	První maximální síla
G		Mřížka
G-kód		Formát souboru
H		Hexagonální
h	[mm]	Výška
L	[mm]	Počáteční délka mezi čelistmi
L₀	[mm]	Počáteční měrná délka
l₁	[mm]	Délka zúžené části
l₂	[mm]	Vzdálenost rozšířených částí
l₃	[mm]	Celková délka
MJ		Material Jetting

PC		Polykarbonát
PET		Polyethylentereftalát
PET-G		Polyethylentereftalát-glykol
PLA		Kyselina polyléčná
PVA		Polyvinyl alkohol
R		Přímočarý
r	[mm]	Poloměr
S₀	[mm ²]	Plocha průřezu
SLA		Stereolitografie
SLM		Selective Laser Melting
SLS		Selective Laser Sintering
STL		Standart Triangulation Language
T_f	[°C]	Teplota viskózního toku
T_g	[°C]	Teplota skelného přechodu
T_m	[°C]	Teplota tání
UV záření		Ultrafialové světlo
ΔL_b	[mm]	Změna prodloužení
ε	[-]	Relativní prodloužení
ε_{tb}	[-]	Jmenovité poměrné prodloužení
σ	[MPa]	Napětí
σ_m	[MPa]	Mez pevnosti

Úvod

Zájem o aditivní technologii, jak se 3D tisku také říká, neustále roste. 3D tisk se běžně užívá jak v domácím prostředí, kdy uživatelé mají své stolní tiskárny, tak i v širokém spektru průmyslového odvětví například ve strojírenském, zdravotnickém, obalovém nebo leteckém průmyslu. S neustálým vývojem a inovacemi v oblasti 3D tisku dochází ke zlevňování některých metod, a tím dochází k nárůstu možností použití, a zároveň i okruhu uživatelů této technologie.

Způsob výroby konvenčními metodami, kdy se materiál většinou odebírá k dosažení požadovaného výrobku, je v případě 3D tisku opačný. K dosažení konečného tvaru (trojrozměrného objektu) z polotovaru se materiál přidává. Samotný tisk probíhá tak, že se nanáší jednotlivé vrstvy na sebe podle rozměrů a geometrie výrobku. Jakým způsobem se tyto vrstvy na sebe nanáší je zpracováno v teoretické části této práce, což byl jeden z cílů práce. K dispozici je široký výběr materiálů (kov, keramika, plasty...), avšak jeho výběr je mimo jiné závislý na typu použité technologie. V této práci jsou popsány nejčastěji používané polymerní materiály vhodné k tisku metodou Fused Deposition Modeling (FDM), která je zvolena pro praktickou část práce.

Praktická část se zabývá výrobou testovacích tělísek, které jsou rozdělené do skupin lišících se od sebe liší vybranými parametry, kterými jsou teplota tisku, hustota a typ vnitřní výplně. Skupiny vzorků jsou dále podrobeny příslušným zkouškám. Naměřené hodnoty z daných zkoušek jsou přehledně zpracovány, porovnány a komentovány. Jedním z posledních bodů práce je pozorování vnitřní struktury na vybraných vzorcích pomocí světelného mikroskopu, které jsou poté vyhodnoceny.

Teoretická část:

1. Historie 3D tisku

Počátky 3D tisku se datují přes tři desítky let. Charles Hull v roce 1984 vynalezl první z metod 3D tisku - stereolitografii. Charles Hull pozoruje fotopolymery inkoustových tiskáren a všimá si specifických fyzikálních vlastností, které mají za následek tuhnutí materiálu při kontaktu s UV zářením. Roku 1986 Charles Hull oficiálně získává patent, a tak se zrodila první metoda 3D tisku, nazývaná stereolitografie, známá též pod zkratkou SLA nebo SL. Hull téhož roku zakládá společnost 3D Systems, což je jedna ze společností zabývajících se 3D technologií a fungující dodnes. [1,3]

Další krok přišel v roce 1988, kdy 3D Systems představuje veřejnosti první verzi 3D tiskárny s označením SLA 250 (obr.1). Zároveň se objevují další metody 3D technologie. V automobilovém a leteckém průmyslu se 3D tisk objevuje v roce 1992. V těchto oborech se využívá při vývoji a výrobě nových komponentů. Z počátku jde o zkušební provoz, přesto společností tato technologie nabízí nové příležitosti v jejich rozvoji. Zároveň společnost 3D Systems uvedla na trh první komerčně dostupnou 3D tiskárnu s využitím SLA technologie. Roku 1999 byla vytvořena část lidského orgánu, která byla potažena vlastními buňkami pacienta. Tento krok znamenal výrazný pokrok 3D tisku v medicínském oboru. O pár let později, konkrétně v roce 2002, byla vytištěna první funkční ledvina, která byla následně úspěšně transplantována zvířeti. [1]



Obr. 1: První verze tiskárny SLA 250 [27]

Pravděpodobně největší milník přišel v roce 2005. Doktor Adrian Bowyer, který působil na univerzitě v Bath, přišel s projektem „RepRap“. Cílem projektu bylo navrhnout 3D tiskárnu schopnou tisknout z velké míry součástky na sebe samou, tedy se replikovat. Celý projekt byl navíc „Open Source“, což znamenalo, že se do vývoje a inovování mohlo zapojit velké množství nadšenců z celého světa. RepRap tím snižuje

náklady na výrobu a otevírají se brány 3D tisku domácím uživatelům. Už v roce 2008 vyšla první verze tiskárny Darwin, která byla schopna tisknout většinu vlastních dílů. Je tedy možné tisknout díly pro své známé, a tak se rychle stávají nejrozšířenějším druhem tiskáren na celém světě. [1,2]

V oblasti protetiky byla vytištěna komplexní protéza nohy, která byla složena z několika částí. Organova společnost, v roce 2009, tiskla pomocí 3D biotiskárny organické cévy, které byly transplantovány pacientovi. MakerBot Open Source je společnost vyrábějící balíčky, ve kterých uživatelé našli vše, co potřebovali k sestavení své 3D tiskárny. Roku 2010 3D tisk velkoformátových objektů zvládala služba RedEye on Demand zajištěná společností Stratasys, která také stejného roku představila prototyp automobilu Urbee. Celá karoserie automobilu Urbee byla vytištěna na 3D tiskárně. [1]

Každým rokem se zrychloval pokrok, a tak v roce 2011 několik univerzit představilo své projekty. Cornell univerzita začala s vývojem 3D tiskárny na výrobu jídla. Univerzity v Brunelu a Exeteru vyráběly 3D tiskárnu na čokoládu a univerzita v Southamptonu vytiskla první bezpilotní letoun. Další pokrok v medicínské sféře přišel v roce 2012, kdy lékaři z Nizozemska úspěšně implantovali spodní čelist, kterou si nechali vytisknout od společnosti LayerWise. [1,3]

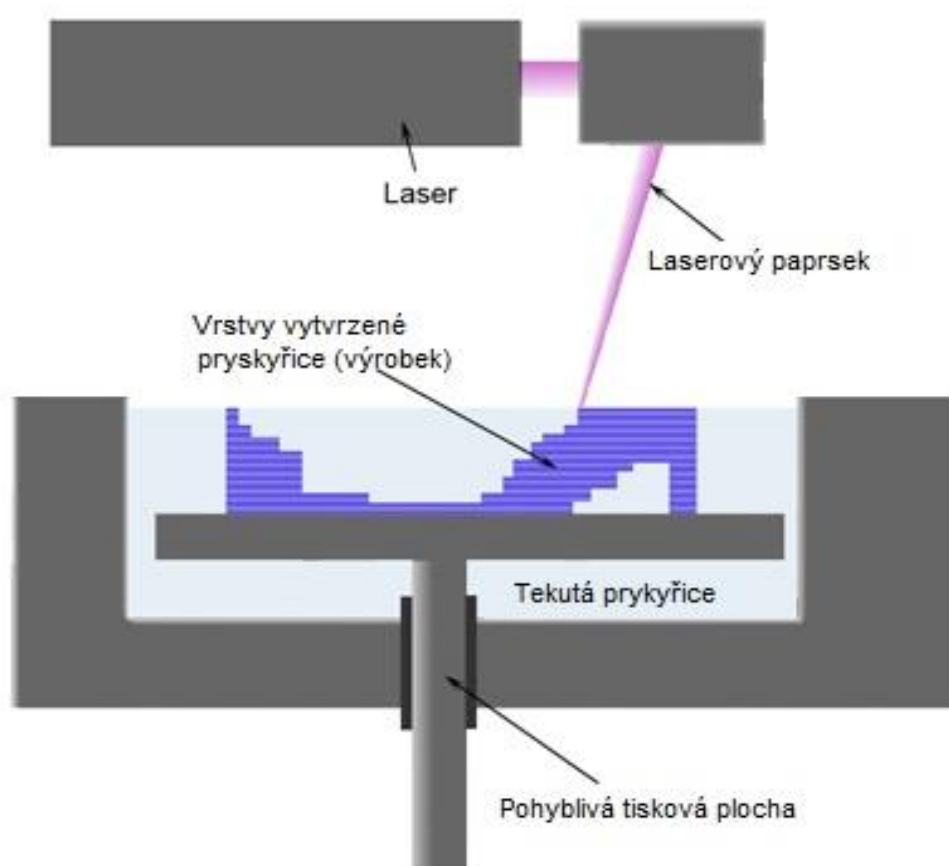
Vývoj 3D tisku je rychlý a každým dnem jsou objeveny nové materiály, které je možné při tisku použít. Nově vyvinuté 3D tiskárny jsou přesnější, rychlejší a zvládají tisk nových materiálů (tisk kostí, tisk z betonu...) [3]

2. Metody 3D tisku

Vývoj aditivní výroby, jak se 3D tisku říká, se posouvá každým dnem a tak není divu, že již existuje mnoho metod a používaných materiálů. Využití nacházíme v mnoha oborech od vzdělávání, zdravotnictví, až po automobilový a letecký průmysl. Různými způsoby je můžeme členit do kategorií například podle konzistence vstupujícího materiálu (tuhý, práškový nebo kapalný) nebo podle způsobu, jakým se vytváří nové vrstvy (chemická reakce či tavení). Popis nejrozšířenějších metod aditivní výroby je uveden níže.

2.1. Stereolitografie (SLA)

Tato metoda je nejstarší z celé škály metod používaných v 3D tisku. Základem technologie je nádoba s pohyblivou deskou po ose Z. Nádoba je naplněna fotocitlivou pryskyřicí. Nad tiskařskou deskou se pohybuje v osově rovině X a Y cílený UV laserový paprsek, pracující podle dat získaných z 3D programu. Principem je ozáření fotocitlivé pryskyřice, která se v důsledku chemické reakce začne vytvrzovat. Proces vytvrzení je nevratný a není možné vytvrzenou pryskyřici teplem změnit opět do tekutého stavu. Po dokončení dané vrstvy se platforma (tisková plocha) posune po ose Z níže, právě o výšku



Obr. 2: Princip metody SLA [23]

vrstvy a pokračuje tisk další vrstvy, dokud není výrobek dokončen. Princip metody SLA je zobrazen na obrázku 2. [5]

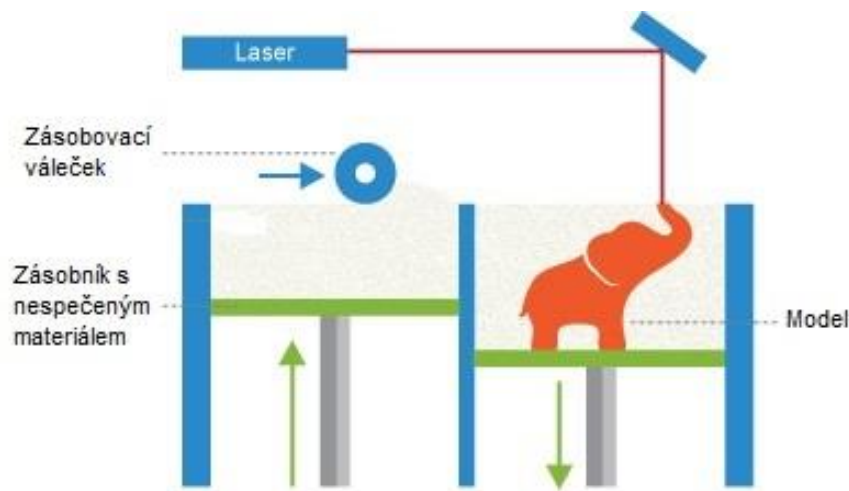
Některé součástky, které jsou tisknuty, potřebují z důvodů své speciální konstrukce pomocné podpěry. Tyto podpěry zabrání nechtěné deformaci při tisku součástky. Po dokončení tisku jsou manuálně odstraněny a výrobek je nutné umístit do přístroje, který pryskyřici vytvrdí do konečné fáze, čímž dojde ke změně mechanických vlastností. [5]

Stereolitografie je jedna z nejpřesnějších metod s uspokojivou povrchovou úpravou. Výška vrstvy se pohybuje v rozmezí od 25 až 100 mikronů. Čím nižší je výška vrstvy, tím lépe dojde k zobrazení případných rádiusů, drážek a výstupků, prodlouží se ale času tisku, který zvýší cenu a pravděpodobnost chyby tisku. Velice podobnou metodou je DLP – Digital Light Processing. Hlavní odlišnost je ve zdroji záření, což může být klasická oblouková lampa s prvky optické soustavy. [4,5]

2.2. Selective Laser Sintering (SLS)

Selective Laser Sintering se překládá jako selektivní spékání laserem ale pojem „sintrování“ se v praxi objevuje častěji. Vstupní surovinou je práškový materiál nejčastěji plastové částice (prášek). [6]

Materiál je přiváděn ze zásobníku pomocí válečku, který nanese vrstvu prášku na plochu tisku. Tato vrstva je předehřata na teplotu blížíci se bodu tání. Poté je vrstva postupně ozářena a dochází ke spečení. Proces spečení vyžaduje mnoho energie, kterou dodává vysoce výkonný laser. Po dokončení osvětlení dané plochy, která má být spečena, klesne tisková plocha o výšku vrstvy a dojde k nanesení práškového materiálu na předchozí vrstvu. Proces se opakuje do ukončení tisku, kdy je celý výrobek hotov. Princip metody SLS je zobrazen na obr. 3. [6]



Obr. 3: Princip metody SLS [24]

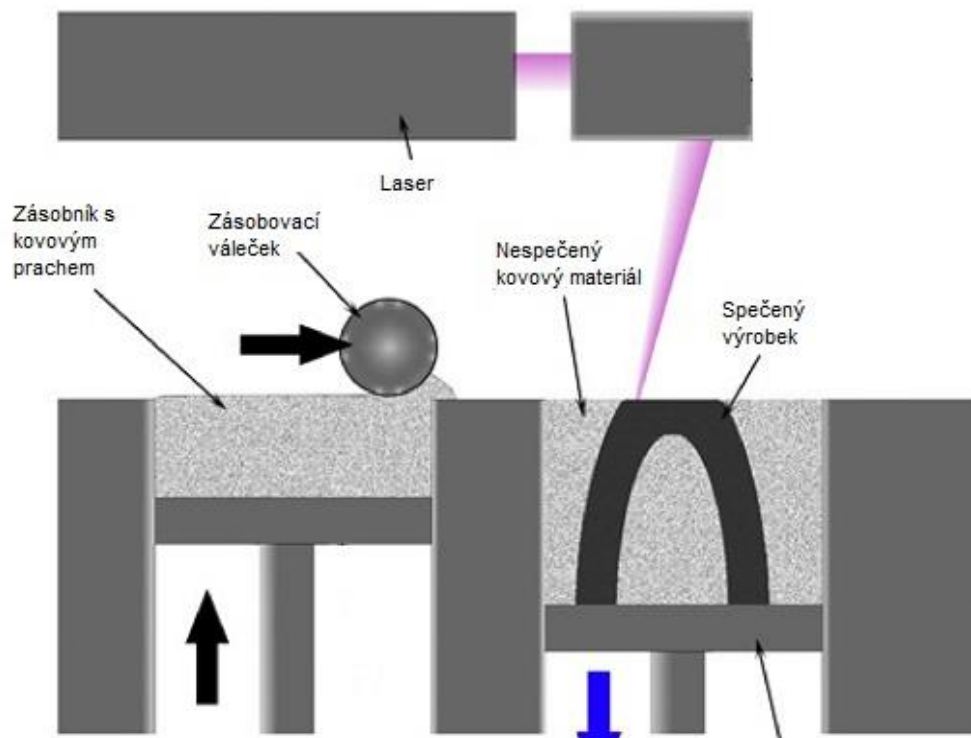
Před vydáním vytisknutého výrobku je nutné nechat daný výrobek zchladnout na běžnou teplotu. Při použití této metody není potřeba používat žádné dočasné podpěry, protože laser působí pouze v daném místě a oporu výrobku dodává přebytečný prášek okolo výrobku, který není spečen. Výrobky vytvořené touto metodou dosahují lepších

mechanických vlastností, ale jejich povrch a přesnost není tak dobrá jako u předchozí popsané metody SLA. [6]

2.3. Selective Laser Melting (SLM) a Direct Metal Laser Sintering (DMLS)

SLM a DMLS metody mají mnoho společného. Obě používají laser vysokého výkonu k natavení a spečení částecek práškového materiálu, které se spojí a vytvoří tak vrstvu po vrstvě. Vstupním materiálem je práškový materiál kovového charakteru. Jedním z rozdílů mezi metodami SLM a DMLS je patent, ale hlavním rozdílem je, že metoda SLM je určena k tavení a tisku z jednoho kovu, zatímco metoda DMLS je určena k tisku ze slitin kovů, tedy z více materiálů. Princip tisku obou metod je stejný (viz. obr. 4). [7]

Vše začíná v uzavřené komoře, kde probíhá tisk. Do této komory je přiváděn inertní plyn (např. argon), aby minimalizoval proces oxidace během tisku. Po naplnění se celá komora zahřeje na optimální teplotu vhodnou k tisku. Dále váleček přivede kovové částice na plochu tisku, kde vysoce výkonný laser nataví a speče předem určenou plochu, a tím vytvoří první vrstvu hotového výrobku. Po dokončení vrstvy se plocha tisku sníží



Obr. 4: Princip metody SLS & DMLS [25]

o výšku vrstvy a váleček opět přivádí kovové částičky na plochu tisku. Proces se opakuje, dokud není tisk dokončen. [7]

Při těchto metodách je využíváno podpor, přestože jsou obklopeny kovovými částicemi. Podpory jsou tisknuty ze stejného materiálu, jako materiál tisknutého modelu. Jejich úkolem je zmírnit vliv deformací, které by mohly nastat v důsledku vysokých teplot tisku. Při tisku je dosahováno až 1600 °C. Z důvodu vysokých teplot je také nutné počkat, dokud tisknutý výrobek nevychladne. Následně je možné odstranit zbylé kovové částice, výrobek dále tepelně zpracovat a odstranit vytisknuté podpory. [7]

Přesnost těchto dvou metod se pohybuje v řádech desetin milimetru. Výška vrstvy se pohybuje mezi 20 až 50 mikrony a může být ovlivněna velikostí a tvarem kovových částic. Běžná velikost tisku je 250 x 150 x 150 mm, ale dostupná je i větší varianta až 500 x 280 x 360 mm. Po tisku jsou netknuté kovové částice přesety a opět použity v zásobníku pro další tisk, a tak je odpad minimální (méně než 5%). [7]

2.4. Material Jetting (MJ)

MJ je metoda pracující na podobném principu jako 2D domácí tiskárny. Tisková hlava, která je podobná běžné inkoustové tiskárně, dávkuje kapičky fotocitlivého materiálu. Dávkované kapky, které jsou pod UV světlem hned vytvrzovány, tvoří strukturu jednotlivých vrstev. Materiálem používaným v metodě MJ jsou reaktoplasty citlivé na UV záření v tekuté podobě. [8]

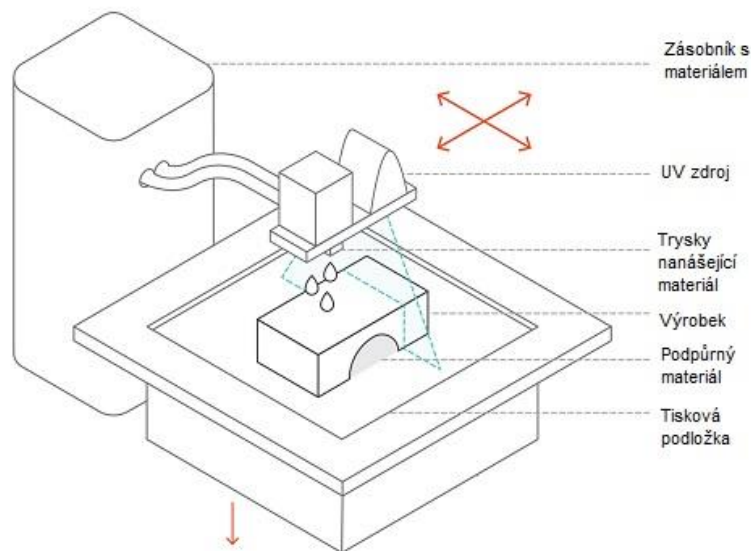
Nejprve se tekutý materiál zahřeje na 30-60 °C abychom dosáhli optimální hodnoty viskozity kapaliny. Hlava tiskárny, obsahující mnoho malých trysek, se pohybuje po osách X a Y nad plochou tisku. Z trysek je na určitá místa dávkována kapalina, která je následně vytvrzována UV zdrojem, jenž je součástí tiskové hlavy. Tímto způsobem je vytisknuta první vrstva. Následně plocha tisku sjede o výšku vrstvy níž, aby se mohla tisknout další vrstva. Opakujícím se procesem se tisk dokončí. Schéma této metody si můžeme prohlédnout na obr. 5. [8]

Oproti jiným metodám MJ umožňuje tisknout z vícero materiálů či více barev zároveň. Tato možnost je dána umístěním více trysek na hlavu tiskárny, a tak je hojně využívána. Schopnost tisknout z více materiálů se hlavně využívá při tisku podpor, které jsou vždy vyžadovány a musí být po dokončení tisku odstraněny. Udávaná přesnost je cca 0,1 % z rozměrů výtisku, proto MJ patří k nejpřesnějším metodám. S vytvrzovacím procesem

je spojena i metoda SLA, popisována v bodě 2.1., s tím rozdílem, že MJ není potřeba dodatečně vytvrzovat k dosažení optimálních vlastností, protože se tiskne nižší vrstva, která se pohybuje mezi 16 a 32 mikrony. [8]

Díky nízké teplotě tisku, oproti ostatním metodám, není metoda MJ tolik náchylná na odlepení od podložky či kroucení vlivem teplotní roztažnosti materiálu výtisku. Díky tomu je možné tisknout velké výrobky s vysokou přesností. Obvyklé rozměry tisku mohou být přibližně 380 x 250 x 200 mm, zatímco u velkých průmyslových tiskáren mohou být až 1000 x 800 x 500 mm. [8]

Nevýhodou MJ je používání fotocitlivých materiálů, u kterých dochází postupem času k degradaci mechanických vlastností. Hotové výrobky nejsou vhodné na funkční součásti, které jsou hodně namáhány, jelikož nemají tak dobré mechanické vlastnosti jako u jiných metod. [8]



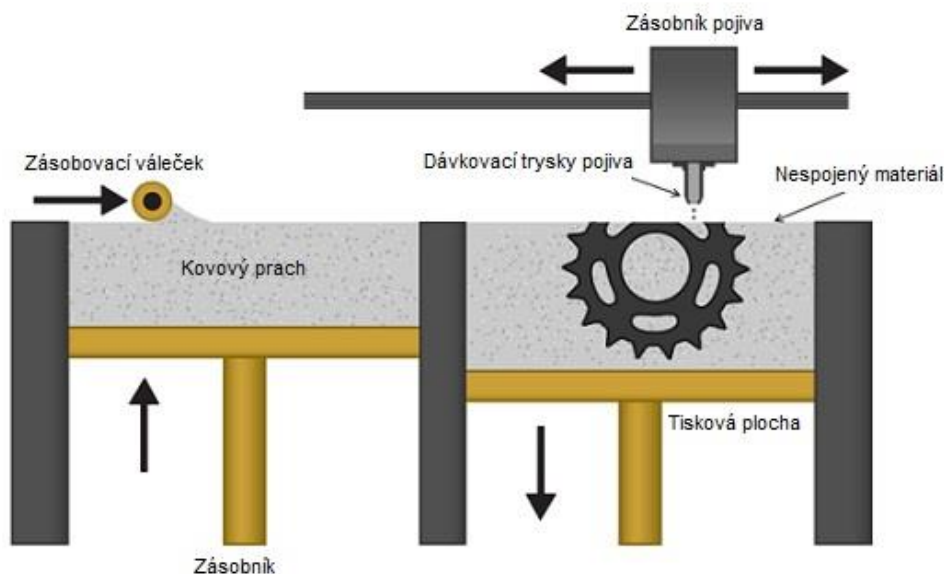
Obr. 5: Princip metody Material Jetting [8]

2.5. Binder Jetting (BJ)

Další z metod aditivní výroby je Binder Jetting. Základem je pojivo, které je dodáváno z trysek na daná místa. Typickými používanými materiály jsou kovy, písek a keramika, které jsou ve formě jemných částic (prášku). Průběh této metody (viz. obr. 6) je kombinací SLS a MJ. [9]

Nejprve dojde k nanesení částic materiálu na plochu tisku. Následně hlava tiskárny s mnoha malými tryskami, které jsou podobné jako v domácích tiskárnách, přejede nad plochou tisku a z trysek se na daná místa uvolní pojivé činidlo („lepidlo“), které spojí částičky materiálu dohromady. V případě barevného tisku se během tohoto kroku uvolní

barva. Po dokončení vrstvy, plocha tisku opět klesne o výšku vrstvy a znovu se nanáší materiál, z kterého se tiskne. Tyto kroky neustále cyklují, dokud tisk není kompletní. [9]



Obr. 6: Princip metody Binder Jetting [26]

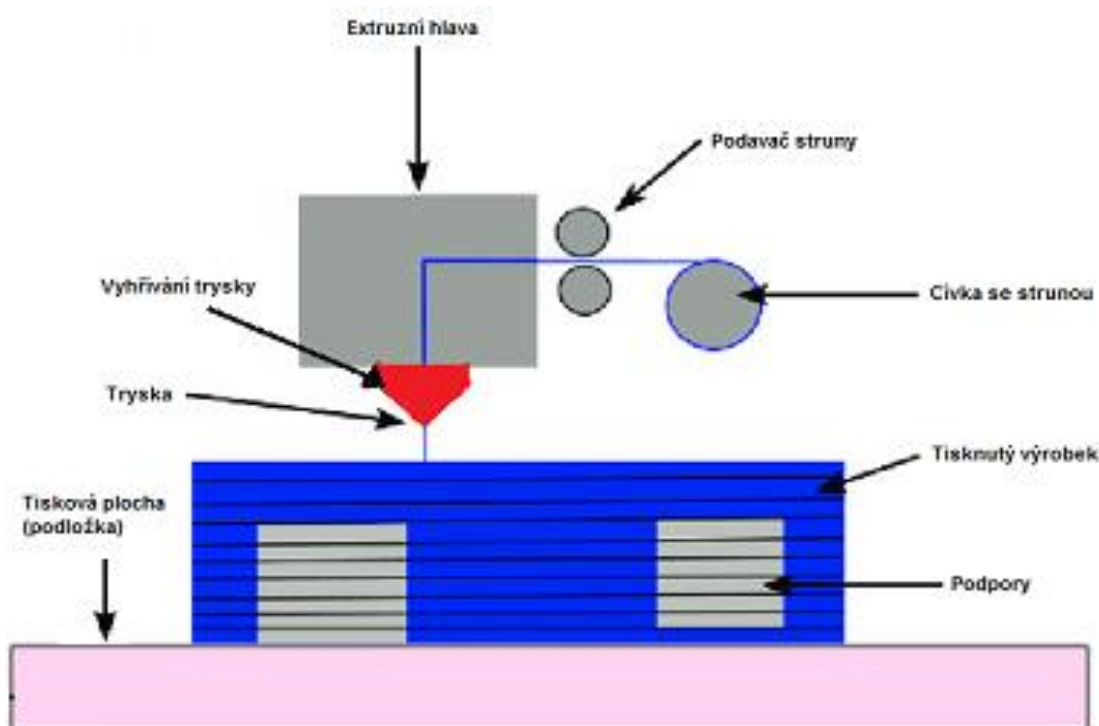
Po dokončení tisku je výrobek obklopen nespojeným materiálem a pojivo se nechá nějakou dobu vytvrzovat, aby zesílilo. Posledním krokem je vyjmutí součásti z nádoby a očištění (například stlačeným vzduchem) od nečistot ulpěných na výrobku. Součástky vyndané z formy jsou „syrové“ - jsou křehké a mají vysokou pórovitost. Proto je většinou nutné provést další krok zpracování (záleží na druhu použitého materiálu, z kterého se tiskne). Například kovové součásti je vhodné tepelně upravit, barevné výrobky jsou upraveny tak, že dojde ke zvýšení živosti barev. Pouze pískové formy jsou většinou připraveny k přímému použití. [9]

Klíčovou výhodou metody Binder Jetting je možnost tisku při pokojové teplotě. Nedochází tak k žádným rozměrovým změnám vlivem tepla. Velikost tiskáren patří k největším mezi technologiemi 3D tisku. Záleží i na materiálu, který je používán při tisku. Největší tiskárny, používány na pískové formy, dosahují rozměrů až 2200 x 1200 x 600 mm. V případě kovových částic jako tisknutého materiálu je možné na strojích, velkých až 800 x 500 x 400 mm, tisknout více součástí najedou. V Binder Jetting ani v kovovém provedení není potřeba podpěr oproti SLS nebo DMLS, které se bez podpěr neobejdou. [9]

2.6. Fused Deposition Modeling (FDM)

Fused Deposition Modeling (FDM), registrovaná značka firmy Stratasys, nebo také označována jako Fused Filament Fabrication (FFF) je metoda založená na extruzi materiálu. Jedná se o nejrozšířenější metodu aditivní výroby na světě a je často první, na kterou si lidé vzpomenou, když slyší o 3D tisku. [10]

Nejprve je materiál ve formě vlákna (struny) o průměru 1,75 až 3 mm přiveden do tiskové hlavy (též označována jako extruzní hlava), kde dojde k natavení a protlačování skrze trysku daného průměru. Extruzní hlava projíždí nad plochou tisku a tryska klade tenké prameny na podložku. Natavený materiál na podložce opět tuhne. Po dokončení vrstvy se začne tisknout další vrstva. Přiváděný materiál se roztaví, dále se protlačuje tryskou a tlačí proti předchozí vrstvě. Tlak a vysoká teplota nataví povrch předchozí vrstvy a umožní lepší spojení nové vrstvy s předchozí. Tyto kroky pokračují stále dokola, dokud nevznikne hotový výrobek. Schéma metody FDM/ FFF je zobrazeno na obr. 7 [10]



Obr. 7: Schéma metody FDM / FFF [28]

K více barevnému tisku je potřeba extruzní hlava s více tryskami, do kterých bude přiváděn materiál rozdílné barvy. Většina počítačových programů umožňuje nastavit několik parametrů tisku jako například teplotu trysky a podložky, rychlost tisku nebo třeba výšku vrstvy. Průmyslové stroje dosahují rozměrů tisku až 1000 x 1000 x 1000 mm, zatímco domácí (stolní) tiskárny obvykle mají prostor tisku o rozměrech

200 x 200 x 200 mm. Výška vrstvy se pohybuje mezi 0,05 – 0,4 mm. Nejčastější tisk má výšku nastavenou kolem 0,2 mm. Použití velmi nízké výšky vrstvy prodlužuje dobu tisku a zároveň se tisk prodražuje, na druhou stranu je výtisk přesnější a s více detaily. [10]

Nejpoužívanějším prvkem v této metodě je polymerní materiál, přesněji řečeno termoplast. Více informací o jednotlivých používaných termoplastových materiálech je rozepsáno v kapitole 4. [10]

Nejrozšířenějším problémem je změna tvarů a rozměrů výrobku vlivem teplotní roztažnosti. Některá místa výrobku chladnou rychleji, některá pomaleji. Rozdílnou rychlostí chladnutí dochází i k rozdílné rychlosti změn rozměrů (smršťování). Při tomto procesu ve struktuře vzniká napětí, které se projeví odlepením (vlivem kroucení) okrajů nebo celého výrobku od podložky. [10]

Tomuto jevu můžeme předejít zajištěním rovnoměrného chladnutí výrobku (vyhříváním komorou nebo podložkou během tisku). Další možností je vhodná volba materiálu a geometrie výrobku. Z důvodu zachování požadované geometrie výrobku je vyžadován tisk podpůrné struktury pod převisy. Z estetického hlediska při tisku podpor je dobré počítat s tím, že kvalita povrchu podpěr bude horší ve srovnání se zbytkem výrobku, a proto dbáme na to, aby podpory nebyly příliš viditelné. Vhodně navržená konstrukce minimalizuje nutnost podpor. Většinou je podpora tištěna ze stejného materiálu jako výrobek. Podporu lze i manuálně odstranit po dokončení tisku. [10]

Existuje možnost tisku z více trysek, které jsou přiděleny na extruzní hlavě. V takovém případě jedna tryska tiskne základní materiál a druhá tiskne podpory z materiálu, který lze následně rozpustit ve speciální kapalině. Tato varianta tisku je však dražší, jelikož potřebujeme extruzní hlavu, na které je možné mít víc trysek, dále potřebujeme cívky druhého materiálu a rozpouštěcí kapalinu. [10]

Výhodou této metody je široké spektrum použitelných materiálů a široká základna tiskařů této technologie. Nevýhodou je velmi malá přesnost hotových výrobků dokonce nejmenší z uvedených metod aditivní výroby. Vytisknuté výrobky mají viditelné jednotlivé vrstvy a pro docílení hladkého povrchu je nutná dodatečná úprava. [10]

Za účelem úspory času a materiálu nejsou ve většině případů výrobky vytisknuté touto metodou „plné“. Výrobek obsahuje takzvanou skořápku, kdy plášť tělesa tvoří pár vrstev plného materiálu. Vnitřní prostor je tvořen námi zvolenou strukturou a určitou procentuální hodnotou z plného objemu tělesa. Nejčastěji využívaný tisk probíhá s 20%

výplní. Vnitřní struktura, výplň a počet vrstev na plášti výrazně ovlivňují pevnost materiálu. Tato metoda byla zvolena pro experimentální část této práce, proto jaký vliv má struktura a výplň na pevnost materiálu je možné nalézt v praktické části této práce. [10]

3. Vlastnosti termoplastu

Polymer

Základem polymeru je řetězec opakujících se makromolekul, které jsou tvořeny sloučenými jednoduchými chemickými jednotkami, nazývanými se mery. Polymery můžeme dále rozdělit na plasty a elastomery. Plast je směs polymerů a aditivních složek jako například barvivo, změkčovadla, stabilizátory atd. Plasty můžeme dělit na reaktoplasty a termoplasty. Nás budou zajímat především termoplasty. [11]

Termoplast

Termoplast je polymer tvořený rozvětvenými nebo lineárními makromolekulami. Pokud tyto makromolekuly tvoří pravidelnou strukturu, mluvíme o struktuře semi-krytalické. Zatímco neuspořádaná se nazývá amorfni struktura. Semi-krytalické neboli částečně krytalické struktury jsou tvořeny kombinací amorfni a krytalické fáze. [12]

Makromolekuly jsou mezi sebou drženy pomocí fyzikálních vazebních sil (např. Van der Waalsovými silami a vodíkovými vazbami). Tyto vazebné síly mohou být překonány, pokud dodáme dostatek tepelné energie. To znamená, že tyto polymerní materiály převedeme do viskózního stavu. Krytalická struktura se změní na amorfni. Tento proces se využívá při zpracování termoplastů, kdy dojde k roztavení a následného tvarování do polotovaru nebo přímo do hotového výrobku. [12]

Přímo této vlastnosti termoplastu se využívá při tisku technologií FDM, kdy je struna tavena v extruzní hlavě a nanášena na podložku, kde opět tuhne. Termoplasty patří k nejlevnějším materiálům používaných v 3D tisku. [12]

Vlastnosti termoplastů ovlivňující tisk metodou FDM

Při výběru termoplastu pro tisk existuje mnoho faktorů, které ovlivňují samotný tisk a zároveň určují vlastnosti hotového výrobku. Vlastnosti, které ovlivňují samotný průběh tisku, jsou například teplota skelného přechodu (T_g), koeficient tepelné roztažnosti,

teplota viskózního toku (T_f), kterou mají amorfnní termoplasty a teplota tání (T_m), kterou mají semi-krystalické termoplasty. [17]

Teplota tání nebo teplota viskózního toku určují teplotu, které musí tryska dosáhnout, aby bylo možné tisknout z daného materiálu. Teplota skelného přechodu plastů je teplota, kdy přechází ze stavu skelného do kaučkovitého, na které plast není roztavený, ale je měkký a tvárný. Při takové teplotě je pro polymerní řetězce jednodušší pohyb a výsledkem je velká změna vlastností materiálu. Nad teplotou T_g je materiál tvárný a pružný, pod teplotou T_g se naopak chová jako sklo, je tuhý a křehký. Teplota skelného přechodu spolu s koeficientem teplotní roztažnosti ovlivňují, jak velká deformace vznikne vlivem rozdílných teplot během tisku, což může přispět k horší přilnavosti k podložce. Rovněž pevnost, houževnatost a odolnost vůči rozpouštědlům jsou důležité vlastnosti, ale ty jsou ovlivněny složením a mikrostrukturou polymerů. T_m , případně T_f a T_g určují, jak snadno se polymerní řetězce mohou navzájem po sobě pohybovat na molekulární úrovni. [17]

V řetězci polymeru se opakují hlavní (páteřní) skupiny makromolekul a větve (vedlejší) skupiny makromolekul. Velké větve připojené na hlavní řetězec usnadňují zamotání polymerního řetězce, a to vede k omezení pohybu polymerního řetězce, což se projeví zvýšením teplot T_g a T_m nebo T_f . Růstem těchto teplot se polymer stává pevnějším, tužším ale křehčím. Benzenové jádro, které je součástí hlavního řetězce, zvyšuje pevnost, tuhost, teplotu T_g a hořlavost, ale snižují odolnost proti UV záření. [17]

Polarita vazeb má vliv především na absorpci vody (vzdušné vlhkosti) a odolnost vůči rozpouštědlům. Polarita vazeb vzniká rozdílnou elektronegativitou mezimolekulárních vazeb. S vyšším počtem polárních vazeb v řetězci polymeru je pravděpodobnější, že polymer je náchylnější na vlhko, tedy že absorbuje vodu. Vlhkost materiálu nepříznivě ovlivňuje mechanické vlastnosti výrobku. Výrobek je měkkčí nebo náchylnější k degradaci. Vlhčí polymer má menší elektroizolační vlastnosti. Polymer s vyšším počtem polárních vazeb je lépe rozpustný v polárních rozpouštědlech. Této vlastnosti se využívá při tisku, kdy se tiskne výrobek s většími převisy nebo složitější geometrií, vyžadující tisk podpěr. Tyto podpěry jsou po dokončení tisku odstraněny (rozpuštěny). [17]

4. Používané materiály

Vzestup aditivní výroby je značný, proto i základna používaných materiálů se rozšiřuje. Každý materiál má svoje silné a slabé stránky a je limitován využitím. Proto je důležité se v rozrůstající se základně materiálů orientovat. Popsat veškeré nebo alespoň většinu používaných materiálů v 3D technologii není v rozsahu této práce, proto v této práci zmíním nejpoužívanější termoplasty pro stolní tiskárny technologie FDM, jenž byla využita v praktické části. Pryskyřice, kovové, keramické, kompozitní a další materiály nebudou v této práci rozepisovány.

4.1.1. Kyselina polyléčná (PLA)

Zkratka PLA vychází z anglického polylactic acid, překládáno do češtiny jako kyselina polyléčná. Biologicky odbouratelný materiál, který se v přírodě přirozeně nevyskytuje. Jde o derivát z obnovitelného zdroje jako je kukuřičný škrob nebo cukrová třtina. To řadí PLA k nejšetrnějšímu materiálu k životnímu prostředí v oblasti aditivní výroby. Ostatní termoplasty jsou výrobkem petrochemického průmyslu. [13,14]

Využití nachází v oblasti medicíny, kde se používá jako nit na šití nebo chirurgické implantáty (například šrouby, pruty nebo síťka), které se časem vstřebají. Další využití je v obalovém průmyslu (jednorázové nádoby, kelímky od jogurtů atd.).[14]

Mezi výhody tisku z PLA patří dobrá přesnost, pevnost a je jednoduchý na tisk, není nutná vyhřívaná podložka. Není náchylný na kroucení výrobků. Hlavní nevýhodou je malá tepelná odolnost (kolem 60 °C materiál měkne), křehkost a degraduje vlivem slunečního záření. Dalším problémem je vzdušná vlhkost, která ovlivňuje podmínky a kvalitu tisku. PLA materiál připravený k tisku je vhodné skladovat v uzavřených nádobách. Teplota trysky při tisku se doporučuje 160-220 °C. [14]

4.1.2. Akrylonitril Butadien Styren (ABS)

ABS je používán ve velké škále aplikací v průmyslu. Jedná se třeba o automobilový nebo hračkářský průmysl. Nejznámějším výrobkem jsou slavné Lego kostky, které jsou právě vyráběné z ABS. Patří k nejpoužívanějším materiálům spolu s PLA v 3D tisku. [14]

Obecně je to materiál velmi pevný, odolný a poměrně tepelně odolný, jelikož začíná měknout až kolem 100 °C. Teplota tisku se pohybuje v rozmezí 210 až 250 °C. Při tisku z ABS je nezbytná vyhřívaná podložka (kolem 110 °C), která zmírní nebo zabrání

případnému kroucení, ke kterému je ABS velmi náchylné. ABS je produktem ropného průmyslu, takže není přírodně odbouratelný, lze ho pouze recyklovat. Při zahřátí na teploty tisku uvolňuje výpary, které mohou dráždit dýchací cesty obsluhy. Z tohoto důvodu se doporučuje tisk z tohoto materiálu pouze v dobře větraných prostorech nebo v prostorech s odsáváním. ABS dlouhodobě vystavený slunečnímu záření, může ztrácet barvu a křehnout. [14]

4.1.3. Polykarbonát (PC)

Polykarbonát je čirý vysoce pevný materiál předurčen pro náročné prostředí a technické aplikace. Má vysoce dobrou odolnost vůči teplu a proti rázům. Měkne až při 150 °C. Snese ohybové zatížení, proto je často využíván v takových případech, kde je potřeba flexibilita (PC desky na skleníky, zastřešení pergol, ochranné brýle atd.). Jeho teplota tisku je okolo 300 °C. Tuto teplotu běžné stolní tiskárny nejsou schopné zajistit. Řešení se nachází v přídatných složkách do samotného polykarbonátu, které snižují teplotu tisku. Další způsob je snížit chlazení větráčkem na extruzní hlavě. Tisk z PC je obtížný, protože se tiskne za vysokých teplot a je náchylný na kroucení během tisku. Je nutná vyhřívaná komora nebo podložka na teploty přesahující 100 °C. Další nevýhodou je extrémní hygroskopičnost, tedy vysoká absorpce vzdušné vlhkosti, která se projeví při tisku. PC je nutné skladovat ve vzduchotěsných obalech. [15]

4.1.4. Polyvinyl alkohol (PVA)

PVA je speciální plast, který je rozpustný ve vodě. Využití nachází třeba v rybolovu, kde se pytle, obsahující návnady, nahází do vody. Pytle se rychle rozpustí a krmivo naláká ryby. Další využití je tisk podpor, pod výrobky složitých tvarů obsahující mnoho převisů. Používá se při dvojici trysek na extruzní hlavě, kdy jedna z trysek tiskne hlavní (nosný) materiál a druhá z trysek tiskne podpůrný materiál. [14]

Hotový výrobek se poté vloží do vody a PVA materiál se rozpustí a zbyde pouze hlavní výrobek. Teplota tisku se pohybuje okolo 190 °C. PVA má velkou navlhavost. Měl by se skladovat ve vzduchotěsné nádobě, nejlépe s odstraňovači vlhkosti. Před tiskem je vhodné PVA ještě vysušit. Používání PVA při tisku je poměrně nákladné. [14]

4.1.5. Polyethylentereftalát glykol (PET-G)

Ačkoli PLA a ABS patří stále k nepoužívanějším materiálům v 3D tisku. Hledají se různé alternativy s lepšími vlastnostmi, které by převzaly popularitu těchto dvou materiálů. Polyethylentereftalát glykol (PET-G) získává na oblibě kvůli své odolnosti, rezistenci proti vlhkosti a různým chemikáliím. PET-G vychází z polyethylentereftalát (PET). Široce používaný plast ve světě, který nás obklopuje každý den. Nalezneme ho ve formě lahví na pití, potravinářských obalech nebo jako textilní vlákna. Samotný PET má dobré mechanické vlastnosti. [16]

Přidáním Glykolu vznikne PET-G, který je díky glykolu odolnější vůči teple, houževnatější a jednodušší na použití. Při 3D tisku je méně náchylný na deformace a kroucení. PET-G přebírá dobré vlastnosti z obou dříve zmíněných materiálů (PLA a ABS). Teplota trysky se pohybuje kolem 240 °C a podložky kolem 90 °C. [16]

PET-G je plně recyklovatelný, případné podpěry a nepovedené výtisky mohou být rozebrány a opět zpracovány do formy vlákna. [16]

4.2. Shrnutí vlastností tiskových materiálů

Přehled teplot použitelných při tisku z daného materiálu (tab. 1.) je spíše orientační, jelikož se mohou lišit s každým výrobcem materiálu.

Tab. 1: Teploty tiskových materiálů [14,15,16,17]

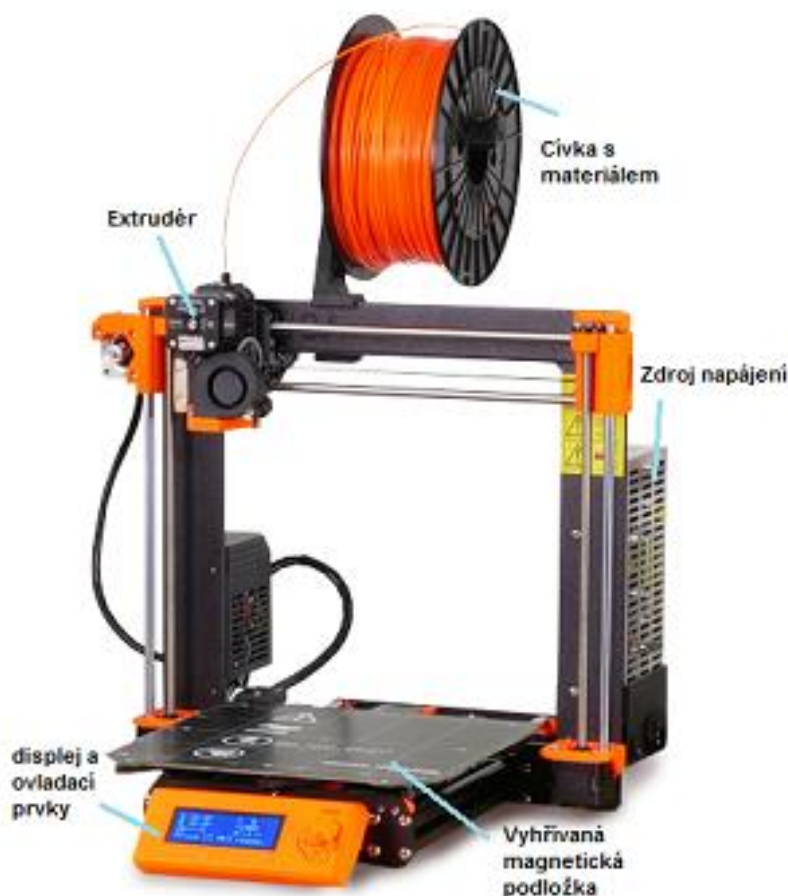
Materiál	Teplota trysky [°C]	Teplota podložky [°C]	T _g [°C]
PLA	160-220	-	60-65
ABS	210-250	80-110	105-110
PET-G	220-260	70-90	90
PVA	190-210	-	40
PC	260-310	80-120	145-150

Praktická část:

Cílem praktické části této práce je zhodnotit mechanické vlastnosti termoplastového materiálu PET-G, který byl tištěn metodou FDM na 3D tiskárně Original Prusa i3 MK3 (obr. 8).

Bude hodnocen vliv tisku odlišné struktury vzorků při stejné hustotě výplně na mechanické vlastnosti zkušebních vzorků, prověřené tahovou a rázovou zkouškou. Bude vyhodnocen vliv tisku stejné vnitřní struktury výplně s různou hustotou na mechanické vlastnosti zkušebních vzorků. Posledním bodem bude pomocí světelného mikroskopu pozorování struktury vzorků vytisknutých při různé teplotě nastavené na trysce.

Celkem bylo vytisknuto 122 vzorků, rozdělených do 6 sad po 20 kusech odlišné struktury a rozdílné hustoty výplně a dvou vzorků, tištěných při odlišné teplotě. Všechny zkušební vzorky byly tištěny během několika dní na třech až šesti tiskárnách Original Prusa i3 MK3. Přístup k těmto tiskárnám byl poskytnut společností Prusa Research s.r.o.



Obr. 8: 3D tiskárna Original Prusa i3 MK3 [29]

5. Zkušební vzorky

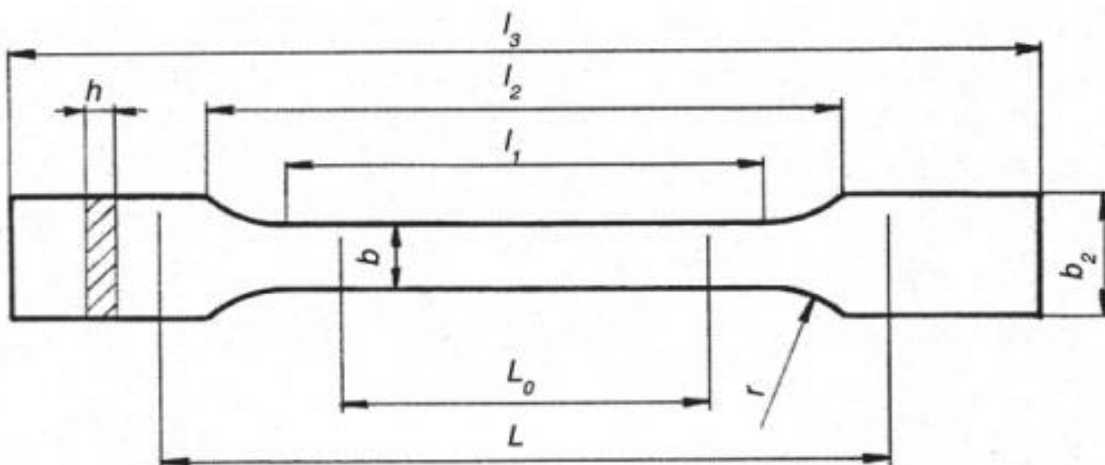
Model výrobku (vzorek pro zkoušku tahem) byl vytvořen v 3D CAD softwaru, který byl následně převeden na formát STL. Formát STL byl otevřen v programu Slic3r Prusa Edition, který vytvoří potřebná data pro tiskárny Prusa Research, tedy i Original Prusa i3 MK3. Program má podle typu tiskárny, druhu tisknutého materiálu a výšky vrstvy přednastavené parametry tisku. Přednastavené parametry se mohou dále upravit podle konkrétních požadavků. Poté byl vygenerován G-kód, který nese potřebné informace, podle kterých tiskárna tiskne. Následně byl G-kód na přenosném mediu (paměťová karta) vložen do tiskárny.

5.1.1. Materiál

Materiálem zvoleným pro tisk zkušebních tělísek byl zvolen PET-G pro jeho dobré vlastnosti popsané v bodě 4.5. Také se tento materiál stává stále oblíbenějším v 3D tisku. Barva zvolené PET-G struny byla transparentní (čirá) a průměr struny byl 1,75 mm.

5.1.2. Rozměry

Pro 3D tisk v současné době není norma, která by určovala jak mají zkušební vzorky vyrobené touto metodou vypadat pro tahovou zkoušku. Z tohoto důvodu byla pro zkušební vzorky použita norma ČSN EN ISO 527-1. Tvar zkušebního vzorku lze vidět na obr. 9.



Obr. 9: Tvar zkušebního vzorku [20]

Rozměry zkušebního tělesa odpovídají typu 1B dle [21] jsou uvedené v tab. 2.

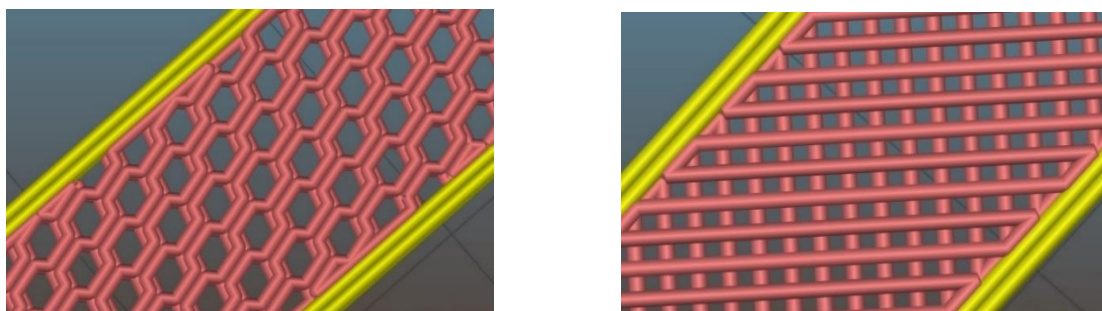
Tab. 2: Rozměry zkušebního vzorku

l_3 [mm]	Celková délka	150
l_1 [mm]	Délka zúžené části	60
l_2 [mm]	Vzdálenost rozšířených částí	108
r [mm]	Poloměr	60
b_2 [mm]	Šířka konců	20
b_1 [mm]	Šířka zúžené části	10
h [mm]	Tloušťka	4
L_0 [mm]	Počáteční měrná délka	50
L [mm]	Počáteční vzdálenost mezi čelistmi	115

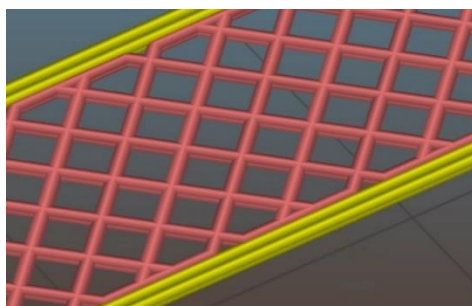
5.1.3. Vnitřní struktura

Vnitřní struktura (výplň) pomáhá držet tvar hotového výrobku a zabraňuje teplotní deformaci během tisku. Druh vnitřní struktury má také vliv na mechanické vlastnosti hotového výrobku.

Zkušební vzorky pro tuto práci byly tisknuty s vnitřní strukturou typu mřížka (G - grid), hexagonální (H - honeycomb) a přímočarý (R - rectilinear). U všech zkušebních vzorků je orientace tisknutých vrstev vůči sobě $45^\circ/-45^\circ$, střídající se každou vrstvou. Použité vnitřní struktury u zkušebních vzorků jsou zobrazeny na obr.10 a 11.



Obr. 10: Hexagonální struktura (vlevo) a Přímocará struktura (vpravo)

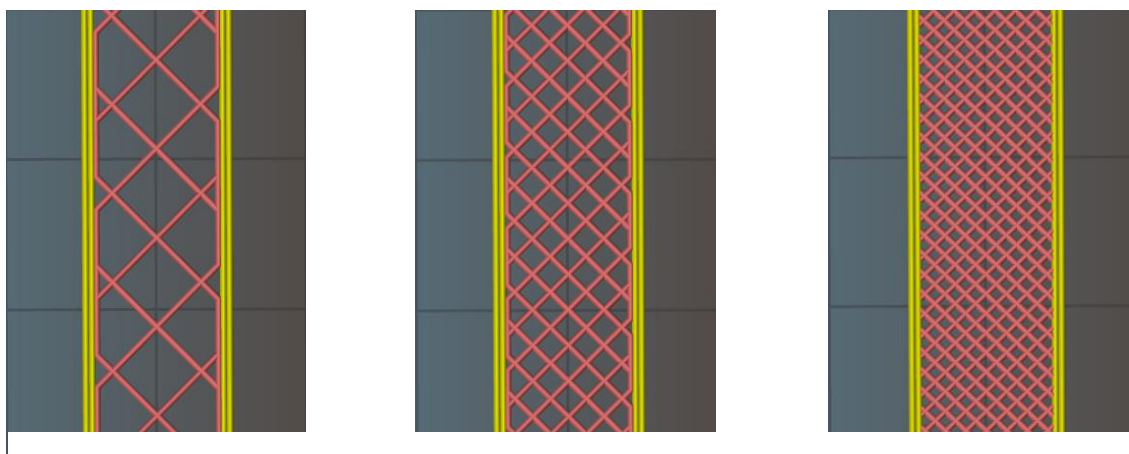


Obr. 11: Mřížková struktura

5.1.4. Hustota výplně a povrch

Kromě typu výplně hraje velkou roli množství výplně. Běžně používaná hodnota při tisku je 20% výplně. Tím je zajištěna alespoň částečná pevnost výrobku, a přesto je znatelná úspora použitého materiálu oproti konvenční metodě vstřikování plastů. Výhodou je také úspora času na tisk výrobku, který se snižuje s klesající hustotou výplně. Pouze dno a vrchní plocha výrobku může být vytištěna 100 % výplní. Maximální procento vyplnění objemu je 90 %. Výjimku tvoří struktura přímočará (Rectilinear), která může být jako jediná tištěna se 100 % výplní.

Další parametr, který může být nastaven ve Slic3ru (software) je síla stěn, spodní a vrchní strany výrobku. Pro účely této práce bylo nastaveno, aby jedna ze šesti sad vzorků byla tisknuta s 20 %, tři sady a 2 vzorky s 50 %, jedna sada s 90 % a jedna sada se 100 % výplně. Aby se více projevil vliv hustoty výplně na mechanických vlastnostech vzorků, byl nastaven počet vrstev, tvořící stěny na hodnotu 2 a 3 vrstvy na dně a vrchu vzorků. Ukázka rozdílné procentuální výplně tělesa je k dispozici na obr. 12.



Obr. 12: Hustota výplně: vlevo (20%), uprostřed (50%), vpravo (90%)

5.1.5. Teplota

Důležitým parametrem je teplota na trysce, která musí odpovídat zpracovatelské teplotě daného materiálu. Při nedostatečné teplotě se vlákno při tisku narušuje. Při výstupu z trysky se může kroutit a ulpívat okolo trysky, kde se po čase vytvoří hrudka. Vrstvení na podložku je tak nerovnoměrné a tisk výrobku je neúspěšný.

Teplota podložky se odvíjí od používaného materiálu. Při tisku materiálů, které vyžadují vyhřívanou podložku, způsobuje její nedostatečná teplota kroucení a odlepení výrobku od podložky. Tisknout materiály jako polykarbonát (PC) nebo

akrylonitril butadien styren (ABS) je bez vyhřívání podložky téměř nemožné. Oproti tomu například výrobky z kyseliny polylactonové (PLA) lze tisknout i bez vyhřívání podložky.

Pro tisk zkušebních vzorků byl použit materiál PET-G. Teplota trysky při tisku všech vzorků byla nastavena na 260 °C dle doporučení. Pro porovnání kvality tisku při nevhodně nastavené teplotě byly vytištěny 2 vzorky, kdy jeden z nich byl vytištěn s teplotou trysky nastavenou na teplotu 250 °C a druhý na 240 °C. Teplota podložky ve všech případech byla nastavena na 90 °C.

5.2. Shrnutí parametrů vzorků

Celkový přehled tištěných vzorků s nastavenými parametry pro tisk jako byly teplota trysky a podložky, druh a hustota výplně a orientace vrstev při jejich výrobě jsou zobrazeny v tab. 3. Výchozím materiálem pro všechny tištěné vzorky byl PET-G.

Tab. 3: Celkový přehled tištěných vzorků

Označení sady / vzorků	Množství [kus]	Druh struktury [-]	Hustota výplně [%]	Teplota trysky [°C]	Teplota podložky [°C]	Orientace vrstev [°]
Sada 1 (G20)	20	Mřížka	20	260	90	45/-45
Sada 2 (G50)	20	Mřížka	50	260	90	45/-45
Sada 3 (G90)	20	Mřížka	90	260	90	45/-45
Sada 4 (H50)	20	Hexagonální	50	260	90	45/-45
Sada 5 (R50)	20	Přímočará	50	260	90	45/-45
Sada 6 (R100)	20	Přímočará	100	260	90	45/-45
RT250	1	Přímočará	50	250	90	45/-45
RT240	1	Přímočará	50	240	90	45/-45

Značení sad bude v dalších částech práce následující:

Sada 1 ... G20

Sada 3 ... G90

Sada 5 ... R50

Sada 2 ... G50

Sada 4 ... H50

Sada 6 ... R100

Značení vychází z druhu vnitřní struktury G – grid - mřížka, H - honeycomb - hexagonální, R – rectilinear – přímočará. Číslice udává procentuální výplň dané struktury.

Průměrný čas tisku jednoho vzorku a spotřeba materiálu na jeden vzorek je uveden v tab. 4. Tyto údaje byly vypočteny programem a není ověřena správnost, slouží pouze jako orientační údaj.

Tab. 4: Orientační čas a spotřeba materiálu

	G20	G50	G90	H50	R50	R100	RT250	RT240
Prům. čas tisku 1 vzorku [min]	28	34	42	67	33	42	33	32
Spotřeba materiálu na kus [mm]	1895	2535	3291	2628	2499	3439	2499	2499

6. Tahová zkouška

Základní materiálové charakteristiky jsme schopni získat z dat získaných z tahové zkoušky. Zkušební těleso je vloženo mezi čelisti trhacího stroje a je zatíženo tahovým jednoosým namáháním. Průběh zkoušky je zaznamenáván do grafu, kde na svislé ose (y) je zapisována zatěžující síla (resp. napětí) a na vodorovné ose (x) se zaznamenává prodloužení (resp. deformace). Vzorec pro výpočet technického napětí (σ) zobrazuje rovnice (1). Relativní prodloužení (ε) můžeme vypočítat podle rovnice (2). [18]

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} * 100 \quad [\%] \quad (2)$$

F	... působící síla	[N]
S ₀	... původní průřez	[mm ²]
Δ L ₀	... změna původní délky	[mm]
L ₀	... původní měrná délka	[mm] [18]

Pomocí vybraných hodnot získaných z průběhu grafu, můžeme vypočítat další charakteristiky jako například mez pevnosti (σ_m) nebo modul pružnosti (E).

Mez pevnosti je první maximální síla vztažená na počáteční průřez a vypočteme ji dle rovnice (3). Modul pružnosti (E) určíme z lineární části deformační křivky. V této oblasti je deformace přímo úměrná napětí materiálu což vyjadřuje Hookův zákon (rovnice 4).[18]

$$\sigma_m = \frac{F_m}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (3)$$

$$\sigma = E * \varepsilon \Rightarrow E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad [\text{MPa}] \quad (4)$$

Z každé sady vyrobených vzorků bylo odebráno vždy 5 zkušebních těles. Tahová zkouška byla provedena na stroji Walter + Bai ag ZD10/90, který je na obr 13.

Pro všechny vytištěné vzorky byla nastavena rychlost posuvu 50 mm/min a upnuty do stroje ve vzdálenosti čelistí 115 mm (L₀). Všechny vzorky měly počáteční plochu průřezu S₀ = 40 mm².

Parametry zkoušky:

Rychlost posuvu	50	mm / min
Vzdálenost čelistí	115	mm
Teplota v místnosti	23 ± 1	°C



Obr. 13: Zkušební stroj pro tahovou zkoušku W+B ZD10/90, Autor obrázku: Vích Ondřej

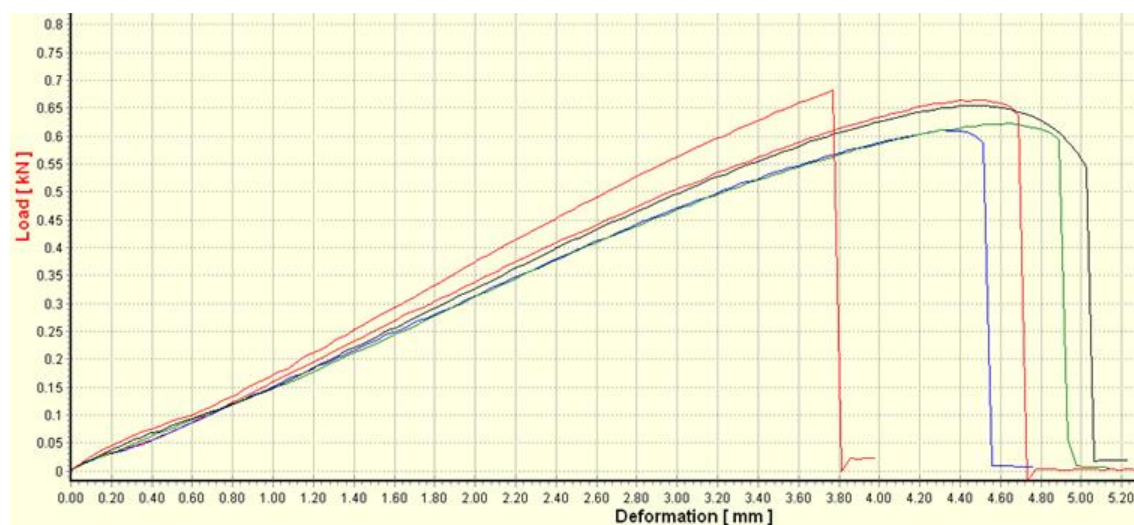
Grafické záznamy tahové zkoušky jednotlivých skupin jsou znázorněny na obr. (14,15,16,17,18 a 19).

Popis grafů

Svislá osa (y) Load – Zatížení [kN] (F)

Vodorovná osa (x) Deformation – Deformace [mm] (ΔL)

6.1.1. Vzorky G20



Obr. 14: Graf z tahové zkoušky vzorků G20

Z grafu zobrazeném na obr. 14 byly odečteny jednotlivé hodnoty zatížení a deformace pro sadu vzorků G20 a byly zapsány do tab. 5.

Tab. 5: odečtené hodnoty vzorků G20

G20	1	2	3	4	5
F_m [kN]	0,66	0,61	0,625	0,65	0,68
ΔL_b [mm]	4,6	4,5	4,8	5	3,8

Postup výpočtu byl naznačen jen pro první hodnoty z tab. 5. Zbylé hodnoty byly vypočteny obdobným způsobem.

Získaná hodnota maximálního napětí na mezi pevnosti byla vypočtena dle rovnice (3).

$$\sigma_m = \frac{F_m}{S_0} = \frac{660}{40} = 16,5 \quad [\text{MPa}]$$

Pro výpočet jmenovitého poměrného prodloužení při přetržení byla použita rovnice (2).

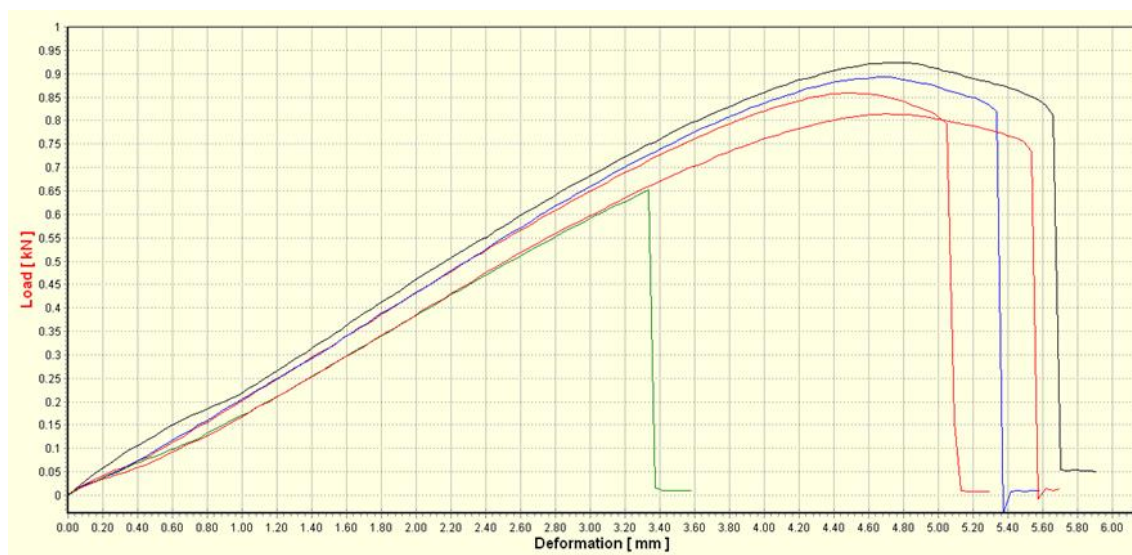
$$\varepsilon_{tb} = \frac{\Delta L_b}{L} * 100 = \frac{4,6}{115} * 100 = 4,0 \quad [\%]$$

Výsledné hodnoty pevnosti a jmenovitého poměrného prodloužení jsou zapsány v tab. 6. Pro danou sadu vzorků byla vypočtena průměrná hodnota a směrodatná odchylka.

Tab. 6: Vypočtené hodnoty σ_m a ε_{tb} vzorků G20

G20	1	2	3	4	5	Průměrná hodnota	Směr. odchylka
σ_m [MPa]	16,5	15,3	15,6	16,3	17	16,1	0,622
ε_{tb} [%]	4,0	3,91	4,17	4,35	3,3	3,95	0,355

6.1.2. Vzorky G50



Obr. 15: Graf průběhu tahové zkoušky vzorků G50

Z grafu obr.15 byly odečteny jednotlivé hodnoty zatížení a deformace a zapsány do tab. 7.

Tab. 7: Hodnoty G50

G50	1	2	3	4	5
F_m [kN]	0,86	0,9	0,65	0,93	0,82
ΔL_b [mm]	5,05	5,4	3,3	5,7	5,6

Postup výpočtu byl naznačen jen pro první hodnoty z tab. 7. zbylé hodnoty byly vypočteny obdobným způsobem.

Výpočtem dle rovnice (3) byla získána hodnota prvního maximálního napětí.

$$\sigma_m = \frac{F_m}{S_0} = \frac{860}{40} = 21,5 \text{ [MPa]}$$

Pro výpočet jmenovitého poměrného prodloužení při přetržení byla použita rovnice (2).

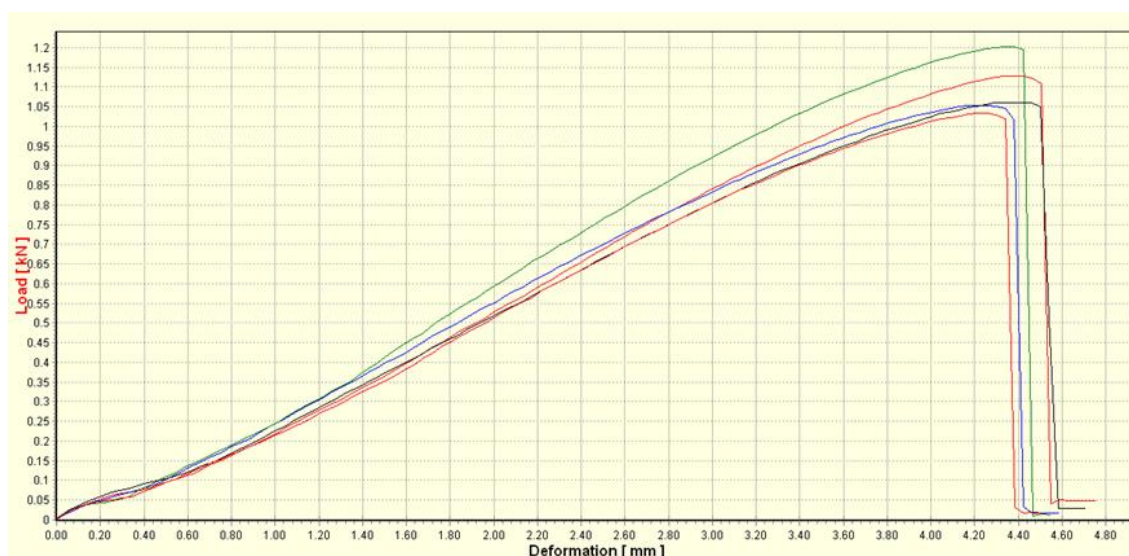
$$\varepsilon_{tb} = \frac{\Delta L_b}{L} * 100 = \frac{5,05}{115} * 100 = 4,39 \text{ [%]}$$

Výsledné hodnoty maximálního napětí na mezi pevnosti a jmenovitého poměrného prodloužení jsou zobrazeny v tab. 8. Pro sadu vzorků G50 byla vypočtena průměrná hodnota a směrodatná odchylka.

Tab. 8: Přehled vypočtených hodnot vzorků G50

G50	1	2	3	4	5	Průměrná hodnota	Směr. odchylka
σ_m [MPa]	21,5	22,5	16,3	23,3	20,5	20,8	2,45
ε_{tb} [%]	4,39	4,7	2,87	4,96	4,87	4,36	0,768

6.1.3. Vzorky G90



Obr. 16: Graf průběhu tahové zkoušky vzorků G90

Z grafu na obr.16 byly odečteny jednotlivé hodnoty zatížení a deformace a zapsány do tab. 9.

Tab. 9: Odečtené hodnoty vzorků G90

G90	1	2	3	4	5
F_m [kN]	1,125	1,05	1,2	1,06	1,04
ΔL_b [mm]	4,5	4,4	4,45	4,5	4,35

Postup výpočtu byl naznačen jen pro první hodnoty z tab. 9.

Hodnota maximálního napětí na mezi pevnosti byla získána výpočtem dle rovnice (3).

$$\sigma_m = \frac{F_m}{S_0} = \frac{1125}{40} = 28,1 \text{ [MPa]}$$

Pro výpočet jmenovitého poměrného prodloužení při přetržení byla použita rovnice (2)

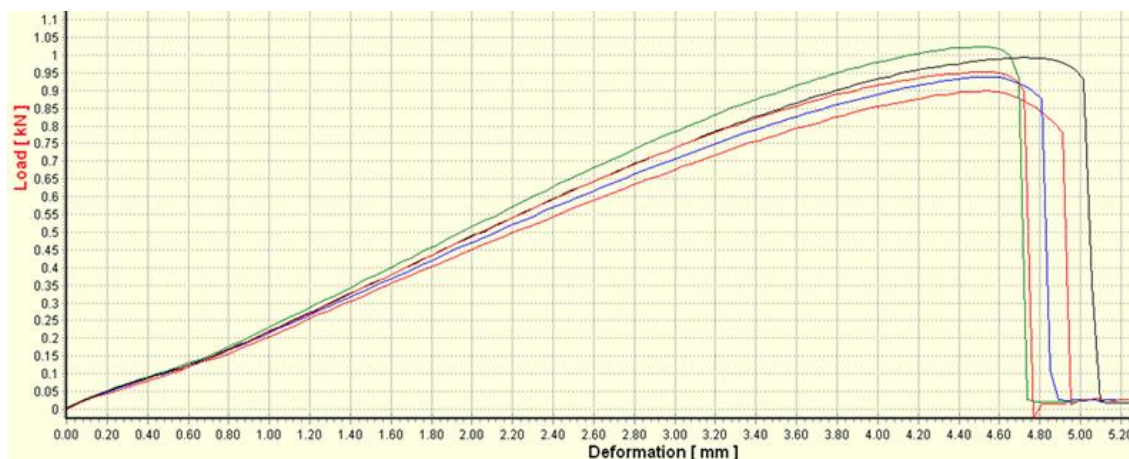
$$\varepsilon_{tb} = \frac{\Delta L_b}{L} * 100 = \frac{4,5}{115} * 100 = 3,91 \text{ [%]}$$

Výsledné hodnoty pevnosti a jmenovitého poměrného prodloužení při přetržení byly zapsány do tab.10. Pro sadu vzorků G90 byla vypočtena průměrná hodnota a směrodatná odchylka.

Tab. 10 Přehled hodnot vzorků G90:

G90	1	2	3	4	5	Průměrná hodnota	Směr. odchylka
σ_m [MPa]	28,1	26,3	30,0	26,5	26,0	27,4	1,51
ε_{tb} [%]	3,91	3,83	3,87	3,91	3,78	3,86	0,05

6.1.4. Vzorky H50



Obr. 17: Graf průběhu tahové zkoušky vzorků H50

Z grafu na obr. 17 byly odečteny jednotlivé hodnoty zatížení a deformace a zapsány do tab. 11.

Tab. 11: Odečtené hodnoty vzorků H50 z grafu

H50	1	2	3	4	5
F_m [kN]	0,9	0,94	1,03	1	0,95
ΔL_b [mm]	4,9	4,6	4,75	5	4,7

Postup výpočtu byl naznačen jen pro první hodnoty z tab. 11. Zbylé hodnoty byly vypočteny obdobným způsobem.

Hodnota maximálního napětí na mezi pevnosti byla získána pomocí rovnice (3).

$$\sigma_m = \frac{F_m}{S_0} = \frac{900}{40} = 22,5 \text{ [MPa]}$$

Pro výpočet jmenovitého poměrného prodloužení při přetržení byla použita rovnice (2).

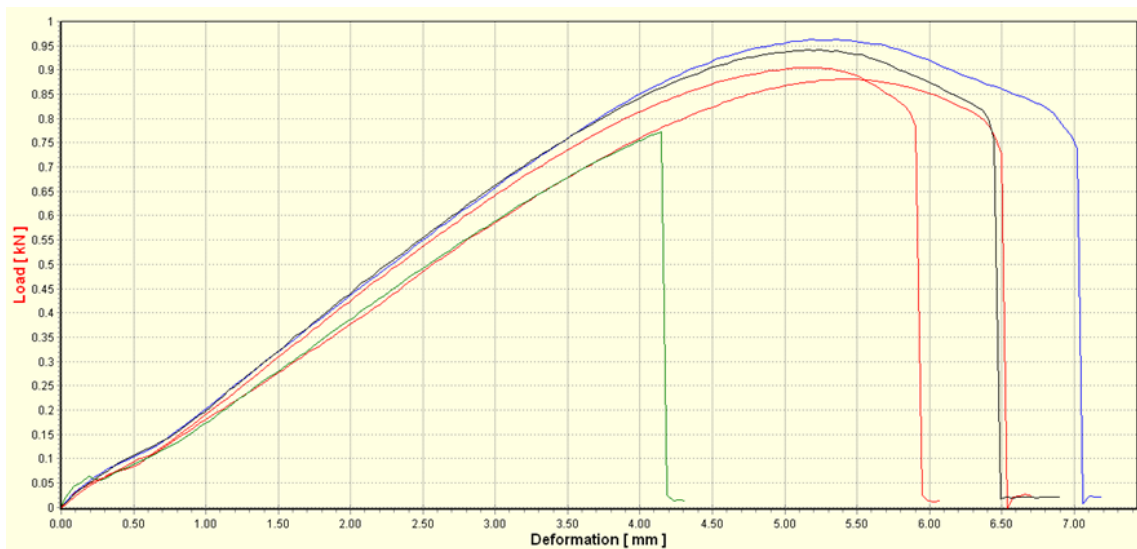
$$\varepsilon_{tb} = \frac{\Delta L_b}{L} * 100 = \frac{4,9}{115} * 100 = 4,26 [\%]$$

Výsledné hodnoty pevnosti a jmenovitého poměrného prodloužení při přetržení jsou zobrazeny v tab. 12. Pro sadu vzorků H50 byla vypočtena průměrná hodnota a směrodatná odchylka.

Tab. 12: Výsledné hodnoty vzorků H50

H50	1	2	3	4	5	Průměrná hodnota	Směr. odchylka
σ_m [MPa]	22,5	23,5	25,8	25,0	23,8	24,1	1,45
ε_{tb} [%]	4,26	4,00	4,13	4,35	4,09	4,17	0,124

6.1.5. Vzorky R50



Obr. 18: Graf průběhu tahové zkoušky vzorků R50

Z grafu na obr.18 byly odečteny jednotlivé hodnoty zatížení a deformace a zapsány do tab. 13.

Tab. 13: Naměřené hodnoty vzorků R50

R50	1	2	3	4	5
F_m [kN]	0,87	0,96	0,77	0,945	0,91
ΔL_b [mm]	6,5	7	4,2	6,5	5,9

Postup výpočtu byl naznačen jen pro první hodnoty tab. 13 a zbylé hodnoty byly vypočteny obdobným způsobem.

Získaná hodnota napětí na mezi pevnosti byla vypočtena dle rovnice (3).

$$\sigma_m = \frac{F_m}{S_0} = \frac{870}{40} = 21,8 \text{ [MPa]}$$

Pro výpočet jmenovitého poměrného prodloužení byla použita rovnice (3).

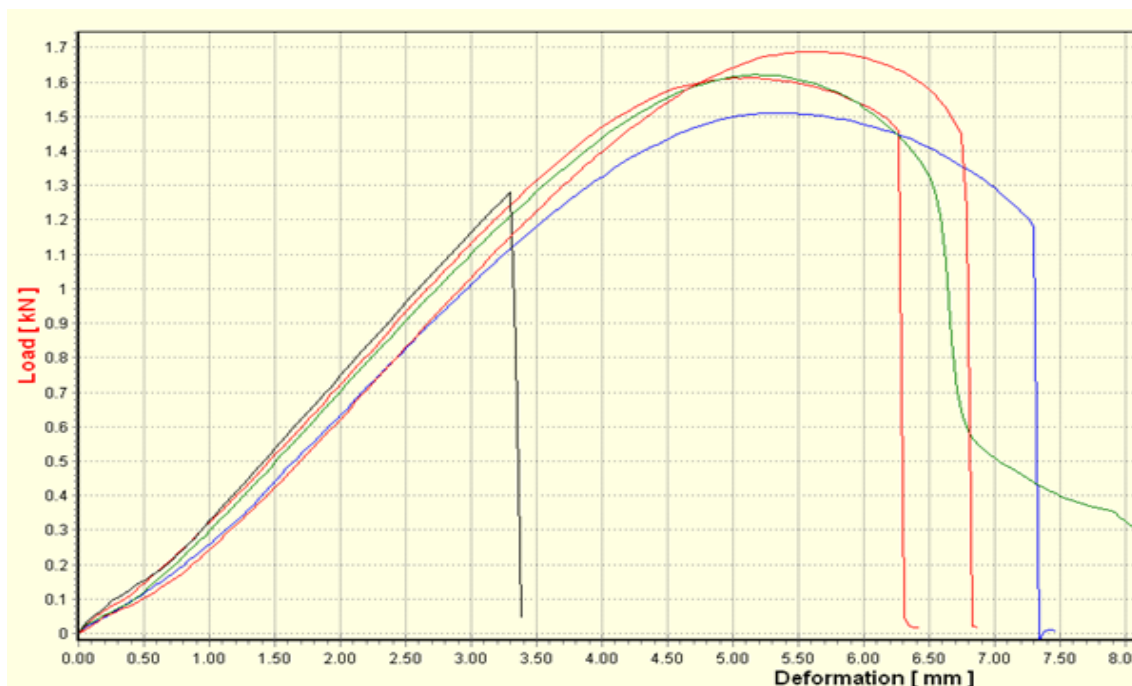
$$\varepsilon_{tb} = \frac{\Delta L_b}{L} * 100 = \frac{6,5}{115} * 100 = 5,65 \text{ [%]}$$

Výsledné hodnoty napětí na mezi pevnosti a jmenovitého poměrného prodloužení byly zapsány spolu s hodnotou aritmetického průměru a směrodatnou odchylkou pro sadu vzorků R50 do tab. 14.

Tab. 14: Přehled výsledných hodnot vzorků R50

R50	1	2	3	4	5	Průměrná hodnota	Směr. odchylka
σ_m [MPa]	21,8	24,0	19,3	23,6	22,8	22,3	1,70
ε_{tb} [%]	5,65	6,09	3,65	5,65	5,13	5,23	0,847

6.1.6. Vzorky R100



Obr. 19: Graf průběhu tahové zkoušky vzorků R100

Z grafu na obr. 19 byly odečteny jednotlivé hodnoty zatížení a deformace a zapsány do tab. 15.

Tab. 15: Naměřené hodnoty vzorků R100

R100	1	2	3	4	5
F_m [kN]	1,61	1,51	1,62	1,27	1,69
ΔL_b [mm]	6,25	7,35	6,8	3,3	6,75

Postup výpočtu byl naznačen jen pro první hodnoty z tab. 15 a zbylé hodnoty byly vypočteny obdobným způsobem.

Získaná hodnota napětí na mezi pevnosti byla vypočtena dle rovnice (3).

$$\sigma_m = \frac{F_m}{S_0} = \frac{1610}{40} = 40,3 \text{ [MPa]}$$

Pro výpočet jmenovitého poměrného prodloužení byla použita rovnice (2).

$$\varepsilon_{tb} = \frac{\Delta L_b}{L} * 100 = \frac{6,25}{115} * 100 = 5,43 \text{ [%]}$$

Výsledné hodnoty pevnosti a jmenovitého poměrného prodloužení při přetržení byly zapsány do tab. 16. Pro sadu vzorků R100 byla vypočtena hodnota aritmetického průměru a směrodatné odchyly.

Tab. 16: Výsledné hodnoty vzorků R100

R100	1	2	3	4	5	Průměrná hodnota	Směr. odchylka
σ_m [MPa]	40,3	37,8	40,5	31,8	42,3	38,5	3,67
ε_{tb} [%]	5,43	6,39	5,91	2,87	5,87	5,29	1,25

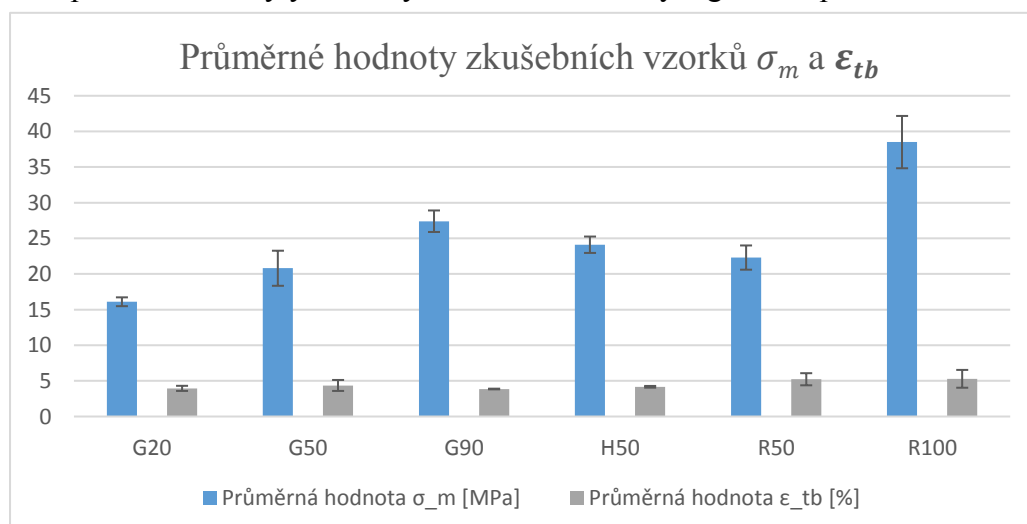
6.2. Shrnutí hodnot tahové zkoušky

Průměrné hodnoty pevnosti, jmenovitého poměrného prodloužení a jejich směrodatných odchylek všech testovaných skupin byly zapsány do tab. 17.

Tab. 17: Shrnutí průměrných hodnot z tahové zkoušky

Vzorky	Průměrná hodnota σ_m	Směr. odchylka (σ_m)	Průměrná hodnota ε_{tb}	Směr. odchylka (ε_{tb})
G20	16,1	0,62	3,95	0,36
G50	20,8	2,46	4,36	0,77
G90	27,4	1,51	3,86	0,05
H50	24,1	1,15	4,17	0,12
R50	22,3	1,7	5,23	0,85
R100	38,5	3,67	5,29	1,25

Pro lepší názornost byly hodnoty z tab. 17 zobrazeny v grafické podobě.



Graf 1: Průměrné hodnoty výsledků tahové zkoušky

Porovnáním hodnoty, vyplývající z tab. 17 nebo grafu č.1 je patrné, že s rostoucí hustotou výplně, roste i pevnost materiálu. Při srovnání stejné hustoty a rozdílných struktur zjistíme, že H50 vykazuje nejlepší pevnost ve srovnání s G50 a R50.

7. Zkouška rázem v ohybu

Tato zkouška patří mezi dynamické zkoušky a jde o stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy – neinstrumentovaná rázová zkouška dle normy ČSN EN ISO 179 [22]. Zkušební vzoreček se umístí na podpěry, vzdálené od sebe určitou hodnotou. Úder kladiva je veden tak, aby nos kladiva dopadl na těleso doprostřed mezi podpěry. Hodnota, kterou odečteme, je energie spotřebovaná k přeražení tělesa. Pomocí této hodnoty vypočítáme rázovou houževnatost (viz rovnice 5). [19]

Rázová houževnatost vyjadřuje schopnost, jak rychle dokáže materiál absorbovat energii. Při přeražení tělesa dojde ke křehkému nebo houževnatému lomu. Jaký lom vznikne má souvislost s teplotou skelného přechodu (viz. kapitola 3). Další parametry ovlivňující rázovou houževnatost (a_c) jsou například druh a složení polymeru, energie kladiva, vzdálenost podpor atd. [19]

$$a_c = \frac{E_c}{h \cdot b} \text{ [kJ/m}^2\text{]} \quad (5)$$

E_c ... spotřebovaná kinetická energie k přeražení tělesa [J]

h ... tloušťka [mm]

b ... šířka [mm] [19]

Rázové zkoušce bylo podrobena 6 připravených vzorků z každé sady. Celkem tedy 36 zkušebních vzorků. Zkouška byla provedena na Charpyho kladivu (Ceast 6545). Byly použity vzorky vytištěné pro tahovou zkoušku. Ruční pilkou byly odříznuty konce ve vzdálenosti 35 mm. Tímto krokem bylo dosaženo zkušebních vzorků o rozměrech 80 x 10 x 4 mm pro rázovou zkoušku Charpyho kladivem. Vzorky byly na podpěry pokládány vždy stejnou stranou a byly stejně ukládány vzhledem k nosu kladiva, aby kladivo udeřilo vždy na shodné místo.

Parametry zkoušky:

Vzdálenost podpor	60 mm
Max. energie kladiva	7,5 J
Rozměry vzorků	80 x 10 x 4 mm
Teplota okolí	23 ± 1

Hodnoty ze zkoušky rázové houževnatosti Charpyho kladivem byly zaznamenány do tab. 18, ze které byly provedeny další výpočty.

Tab. 18: Přehled naměřených hodnot v rázové zkoušce

	G20	G50	G90	H50	R50	R100
Číslo vzorku	Energie [J]					
1	0,34	0,13	0,64	1,08	0,4	1,02
2	0,48	0,81	0,61	0,57	0,45	3,43
3	1,17	0,13	0,24	0,97	0,6	3,06
4	0,4	0,12	0,49	0,78	0,9	0,91
5	0,46	0,15	0,48	0,45	0,6	1,05
6	0,34	0,21	0,58	0,85	0,85	3,04

Na výpočet rázové houževnatosti byla použita rovnice (5). Hodnoty uvedené v tab. 18 byly převedeny na jednotky [kJ] a dosazeny do rovnice (5). Pro lepší názornost byla vypočtena první hodnota rázové houževnatosti, zbylé hodnoty byly vypočteny obdobným způsobem. Již vypočtené hodnoty rázové houževnatosti je možno nalézt v tab. 19, kde lze najít průměrnou hodnotu skupin vzorků včetně směrodatné odchylky.

Ukázka postupu výpočtu:

$$h = 4 \text{ mm} = 0,004 \text{ m}$$

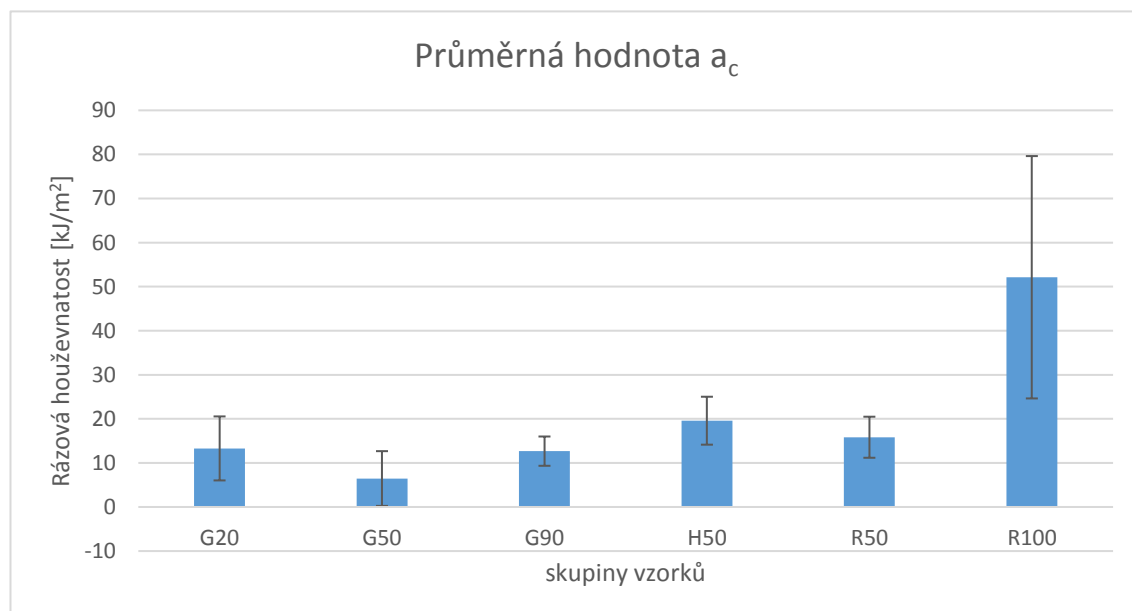
$$b = 10 \text{ mm} = 0,01 \text{ m}$$

$$\text{G20- } E_{c1} = 0,34 \text{ J} = 0,00034 \text{ kJ}$$

$$a_c = \frac{E_{c1}}{h \cdot b} = \frac{0,00034}{0,004 \cdot 0,01} = 8,5 \text{ [kJ/m}^2\text{]}$$

Tab. 19: Vypočtené hodnoty rázové zkoušky

	G20	G50	G90	H50	R50	R100
Číslo vzorku	Rázová houževnatost [kJ/m ²]					
1	8,5	3,25	16	27	10	25,5
2	12	20,3	15,3	14,3	11,3	85,8
3	29,3	3,3	6	24,3	15	76,5
4	10	3	12,3	19,5	22,5	22,5
5	11,5	3,75	12	11,25	15	26,3
6	8,5	5,3	14,5	21,3	21,3	76
Průměrné hodnoty a_c	13,3	6,46	12,7	19,6	15,8	52,1
Směr. odchylka	7,26	6,21	3,21	5,44	4,66	27,5



Graf 2: Průměrné hodnoty výsledků rázové zkoušky v ohybu

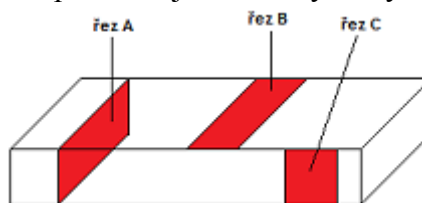
Z grafu 2 vyplývá, že vzorky R100 mají největší hodnotu rázové houževnatosti. Překvapující výsledky byly zjištěny u vzorků ze skupiny G20, které prokázaly lepší

rázovou houževnatost než vzorky se stejnou strukturou ale hustší výplní (G50, G90). Takový výsledek vyvolával dojem, že v měření byla chyba. Proto byl test opakován, tentokrát s 5 vzorky a jeho výsledky dopadly podobně. Výsledky z této zkoušky jsou k nalezení v příloze této práce.

8. Světelný mikroskop

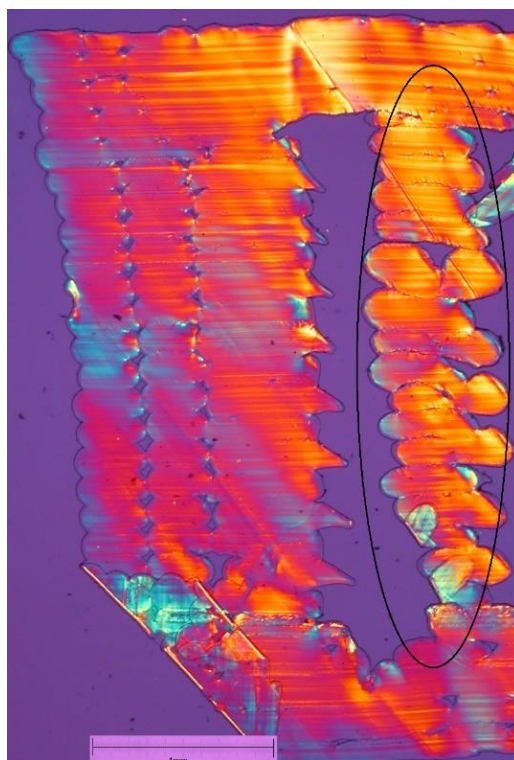
Cílem poslední části experimentu bylo zjistit, jaký vliv má teplota na kvalitu tisku při shodné struktuře i hustotě.

Pro tento účel posloužily 3 vzorky se strukturou R50 tištěné při teplotách 260, 250 a 240 °C. Nejprve byla odříznuta tenká fólie (0,15 až 0,2 mm) z každého vzorku z řezu A (obr. 20), která byla vložena na podložní sklíčko, zakápnuta olejem a zakryta krycím sklíčkem. Takto připravený vzorek byl položen na stolek mikroskopu. Tyto vzorky byly pozorovány v průchozím polarizovaném světle mikroskopu Nikon eclipse ME 600. Jednotlivé pohledy jsou zobrazeny na obr. 21, 22 a 23.



Obr. 20: Náhled místa odebraných fólií

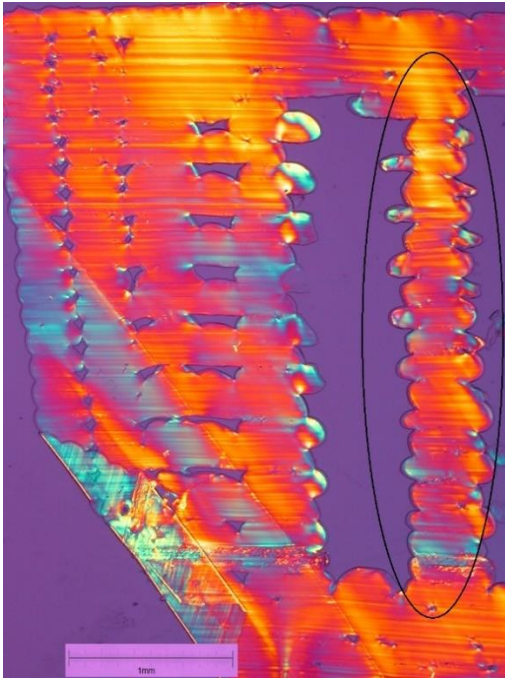
Dále ze vzorku R100 z řezu B (obr. 20) byla odříznuta fólie z vrchní části vzorku a z řezu C (obr.20) byla odříznuta fólie z boční části vzorku. Tyto vzorky byly pozorovány za stejných podmínek na výše zmíněném mikroskopu. Snímky pořízené během pozorování jsou zobrazeny na obr. 24 a 25.



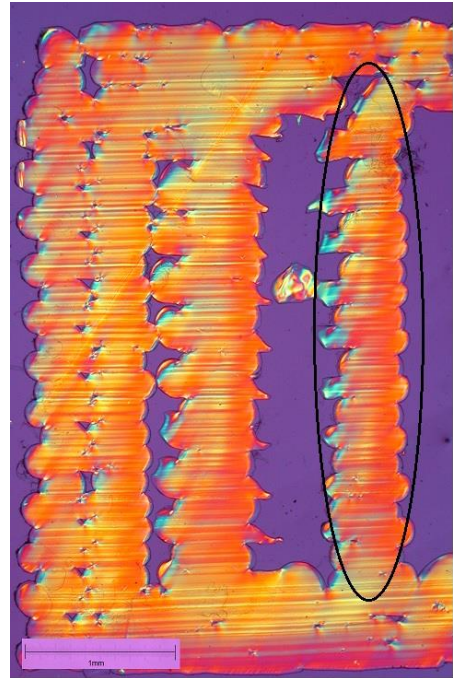
Obr. 21: Snímek vzorku RT240 (R50, 240 °C, zvětšeno 2,5x)

Při pozorování snímků vzorků na obr. 21, 22 a 23 jsou na první pohled patrné rozdíly ve struktuře. Při zaměření na černě označenou oblast na obr. 21 je viditelně horší kvalita tisknutých vrstev oproti ostatním dvěma snímkům. Jednotlivé vrstvy tvoří nepravidelnou strukturu a mezi vrstvami jsou pozorovatelné malinké dutinky.

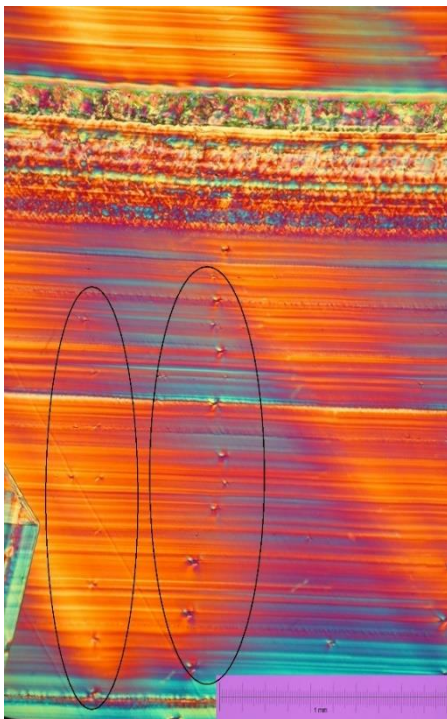
Tyto skutečnosti by se jistě odrazily v horších mechanických vlastnostech. Avšak tento předpoklad by bylo nutné ověřit příslušnými zkouškami. Už samotný tisk zkoumaného vzorku RT240 (obr. 21) byl problematický. Natavené vlákno špatně přiléhalo k předchozí vrstvě a občas mělo tendenci lepit se k okolí trysky.



Obr. 23: Snímek vzorku RT250 (R50, 250 °C, zvětšeno 2,5x)



Obr. 22: Snímek vzorku R50 (R50, 260 °C, zvětšeno 2,5x)

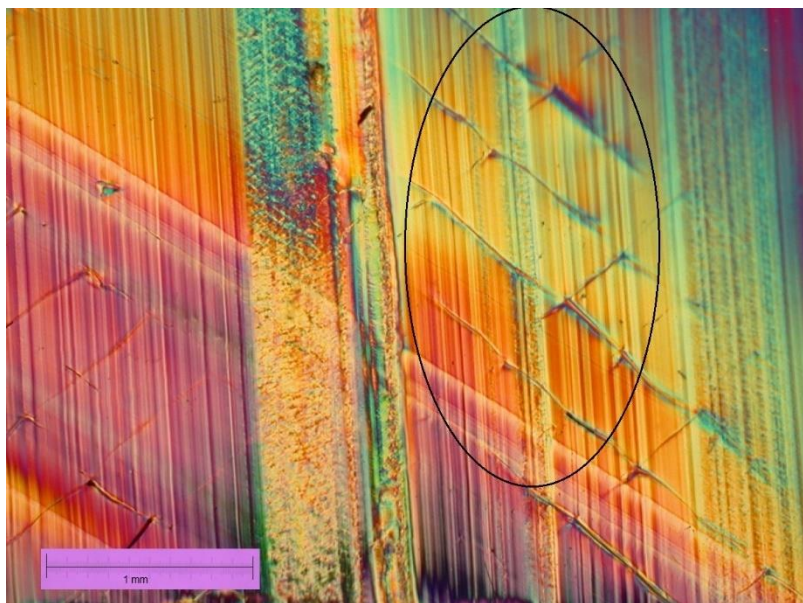


Obr. 24: Výřez ze snímku z řezu C, vzorek R100, zvětšeno 5x

Oproti tomu struktura na obr. 23 je pravidelná a je možné počítat, jak jednotlivé vrstvy tvořící výplň, tak vrstvy tvořící plášť zkušební vzorečku.

Pro zjištění, jak vypadá struktura vzorku R100 byly pořízeny 2 snímky obr. 24 a 25. Pozorováním těchto vzorků pomocí mikroskopu bylo zjištěno, že obsahuje malinké dutinky. Tyto malinké dutinky mezi vrstvami tisknutého zkušební tělíska, které jsou zvýrazněny černou oblastí, jsou viditelné na obr. 24. Vertikální vzdálenost mezi dutinkami přibližně odpovídá jedné výšce tisknuté vrstvy, tedy 0,15 mm.

Zcela odlišná struktura byla získána z řezu C (obr. 20). Patrné rýhy ve struktuře jsou viditelné při pohledu na obr. 25. Tyto rýhy tvoří hranici mezi jednotlivými tisknutými řadami ve vrstvě. Hranice řad v jedné vrstvě odpovídají směru zleva doprava dolů. Hranice řad směrem zprava doleva dolů odpovídá tisknutým řadám v jiné vrstvě. Řady v dané vrstvě jsou s řadami ze sousední vrstvy navzájem kolmé.



Obr. 25: Výřez ze snímku vzorku z řezu B, vzorek R100, zvětšeno 2,5x

9. Vyhodnocení

Při vyhodnocení vlivu tisku odlišné struktury při zachování stejné hustoty vnitřní výplně na mechanické vlastnosti, konkrétně pevnosti a rázové houževnatosti, byly porovnány skupiny vzorků s 50 % hustotou výplně tištěné se strukturou mřížka G50, hexagonální H50 a přímočarou R50 mezi sebou. Jak byly zkušební vzorky vyrobeny bylo zmíněno v kapitole 5 a jejich testování bylo popsáno v kapitolách 6 a 7. Vzorky H50 dosáhly nejlepších výsledků jak ve zkoušce tahem, tak i rázem v ohybu ve srovnání se skupinami R50 a G50, což znázorňuje graf 3. Průměrná hodnota pevnosti byla vypočtena na 24,1 MPa, což je o 8 % více než hodnota R50 a o 16 % více než vykazaly vzorky G50. Průměrná hodnota rázové houževnatosti dosáhla u vzorků H50 19,6 kJ/m², která je větší o necelých 24 % než R50. Z orientačního údaje doby tisku jednoho vzorku z podkapitoly 5.2. vyplývá, že doba tisku vzorku H50 je o víc než 100 % delší než R50 a G50, a tak by mohla nastat otázka, jestli se takový tisk vyplatí.

Pro vyhodnocení vlivu tisku odlišné hustoty vnitřní výplně při stejné vnitřní struktuře na pevnost a rázovou houževnatost zkušebních vzorků, byly použity vzorky s mřížkovou a přímočarou vnitřní strukturou. Konkrétně se jednalo o skupiny G20, G50, G90, R50 a R100. Srovnáním zkušebních tělísek R100 a R50 dle tab. 20, byla prokázána lepší pevnost i rázová houževnatost ve prospěch R100, i přes vysokou směrodatnou odchylku. Neočekávaných výsledků dosáhly vzorky G20 v rázové houževnatosti. Typ G20 předčil v rázové houževnatosti skupiny G50 a G90, v porovnání s G50 dokonce o 106 %, a proto by bylo vhodné tento neočekávaný závěr znovu ověřit s novými vzorky. Oproti tomu vzorky G20 vykazaly nejmenší pevnost ze všech testovaných vzorků viz. tab. 20.

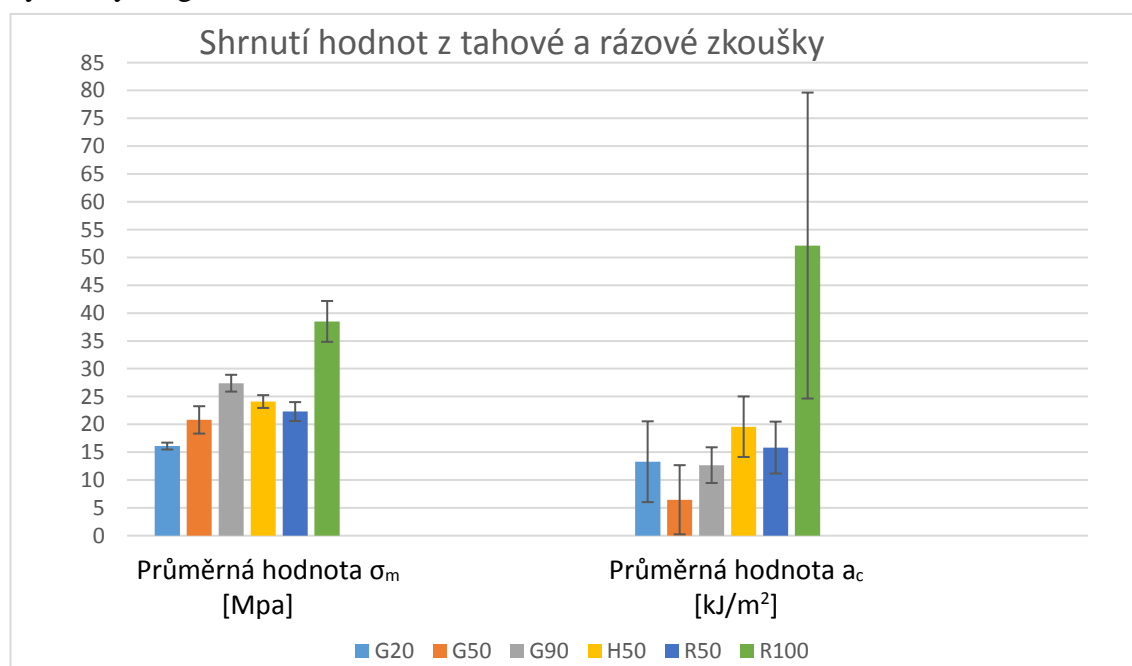
Posledním bodem bylo pozorování vlivu teploty na kvalitu tisku materiálu na světelném mikroskopu viz. kapitola 8. Pozorované vzorky byly typu R50, RT240, RT250 a dále byly vyhodnoceny 2 snímky ze vzorku R100. Ze srovnání (obr. 21-23) vyplynulo, že teplota tisku 240 °C byla nedostatečná. Struktura vzorku RT240 byla nepravidelná s viditelnými trhlinami, to by se odrazilo ve zhoršených mechanických vlastnostech. Tento předpoklad by bylo vhodné ověřit příslušnými zkouškami. Pro lepší tisknutou strukturu by muselo dojít k úpravě některých parametrů, které by ovlivnily další nastavované parametry. Například by se musela snížit rychlost tisku, aby se stihla dostatečně natavit struna v trysce, čímž by se prodloužil čas tisku. Na vzorku RT250 (obr. 22) byla pozorována vcelku kompaktní struktura, stále však vykazovala

geometrické a rozměrové odlišnosti, zatímco struktura vzorku R50 (obr. 23) byla na první pohled znatelně lepší, struktura byla pravidelná, vrstvy stejně spojené, které by se daly spočítat a při aplikaci měřítka se výška jednotlivých vrstev pohybovala okolo 0,15 mm, tedy hodnotě nastavené v parametrech tisku.

Tab. 20: Celkový přehled získaných hodnot

	G20	G50	G90	H50	R50	R100
Průměrná hodnota σ_m [MPa]	16,1	20,80	27,4	24,1	22,3	38,5
Směr. odchylka σ_m	0,62	2,46	1,51	1,15	1,7	3,67
Průměrná hodnota a_c [kJ/m²]	13,3	6,46	12,7	19,6	15,8	52,1
Směr. odchylka a_c	7,26	6,21	3,21	5,44	4,66	27,5
Průměrná hodnota ε_{tb}	3,95	4,36	3,86	4,17	5,23	5,29

Hodnoty pevnosti a rázové houževnatosti, včetně jejich směrodatných odchylek byly vyneseny do grafu 3.



Graf 3: Shrnutí hodnot pevnosti a rázové houževnatosti zkušebních vzorků

10. Závěr

Cílem této práce bylo sestavit přehled technologií 3D tisku a zvolit jednu, pomocí které budou vyrobeny a porovnány vzorky. Byly hodnoceny mechanické vlastnosti termoplastového materiálu PET-G tištěného metodou FDM na tiskárně Original Prusa i3 MK3.

Všechny cíle této bakalářské práce byly splněny.

- V teoretické části této bakalářské práce byl sestaven přehled nejpoužívanějších technologií 3D tisku.
- Byly popsány polymerní materiály (kapitola 4) používané při tisku technologií FDM, která byla zvolena pro praktickou část práce. Pro výrobu vzorků byl použit materiál PET-G, pro jeho dobré vlastnosti a stále větší oblíbenost (viz. kapitola 4.1.5).
- Byla vtištěna tělíska s různými parametry tisku. Měněnými parametry byly vnitřní struktura (hexagonální, mřížková nebo přímočará), hustota vnitřní výplně (20, 50, 90 nebo 100%) a teplota tisku (240, 250 nebo 260 °C). Více o tištěných vzorcích je možné najít v podkapitole 5.2.
- Vytisknutá tělíska byla podrobena zkoušce tahem a rázem v ohybu a vybrané vzorky byly pozorovány pomocí světelného mikroskopu. Samotný průběh zkoušek a získaných hodnot je možné nalézt v kapitolách 6 pro tahovou zkoušku, v kapitole 7 pro zkoušku rázem v ohybu a pozorování struktury mikroskopem v kapitole 8.
- Výsledky byly zpracovány do přehledné tabulky a grafu v kapitole 9, kde byly komentovány. Bylo prokázáno, že nejlepší pevnosti a rázové houževnatosti dosáhly vzorky H50 ve srovnání se vzorky G50 a R50. Vzorky H50 byly ovšem připravovány s nejdelším časem. Neočekávaných výsledků bylo dosaženo při porovnání skupin se stejnou vnitřní strukturou, ale odlišnou hustotou, konkrétně se jednalo o vzorky G20, G50 a G90. Vzorky G20 v rázové houževnatosti výrazně předčily vzorky G50, dokonce i G90. Tento závěr se však nepotvrdil u vzorků R50 a R100, a proto by bylo vhodné výrobu vzorků a zkoušky zopakovat.

Z výsledků tahové a rázové zkoušky bylo prokázáno, že při tisku metodou FDM má na mechanické vlastnosti vliv typu vnitřní struktury a její hustota. Pozorováním vnitřní struktury pomocí mikroskopu bylo potvrzeno, že nevhodně zvolená teplota tisku má značný vliv na výslednou kvalitu tisku.

Seznam použité literatury

- [1] CHLEBO, Martin. Historie 3D tisku [online]. [cit. 2018-07-05]. Dostupné z: <http://www.o3d.cz/3d-tisk/%C5%A1t%C3%ADtky/historie-3d-tisku/>
- [2] PRŮŠA, Josef a Michal PRŮŠA. Základy 3D tisku [online]. 2014 [cit. 2018-07-05]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/wp-content/uploads/zaklady-3d-tisku.pdf>
- [3] BENSOUSSAN, Hannah. Sculpteo :The History of 3D Printing [online]. 2016 [cit. 2018-07-05]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/blog/2016/12/14/the-history-of-3d-printing-3d-printing-technologies-from-the-80s-to-today>
- [4] VAROTSIS, Alkaios Bournias. 3dhubs: Introduction to SLA 3D Printing [online]. [cit. 2018-07-08]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sla-3d-printing>
- [5] 3dprintingindustry: The Free Beginner's Guide [online]. [cit. 2018-07-08]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide#04-processes>
- [6] HOMOLA, Jan. 3D-tisk: Selective Laser Sintering [online]. 2013 [cit. 2018-07-08]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/selective-laser-sintering/>
- [7] VAROTSIS, Alkaios Bournias. Introduction to Metal 3D printing. 3dhubs [online]. [cit. 2018-07-10]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-metal-3d-printing>
- [8] VAROTSIS, Alkaios Bournias. Introduction to Material Jetting 3D Printing. 3dhubs [online]. [cit. 2018-07-10]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-material-jetting-3d-printing>
- [9] VAROTSIS, Alkaios Bournias. Introduction to Binder Jetting 3D printing. 3dhubs [online]. [cit. 2018-07-10]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-binder-jetting-3d-printing>
- [10] VAROTSIS, Alkaios Bournias. Introduction to FDM 3D printing. 3dhubs [online]. [cit. 2018-07-10]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing>
- [11] MEISSNER, Bohumil a Václav ZILVAR. Fyzika polymerů. Praha: SNTL, 1987.
- [12] ERHARD, Gunter. *Designing with Plastics*. Munich: Carl Hanser Verlag, 2006. ISBN 978-3-446-22590-9.
- [13] OSSWALD, Tim, Erwin BAUR, Sigrid BRINKMANN, Karl OBERBACH a Ernst SCHMACHTENBERG. *International Plastics Handbook: The Resource for Plastic Engineers*. Munich: Carl Hanser Verlag, 2006. ISBN 978-3-446-22905-1.
- [14] MICH. What Material Should I Use For 3D Printing?. 3dprintingforbeginners [online]. 2013 [cit. 2018-07-14]. Dostupné z: <http://3dprintingforbeginners.com/filamentprimer/>

- [15] Polycarbonate. Simplify3D [online]. [cit. 2018-07-14]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/polycarbonate/>
- [16] FLYNT, Joseph. PETG Filament: Properties, How to Use, and Best Brands. 3dinsider [online]. 2018 [cit. 2018-07-14]. Dostupné z: <http://3dinsider.com/petg-filament/>
- [17] Materials for 3D Printing by Fused Deposition [online]. Edmonds Community College, 2017 [cit. 2018-07-14]. Dostupné z: http://www.materialseducation.org/educators/matedu-modules/docs/Materials_in_FDM.pdf
- [18] BĚHÁLEK, Luboš. Polymery [online]. 2016 [cit. 2018-07-15]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/09.html>
- [19] BĚHÁLEK, Luboš. Mechanické vlastnosti polymerů – dynamické rázové namáhání [online]. 2016 [cit. 2018-07-15]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/11.html>
- [20] SOBOTOVÁ, Jana, Elena ČIŽMÁROVÁ, Jakub HORNÍK a Zdeňka JENÍKOVÁ. Nauka o materiálu I. a II. cvičení. Praha: ČVUT, 2014. ISBN 978-80-01-05550-2.
- [21] ČSN EN ISO 572-1. Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 1: Obecné principy. 2012
- [22] ČSN EN ISO 179-1. Plasty - Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy - Část 1: Neinstrumentovaná rázová zkouška. 2010
- [23] Easycnc [online]. [cit. 2018-07-16]. Dostupné z: <https://www.easycnc.cz/inpage/informace-o-technologiech-3d-tisku/>
- [24] Selective Laser Sintering (SLS). Printspace3d [online]. [cit. 2018-07-16]. Dostupné z: <https://www.printspace3d.com/what-is-3d-printing/3d-printing-processes/>
- [25] SLM. Sculpteo [online]. [cit. 2018-07-16]. Dostupné z: https://www.sculpteo.com/blog/wp-content/uploads/2015/04/Selective_laser_melting_system_schematic_small_color.jpg
- [26] Metal 3D Printing: Laser Sintering vs. Bulk Sintering in a Furnace – Pros and Cons. 3dprint [online]. [cit. 2018-07-16]. Dostupné z: <https://3dprint.com/193946/laser-sintering-vs-bulk-sintering/>
- [27] In: Itnetwork [online]. [cit. 2018-07-17]. Dostupné z: <https://www.itnetwork.cz/nezarazene/3d-tisk/technologie-3d-tisk>
- [28] FDM process schematic. In: Researchgate [online]. [cit. 2018-07-17]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/FDM-process-schematic_fig1_318284051
- [29] 3D tiskárna. In: Prusa3d [online]. [cit. 2018-07-17]. Dostupné z: https://www.prusa3d.com/wp-content/uploads/2018/03/MK3_bright.png

Seznam obrázků a grafů

Obr. 1: První verze tiskárny SLA 250 [27]	11
Obr. 2: Princip metody SLA [23]	13
Obr. 3: Princip metody SLS [24]	14
Obr. 4: Princip metody SLS & DMLS [25]	15
Obr. 5: Princip metody Material Jetting [8]	17
Obr. 6: Princip metody Binder Jetting [26]	18
Obr. 7: Schéma metody FDM / FFF [28]	19
Obr. 8: 3D tiskárna Original Prusa i3 MK3 [29]	26
Obr. 9: Tvar zkušební vzorku [20]	27
Obr. 10: Hexagonální struktura (vlevo) a Přímočará struktura (vpravo)	28
Obr. 11: Mřížková struktura	28
Obr. 12: Hustota výplně: vlevo (20%), uprostřed (50%), vpravo (90%)	29
Obr. 13: Zkušební stroj pro tahovou zkoušku W+B ZD10/90, Autor obrázku: Vích Ondřej	32
Obr. 14: Graf z tahové zkoušky vzorků G20	33
Obr. 15: Graf průběhu tahové zkoušky vzorků G50	34
Obr. 16: Graf průběhu tahové zkoušky vzorků G90	36
Obr. 17: Graf průběhu tahové zkoušky vzorků H50	37
Obr. 18: Graf průběhu tahové zkoušky vzorků R50	38
Obr. 19: Graf průběhu tahové zkoušky vzorků R100	40
Obr. 20: Náhled místa odebraných fólií	45
Obr. 21: Snímek vzorku RT240 (R50, 240 °C, zvětšeno 2,5x)	45
Obr. 22: Snímek vzorku R50 (R50, 260 °C, zvětšeno 2,5x)	46
Obr. 23: Snímek vzorku RT250 (R50, 250 °C, zvětšeno 2,5x)	46
Obr. 24: Výřez ze snímku z řezu C, vzorek R100, zvětšeno 5x	46
Obr. 25: Výřez ze snímku vzorku z řezu B, vzorek R100, zvětšeno 2,5x	47
Graf 1: Průměrné hodnoty výsledků tahové zkoušky	41
Graf 2: Průměrné hodnoty výsledků rázové zkoušky v ohybu	44
Graf 3: Shrnutí hodnot pevnosti a rázové houževnatosti zkušebních vzorků	49
Graf 4: 2. zkouška - hodnoty rázové houževnatosti	57

Seznam tabulek

Tab. 1: Teploty tiskových materiálů [14,15,16,17].....	25
Tab. 2: Rozměry zkušebního vzorku.....	28
Tab. 3: Celkový přehled tištěných vzorků	30
Tab. 4: Orientační čas a spotřeba materiálu	31
Tab. 5: odečtené hodnoty vzorků G20.....	33
Tab. 6: Vypočtené hodnoty σ_m a ϵ_{tb} vzorků G20	34
Tab. 7: Hodnoty G50	35
Tab. 8: Přehled vypočtených hodnot vzorků G50	35
Tab. 9: Odečtené hodnoty vzorků G90	36
Tab. 10 Přehled hodnot vzorků G90:	37
Tab. 11: Odečtené hodnoty vzorků H50 z grafu	37
Tab. 12: Výsledné hodnoty vzorků H50	38
Tab. 13: Naměřené hodnoty vzorků R50	39
Tab. 14: Přehled výsledných hodnot vzorků R50	39
Tab. 15: Naměřené hodnoty vzorků R100	40
Tab. 16: Výsledné hodnoty vzorků R100.....	41
Tab. 17: Shrnutí průměrných hodnot z tahové zkoušky	41
Tab. 18: Přehled naměřených hodnot v rázové zkoušce	43
Tab. 19: Vypočtené hodnoty rázové zkoušky.....	44
Tab. 20: Celkový přehled získaných hodnot.....	49
Tab. 21: 2. zkouška - naměřené hodnoty při zkoušce rázem v ohybu	56
Tab. 22: 2. zkouška - hodnoty rázové houževnatosti.....	57

Přílohy

1) Druhá opakovaná zkouška rázem v ohybu

Z důvodu podezření chyby ve zkoušce rázem v ohybu vyplývající z tab. 19 byla zkouška opakována. Naměřené hodnoty energie potřebné na přeražení zkušební vzorečku je zobrazeno v tab. 21.

Max. energie kladiva 1 J

Rozměry vzorků 80 x 10 x 4 mm

Teplota okolí 23 ± 1

$S_0 = 40 \text{ mm}^2 = 4 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$

Tab. 21: 2. zkouška - naměřené hodnoty při zkoušce rázem v ohybu

	G20	G50	G90
Číslo vzorku	Energie [J]		
1	0,33	0,29	0,35
2	0,54	0,28	0,18
3	0,37	0,21	0,23
4	0,50	0,35	0,45
5	0,34	0,21	0,60

Znázorněn výpočet a_c pro první hodnoty vzorků G20, G50 a G90

$$a_c = \frac{E_c}{h \cdot b} \text{ [kJ/m}^2\text{]}$$

$$a_{cG20} = a_{cG20} = \frac{E_c}{h \cdot b} = \frac{\frac{0,33}{1000}}{0,00004} = 8,25 \text{ [kJ/m}^2\text{]}$$

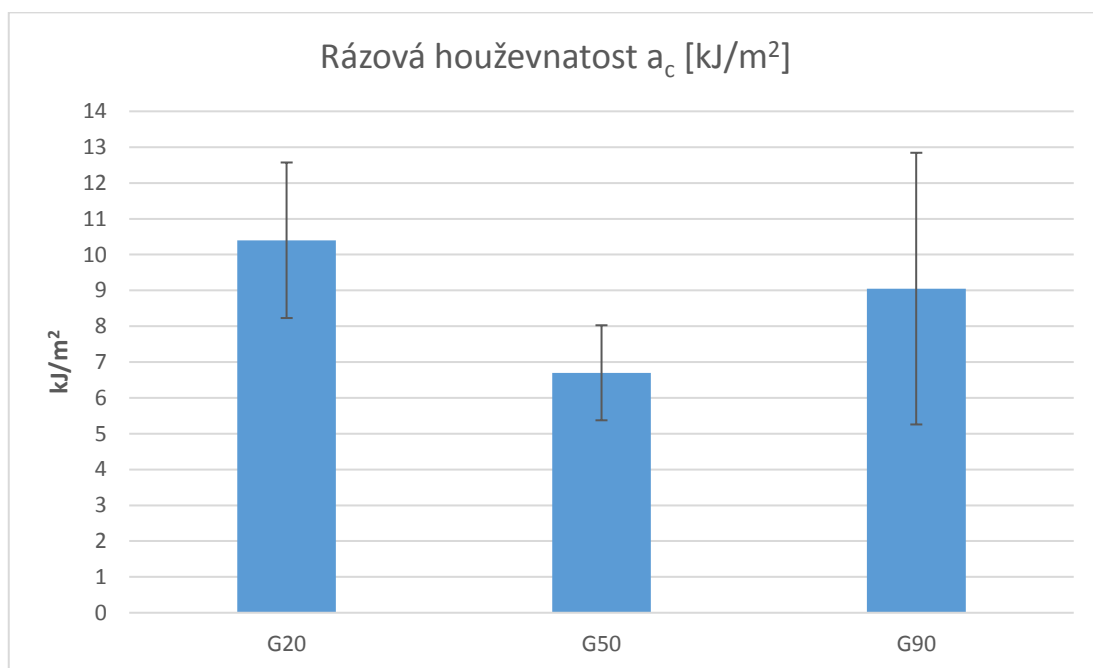
$$a_{cG50} = a_{cG20} = \frac{E_c}{h \cdot b} = \frac{\frac{0,29}{1000}}{0,00004} = 7,25 \text{ [kJ/m}^2\text{]}$$

$$a_{cG90} = a_{cG20} = \frac{E_c}{h \cdot b} = \frac{\frac{0,35}{1000}}{0,00004} = 8,75 \text{ [kJ/m}^2\text{]}$$

Tab. 22: 2. zkouška - hodnoty rázové houževnatosti

	G20	G50	G90
č. vzorků	a_c [kJ/m ²]		
1	8,25	7,25	8,75
2	13,5	7	4,5
3	9,25	5,25	5,75
4	12,5	8,75	11,25
5	8,5	5,25	15
Prům. hodnota	10,4	6,7	9,05
Směr. odchylka	2,17	1,33	3,79

Z průměrné hodnoty a_c uvedené v tab. 22, včetně směrodatné odchylky byl sestaven graf 4.



Graf 4: 2. zkouška - hodnoty rázové houževnatosti

Výsledek opakované zkoušky dopadl stejně jako test první uvedený v kapitole 7. Vzorky G20 vykázaly lepší hodnotu rázové houževnatosti oproti G50 a G90.