

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ



DIPLOMOVÁ PRÁCE

PROBLEMATIKA 3D TISKU

PROBLEMATICS OF 3D PRINTINGS

AUTOR: Bc. JIŘÍ MAREK

STUDIJNÍ PROGRAM: STROJNÍ INŽENÝRSTVÍ

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. ZDEŇKA JENÍKOVÁ, Ph.D.

PRAHA 2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Marek** Jméno: **Jiří** Osobní číslo: **419995**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Konstrukce a výroba součástí z plastů a kompozitů**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Problematika 3D tisku

Název diplomové práce anglicky:

Problematics of 3D printing

Pokyny pro vypracování:

Cíl práce:

Vyhodnotit vliv podmínek tisku na vlastnosti připravených vzorků.

Postup:

Rešerše v oblasti 3D tisku se zaměřením na princip tavení plastu ve formě vlákna uvnitř extruzní hlavy (metoda FDM).

Vytvořit vzorky na zkoušku tahem z vybraných materiálů za zvolených měnících se podmínek.

Provést testování vzorků a vyhodnocení získaných údajů při odlišných podmínkách přípravy těles realizovanou metodou 3D tisku.

Seznam doporučené literatury:

- [1] MEISSNER, Bohumil a Václav ZILVAR, 1987. Fyzika polymerů: struktura a vlastnosti polymerních materiálů. Praha: SNTL.
- [2] GRELLMANN, Wolfgang a Sabine SEIDLER, c2007. Polymer testing. Cincinnati, Ohio: Hanser. ISBN 978-1-56990-410-7.
- [3] Firemní literatura
- [4] Časopisecká literatura – vyhledání je součástí diplomového úkolu

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

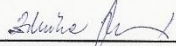
Ing. Zdeňka Jeníková, Ph.D., ústav materiálového inženýrství FS


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


Datum zadání diplomové práce: **02.04.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **26.07.2019**

Platnost zadání diplomové práce: _____


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


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

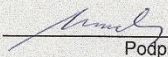

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

29. 4. 2019

Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně a to výhradně s použitím pramenů a literatury, uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne:

.....

Podpis

Anotace

Diplomová práce zpracovává v teoretické části rešerši na téma 3D tisk a technologii FDM (Fused Deposition Modeling) její proces výroby, problémy, které mohou při tisku nastat a základní materiály používané při této technologii. V praktické části je zpracováno měření mechanických vlastností, konkrétně tahových vlastností (mez pevnosti v tahu) materiálu ASA (=Akrylonitril-styren – akryl), při změně nastavení vnějších vrstev, struktury a zjištění vlivu pigmentu použitého materiálu na mez pevnosti.

Klíčová slova

3D tisk, aditivní technologie, FDM technologie, Fused Deposition Modeling, ASA, Akrylonitril-styren-akryl, mez pevnosti v tahu

Annotation

The diplom thesis deals with the theoretical part of the research on 3D printing and FDM technology (Fused Deposition Modeling), its production process, problems that may occur during printing and the basic materials used in this technology. The practical part deals with the measurement of mechanical properties, namely tensile properties (tensile strength) of ASA material (= acrylonitrile-styrene - acrylic), when changing the settings of the outer layers, structure and finding the influence of pigment used on the strength.

Keywords

3D print, FDM technology, Fused Deposition Modeling, ASA, additive technology

Poděkování

Tímto chci poděkovat p. Ing. Zdeňce Jeníkové Ph. D za nesmírnou trpělivost a odborné rady při psaní této práce. Dále bych chtěl poděkovat firmě Prusa Research s.r.o, že mi bylo umožněno připravit vzorky v jejich laboratoři a v neposlední řadě mé přítelkyni a rodině, kteří mi vždy byli a jsou oporou.

Seznam zkratek

A	[mm ²]	Průřez
ABS		Akrylonitril butadien styren
ASA		Akrylonitril styren-akryl
b ₁	[mm]	Šířka zúžené části
b ₂	[mm]	Šířka konců
CAD		Computer aided designed
EBM		Electron Beam Melting
DLP		Digital Light Processing
DMLS		Direct Metal Laser Sintering
F	[N]	Síla
FDM		Fused Deposition Modeling
FFF		Fused Filament Fabrication
F _m	[N]	První maximální síla
G-kód		Formát souboru
L	[mm]	Počáteční délka mezi čelistmi
L ₀	[mm]	Počáteční měrná délka
l ₁	[mm]	Délka zúžené části
l ₂	[mm]	Vzdálenost rozšířených částí
l ₃	[mm]	Celková délka
LOM		Laminated Object Manufacturing
m	[kg]	Hmotnost
PA		Polyamid
PC		Polykarbonát
PET		Polyethylentereftalát
PET-G		Polyethylentereftalát-glykol
PLA		Kyselina polymléčná
PP		Polypropylen

PS-HI		Houževnatý polystyren
R_m	[MPa]	Mez pevnosti
SLA		Stereolitografie
SLM		Selective Lase Melting
SLS		Selective Laser Sintering
STL		Formát souboru
TPE-(U)		Termoplastický polyuretan
TPU		Termoplastický polyuretan
V	[mm ³]	Objem
ε	[-]	Deformace
ρ	[kg/m ³]	Hustota
σ	[MPa]	Napětí
σ_m	[MPa]	Mez pevnosti v tahu

Obsah

1	Úvod	7
2	Motivace.....	8
3	Cíl práce	8
4	Aditivní technologie	9
4.1	Metody aditivních technologií dle stavebního materiálu	10
5	Technologie FDM	12
5.1	Historie a princip.....	12
5.1.1	Stavební materiál	12
5.1.2	Materiál podpor.....	13
5.1.3	Využití FDM.....	13
5.2	Proces výroby.....	14
5.2.1	CAD model.....	14
5.2.2	Konverze do STL	14
5.2.3	Generování G-kódu	14
5.2.4	Tisk objektu.....	15
5.2.5	Dokončovací úpravy	15
5.3	Parametry tisku	15
5.3.1	Nastavení trysky.....	16
5.3.2	Nastavení teploty podložky.....	16
5.3.3	Nastavení polohování	16
5.3.4	Nastavení výplně (Infill).....	16
5.3.5	Nastavení rychlosti tisku.....	17
5.3.6	Nastavení horizontálního pláště.....	18
5.3.7	Nastavení perimetrů	18
5.4	Problémy při tisku	19
5.4.1	Odlupování první vrstvy	19
5.4.2	Posunutí vrstvy	19
5.4.3	Stringování.....	19
5.4.4	Zakřivení okrajů	20
5.5	Materiály pro FDM	21
5.5.1	PLA.....	22
5.5.2	PET	22
5.5.3	PET-G.....	22
5.5.4	ABS	23

5.5.5	TPE-U (TPU).....	23
5.5.6	PS-HI	23
5.5.7	PP	24
5.5.8	NYLON (PA)	24
5.5.9	ASA	24
5.5.10	PC.....	25
6	Analýza měření.....	26
6.1	Zkouška tahem	26
6.1.1	Zkušební těleso	26
6.1.2	Deformační křivka.....	27
6.1.3	Napětí v tahu	27
6.1.4	Mez pevnosti	27
6.1.5	Poměrné prodloužení	28
6.2	Příprava vzorků	28
6.2.1	Model zkušební tělesa.....	30
6.2.2	Příprava G-kódu.....	30
6.2.3	Tisk vzorků.....	30
6.3	Návrh měnitelných parametrů	31
6.3.1	Vliv pigmentu.....	31
6.3.2	Procento výplně	31
6.3.3	Struktura výplně.....	32
6.3.4	Počet perimetrů	32
6.3.5	Vnější vrstvy (Top layer – Bottom layer).....	32
6.3.6	Struktura honeycomb	33
6.4	Měření zkušebních vzorků.....	33
6.4.1	Tahová zkouška	33
6.4.2	Měření hustoty	34
6.4.3	Zkoumání lomových ploch	34
6.4.4	Zkoumání struktury pod světelným mikroskopem	34
7	Výsledky měření	35
7.1	Vliv pigmentu na mez pevnosti v tahu	35
7.2	Vliv procentuální výplně na pevnost v tahu	39
7.3	Vliv vnějších vrstev na mez pevnosti	41
7.4	Vliv struktury výplně na mez pevnosti	43
7.5	Vliv perimetru na mez pevnosti.....	45
7.6	Vliv měnitelných parametrů na strukturu honeycomb.....	48

8	Diskuze výsledků	49
9	Závěr.....	50
10	Seznam obrázků	51
11	Seznam tabulek.....	52
12	Seznam grafů.....	53
13	Seznam použitého softwaru	54
14	Seznam použitého zařízení.....	55
15	Seznam uvedených rovnic.....	55
16	Literatura.....	56
17	Přílohy	59

1 Úvod

Aditivní technologie vznikla v 80. letech 20. století. Patří mezi nekonvenční technologie, protože materiál je nanášen postupně po vrstvách, a tím vytváří požadovaný produkt. Na rozdíl od technologie konvenční, která materiál postupně odebírá, aby vyrobila model do požadované podoby.

Aditivní technologie nachází široké uplatnění v automobilovém, leteckém a zdravotnickém průmyslu. V automobilovém a leteckém průmyslu se používá především k výrobě prototypů, jelikož jeho nespornou výhodou je rychlost, jakou se dostane virtuální model do podoby reálné. Ve zdravotnictví je to schopnost vyrábět pomůcky a implantáty „na míru“. Zároveň není nijak omezen náročností a komplikovaností výrobku. Díky této nové technologii a výrobě vznikají nové obory zaměřené na optimalizaci a úsporu materiálu při zachování mechanických vlastností.

Technologie FDM je nejpoužívanější metodou aditivních technologií. Je rozšířená mezi domácími kutily, a to především díky její pořizovací ceně. Používá se nejen pro tisk dekorativních prvků, ale i pro jednoduché mechanicky nenamáhané součástky.

2 Motivace

Při výrobě metodou FDM vstupuje do tisku množství volitelných parametrů, kterými můžeme ovlivnit výslednou podobu a mechanické vlastnosti samotného výrobku. Software určený k volbě parametrů skýtá možnosti, jak mechanické vlastnosti změnit a dále je zlepšit. Tím můžeme zvýšit efektivitu po stránce rychlosti, úspory materiálu a zlepšení mechanických vlastností.

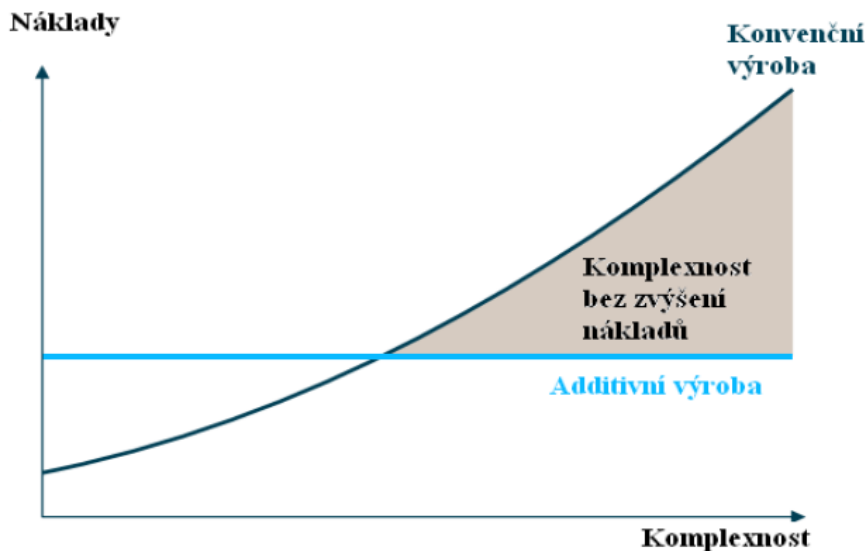
3 Cíl práce

Cílem práce je provést rešerši na téma Problematika 3D tisku technologií FDM a zjištění mechanických vlastností zkušebního tělíska vytištěného na 3D tiskárně pomocí technologie FDM. Následně provést porovnání vlivu možnosti nastavení parametrů tisku na výslednou pevnost v tahu a zanalyzování výsledků, pro zjištění parametrů, které mají na výslednou pevnost v tahu největší vliv.

4 Aditivní technologie

Jedná se o nekonvenční technologii, která je opakem k subtraktivním procesům výroby. Subtraktivní procesy vytváří výrobek za pomoci odebrání materiálu (patří mezi ně např. soustružení a frézování). Princip aditivní technologie spočívá v nanášení vrstvy na další vrstvu, a tím vytváření požadovaného objektu. Tudíž materiál neodebírání, ale pro vytvoření objektu ho naopak přidává. Jedná se o podobný proces jako při obyčejném tisku inkoustových tiskáren (které tisknou pouze v horizontálních osách X a Y) s tím rozdílem, že je navíc přidána vertikální osa Z. To přináší výhody v podobě možnosti výroby složitějších a tvarově náročnějších modelů. Největší uplatnění nachází metoda aditivních technologií v oblasti pro tzv. Rapid prototyping, což je výroba prototypů za pomoci 3D tisku, kde hlavní výhodou je rychlost přechodu z virtuálního modelu do modelu reálného. Samotné modely jsou navíc modelovány mnohem kratší dobu než konvenční metodou a lze si je tedy i rychle a snadno odzkoušet. Mezi hlavní zkušební kritéria patří funkční vlastnosti, tvar a celková ergonomie. Tyto prototypy jsou většinou nevhodné k většímu zatížení. Díky zrychlení celého procesu výroby prototypu je významně zkrácena doba návrhu, a tím je zvětšena možnost reagovat na případné nesrovnalosti v konstrukci. Mezi další výhody patří možnosti úspory materiálu. Jednak lze materiál ušetřit za pomoci topologické optimalizace výrobku, kde jsme schopni navrhnout model při zachování mechanických vlastností s úsporou až 30 % materiálu. Dále lze uspořit materiál tím, že při procesu výroby vzniká malé až nulové procento odpadu. Mezi nevýhody patří horší mechanické vlastnosti v důsledku anizotropních vlastností, které vznikají už z podstaty samotné výroby. Dále nutnost výsledné výtisky podrobit dokončovacím úpravám za pomoci konvekčních technologií a z hlediska jednoduchých výtisků neekonomičnosti produkce. [8,23]

Aditivní technologie jsou z hlediska ekonomického zhodnocení vhodné pro malosériové a tvarově náročné výrobky. Jejich hlavní výhodou je, že při náročnějším tvaru výrobku jeho cena nestoupá jako je tomu u konvenčních technologií. Proto není výhodné jednoduché díly aditivní technologií sériově vyrábět. [23]



Obr. 1 Ekonomické srovnání konvenční a aditivní výroby [23]

4.1 Metody aditivních technologií dle stavebního materiálu

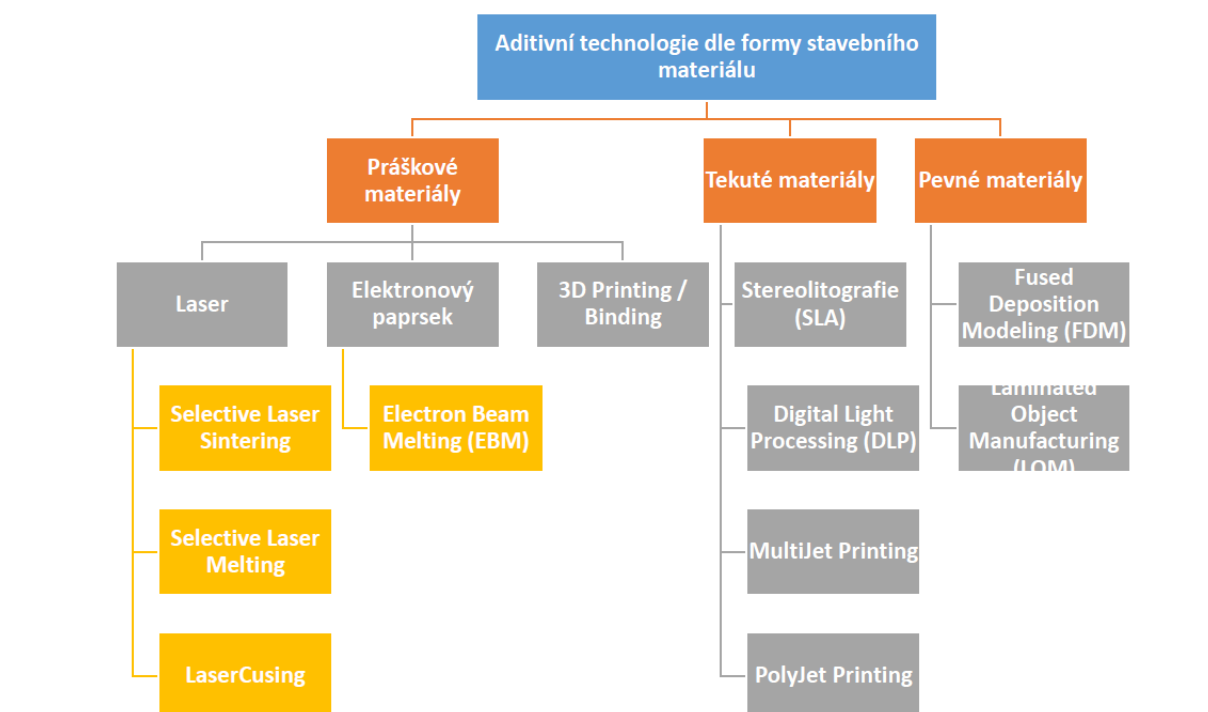
V dnešní době existuje celá řada aditivních technologií, které lze rozdělit dle několika kritérií. Nejvhodnějším kritériem je stavební materiál (materiál, ze kterého jsou objekty tištěny). Rozdělujeme ho do tří kategorií, a to podle substance, ve které je samotný materiál tištěn. Celkem se nachází ve třech substancích, a to jako práškový materiál, tekutý materiál a pevný materiál.

Práškový materiál, se používá pro technologie SLS (Selective laser sintering), kde hlavním principem je nanášení práškového materiálu po vrstvách, které jsou k sobě spékány laserem. Na stejném principu je založena i metoda EBM (Electron Beam Melting), akorát místo laseru využívá elektronový paprsek. Práškové materiály jsou používány jak pro tisknutí výrobků z kovů tak z plastů. Nevýhodou je nutnost při tisku kovů použití ochranných atmosfér (přidávání inertních plynů jako dusík nebo argon). Dále jemnost práškového materiálu, který může pronikat do plic a způsobovat závažné dýchací potíže. Proto je potřeba při výměně materiálu ze zásobníku použití ochranných pomůcek a zvýšené ochrany zařízení před únikem tohoto materiálu. Výhodou je rychlost tisku (oproti ostatním aditivním technologiím jedna z nejrychlejších), a mechanické vlastnosti vyrobeného objektu.

Tekutý materiál je využíván technologiemi SLA (Stereolytografie) a DLP(Direct Light Processing) jejichž princip spočívá postupném vytvrzování fotopolymerních materiálů. Rozdílem je, že u technologie SLA jsou vrstvy postupně vytvrzovány laserem, zatímco u technologie DLP jsou vytvrzovány digitálním projektorem, což je se srovnáním technologie SLA mnohem rychlejší způsob tisku. Aplikovaným materiálem jsou fotopolymerní epoxidové pryskyřice,

kteře reagují se světlem. Nevýhodou takto vyrobených objektů je právě reakce materiálu na světlo, a proto vytištěné objekty z fotopolymerních materiálů nemají dlouhou životnost. Naopak výhodou je velmi vysoká přesnost. Další skupinou jsou nové technologie MultiJet Printing a PolyJet printing. Zde jsou vrstvy nanášeny pomocí hlavy, na které jsou desítky trysek. Nanesený materiál je následně vytvrzován pomocí UV záření. Jedná se o nejrychlejší a zároveň velmi přesné metody 3D tisku.

Pevné materiály jsou používány u metod FDM (Fused Deposition Modeling), kde je materiál ve formě filamentu nataven přes extruder po trysku postupně nanášen vrstvu po vrstvě. Nevýhodou je dlouhá doba tisku. Metoda LOM (Laminated Object Manufacturing) využívá materiál ve formě plastového papíru, který je stříhán a lepen vrstvu po vrstvě na sebe. Nevýhodou u této metody je nízká přesnost a vysoký podíl odpadu. [2,23]



Obr. 2 Přehled a rozdělení aditivní výroby z hlediska materiálu [23]

5 Technologie FDM

5.1 Historie a princip

Fused Deposition Modeling (FDM) je jednou z nejrozšířenějších metod profesionálního 3D tisku, někdy také označované jako FFF (Fused Filament Fabrication). Tyto dvě zkratky znamenají to samé s tím rozdílem, že zkratka FDM je registrovaná ochranná značka společnosti Stratasys, a tedy ji ostatní výrobci nemůžou používat.

Roku 1989 Steven Scott Crump (pozdější zakladatel firmy Stratasys) zažádal o patent na stroj, který dokázal pomocí pohyblivé hlavy ukládat roztavený materiál v horizontálních osách X, Y a vertikální ose Z. Ten po vyextrudování chladl a postupně získal pevné skupenství společně s finálními mechanickými vlastnostmi. Tím, že Stratasys držel patent na takto obecný model, se ve vývoji FDM tiskáren neodehrával zásadní konkurenční boj. Zlom přišel až v roce 2009, kdy patent vypršel a vznikly nové firmy, které se začaly vývojem 3D tiskáren na principu FDM zabývat.

Princip FDM spočívá v natavení plastu nebo kovu ve formě filamentu (vlákna) uvnitř extruzní hlavy, která taveninu vytlačuje na podložku a svým pohybem ve dvou osách postupně nanáší velmi tenkou vrstvu materiálu v rovině horizontálního průřezu budoucího výrobku. Po nanesení celé vrstvy se podložka sníží o tloušťku vrstvy ve vertikální ose. Tato tenká nanesená vrstva zchladne. A postupné nanášení pokračuje nanovo až do vytvoření celého produktu.

Doba tisku závisí na velikosti vyráběného objektu. Malé objekty se tisknou rychle, zatímco větší a tvarově složitější se tisknou déle. Ve srovnání s jinými metodami jako je stereolitografie (SLA) nebo (SLS) „Selektivní laserové slinování“ je FDM poměrně pomalý proces.

Nanesený materiál můžeme z hlediska funkce rozdělit na dva typy, a to stavební materiál a materiál podpor. [2,16,18,19]

5.1.1 Stavební materiál

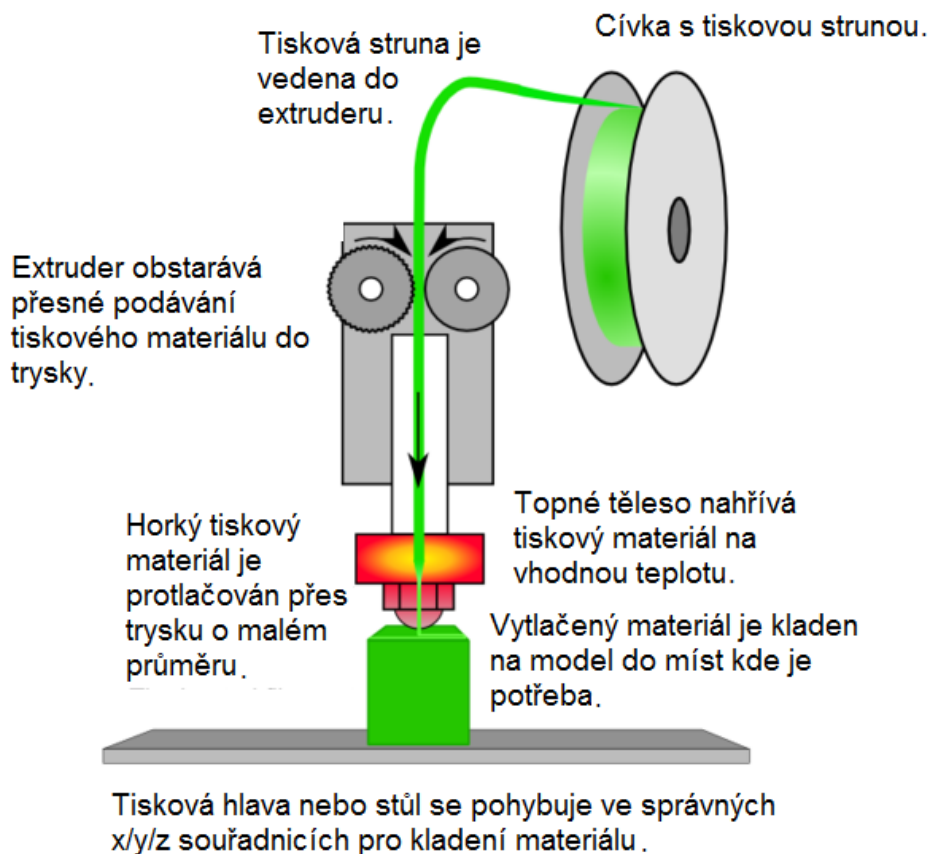
Jedná se o materiál, který slouží pouze k tisku našeho objektu. Stavební materiál je dodáván ve formě filamentů o průměru 1,75 mm až 3 mm (namotaného drátu). Nejčastěji se tiskne z materiálu PLA a ABS. Více o tomto materiálu naleznete v kapitole Materiály pro FDM. [23]

5.1.2 Materiál podpor

Jelikož princip FDM spočívá v nanášení vrstvy po vrstvě. Může nastat případ, kdy bude potřeba tisknout část objektu „v prostoru“ bez spodních vrstev. Pro tyto případy se nanášejí tzv. podpory, které slouží k tomu, aby se objekt při tisku nezbortil. Jako podpora se může jednat o ten samý materiál, ale s rozdílnou vnitřní výplní, anebo jiný materiál, který je možné chemicky odstranit, či rozpustit ve vodě. Podpory je tedy po dokončení tisku potřeba odstranit. Z důvodů nutnosti aplikace více materiálů, jsou vyráběny tiskárny s větším počtem extruzních hlav.

5.1.3 Využití FDM

Technologie FDM nachází uplatnění především v automobilovém průmyslu při výrobě funkčních prototypů. Mezi další průmyslová odvětví patří zejména zdravotnictví, stavebnictví a kosmonautika.[2]



Obr. 3 Princip technologie FDM [3]

5.2 Proces výroby

5.2.1 CAD model

Ze začátku se vyhotoví CAD model, tj. digitální model vytvořený v aplikaci CAD (computer-aided design = počítačem podporované projektování). Jedná se o software, který obsahuje grafické a geometrické, matematické a inženýrské nástroje pro kreslení plošných výkresů, modelování objektů a dějů reálného světa. Pro vytvoření tohoto digitálního modelu, existuje celá řada profesionálních programů specializovaných pro konkrétní obor použití jako je stavebnictví a architektura, strojírenství, elektrotechnika a další. [14]

5.2.2 Konverze do STL

Po vytvoření CAD modelu, je následně samotný model konvertován do formátu STL (Standard Triangulation Language). Je používán od roku 1987 a byl původně vyvinut pro stereolitografii. Dnes se jedná o nejpoužívanější datový formát pro 3D tisk. Povrch modelu je reprezentován jako soubor trojúhelníků různých velikostí v závislosti na požadovaném rozlišení. Čím vyšší je rozlišení tím menší je velikost trojúhelníků (hladší povrch modelu), ale zato delší čas výpočtu. STL model je rozdělen do velmi tenkých vrstev podél roviny os X a Y. Každá vrstva je postavena na vrstvu přechází a pohybuje se nahoru ve směru osy Z [15].

5.2.3 Generování G-kódu

Model ve formátu STL je následně importován (vložen) do příslušného softwaru aditivního zařízení, kde jsou nastaveny jeho parametry tisku jako teplota extruderu, teplota podložky, pojzdová rychlost, hustota výplně atd. viz. kap. Parametry tisku. Většina programů jednotlivé parametry automaticky přednastavuje, a to vzhledem k co nejkratší době tisku při zachování vizuální kvality. Jediné, co musí uživatel zvolit, je materiál, ze kterého má být objekt vytištěn. Pro náročnější uživatele existuje možnost si parametry individuálně nastavit dle potřeby. Po nastavení parametrů je třeba vygenerovat tzv. G-kód, který definuje dráhu v prostoru kartézských souřadnic. Jedná se o program, jež nejen udává polohu trysky, ale obsahuje i veškeré informace našich přednastavených parametrů.[16,18,19]

5.2.4 Tisk objektu

Vygenerovaný G-kód se nahrává na SD kartu a vkládá do tiskárny. Následně dojde k přehřátí extruderu a podložky na přednastavenou hodnotu. Materiál je v podobě drátu vtlačěn do extruderu, kde se nataví, a přes trysku je vytlačován. Po dokončení přehřevu je nanесena základní vrstva, a poté jsou nanášeny další vrstvy na sebe. To je umožněno buď posuvem extruderu, anebo modelovací desky ve vertikální ose Z. U technologie FDM dochází k posuvu extruderu ve směru osy X a Y a posuv modelovací desky ve směru osy Z. Proces tisku je automatický a není třeba (pokud nedojde k chybě) do něho zasahovat.[16,18,19]

5.2.5 Dokončovací úpravy

Po dokončení tisku se musí objekt nechat vychladnout. Poté je třeba ho vyjmout z prostoru tiskárny a odstranit podpory, které drží vysunuté části objektu. Podpory lze odstranit dvěma způsoby, a to buď mechanicky anebo chemicky. Mechanicky lze oddělit odloupenutím či řezáním. Chemicky lze oddělit, pokud jsou podpory tisknuty z jiného materiálu než je stavební, a je možné je v určité chemické látce rozpustit. Po odstranění podpor je možné objekt vizuálně lépe upravit, a to zpravidla broušením, leptáním či tryskáním. Po dokončení úprav je objekt připraven k použití. [16,18,19]

5.3 Parametry tisku

Parametry tisku se nastavují s ohledem na vybavení a možnosti konkrétní 3D tiskárny. Jedná se především o topná tělesa (jako je vyhřívaná podložka nebo tryska), konstrukci a pohon tiskárny.

Veškeré parametry tisku se nastavují v příslušném softwaru určeném pro 3D-tiskárnu. Především, než dojde k nastavení jednotlivých parametrů, je potřeba náš model vytvořit v CADu, ve kterém se následně transformuje do formátu STL, a následně vygenerovat G-kód. V průběhu tisku lze některé parametry měnit jako například rychlost tisku (kdy může dojít ke špatnému vytlačování materiálu), průtok materiálu, teplotu trysky (kdy materiál není dostatečně nataven), vertikální polohu trysky (kdy je první vrstva nanесena příliš blízko podložky a následující vrstva by při nanášení mohla poškodit vrstvu předchozí) a otáčky ventilátoru chlazení tisku (výfuk po vyjmutí z podložky vlivem velkého vnitřního pnutí praskají).[3]

5.3.1 Nastavení trysky

Pomocí trysky určujeme tloušťku vlákna, které bude postupně svařeno. Její tloušťku lze nastavit v určitém rozmezí. Obvykle 0,1 mm až 0,4 mm. Menší výška vrstvy vytváří hladší části a přesněji zachycuje zakřivené geometrie, zatímco větší výška vytváří součást rychleji a s nižšími náklady. Nejčastěji se používá výška vrstvy 0,2 mm.[3]

Dále můžeme nastavit teplotu trysky, při které bude náš požadovaný materiál nanášen. Většina tiskáren už má teploty tisku pro daný materiál přednastaveny, přesto lze tento parametr upravit. [3]

5.3.2 Nastavení teploty podložky

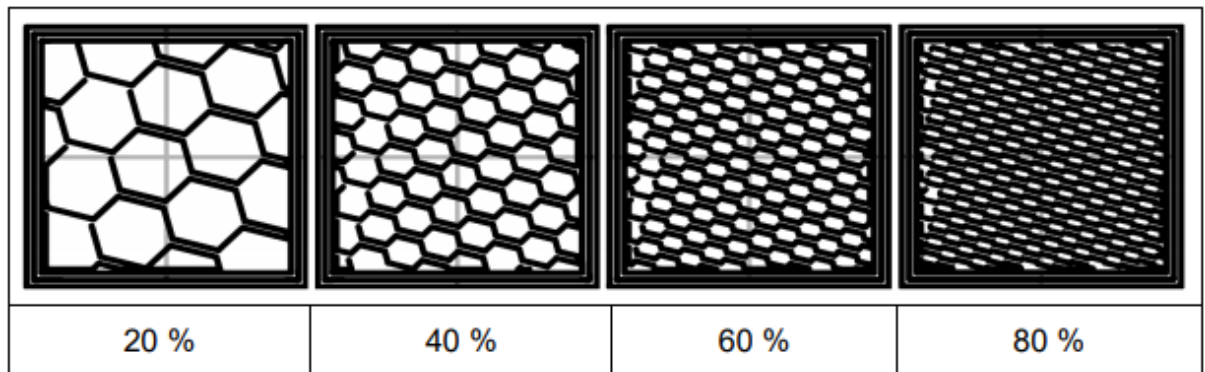
Nastavení teploty podložky se uplatňuje především u materiálů, které po ochladnutí mají značnou tendenci se smršťovat, a tím vytvářejí vnitřní pnutí. Zároveň dochází k nedokonalému tisku a to tím, že se jednotlivé filamenty k sobě dostatečně nesvaří. Teplota podložky se především nastavuje u ABS a ASA.[3]

5.3.3 Nastavení polohování

Správným nastavením polohování můžeme především dosáhnout úspory doby tisku. Případně můžeme i zlepšit nanášení materiálu a docílit tak zlepšení mechanických vlastností našeho výtvaru. Při této činnosti lze uspořit značnou část času, ale i docílit lepších mechanických vlastností. Především lze nastavit i tloušťku jednotlivých vrstev, po kterých lze tisknout, a tím zvětšit přesnost. [3]

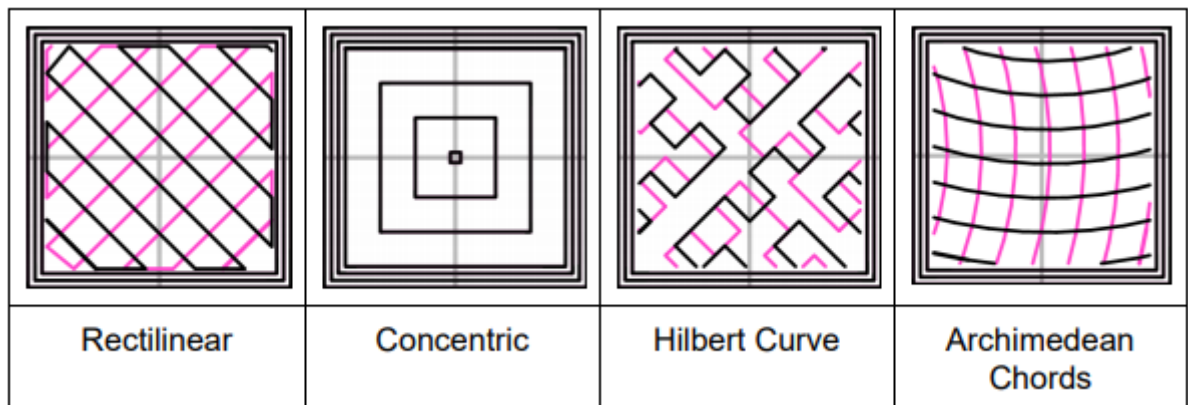
5.3.4 Nastavení výplně (Infill)

Nastavení výplně je jedna z mála funkcí, kde můžeme uspořit značnou část materiálu. Zejména pokud tiskneme duté objekty. Hustotu výplně můžeme nastavit od 0 % do 100 %. Ovšem nedává příliš smysl vyplnit model plastem z důvodů dlouhé doby tisku. Místo toho může být většina modelů naplněna menším množstvím materiálu, který je pak vložen mezi vrstvy naplněné na 100 %. Hodnota hustoty 40 % stačí k tomu, aby téměř všechny modely měly dobrou mechanickou pevnost. Hodnota 20 % je obvykle minimum potřebné pro podporu plochých stropů.[4]



Obr. 4 Procentuální výplň struktury honeycomb[20]

Existuje možnost nastavit různou strukturu výplně. Při výběru výplňového vzoru existuje několik úvah: objektová síla, čas a materiál. Lze vyvodit, že složitější vzor bude vyžadovat více pohybů, a proto doba tisku bude trvat více času a spotřebuje daleko více materiálu. Na obrázku jsou znázorněny pro představu 4 struktury výplně z programu Slic3r.[4,20]



Obr. 5 Struktury výplně[20]

5.3.5 Nastavení rychlosti tisku

Nastavením rychlosti ovlivníme především tvar samotného výtisku. Při nastavení je tedy nutné brát ohled na velikost samotného objektu. Zároveň lze nastavit rychlost zvlášť pro perimetry (vnější plášť vytištěného objektu) a pro výplň. Pro perimetr se udává především menší rychlost z důvodu lepší tvarové a celkové vizuální kvality. Zatímco u výplně se nastavuje vyšší rychlost z důvodu úspory času.[4]

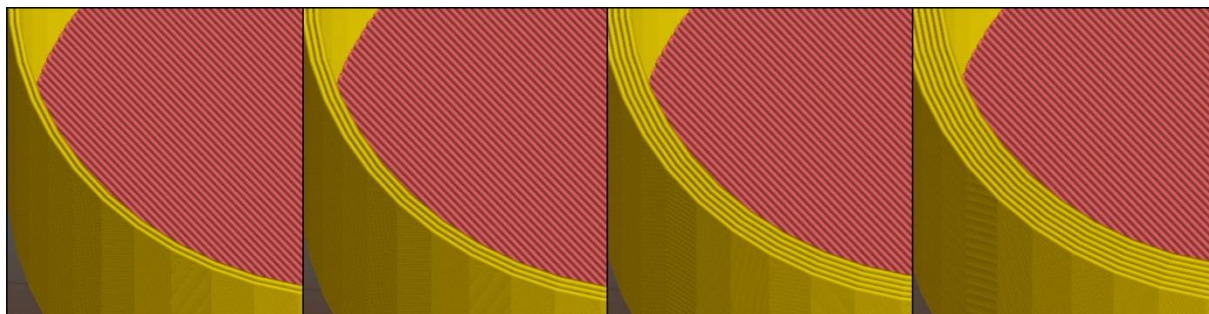
5.3.6 Nastavení horizontálního pláště

Číslo v tomto nastavení značí, kolik plných vrstev bude tvořit horní (Top) a spodní (Bottom) podstavu objektu. Podstava objektu je umístěna na tiskové podložce a dosahuje nejlepší vizuální kvality. Zpravidla není potřeba použít na spodní vrstvy dokončovací úpravy. Z hlediska tvarového se může jako nežádoucí prvek projevit větší šířka spodních vrstev oproti ostatním. To může být způsobeno nevhodnou teplotou podložky, anebo jinak nastavenou šířkou pro první vrstvu.

Horní podstava už nedosahuje takové vizuální kvality jako podstava spodní, jelikož vytištěná tělesa nejsou plná a vrchní vrstvy jsou tak nanášeny na nepravidelnou výplň. Proto je vhodné použít více vrstev, aby nedošlo k případnému zhroucení tělesa a zároveň došlo ke zlepšení povrchu objektu.[5,20]

5.3.7 Nastavení perimetrů

Nastavené číslo udává, kolik vláken bude tvořit vytištěný vnější plášť objektu. Čím vyšší číslo, tím více vláken, a tím pádem i tlustší stěna i prodloužení doby tisku. Nastavení se používá zejména pro vytištění šikmých ploch s nulovou výplní. Chyba spočívá v tom, že horizontální vrstevnice jsou nanášeny ve větší vzdálenosti a nedochází tak k ukotvení vlákna. Aby se vlákno dobře ukotvilo, je potřeba u takto složitých tvarů zvýšit počet perimetrů. Na obrázku jsou perimetry označeny žlutou barvou. [4,5]



Obr. 6 Nastavení perimetrů v programu Slic3r [5]

5.4 Problémy při tisku

5.4.1 Odlupování první vrstvy

Jedná se o nejčastější problém při 3D tisku. První vrstva je u 3D tisku naprosto zásadní, protože tvoří základ celého objektu. Pokud není perfektně přichycena, hrozí, že tisk nebude úspěšný. Při tisku se plast, začne odlepovat a nabalovat na trysku. Někdy může dojít k odlepení až po několika minutách, což vede k řadě dalších potenciálních problémů. K zajištění dobré přilnavosti je proto potřeba zajistit správnou kalibraci první vrstvy v *Nastavení první vrstvy*. Pokud je úspěšné, je možné začít s tiskem. Navíc během tisku je možné doladit osu Z a to v době, kdy tiskárna vytváří první tři vrstvy. Dále je vhodné připravit tiskovou plochu, zejména ji očistit, aby nebyla mastná. Před použitím materiálu jako ABS nebo PLA je vhodné použít 90% roztok isopropylalkoholu. [24]



Obr. 7 První vrstva [24]

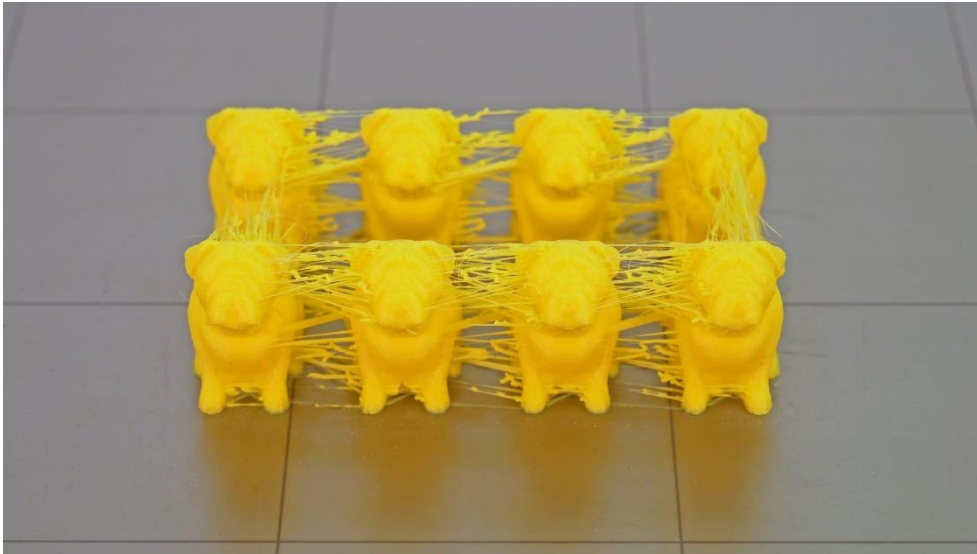
5.4.2 Posunutí vrstvy

Během tisku může dojít k horizontálnímu posuvu aktuálně tištěné vrstvy. Tento problém většinou způsobuje špatný pohyb jedné z os, což způsobí vychýlení trysky, které tiskárna nemusí zaznamenat. Proto dál pokračuje v tisku. Výsledkem pak je zub na tištěném objektu. U rozměrných, těžkých objektů (200-300g) nebo velmi komplexních modelů je doporučeno tisknout v Normálním režimu. Dále je potřeba překontrolovat řemeny na osách X a Y zda jsou dobře napnuté a taktéž zkontrolovat kladky na stejných osách zda jsou správně nasazené a volně se točí. Zároveň se na hladkých tyčích mohou vyskytovat nečistoty z předchozího tisku, který brání osám v hladkém pohybu. [24]

5.4.3 Stringování

Při stringování dochází k tomu, že za sebou tryska nechává tenká vlákna plastu, což má za následek „chlupaté výtisky“. Ke stringování dochází nejčastěji při tisku složitějších objektů, nebo pokud nejsou správně nastaveny parametry

tisku. Některé materiály ale mohou „stringovat“ při správném nastavení tiskárny např. PETG. [24]



Obr. 8 Ukázka stringování [24]

5.4.4 Zakřivení okrajů

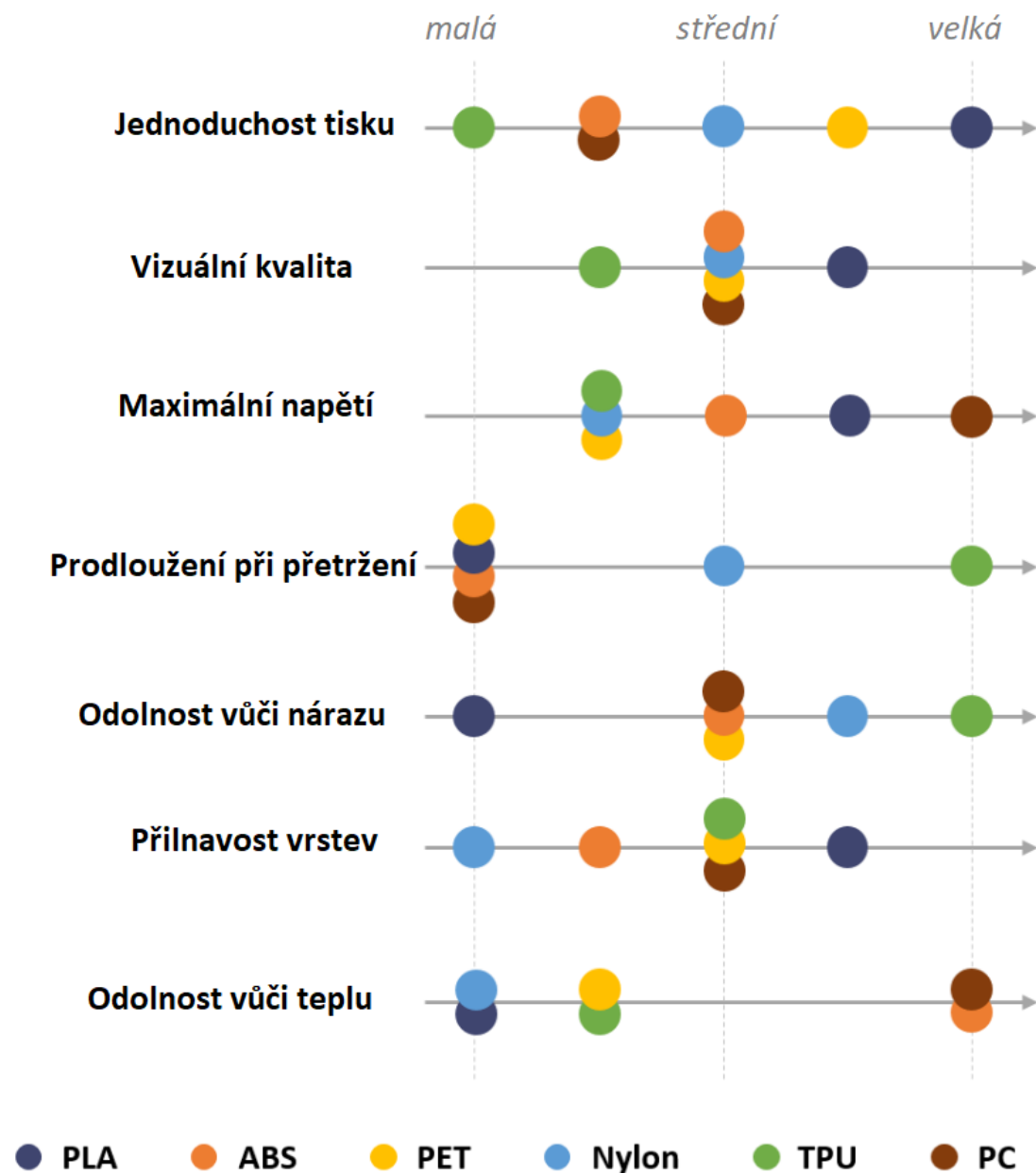
Zakřivení okrajů patří mezi nejčastější vady technologie FDM. Při ochlazení se vytlačený materiál postupně smršťuje. Protože se různé části tisku jinak rychle ochlazují mění se také jejich rozměry. Rozdílné chlazení způsobuje nahromadění vnitřních napětí, která přitahují podkladovou vrstvu směrem vzhůru, což způsobuje její deformaci. Z technologického hlediska, lze deformaci předejít sledováním teploty systému FDM (např. teplota podložky a trysky) a zvýšením adheze mezi dílem a podložkou. Z konstrukčního hlediska, lze deformaci předpokládat u objektů s velikou plochou ale i velmi tenkých vystupujících rysů (hroty). Zde se dá deformaci vyhnout přidáním materiálu na okraj tenké vrstvy, který je potřeba po vytištění mechanicky odebrat. Dále ostré rohy se deformují více než zaoblené tvary. Z hlediska materiálového je ABS mnohem citlivější na deformaci ve srovnání s PLA nebo PETG, kvůli vyšší teplotě skelného přechodu a relativně vysokému koeficientu tepelné roztažnosti. [19]



Obr. 9 Zakřivení okrajů u první vrstvy [19]

5.5 Materiály pro FDM

Jedná se především o termoplasty s nižší tepelnou roztažností, které lze zpracovávat při nízkých teplotách (do 300 °C). Materiál je aplikován ve formě struny do extruderu, kde je nataven a následně přes trysku postupně nanášen po jednotlivých vrstvách. Výhodou termoplastů je, že se dají po opětovném zahřátí znovu zpracovat. Jednotlivé materiály se liší jak vzhledem, tak vhodným nastavením parametrů tisku (zejména teploty tisku), nehledě po výslednou pevnost. Proto je na uživateli, jaké kritérium má pro něho prioritu. Na obrázku je uveden příklad základních termoplastických materiálů a hodnocení jejich kritérií.[1]



Obr. 10 Přehled základních materiálů používaných technologií FDM [25]

5.5.1 PLA

Polyactic acid (PLA), neboli kyselina polymléčná je nejčastějším používaným materiálem pro 3D tisk metodou extruze termoplastu, včetně technologie FDM. Tento termoplastický polyester je získáván z obnovitelných zdrojů např. z kukuřičného nebo bramborového škrobu. Jedná se o biologicky odbouratelný materiál, který se snadno tiskne a výtisky z něho jsou velmi tvrdé. Díky malé tepelné roztažnosti ho lze používat na tisk větších objektů a zároveň pro tisk menších modelů, a přitom není potřeba předehřát podložku. Jde o jediný materiál, který je ověřen pro tisk padesáti mikronových vrstev. PLA má relativně nízkou teplotu tání 175 °C, je tvrdý ale zároveň křehký, nicméně výrobky jsou z něj výrazně méně odolné než z ABS, navíc začíná měknout kolem šedesáti stupňů Celsia. To je nevýhoda zejména při dalších možnostech povrchových úprav jako je broušení, kdy brusný papír materiál rychle zahřeje a následně dojde k měknutí, proto je nutné materiál při těchto úpravách chladit. Lze ho použít u konceptů prototypů, hraček apod. Z materiálového hlediska mají vyšší lesk než například u ABS a při tisknutí produkují vůni smaženého rostlinného oleje. Doporučená teplota tisku je 185 - 235 °C. [10,11,26]

5.5.2 PET

Polyethylentereftalát (PET) je nejvíce běžně používaný plast na světě (láhve, oděvní vlákna, nádoby apod.). Vyrábí se z ethylenglykolu esterifikací s kyselinou tereftalovou. Jedná se o velmi houževnatý materiál s dobrou tepelnou odolností. Má velmi malou tepelnou roztažnost, a tudíž je vhodný pro tisk i větších modelů. Díky tomu ho lze univerzálně využít i pro tisk mechanických částí, a to jak uvnitř, tak i ve venkovním prostředí. Teplota tisku se udává 220 – 260 °C. [11]

5.5.3 PET-G

(Polyethylentereftalát-glykol) Písmeno G označuje glykol, který se přidává k materiálové kompozici během polymerace. Výsledkem je vlákno, které je jasnější, méně křehké a snadněji se používá než základní forma PET. Má velmi malou tepelnou roztažnost a na podložce se tedy nekroučí, a tudíž není problém s tiskem větších modelů. PET-G je navíc houževnatý a lehce pružný, tzn. že při namáhání se spíše ohne než praskne. Pro větší pevnost i tuhost se do něj přidává uhlíkové vlákno (PET-G/CF). Vytištěné materiály nabývají typického černého kovového vzhledu. Teplota tisku je 210 – 235 °C, zároveň je potřeba vyhřívaná podložka na 45 – 60 °C. Nutné je chlazení k zachování detailů výrobku. [11,12,26]

5.5.4 ABS

Akrylonitrilbutadienstyren je amorfní termoplastický průmyslový kopolymer, který je odolný vůči mechanickému poškození. Je tuhý, houževnatý, odolný proti nízkým i vysokým teplotám, málo nasákový, zdravotně nezávadný a vhodný pro vnitřní i venkovní použití. Jedná se o termoplast, což znamená, že může být opakovaně roztaven a krystalizován, aniž by došlo ke znehodnocení materiálu. Dále má vyšší teplotu tání (než PLA). Obsahuje příměsi syntetického kaučuku, je odolnější proti opotřebení a nárazům. Samotný filament je rozpustný v acetonu, díky čemuž můžeme vytisknuté díly i ručně spojovat. ABS je díky svým vlastnostem vhodný pro výrobu funkčních vzorků, nástrojů i pro výrobu věcí pro běžné použití. Není vhodný pro medicínální aplikace. Jelikož se jedná o ropný produkt, při jeho zahřívání uniká škodlivý zápach. Při tisku je nutné místnost větrat. Je náchylný na změnu teploty, což se projevuje smršťováním při tisku, a proto je nutné objekt pomalu ochlazovat. Teplota tisku se pohybuje od 220 – 240 °C, teplota podložky mezi 100 – 130 °C. Existují i další varianty ABS, které zvyšují jeho pevnost (ABS+), ulehčují tisk materiálu (ABS-T), či zlepšují estetické vlastnosti (ABSi). [11,12,26]

5.5.5 TPE-U (TPU)

Termoplastický polyuretan (TPU) je termoplastický elastomer, který je vyroben ze směsi tvrdých plastických polymerů a měkkých gumových materiálů. Jedná se o velmi silný materiál, který vyniká svojí pružností. Zároveň má velmi dobrou odolnost proti otěru, zůstává pružný i při nízkých teplotách. Při působení větší síly ho lze deformovat a díky své elasticitě zaujme svůj původní tvar. Použití má v běžném automobilovém průmyslu, ve zdravotnictví nebo ve výrobě pouzder na mobilní telefony. Je netoxický a schopný rozkladu. TPU vlákno dobře drží na většině povrchů (hliník, sklo). V závislosti na použitých příměsích velmi dobře odolává olejům a tukům, ale není vhodné jej vystavovat rozpouštědlům a kyselinám. Při tisku je nutné dbát na rychlost tisku, která by se měla pohybovat mezi 15 – 30 mm/s. Při vyšší rychlosti může dojít k ohnutí filamentu. Teplota tisku se pohybuje v rozmezí 240 - 260 °C a teplota podložky 40 - 60 °C. [26]

5.5.6 PS-HI

HiPS (high impact polystyrene-houževnatý polystyrén) je nový materiál pro 3D tisk. Svým nasazením v obalovém a potravinářském průmyslu naopak patří mezi nejpoužívanější materiály. Jedná se o termoplast neboli polystyren s přídavkem kaučuku. Je velmi pevný a houževnatý, má dobrou teplotní stálost. Používá se pro tisk na dvouhlavých 3D tiskárnách. Jedna hlava vytiskne podpůrné konstrukce z ABS nebo HiPS a druhá samotný model z ABS nebo HiPS. HiPS má vlastnostmi tisku mnohem blíže k ABS než PVA. ABS na HiPSu

drží lépe než na PVA. Díky menšímu kroucení při tisku jde o skvělý materiál pro tisk velkých objektů. Tiskové a mechanické vlastnosti jsou podobné ABS. Má však o něco menší tepelné smršťování. Lze ho brousit a povrchově upravovat. Teplota tisku se udává mezi 220 – 240°C a teplota podložky 100 – 120 °C.[26]

5.5.7 PP

Polypropylen (PP) je termoplastický polymer ze skupiny polyolefinů. Je jeden z nejpoužívanějších plastů, zvláště jako obalový materiál. Používá jej textilní i potravinářský průmysl. Polypropylen má velmi dobré mechanické vlastnosti, snese vyšší provozní teplotu než ABS nebo PLA a je odolný vůči řadě chemikálií. Netrpí stejnými problémy jako polyetyleny a vypadá pro budoucí použití velmi slibně. V současné době se hledá vhodný materiál pro tiskový stůl při použití PP. [26]

5.5.8 NYLON (PA)

Syntetický polymer tvořen peptidickými vazbami označovaný jako polyamid (PA). Je to nesmírně silný, odolný a všestranný materiál. Je flexibilní v tenkých vrstvách, ale s velmi vysokou adhezí (přilnutím) mezi vrstvami. Jeho nízký součinitel tření a vysoká teplota tání je vynikající volbou pro tisk funkčních a technických dílů. Je velmi hygroskopický, to znamená, že rychle absorbuje vodu ze vzduchu. Aby tisk s nylonem byl úspěšný, musí být vlákno suché. Pokud suché není, vzniknou na materiálu bublinky. Suché nylonové vlákno tiskne hladké předměty s lesklým povrchem. Nylon je velmi citlivý na vlhkost. Pro jeho skladování je nutné použít uzavřenou nádobu s odvlhčovačem. 3D nastavení tiskárny pro tento materiál je podobné těm, které se používají pro ABS vláken. Adheze k tiskovému loži se zvyšuje s vyššími teplotami vytlačování. Doporučená teplota tisku 235 – 260 °C, teplota podložky 100 – 130 °C. Existují i další varianty jako Nylon 618, který má bílou barvu, dále Nylon 645 který je částečně jasný a Nylon FX256, který je mnohem méně křehký, a tudíž pevnější než ABS a PLA. [26]

5.5.9 ASA

Akrylonitril-styrén-akrylát má podobné vlastnosti jako ABS. Je odolný vůči větším teplotám a UV záření a je rozpustný v acetonu. Výhodou tohoto materiálu je dobrá mechanická odolnost, tuhost, odolnost proti teplotě, jednoduchá zpracovatelnost na 3D tiskárnách, kvalita tisku i při náročných detailech i pro malé objekty, výborné vrstvení tisknutého objektu, vynikající odolnost proti povětrnostním vlivům a zachování fyzikálních vlastností. Dále má nízkou hladinu

žloutnutí, což je velmi důležité pro aplikace, kde je dlouhodobě kladen důraz na vzhled. Další výhodou je jeho dobrá rozměrová stabilita. [6]

Jeho vhodné využití je pro výrobu prototypů, strojírenských nástrojů i koncových výrobků pro běžné použití včetně využití pro venkovní aplikace. Tisk je ucelený a pevný, vhodný i na malé detaily, vytisknutý objekt je lesklý. Zároveň má vyšší tuhost než ABS, a proto je příhodným materiálem pro náročné aplikace. Teplota tisku se udává 250 – 255 °C, teplota podložky 60 - 100 °C. [6,26]

5.5.10 PC

Polykarbonát je termoplastický materiál, který lze zařadit mezi nejodolnější filamenty. Velmi často se používá ve spojení s materiálem ABS, případně bývá jeho alternativou, a to především díky podobným vlastnostem, které PC nabízí. Díky rezistenci vůči nárazům je vhodný na namáhané výtisky, uplatnění nachází také v elektrotechnice a automobilovém průmyslu. Pro své elektroizolační a dielektrické vlastnosti (nevodí elektřinu) ho lze aplikovat i na tisk PC krabiček apod. Doporučená teplota tisku 250 - 290 °C, teplota podložky se udává 100 – 130 °C. Existuje i ve variantě s ABS (PC/ABS), kde vykazuje dobrý poměr mezi funkčností a opracovatelností. Má lepší odolnost proti nárazům než samotný PC nebo ABS. Je také více rozměrově stabilní a snadněji se tiskne. [26]

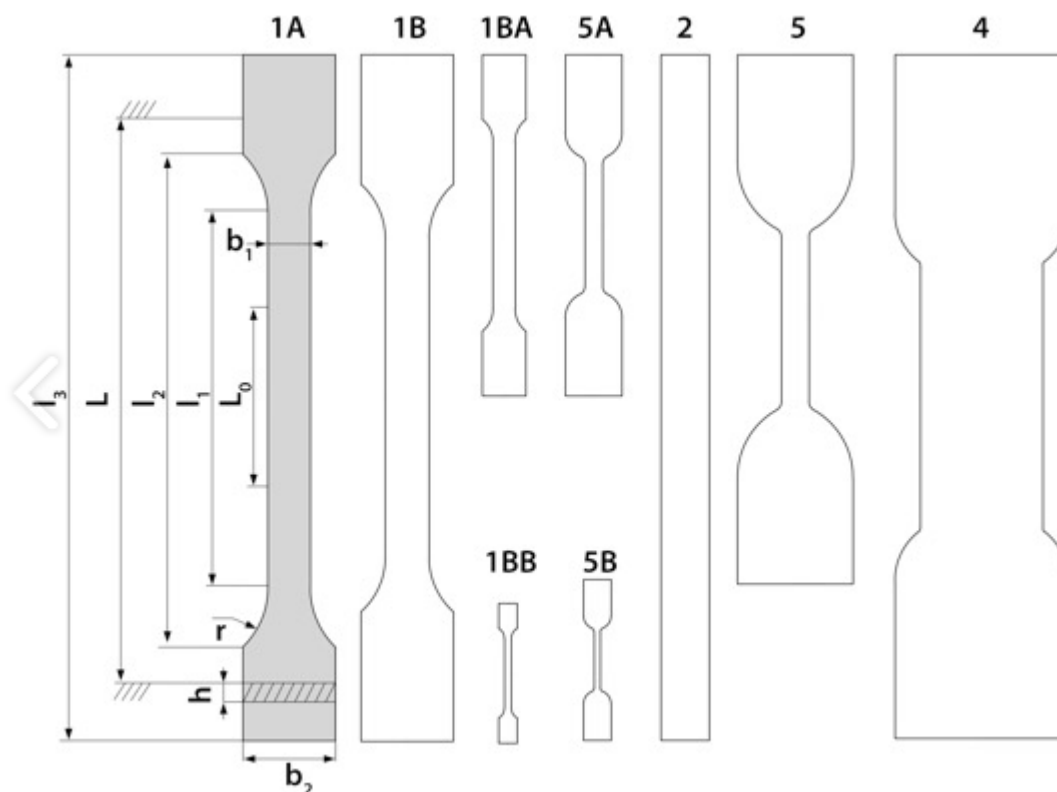
6 Analýza měření

6.1 Zkouška tahem

Tahové charakteristiky materiálu jsou jeho nejzákladnějšími mechanickými charakteristikami. Jestliže je zkušební těleso namáhané v tlaku, je možné průběh deformace sledovat pomocí deformační křivky, která poskytuje důležité informace o vlastnostech materiálu. Zkušební těleso je uchyceno do čelistí zkušebního stroje, kde je vystaveno tahové síle až do přetržení vzorku. Během zkoušky se zaznamenává závislost působící síly (F), na poměrné prodloužení zkušebního vzorku. [13,21]

6.1.1 Zkušební těleso

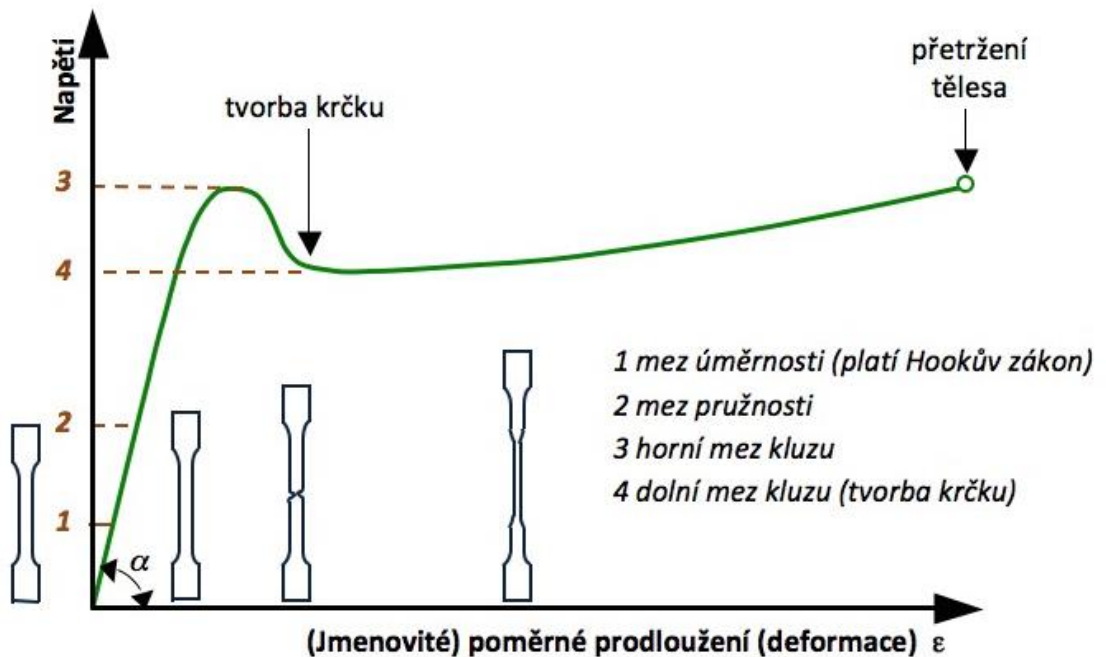
Tvar a rozměry těles jsou definované normou pro konkrétní materiál. Většinou se používají tělesa oboustranných lopatek, takzvaných osmiček, která umožňují dostatečné upevnění vzorku v čelistech zkušebního stroje a napětí je koncentrováno do zúžené části vzorku. [13,21]



Obr. 11 Tvary zkušebních těles [13]

6.1.2 Deformační křivka

Z deformační křivky jsou určovány veličiny jako mez pevnosti, napětí na mezi kluzu a napětí při přetržení. Jedná se o pevnostní charakteristiky, které popisují mechanické vlastnosti materiálu. [13]



Obr. 12 Deformační křivka při zkoušce tahem [13]

6.1.3 Napětí v tahu

Napětí se spočítá jako síla působící na průřez vzorku. Podle toho, jaké napětí chceme znát, použijeme sílu, která byla pro danou mez naměřena. [21]

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Rovnice 1 Napětí v tahu [21]

6.1.4 Mez pevnosti

Mez pevnosti je maximální napětí v tahu, které odpovídá největší síle (F_m) naměřené v průběhu zkoušky a jeho hodnota je stanovena na základě rovnice: [21]

$$\sigma_m = \frac{F_m}{A}$$

Rovnice 2 Mez pevnost [21]

6.1.5 Poměrné prodloužení

Pro materiály anebo zkušební podmínky, u kterých je převládající homogenní rozložení poměrného prodloužení pracovní části zkušebního tělesa, tj. pro poměrná prodloužení do meze kluzu, se vypočítají všechny hodnoty poměrného prodloužení definované podle následující rovnice: [21]

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0}$$

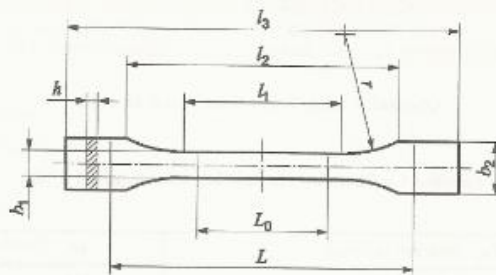
Rovnice 3 Poměrné prodloužení [21]

6.2 Příprava vzorků

Pro vyhodnocení mechanických vlastností jsem zvolil zkoušku tahem, abych získal pevnostní charakteristiky materiálu, především mez pevnosti v tahu. Jelikož neexistuje norma pro plasty vyrobené aditivními technologiemi, zvolil jsem tedy normu ČSN EN ISO 527-1 Plasty– Stanovení tahových vlastností.

Pro zkoušku tahem se používá těleso typu 1A anebo 1B, pokud není dáno jinak. Rozměry zkušebního tělesa jsou na obrázku č.14

Pro vytištění jsem vybral malé zkušební těleso 1BA (viz obrázek č.13), z důvodů kratší doby tisku, nízkého vnitřního pnutí a možnosti tisknout více těles najednou. Jelikož stanovená tloušťka je minimálně 2 mm rozhodl jsem se tisknout zkušební tělesa s tloušťkou 5 mm, a to abych lépe poměřil vnitřní výplně vzorků.



Obrázek A.1 – Zkušební tělesa typu 1BA a 1BB

Tabulka A.1 – Rozměry zkušebních těles typu 1BA a 1BB

Rozměry v milimetrech

Typ zkušebního tělesa	1BA	1BB
l_3 Celková délka	≥ 75	≥ 30
l_1 Délka zúžené části s rovnoběžnými hranami	$30,0 \pm 0,5$	$12,0 \pm 0,5$
r Poloměr	≥ 30	≥ 12
l_2 Vzdálenost mezi rozšířenými částmi s rovnoběžnými hranami	58 ± 2	23 ± 2
b_2 Šířka konců	$10,0 \pm 0,5$	$4 \pm 0,2$
b_1 Šířka zúžené části	$5,0 \pm 0,5$	$2,0 \pm 0,2$
h Tloušťka	≥ 2	≥ 2
L_0 Počáteční měřená délka	$25,0 \pm 0,5$	$10,0 \pm 0,2$
L Počáteční vzdálenost mezi čelistmi	$l_2^{+2}_0$	$l_2^{+1}_0$

POZNÁMKA Zkušební tělesa typu 1BA a 1BB jsou tvarově úměrná typu 1B, s poměrem zmenšení 1:2 popř. 1:5, s výjimkou tloušťky.

Obr. 13 Malá zkušební tělíska [22]

Pro tisk na zjištění vlivu perimetrů bylo zvoleno zkušební tělíska 1B, protože zkušební tělíska 1BA má příliš malou šířku zúžené části, kde bude mít číslo perimetru největší vliv na mechanické vlastnosti.

Rozměry v milimetrech

Typ zkušebního tělesa	1A	1B
l_3 Celková délka ^a	170	≥ 150
l_1 Délka zúžené části s rovnoběžnými hranami	80 ± 2	$60,0 \pm 0,5$
r Poloměr	24 ± 1	$60 \pm 0,5$
l_2 Vzdálenost mezi rozšířenými částmi s rovnoběžnými hranami ^b	$109,3 \pm 3,2$	$108 \pm 1,6$
b_2 Šířka konců	$20,0 \pm 0,2$	
b_1 Šířka zúžené části	$10,0 \pm 0,2$	
h Doporučená tloušťka	$4,0 \pm 0,2$	
L_0 Počáteční měřená délka (preferovaná)	$75,0 \pm 0,5$	$50,0 \pm 0,5$
Počáteční měřená délka (přípustná, jestliže se požaduje pro řízení kvality nebo když je předepsána)	$50,0 \pm 0,5$	
L Počáteční vzdálenost mezi čelistmi	115 ± 1	115 ± 1

^a Doporučená celková délka 170 mm pro typ 1A je v souladu s ISO 294-1 a ISO 10724-1. U některých materiálů smí být délka lopatek prodloužena (např. $l_3 = 200$ mm), aby se zabránilo porušení nebo prokluzování tělesa v upínacích čelistech zkušebního stroje.

^b $l_2 = l_1 + [4r(b_2 - b_1) - (b_2 - b_1)^2]^{1/2}$, pro l_1 , r , b_1 a b_2 , musí však být v určených mezích.

Obr. 14 Tabulka velkých zkušebních tělísek [22]

6.2.1 Model zkušební tělesa

Zkušební tělíska jsem namodeloval v CAD programu Solidworks Student Edition, dle přiložené normy ČSN EN ISO 527-1. Podle navržených délkových rozměrů uvedených v normě. Ve stejném programu byl i převeden do formátu *STL.

6.2.2 Příprava G-kódu

Jelikož jsme chtěli tisknout ve firmě Prusa Research s.r.o, byl vybrán software kompatibilní s jejich tiskárnami, a to jejich software Slic3r. V tomto programu je možnost upravit parametry tisku a připravit tak vhodné podmínky pro naše zkušební tělíska a především pro samotný tisk. Po nastavení veškerých parametrů a podmínek jsem výsledný formát převedl do G-kódu. Což je formát souboru, který tiskárna dokáže „přečíst“, a který obsahuje veškeré nastavené parametry tisku.

6.2.3 Tisk vzorků

G-kód jsem přenesl na SD kartu, kterou jsem vložil do tiskárny MK3 i3 ve firmě Průša. Ten jsem za pomoci SD karty vložil do tiskárny, kde jsem si připravil materiál ASA a předehřál jsem podložku na 110 °C a extruder na 265 °C. Jedná se o stejné nastavení jako u materiálu ABS. Vyčistil jsem povrch podložky isopropylalkoholem, aby vytisknuté vzorky byly snadno odnímatelné od podložky tiskárny. Zadal jsem tisk a počkal, až se model vytiskne. Po vytisknutí a ochlazení vzorku jsem následně model vyjmul z tiskárny. Celkem bylo vytištěn 57 zkušebních tělísek typu 1BA a 9 vzorků 1B.

Základní neměnné parametry a nastavení tisku jsou uvedeny v tabulce 1.

Tab. 1 Tabulka základních nastavení tiskárny

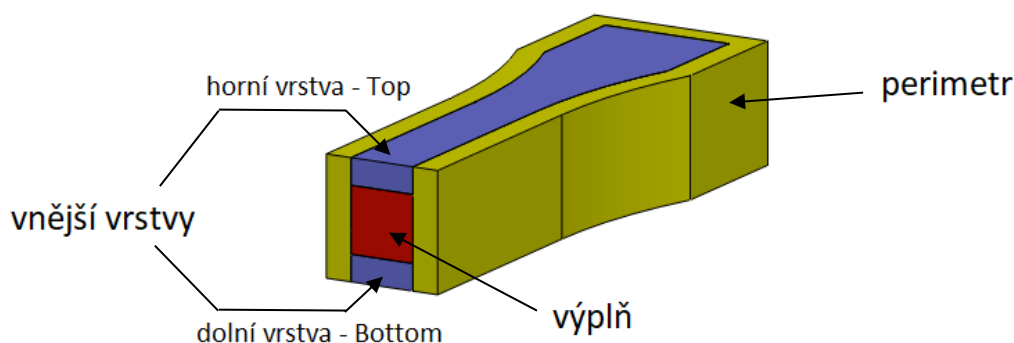
Teplota tisku	275 °C
Teplota podložky	110 °C
Nastavený mód	0.15 mm QUALITY MK3 *
Materiál	ASA

Tab. 2 *Tabulka módu 0,15 mm QUALITY MK3

Průměr vytlačovaného filamentu	0.15 mm
Rychlost posuvu pro perimetry	40 mm/s
Rychlost posuvu pro výplň	80 mm/s
Rychlost posuvu pro horní vnější vrstvu	40 mm/s
Rychlost nanášení první vrstvy	20 mm/s

6.3 Návrh měnitelných parametrů

Parametry jejichž hodnoty se měnily jsou zobrazeny na obr. č. 15.



Obr. 15 Schéma tisknutého vzorku

6.3.1 Vliv pigmentu

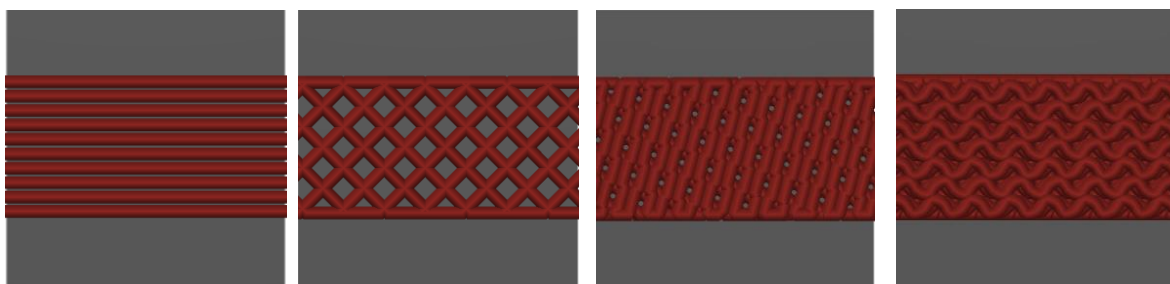
V této konfiguraci se jednalo o přání společnosti Průša, kde jsem měl zjistit vliv přidávaných aditiv na výsledný vzorek. Nejedná se o změnu parametru v softwaru, ale o změnu materiálovou. Vzorky byly tisknuty v konfiguraci při 100% výplni se dvěma perimetry, to znamená, že měly na každé boční straně dvě okrajové vrstvy. Parametr horních a spodních vrstev byl 2, což znamená dvě horní a dvě spodní vrstvy.

6.3.2 Procento výplně

Pro měření procenta výplně byly použity konfigurace s 80% výplní s 50% výplní a 15% výplní. Všechny tyto konfigurace měly číslo perimetru 2. Dalším společným parametrem byl počet horních a spodních vrstev, kde byly dvě horní a dvě spodní vrstvy a výplň tvořila struktura „včelích pláství“.

6.3.3 Struktura výplně

Pro struktury výplní byly použity celkem 4 výplně. Z hlediska možnosti použití při tisku vzorku byly vybrány tyto: výplň honeycomb, dále výplň concentric, výplň grid a výplň gyroid. Společnými parametry je počet perimetrů 0 (nebyly přidány boční okrajové vrstvy), hustota výplně 80 % a počet vnějších vrstev 2 (tzn. dvě horní a dvě spodní vrstvy), a to z důvodu lepšího uchycení na zkušebním trhacím stroji.



Obr. 19 Concentric

Obr. 18 Grid

Obr. 17 Honeycomb

Obr. 16 Gyroid

6.3.4 Počet perimetrů

Nejdříve byly porovnány vzorky s perimetrem 2 a bez perimetru, a to se strukturou honeycomb a grid. Jelikož se u těchto vzorků později potvrdil vliv perimetrů, byla připravena zkušební tělíska typu 1B s perimetrem číslo 2 dále číslem 5 a nakonec číslem 10. Pro tuto konfiguraci nemohla být doposud používána tělíska 1BA, neboť měla velmi malou šířku a vliv parametrů by tak nemusel být dostatečně patrný.

6.3.5 Vnější vrstvy (Top layer – Bottom layer)

Vnější vrstvy program Slic3r automaticky přednastavuje číslem 2. To znamená dvě horní a dvě spodní vrstvy. Je to z důvodu lepší vizuální kvality samotného vzorku. Vrstvy jsou nanášeny jako 100%, a tudíž budou mít z hlediska našeho měření pevnosti nezanedbatelný vliv. Proto byly připraveny vrstvy v konfiguraci 2-2 (2 horní – 2 spodní), 5-5 (a jelikož máme tělísko s tloušťkou 5 mm, tak i v konfiguraci 10-10). Společnými parametry tedy byla 15% výplň honeycomb a počet perimetrů číslo 2.

6.3.6 Struktura honeycomb

Při tisku všech dosud uvedených parametrů byla použita struktura honeycomb. Na této výplni jsem se proto rozhodl určit, který parametr měl kladný či záporný vliv na mechanické vlastnosti ve zkoušce tahem.

Tab. 3 Tabulka pro rekapitulaci tělísek typu 1BA

Název vzorku	Procento výplně	Struktura výplně	Číslo perimetru	Vnější vrstvy
A	100%	rectarliner	2	2
B	15%	Honeycomb	2	10
C	15%	Honeycomb	2	5
D	15%	honeycomb	2	2
E	50%	honeycomb	2	2
F	80%	Gyroid	2	2
G	80%	Rectaliner	2	2
H	80%	honeycomb	2	2
I	80%	Gyroid	0	2
J	80%	honeycomb	0	2
K	80%	grid	0	2
L	80%	concentric	0	2

Tab. 4 Tabulka nastavených parametrů pro zkušební tělíska typu 1B

Název vzorku	Procento výplně	Struktura výplně	Číslo perimetru	Počet vnějších vrstev
P2	80%	honeycomb	2	2
P5	80%	honeycomb	5	2
P10	80%	honeycomb	10	2

6.4 Měření zkušebních vzorků

6.4.1 Tahová zkouška

Tahová zkouška proběhla na Ústavu materiálové inženýrství Fakulty strojní ČVUT. K měření bylo použito zkušební trhací stroj ZD 10/90. Nastavené parametry zkoušky jsou popsány v Tabulce č. 3. Vzorky nebyly předem nijak upraveny. Ze zkoušky jsem získal grafy deformačních křivek viz. příloha, na jejichž základě jsem vyhodnotil meze pevnosti materiálu. Pro zkušební těleso bylo 1BA byla zvolena rychlost protahování 50 mm/min. Vzdálenost čelistí byla zvolena 50 mm.

Pro zkušební tělesa typu 1B se vzdálenost zvolila 95 mm a rychlost posuvu čelistí 50 mm/min.

6.4.2 Měření hustoty

K měření hustoty byla použita Digitální váha KERN, typ 770-13 na Ústavu materiálového inženýrství ČVUT v Praze, kde byly jednotlivé vzorky po přetržení zváženy a následně dle programu SLic3r určen jejich objem. Poté ze vztahu pro výpočet hustoty viz rovnice č. 4 byla určena hustota vzorku. Tímto došlo k ověření, zda má hustota vliv na výslednou pevnost materiálu.

$$\rho = \frac{m}{V} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

Rovnice 4 Výpočet hustoty

6.4.3 Zkoumání lomových ploch

Lomové plochy (= místa, kde došlo k přetržení vzorků na zkušebním trhačím stroji) zkušebních tělísek byly vloženy pod mikroskop, kde došlo k porovnání vnitřní výplně a okrajové vrstvy jednotlivých vzorečků. Byly pořízeny fotografie z fotoaparátu fotoaparát Nikon-coolpix 995. A ty byly vyhodnoceny. Zájem panoval především o vlivu účinků síly na deformaci těles. Z vyhodnocení bylo určeno, jak se deformovala výplň oproti vnějším vrstvám a perimetrům a jaký měla vliv na celkovou strukturu materiálu.

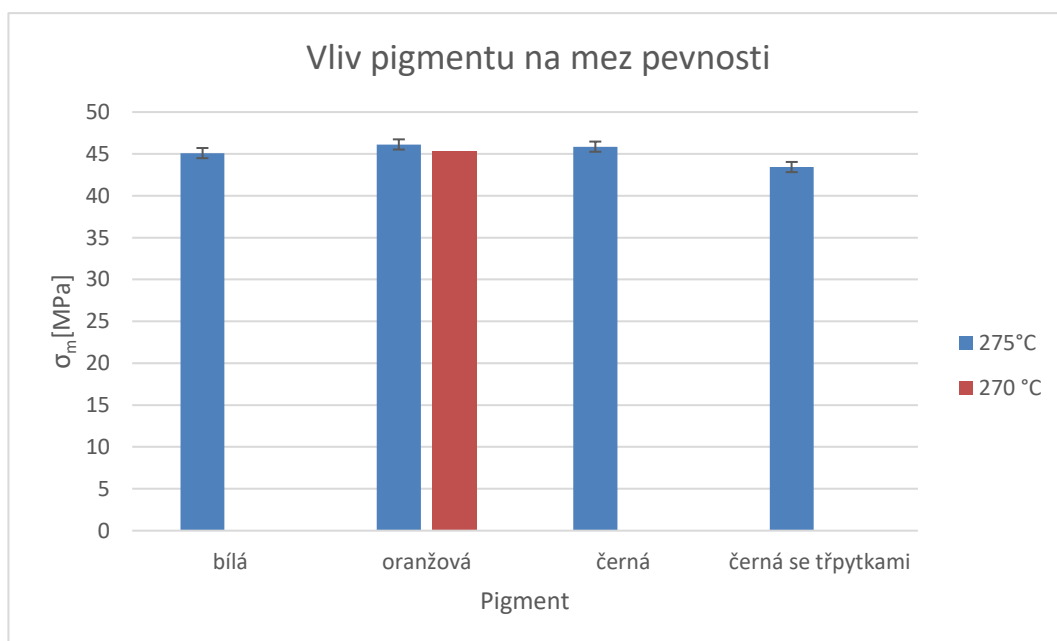
6.4.4 Zkoumání struktury pod světelným mikroskopem

Vzorkům s rozdílným pigmentem a rozdílnou vnitřní výplní byla odebrána fólie z nedeformované části, za pomoci pinzety a sanového mikrotonu typu OE-908/1. Fólie následně byla pokapána olejem a stlačena sklíčkem. Následně byla vložena pod světelný mikroskop a z fotoaparátu Nikon-coolpix 995 pořízeny fotky, na kterých jsou jednotlivé struktury materiálu. Zájem panoval především o to, jak velké jsou mezery, jak která struktura může, či nemusí zvyšovat pevnost a zda se ve vzorečcích nacházejí další příměsi mimo samotný materiál ASA.

7 Výsledky měření

7.1 Vliv pigmentu na mez pevnosti v tahu

Při porovnání vlivu pigmentu, jsme měli k dispozici 4 typy. Vybarvení natural – bílá, oranžová, černá a šedá se třpytkami. Při porovnání jednotlivých pevností v tahu lze jen konstatovat, že pigment nemá na pevnost zásadní vliv. Jedinou malou výjimkou je kombinace šedé se třpytkami. Zde je patrný menší rozdíl (pouze 2 MPa) a to v podobě menší pevnosti oproti ostatním barvám. Důvodem může být nehomogenita materiálu v podobě příměsi třpytek.

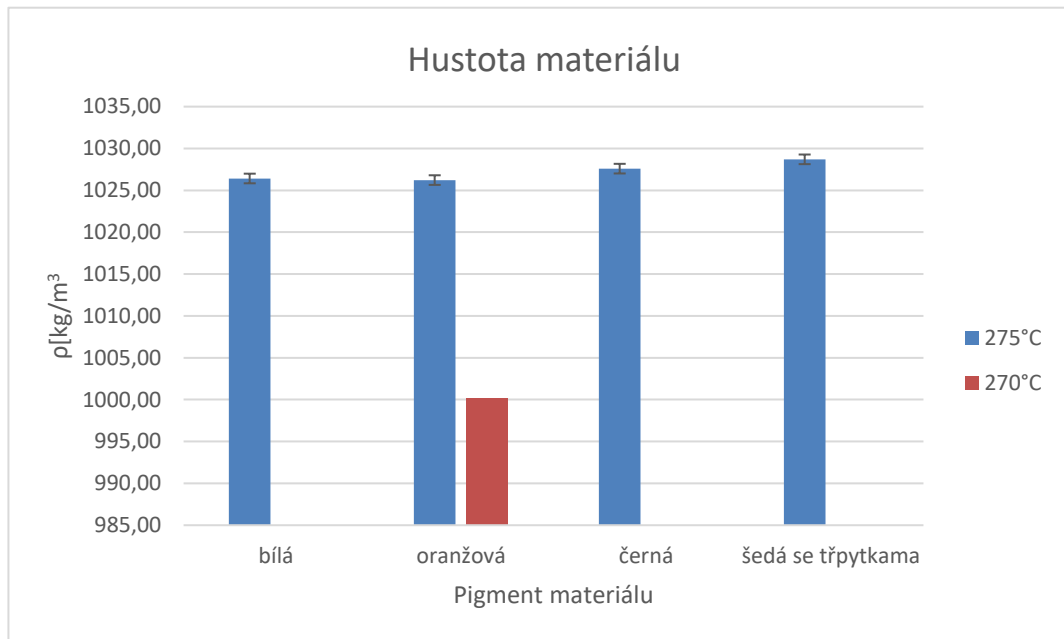


Graf 1 Vliv pigmentu na mez pevnosti

:

Další zkoumanou hodnotou bylo, zda má pigment vliv na hustotu vzorku. Proto byla změřena hmotnost všech vzorků a výsledkem je, že pigment nemá na hustotu materiálu z ASA zásadní vliv. Průměrná hustota všech vzorků se od ostatních neliší.

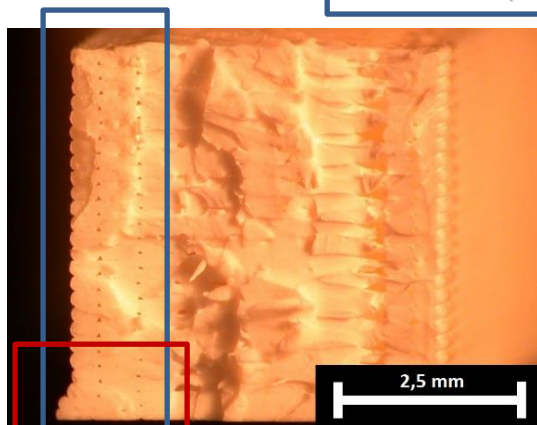
Při porovnání obou grafů (vliv pigmentu na pevnost a hustoty materiálu) můžeme konstatovat, že ačkoliv pigment šedý se třpytkami má při porovnání nejvyšší hustotu, jeho pevnost je nejmenší. Tzn. že z porovnaných hledisek, nemá výsledná hustota zásadní vliv na pevnost materiálu, pokud tiskneme za stejných podmínek a při stejné procentuální výplni.



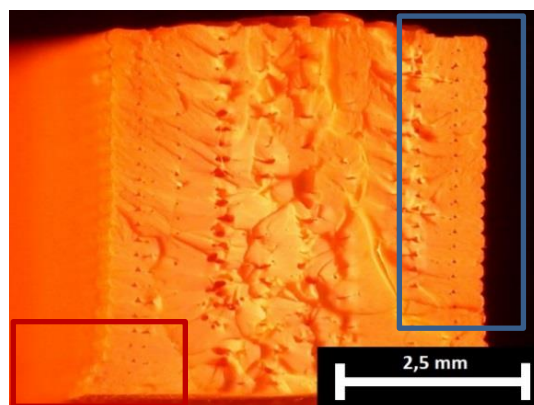
Graf 2 Hustota materiálu

Zvláštností je, že při tisku při nižší teplotě vykazuje materiál menší hustotu než při teplotě vyšší. Tato odchylka může být způsobena tím, že při vyšší teplotě se nataví více z dodávaného filamentu než při nižší teplotě.

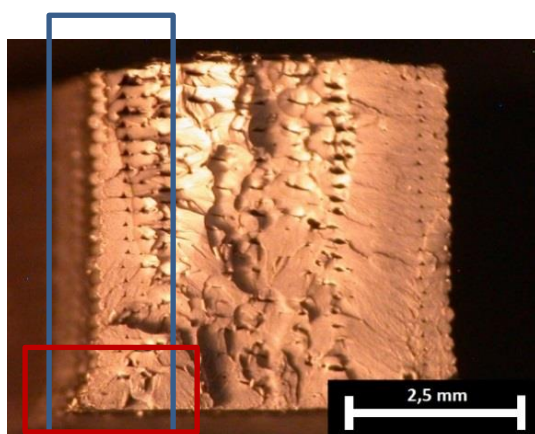
oblast perimetrů



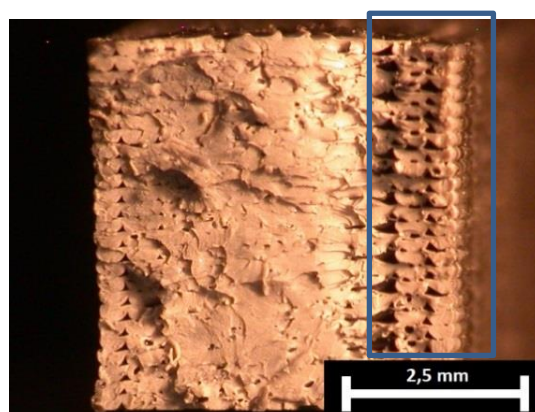
Obr. 22 bez pigmentu – Natural – 100% výplň



Obr. 23 oranžový pigment – 100% výplň



Obr. 21 černý pigment – 100% výplň



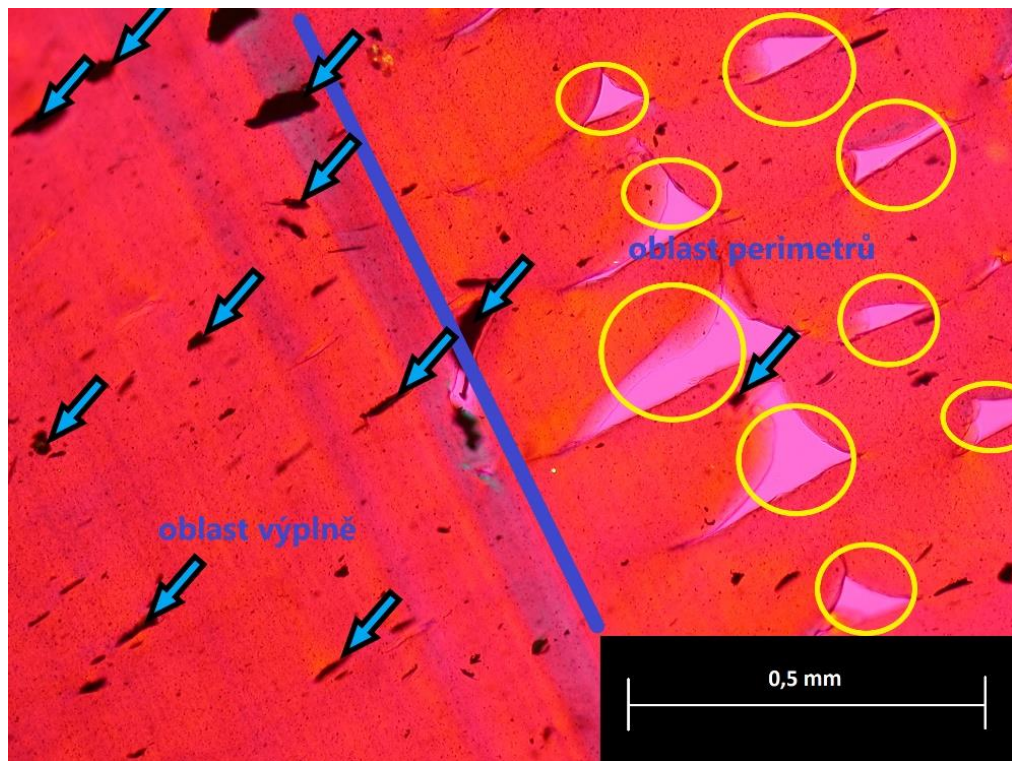
Obr. 20 pigment šedý se třpytkami – 100% výplň
Z

šířka spodních vrstev

Z pořízených obrázků lomových ploch, je patrné, že v oblasti perimetrů (vyznačeno modře) došlo k rovnoměrné deformaci, zatímco ve střední části vzorku došlo k nerovnoměrné deformaci. Zatímco při tisku perimetry kopírují obvod vzorku, směr kladení struny u výplně vůči podélné ose je 45° . Lze tedy předpokládat, že orientace vláken má v tomto případě značný vliv na výslednou pevnost, protože jejich orientace je ve směru působení deformace na trhačím zkušebním zařízení.

Při bližším pohledu na snímky, lze vidět i větší šířku spodních vrstev (červeně), než je pravidelná šířka celého objektu. To může být způsobeno vyšší teplotou podložky při tisku.

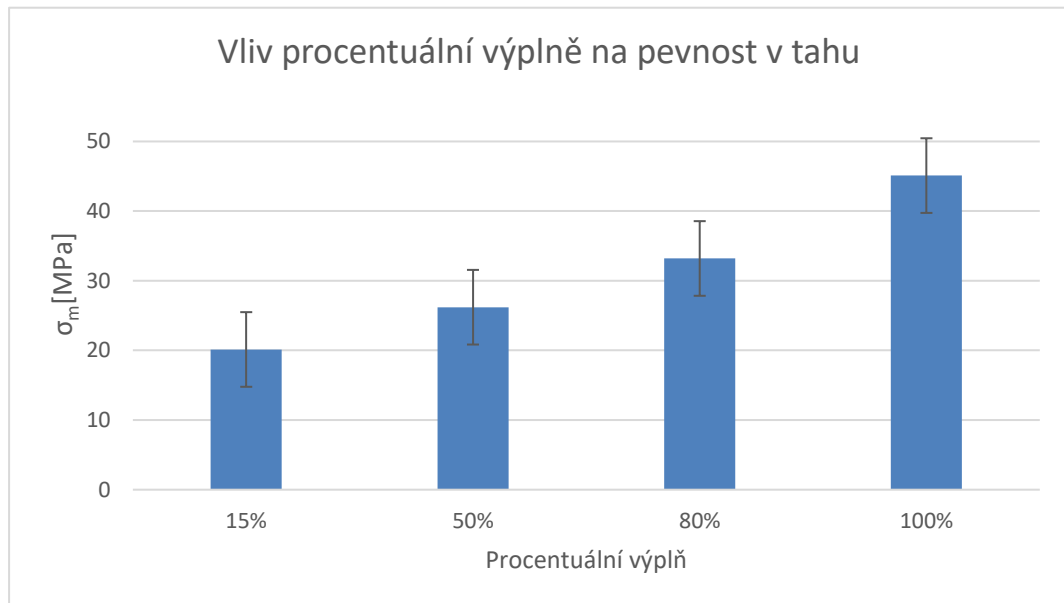
Při prohlédnutí fólií je zajímavé povšimnout si především aditiva ve formě třpytek v pigmentu šedá se třpytkami. Na tomto snímku lze jednotlivé třpytky vidět jako černé tečky. Dále je možné rozeznat oblast výplně a oblast perimetrů. Jelikož máme 100% výplň, mezery, které se na obrázku vyskytují v pravidelném počtu (a to 2 vedle sebe), poukazují nanášení filamentu pouze v jednom směru, což je znak pro nanášení perimetrů.



Obr. 24 pigment šedý se třpytkami – 10x zvětšeno

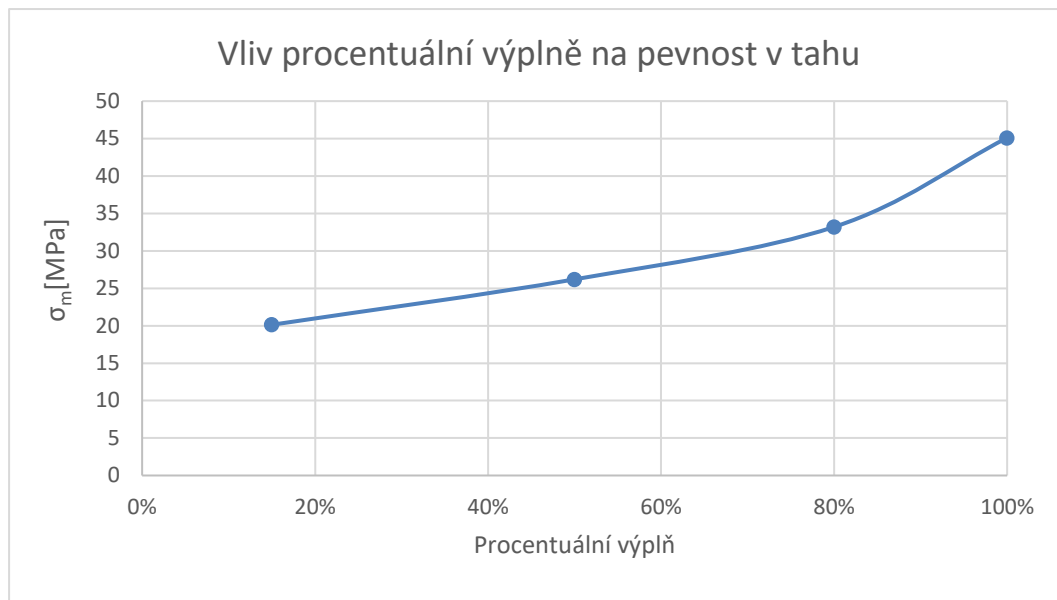
7.2 Vliv procentuální výplně na pevnost v tahu

Další zkoumanou možností je vliv procentuální výplně. Z naměřených hodnot je patrné, že se zvyšující se procentuální výplní pevnost materiálu stoupá. Dále je třeba podotknout, že při 100% výplni, je použita výplň rectaliner, zatímco u menších než 100% je použita výplň honeycomb. Z hlediska porovnání nejvyšší meze pevnosti dosahuje při 100% výplni a to 45,1 MPa, zatímco při 15% výplni dosahuje „jen“ 20 MPa. K tomu lze říci, že ač je pevnostní rozdíl 25 MPa rozdíl mezi výplni je 75 %.



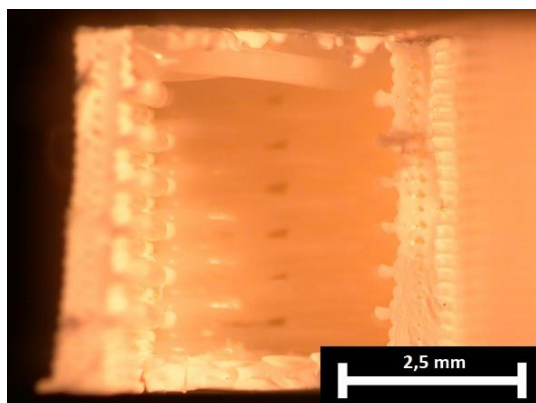
Graf 3 Vliv procentuální výplně na pevnost v tahu

Nutno podotknout, že pevnost stoupá nelineárně. Kdy z 15 % na 50 % (čili rozdíl 35 %) stoupla o 6 MPa, a dále z 50 % na 80 % (čili rozdíl 30 %) o 7 MPa. Zvláštností je, že při výplni 50 % neodpovídá hodnota 26,1 MPa poloviční pevnosti, ale je o 4 MPa vyšší. Tzn. že výplň není jediným parametrem určujícím výslednou pevnost v tahu.

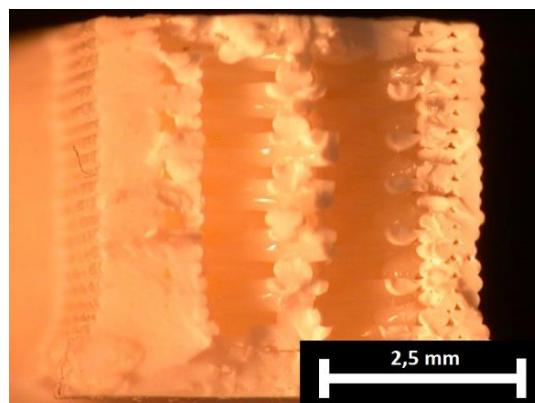


Graf 4 Vliv procentuální výplně na pevnost v tahu

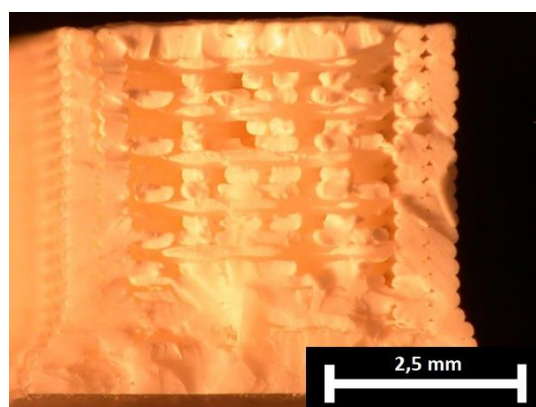
Ze snímků je patrný rozdíl jednotlivých výplní a okrajových vrstev. Z toho vyplývá, že ač perimetr i vnější vrstvy zůstaly zachovány, vliv procentuální výplně má nezanedbatelný vliv na výslednou pevnost. Znovu lze podotknout, že místa lomu jsou vedena především v mezerách samotné výplně. A že perimetr se deformoval rovnoměrně oproti vnitřní výplni.



Obr. 25 Vzorek D–15% výplň



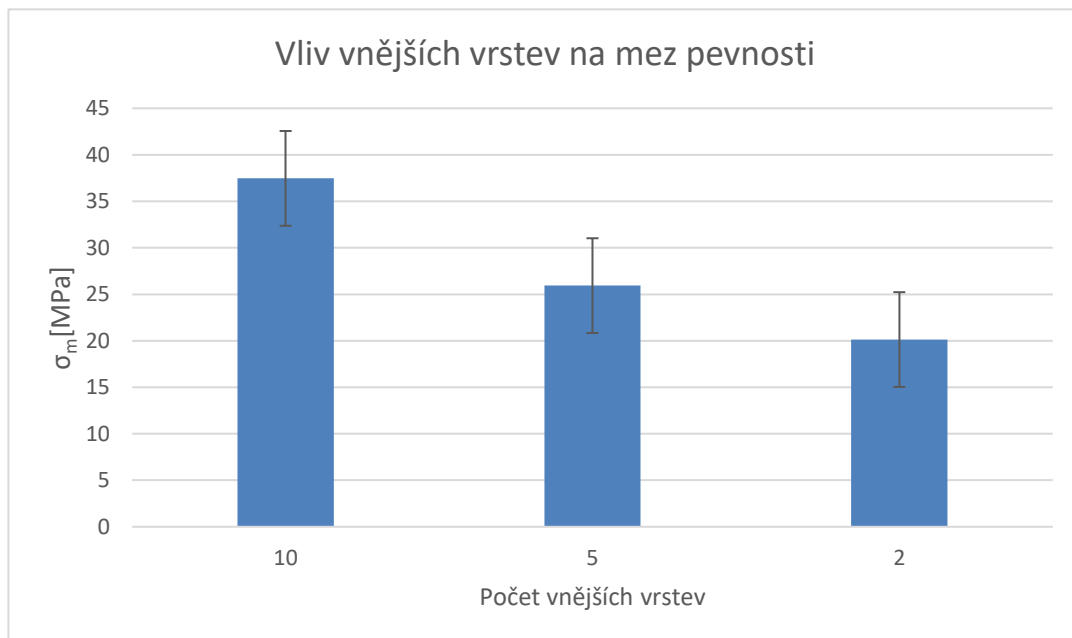
Obr. 26 Vzorek E–50% výplň



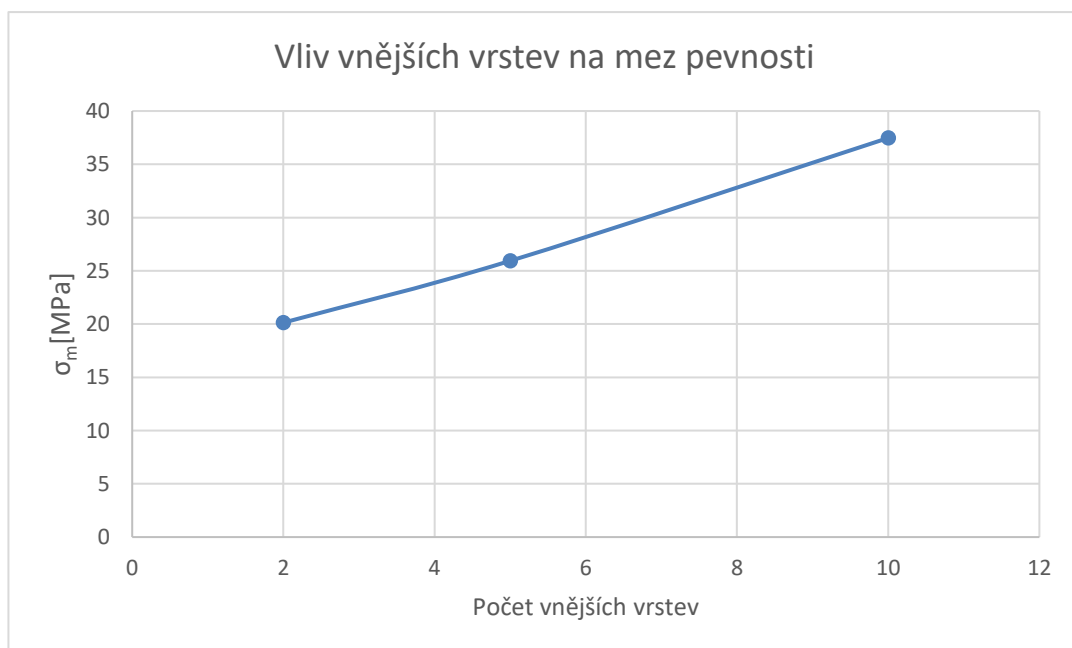
Obr. 27 Vzorek H–80% výplň

7.3 Vliv vnějších vrstev na mez pevnosti

Další možnost, jak ovlivnit pevnost, je nastavení horních a spodních vrstev. Při nastavení deseti shora a deseti od spodní vrstvy dosáhneme pevnosti 38 MPa při nastavení konfigurace „5–5“ 26 Mpa a při nastavení konfigurace „2-2“ 20 MPa. Zde hraje roli taktéž, samotná struktura vrstvy, poněvadž tyto zvolené vrstvy jsou přednastaveny jako 100% výplň. Tím je zásadně ovlivněna pevnost.

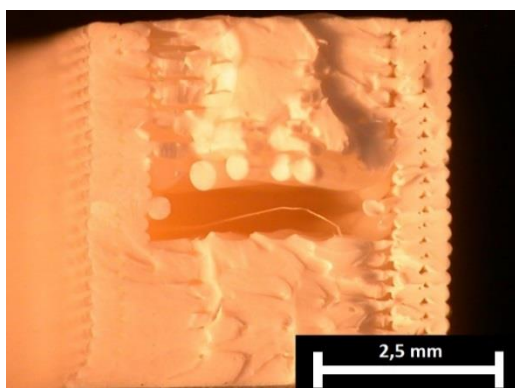


Graf 6 Vliv vnějších vrstev na mez pevnosti

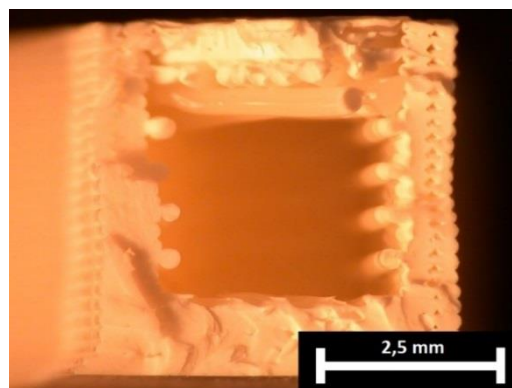


Graf 5 Vliv vnějších vrstev na mez pevnosti

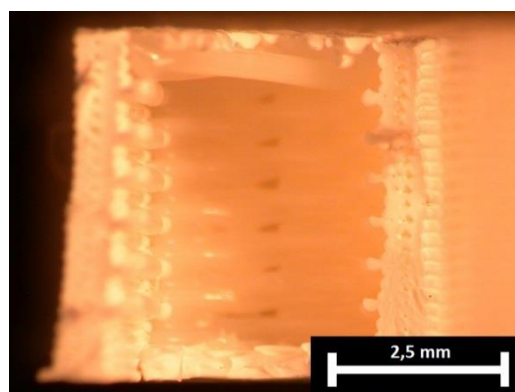
Ze snímků je patrné, že perimetr zůstal zachován a rovnoměrně se deformoval. Při porovnání snímků se 100% výplní je možné si povšimnout jisté podobnosti deformace vnitřní výplně. Je to dáno tím, že vnější vrstvy se tisknou podobně jako 100% výplň. Tedy způsobem rectaliner.



Obr. 28 Vzorek B – konfigurace 10-10



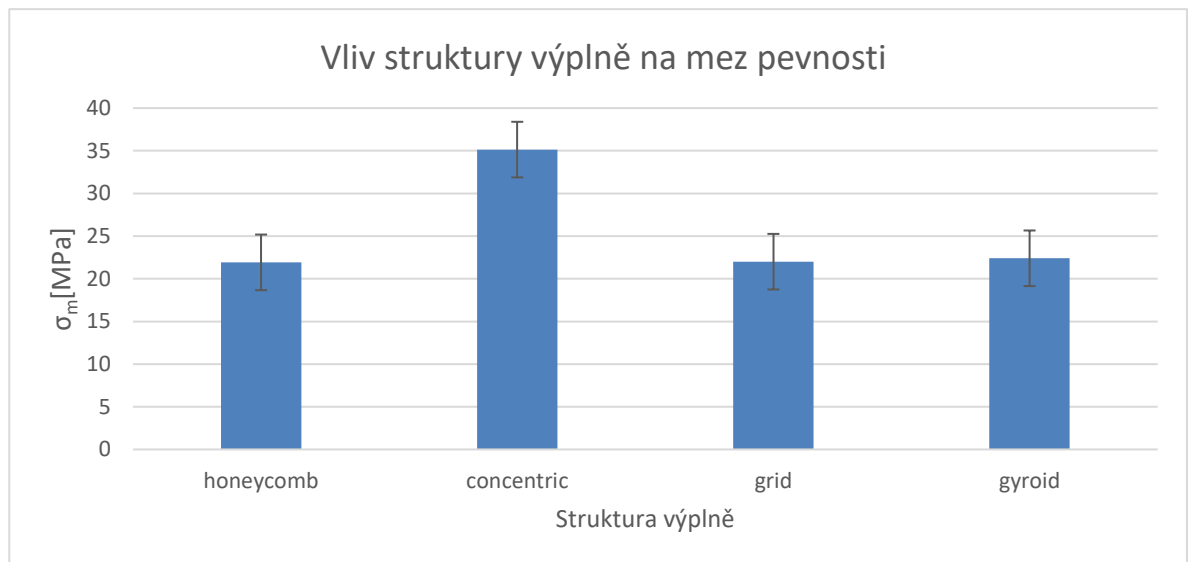
Obr. 29 Vzorek C – konfigurace 5-5



Obr. 30 Vzorek D – konfigurace 2-2

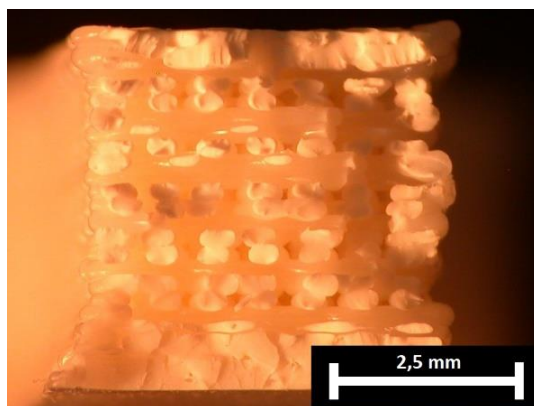
7.4 Vliv struktury výplně na mez pevnosti

Při tisku byly použity 4 struktury: honeycomb, concentric, grid a gyroid. Struktura concentric dosahuje mnohem větší pevnosti než ostatní. Je to dáno už samotnou strukturou. Poněvadž všechny ostatní můžeme považovat za tisk při orientaci 45°. Strukturu concentric můžeme určit jako orientaci při 0°. Pokud by struktura concentric nebyla tištěna ve směru deformace, dosáhla by naopak menších hodnot než při tisku ostatních struktur.

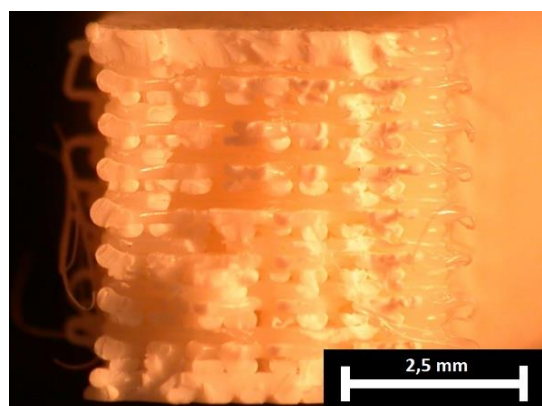


Graf 7 Vliv struktury výplně na mez pevnosti

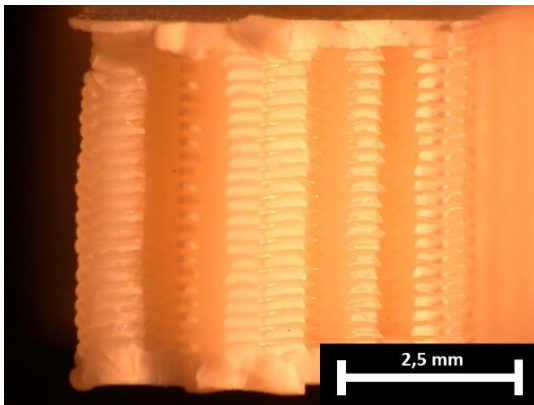
Ze snímků je patrné, že struktura concentric je tisknuta ve směru deformace, tím dosahuje mnohem lepších vlastností v pevnosti v tahu. Naopak ostatní lomy se od sebe nijak zásadně neliší. Především struktura honeycomb a gyroid si jsou v oblasti lomu značně podobné. Snímek grid naznačuje, že pokud by byl vzorek tištěn ve směru 90°, mohlo by dojít k výraznému zlepšení tahových vlastností materiálu.



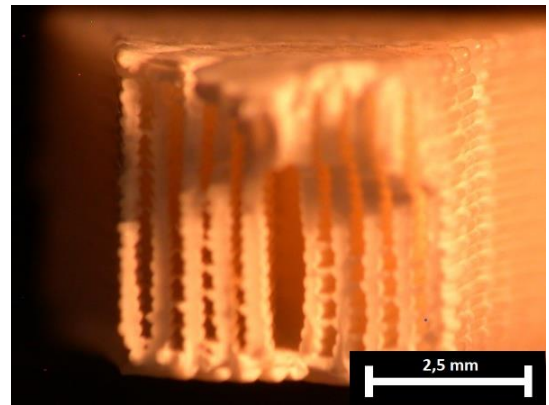
Obr. 32 Vzorek I–80% výplň gyroid



Obr. 31 Vzorek J–80% výplň honeycomb

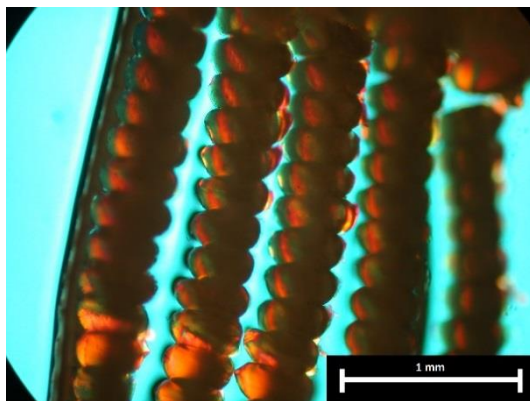


Obr. 33 Vzorek K–80% výplň grid

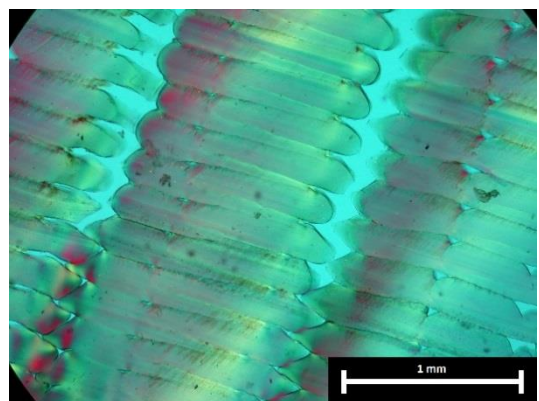


Obr. 34 Vzorek L–80% výplň concentric

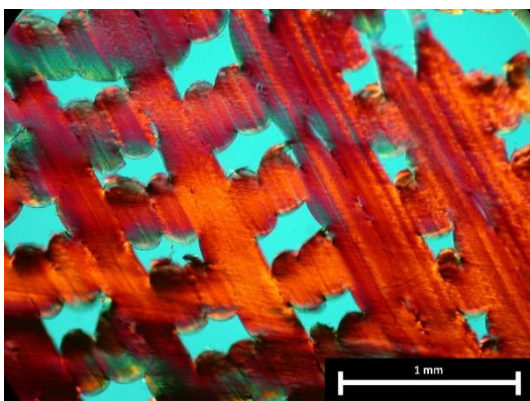
Vzorky fólií jednotlivých struktur, krásně ukazují, jak jsou jednotlivé výplně tištěny. Struktura concentric má mezery v příčném směru. Na obrázku je vidět kladení vrstev a jednotlivé vrstvy lze spočítat. Spočítat vrstvy je možné i u struktury grid, zároveň jsou více „široké“ než u struktury concentric a to z důvodu, že jsou nanášeny při 45° působení deformace. Struktury honeycomb a gyroid vykazují určitou podobnost, a to že se jedná o zesíťované struktury.



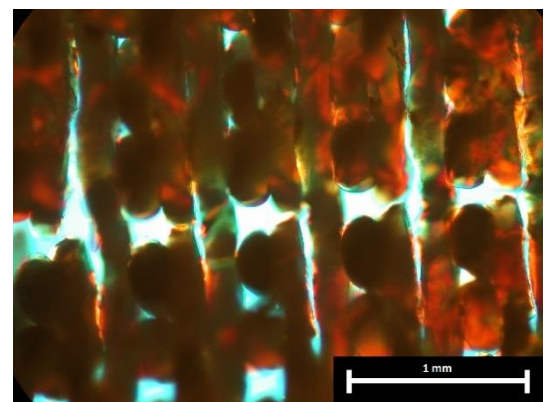
Obr. 36 Vzorek L–80% výplň concentric



Obr. 35 Vzorek K–80% výplň grid



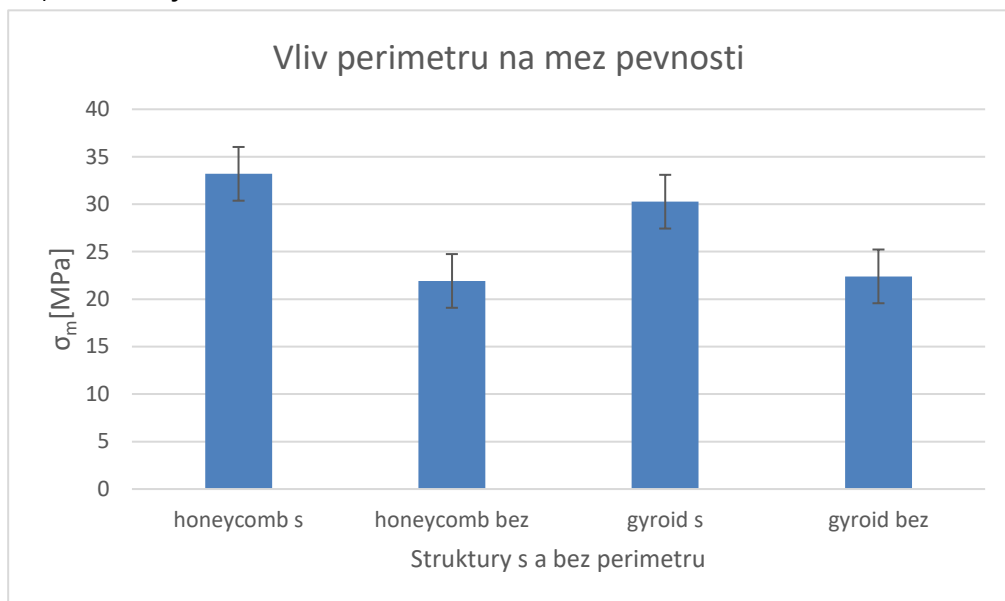
Obr. 37 Vzorek I – 80% výplň gyroid



Obr. 38 Vzorek J–80% výplň honeycomb

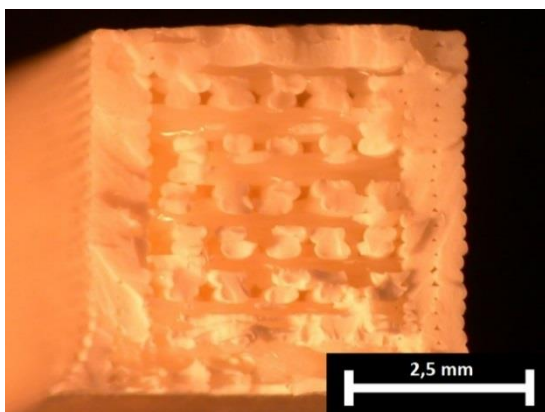
7.5 Vliv perimetru na mez pevnosti

Nejdříve bylo potřeba zjistit, zda má perimetr vliv na výslednou pevnost. Proto byly vytištěny vzorky bez perimetru a následně poměřeny už s vytištěnými vzorky s perimetrem.

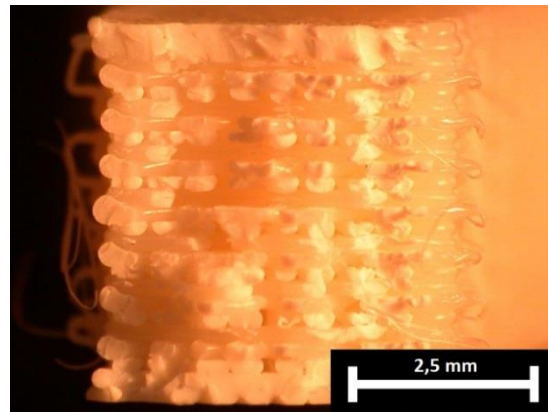


Graf 8 Vliv perimetru na mez pevnosti

Z grafu vyplývá, že struktury s perimetrem dosahují značného zpevnění, a to až o 10 MPa. Je to opět dáno, že perimetr je tisknut ve směru deformace. Dále je patrné, že struktura honeycomb s perimetrem má lepší pevnost než struktura gyroid s perimetrem. Po odstranění perimetrů obě struktury vykazují stejnou pevnost.

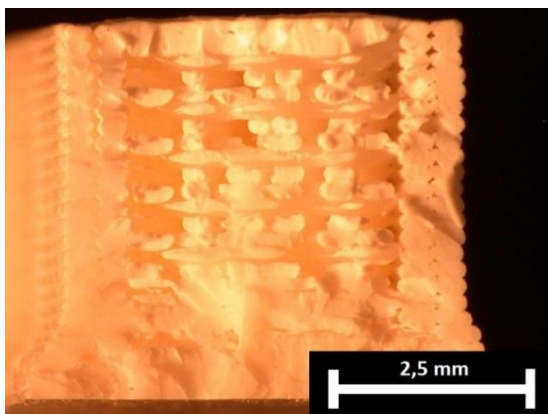


Obr. 40 Vzorek H – struktura honeycomb s perimetrem

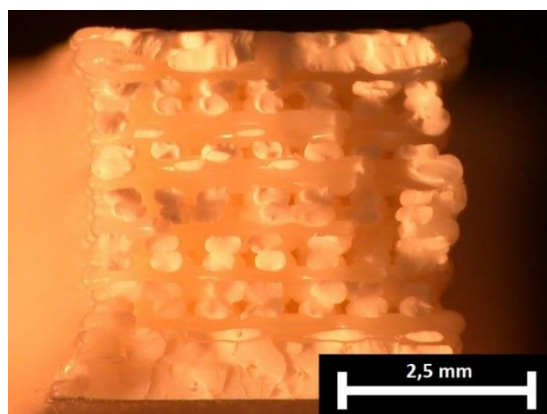


Obr. 39 Vzorek J – struktura honeycomb bez perimetrů

Ze snímků je patrné, že deformace u struktur s perimetrem probíhala rovnoměrně, zatímco u struktur bez perimetrů je deformace značně nerovnoměrná. U snímku struktury honeycomb bez perimetrů lze pozorovat přetržená vlákna na vnější vrstvě, která by při přidání perimetrů držela.

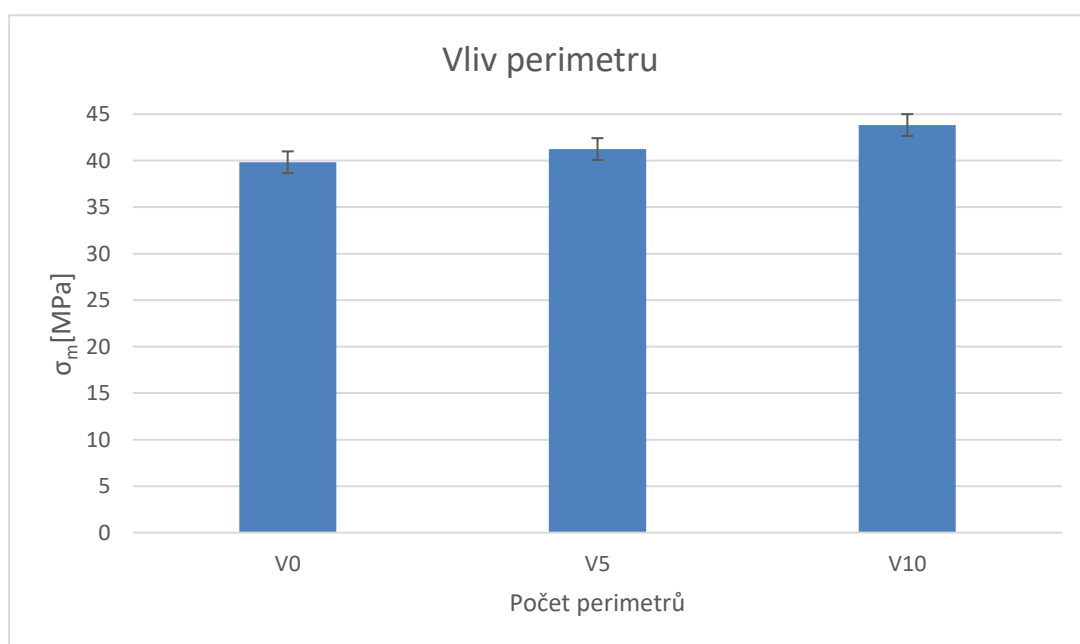


Obr. 42 Vzorek F – struktura gyroid s perimetry



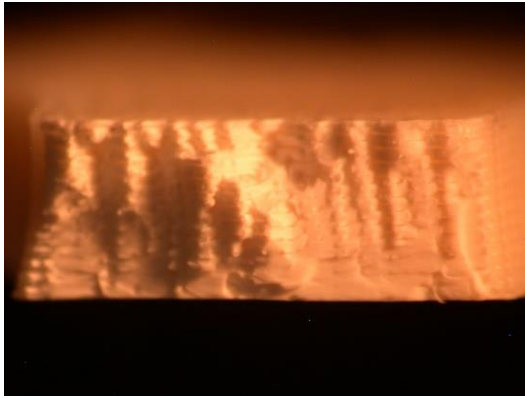
Obr. 41 Vzorek I – struktura gyroid bez perimetrů

Proto bylo uskutečněno ještě jedno měření, kde byla změřena mez pevnosti při přidání dalších perimetrů a tentokrát pro vzorky se 100% výplní a zkušebním tělesem 1B. Z grafu vyplývá, že vzorky s větším počtem perimetrů dosahují vyšší pevnosti než vzorky s malým či nižším počtem. Je to dáno opět především orientací vláken, kde vlákna perimetru jsou nanášena ve směru deformace.

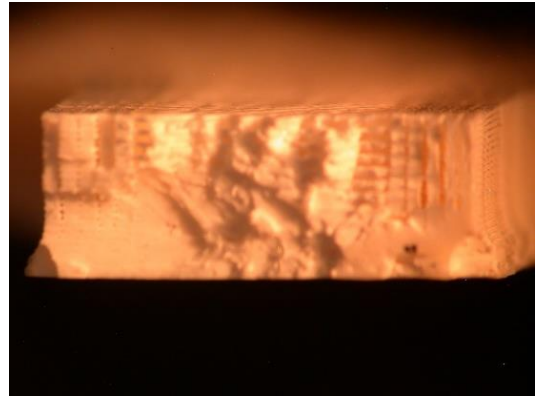


Graf 9 Vliv perimetru na mez pevnosti v tahu

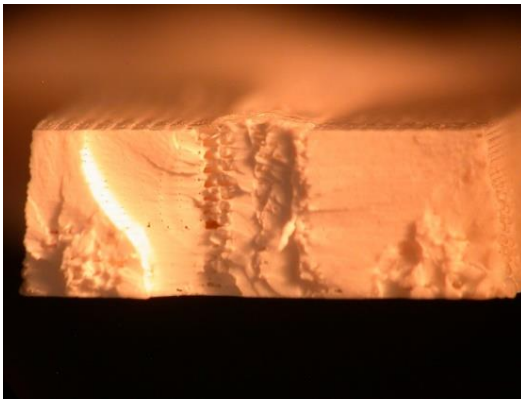
Ze snímků je patrné, že vzorky s větším perimetrem se chovají více jako izotropní materiál, zatímco u vzorků s nižším počtem perimetrů lze pozorovat určitou anizotropii. Při bližším zkoumání lze vidět, že deformace u většího počtu perimetrů je dosažena rovnoměrně. Zatímco u vzorků s nižším perimetrem je deformace značně nerovnoměrná.



Obr. 44 Vzorek V0 – bez perimetrů



Obr. 43 Vzorek V5 – počet perimetrů 5

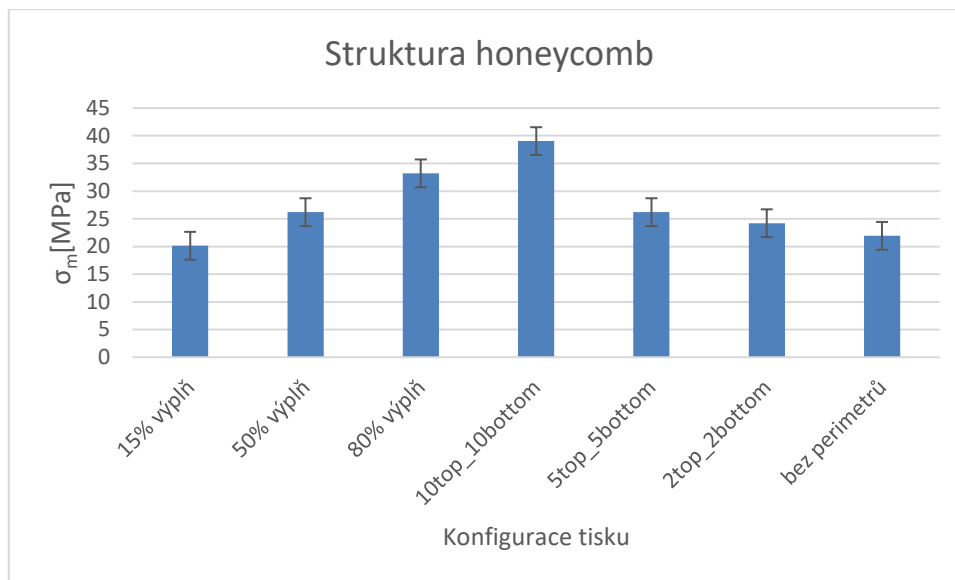


Obr. 45 Vzorek V10 – počet perimetrů 10

I když se v podstatě jednalo o 100% zaplnění celého objemu tělesa, vliv počtu perimetrů je patrný stejně jako volba počtu vrstev.

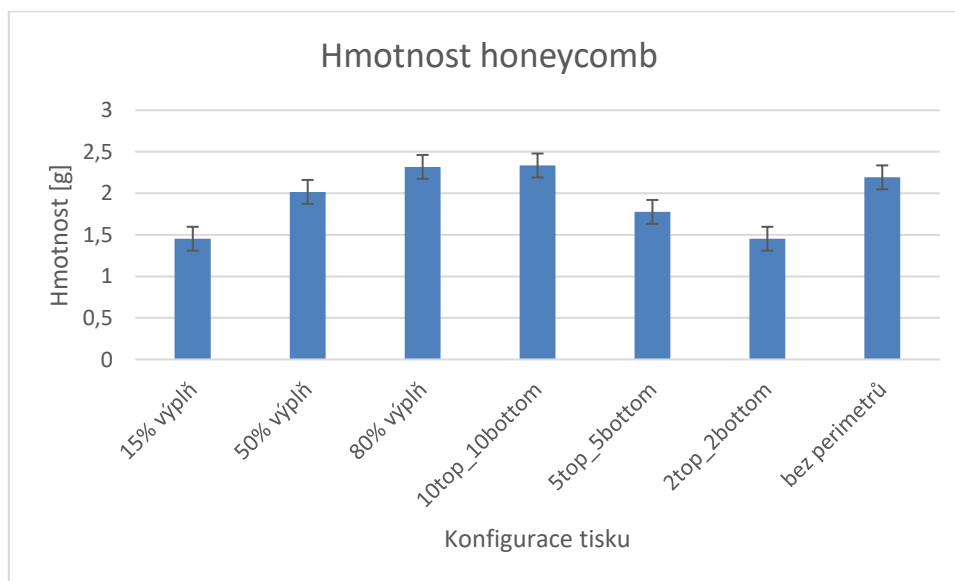
7.6 Vliv měnitelných parametrů na strukturu honeycomb

Vliv podmínek na strukturu honeycomb ukazuje, že největší pevnosti dosahuje při zvýšení vnějších vrstev. Je to dáno především zvyšováním samotné výplně, neboť výplň vnější vrstvy je 100 %. Dalším zvláštním porovnatelným ukazatelem je 80% výplň a bez perimetrů, kde si můžeme povšimnout rozdílu až 11 Mpa. Zde je vidět pokud obsahují perimetr, anebo ne. Zde se jasně promítá orientace vláken po směru působení deformace



Graf č. 10 Mez pevnosti struktury honeycomb

Vliv hmotnosti na celkovou pevnost nám ukazuje, určitou podobnost grafu tahové pevnosti. Zajímavé je porovnání 80% výplně, 10top_10bottom a konfiguraci bez perimetrů, že i při stejné hmotnosti, tedy naneseném materiálu, můžeme docílit různých pevností. Vhodnou orientací vláken tedy můžeme uspořít značnou část materiálu při zachování, nebo zlepšení tahových vlastností materiálu.



Graf č. 11 Hmotnost struktury honeycomb

8 Diskuze výsledků

Prvním měřením jsme chtěli určit, zda můžou mít přidaná aditiva ve formě pigmentu vliv na výslednou pevnost v tahu. Měření prokázala, že ač došlo k malým výchylkám (2 -3MPa). Z hlediska praktického nemají přidaná aditiva zásadní vliv na mez pevnosti v tahu. Zároveň jsme chtěli podložit menší odchylky představou, že by mohla hrát výslednou roli hustota materiálu. I když hustota pigmentu šedý se třpytkami dosahovala vyšších hodnot, její pevnost byla naopak menší než u ostatních aditiv. Proto můžeme konstatovat, že hustota neměla pro analýzu pigmentu zásadní vliv na pevnost materiálu.

Další měření se týkala vlivu přednastavených parametrů tisku. Vliv procentuální výplně ukázal, že výplň má vliv na pevnost v tahu. 15% procentní výplň dosahovala pevnosti 20MPa zatímco 80% výplň dosahovala 33 MPa. Nutno podotknout, že nárůst meze pevnosti materiálu není lineární. Dalším zajímavým aspektem je že při 50 % výplně nedosahuje poloviční pevnosti. Tudíž, zde hrají roli další parametry a možnosti, jak výslednou pevnost ovlivnit.

Porovnání vnějších vrstev na mezi pevnosti prokazuje jejich vliv na výslednou pevnost. Tím, že tyto vrstvy jsou vyplněny ze 100%, lze jejich přirovnat k procentuální výplni. Zajímavé je, že při konfiguraci 5-5 dosahuje podobných mechanických vlastností jako s 50% výplní.

U vlivu struktur nejvíce hrála roli orientace vláken. Struktura concentric je vytisknutá ve směru deformace, a tudíž její naměřená pevnost dosahovala nejlepších výsledků z vytištěných vzorků struktur a to 35MPa. Ostatní struktury byly tištěny po vrstvách s orientací každé vrstvy 45°na vrstvu druhou. Dosahují i podobných výsledků a to 22MPa.

Posledním zkoumaným parametrem jsou perimetry vytištěných vzorků. Nejdříve jsme provedli měření, zda mají vliv a prokázali, že mají. Vzorky tištěny bez perimetrů dosahují pevnosti 22 MPa, zatímco vzorky při stejném nastavení, akorát se dvěma perimetry, dosahují dosahují 30MPa. Proto jsme uskutečnili ještě další měření, a to se zkušebními tělesy 1B, kde jsme počet perimetrů zvětšovaly. Zde se ukázalo, že když přidáme 5 perimetrů zvýší se pevnost zhruba o 2 MPa při 100% výplni tělesa.

Konečným zhodnocením můžeme konstatovat, že největší vliv na mechanické vlastnosti v tahu má procento výplně. Druhým parametrem, který zásadně ovlivnil pevnost je nastavení vnějších vrstev, které jsou tisknuty při 100% výplni, a tudíž ovlivní množství vytištěného materiálu. Posledním parametrem je orientace tisku, protože perimetry dosahovaly lepších vlastností stejně jako struktury tištěné ve směru deformace.

9 Závěr

Cíl práce byl splněn. Byla provedena rešerše, která vysvětluje, co je technologie FDM. Jaký je postup přenosu od virtuálního modelu do modelu reálného výrobku pomocí 3D tisku. Dále rešerše obsahuje nastavení základních parametrů tisku a definuje cizí pojmy při této konfiguraci. V neposlední řadě jsou uvedeny chyby, které mohou při výrobě modelu nastat a seznam základních materiálů, ze kterých jsou reálné výrobky zhotoveny.

V praktické části byla vytištěna tělíska na zkoušku tahem za odborného dohledu ve firmě Průša. Zvolený materiál byl Akrylonitril-styren-akrylát, který tato firma plánuje uvést v co nejbližší době na trh. Tělíska byla vymodelována dle normy ČSN EN ISO 572-2 a následně převedena do formátu STL. Poté jsme navolili parametry tisku v příslušném softwaru 3D tiskárny a převedli nastavení do G-kódu. G-kód byl posléze nahrán na SD kartu, která byla vložena do tiskárny MK3 i3 od společnosti Průša, kde bylo zkušební tělísko nakonec vytisknuto.

Nakonec byla provedena tahová zkouška, kde jsme zjistili potřebnou mechanickou vlastnost, a to pevnost v tahu. Dále jsme vzorky zvážili pro zjištění jejich celkové hustoty a přetrhané plochy zkoumali pod stereoskopem. Z vybraných vzorků jsme nakonec odebrali fólie, které jsme pod mikroskopem vyfotili a zjistili tak strukturu vnitřní výplně.

Výsledky byly nakonec zanalyzovány a uvedeny v diskuzi výsledků.

10 Seznam obrázků

Obr. 1 Ekonomické srovnání konvenční a aditivní výroby [23].....	10
Obr. 2 Přehled a rozdělení aditivní výroby z hlediska materiálu [23]	11
Obr. 3 Princip technologie FDM.....	13
Obr. 4 Procentuální výplň struktury honeycomb[20].....	17
Obr. 5 Struktury výplně[20].....	17
Obr. 6 Nastavení perimetrů v programu Slic3r [5].....	18
Obr. 7 První vrstva [24].....	19
Obr. 8 Ukázka stringování [24].....	20
Obr. 9 Zakřivení okrajů u první vrstvy [19].....	20
Obr. 10 Přehled základních materiálů používaných technologií FDM [25]..	21
Obr. 11 Tvary zkušebních těles [13].....	26
Obr. 12 Deformační křivka při zkoušce tahem [13]	27
Obr. 13 Malá zkušební tělíška [22].....	29
Obr. 14 Tabulka velkých zkušebních tělíšek [22].....	29
Obr. 15 Schéma tisknutého vzorku	31
Obr. 16 Gyroid.....	32
Obr. 17 Honeycomb	32
Obr. 18 Grid.....	32
Obr. 19 Concentric	32
Obr. 20 pigment šedý se třpytkami – 100% výplň	37
Obr. 21 černý pigment – 100% výplň	37
Obr. 22 bez pigmentu – Natural – 100% výplň	37
Obr. 23 oranžový pigment – 100% výplň.....	37
Obr. 24 pigment šedý se třpytkami – 10x zvětšeno.....	38
Obr. 25 Vzorek D–15% výplň	40
Obr. 26 Vzorek E–50% výplň	40
Obr. 27 Vzorek H–80% výplň.....	40
Obr. 28 Vzorek B – konfigurace 10-10.....	42
Obr. 29 Vzorek C – konfigurace 5-5.....	42
Obr. 30 Vzorek D – konfigurace 2-2	42
Obr. 31 Vzorek J–80% výplň honeycomb	43
Obr. 32 Vzorek I–80% výplň gyroid	43
Obr. 34 Vzorek K–80% výplň grid.....	44
Obr. 33 Vzorek L–80% výplň concentric	44
Obr. 35 Vzorek K–80% výplň grid.....	44
Obr. 36 Vzorek L–80% výplň concentric	44
Obr. 37 Vzorek I – 80% výplň gyroid	44
Obr. 38 Vzorek J–80% výplň honeycomb	44
Obr. 39 Vzorek J – struktura honeycomb bez perimetrů.....	45
Obr. 40 Vzorek H – struktura honeycomb s perimetrem	45
Obr. 41 Vzorek I – struktura gyroid bez perimetrů.....	46

Obr. 42 Vzorek F – struktura gyroid s perimetry	46
Obr. 43 Vzorek V5 – počet perimetrů 5	47
Obr. 44 Vzorek V0 – bez perimetrů	47
Obr. 45 Vzorek V10 – počet perimetrů 10	47

11 Seznam tabulek

Tab. 1 Tabulka základních nastavení tiskárny	30
Tab. 2 *Tabulka módu 0,15 mm QUALITY MK3	31
Tab. 3 Tabulka pro rekapitulaci tělísek typu 1BA	33
Tab. 4 Tabulka nastavených parametrů pro zkušební tělíska typu 1B	33

12 Seznam grafů

Graf 1 Vliv pigmentu na mez pevnosti.....	35
Graf 2 Hustota materiálu	36
Graf 3 Vliv procentuální výplně na pevnost v tahu.....	39
Graf 4 Vliv procentuální výplně na pevnost v tahu.....	40
Graf 5 Vliv vnějších vrstev na mez pevnosti.....	41
Graf 6 Vliv vnějších vrstev na mez pevnosti.....	41
Graf 7 Vliv struktury výplně na mez pevnosti.....	43
Graf 8 Vliv perimetru na mez pevnosti	45
Graf 9 Vliv perimetru na mez pevnosti v tahu.....	46

13 Seznam použitého softwaru

MS Word

MS Excel

Solidworks Student Edition

Slic3r

14 Seznam použitého zařízení

3D tiskárna Prusa MK3 i3
Zkušební trhací stroj ZD 10/90
Sanovy mikroton, typ OE-908/1
Stereoskop SZP 11-T ZOOM
Mikroskop Nikon Eclipse ME600
Fotoaparát Nikon-coolpix 995
Digitální váha KERN, typ 770-13

15 Seznam uvedených rovnic

Rovnice 1 Napětí v tahu	27
Rovnice 2 Mez pevnosti	27
Rovnice 3 Poměrné prodloužení	28
Rovnice 4 Výpočet hustoty	34

16 Literatura

- [1] *Materiály* [online]. 2019 [cit. 2019-07-20]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/materialy/>
- [2] PRŮŠA, Josef a Michal PRŮŠA. *Základy 3D tisku* [online]. 2014 [cit. 2019-07-20]. Dostupné z: <http://www.prusa3d.cz/wp-content/uploads/zaklady-3d-tisku.pdf>
- [3] KLOSKI, Liza a Nick KLOSKI. *Začínáme s 3D tiskem*. Brno 2017. Nakladatelství ,Computer Press.
- [4] CÍSAŘ, Dominik. *K čemu slouží nastavení perimeters?* [online]. 2015 [cit. 2019-07-20]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/k-cemu-slouzi-nastaveni-perimeters/>
- [5] CÍSAŘ, Dominik. *Slicuj jako bůh!* [online]. 2018 [cit. 2019-07-20]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/slicuj-jako-buh-pruvodce-zacatecnika-slic3r-prusa-edition/>
- [6] ASA [online]. 2019 [cit. 2019-07-20]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/asa/>
- [7] KOCHAN, Anna. Rapid prototyping gains speed, volume and precision. *Assembly Automation* [online]. 2000, 20(4): 295-299 [cit. 2019-10-07]. DOI:10.1108/01445150010378425. ISSN 01445154. Dostupné také z: <http://www.emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/01445150010378425>
- [8] HODEK, Josef. *Aditivní technologie: Zpráva o stavu 3D tisku pro Českou technologickou platformu STROJÍTENSTVÍ, o.s.* [online]. 2013 [cit. 2019-05-29].
- [9] ISO/ASTM 52900:2015. Additive manufacturing -- General principles -- Terminology. 2015.
- [10] HOMOLA, Jan. *PLA* [online]. 2013 [cit. 2019-07-20]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/pla/>

- [11] Rozdíl mezi ABS, PLA, PETG [online]. 2017 [cit. 2019-07-20]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/blog/rozdily-abs-pla-petg/>
- [12] Prusament PETG [online]. 2019 [cit. 2019-07-20]. Dostupné z: <https://prusament.com/cs/materials/prusament-petg/>
- [13] BĚHÁLEK, Luboš. *Mechanické vlastnosti polymerů-: Statické namáhání* [online]. 2016 [cit. 2019-07-20]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/09.html>
- [14] Computer aided design. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-07-20]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Computer_aided_design
- [15] PAGÁČ, Marek. *Jak připravit kvalitní a přesný model pro 3D tisk* [online]. 2015 [cit. 2019-07-20]. Dostupné z: <https://www.mujsolidworks.cz/jak-pripravit-kvalitni-a-presny-model-pro-3d-tisk/>
- [16] PALERMO, Elizabeth. *Fused Deposition Modeling: Most Common 3D Printing Method* [online]. 2013 [cit. 2019-07-20]. Dostupné z: <https://www.livescience.com/39810-fused-deposition-modeling.html>
- [17] *FDM Technologie* [online]. 2018 [cit. 2019-07-20]. Dostupné z: <https://www.objet.cz/3D-tiskarny/technologie-fdm>
- [18] *3D tisk: Jak funguje FDM / FFF tiskárna* [online]. 2019 [cit. 2019-07-20]. Dostupné z: <https://www.svethardware.cz/3d-tisk-jak-funguje-fdm-fff-tiskarna/48457>
- [19] VAROTSIS, Alkaios Bournias. *Introduction to FDM 3D printing* [online]. 2019 [cit. 2019-07-20]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing>

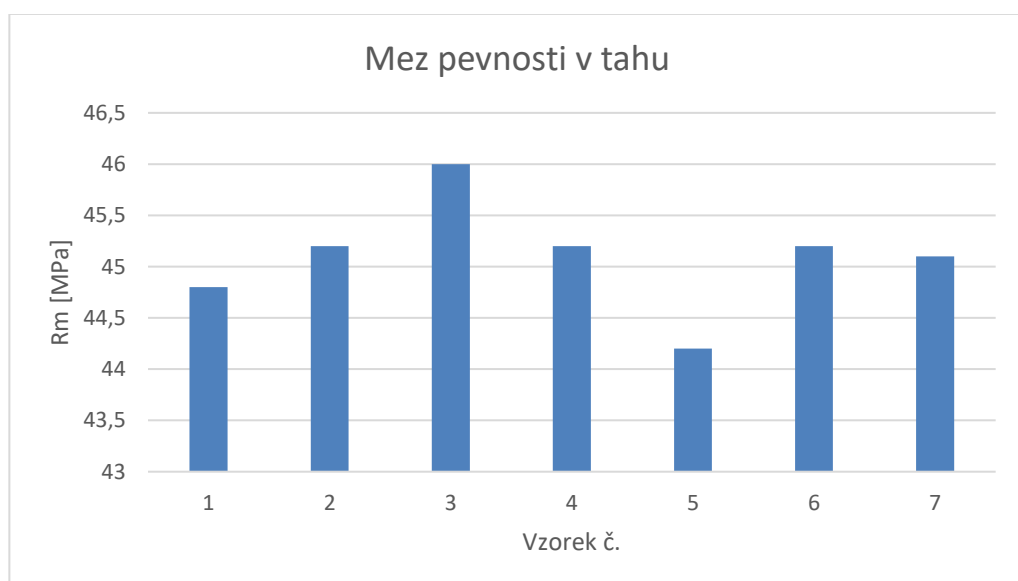
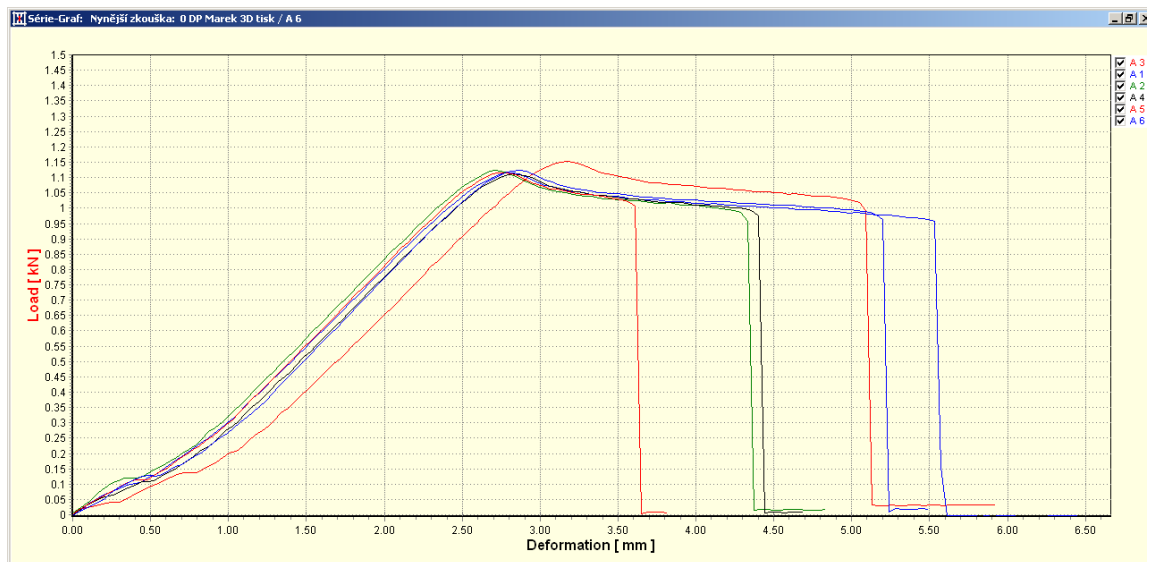
- [20] KRATOCHVÍL, Tomáš. *3D FDM TISKÁRNA REPRAP A PARAMETRY TISKU* [online]. Brno, 2015 [cit. 2019-07-31]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30309633.pdf>. Diplomová práce. Fakulta strojní VUT v Brně.
- [21] ČSN EN ISO 527-1. *Plasty - Stanovení tahových vlastností: Obecné principy*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [22] ČSN EN ISO 527-2. *Plasty - Stanovení tahových vlastností: Zkušební podmínky pro tvářené plasty*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [23] BERÁNEK, Libor. *Aditivní a alternativní technologie*. Praha, 2018.
- [24] BACH, Martin. *Jak vyřešit nejčastější problémy při tisku* [online]. 2018 [cit. 2019-07-25]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/jak-vyresit-nejcastejsi-problemy-pri-3d-tisku/>
- [25] *What is the best type of plastic for my 3D printing application?* [online]. 2016 [cit. 2019-07-31]. Dostupné z: <https://my3dmatter.com/what-is-the-best-type-of-plastic-for-my-3d-printing-application/>
- [26] *Materialy pro 3D* [online]. Brno, 2017 [cit. 2019-07-15]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/>
- [27]

17 Přílohy

Natural – bílá – 100% výplň

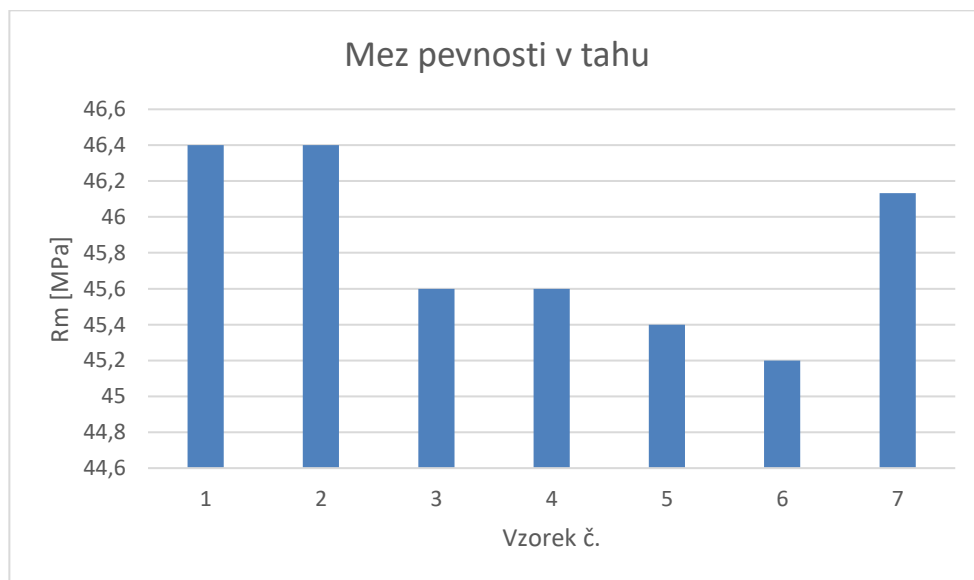
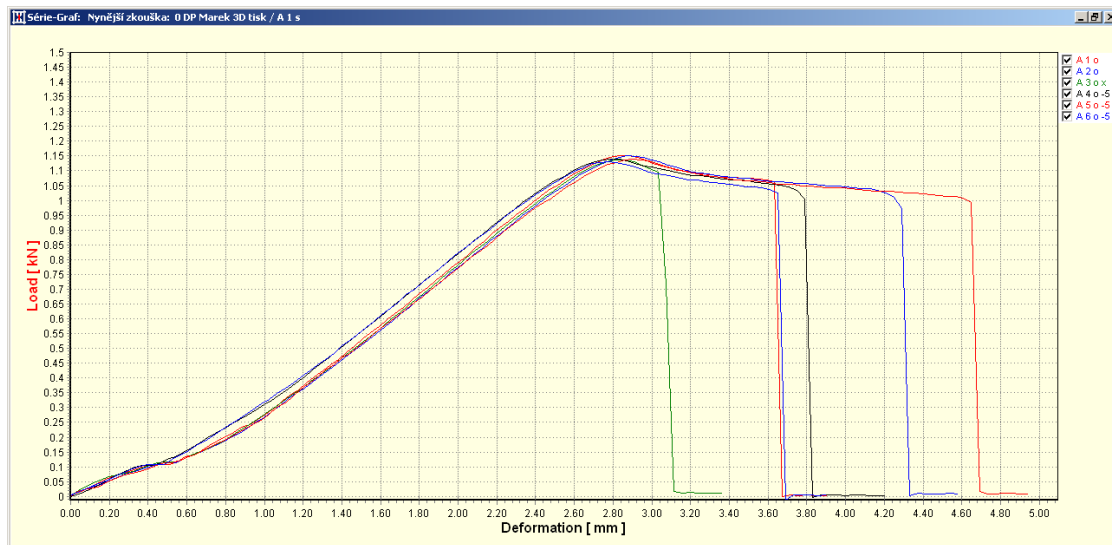
Zkouška pevnosti v tahu

č.vzorku	Fm [N]	A[mm ²]	σ_m [Mpa]	ΔL_0 [mm]	L ₀ [mm]	ϵ [-]	
1	1120	25	44,8	5,6	25	0,224	
2	1130	25	45,2	4,3	25	0,172	
3	1150	25	46	5,05	25	0,202	
4	1130	25	45,2	4,4	25	0,176	
5	1105	25	44,2	3,6	25	0,144	
6	1130	25	45,2	5,2	25	0,208	
			σ_m[Mpa]	45,1		ϵ [-]	0,187667



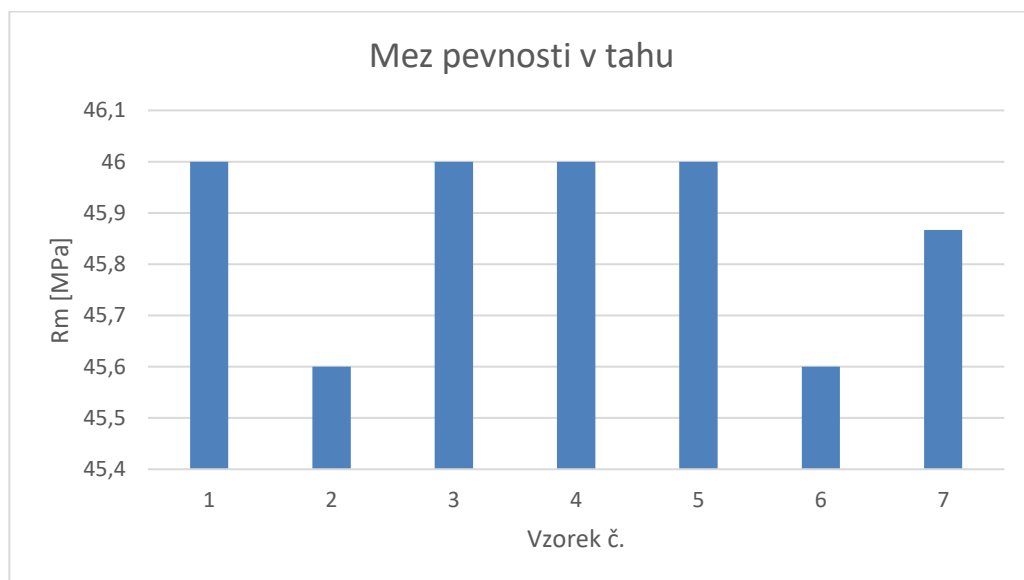
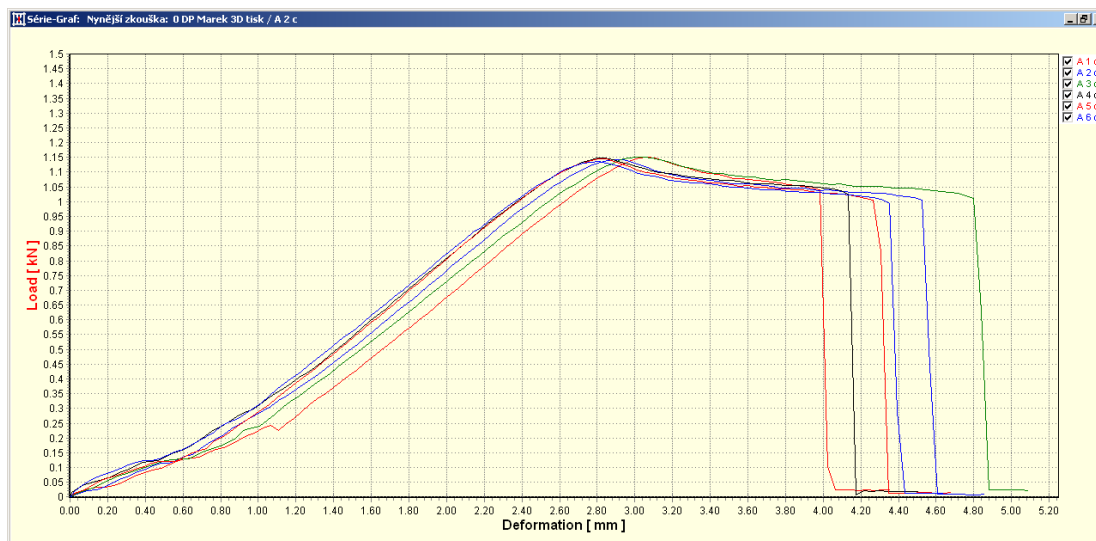
Oranžová barva – 100% výplň

č.vzorku	Fm [N]	A[mm ²]	σ_m [Mpa]	ΔL_0 [mm]	L ₀ [mm]	ϵ [-]
1	1160	25	46,4	3,65	25	0,146
2	1160	25	46,4	4,3	25	0,172
3	1140	25	45,6	3,05	25	0,122
4	1140	25	45,6	3,8	25	0,152
5	1135	25	45,4	4,6	25	0,184
6	1130	25	45,2	3,7	25	0,148
	275°C	σ_m [Mpa]	46,13		ϵ [-]	0,154
	270°C	σ_m [Mpa]	45,4			



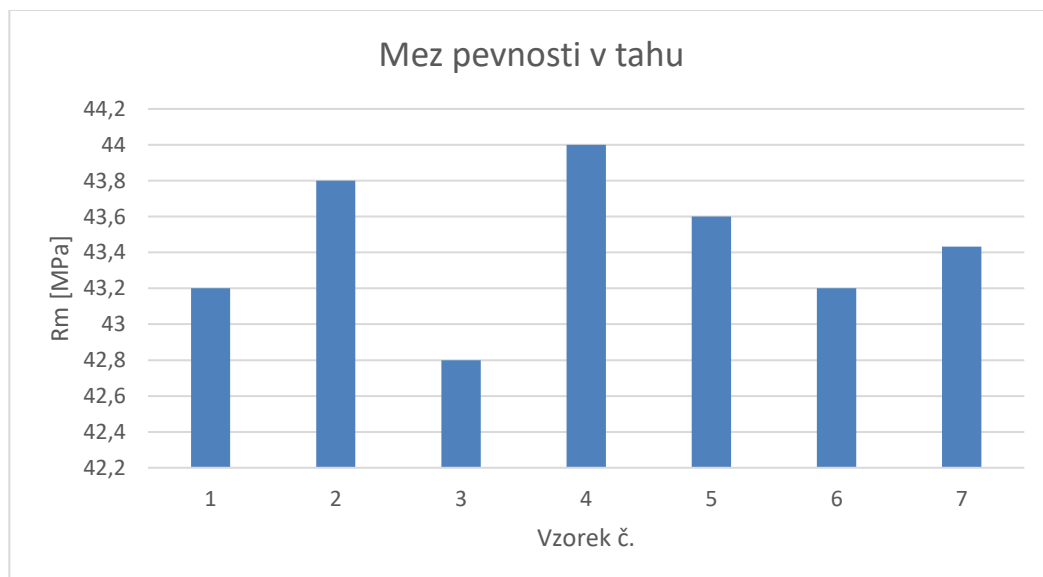
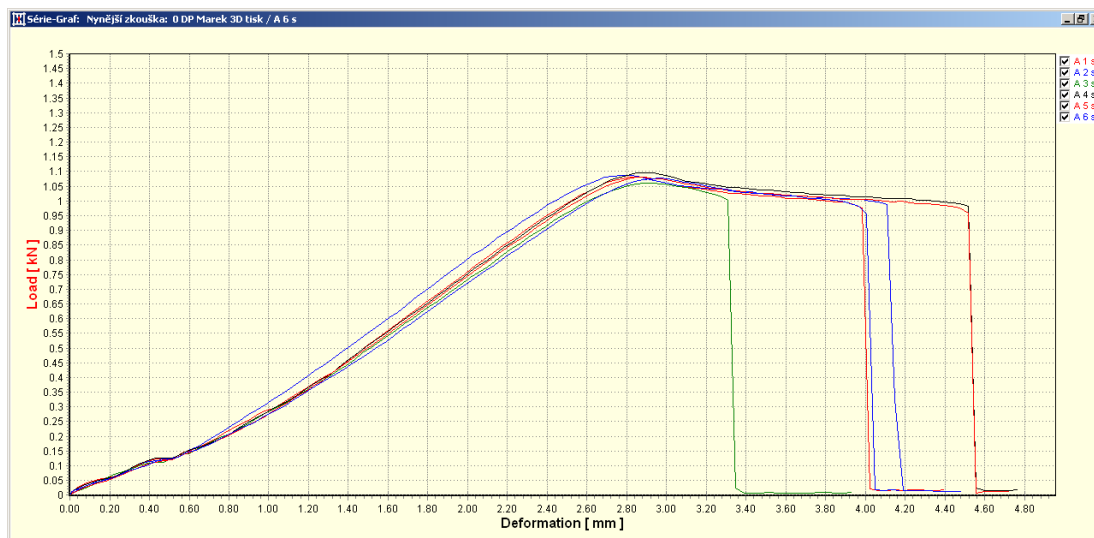
Černá barva – 100% výplň

č.vzorku	Fm [N]	A[mm ²]	σ_m [Mpa]	ΔL_0 [mm]	L ₀ [mm]	ϵ [-]
1	1150	25	46	4	25	0,16
2	1140	25	45,6	4,5	25	0,18
3	1150	25	46	4,8	25	0,192
4	1150	25	46	4,15	25	0,166
5	1150	25	46	4,3	25	0,172
6	1140	25	45,6	4,35	25	0,174
		σ_m[Mpa]	45,86667		ϵ [-]	0,174

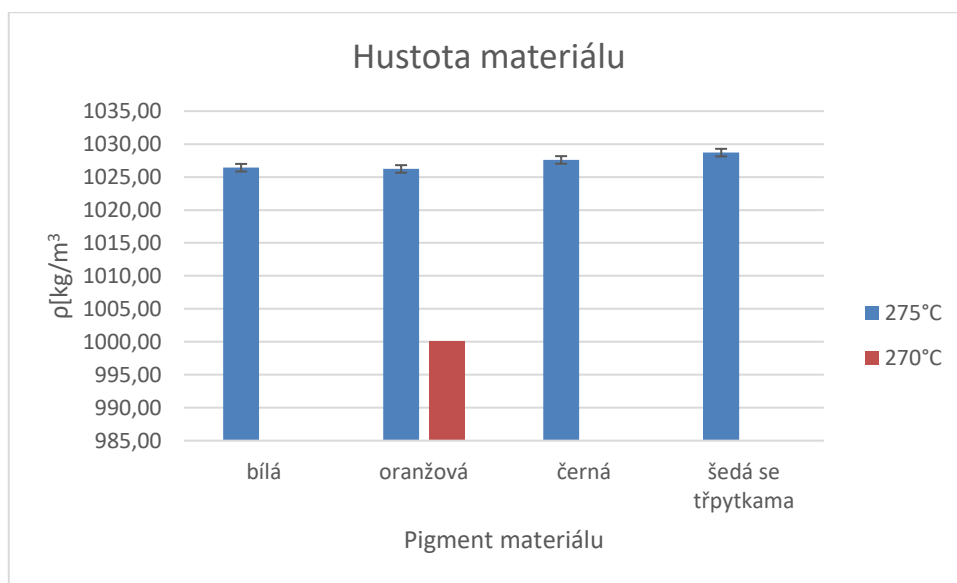


Šedá se třpytkami – 100% výplň

č.vzorku	Fm [N]	A[mm ²]	σ_m [Mpa]	ΔL_0 [mm]	L ₀ [mm]	ϵ [-]
1	1080	25	43,2	4	25	0,16
2	1095	25	43,8	4,2	25	0,168
3	1070	25	42,8	3,3	25	0,132
4	1100	25	44	4,5	25	0,18
5	1090	25	43,6	4,5	25	0,18
6	1080	25	43,2	4	25	0,16
		σ_m[Mpa]	43,43333		ϵ [-]	0,163333

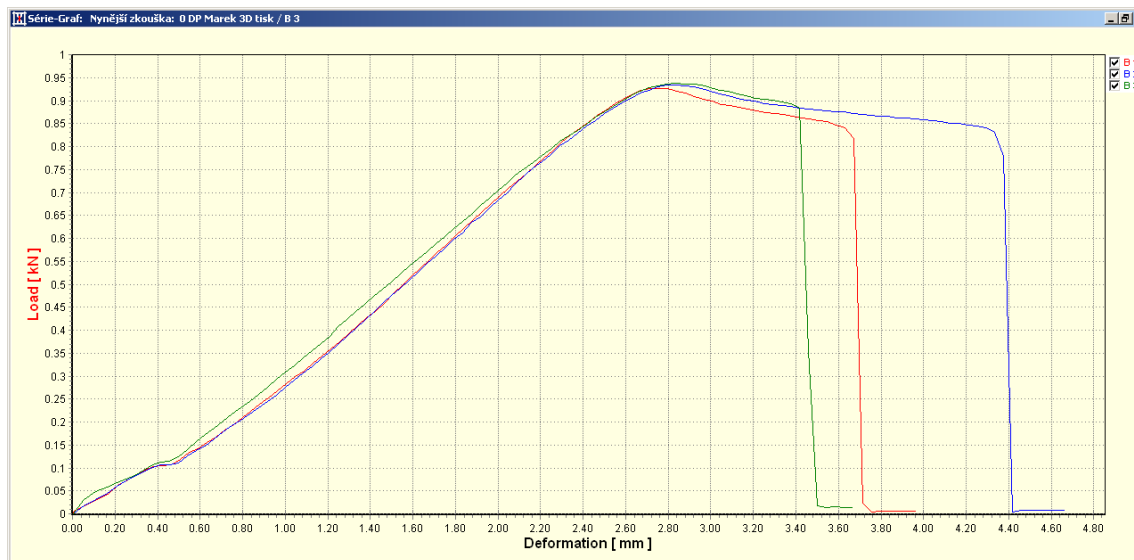


Hmotnost [g]				
č. vzorku	Natural	oranžová	černá	šedá s třp.
1	2,60	2,60	2,61	2,61
2	2,60	2,60	2,61	2,60
3	2,60	2,60	2,60	2,61
4	2,60	2,53	2,60	2,61
5	2,60	2,54	2,60	2,60
6	2,60	2,53	2,60	2,61
Průměrná hmotnost	2,60	2,60	2,61	2,61
		2,54		
Objem [mm³]	2535,18			
Hustota [kg/m³]	1026,42	1026,23	1027,59	1028,70
		1000,15		
*tisk při teplotě 270 °C				
Čas tisku	45m 19s			



B - konfigurace 10-10 ; 15% výplň honeycomb

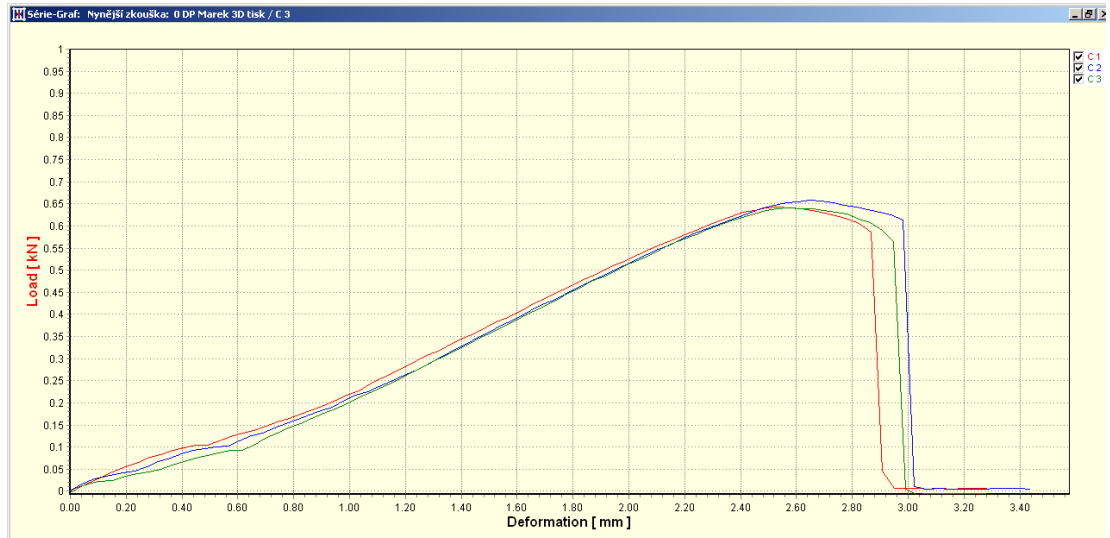
č.vzorku	Fm [N]	A[mm ²]	σ_m [Mpa]	ΔL_0 [mm]	L ₀ [mm]	ϵ [-]	
1	930	24	38,75	3,7	25	0,148	
2	940	24	39,16667	4,4	25	0,176	
3	940	24	39,16667	3,4	25	0,136	
		σ_m[Mpa]	39,02778			ϵ [-]	0,153333



	č.vzorku	Hmotnost
	1	2,3341
	2	2,3344
	3	2,3366
Průměrná hmotnost		2,335033
Objem		2535,18
Hustota		921,0523
Čas tisku	43m 35s	

C – konfigurace 5-5; 15% výplň honeycomb

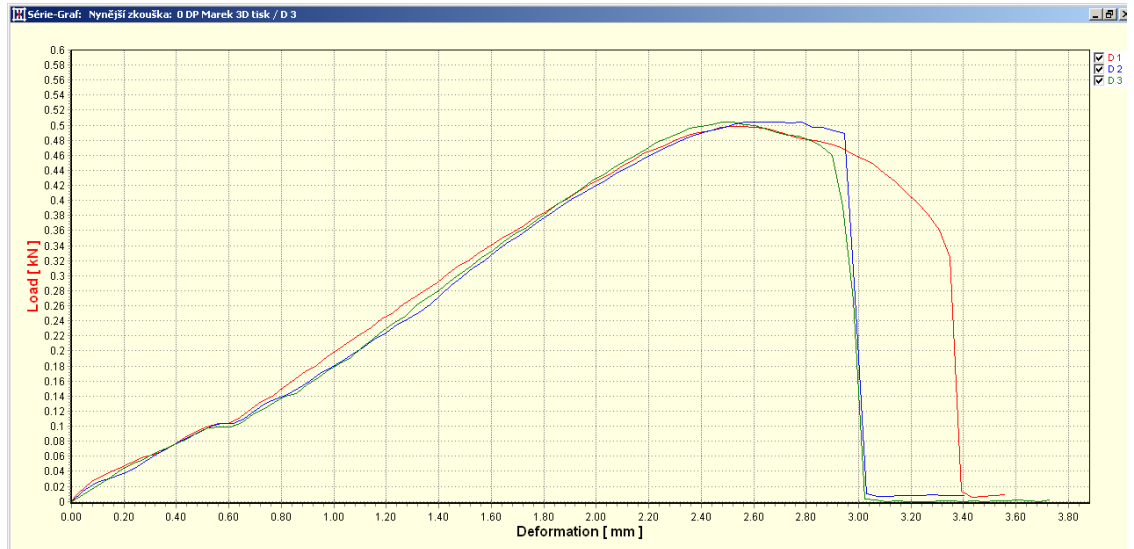
č.vzorku	Fm [N]	A[mm ²]	σ_m [Mpa]	ΔL_0 [mm]	L ₀ [mm]	ϵ [-]	
1	645	22	29,31818	2,8	25	0,112	
2	655	22	29,77273	2,95	25	0,118	
3	645	22	29,31818	2,9	25	0,116	
		σ_m[Mpa]	29,4697			ϵ [-]	0,115333



	č.vzorku	Hmotnost
	1	1,7781
	2	1,7765
	3	1,775
Průměrná hmotnost		1,776533
Objem		2535,18
Hustota		700,7523
čas tisku	39m 5s	

D - konfigurace 2-2; 15% výplň honeycomb

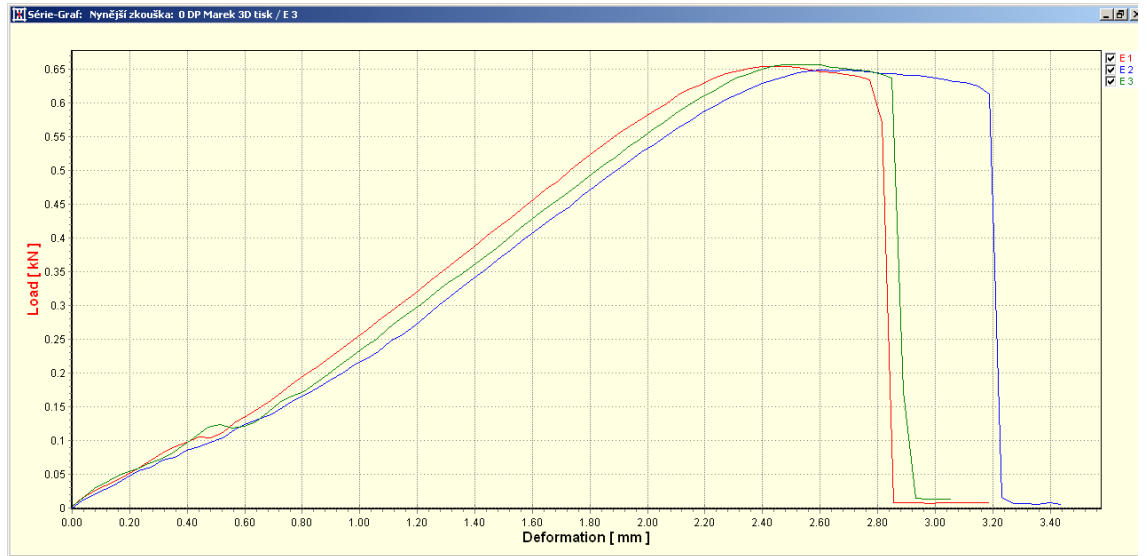
č.vzorku	Fm [N]	A[mm ²]	σ_m [Mpa]	ΔL_0 [mm]	L ₀ [mm]	ϵ [-]	
1	500	20,8	24,03846	3,35	25	0,134	
2	505	20,8	24,27885	2,95	25	0,118	
3	505	20,8	24,27885	2,9	25	0,116	
		σ_m[Mpa]	24,19872			ϵ [-]	0,122667



	č.vzorku	Hmotnost
	1	1,4534
	2	1,4539
	3	1,4515
Průměrná hmotnost		1,452933333
Objem		2535,18
Hustota		573,1085498
Čas tisku	36m 23s	

E – 50% výplň honeycomb

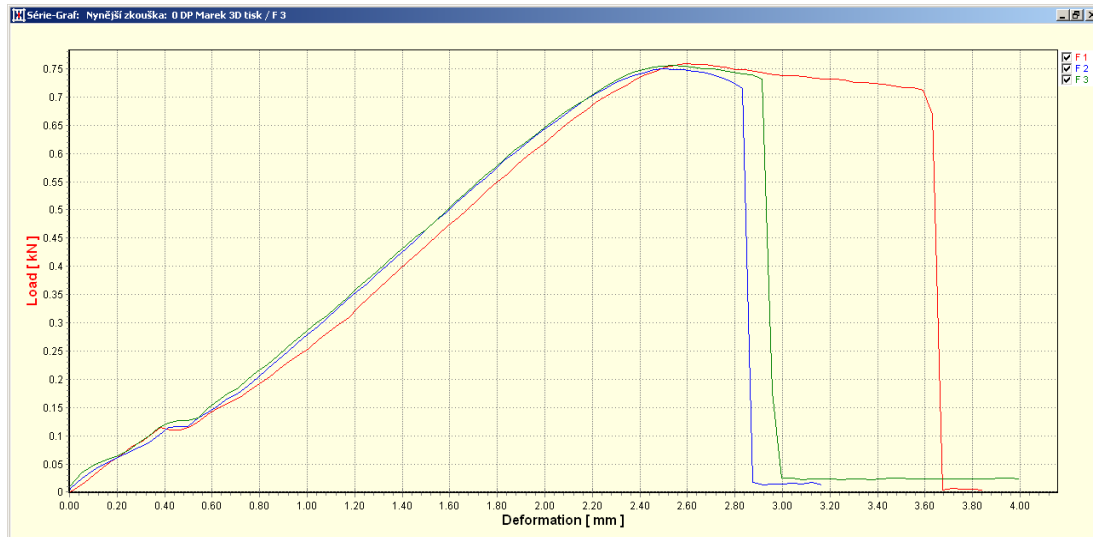
č.vzorku	F _m [N]	A[mm ²]	σ _m [Mpa]	ΔL ₀ [mm]	L ₀ [mm]	ε [-]	
1	655	25	26,2	2,8	25	0,112	
2	650	25	26	3,2	25	0,128	
3	660	25	26,4	2,85	25	0,114	
			σ_m[Mpa]	26,2		ε [-]	0,118



	č.vzorku	Hmotnost
	1	2,0171
	2	2,0192
	3	2,0162
Průměrná hmotnost		2,0175
Objem		2535,18
Hustota		795,8015
Čas tisku	1h 8 m 10s	

F – 80% výplň gyroid

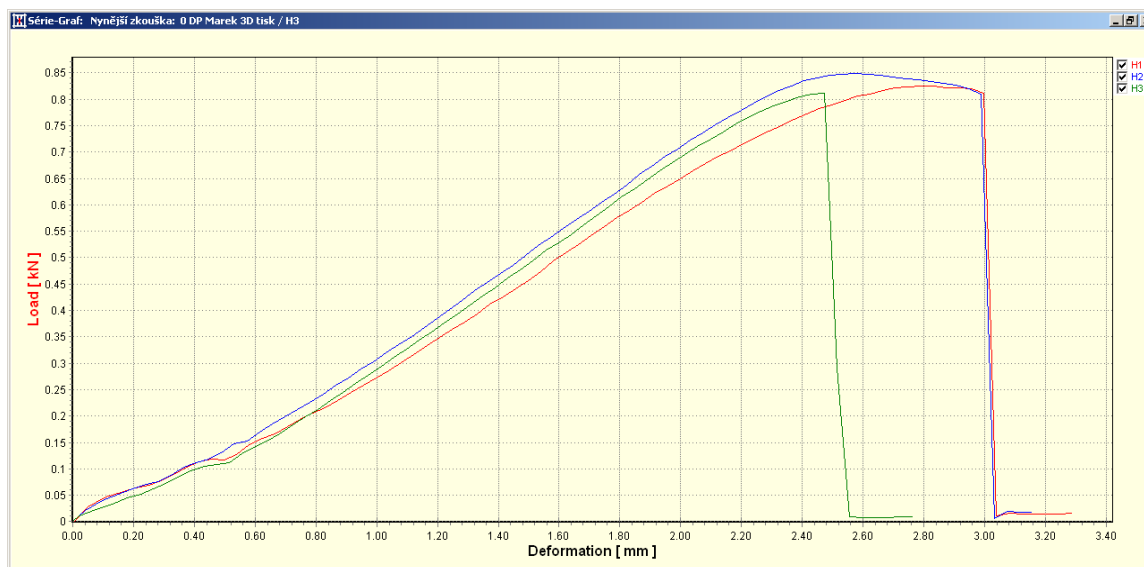
č.vzorku	Fm [N]	A[mm ²]	σ_m [Mpa]	ΔL_0 [mm]	L ₀ [mm]	ϵ [-]	
1	760	25	30,4	3,65	25	0,146	
2	750	25	30	2,85	25	0,114	
3	760	25	30,4	2,85	25	0,114	
			σ_m[Mpa]	30,26667		ϵ [-]	0,124667



	č.vzorku	Hmotnost
	1	2,2395
	2	2,235
	3	2,23
Průměrná hmotnost		2,234833
Objem		2535,18
Hustota		881,5285
čas tisku	57m 9s	

H – 80% výplň honeycomb

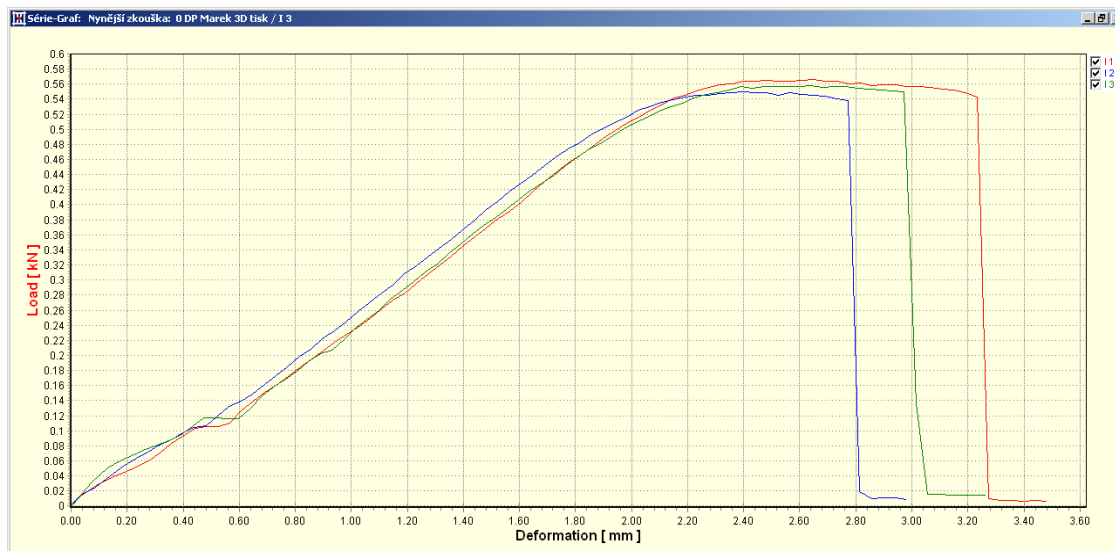
č.vzorku	Fm [N]	A[mm ²]	σ_m [Mpa]	ΔL_0 [mm]	L ₀ [mm]	ϵ [-]	
1	825	25	33	3	25	0,12	
2	850	25	34	3	25	0,12	
3	815	25	32,6	2,45	25	0,098	
		σ_m[Mpa]	33,2			ϵ [-]	0,112667



	č.vzorku	Hmotnost
	1	2,2987
	2	2,3342
	3	2,3213
Průměrná hmotnost		2,318067
Objem		2535,18
Hustota		914,3598
čas tisku	1h 31m 33s	

I – 80% výplň gyroid bez perimetrů

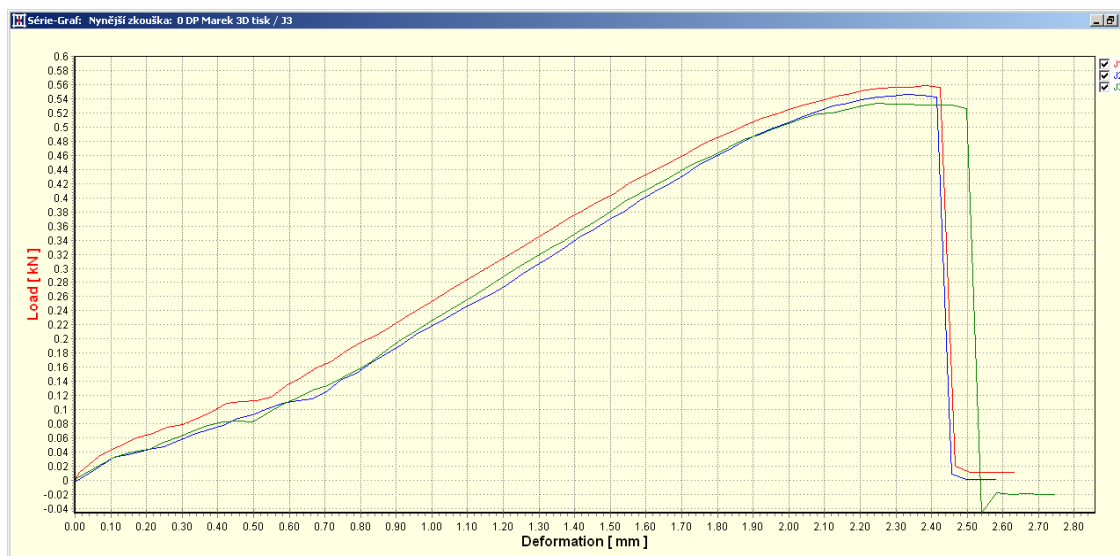
č.vzorku	F _m [N]	A[mm ²]	σ _m [Mpa]	ΔL ₀ [mm]	L ₀ [mm]	ε [-]	
1	570	25	22,8	3,25	25	0,13	
2	550	25	22	2,75	25	0,11	
3	560	25	22,4	2,95	25	0,118	
		σ_m[Mpa]	22,4			ε [-]	0,119333



	č.vzorku	Hmotnost
	1	2,01
	2	2,0074
	3	2,0018
Průměrná hmotnost		2,0064
Objem		2535,18
Hustota		791,4231
čas tisku	55m 37s	

J – 80% výplň honeycomb bez perimetrů

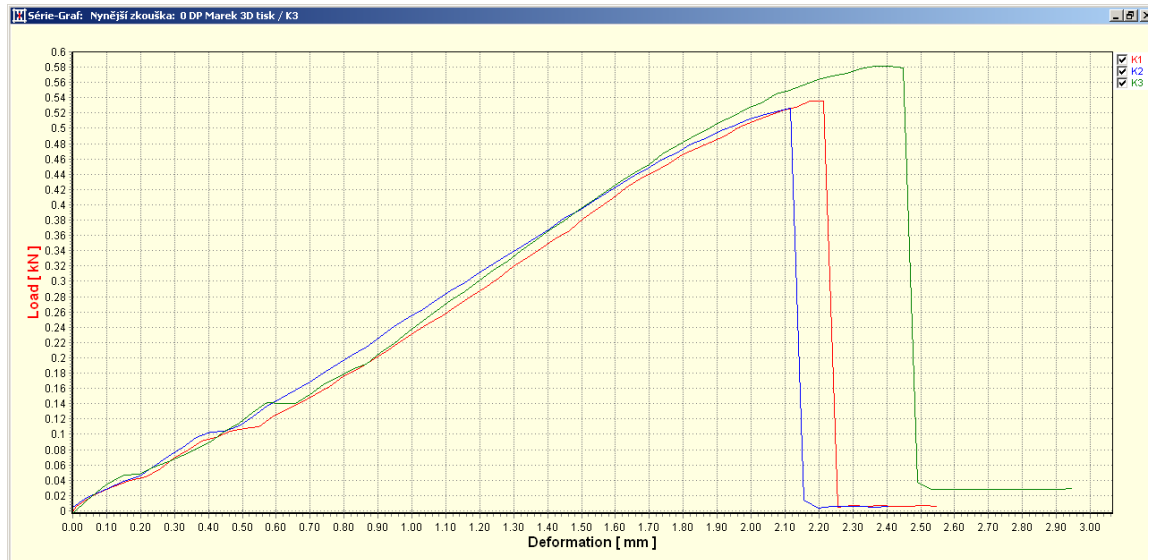
č.vzorku	Fm [N]	A[mm ²]	σ_m [Mpa]	ΔL_0 [mm]	L ₀ [mm]	ϵ [-]	
1	560	25	22,4	2,4	25	0,096	
2	549	25	21,96	2,4	25	0,096	
3	535	25	21,4	2,5	25	0,1	
		σ_m[Mpa]	21,92			ϵ [-]	0,097333



	č.vzorku	Hmotnost
	1	2,2987
	2	2,3342
	3	2,3213
Průměrná hmotnost		2,318067
Objem		2535,18
Hustota		914,3598
čas tisku		1h 33m 47s

K – 80% výplň grid bez perimetrů

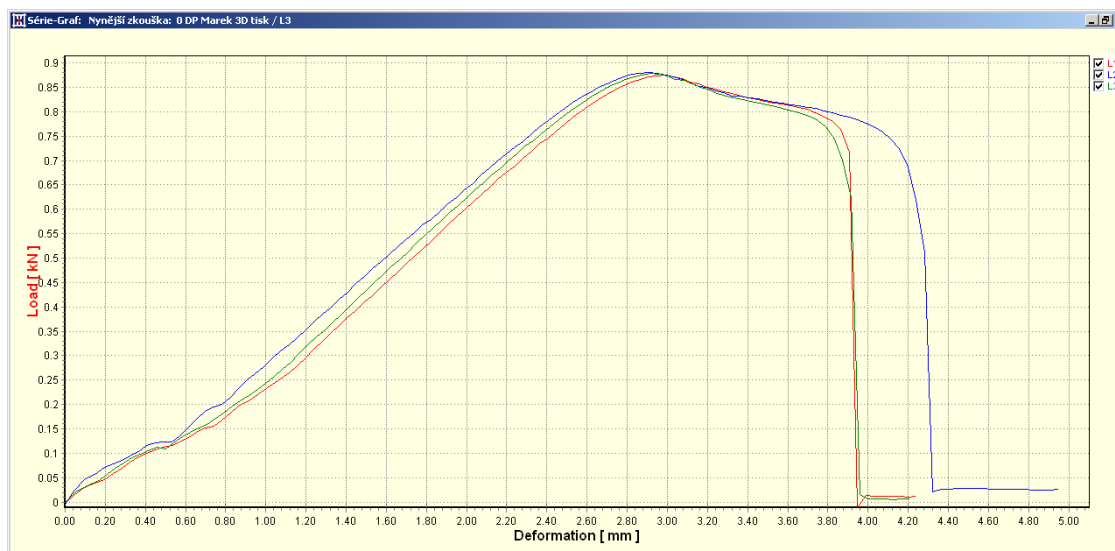
č.vzorku	Fm [N]	A[mm ²]	σ_m [Mpa]	ΔL_0 [mm]	L ₀ [mm]	ϵ [-]
1	540	25	21,6	2,2	25	0,088
2	530	25	21,2	2,15	25	0,086
3	580	25	23,2	2,4	25	0,096
		σ_m[Mpa]	22		ϵ [-]	0,09



	č.vzorku	Hmotnost
	1	2,3266
	2	2,3248
	3	2,325
Průměrná hmotnost		2,325467
Objem		2535,18
Hustota		917,2787
čas tisku	36m14s	

L – 80% výplň concentric bez perimetrů

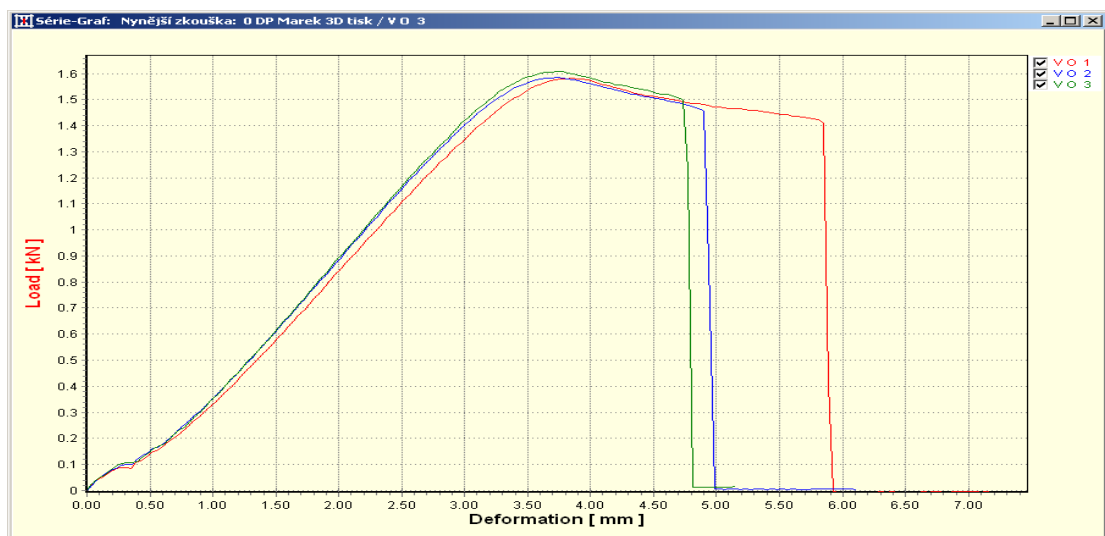
č.vzorku	Fm [N]	A[mm ²]	σ_m [Mpa]	ΔL_0 [mm]	L ₀ [mm]	ϵ [-]	
1	875	25	35	3,85	25	0,154	
2	880	25	35,2	4,2	25	0,168	
3	880	25	35,2	3,9	25	0,156	
		σ_m[Mpa]	35,13333			ϵ [-]	0,159333



	č.vzorku	Hmotnost
	1	2,0974
	2	2,0982
	3	2,0987
Průměrná hmotnost		2,0981
Objem		2535,18
Hustota		827,5941

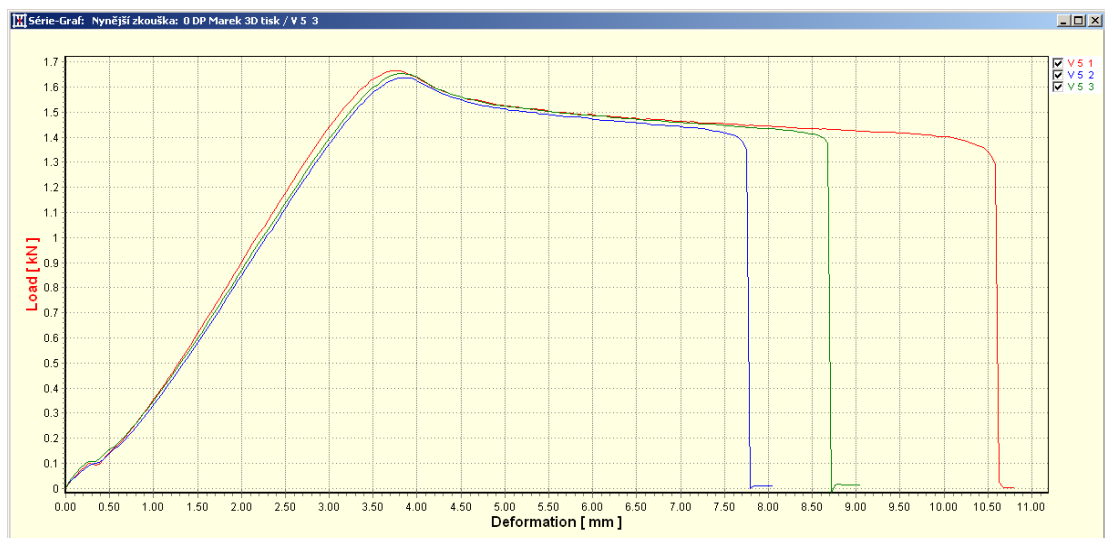
V0 – 0 perimetrů ; 100% výplň

č.vzorku	Fm [N]	A[mm ²]	σ_m [Mpa]	ΔL_0 [mm]	L ₀ [mm]	ϵ [-]	
1	1580	40	39,5	5,9	50	0,118	
2	1590	40	39,75	4,95	50	0,099	
3	1610	40	40,25	4,7	50	0,094	
			σ_m[Mpa]	39,83333		ϵ [-]	0,103667



V5- 5 perimetrů ; 100% výplň

č.vzorku	Fm [N]	A[mm ²]	σ_m [Mpa]	ΔL_0 [mm]	L ₀ [mm]	ϵ [-]	
1	1660	40	41,5	13	50	0,26	
2	1640	40	41	7,8	50	0,156	
3	1650	40	41,25	8,7	50	0,174	
			σ_m[Mpa]	41,25		ϵ [-]	0,196667



V10- 10 perimetrů ; 100% výplň

č.vzorku	Fm [N]	A[mm ²]	σ_m [Mpa]	ΔL_0 [mm]	L ₀ [mm]	ϵ [-]	
1	1750	40	43,75		50	0	
2	1750	40	43,75	6,2	50	0,124	
3	1760	40	44	7,2	50	0,144	
			σ_m[Mpa]	43,83333		ϵ [-]	0,089333

