



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav letadlové techniky

Materiálové vlastnosti 3D tištěných vzorků

Material properties of 3D printed specimens

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2022

Jan Krapf

Studijní program: B2341 Strojírenství

Studijní obor: 3901R051 Konstruování podporované počítačem

Vedoucí práce: Ing. Jakub Valenta

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Krapf** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **484755**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav letadlové techniky**
Studijní program: **Strojírenství**
Studijní obor: **Konstruování podporované počítačem**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Materiálové vlastnosti 3D tištěných vzorků

Název bakalářské práce anglicky:

Material properties of 3D printed specimens

Pokyny pro vypracování:

Náplní této práce je prozkoumat materiálové vlastnosti 3D tištěných vzorků.

Body zadání:

- Rešerše technologie a materiálů
- Volba technologie a materiálu
- Příprava vzorků
- Provedení pevnostní zkoušky
- Vyhodnocení naměřených dat

Seznam doporučené literatury:

Dle pokynů vedoucího.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jakub Valenta ústav letadlové techniky FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **29.04.2022** Termín odevzdání bakalářské práce: **08.06.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Jakub Valenta
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Robert Theiner, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
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.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

podpis

Poděkování:

Tímto bych rád poděkoval panu Ing. Jakubu Valentovi, za odborné rady a pomoc při vedení mé bakalářské práce. Chci poděkovat Ing. Františku Brožovi, za vytisknutí vzorků, také bych chtěl poděkovat Ing. Jaromíru Kučerovi, za pomoc při provedení zkoušky. Dále bych chtěl poděkovat své rodině a přátelům za velikou podporu při psaní práce.

Anotační list

jméno autora:	Jan Krapf
název práce:	Materiálové vlastnosti tištěných vzorků
rok vypracování:	2022
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Konstruování podporované počítačem
Ústav:	Ústav letadlové techniky
Jméno vedoucího:	Ing. Jakub Valenta
Bibliografické údaje:	počet stran 75
	Počet obrázků 22
	Tabulek 13
	Příloh 31

Anotace

Teoretická část práce má za cíl zpracovat rešerši dostupných tiskových technologií a materiálů a poté pomocí metody trade matrix vybrat perspektivní materiál a technologii. V praktické části budou vytvořeny 3D tištěné vzorky. Zhodnotíme, jaké kvality tisku se podařilo dosáhnout a podrobíme je tahové zkoušce. Následně je cílem zjistit, jaká je závislost poměru mezi hmotností a pevností na hustotě použitého infillu a zjistit, jaká je funkční závislosti.

Během tahové zkoušky bylo zjištěno, že při vlastním tisku došlo k vnitřním vadám, které se výrazně podepsaly na výsledku tahové zkoušky. Podle získaných dat jsme došli k výsledku, že závislost poměru mezi hmotností a pevností na hustotě použitého infillu je konstantní.

Klíčová slova

3D tisk, mechanické vlastnosti, plast, tahová zkouška, ABS, PA, FDM tisk

Annotation sheet

Author Name:	Jan Krapf
Thesis Title:	Material Properties of Printed Samples
Year of elaboration:	2022
Study program:	Mechanical Engineering
Specialization:	Computer-aided design
Department:	Department of Aircraft Engineering
Name of the supervisor:	Ing. Jakub Valenta
Bibliographic data:	number of pages 75
	Number of Images 22
	Table 13
	Appendices 31

Annotation

The theoretical part of the thesis aims to process a search of available printing technologies and materials and then use the trade matrix method to select promising material and technology. In the practical part 3D printed samples will be created. We will evaluate what print quality has been achieved and put them to the tensile test. Subsequently, the aim is to find out what is the dependence of the ratio between mass and strength on the density of the infill used and to find out what the functional dependence is.

During the tensile test, it was found that during the actual printing there were internal defects that significantly affected the result of the tensile test. According to the obtained data, we came to the conclusion that the dependence of the ratio between mass and strength on the density of the infill used is constant.

Keywords

3D printing, mechanical properties, plastic, tensile test, ABS, PA, FDM Printing

Obsah

1	Úvod.....	12
2	Teoretická část	13
2.1	Druhy 3D tiskáren	13
2.2	Metody 3D tisku.....	13
2.2.1	Selective Laser Sintering (SLS).....	14
2.2.2	Selective Heat Sintering (SHS).....	15
2.2.3	Binder Jetting (BJ)	15
2.2.4	Multijetprinting (MJP)	17
2.2.5	Fused Deposition Modeling (FDM).....	18
2.2.6	Stereolitografie (SLA).....	19
2.3	Materiály	20
2.3.1	ABS	20
2.3.2	PLA	21
2.3.3	Nylon.....	21
2.3.4	Polykarbonát.....	22
2.3.5	PEEK.....	22
2.3.6	Tabulka materiálů.....	23
2.4	Volba technologie a materiálu.....	23

2.5	Mechanické zkoušky	24
2.5.1	Zkouška tahem	24
2.6	Model	27
2.6.1	Vnitřní struktura	27
2.6.2	Tvar a rozměry modelu.	28
2.7	G-Code	29
3	Praktická část	30
3.1	Metodologie výzkumu.....	30
3.1.1	Téma výzkumu	30
3.1.2	Cíle výzkumu	30
3.2	Použitý materiál a technologie	30
3.2.1	Materiál	30
3.2.2	3D tiskárna	31
3.2.3	Stand pro trhání	33
3.3	Parametry tisku.....	34
3.4	Vzorky	36
3.4.1	Vady vzorků	36
3.4.2	Měření vzorků	39
3.5	Trhací zkouška	43
3.5.1	Transparentní výpočet.....	44
3.5.2	Výsledky zkoušky	48

4 Závěr	53
Zdroje	54
Seznam grafů.....	57
Seznam tabulek	57
Seznam rovnic	58
Příloha 1 Naměřené hodnoty vzorků	60
Příloha 2 Grafy průběhu tahové zkoušky.....	63
Příloha 3 Materiálový list.....	74

Seznam zkratek

ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
BJ	Binder Jetting
ČSN	České technické normy
DLP	Digital Light Processing
FDM	Fused Deposition Modeling
MP	Multijetprinting
PA	Nylon
PLA	Polylactic acid
SHS	Selective Heat Sintering
SLA	Stereolitografie
SLS	Selective Laser Sinterin

Seznam zkratek

E		Modul pružnosti v tahu
F	[N]	síla
H	[$Mpa * g^{-1}$]	Poměr pevnosti a hmotnosti
L	[mm]	počáteční upínací vzdálenost mezi body měřícími prodloužení
L ₀	[mm]	počáteční délka vzorku
L _t	[mm]	konečná změna upínací vzdálenosti mezi body měřícími prodloužení
S	[mm ²]	průřez
S ₀	[mm ²]	počáteční průřez vzorku
u _a		nejistota typu A
u _{AF}	[N]	nejistota typu A pro sílu
U _{AH}	[$Mpa * g^{-1}$]	nejistota pro poměr pevnosti a hmotnosti
u _{AS}	[mm ²]	nejistota průřezu
u _{AT}	[mm]	nejistota typu A tloušťky vzorku
u _{AW}	[mm]	nejistota typu A šířky vzorku
U _{Aσ}	[MPa]	nejistota napětí
u _b		nejistota typu B
U _{bF}	[N]	nejistota typu B síly
u _{bWT}	[mm ²]	nejistota typu B tloušťky a šířky
u _c		Kombinovaná nejistota
u _{cF}	[N]	Kombinovaná nejistota síly
u _{CT}	[mm ²]	Kombinovaná nejistota tloušťky
u _{CW}	[mm]	Kombinovaná nejistota šířky
ε	[%]	poměrné prodloužení
ε _i	[%]	jmenovité poměrné prodloužení
σ	[MPa]	napětí
ΔL ₀	[mm]	změna počáteční délky vzorku

1 Úvod

„Kdysi dávno bývaly věci tak jednoduché! Bylo to tím, že vesmír byl plný nevědomosti a vědec ho musel promývat jako prospektor, přikrčený se svou páneví u horského potoka. Drahocenné valouny vědění však musel hledat ve směsi štěrku nevědomosti, písku nejistoty a malých chlupatých a osminohých plovoucích obluděk pověrčivosti.“ [21]

Tento citát jsme zvolili, protože velmi dobře vystihuje směr, jakým se ubírá tato bakalářská práce.

Technologie 3D tisku zažívá v poslední době velikou vlnu popularity a je potřeba prozkoumat všechny možnosti a závislosti, které nabízí.

Bakalářská práce se zabývá studiem závislosti vlivu vnitřní struktury na poměr mezi pevností a hmotností tištěného dílu. Toto téma jsme zvolili na základě faktu, že letecký průmysl vyžaduje, aby hmotnost veškerých komponent byla co možná nejnižší při dané pevnosti. V případě pozitivního výsledku testů, kdy poměr pevnosti a hmotnosti materiálu bude výhodnější u menších hustot infillu, bude možné odlehčovat tištěné díly bez ztráty pevnosti. Dále by bylo možné predikovat závislost pevnosti na hustotě výplně.

V teoretické části se zabýváme volbou vhodné technologie 3D tisku a materiálu pro 3D tisk. Jednotlivé technologie a materiály mezi sebou porovnáváme a na základě hodnotících parametrů vybíráme nejperspektivnější dostupnou technologii 3D tisku a materiál.

V praktické části se věnujeme přípravě tištěných vzorků podle dané normy, zhodnocení jejich kvality a následné provedení zkoušky tahem.

2 Teoretická část

Tato kapitola má za cíl vytvořit pro čtenáře základní přehled možných technologií tisku a o materiálech, které je možné použít v této oblasti. Na základě parametrů níže zmíněných technologií, bude vybrána technologie a materiál vhodný k dalšímu výzkumu.

2.1 Druhy 3D tiskáren

3D tiskárny lze dělit na základě několika hledisek.

Prvním hlediskem je koncepce tiskáren, a to zda jsou či nejsou plány pro tiskárnu volně k použití. Jestliže jsou plány volně k použití, tedy open source, pak se takové tiskárny velice snadno upravují a vyvíjejí. V případě, že plány nejsou volně k užití, jedná se zpravidla spíše o poloprofesionální tiskárny. Profesionální tiskárny narozdíl od open source zaručují, přesnost a opakovatelnost tisku, ve výrobcem uvedených tolerancích. Tyto tiskárny, ale zároveň bývají certifikovány na daný materiál například PLA.

Dalším hlediskem pak může být technologie 3D tisku. Existuje celá řada technologií, jak tisk zajistit. Tyto budou rozvedeny níže. Za zmínku stojí také dělení tisku podle tisknutého média, totiž jestli se tiskne z prášku, struny či tekutiny. [1] [2]

2.2 Metody 3D tisku

V této kapitole budou popsány některé z technologií 3D tisku. Konkrétně se bude jednat o SLS, SHS, BJ, MP, FDM a SLA tisk. Toto jsou vybrané technologie v současné době pro průmysl běžně dostupné. Dále pak existuje dalších několik principů tisku, v této práci není třeba podrobně popisovat. Jedná se o DLP tisk, který je velice podobný SLA tisku. Rozdíl je ve zprostředkování vytvrzování materiálu, kdy namísto laseru se používá UV lampa. A pak existuje LOM, který vrství jednotlivé pláty vybraného média jako je například papír, který se vyřízne a je následně spojen dohromady.

2.2.1 Selective Laser Sintering (SLS)

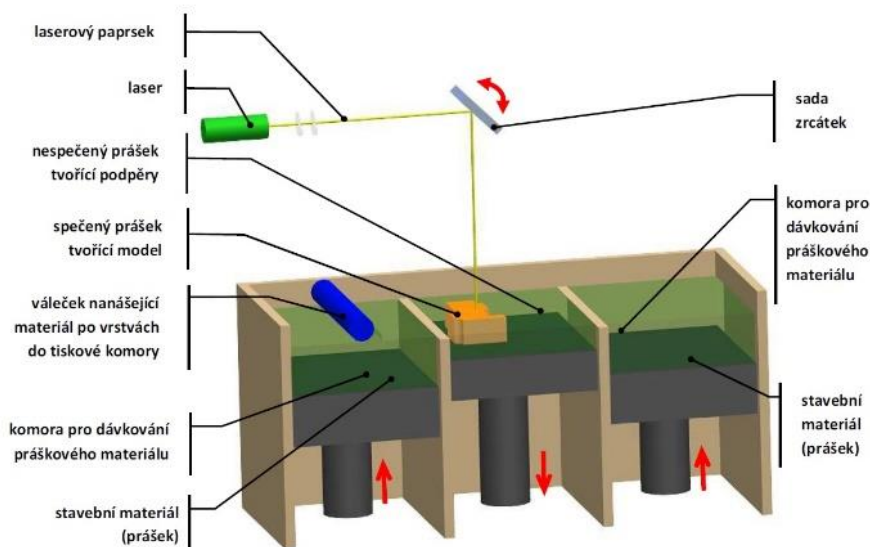
Jedná se o technologii, která je založena na spékání prášku. Tato metoda se dá využít u oceli, plastu, nebo keramiky. V principu metoda funguje tak, že se na podložku nanese práškový film, který je pak v požadovaných bodech spečen laserem, poté se podložka posune a nanese se další vrstva a metoda se opakuje. U této technologie je nutné, aby se nevytvářely zcela uzavřené objekty kvůli odstranění nepoužité vrstvy prášku. Tato metoda byla patentována v roce 1987 a jedná se tak o jednu z nejstarších metod 3D tisku. [1] [4]

Výhody:

- Není potřeba žádných vnitřních podpor pro tisk
- Opětovné použití materiálu
- Je možná další povrchová úprava
- Solidní chemická odolnost

Nevýhody:

- Vysoká cena tiskárny
- Porézní povrch výtisku.



Obrázek 2-1 SLA schéma [1]

2.2.2 Selective Heat Sintering (SHS)

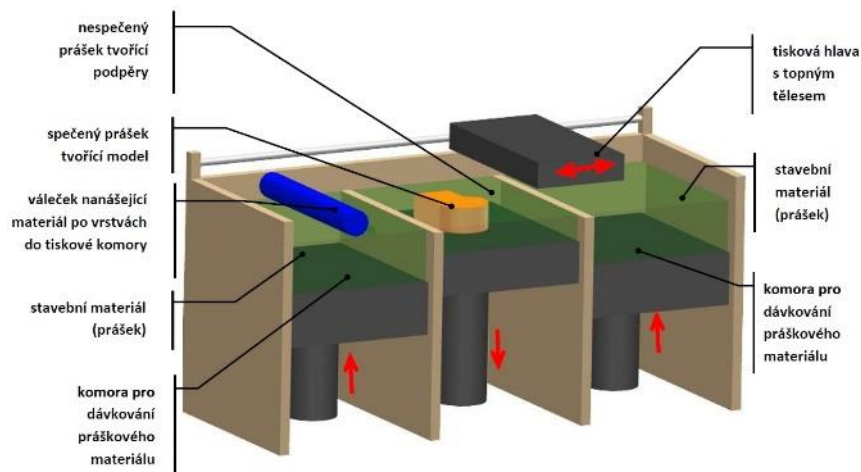
Jedná se obdobný princip jako u SLS tisku, až na skutečnost, že spékání není uskutečněno laserem nýbrž pomocí zdroje tepla v tiskové hlavě. [1]

Výhody:

- nižší pořizovací cena než u tiskáren typu SLS
- Možnost 100% recyklování nepoužitého materiálu
- Nemusí se používat podpory pro tisk

Nevýhody:

- Nutnost očištění modelu stlačeným vzduchem



Obrázek 2-2 SHS schéma [1]

2.2.3 Binder Jetting (BJ)

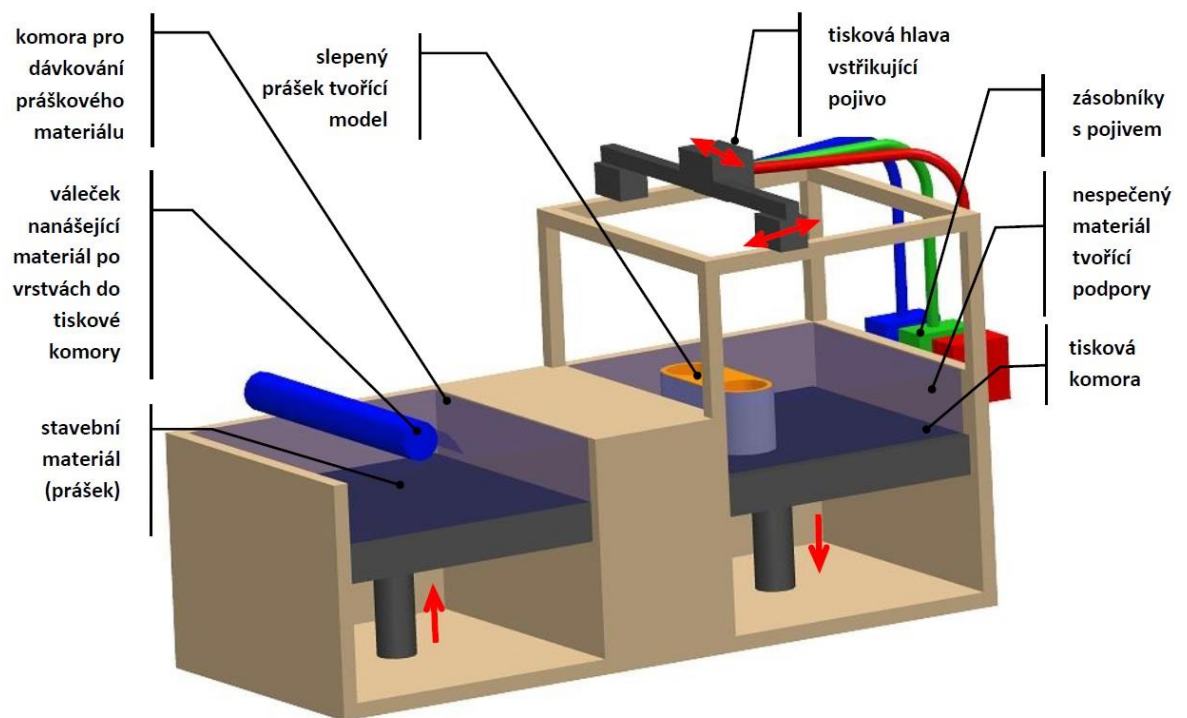
Jedná se o poměrně mladou metodu tisku. Patentována byla v roce 2002. Princip je podobný jako u SLS tiskárny, až na skutečnost, že zde nedochází ke spékání, nýbrž k chemickému spojování. Na vrstvu prášku (nejčastěji kov nebo keramika) je selektivně nanášena vrstva pojiva z tiskové hlavy. Vrstva je dokončena až po zaschnutí pojiva. [1] [5]

Výhody:

- Kovové výtisky je možné využít jako funkční součást
- Výrazně nižší cena oproti SLS tiskáren
- Není zapotřebí podpor, prášek sám funguje jako podpora.

Nevýhody:

- Nutnost postprocesingu (odstranění neslepeného prášku)
- Horší mechanické vlastnosti oproti technologii SLS



Obrázek 2-3 BJ schéma [1]

2.2.4 Multijetprinting (MJP)

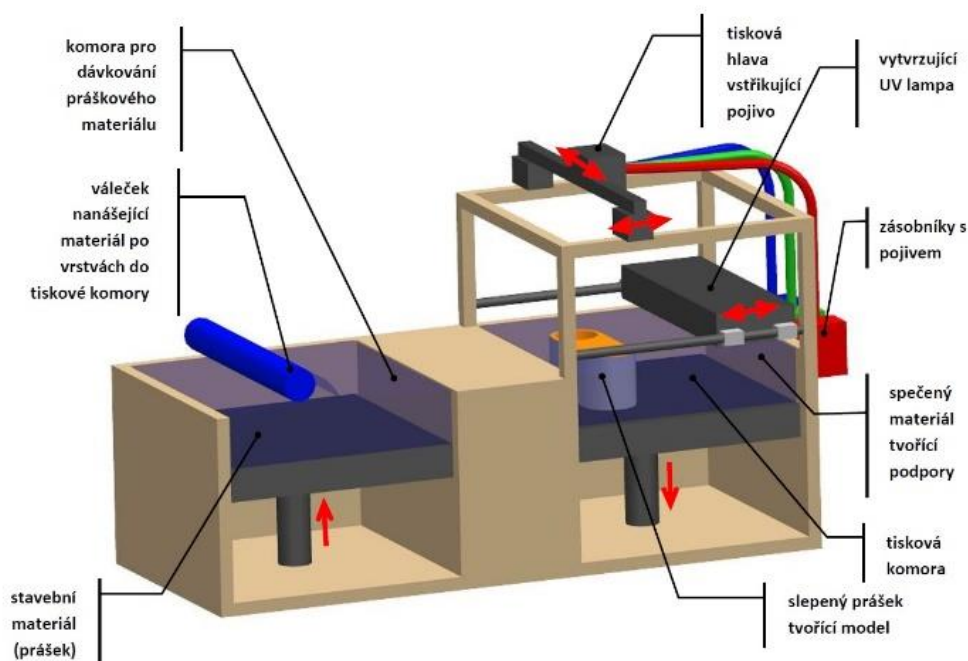
Tato metoda tisku byla vyvinuta společností 3D Systems. Její principiální funkce je podobná jako u metody BJ. Rozdíl je v tom, že po té, co je nanese pojivo, okamžitě dochází k vytvrzování za pomoci UV záření. Vytisknutý materiál je obklopen podpurným materiálem, totiž voskem. Podpurný materiál je snadné odstranit pomocí vodní lázně. Materiály, které jsou použitelné pro tuto metodu, jsou vyrobeny na míru k tiskárně od 3D Systems. [1] [5]

Výhody:

- Kvalitní a přesný povrch
- Dobré mechanické vlastnosti
- Rychlý tisk

Nevýhody:

- Cena materiálu



Obrázek 2-4 MP schéma [1]

2.2.5 Fused Deposition Modeling (FDM)

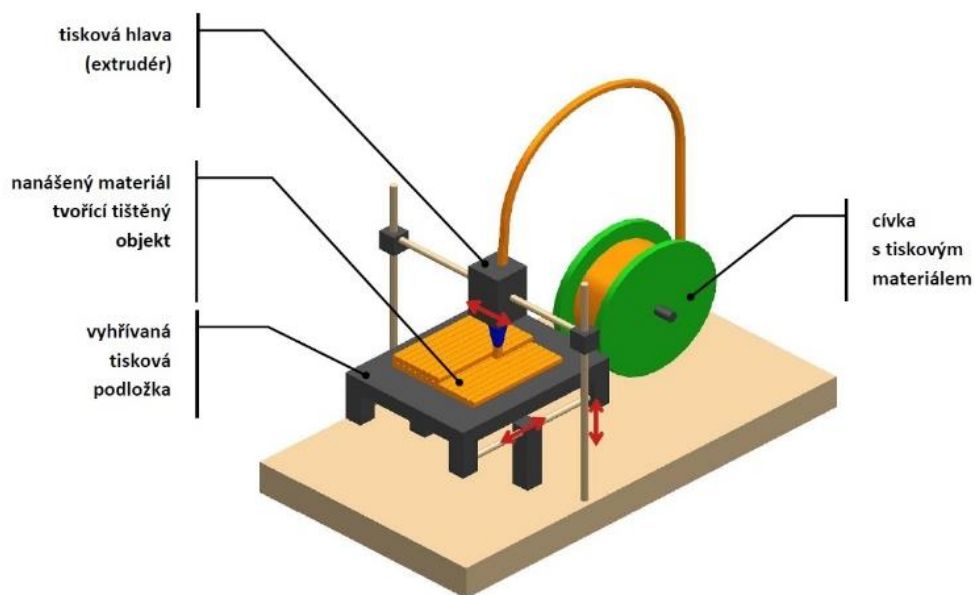
Tato metoda již nevyužívá práškového materiálu. Do tiskové hlavy je vtačována natavená struna, ta je pak tryskou nanášena na tiskovou podložku. Jedná se o nejběžněji používanou metodu tisku na trhu. Díky velice jednoduchému systému je možné vyrobit tiskárnu za velice nízkou cenu. Pro tisk složitých modelů je potřeba vytvořit před vlastním tiskem systém podpor. [1] [2] [5]

Výhody:

- Nízká pořizovací cena.
- Dobré mechanické vlastnosti.
- Široká škála použitelných materiálů.
- Možnost barevného tisku.
- Možnost duality materiálů.

Nevýhody:

- Hrubá struktura povrchu.
- Výtisk se chová jako anizotropní materiál.
- Nutnost odstraňování podpor.



Obrázek 2-5 FDM schéma [1]

2.2.6 Stereolitografie (SLA)

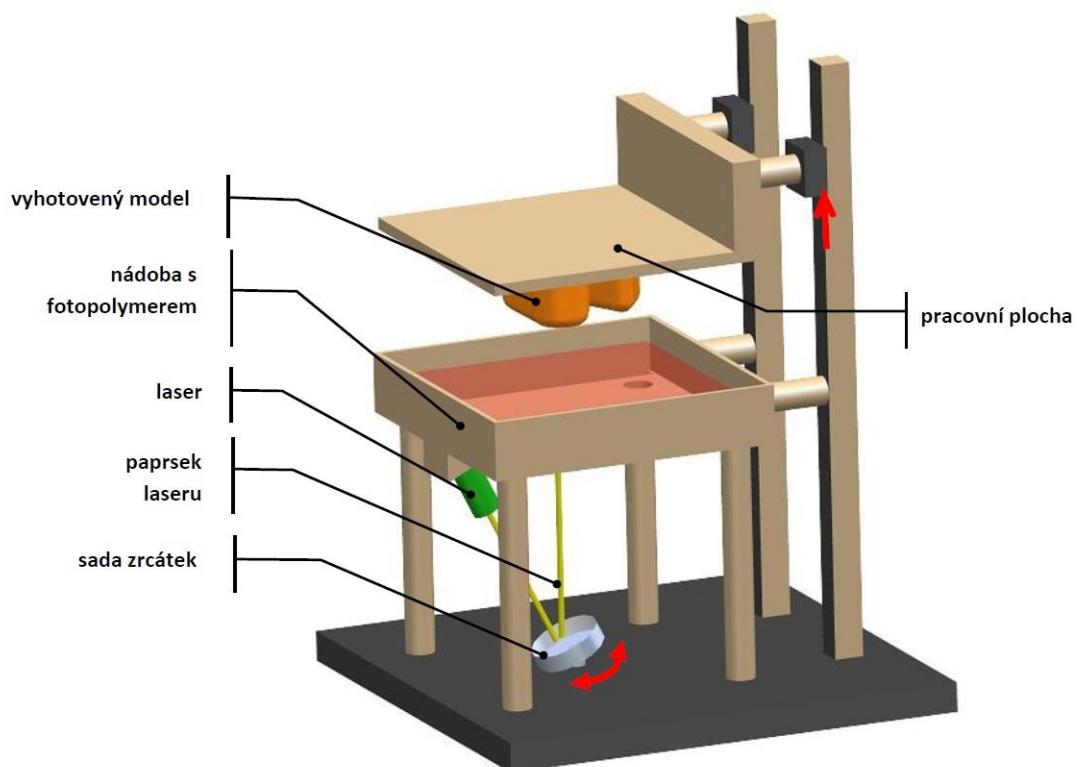
Jedná se o nejstarší používanou metodu 3D tisku.

SLA metoda se dá praktikovat pouze u fotopolymerů, které je potřeba dále nechat vytvrdit pro zlepšení mechanických vlastností. Tato metoda nabízí velice vysokou přesnost v řádu mikronů, nicméně minimální výška vrstvy je 0,01 mm.

Metoda SLA se praktikuje pomocí dvou principů.

V prvním případě je pracovní plocha celá ponořená ve fotopolymeru a laser následně vytvrzuje na ploše model, a po dokončení se pracovní plocha posouvá vzhůru a vytahuje hotový model.

Druhý princip funguje přesně opačně. V tomto případě je pracovní deska ponořována do fotopolymeru, a to vždy o jednu vrstvu, a ten je následně vytvrzován laserem shora. [1]



Obrázek 2-6 schéma SLA tiskárny [1]

2.3 Materiály

Materiálů pro 3D tisk existuje celá řada, nicméně pro konstrukční účely se hodí jen malé množství. Následující podkapitoly budou zaměřeny na materiály, které jsou svými charakteristikami zajímavé pro možnou výrobu funkčních dílů. Jedná se o ABS, PLA, Nylon, Polykarbonát a PEEK. V experimentální části se budeme zabývat zejména Nylonem.

U materiálu je zapotřebí sledovat následující vlastnosti:

- Mez pevnosti
- Hustotu
- Tiskovou teplotu
- Teplotní odolnost
- Teplotní roztažnost (především u FDM tisku)
- Možnosti lepení
- Cenu
- Poměr hustoty pevnosti

2.3.1 ABS

ABS je zkratkou pro Akrylonitril Butadien Styren, jedná se o termoplastický polymer. ABS je široce rozšířený plast napříč celým průmyslovým světem, a to díky své nízké ceně, poměrně dobrým mechanickým vlastnostem a zdravotní nezávadnosti. ABS se ve světě 3D tisku využívá zejména u FDM metody. ABS je třeba tisknout s předehřivanou podložkou. Při tisku je nutné, místnost větrat kvůli výparům při tisku. [6] [7] [8]

- | | |
|---|-------------------------------|
| • Mez pevnosti | 40 Mpa |
| • Hustota | 1,04 g/cm ³ |
| • Tisková teplota | 220-250 °C |
| • Maximální provozní teplota | 98°C |
| • Teplotní roztažnost (především u FDM tisku) | 90μm/m-°C |
| • Možnosti lepení | Kaptnová páska, ABS slurry |
| • Cena | 10-40 dolarů |
| • Poměr hustoty pevnosti | 38,462 MPa*cm ³ /g |

2.3.2 PLA

PLA je zkratkou pro Polyaktid. Jedná se o bioplast, jehož základem není ropa, nýbrž polyester z kyseliny mléčné, vzniklé z kukuřičného škrobu. Jedná se o plast s poměrně dobrými mechanickými vlastnostmi a velmi nízkou cenou, jeho velkou nevýhodou je však nízká teplotní odolnost. Z toho důvodu je nutné plast ochránit před přímým slunečním svitem.

[8] [9]

2.3.3 Nylon

Nylon je syntetický termoplastický lineární polyamid. Jedná se o široce rozšířený materiál. Je tomu tak především díky mimořádným mechanickým vlastnostem a možnostem modifikovat ho pro požadované účely. Jeho nevýhodou, vůči materiálům zmíněným výše, je poměrně vysoká cena a nutnost uchovávat materiál v suchu. Na rozdíl od PLA, které má téměř srovnatelné vlastnosti je Nylon výrazně teplotně odolnější. [8] [10] [11]

Poznámka: Rozptyl klíčových hodnot je dán právě flexibilitou materiálu.

2.3.4 Polykarbonát

Jedná se o termoplast, který ve své struktuře obsahuje uhličitanové skupiny. PC má skvělé mechanické vlastnosti. Jedná se zároveň o poměrně drahý materiál. Má vysokou teplotní odolnost. Při FDM tisku je nutné používat vyhřívanou podložku. [8] [12] [13]

2.3.5 PEEK

PEEK je semikrystalický plast, který má mimořádné mechanické vlastnosti. Je srovnatelný například s hliníkem. Výborné mechanické vlastnosti však odpovídají velmi vysoké ceně. Využívá se pro výrobu funkčních dílů. Je chemicky stálý i teplotně odolný a otěru odolný. Kvůli jeho teplotní odolnosti je pro zpracování, nutné speciální prostředí. Pro tisk je potřeba vysoká tisková teplota. [14] [15] [16]

2.3.6 Tabulka materiálů

Pro přehlednost je uvedena tabulka hodnot jednotlivých materiálů

Tabulka 1 Seznam materiálů

	Mez pevnosti (MPa)	Hustota g/cm ³	Tisková teplota °c	Maximální provozní teplota °C	Teplotní roztažnost μm/m·°C ⁻¹	Poměr Hustoty a pevnosti MPa*cm ³ /g	Cena dolar
ABS	40	1,04	220-250	98	90	38,462	10-40
PLA	65	1,24	190-220	52	68	52,42	10-40
Nylon	40-85	1,06-1,14	220-270	85-90	65	37,74-74,56	25-65
Polycarbonát	72	1,2	220-270	121	95	60	40-75
PEEK	115	1,31	400	260-300	45	87,78	455

2.4 Volba technologie a materiálu

Pro zvolení použité technologie a materiálu byla použita metoda Trade matrix, která jednotlivým parametrům přiřadí váhu podle jejich důležitosti. Každá tisková technologie je ohodnocena známkou od 1 do 5, kdy 5 je nejlepší a 1 nejhorší. Následně se pak sečtou získané body vynásobené váhou parametru. Pro volbu vhodné technologie byly zařazeny pouze takové tiskové metody, jejichž použití bylo dostupné.

Tabulka 2 Trade matrix pro technologii

	Cena	Materiálová variabilita	Tisková doba	Přesnost	Σ
Váha parametru	0.2	0.4	0.1	0.3	1
SHS	1	3	3	5	3.2
FDM	5	4	5	2	3.7
SLA	3	2	3	4	2,9

Na základě trade matrix byla zvolena technologie FDM tisku. Konkrétní 3D tiskárna bude kompletně popsána v kapitole 3.1.2.

Tabulka 3 Trade matrix pro materiál

	Cena	Mez pevnosti	hustota	Provozní teplota	Σ
Váha parametru	0.4	0.3	0.2	0.1	1
PLA	5	2	2	1	3.1
Nylon	4	4	4	2	3,8
Polycarbonát	3	3	3	4	3.1
Peek	1	5	1	5	2,6
ABS	5	1	5	3	3,6

Na základě trade matrix byl zvolen materiál Nylon. Konkrétní varianta bude dále kompletně popsána v kapitole 3.1.1.

2.5 Mechanické zkoušky

V rámci bakalářské práce budou provedeny tahové zkoušky pro zjištění mechanických vlastností výtisku. Bude porovnáno, jak se materiálové charakteristiky mění v závislosti na hustotě použité výplně. Technologie použitá k tisku bude FDM. Použitý materiál bude Nylon z důvodu nejvýhodnějších parametrů vzhledem k ceně. Zvolená mechanická zkouška bude zkouška tahem. Výstupem mechanických zkoušek budou meze pevnosti v tahu, a to v závislosti na objemu vnitřní výplně testovaných vzorků. U každého vzorku bude zaznamenána hmotnost, mez pevnosti v dané zkoušce a nakonec poměr, mezi pevností a hmotností.

2.5.1 Zkouška tahem

Zkouška tahem je nejčastěji používaná materiálová zkouška sloužící k vyhodnocení pevnosti a plasticity materiálu. Zkouška samotná podléhá normě ASTM D 638-14 [20] pro plasty.

Zkouška tahem nám umožňuje vykreslit deformační charakteristiky, tj. průběh deformace, resp. poměrného prodloužení v závislosti na normálovém napětí.

$$\sigma = \frac{F}{S_0} [MPa] \quad (2.1.)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0} * 100 [\%] \quad (2.2.)$$

$$\varepsilon_t = \frac{L_t}{L} * 100 [\%] \quad (2.3.)$$

- F [N] je působící síla jež je vyvíjena na testovaný vzorek
- S_0 [mm²] je počáteční průřez vzorku
- L_0 [mm] je počáteční délka vzorku
- L [mm] je počáteční upínací vzdálenost mezi body měřícími prodloužení
- L_t [mm] je konečná změna upínací vzdálenosti mezi body měřícími prodloužení
- σ [MPa] je smluvní napětí
- ε [%] je poměrné prodloužení
- ε_t [%] je jmenovité poměrné prodloužení
- ΔL_0 [mm] změna počáteční délky vzorku

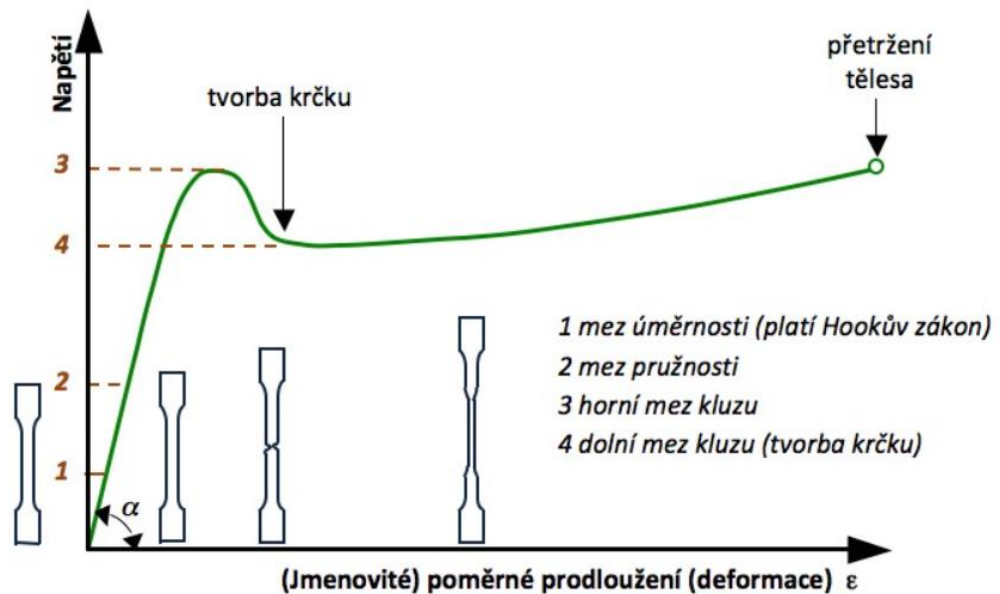
Z tahové zkoušky pak určujeme následující parametry

Mez pevnosti (σ_m) – je maximální napětí v tahu, které odpovídá největší síle (F_{max})

Napětí na mezi kluzu (σ_y) – je napětí, při kterém začíná vznikat plastická (trvalá) deformace a začíná se tvořit tzv. krček, který se dále s rostoucím napětím rozšiřuje.

Napětí na mezi kluzu považujeme za horní hranici přípustného napětí při provozu součásti.

Napětí při přetržení (σ_b) – je napětí, kdy dojde k porušení zkušebního tělesa. U křehkých polymerů (např. amorfních termoplastů, reaktoplastů a kompozitů) může být shodné s napětím na mezi pevnosti [17]



Obrázek 2-7 ukázková deformační křivka [17]

Pro vyhodnocení tahové zkoušky je důležité určit modul pružnosti (E) ten nám dokáže vyjádřit tuhost materiálu. Tato hodnota se získává z deformační křivky, která je vidět na obrázku 7 v oblasti platnosti Hookova zákona, kde je deformace přímo úměrná napětí. Vztah je uveden v rovnici (2.4.) [17]

$$\sigma = E * \varepsilon = E = \frac{E}{\varepsilon} [MPa] \quad (2.4.)$$

V deformační křivce figuruje E jako směrnice lineární části.

Při zkoušce různých plastů pak používáme sečný modul. Ten se používá kvůli vysoce elastickému chování plastů. To totiž způsobuje silně nelineární chování od počátku průběhu deformační křivky. Proto měření modulu pružnosti v tahu (E_t) vychází u polymerů ze dvou

hodnot napětí (σ_1 , σ_2), které odpovídají hodnotám poměrného prodloužení $\varepsilon_1=0,05$ % a $\varepsilon_2=0,25$ % [17]

$$E_t = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} [MPa] \quad (2.5.)$$

2.6 Model

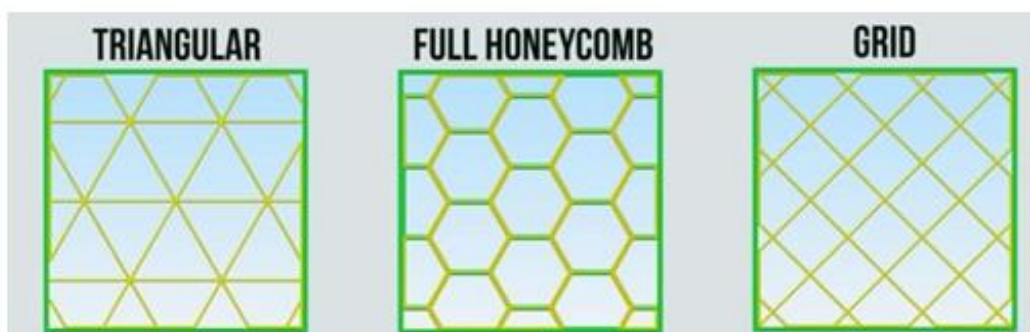
V této kapitole bude představen model, který bude použit pro mechanické zkoušky.

2.6.1 Vnitřní struktura

Tato kapitola má za cíl představit vnitřní struktury tisků. V experimentální části pak bude sledováno, jak se změní poměr hmotnosti a pevnosti. V programu určeném pro přípravu modelu pro tisk je možné nastavit hustotu vnitřní výplně a její tvar.

V případě, že je odlehčován tisknutý díl, tak se pomocí programu vytvoří vnitřní struktura. Ta je rozdělena do 3D segmentů, které interpretují požadovanou hustotu výplně. Níže jsou uvedeny tři druhy segmentů, do kterých je možné těleso rozdělit. Jednotlivé struktury jsou zachyceny na obrázku 2-8.

- Triangular- je struktura, která má půdorys trojúhelníku.
- Honeycomb- je struktura, která má půdorys šestiúhelníku.
- Grid- je struktura, která má půdorys jednoduché mřížky.

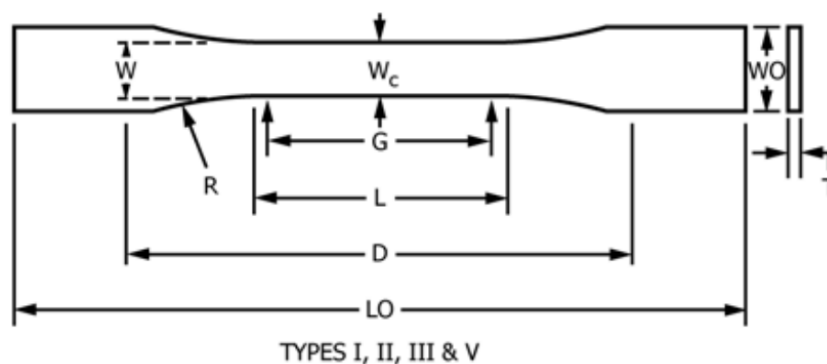


Obrázek 2-8 Schéma tištěných struktur [18]

Na základě výzkumu Emanoil Linul a Marian Baban [18], kteří studovali závislost meze tahu na použité výplni, vyplynulo, že výplň typu triangular nabízí nejzajímavější prognózy.

2.6.2 Tvar a rozměry modelu.

Tvar a rozměry modelu jsou dány normou ASTM D 638-14 [20]. Tato norma je určena pro tahovou zkoušku plastů a je ekvivalentní s ČSN EN ISO 527. Tvar je uveden na obrázku 9. rozměry pak v tabulce. U zkoušky se bude měnit hustota vnitřní výplně, a to konkrétně v oblasti 100 %, 70 %, 40 % a 20 %.



Obrázek 2-9 výkres zkušební vzorku [20]

Tabulka 4 rozměry zkušebních vzorků

	L0	D	L	G	WC	WO	T	R
[mm]	165	115	57	50	13	19	5,6	76

2.7 G-Code

Tato kapitola má za cíl představit program určený pro nastavení tisku. Slicer je program, který má za úkol převést 3D model na G-Code. G-code je jazyk, který používá tiskárna pro dosažení požadovaných parametrů v tisku. Dá se říci, že ke každému bodu v tiskové ploše je určeno množství materiálu, které má být na daný bod nanášeno. Dále G-code obsahuje globální informace, jako je rychlost tisku, nastavení teploty trysky a podložky, a také jestli má být zapnuté větrání a na jakou intenzitu. Slicerů existuje celá řada, pro náš experiment bude použit program Simplify 3D, který nabízí širokou škálu nastavitelných parametrů.

3 Praktická část

3.1 Metodologie výzkumu

Výzkum bude proveden ve třech částech. V první části se tvoří tištěné vzorky. V druhé části bude na Ústavu letadlové techniky provedena tahová zkouška. Ve třetí části nakonec budou vyhodnoceny výsledky tahové zkoušky.

3.1.1 Téma výzkumu

Součástí této bakalářské práce je provedení tahové zkoušky za účelem zjistit mez pevnosti. Pro provedení tahové zkoušky pak bylo třeba vytvořit 3D model testovacího vzorku, vygenerovat G-code, vytisknout vzorky a provést trhací zkoušku a následně ji vyhodnotit.

3.1.2 Cíle výzkumu

Cílem výzkumu je interpretace dat, které poskytne tahová zkouška pro závislost vlivu vnitřní struktury na poměr mezi pevností a hmotností tištěného dílu.

Dílním cílem je potom výběr vhodného materiálu a vhodné tiskové technologie, seznámit čtenáře se současnými možnostmi 3D tiskové technologie a položit základy pro další výzkum vlivu parametrů na mechanické vlastnosti 3 D tištěných dílů.

3.2 Použitý materiál a technologie

Tato kapitola popisuje použité technologie pro provedení zkoušky, bude zde uveden použitý materiál, 3D tiskárna a trhací stroj.

3.2.1 Materiál

Z rešerše vyplynulo, že nejvhodnější materiál pro zkoušku je Nylon pro vlastní zkoušku pak byl vybrán materiál Polymaker PolyMide PA6-CF, což je nylon vyztužený karbonovým vláknem. Díky tomuto vyztužení pak má o něco vyšší pevnost v tahu než klasický nylon.

Výrobce garantuje následující vlastnosti

- Mez pevnosti v ose x-y 105 [MPa]
- Mez pevnosti v ose z 67,7 [MPa]
- Hustota 1,17 [g/cm³]
- Teplota tání 220 [°C]

Doporučené nastavení tiskárny pro tisk materiálu

- Tisková teplota 280-300 [°C]
- Teplota podložky 20-50 [°C]
- Rychlost tisku 30-60 [mm/s]
- Průměr struny 1,75 [mm]

Tento materiál tedy zaručuje o něco vyšší pevnost v tahu než je u obyčejného Nylonu. Z důvodu vysoké tiskové teploty bylo zapotřebí zvolit vhodnou 3D tiskárnu.

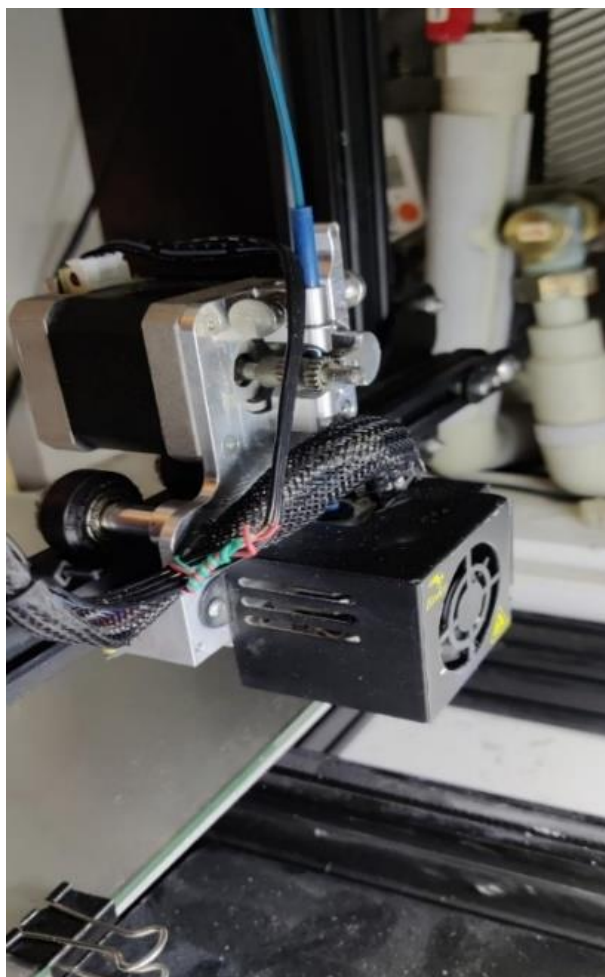
3.2.2 3D tiskárna

Pro potřeby tisku byla použita tiskárna Ender V3. Jedná se o velice rozšířenou tiskárnu na bázi FDM technologie. Pohyb v osách je kombinovaný. V ose X se pohybuje stolek a v osách Y a Z se pohybuje tryska. Pro potřeby tisku pak byla tiskárna modifikovaná. Jednou z hlavních změn je nastavení krokových motorů 133,7 kroků na milimetr. Toto nastavení je změněno kvůli správnému podávání materiálu. Dále pak byl vyměněn původní hotend a direct driver extrudér za celokovový typ, konkrétně Direct Drive Extruder pro Creality CR-10 & Ender. Díky této modifikaci je možné tisknout při výrazně vyšší teplotě. Použita byla skleněná tisková podložka, tloušťka skla je 3 mm. Také byl použit tiskový kryt, který má za úkol zlepšit teplotní uniformitu během tisku. Základní deska pak byla vyměněná za desku creality ender 3 silent mainboard 1.1.5 s firmwarem Marlin v. 2.0.9.3.. Na obrázku 3-1 je tiskárna vyobrazena.



Obrázek 3-1 Tiskárna Ender V3

Na obrázku 3-2 je pak vyfocen Creality CR-10 & Ender.



Obrázek 3-2 Použitý extrudér a hotend

3.2.3 Stand pro trhání

Pro trhací zkoušky byl použit univerzální trhací stroj ZUZ 200. Vzhledem k avizované mezi pevnosti materiálu byl zvolen siloměr GTM serie K s měřícím rozsahem 25 kN jehož nepřesnost je ± 100 N . Kleštiny byly použité mechanické. Na obrázku 3-3 je zobrazen standt pro trhání.



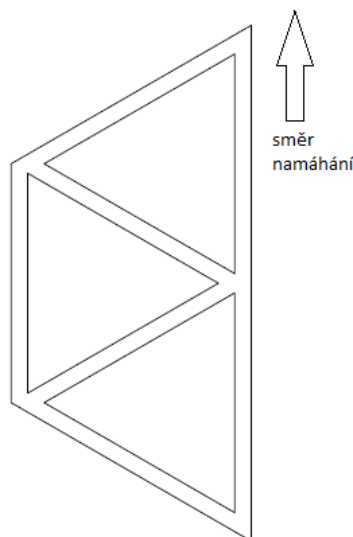
Obrázek 3-3 Testovací stand ZUZ 200

3.3 Parametry tisku

Tato kapitola má za cíl popsat jaké parametry tisku byly pro vzorky nastaveny.

G-cod byl vytvořen v programu Simplify 3D, jež umožňuje volit celou řadu parametrů, které mají za cíl optimalizovat tisk, aby výsledný tisk měl co nejlepší vlastnosti. Teplota tisku byla nastavena na 290 °C, protože při teplotě 280 °C docházelo k odlupování jednotlivých vrstev.

Nastavení vnitřní struktury vůči směru namáhání výplně je znázorněno na obrázku 3-4.



Obrázek 3-4 nastavení vnitřní struktury

Zrychlení pro přejezdy bylo nastaveno na 300 [mm/s při tisku pak 150 mm/s² teplota podložky po zkušenosti s předchozími tisky byla nastavena na 54 [°C] a pro první vrstvu pak 60 °C. Jerk byl nastaven na 6 mm/s (Jerk je parametr, který předchází akceleraci tisku a umožňuje plynulejší akceleraci) , retrakce na 1 mm. (Retrakce je parametr, který nastavuje vtažení filamentu extruderem před přejezdem o délku, která stačí k tomu, aby nastavený filament zůstal v trysce po dobu přejezdu k místu dalšího tisku) První vrstva byla nastavena 0,2mm. Pro zachování konstantního průřezu tloušťky stěn pak byly nastaveny 4 vrstvy o tloušťce 0,12 [mm] na spodní a horní straně vzorku, a boční strana byla tištěna dvěma

perimetry. Vrchní vrstvy pak byly tisknuty jednosměrně ve směru namáhání. Na obrázku 3-5 je fotografie tisknutí vzorku. Pro výrobu vzorků bylo vygenerováno 12 G-codů.



Obrázek 3-5 záznam z tisku

Na obrázku 3-6 je vyfocen kompletní vzorek připravený pro zkoušku tahem.



Obrázek 3-6 hotový vzorek

3.4 Vzorky

Tato kapitola referuje o průběhu tisku a zjištěných vadách výtisku. Podle normy ASTM D 638-14[20], aby měla zkouška vypovídající hodnotu, je zapotřebí vyzkoušet pět vzorků. Celkově je zapotřebí 20 vzorků, tedy 5 od každé hustoty vnitřní výplně.

3.4.1 Vady vzorků

Během tisku docházelo k dílčímu poškození vzorků. Především k nedostatečnému provaření vrchních vrstev. Dále pak došlo k odtržení části vrchní vrstvy. Také došlo částečnému posunutí jednotlivých vrstev. Z toho důvodu pak byly přidány další dva vzorky u potřebných skupin, konkrétně ke skupině 20 % a 70 % vnitřní výplně bylo přidáno po jednom vzorku. Pro snazší rozeznání vzorků má každý vzorek přiřazeno pořadí a za lomítkem procentuální hustotu.

- Vzorek 5/70 Zde nejsou dokonale svařené horní vrstvy. Toto poškození je patrné na obrázku 3-7.



Obrázek 3-7 zobrazení poruchy vzorku 5/70

- Vzorek 3/70 Zde se nedokonale přivařila spodní vrstva k zbytku vzorku. Toto poškození je zobrazeno na obrázku 3-8.



Obrázek 3-8 znázornění poškození vzorku 3/70

- Vzorek 5/40 Zde došlo k vícenásobnému odtržení horních vrstev. Toto poškození je zobrazeno na obrázku 3-9.



Obrázek 3-9 znázornění poškození vzorku 5/40

- Vzorek 2/40 Zde se nedokonale přivařila spodní vrstva k zbytku vzorku. Toto poškození je zobrazeno na obrázku 3-10.



Obrázek 3-10 zobrazení poškození vzorku 2/40

- Vzorek 4/20 Zde došlo k odtržení horních vláken. Toto poškození je zobrazeno na obrázku 3-11.



Obrázek 3-11 Zobrazení vady vzorků 2/20

- Vzorek 2/40 Zde se nedokonale přivařila spodní vrstva k zbytku vzorku. Toto poškození je zobrazeno na obrázku 3-12.



Obrázek 3-12 zobrazení poškození vzorku 2/40

3.4.2 Měření vzorků

Tato kapitola pojednává o uskutečněných měření vzorků před vlastní tahovou zkouškou. Podle normy ASTM D638-14[20] Je nutné rozměry W a T desetkrát změřit za pomoci mikrometru, toto měření je nutné k co nejpřesnějšímu určení napětí při přetržení. Měření bylo uskutečněno při teplotě 20°C. Dále byl každý vzorek zvážen pomocí digitální váhy, jejíž přesnost je $\pm 0,005$ g. Díky této hodnotě pak je možné spočítat poměr mezi pevností a hmotností vzorků. Tabulky jednotlivých změřených hodnot je možné vyhledat v příloze.

Tabulka 5 rozměrů pro hustotu vnitřní výplně 20%

Hustota 20 %				
vzorek	W [mm]	T [mm]	S [mm²]	u_{AS} [mm²]
1	13,187	5,399	71,201	±1,34
2	13,227	5,463	72,253	±1,55
3	13,186	5,579	73,563	±1,15
4	13,253	5,682	75,300	±0,77
5	13,150	5,756	75,687	±0,48
6	13,245	5,895	78,076	±0,28

Tabulka 6 rozměrů pro hustotu vnitřní výplně 40%

Hustota 40 %				
vzorek	W [mm]	T [mm]	S [mm²]	u_{AS} [mm²]
1	13,253	5,376	71,254	±1,94
2	13,272	5,511	73,145	±1,57
3	13,281	5,561	73,853	±1,15
4	13,262	5,690	75,455	±0,78
5	13,199	5,808	76,665	±0,41

Tabulka 7 hodnoty pro hustotu výplně 70%

Hustota 70 %				
vzorek	W [mm]	T [mm]	S [mm²]	u_{AS} [mm²]
1	13,230	5,422	71,730	±1,96
2	13,233	5,523	73,085	±1,57
3	13,180	5,609	73,926	±1,17
4	13,266	5,685	75,419	±0,78
5	13,293	5,791	76,977	±0,41
6	13,274	5,856	77,733	±0,21

Tabulka 8 hodnoty pro hustotu výplně 100%

Hustota 100 %				
vzorek	W [mm]	T [mm]	S [mm²]	u_{AS} [mm²]
1	13,267	5,437	72,133	±1,97
2	13,354	5,531	73,865	±1,58
3	13,337	5,631	75,104	±1,18
4	13,355	5,719	76,380	±0,78
5	13,332	5,836	77,799	±0,40

Pro co nejpřesnější určení meze pevnosti v tahu byla spočítána kombinovaná nejistota pro plochu průřezu. Pro hmotnost vzorků pak byla použita nejistota typu B vzhledem k přesnosti použité váhy.

Tabulka 9 hmotnost vzorků s hustotou 100%

Váha		
vzorek	100 %	U_{Cm} [g]
1	17,765	±0,005
2	17,715	±0,005
3	17,79	±0,005
4	17,86	±0,005
5	17,845	±0,005

Tabulka 10 hmotnost vzorků pro hustotu 70%

Váha		
vzorek	70%	U_{Cm} [g]
1	14,81	±0,005
2	14,96	±0,005
3	14,805	±0,005
4	14,845	±0,005
5	14,94	±0,005
6	14,859	±0,005

Tabulka 11 hmotnost vzorků pro hustotu 20%

Váha		
vzorek	20 %	U_{Cm} [g]
1	8,47	±0,005
2	8,665	±0,005
3	8,515	±0,005
4	8,72	±0,005
5	8,355	±0,005
6	8,355	±0,005

Tabulka 12 hmotnost vzorků pro hustotu 40%

Váha		
vzorek	40 %	U_{Cm} [g]
1	11,29	$\pm 0,005$
2	11,745	$\pm 0,005$
3	11,62	$\pm 0,005$
4	11,79	$\pm 0,005$
5	11,345	$\pm 0,005$

Po změření hlavních rozměrů bylo zjištěno, že všechny vzorky jsou vytisknuté v dostatečné toleranci, aby mohly být použity při zkoušce. Rozměr T má toleranci $\pm 0,4\text{mm}$ rozměr W $\pm 0,5\text{mm}$.

3.5 Trhací zkouška

Trhací zkouška proběhla 6. května 2022 při teplotě 21°C . Do univerzálního trhacího stroje ZUZ 200 byly nejdříve nainstalované hydraulické kleštiny a siloměr s maximálním měřicím rozsahem 25 kN. Ten byl zvolen na základě maximální možné požadované síly vypočtené z deklarované meze pevnosti v tahu v materiálovém listu. Při prvním pokusu upnout vzorek do hydraulických kleští došlo k poškození vzorku, neboť vyvinutá síla byla příliš vysoká.



Obrázek 3-13 poškození vzorků 1 při upnutí do hydraulických kleští

Během zkoušky se ukázalo, že naprostá většina vrchních vrstev vzorků nebyla dokonale provařena, což způsobilo nárůst smykového napětí a vzorek pak nepraskl najednou. Došlo k postupnému praskání vzorků, což je patrné z grafu 1. V tabulce výsledků je pak uvedena síla, při které došlo k nejradikálnějšímu porušení vzorku.

3.5.1 Transparentní výpočet

Pro názornost výpočtu a určení všech dat zde bude uveden transparentní výpočet vzorku 2 pro hustotu 20%, včetně nejistot výpočtu.

Nejdříve dosadíme sílu a průřez do rovnice (3.1.)

$$\sigma = \frac{F}{S_0} = \frac{2370}{13,227 * 5,463} = 32,8016 \text{ [MPa]} \quad (3.1.)$$

Následně zjistíme poměr mezi hmotností a pevností

$$H = \frac{\sigma}{m} = \frac{32,8016}{8,665} = 3,786 \text{ [Mpa * g}^{-1}\text{]} \quad (3.2.)$$

Nyní budou spočítány nejistoty.

Jako první bude vypočítána nejistota průřezu, jedná se o kombinovanou nejistotu typu A a typu B pro rozměry T a W.

Nejistotu typu A spočítáme jako směrodatnou odchylku. Měření bylo provedeno desetkrát.

$$u_{AT} = \sqrt{\frac{1}{n * (n - 1)} * \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \sqrt{\frac{1}{10 * (10 - 1)} * 1,221} = \pm 0,1165 \text{ mm} \quad (3.3.)$$

Dále spočteme nejistotu typu A pro rozměr W

$$u_{AW} = \sqrt{\frac{1}{n * (n - 1)} * \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \pm 0,00226 \text{ mm} \quad (3.4)$$

Dále určíme nejistotu typu B vzhledem k tomu, že byl použitý digitální mikrometr je chyba v odečítání vyloučena a tak použijeme pro výpočet pouze přesnost mikrometru ta je 0,01 mm

$$u_{bWT} = 0,01 \text{ mm}$$

Nyní je možné spočítat kombinovanou nejistotu u_{cx} pro rozměry T a W

$$u_{cT} = \sqrt{u_{aT}^2 + u_{bT}^2} = \sqrt{0,1165^2 + 0,01^2} = \pm 0,1169 \text{ mm} \quad (3.5)$$

$$u_{cW} = \sqrt{u_{aW}^2 + u_{bW}^2} = \sqrt{0,00226^2 + 0,01^2} = \pm 0,0103 \text{ mm} \quad (3.6)$$

Jelikož plocha průřezu S_0 je nepřímě měřená veličina je nutné spočítat nejistotu nepřímě měřené veličiny U_{Az} , tu je možné spočítat ze vztahu

$$U_{Az} = \sqrt{U_{Cx}^2 * \left(\frac{\partial Z}{\partial X}\right)_{\bar{x};\bar{y}}^2 + U_{CY}^2 * \left(\frac{\partial Z}{\partial Y}\right)_{\bar{x};\bar{y}}^2} \quad (3.7.)$$

V tomto případě je funkce Z rovná výpočtu obsahu tedy $Z = W * T$

$$u_{AS} = W * T \sqrt{\left(\frac{u_{cW}}{W}\right)^2 + \left(\frac{u_{cT}}{T}\right)^2} \doteq \pm 1,55 \text{ mm}^2 \quad (3.8.)$$

Průřez vzorku 2 pro 20% je tedy roven $(72,26 \pm 1,55) \text{ mm}^2$

Dále je možné analogicky vypočítat nepřesnost napětí při přerušení, budeme počítat pro celou skupinu vzorku s 20% hustotou infillu a jako výchozí hodnoty napětí a průřezu, z toho důvodu budeme uvažovat nejvyšší nejistotu průřezu tedy $1,55 \text{ mm}^2$.

Nejprve určíme nejistotu typu A pro sílu.

$$u_{aF} = \sqrt{\frac{1}{n * (n - 1)} * \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \sqrt{\frac{1}{5 * (5 - 1)} * 0,2055} = \pm 0,102 \text{ kN} \quad (3.9.)$$

Nejistota typu B je dána výrobcem siloměru. A je tedy 100N.

$$U_{bF} = \pm 0,1 \text{ kN}$$

Dále určíme kombinovanou nejistotu.

$$u_{cF} = \sqrt{u_{aF}^2 + u_{bF}^2} = \sqrt{0,102^2 + 0,1^2} \doteq \pm 0,15 \text{ kN} \quad (3.10.)$$

Nyní je možné dopočítat nejistotu napětí pomocí předpisu pro nepřímou měřenou veličinu.

$$U_{Az} = \sqrt{U_{Cx}^2 * \left(\frac{\partial Z}{\partial X}\right)_{\bar{x};\bar{y}}^2 + U_{Cy}^2 * \left(\frac{\partial Z}{\partial Y}\right)_{\bar{x};\bar{y}}^2} \quad (3.7.)$$

V tomto případě je funkcí Z

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (2.1.)$$

Z toho plyne

$$U_{A\sigma} = \frac{F}{S_0} * \sqrt{\left(\frac{u_{cF}}{F}\right)^2 + \left(\frac{u_{cS_0}}{S_0}\right)^2} = \frac{2178}{74,346} * \sqrt{\left(\frac{150}{2178}\right)^2 + \left(\frac{1,55}{74,346}\right)^2} \pm 2,11 \text{ MPa} \quad (2.11.)$$

Průměrné napětí tedy je $(29,1 \pm 2,11)$ MPa

V tuto chvíli je možné určit nejistotu poměru Pevnosti vůči hmotnosti. Opět budeme uvažovat vzorky jako jednu skupinu tudíž pro výpočet nepřesnosti použijeme průměrné hodnoty.

$$U_{cm} = \pm 0,005 \text{ g}$$

$$U_{Ah} = \frac{\sigma}{m} * \sqrt{\left(\frac{u_{c\sigma}}{\sigma}\right)^2 + \left(\frac{u_{cm}}{m}\right)^2} = \frac{29,1}{8,51} * \sqrt{\left(\frac{2,11}{29,1}\right)^2 + \left(\frac{0,005}{8,51}\right)^2} = \pm 0,248 \frac{\text{MPa}}{\text{g}} \quad (2.12.)$$

Poměr hmotnosti pro vzorky tedy je $(3,42 \pm 0,248 \frac{\text{MPa}}{\text{g}})$

Pro ostatní vzorky výpočty proběhly stejným způsobem

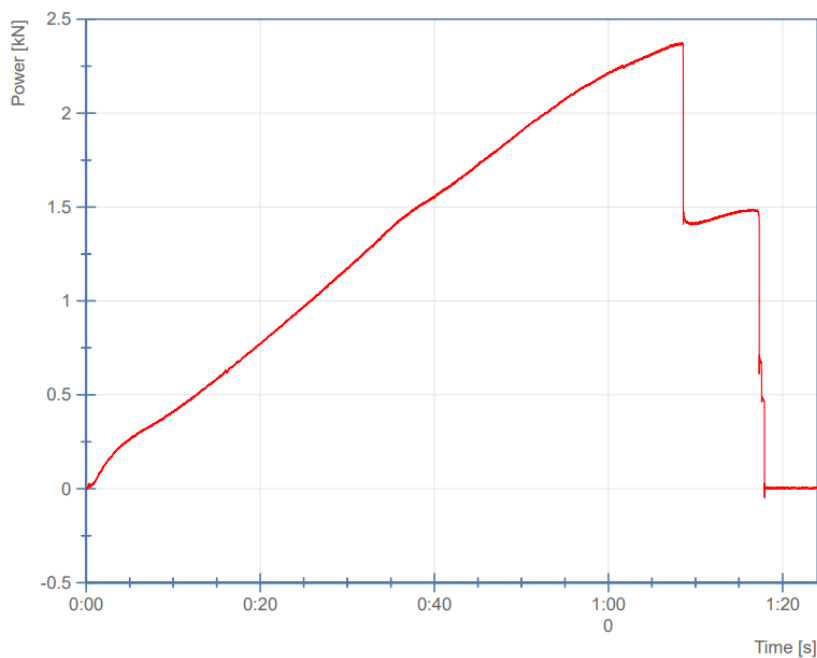
3.5.2 Výsledky zkoušky

Výsledky trhací zkoušky není možné interpretovat dle normy ASTM D638-14 [20]. Charakter daného poškození norma nepřipouští. Všechny vzorky vykazují známky stejné vady – nedokonalé provaření vrchních vrstev. Na základě podobnosti porušení se pokusíme interpretovat výsledky zkoušky v grafu č. 1. V tabulce jsou uvedené síly, při které došlo k hlavnímu přerušeni a tato síla je následně přepočítaná na napětí.

Tabulka 13 Mez pevnosti pro hustotu výplně 20%

Hustota 20 %	síla při přetržení [kN]	Napětí při přerušeni [MPa]
1	1,6	22,47
2	2,37	32,80
3	2,26	30,72
4	2,33	30,94
5	1,81	23,91
6	2,12	27,15
průměr		29,11

Vzorek 1 byl ze statistiky vyřazen z důvodu poškození v hydraulických kleštinách.



Graf 1 závislost zátěžné síly na čase

Tabulka 14 Mez pevnosti pro hustotu výplně 40%

Hustota 40 %	síla při přetržení [kN]		Napětí při přerušení [MPa]
1	2,34		32,84
2	2,7		36,91
3	2,64		35,75
4	2,66		35,25
5	2,82		36,78
průměr			35,51

Tabulka 15 Mez pevnosti pro hustotu výplně 70%

Hustota 70 %	síla při přetržení [kN]		Napětí při přerušení [MPa]
1	3,14		43,78
2	3,48		47,62
3	2,11		28,54
4	3,25		43,09
5	3,07		39,88
6	3,3		42,45
průměr			40,89

Ze statistiky byl vyřazen vzorek 3 z důvodu špatného průběhu zkoušky.

Tabulka 16 Mez pevnosti pro hustotu výplně 100%

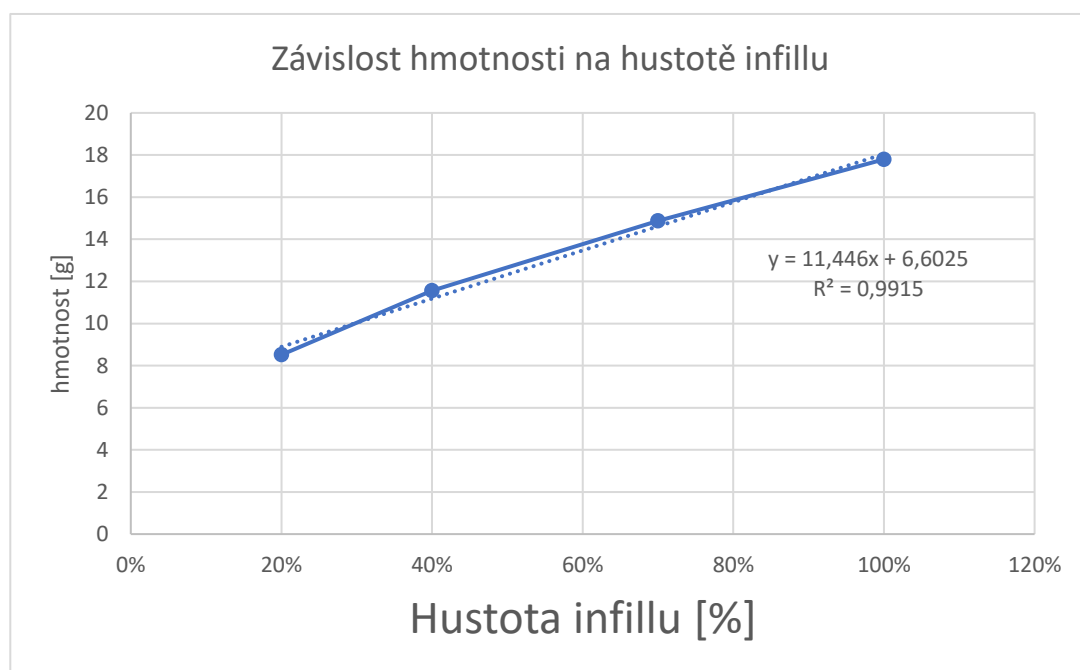
Hustota 100 %	síla při přetržení [kN]		Napětí při přerušení [MPa]
1	4,23		58,64
2	4,44		60,11
3	4,19		55,79
4	4,72		61,8
5	4,42		56,81
průměr			58,63

Napětí při přerušení bylo zprůměrované a spočtena nejistota měření. Výpočet je k nahlédnutí v příloze na CD. Výsledky jsou následující:

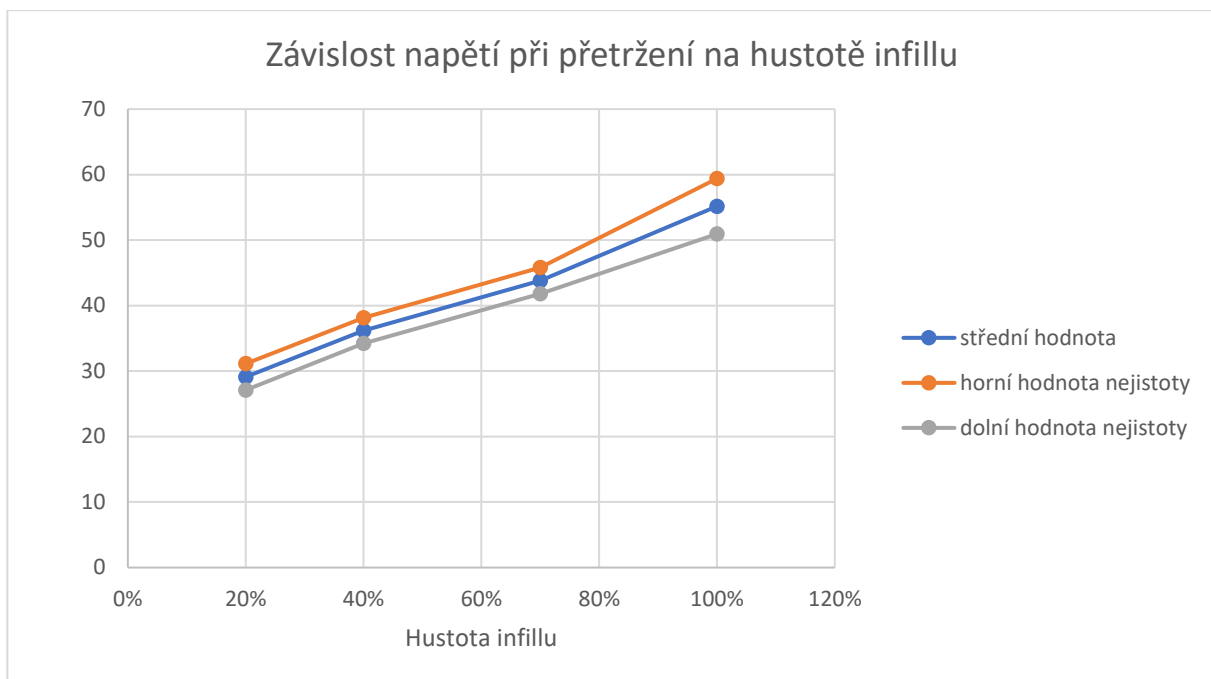
- Pro skupinu vzorků s hustotou infillu 20 % je napětí při přerušení ($29,11 \pm 2,11$ MPa)
- Pro skupinu vzorků s hustotou infillu 40 % je napětí při přerušení ($35,51 \pm 1,96$ MPa)
- Pro skupinu vzorků s hustotou infillu 70 % je napětí při přerušení ($40,89 \pm 1,995$ MPa)
- Pro skupinu vzorků s hustotou infillu 100 % je napětí při přerušení ($58,63 \pm 4,24$ MPa)

Hodnoty hmotnosti a napětí při přetržení byly dále zaneseny do grafů 2 a 3

- Skupina s hustotou infillu 20 % je poměr pevnosti a hmotnosti ($3,42 \pm 0,24$ MPa*g⁻¹)
- Skupina s hustotou infillu 40 % je poměr pevnosti a hmotnosti ($3,13 \pm 0,17$ MPa*g⁻¹)
- Skupina s hustotou infillu 70 % je poměr pevnosti a hmotnosti ($2,95 \pm 0,14$ MPa*g⁻¹)
- Skupina s hustotou infillu 100 % je poměr pevnosti a hmotnosti ($3,01 \pm 0,24$ MPa*g⁻¹)

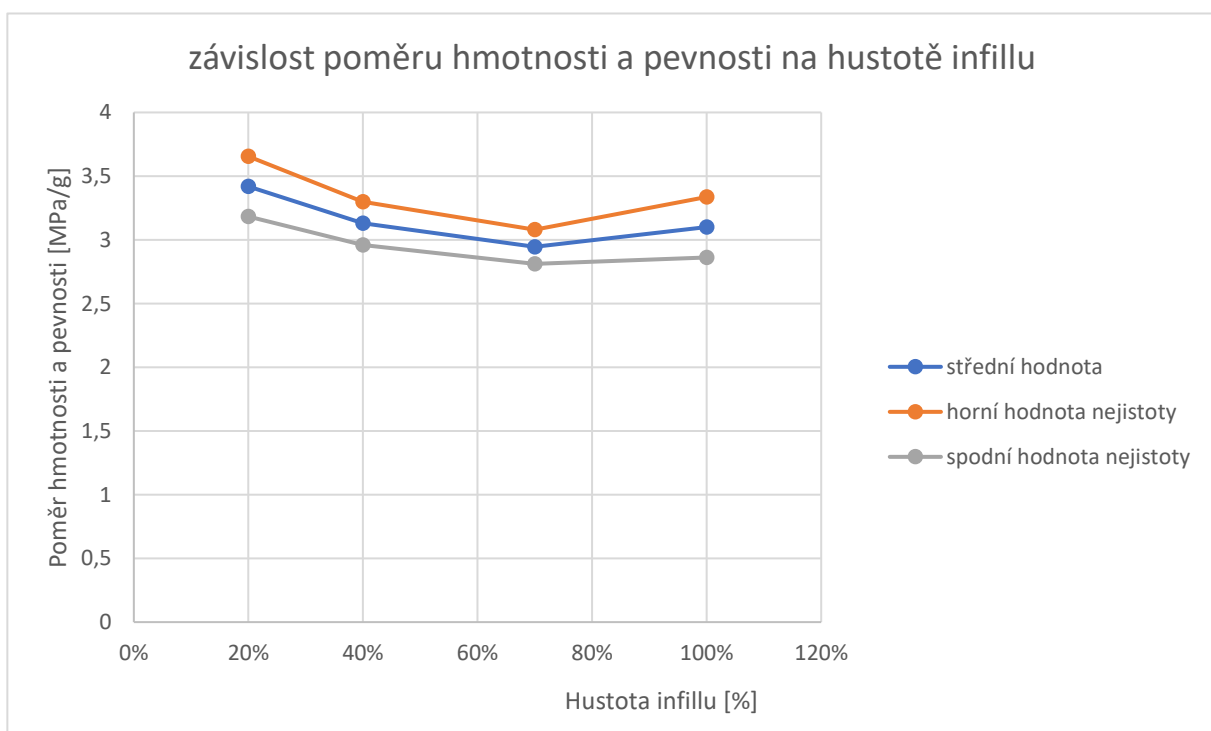


Graf 2 Závislost hmotnosti na hustotě infillu



Graf 3 Závislost napětí při přetržení na hustotě infillu

Grafy 2 a 3 jsou takřka lineární, z toho vychází, že i graf 4, který zachycuje poměr mezi hmotností a pevností, je takřka konstantní.



Graf 4 závislost poměru hmotnosti a pevnosti na hustotě infillu

Z grafu 4 je patrné, že rozdíl mezi 100 % a 20 % je v rámci nepřesnosti téměř stejný. Zajímavou oblastí se však zdá oblast kolem 70 %, kde se zdá tento poměr nejmenší, nicméně je třeba přihlídnout k nepřesnostem měření. Obecně se však zdá, že poměr pevnosti ku hustotě infillu je konstantní.

4 Závěr

Tato bakalářská práce měla za cíl interpretovat data tahové zkoušky pro závislost vlivu vnitřní struktury na poměr pevnosti a hmotnosti tištěného dílu, výběr vhodného materiálu a vhodné tiskové technologie. Také seznámit čtenáře se současnými možnostmi 3D tiskové technologie a současně položit základní kámen pro další výzkum vlivu parametrů na mechanické vlastnosti 3 D tištěných dílů.

Cíl této práce byl splněn. Pomocí metody trade metrix byla zvolena perspektivní technologie a materiál. Následně pak byla vybrána vnitřní struktura na základě práce Emanoil Linul a Marian Baban. Dále pak byla provedena tahová zkouška, která měla za cíl zjistit, jaký je vztah mezi poměrem hmotnosti a pevnosti v závislosti na hustotě vnitřní struktury.

Průběh zkoušky nebyl zcela uspokojivý. Zkouška ukázala jisté nedostatky v provaření svrchních vrstev vzorků. Na základě materiálového listu PA6-CF, viz příloha č. 31, byla nastavena požadovaná teplota podložky i trysky. Jak se později ukázalo, teplota trysky nebyla dostatečná.

Výsledky, které je možné prezentovat pak napovídají, že hledaný vztah poměru hmotnosti a pevnosti ku hustotě vnitřní výplně se jeví lineárně.

Bylo by vhodné experiment zopakovat. Pro dosažení kompetentních výsledků doporučuji zvýšení teploty tisku a zároveň snížení teploty podložky. Dále pak je možné pro vylepšení mechanických vlastností popouštět vytisknutý vzorek s cílem snížit vnitřní pnutí po tisku.

Zdroje

[1] Přehled technologií 3D tisku. Dk metal prominent s.r.o [online]. 2018 [cit. 2020-25-09]. Dostupné z: <http://www.dkmp.cz/o-nas/detail/prehled-technologie-3d-tisku>

[2] PRŮŠA, Josef a Martin BACH. Základy 3D tisku s Josefem Průšou [online]. První vydání. Praha: Průša Research a.s., 2019 [cit. 2021-25-09].

[3] *Technologie 3D tisku* [online]. [cit. 2021-9-29]. Dostupné z: <https://www.na3d.cz/blog/technologie-3d-tisku>

[4] *SLS (Selective Laser Sintering)* [online]. [cit. 2021-9-28]. Dostupné z: <https://www.cotu.cz/blog/126/sls-selective-laser-sintering>

[5] REDWOOD, Ben. *Additive manufacturing technologies: An overview* [online]. [cit. 2021-9-28]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/additive-manufacturing-technologies-overview/#binder-jetting>

[6] *ABS MATERIÁL* [online]. [cit. 2021-10-18]. Dostupné z: <https://www.ski-max.cz/slovník/abs-material>

[7] *ABS plasty* [online]. [cit. 2021-10-18]. Dostupné z: <https://www.renovablesverdes.com/cs/plasticos-abs/>

[8] *Filament Properties Table* [online]. [cit. 2021-10-18]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/properties-table/?fbclid=IwAR3j-0ENYZvy6E8Xf3M0g8WG1JfND87Nu91 llhz7O5vAAs W plhFynlJg>

- [9] *Bioplasty – Polylaktid (PLA)* [online]. 14.11.2018 [cit. 2021-10-18]. Dostupné z: <http://www.bio-plasty.cz/bioplasty-polylaktid-pla/>
- [10] *Nylon* [online]. [cit. 2021-10-18]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/nylon/>
- [11] *NYLON* [online]. [cit. 2021-10-18]. Dostupné z: <https://www.motozem.cz/nylon/>
- [12] *Polycarbonate* [online]. [cit. 2021-10-18]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/polycarbonate/>
- [13] SOVA, CSC., Ing. Miloš. *Vlastnosti polykarbonátu* [online]. 6.3.2015 [cit. 2021-10-18]. Dostupné z: <https://www.techportal.cz/33/vlastnosti-polykarbonatu-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4EqQUkSFod1Gx-NUTUHrB7jY/>
- [14] *Polyetereterketon (PEEK)* [online]. [cit. 2021-10-18]. Dostupné z: <http://www.vink.cz/polyetereterketon>
- [15] *Unfilled Polyetheretherketone (PEEK)* [online]. [cit. 2021-10-18]. Dostupné z: <https://polymerdatabase.com/Commercial%20Polymers/PEEK.html>
- [16] *Materiálový list: PEEK (Polyetheretherketone)* [online]. [cit. 2021-10-18]. Dostupné z: <https://www.sittech.cz/download/plasty/peek.pdf>
- [17] *Mechanické vlastnosti polymerů – statické namáhání.* [online]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/09.html>
- [18] HOMOLA, Jan. *Jakou mají díly tištěné z PLA pevnost v tahu v závislosti na použité výplni?* [online]. 4.2.2022 [cit. 2022-03-13]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/jakou-maji-dily-tistene-z-pla-pevnost-v-tahu-v-zavislosti-na-pouzite->

[vyplni/?fbclid=IwAR3NcRnBAM6M6HL3AsCJuaVUxa61YSpcBKsd5sXhuhgeTG5XIGtFE9MhZrA](https://www.facebook.com/3dprintinfills/)

[19] SIMMONS, Jay. *3D Print Infill Patterns Explained* [online]. [cit. 2022-03-13]. Dostupné z: <https://the3dbros.com/3d-print-infill-patterns-explained/>

[20] ASTM D-638-14. *Standard test method for Tensile Properties of Plastics*. 14. USA: ASTM, 2014.

[21] PRACHETT, Terry a Jan KANTŮREK. *Čarodějky na cestách: Úžasná Zeměplocha*. 1. Praha: Talpress, 1996. ISBN 9780552134651.

Seznam obrázků

Obrázek 2-1 SLA schéma [1]	14
Obrázek 2-2 SHS schéma [1]	15
Obrázek 2-3 BJ schéma [1]	16
Obrázek 2-4 MP schéma [1].....	17
Obrázek 2-5 FDM schéma [1].....	18
Obrázek 2-6 schéma SLA tiskárny [1].....	19
Obrázek 2-7 ukázková deformační křivka [17].....	26
Obrázek 2-8 Schéma tištěných struktur [18].....	28
Obrázek 2-9 výkres zkušebního vzorku [20]	28
Obrázek 3-1 Tiskárna Ender V3	32
Obrázek 3-2 Použitý extrudér a hotend.....	32
Obrázek 3-3 Testovací stand ZUZ 200	33

Obrázek 3-4 nastavení vnitřní struktury	34
Obrázek 3-5 záznam z tisku	35
Obrázek 3-6 hotový vzorek	35
Obrázek 3-7 zobrazení poruchy vzorku 5/70	36
Obrázek 3-8 znázornění poškození vzorku 3/70	37
Obrázek 3-9 znázornění poškození vzorku 5/40	37
Obrázek 3-10 zobrazení poškození vzorku 2/40	38
Obrázek 3-11 Zobrazení vady vzorků 2/20	38
Obrázek 3-12 zobrazení poškození vzorku 2/40	39
Obrázek 3-13 poškození vzorků 1 při upnutí do hydraulických kleštin.....	43

Seznam grafů

Graf 1 závislost zátěžné síly na čase	48
Graf 2 Závislost hmotnosti na hustotě infillu	50
Graf 3 Závislost napětí při přetržení na hustotě infillu	51
Graf 4 závislost poměru hmotnosti a pevnosti na hustotě infillu	51

Seznam tabulek

Tabulka 1 Seznam materiálů	23
Tabulka 2 Trade matrix pro technologii	23
Tabulka 3 Trade matrix pro materiál	24
Tabulka 4 rozměry zkušebních vzorků	28
Tabulka 5 rozměrů pro hustotu vnitřní výplně 20%.....	40

Tabulka 6 rozměrů pro hustotu vnitřní výplně 40%.....	40
Tabulka 7 hodnoty pro hustotu výplně 70%	41
Tabulka 8 hodnoty pro hustotu výplně 100%	41
Tabulka 9 hmotnost vzorků s hustu 100%	42
Tabulka 10 hmotnost vzorků pro hustotu 70%	42
Tabulka 11 hmotnost vzorků pro hustotu 20%	42
Tabulka 12 hmotnost vzorků pro hustotu 40%	43
Tabulka 13 Mez pevnosti pro hustotu výplně 20%.....	48
Tabulka 14 Mez pevnosti pro hustotu výplně 40%.....	49
Tabulka 15 Mez pevnosti pro hustotu výplně 70%.....	49
Tabulka 16 Mez pevnosti pro hustotu výplně 100%.....	49

Seznam rovnic

rovnice 2-1.....	25
rovnice 2-2.....	25
rovnice 2-3.....	25
rovnice 2-4.....	26
rovnice 2-5.....	26
rovnice 3-1.....	44
rovnice 3-2.....	44
rovnice 3-3.....	45
rovnice 3-4.....	45

rovnice 3-5.....	45
rovnice 3-6.....	45
rovnice 3-7.....	46
rovnice 3-8.....	46
rovnice 3-9.....	46
rovnice 3-10.....	46
rovnice 3-11.....	47
rovnice 3-12.....	47
rovnice 3-13.....	47
rovnice 3-14.....	47

Příloha 1 Naměřené hodnoty vzorků

Tabulka 17 rozměry T vzorků s hustotou 20%

hustota 20											
vzorek	T [mm]										Průměr
1	5,777	5,873	5,821	5,888	5,882	5,869	5,821	5,803	5,842	5,818	5,399455
2	5,861	5,791	5,749	5,813	5,861	5,756	5,808	5,89	5,806	5,753	5,462545
3	5,832	5,878	5,812	5,866	5,818	5,819	5,817	5,857	5,82	5,851	5,579091
4	5,812	5,843	5,9	5,829	5,887	5,803	5,892	5,847	5,809	5,877	5,681727
5	5,924	5,826	5,917	5,844	5,844	5,878	5,73	5,873	5,777	5,701	5,755818
6	5,896	5,908	5,923	5,92	5,809	5,904	5,944	5,828	5,787	5,923	5,894727

Tabulka 18 rozměry W vzorků s hustotou 20%

hustota 20											
vzorek	W [mm]										Průměr
1	13,167	13,166	13,206	13,19	13,205	13,211	13,185	13,175	13,167	13,195	13,1867
2	13,234	13,224	13,229	13,235	13,226	13,23	13,232	13,217	13,213	13,229	13,2269
3	13,184	13,183	13,168	13,18	13,203	13,185	13,186	13,183	13,205	13,178	13,1855
4	13,256	13,262	13,257	13,27	13,248	13,242	13,265	13,266	13,254	13,21	13,253
5	13,142	13,159	13,144	13,153	13,157	13,136	13,155	13,167	13,14	13,143	13,1496
6	13,226	13,269	13,242	13,258	13,255	13,26	13,243	13,262	13,234	13,201	13,245

Tabulka 19 rozměry T vzorků s hustotou 20%

hustota 40											
vzorek	T [mm]										Průměr
1	5,838	5,818	5,816	5,84	5,807	5,812	5,824	5,773	5,816	5,796	5,376364
2	5,893	5,84	5,883	5,903	5,872	5,815	5,911	5,846	5,848	5,813	5,511273
3	5,772	5,866	5,812	5,838	5,825	5,853	5,82	5,785	5,76	5,837	5,560727
4	5,844	5,904	5,874	5,792	5,832	5,862	5,917	5,84	5,913	5,809	5,689727
5	5,871	5,906	5,83	5,918	5,912	5,886	5,9	5,831	5,916	5,922	5,808364

Tabulka 20 rozměry W vzorků s hustotou 20%

hustota 40											
vzorek	W [mm]										Průměr
1	13,256	13,249	13,263	13,264	13,241	13,238	13,249	13,252	13,27	13,25	13,2532
2	13,278	13,263	13,261	13,288	13,263	13,286	13,253	13,286	13,282	13,259	13,2719
3	13,274	13,259	13,282	13,272	13,294	13,288	13,273	13,29	13,304	13,276	13,2812
4	13,292	13,248	13,253	13,258	13,268	13,262	13,252	13,26	13,261	13,262	13,2616
5	13,216	13,199	13,191	13,201	13,205	13,181	13,201	13,203	13,192	13,2015	13,19905

Tabulka 21 rozměry T vzorků s hustotou 20%

hustota 70											
vzorek	T [mm]										Průměr
1	5,84	5,891	5,848	5,852	5,904	5,804	5,91	5,849	5,888	5,854	5,421818
2	5,908	5,904	5,835	5,873	5,831	5,908	5,858	5,902	5,899	5,833	5,522818
3	5,817	5,893	5,912	5,847	5,838	5,906	5,84	5,905	5,838	5,901	5,608818
4	5,889	5,866	5,802	5,89	5,836	5,889	5,857	5,806	5,891	5,811	5,685182
5	5,812	5,876	5,89	5,832	5,877	5,905	5,895	5,91	5,824	5,88	5,791
6	5,85	5,875	5,827	5,821	5,854	5,861	5,864	5,819	5,874	5,77	5,855909

Tabulka 22 rozměry W vzorků s hustotou 20%

hustota 70											
vzorek	W [mm]										Průměr
1	13,259	13,243	13,259	13,254	13,21	13,175	13,243	13,161	13,251	13,244	13,2299
2	13,237	13,248	13,236	13,214	13,248	13,213	13,243	13,201	13,241	13,252	13,2333
3	13,17	13,155	13,158	13,185	13,184	13,205	13,15	13,188	13,19	13,219	13,1804
4	13,245	13,278	13,277	13,276	13,271	13,275	13,265	13,247	13,258	13,267	13,2659
5	13,273	13,308	13,28	13,305	13,282	13,305	13,269	13,302	13,293	13,308	13,2925
6	13,265	13,282	13,29	13,247	13,3	13,289	13,257	13,273	13,278	13,261	13,2742

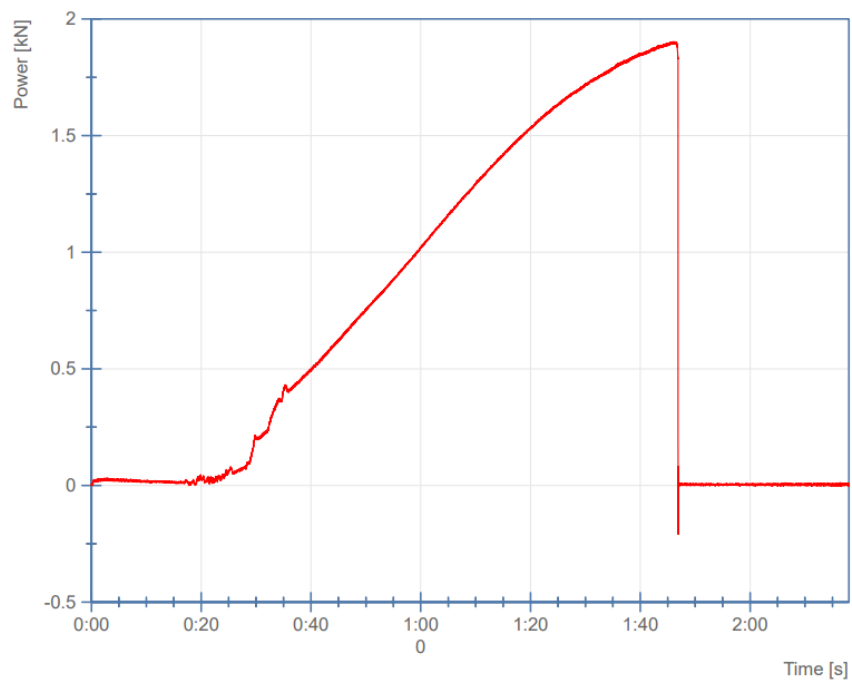
Tabulka 23 rozměry T vzorků s hustotou 20%

hustota 100											
vzorek	T [mm]										Průměr
1	5,895	5,912	5,85	5,896	5,845	5,891	5,912	5,849	5,91	5,847	5,437
2	5,873	5,895	5,909	5,895	5,9	5,889	5,868	5,889	5,909	5,819	5,531455
3	5,882	5,907	5,87	5,936	5,887	5,888	5,906	5,882	5,874	5,914	5,631455
4	5,882	5,899	5,889	5,9	5,899	5,866	5,892	5,892	5,895	5,897	5,719182
5	5,928	5,905	5,926	5,917	5,918	5,919	5,928	5,917	5,925	5,908	5,835545

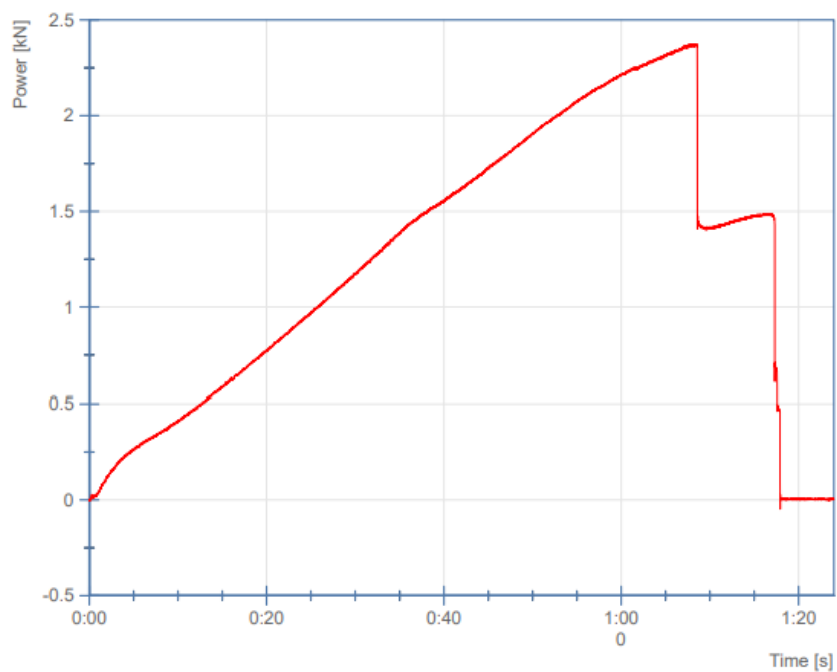
Tabulka 24 rozměry W vzorků s hustotou 20%

hustota 100											
vyorek	W [mm]										Průměr
1	13,29	13,258	13,254	13,297	13,269	13,259	13,252	13,252	13,252	13,288	13,2671
2	13,377	13,354	13,356	13,384	13,348	13,346	13,367	13,327	13,343	13,335	13,3537
3	13,372	13,336	13,325	13,343	13,291	13,341	13,343	13,327	13,345	13,343	13,3366
4	13,369	13,369	13,371	13,367	13,353	13,345	13,35	13,366	13,323	13,337	13,355
5	13,343	13,299	13,353	13,366	13,325	13,352	13,284	13,322	13,337	13,339	13,332

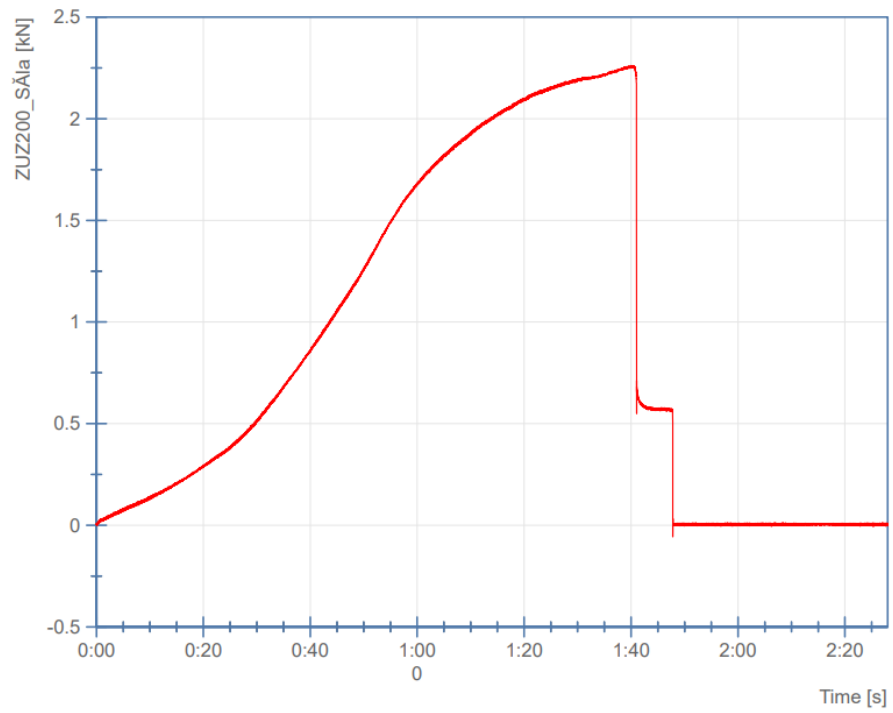
Příloha 2 Grafy průběhu tahové zkoušky



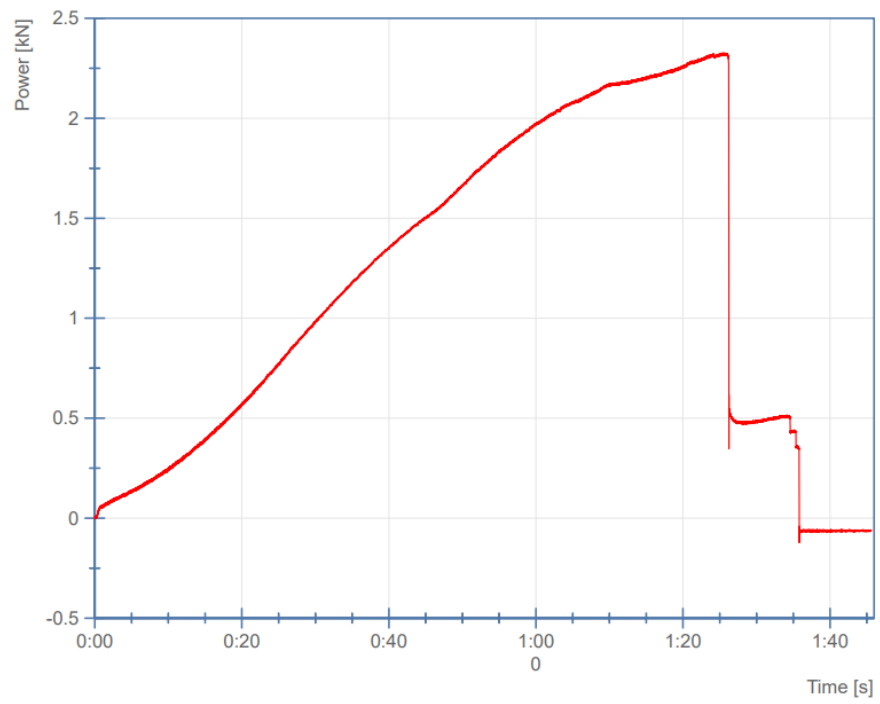
Graf 5 tahové zkoušky vzorku 1/20



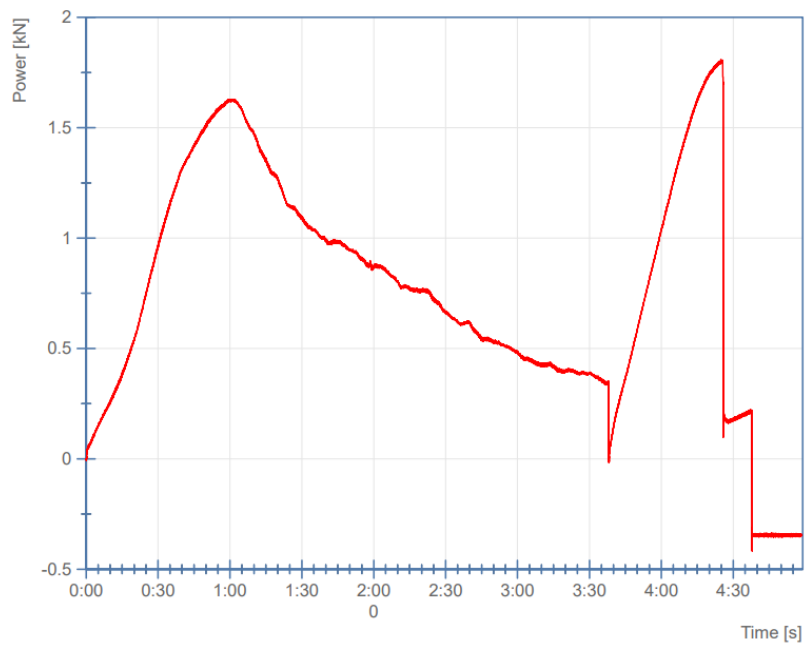
Graf 6 tahové zkoušky vzorku 2/20



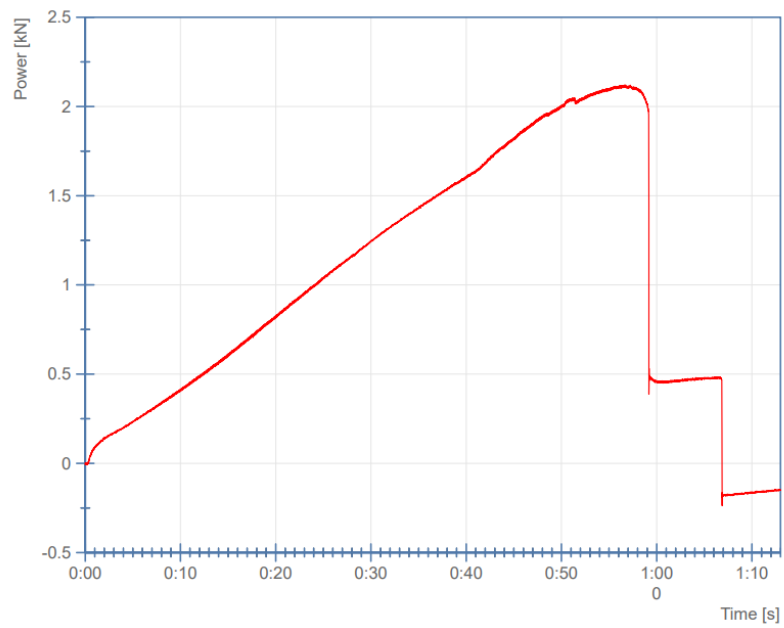
Graf 7 tahové zkoušky vzorku 3/20



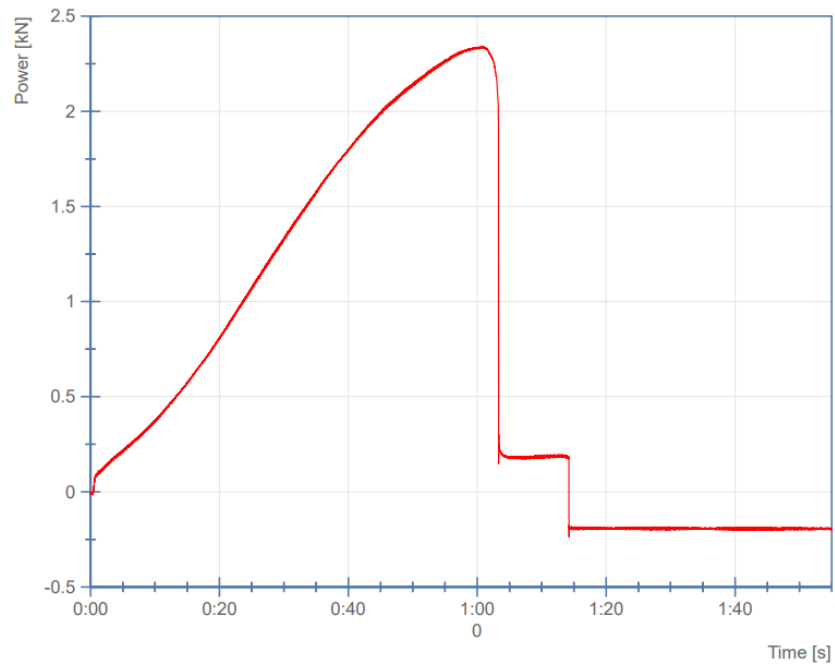
Graf 8 tahové zkoušky vzorku 4/20



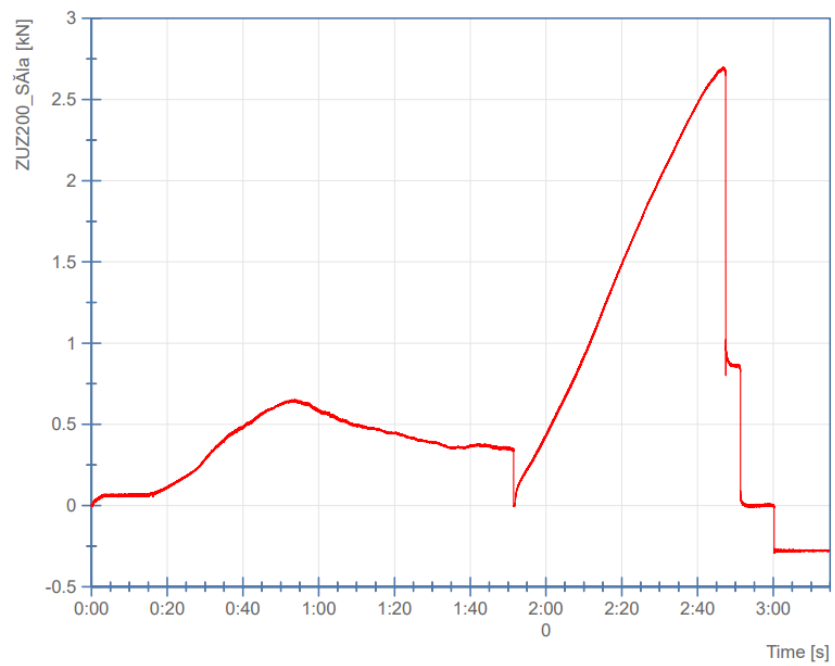
Graf 9 tahové zkoušky vzorku 5/20



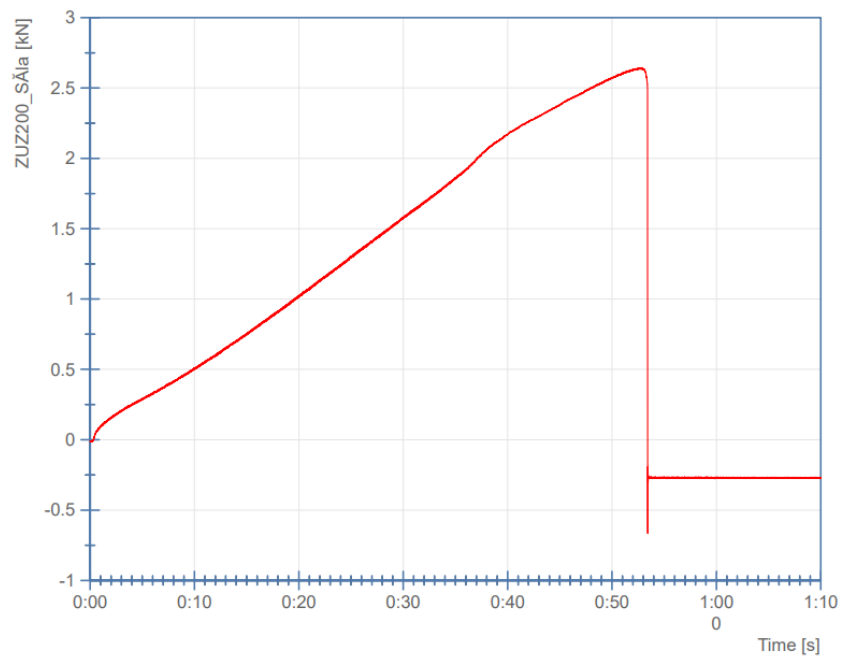
Graf 10 tahové zkoušky vzorku 6/20



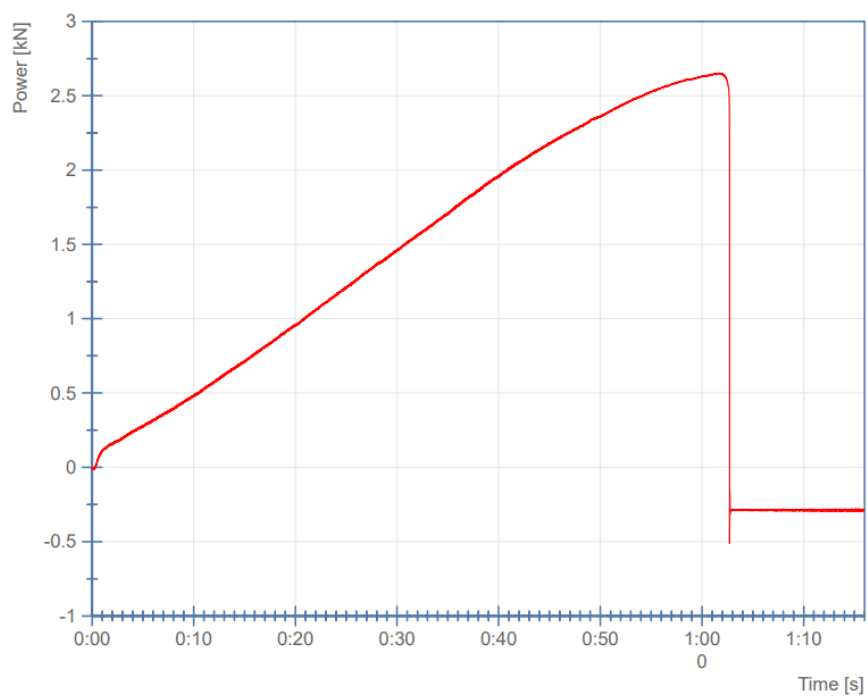
Graf 11 tahové zkoušky vzorku 1/40



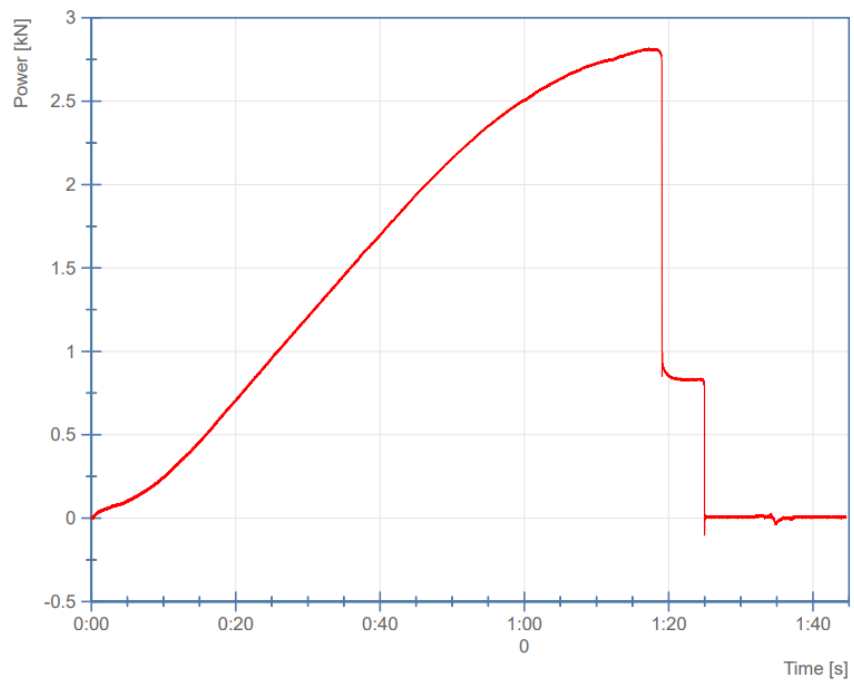
Graf 12 tahové zkoušky vzorku 2/40



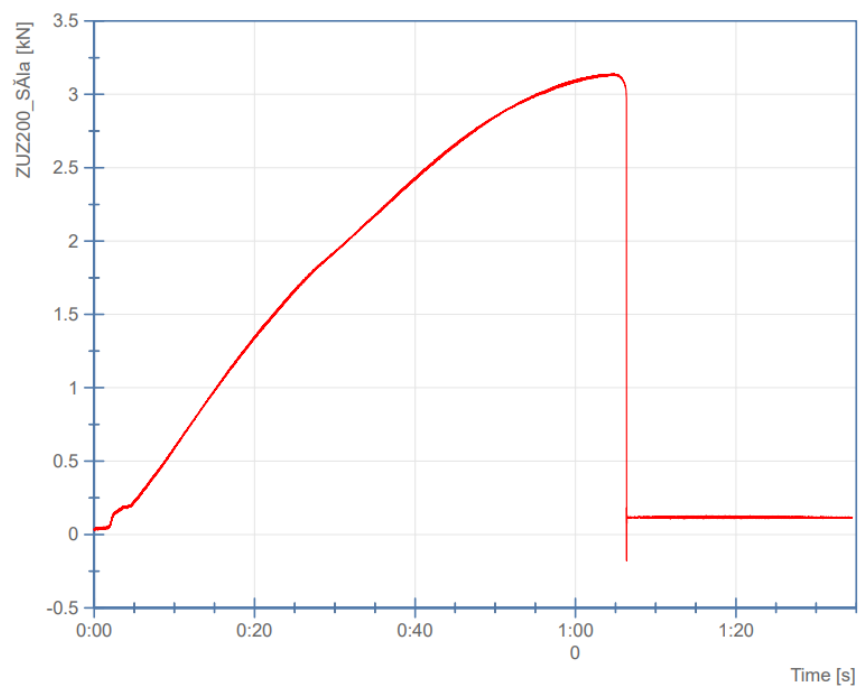
Graf 13 tahové zkoušky vzorku 3/40



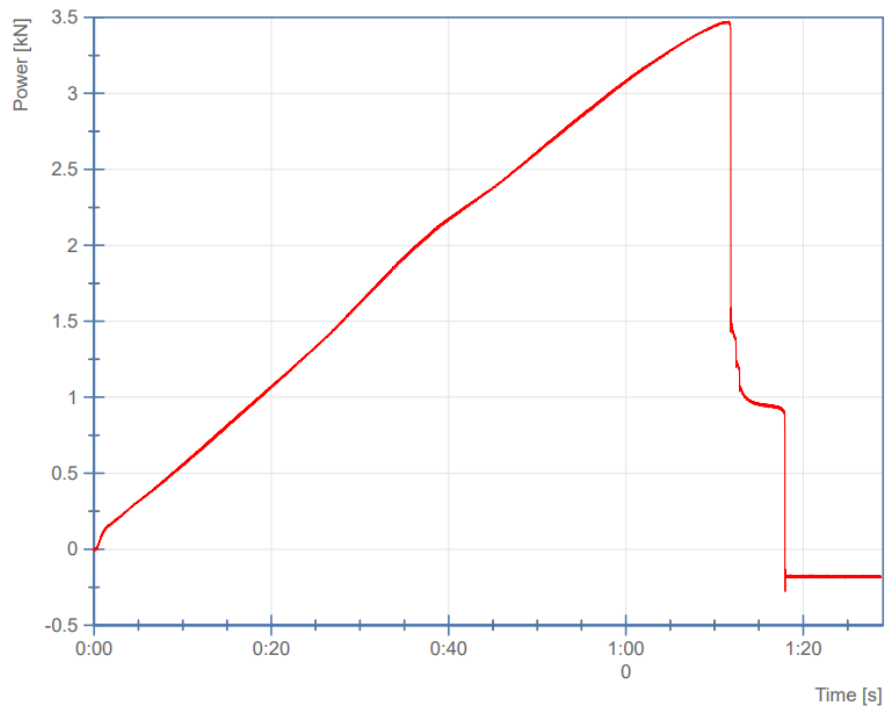
Graf 14 tahové zkoušky vzorku 4/40



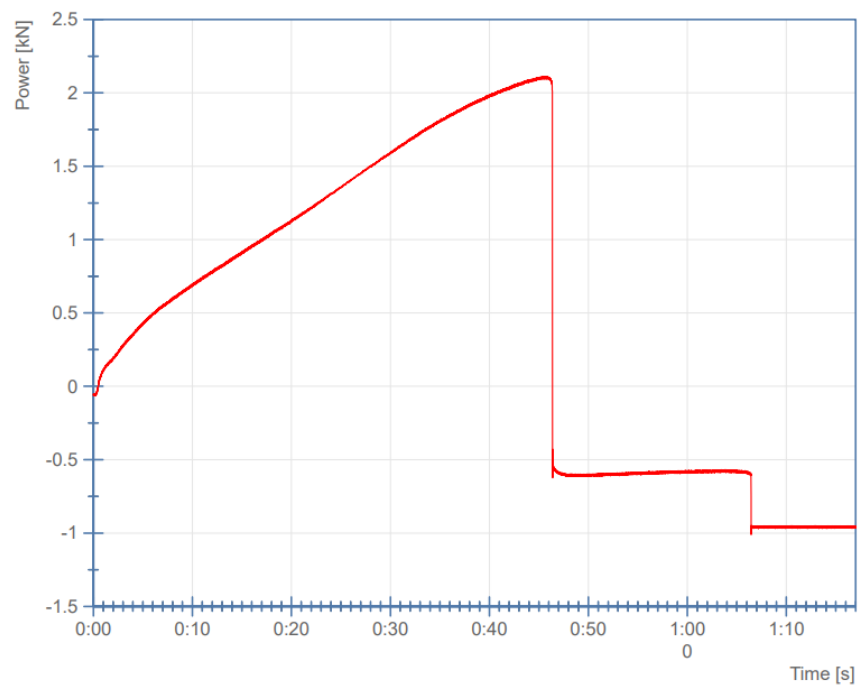
Graf 15 tahové zkoušky vzorku 5/40



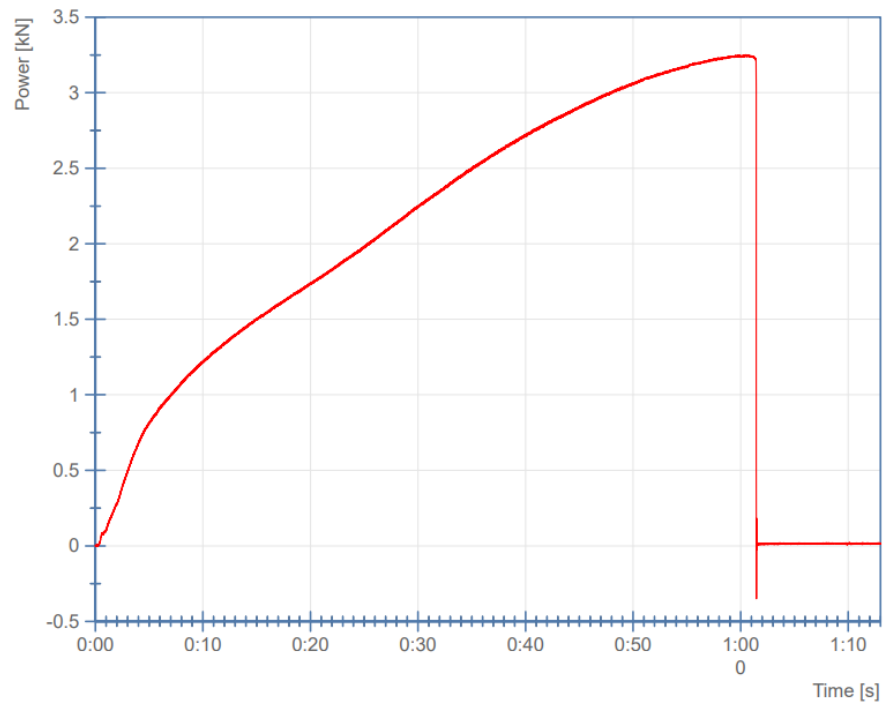
Graf 16 tahové zkoušky vzorku 1/70



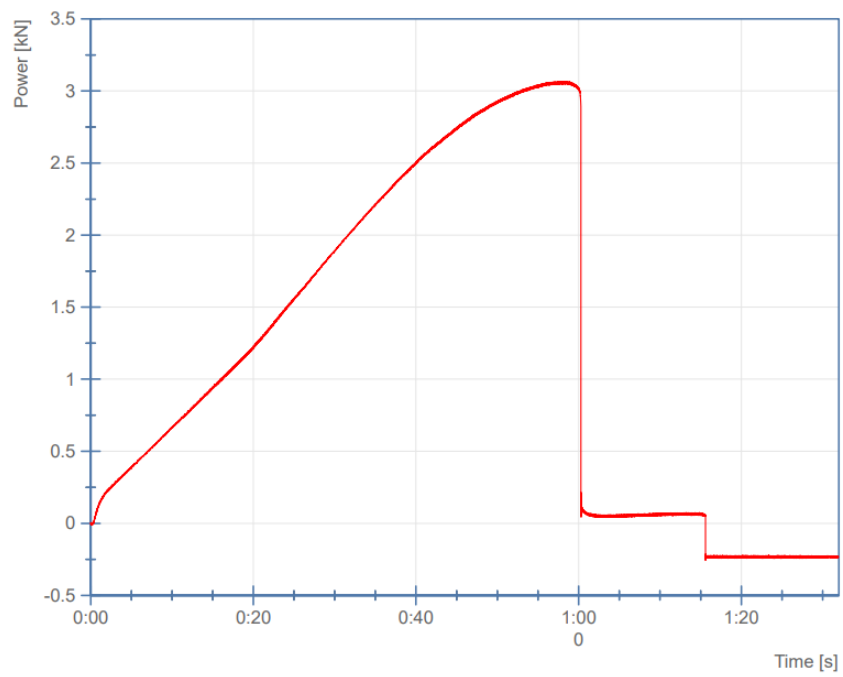
Graf 17 tahové zkoušky vzorku 2/70



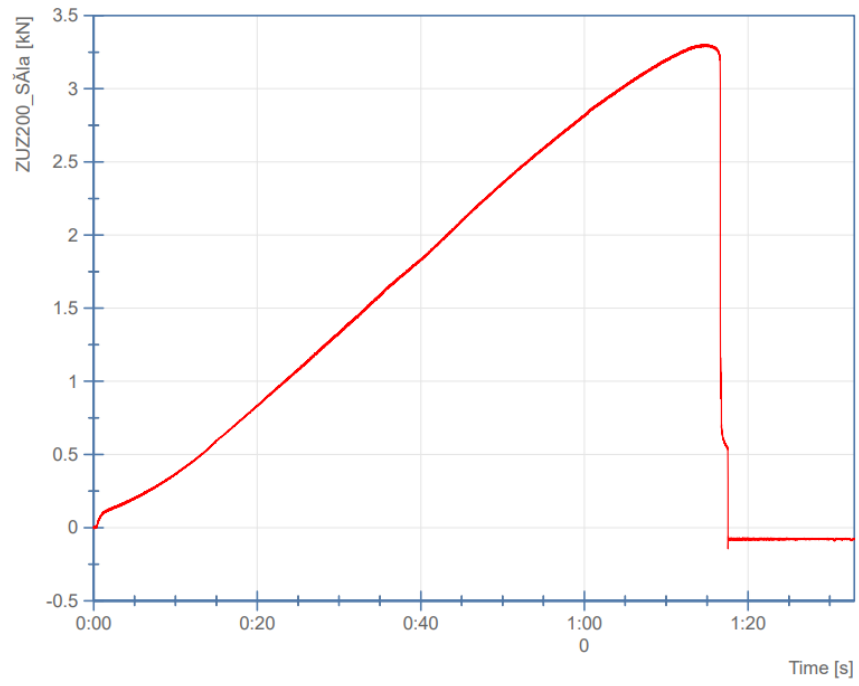
Graf 18 tahové zkoušky vzorku 3/70



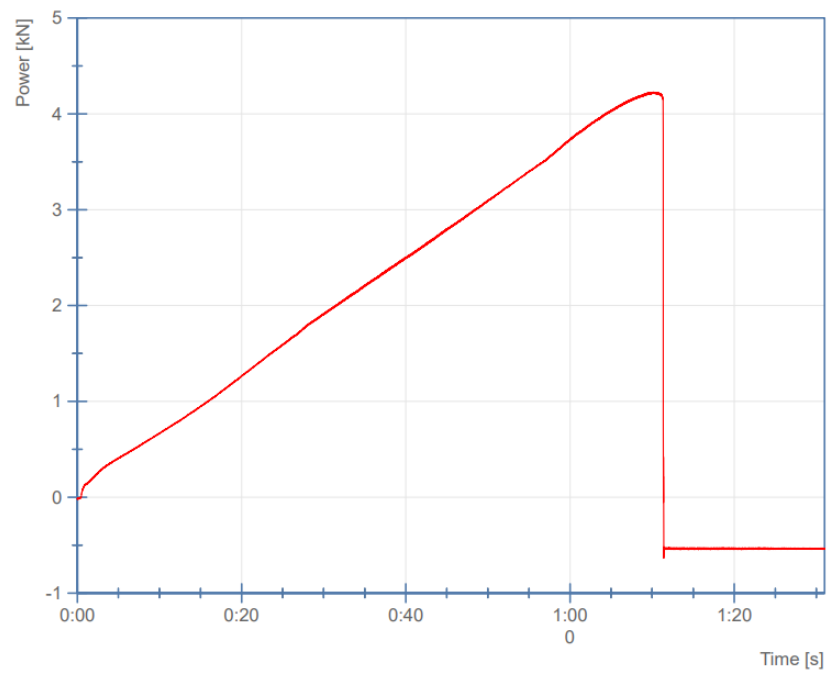
Graf 19 tahové zkoušky vzorku 4/70



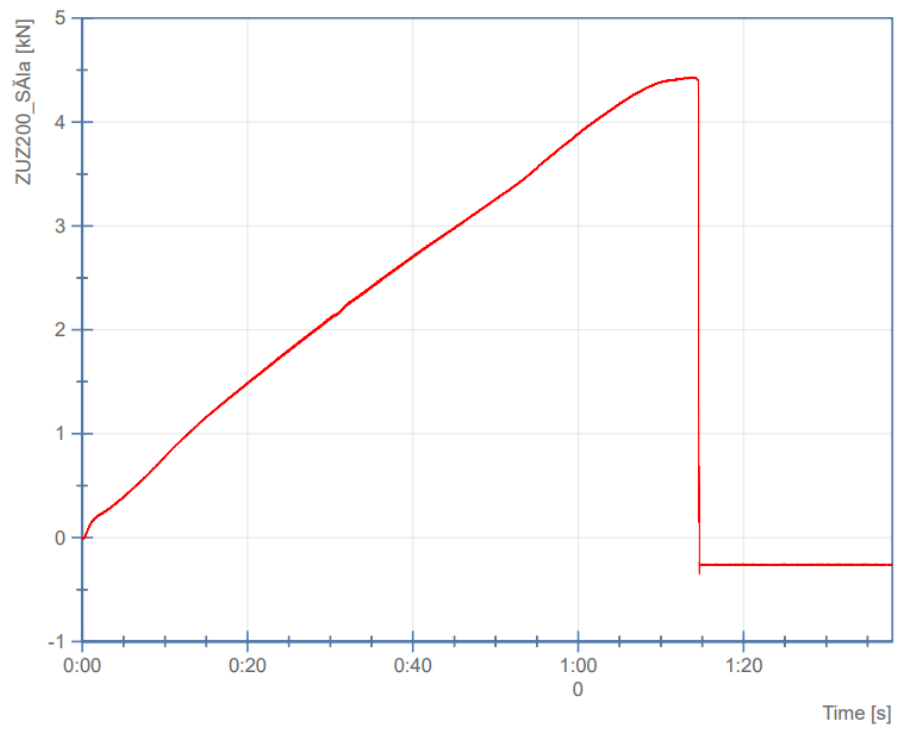
Graf 20 tahové zkoušky vzorku 5/70



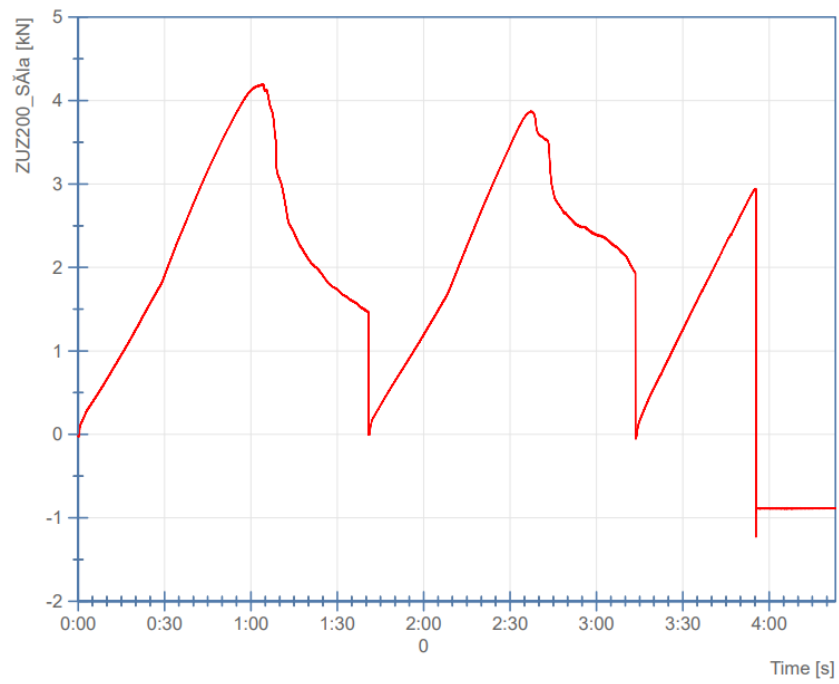
Graf 21 tahové zkoušky vzorku 6/70



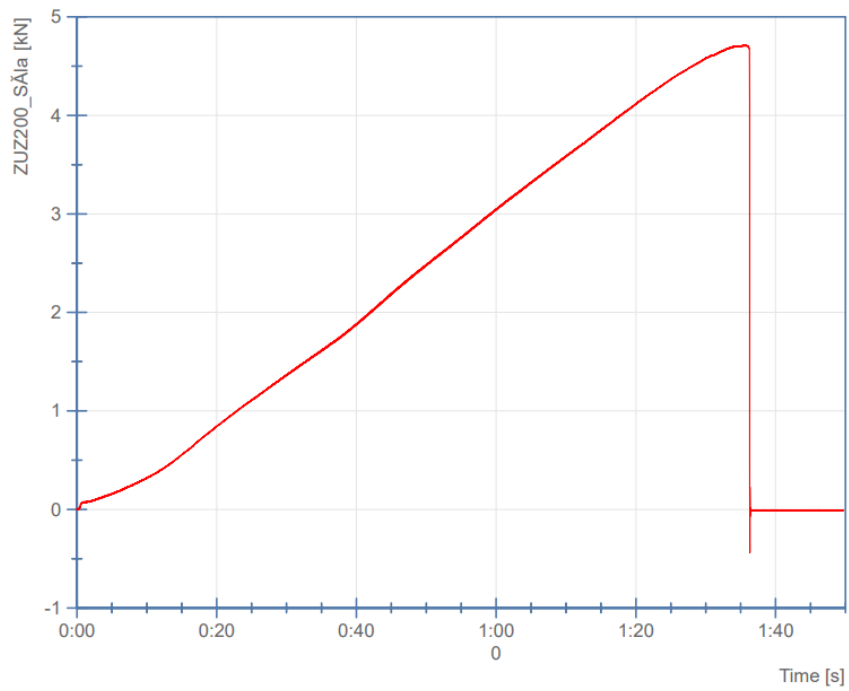
Graf 22 tahové zkoušky vzorku 1/100



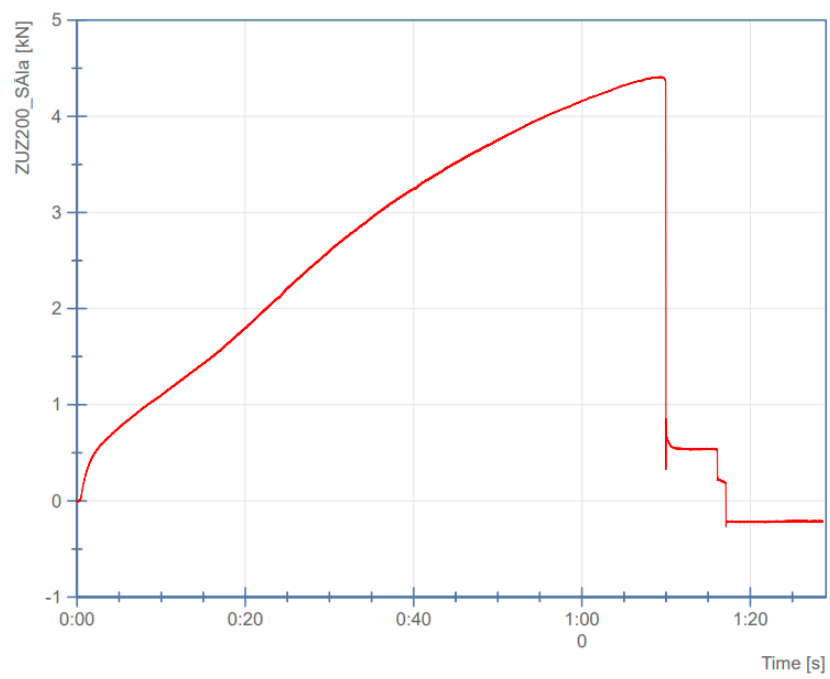
Graf 23 tahové zkoušky vzorku 2/100



Graf 24 tahové zkoušky vzorku 3/100



Graf 25 tahové zkoušky vzorku 4/100



Graf 26 tahové zkoušky vzorku 5/100

Příloha 3 Materiálový list

Tabulka 25 Materiálový list



Apr. 2019

Technical Data Sheet

Version 4.1

PolyMide™ PA6-CF

PolyMide™ PA6-CF is a carbon fiber reinforced PA6 (Nylon 6) filament. The carbon fiber reinforcement provides significantly improved stiffness, strength and heat resistance with outstanding layer adhesion.

Physical Properties

Property	Testing method	Typical value
Density	ASTM D792 (ISO 1183, GB/T 1033)	1.17 (g/cm ³ at 21.5 °C)
Glass transition temperature	DSC, 10 °C/min	56.6 (°C)
Melt index	300 °C, 2.16 kg	20.5 (g/10 min)
Melting temperature	DSC, 10 °C/min	220 (°C)
Crystallization temperature	DSC, 10 °C/min	186.6 (°C)
Heat Deflection Temperature	ISO 75 1.8 MPa	196 (°C)
Heat Deflection Temperature	ISO 75 0.45 MPa	215 (°C)
Sheet Resistance in Moisture State	ASTM D991 (GB/T 2439, ISO 1853)	1 - 10 (10 ⁸ Ω/sq)

Tested with 3D printed specimen of 100% infill

Mechanical Properties (Dry State)

Property	Testing method	Typical value
Young's modulus (X-Y)	ASTM D638 (ISO 527, GB/T 1040)	7453 ± 656 (MPa)
Young's modulus (Z)	ASTM D638 (ISO 527, GB/T 1040)	4354 ± 206 (MPa)
Tensile strength (X-Y)	ASTM D638 (ISO 527, GB/T 1040)	105.0 ± 5.0 (MPa)
Tensile strength (Z)	ASTM D638 (ISO 527, GB/T 1040)	67.7 ± 4.7 (MPa)
Elongation at break (X-Y)	ASTM D638 (ISO 527, GB/T 1040)	3.0 ± 0.4 (%)
Elongation at break (Z)	ASTM D638 (ISO 527, GB/T 1040)	2.9 ± 0.7 (%)
Bending modulus (X-Y)	ASTMD790 (ISO 178, GB/T 9341)	8339 ± 369 (MPa)
Bending strength (X-Y)	ASTMD790 (ISO 178, GB/T 9341)	169.0 ± 4.7 (MPa)
Charpy impact strength (X-Y)	ASTM D256 (ISO 179, GB/T 1043)	13.34 ± 0.52 (kJ/m ²)

All testing specimens were printed under the following conditions:
Nozzle temperature = 300 °C, printing speed = 45 mm/s, shell: 0.8mm, infill: 100%
All specimens were annealed at 80 °C for 30 min and dried for 48h prior to testing

Mechanical Properties (Moisture Conditioned)

Property	Testing method	Typical value
Young's modulus (X-Y)	ASTM D638 (ISO 527, GB/T 1040)	5666.07 ± 469.67 (MPa)
Young's modulus (Z)	ASTM D638 (ISO 527, GB/T 1040)	4713.82 ± 282.70 (MPa)
Tensile strength (X-Y)	ASTM D638 (ISO 527, GB/T 1040)	81.72 ± 6.0 (MPa)
Tensile strength (Z)	ASTM D638 (ISO 527, GB/T 1040)	64.38 ± 5.64 (MPa)
Elongation at break (X-Y)	ASTM D638 (ISO 527, GB/T 1040)	4.60 ± 0.56 (%)
Elongation at break (Z)	ASTM D638 (ISO 527, GB/T 1040)	1.78 ± 0.40 (%)
Bending modulus (X-Y)	ASTMD790 (ISO 178, GB/T 9341)	6387.46 ± 1120.96 (MPa)
Bending strength (X-Y)	ASTMD790 (ISO 178, GB/T 9341)	152.2 ± 15.57 (MPa)
Charpy impact strength (X-Y)	ASTM D256 (ISO 179, GB/T 1043)	32.83 ± 1.03 (kJ/m ²)

All specimens were annealed at 80 °C for 24h, and conditioned at 70% RH/23 °C and ambient temperature for 15 days prior to testing

www.polymaker.com



Technical Data Sheet

Apr. 2019

Version 4.1

Recommended printing conditions

Parameter	
Nozzle temperature	280 - 300 (°C)
Build Surface material	Glass, Garolite, Magigoo PA
Build surface treatment	Applying PVA glue to the build surface
Build plate temperature	25 - 50 (°C)
Cooling fan	Turned off
Printing speed	60 (mm/s)
Raft separation distance	0.1 - 0.2 (mm)
Retraction distance	3 - 6 (mm)
Retraction speed	40 - 60 (mm/s)
Recommended environmental temperature	25 - 50 (°C)
Threshold overhang angle	45 (°)
Recommended support material	PolyDissolve™ S1

Based on 0.4 mm nozzle and Simplify 3D v.3.1. Printing conditions may vary with different nozzle diameters

- Abrasion of the copper nozzle happens quite often when printing PolyMide™ PA6-CF. Normally, the life of a copper nozzle would be approximately 9h. A wear-resistance nozzle, such as hardened steel and ruby nozzle, is highly recommended to be used with PolyMide™ PA6-CF.
- PolyMide™ PA6-CF is sensitive to moisture and should always be stored and used under dry conditions (relative humidity below 20%).
- If PolyMide™ PA6-CF is used as the support material for itself, please remove the support structure before excessive moisture absorption. Otherwise the support structure can be permanently bonded to the model.
- After the printing process, it is recommended to anneal the model in the oven at 80 - 100°C for 1 - 3 hours.