

VYSOKÁ ŠKOLA POLYTECHNICKÁ JIHLAVA

Katedra technických studií

**Mechanické testování filamentů
na bázi polyamidů bez i s obsahem aditiv**

bakalářská práce

Autor práce: Tadeáš Fiala

Vedoucí práce: Ing. Mgr. Lucie Zárybnická, Ph.D.

Jihlava 2020

Abstrakt

Předložená bakalářská práce se zabývá zpracováním polyamidů technologií 3D tisku, konkrétně pomocí metody Fused Filament Fabrication (FFF). V teoretické části je zpracována rešerše na téma 3D tisk, kde je popsán obecný princip 3D tisku, technologie FFF a konstrukce FFF 3D tiskáren. Další část rešerše se zabývá polyamidy, aditivy a vlastnostmi polyamidů. Cíl experimentální části je příprava vzorků čistého polyamidu 12 (PA12) a PA12 obsahující 15% aditiva ve formě uhlíkového vlákna (PA12+CF15). Tyto vzorky byly následně charakterizovány vybranými analýzami jako je termická analýza, analýza vlhkosti a mechanické testování.

Klíčová slova

3D tisk; FFF; polyamidy; uhlíková vlákna; mechanické vlastnosti

Abstract

The submitted bachelor's thesis is on the treatment of polyamides with 3D printing technology, specifically using the Fused Filament Fabrication (FFF) method. In the theoretical part, a search is made for 3D printing, describing the general principle of 3D printing, FFF technology and the design of FFF 3D printers. Another part of the research deals with polyamides, additives, and the properties of polyamides. The aim of the experimental part is to prepare samples of pure polyamide 12 (PA12) and PA12 containing 15% of additives in the form of carbon fibre (PA12+CF15). These samples were then characterised by selected analyses such as thermal analysis, moisture analysis and mechanical testing.

Key words

3D printing; FFF; polyamides; carbon fibers; mechanical properties

Prohlašuji, že předložená bakalářská práce je původní a zpracoval jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem v práci neporušil autorská práva (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, v platném znění, dále též „AZ“).

Souhlasím s umístěním bakalářské práce v knihovně VŠPJ a s jejím užitím k výuce nebo k vlastní vnitřní potřebě VŠPJ.

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje AZ, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že VŠPJ má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé bakalářské práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé bakalářské práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své bakalářské práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠPJ, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených vysokou školou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše), z výdělku dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence.

V Jihlavě dne 2. srpna 2021

.....

Podpis studenta

Poděkování

Chtěl bych poděkovat Ing. Mgr. Lucii Zárybnické, Ph.D. za ochotu a pomoc, kterou mi jako vedoucí bakalářské práce věnovala. Poděkování také patří společnosti Solidify S.R.O., která mi umožnila práci na toto téma.

Obsah

Úvod.....	9
Motivace.....	10
Cíle	10
1 Teoretická část.....	11
1.1 3D tisk.....	11
1.2 FFF.....	11
1.2.1 Typy FFF tiskáren	13
1.3 Polyamidy	15
1.3.1 PA12.....	15
1.3.2 Aditiva pro PA12	18
1.3.3 Mechanické vlastnosti a jejich testování	19
1.3.4 Nasákavost polyamidů	20
1.4 3D tisk polyamidů	21
2 Experimentální část	22
2.1 Testované materiály.....	22
2.2 Použité přístroje.....	26
2.3 3D tisk z PA12 a PA12+CF15.....	30
3 Výsledky a diskuze.....	32
3.1 Analýza filamentů.....	32
3.1.1 Termická analýza	32
3.2 3D tisk zkušebních tyčí.....	34
3.3 Adheziva.....	38
3.4 Mechanické testování vytištěných vzorků pomocí tahové zkoušky.....	40
4 Závěr.....	42

5	Bibliografie.....	44
---	-------------------	----

Seznam použitých zkratek

3D	trojrozměrný
2D	dvourozměrný
ABS	akrylonitrilbutadienstyren
CAD	počítačem podporované navrhování (Computer Aided Design)
CF	uhlíkové vlákno (Carbon Fiber)
CNC	počítačem řízený obráběcí stroj (Computer Numeric Control)
DTA	diferenciální termická analýza
FDM	nanášení roztaveného materiálu (Fused Deposition Modeling) (Registrovaná značka)
FFF	výroba taveným vláknem (Fused Filament Fabrication)
GF	skelné vlákno (Glass Fiber)
OSB	lisovaná deska z orientovaně rozprostřených velkoplošných třísek (Oriented Standard Board)
PA6	nylon (Polyamid6)
PA12	polyamid 12
PLA	kyselina polyléčná (Polylactic Acid)
PA	polyamid obecně
SLA	stereolitografie
SW	software
T_g	teplota skelného přechodu
T_f	teplota toku

T	teplota	
TG	termogravimetrie	
UV	ultrafialové	záření

Úvod

Testování mechanických vlastností filamentů na bázi polyamidů může mít velký přínos nejen v průmyslovém odvětví, ale i pro domácí použití, jelikož polyamidy mají z technického hlediska velmi dobré vlastnosti jako je otěruvzdornost, vysoká houževnatost a odolnost proti UV záření (Omnexus, 2021). Pokud porovnáme konvenční způsoby zpracování polyamidů s technologií 3D tisku, tak aditivní výroba nemůže zatím konkurovat přesnosti a opakovatelnosti výroby, kterou nabízí například počítačem řízené obráběcí stroje (CNC) nebo technologie vstřikování. Na druhou stranu v malosériové nebo kusové výrobě 3D tisk vyniká, a to zejména svou výrobní pružností, kterou vstřikování plastů, a obecně technologie využívající formy, nemá a není tedy ekonomicky vhodné. CNC obrábění také disponuje vysokou pružností výroby, ale s větší složitostí dílu roste také množství odebraného materiálu a tím se prodlužuje i výrobní čas. U 3D tisku ale tento problém není tak razantní, jelikož materiál může být nanesen teoreticky kamkoliv v pracovním prostoru, takže čas výroby složité součásti se nebude výrazně lišit od výroby jakékoliv jiné součásti o stejném objemu. Díky snadnému opracování polyamidů formou obrábění jde i u tištěné součásti docílit vysoké přesnosti, kdy je možné obrobit pouze funkční rozměry, čímž se docílí minimálního množství odpadu a potenciálně i kratších výrobních časů (Stratasys, 2021). Viz Obr. 1



Obr. 1 Obrábění tištěného dílu z PA (Stratasys, 2021)

Motivace

Motivací pro zpracování bakalářské práce na téma Mechanické testování filamentů na bázi polyamidů bez i s obsahem aditiv byl zejména můj zájem o 3D tisk a výrobu funkčních dílů touto technologií. Povědomí o vlastnostech polyamidů jsem získal při obrábění PA6, neboli nylonu, ale s 3D tiskem tohoto materiálu jsem zkušenosti neměl, a proto analyzovat vlastnosti termoplastu PA12 se pro mě stalo velkou výzvou, díky které jsem mohl dále rozvíjet své zkušenosti v oblasti aditivní výroby.

Cíle

Výstupem bakalářské práce bude naměřená pevnost v tahu materiálů polyamidu 12 (PA12) a polyamidu 12 s 15% příměsí uhlíkového vlákna (PA12+CF15) zpracovaných technologií 3D tisku s ohledem na obsah vody v testovaných vzorcích a zhodnotit důležitost vlhkosti v materiálu.

1 Teoretická část

1.1 3D tisk

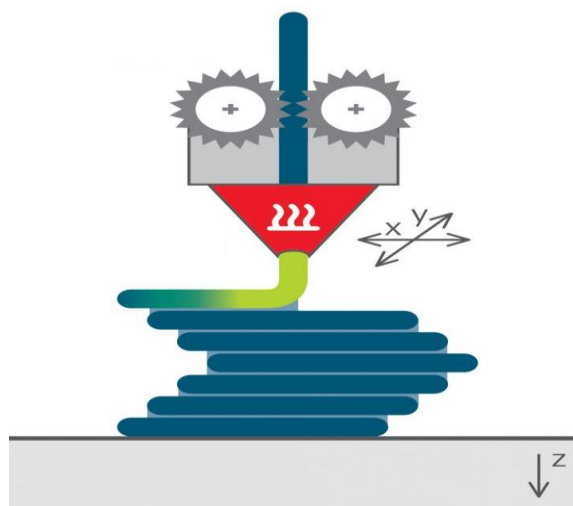
3D tisk je také znám jako aditivní výroba. Je to tedy opak konvenční výroby jako je obrábění. Namísto odebrání materiálu z objektu, například jako při tvorbě sochy z bloku kamene, se při 3D tisku klade materiál po vrstvách pro fyzické ztvárnění dílu z digitálního modelu tvořeného převážně pomocí počítačem podporovaného navrhování (CAD) (All3DP, 2021). Princip spočívá v rozložení trojrozměrného modelu (3D) na dvourozměrné vrstvy (2D), které po poskládání vytvoří konkrétní požadovaný fyzický objekt (3D). První patent technologie 3D tisku se objevil už v roce 1980 v Japonsku, nazvaný Rapid Prototyping, využívající technologii vytvrzování pryskyřice za pomoci světla. Průmyslové využití 3D tisku začíná až v roce 1986 jako technologie stereolithography apparatus (SLA). V průběhu let se objevily další způsoby aditivní výroby, jako je fused deposition modeling (FDM) která je licencovaná, a proto se využívá název fused fabrication filament (FFF) (3D Factory, 2017).

1.2 FFF

Běžně využívaná technologie aditivní výroby, která pomocí pohyblivé tiskové hlavy s nahřívanou tryskou pokládá roztavený termoplast, tzv. filament, v osách X, Y a Z. Roztavený materiál následně chladne a dojde k ztuhnutí materiálu. Tento postup byl patentován již v 80. letech minulého století a už v 90. letech byla zkonstruována první komerční 3D tiskárna od firmy Stratasys (Stratasys, 2020). Tato firma držela velmi dlouhou dobu patent na obecný princip FFF tisku až do roku 2009 (Crump, 1989). Díky vypršení patentu se začaly objevovat nové značky tiskáren a jejich ceny se začali snižovat, což vedlo k rozšíření povědomí i pro veřejnost. Dnes už je tato technologie open source, hlavně díky firmě RepRap, která své poznatky sdílela zdarma. Zde začala éra desktopových (domácích) 3D tiskáren (3D Factory, 2017). Tento „průmyslový boom“ posunul také vývoj filamentů, na bázi termoplastů, které mají ideální vlastnosti pro FFF technologii – relativně snadno se taví, následně zpracovávají a po vychladnutí se „obnoví“ jejich vlastnosti pevného materiálu. Jako první se používaly materiály jako je akrylonitrilbutadienstyren (ABS) a jeho alternativy. Následně se začal využívat polylaktid (PLA), také známý pod názvem kyselina polymlečná, který sice dnes je velmi vhodnou variantou pro 3D tisk, ale nebylo tomu tak vždy. Právě s postupem času se paleta termoplastů vhodných pro 3D tisk a jejich kompozitních

variant rozrostla o nevídaný počet druhů a nadále se škála druhů rozvíjí jako je tomu u filamentů na bázi polyamidů.

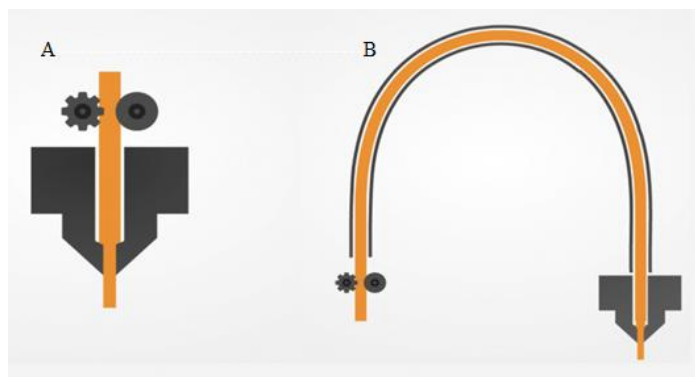
Tyto filamenty ve formě struny jsou taveny v tzv. extrudéru (tisková hlava), který je základním prvkem FFF tiskáren. Extruder se skládá ze tří částí. Jako první je tryska. Tryska je místo, kde má být filament roztaven a určuje šířku vrstvy, ale ne její tloušťku. Tloušťka vrstvy je určena odsazením trysky od podložky nebo předchozí vrstvy. Druhá část, tzv. heat block neboli topné těleso s termistorem pro regulaci teploty. Heat block v ideálním případě nahřívá pouze trysku, ale v praxi se zvyšuje teplota všech prvků v blízkosti, což by vedlo k tavení filamentu ještě před vstupem do trysky, a to je nežádoucí. Proto je zde třetí součást, heatsink, kde je teplo odebíráno a vyzařováno do prostoru. Heatsink je doslova chladič a je běžně doplněn o ventilátor pro lepší odvod tepla (Svět Hardware, 2019). Zjednodušený extruder je vyobrazen na Obr. 2.



Obr. 2 Princip FFF tisku (Matca, 2020)

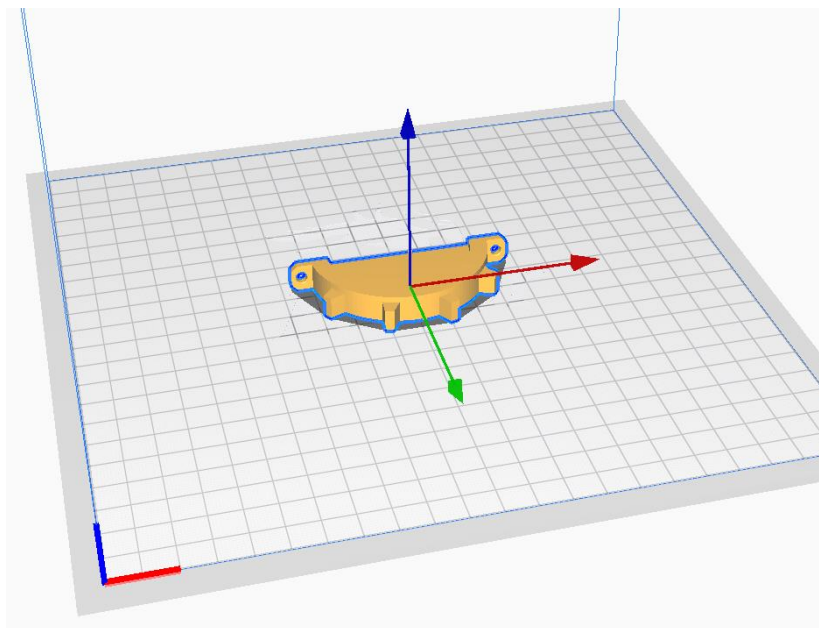
1.2.1 Typy FFF tiskáren

Typy FFF tiskáren je možné dělit podle konstrukce nebo souřadného systému. První konstrukční prvek, který mají FFF tiskárny společný, ale zároveň dělí tiskárny, je extruder. To je podavač materiálu, zjednodušeně ozubené kolečko, které se zařezává do materiálu ve formě struny, a tím je schopno ho tlačít dále do mechanismu tiskárny. Existují dva typy – direct drive (Obr. 3 A) a bowden drive (Obr. 3). Obě varianty mají své výhody, ale i nevýhody. Bowden drive má extruder externě a je propojen teflonovou trubičkou s hotendem. U bowden drive i přes využití teflonové trubičky dochází k značnému tření, čímž může docházet ke zpoždění extruze (vytlačování), popřípadě zpoždění retrakce (vytažení) materiálu. U direct drive není problém s retrakcemi, jelikož je extruder přímo nad tiskovou hlavou, a materiál je přímo posouván do prostoru trysky, proto je vhodnější pro tisk flexibilních materiálů. Na druhou stranu je tisková hlava, nebo lépe řečeno pohyblivá část těžší, proto bowden drive dosahuje většího zrychlení. Extruder je totiž přimontován na pevnou kostru tiskárny, díky čemuž je tisková hlava znatelně lehčí.



Obr. 3 Direct drive (A) vs bowden drive extruder (B) (Bitfab, 2020)

FFF tiskárny se ale obecně dělí podle pohybu tiskové hlavy po pracovní ploše, přesněji jakým způsobem pohyblivé části mění polohu tiskové hlavy. Kartézský souřadný systém je vhodné zmínit jako první, jelikož je nejčastěji využíván pro jeho technickou i matematickou jednoduchost. Z technického hlediska stačí, aby tiskárna měla lineární pohon pro každou osu, díky čemuž se tisková hlava dokáže dostat do každé pozice v pracovním prostoru jen díky vzdálenosti definované od počátku třemi osami (X, Y, Z) jako je na Obr. 4.



Obr. 4 kartézský souřadný systém v programu Ultimaker CURA

Další jsou Delta tiskárny. Delta 3D tiskárny využívají konstrukci tří ramen, která se spojují v prostoru hotendu. Ramena jsou poháněna lineárními pohony, které jsou připevněny k rámu tiskárny, a pohyblivá část je tedy zatížena pouze vahou ramen a hotendu. Tato konstrukce má nízkou hmotnost. Je tedy možné dosáhnout vyššího zrychlení a tím je možné pracovat při vyšších rychlostech, ale matematická část je složitá oproti kartézským souřadnicím. Viz. Obr. 5.



Obr. 5 Delta tiskárna TRILAB DeltiQ (TRILAB, 2020)

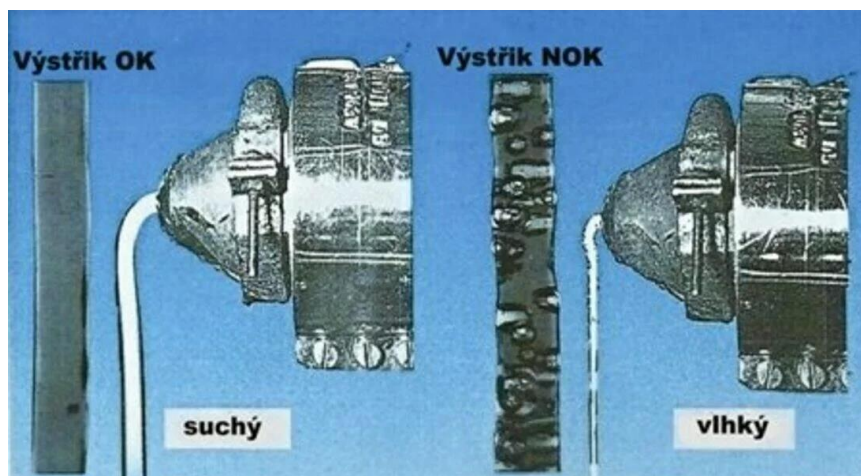
1.3 Polyamidy

Polyamidy patří mezi polymery složené z lineárních makromolekul obsahujících dlouhé řetězce tvořené atomy uhlíku, kyslíku, dusíku a vodíku. Makromolekuly polyamidů se syntetizují například z laktanů, které tvoří cyklické molekuly. Tyto cyklické molekuly se polymerizací rozpojí a vznikne lineární řetězec obsahující stejný počet atomů uhlíku jako jeho cyklická verze. Pro výrobu polyamidů se například využívají laktany s 6, 11, nebo 12 atomy uhlíku, které se polymerizují na jednotlivé typy polyamidů. Polyamidy se využívají často jako konstrukční materiály a materiály pro vysoce namáhané součásti. Jsou velmi odolné při statickém i dynamickém namáhání ve velkém rozpětí teplot. Mezi polyamidy se dnes využívá polyamid 6 (PA6), syntetizován z kaprolaktamu (laktan s 6 atomy uhlíku). Je charakteristický vysokou pevností v poměru k váze, vysokou mezí únavy, chemickou odolností a kluznými vlastnostmi. Také často využívaný polyamid je polyamid 12 (PA12), který je vytvořen z laurilaktanu (laktan s 12 atomy uhlíku). PA12 má nižší teplotu tání a pevnost oproti PA6, ale není tolik citlivý na vlhkost. Má dobré elektrické izolační vlastnosti a má nízkou hustotu. PA12 je také chemicky odolný, ale postrádá odolnost vůči kyselinám (Omnexus, 2021) (Heyman, 2020).

1.3.1 PA12

Vlastnosti PA12, jako je odolnost vůči otěru nebo chemikáliím, jsou podobné v porovnání s PA6, ale teplota tání je o 40°C nižší a mechanická odolnost zaostává. Zato PA 12 má nižší nasákavost než ostatní druhy polyamidů. PA12 je své čisté formě sám o sobě velmi všestranný materiál,

který disponuje velkou odolností vůči namáhání a pokud je PA12 v tenkých vrstvách, tak je i velmi flexibilní (Omnexus, 2021). Další vlastnost, která dělá z PA12 vhodný materiál pro 3D tisk je jeho vysoká adheze mezi vrstvami, díky čemuž je PA12 všestranný pro tvorbu funkčních součástí pomocí FFF technologie. Navíc také odolává poměrně vysokým teplotám, okolo 125°C, a to přes fakt, že skelný přechod (T_g) u PA12 začíná při teplotě 80°C. Jelikož jsou polyamidy semikrystalické, tak skelný přechod nemá tak znatelný vliv na mechanické vlastnosti jako je tomu u amorfních látek. Bohužel, polyamidy jako takové jsou hydroskopické. Materiál tedy rychle absorbuje vlhkost z prostředí, ve kterém se nachází (Heyman, 2020). Vlhkost v materiálu je u 3D tisku nežádoucí, jelikož se materiál zahřívá na tzv. teplotu toku (T_f), kdy se makromolekuly materiálu vůči sobě začínají pohybovat. Tato teplota u polyamidů je 210°C $\pm$ 30°C. Zde nastává problém se zmíněnou vlhkostí. Voda má bod varu nižší, než je teplota při tisku, což při takto vysoké teplotě způsobí její rapidní rozpínání ve formě plynu, který při extruzi naruší homogenitu vrstvy. Stručně řečeno – ve výtisku jsou bublinky jako je zobrazeno na Obr. 6.

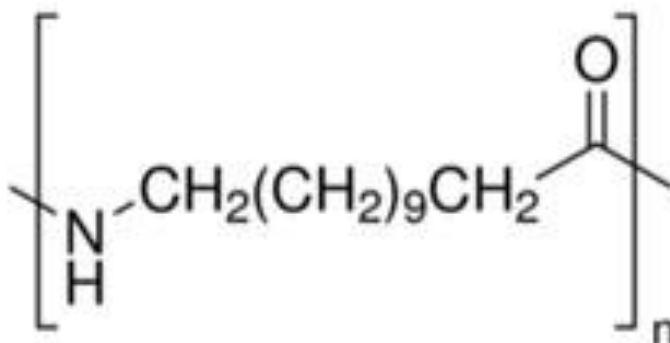


Obr. 6 Struktura taveniny vytlačené z trysky vstřikovacího stroje do volného prostoru u suchého a vlhkého polymeru (MMSpektrum, 2014)

PA12 má ze všech používaných polyamidů nasákavost nejnižší, a proto v oblasti 3D tisku obstál mnohem lépe než ostatní, pevnější varianty Nylonu. Právě díky jeho molekulární struktuře, kdy vazby -CO-NH- zapříčiňují absorpci vody, ale s rostoucím počtem skupin -CH₂- se nasákavost snižuje. A právě PA12 obsahuje v molekule 13 skupin -CH₂-. Viz. Obr. 7.

Na druhou stranu polyamidy vděčí právě vodě za své vlastnosti, protože voda funguje jako forma změkčovadla. Voda se váže na amorfnní části řetězce a tím se zlepšší houževnatost (Omnexus, 2021). Obecně stačí, aby materiál absorboval atmosférickou vlhkost k dosažení optimálních vlastností. Tato vlhkost je ale příliš vysoká pro 3D tisk, a proto je nutné před tiskem materiál vysušit.

Polyamidy jsou chemicky odolné proti běžným rozpouštědlům, olejům a alkáliím, ale neodolají koncentrovaným kyselinám. PA12 v neaditivované formě je bíložlutý nebo mléčně bílý, ale kvůli UV záření postupně žloutne, což se děje kvůli fotooxidaci, která postupně rozkládá vazby makromolekul. To je způsobeno atomy kyslíku, uhlíku a vodíku, které začnou vytvářet jednodušší sloučeniny, jako jsou ketonové a hydroperoxidové skupiny, je ale možné zvýšit jeho životnost speciálním barvením, například sazemi, které světelné záření pohlcují. I při tepelném zatížení od -40°C do 80°C, dle tvaru a zatížení výrobku, si polyamidy udržují velmi dobrou tvarovou stálost a pevnost a krátkodobě odolají teplotám až do 125°C. U polyamidů s přidaným skelným vláknem je tepelná roztažnost ještě menší a krátkodobě zvládnou i teploty vyšší než čistý PA12 (Heyman, 2020).



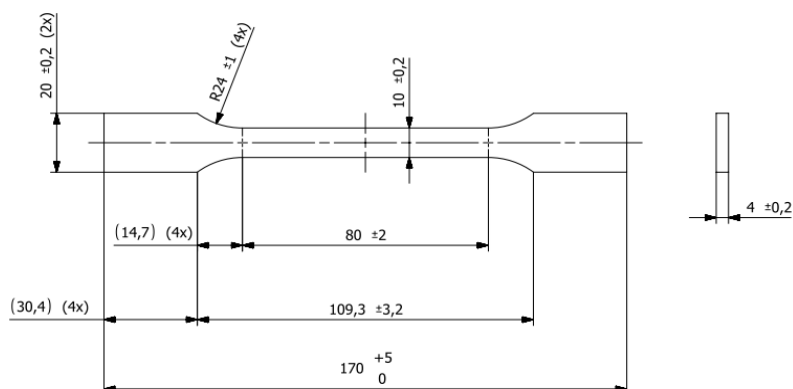
Obr. 7 Molekulární struktura PA12 (Omnexus, 2021)

1.3.2 Aditiva pro PA12

Přidáním aditiv, jako je například uhlíkové vlákno, do PA12 se výrazně zvýší pevnost v tahu a tuhost (Fiberlogy, 2021). PA12 s příměsí uhlíkového vlákna je potenciální konkurencí pro výrobu některých součástí z hliníku, která je ještě podtržena téměř 3x nižší hmotností. Hustota je u PA12+CF15 $1,01\text{g/cm}^3$ a u slitin hliníku průměrně $2,7\text{g/cm}^3$. Dalším faktem je i možnost tvorby tvarově mnohem náročnějších součástí, jak už bylo zmíněno v kapitole 1.1 a 1.2. V případě použití skelného vlákna jako aditiva se také zvýší pevnost, ale na úkor váhy. Příměs skelného vlákna nijak výrazně neovlivní cenu materiálu. Dalšími používanými aditivami mohou být různá plniva, jako například minerální plniva, která dobře fungují jako retardéry hoření a také sníží konečnou cenu materiálu. Minerální plniva mohou změnit vlastnosti materiálu jako je hustota, viskozita, rázová houževnatost, schopnost hoření, mechanické napětí, rozměrovou stabilitu, tepelnou a chemickou odolnost a také cenu. Plniva mohou být i organická, například dřevěná moučka nebo popílek z rýžových slupek, které se využívají pro snížení ceny a hustoty, ale jsou velmi citlivá na vlhkost. Jako aditiva se také přidávají různá barviva, pigmenty, absorbéry ultrafialového záření, retardéry hoření, stabilizátory, změkčovadla a nadouvadla (Zálešák, 2016).

1.3.3 Mechanické vlastnosti a jejich testování

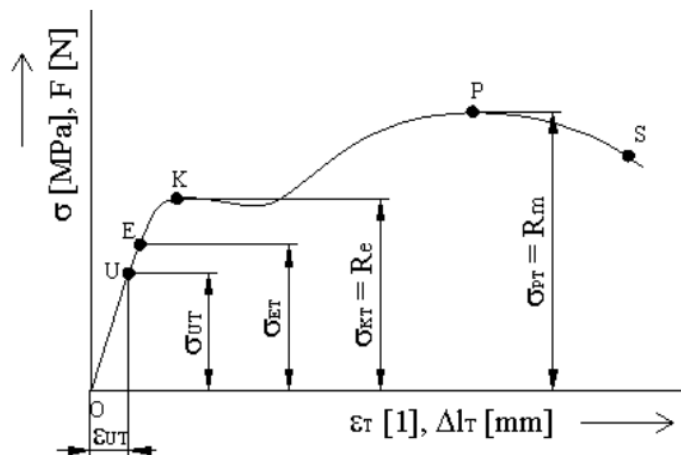
Mechanické vlastnosti materiálů je možné zjišťovat rozličným množstvím metod, ale prakticky se dají rozdělit do tří kategorií. Jsou to zkoušky statické, dynamické a zkoušky tvrdosti. Pro účel zjištění pevnosti materiálu jsou vhodné zejména statické zkoušky, kdy je na vzorek vyvíjeno zatížení, které se pozvolně zvyšuje, dokud nedojde k zničení testovaného vzorku. Typicky se využívá zkouška tahem, tlakem, stříhem nebo ohybem. Je možné také testovat namáhání na krut nebo dokonce namáhání kombinovat. Pro opakovatelnost výsledků testů se využívají zkušební tyče dle normy ČSN EN ISO 527, která se zabývá testováním pouze polymerních materiálů (Chalupová, 2020). Zkušební tyče mohou být kruhové, nebo ploché jako je na Obr. 8.



Obr. 8 Výkres s rozměry zkušební tyče

Nejčastěji využívanou metodou je tahová zkouška, která umožňuje výpočet mnoha důležitých veličin jako je pevnost v tahu, tažnost nebo kontrakce. Obecný tahový diagram je znázorněn na Obr. 9. Tato zkouška probíhá tak, že se testovaná zkušební tyč upne z obou stran do čelistí a postupně se zvyšuje zatížení až dojde k plastické (nevratné) deformaci. Tento proces je většinou kontinuálně zaznamenáván. Pro zjednodušení následujících výpočtů se velikost působící síly F převádí na mechanické smluvní napětí σ , pro které platí vztah síly ku průřezu S_0 (LIČKOVÁ, 2016).

$$\sigma = F/S_0$$



Obr. 9 Obecný diagram tahové zkoušky (LIČKOVÁ, 2016)

U...mez úměrnosti

E...mez pružnosti

K...mez kluzu

P...mez pevnosti

S...přetržení materiálu

1.3.4 Nasákavost polyamidů

Nasákavost je obecně schopnost přijímat vlhkost přímo z vody, ve které je těleso ponořeno. Oproti navlhavosti, která je pouze relativní vůči vlhkosti vzduchu (prostředí), materiál pojme maximální množství, které se měří v procentech hmotnosti. Navlhavost nemůže být směrodatná hodnota, ale nasákavost je konstantní a tedy měřitelná. Doba, po kterou bude materiál absorbovat vodu, závisí zejména na poměru povrchu ku objemu a na chemickém složení a teplotě. U polyamidů chemická struktura vede k výrazné nasákavosti. Přesněji nasákavost je zapříčiněna přítomností vazby $-\text{CO}-\text{NH}-$. Vazby $-\text{CH}_2-$ nasákavost snižují (Bělášková, 2017). Další věci ovlivňující nasákavost je typ a množství přidávaných plniv. Organická aditiva, jako je celulóza, bavlna nebo jiná přírodní vlákna, nasákavost zvyšují, ale příměsi, jako je skelné vlákno, uhlíkové vlákno nebo křemenný prášek, budou nasákavost snižovat. Právě zmíněná vlhkost, ať už

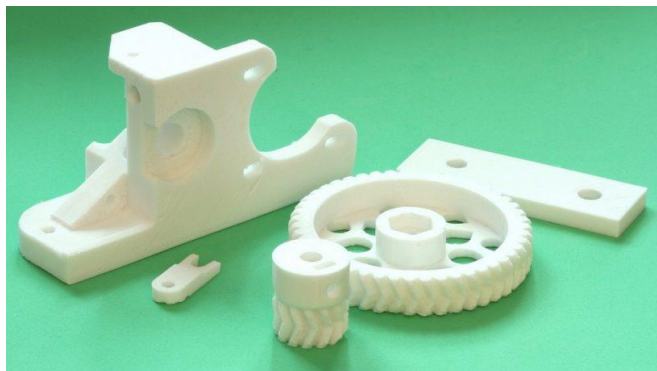
z nasákavosti nebo navlhavosti, může způsobit pokles meze pevnosti, zhoršení elektroizolačních schopností, snížení tepelné odolnosti nebo změna dilatace rozměrů. Vlhkost může mít ale také pozitivní účinky na houževnatost a tažnost (Omnexus, 2021).

Proto, aby se, ať už pozitivní nebo negativní, vlastnosti během tisku neprojeví, vysouší se materiál obecně pod 0.3hm.%, ale z praktické zkušenosti a absenci přístroje na měření vlhkosti materiálu na pracovišti stačí filament skladovat v suchém prostředí, ideálně v hermeticky uzavíratelném boxu s pohlcovačem vlhkosti. Pro případné vysoušení materiálu je postačující horkovzdušná trouba s teplotou mezi 75°C a 90°C, kde se materiál nechá vysoušet alespoň 3h v závislosti na velikosti cívky (Prusa Research, 2021).

1.4 3D tisk polyamidů

Tisk z polyamidů z PA12 nebo PA12+CF15 má potenciál pro snadnou a relativně rychlou výrobu prototypů, kdy je nutné zaručit vyšší odolnost na namáhání, otěruvzdornost nebo chemickou stálost. V praxi je tedy možné využít PA12 pro kluzná ložiska, ozubená soukolí, elektrotechnické součástky, nábytek, kolečka, válečkové dopravníky či aplikaci v námořním, nebo leteckém odvětví (AMFG, 2018).

Vzhledem ke své univerzálnosti se uplatnění PA12 najde v široké škále zaměření a díky možnosti tisku za pomoci technologie FFF je možné vytvářet součásti, či dokonce celé sestavy, na domácích 3D tiskárnách kde nachází využití při reverzním inženýrství. Díky možnosti vytištění poškozených nebo kompletně zničených součástí je možné mnoho přístrojů pouze opravit a není třeba uvažovat nad koupí nového zařízení, což se dá brát nejen za ekonomické, ale i za ekologické. Z hlediska výroby PA12 se může také jednat o ekologické řešení, jelikož jeho výroba je možná z ricinového oleje (GREEN Chemicals, 2013) (AMFG, 2018). Další zásadní výhodou, která činí PA12 vysoce versatilním materiálem, je již zmíněná snadná obrobiteľnosť. PA12 také disponuje vysokou schopností izolovat, ať už elektrickou nebo mechanickou energii. Tyto vlastnosti se hodí při konstrukci různých tlumičů, krytů nebo dílů, u kterých dochází ke tření a vibracím. (viz. Obr. 10 a Obr. 11)



Obr. 10 výrobky z PA12 vytištěné technologií FFF (AMFG, 2018)



Obr. 11 Pedál pro jízdní kola z PA12 (Bikester, 2021)

2 Experimentální část

2.1 Testované materiály

Testované materiály byly dodány společností Solidify S.R.O., která vybrala filamenty od výrobců Devil Design a Fiberlogy. Tyto značky byly vybrány z produktů, které Solidify S.R.O. prodává a filamenty těchto vybraných značek jsou oblíbené mezi uživateli 3D tiskáren. První testovaný materiál PA12, který byl zpracován firmou Devil Design, udává v technickém listu vlastnosti produktu jako je průměr struny, tolerance, vzhled, smršťivost, váhu a rozměry balení. Dále zde jsou doporučené teploty, viskozita a množství vody v materiálu, ale neudává pevnost v tahu, která je pro tvorbu funkčních dílů podstatná. Doporučené teploty odpovídaly analyzovaným

hodnotám v laboratoři a vlhkost materiálu tvořila pouze 0.051% dle normy ČSN EN ISO15512 (640113) (Chalupová, 2020).

U materiálu PA12+CF15 značky Fiberlogy jsou v technickém listu také k nalezení parametry, jako je průměr struny, tolerance, váha materiálu a teploty, které jsou opět srovnatelné s naměřenými hodnotami, ale není zde popis balení jako je váha nebo rozměry. V případě vlastností materiálu zde bylo více informací jako například modul pružnosti, pevnosti v tahu, tvrdost podle Charpyho. Deklarované parametry jsou zaznamenány v Tabulka 1 a Tabulka 2.

Tabulka 1 Deklarované parametry od výrobce pro materiál PA12

Průměr struny 1.75mm	Balení Potištěná krabice
Tolerance struny $\pm 0.05\text{mm}$	Rozměry balení ~205x205x80mm
Kulatost struny $\pm 0.02\text{mm}$	Vakuově baleno Ano
Povrch materiálu Saténový	Pohlcovač vlhkosti Ano
Smrštivost materiálu Velká	Teplota hotendu 240-270°C
Váha produktu 0.8kg struna /1.16kgcelkově	Teplota podložky 95-120°C
Materiál – cívka Transparentní polykarbonát	Chlazení Volitelné
Průměr cívky 200mm	Viskozita DIN EN ISO 307 – 189ml/g
Šířka cívky ~70mm	Obsah vody ISO 15512 – 0.051%
Průměr otvoru cívky 52mm	Barva Přírodní

Tabulka 2 Deklarované parametry od výrobce pro materiál PA12+CF15

Průměr struny 1.75mm		Váha materiálu 0.50kg	
Tolerance struny ±0.02mm		Teplota tisku 255-270°C	
Kulatost struny ±0.02mm		Teplota podložky 80-100°C	
Mechanické vlastnosti	Metoda testu	Jednotky	Typická hodnota
Modul pružnosti	ISO 527	MPa	8000
Pevnost v tahu	ISO 527	MPa	125
Charpyho rázová pevnost	ISO 179/1eU (23°C)	kJ/M2	75±15
Hustota	ISO 483	g/cc	1.07
Tepelné vlastnosti	---	---	---
Teplota tání	ISO 3146	°C	178
Teplota průhybu při zatížení	ISO 75-1/2	°C	170
Hořlavost	UL94	Třída	HB

2.2 Použité přístroje

3D tiskárna – Creality Ender 3 pro (hotend Micro-swiss CR-10)

Stavebnicová FFF tiskárna ekonomické třídy s tiskovým prostorem 220x220x250mm s tiskovou teplotou do 255°C od společnosti Creality (vylepšena celokovovým hotendem Micro-swiss CR10, tiskovou plochou 225x225x250mm a tiskovou teplotou do 260°C). (Obr. 12)

Země původu – Čína

(Creality, 2021)

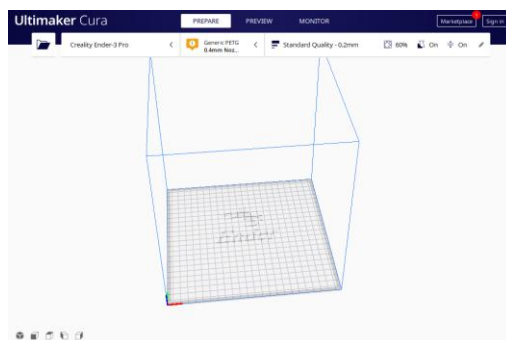


Obr. 12 Upravená 3D tiskárna Ender3pro v tepelné komoře

SW – Ultimaker CURA

Opensource software pro přípravu programu pro 3D tiskárnu od společnosti Ultimaker. (Obr. 13)

Země původu – Holandsko



Obr. 13 Uživatelské prostředí programu Ultimaker Cura

Váhy – Analytická váha Sartorius

Váha s optoelektronickými senzory pro střežení vodorovného stavu do 220g s rozlišením 0.1mg. od společnosti Sartalex.

Země původu – Česká republika

(Sartalex, 2021)

Termická analýza – Termogravimetrický analyzátor STA 504

Přístroj pro simultánní měření úbytku hmotnosti (TGA) a tepelné výměny od -160°C do 1650°C od společnosti TA Instruments.

Země původu – USA

(TA Instruments, 2012)

Sušárna – DRYSC43

Laboratorní sušárna s vlastním ventilátorem s teplotním rozsahem od +5°C nad okolní teplotou do 300°C s odchylkou $\pm 1^\circ\text{C}$ od společnosti COLO Lab Experts.

Země původu – Slovinsko

(COLO Lab Experts, 2021)

Analyzátor vlhkosti – OHAUS, MB 23

Analyzátor s infračerveným ohřevem do 160°C, který měří váhu a vlhkost ve vzorcích od 0.5g do 20g s přesností 10g/1% od společnosti METROSERVIS.

Země původu – Česká republika

(METROSERVIS, 2021)

Trhací zařízení – Instron 3345

Stolní trhací zařízení se silou až 5kN od společnosti INSTRON použité dle normy ČSN EN ISO 527-2 (Chalupová, 2020).

Země původu - USA

(INSTRON, 2021)

Posuvné měřítko – Mitutoyo ABS AOS 0-150 digitální

Posuvné měřítko s ochranou IP67 od společnosti Mitutoyo. (Obr. 14)

Země původu – Japonsko

(Mitutoyo, 2021)



Obr. 14 Posuvné měřítko Mitutoyo

Vlhkoměr/teploměr – Digitální LCD Teploměr a Vlhkoměr Vnitřní do Panelu

Země původu – Česká republika

(Dratek.cz, 2021)

2.3 3D tisk z PA12 a PA12+CF15

Ideální teplota tisku je $245^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ a teplota podložky 90°C jak pro PA12, tak i PA12+CF15. Pro první zkušební výtisk bylo použito PA12. Rychlost tisku probíhala pod 45mm/s. Tisk byl obohacen límcem (tzv. brim) a bylo nutné vybavit tiskárnu tepelnou komorou. Aktivní dochlazování extrudovaného materiálu bylo vypnuto. Parametry, které vedly k optimálnímu tisku jsou v Tabulka 3. Při tisku z PA12+CF15 bylo použito stejné nastavení i modifikace chronologicky jako u PA12, viz. Tabulka 4.

Tabulka 3 Parametry tisku pro PA12

Tiskárna	Ender3 pro / Ender3 pro – modifikováno
Podložka	Sklo + adheziva
Tryska	průměr 0.4mm
Výška vrstvy	0.2mm
Rychlost tisku	Stěny – 25mm/s, Vodorovné stěny – 25mm/s , Výplň – 35mm/s
Výplň	100%, vzor „trihexagon“
Slicer	Cura
Materiál	PA12

Tabulka 4 Parametry tisku pro PA12+CF15

Tiskárna	Ender3 pro / Ender3 pro – modifikováno
Podložka	Sklo + adheziva
Tryska	průměr 0.4mm
Výška vrstvy	0.2mm
Rychlost tisku	Stěny – 25mm/s , Vodorovné stěny – 25mm/s , Výplň – 25mm/s
Výplň	100%, vzor „trihexagon“
Slicer	Cura
Materiál	PA12+CF15

3 Výsledky a diskuse

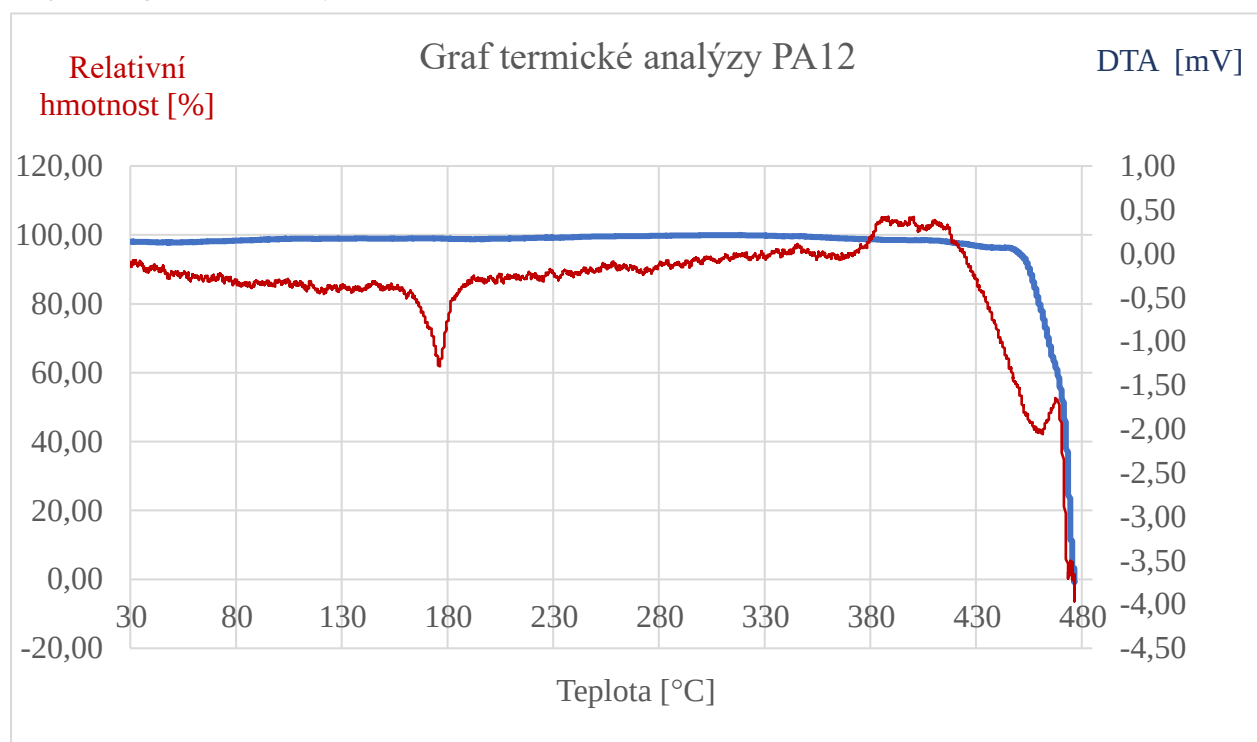
3.1 Analýza filamentů

3.1.1 Termická analýza

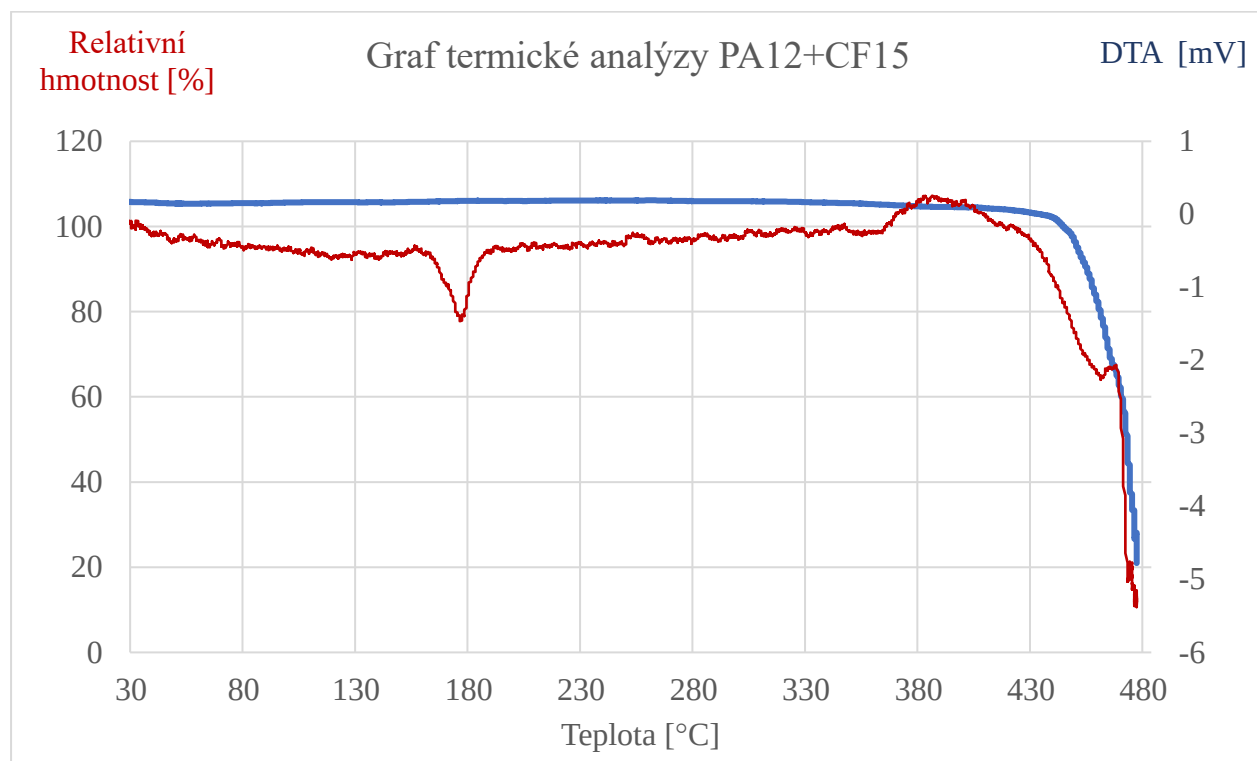
Pro termickou analýzu byla použita metoda termogravimetrie (TG), která patří mezi dynamické analytické metody a její princip spočívá v měření změn hmotnosti analyzovaného vzorku v závislosti na plynulé změně teploty $m = f(T)$. Tyto změny se dají vyjádřit rovnicí $m_{AB}(s) = m_A(s) - m_B(g)$, kde $m_{AB}(s)$ je analyzovaný materiál v pevném skupensví, $m_A(s)$ je zbylý materiál v pevném skupensví a $m_B(g)$ je uvolněná plynná složka materiálu.

Tato závislost je graficky znázorněna termogravimetrickými křivkami (viz. Graf 1 a Graf 2).

Graf 1 Termogravimetrická analýza materiálu PA12



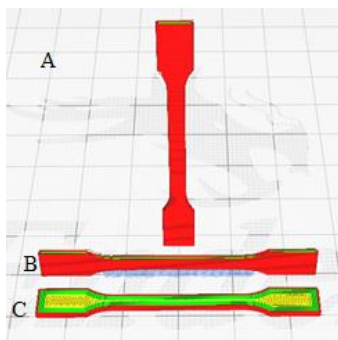
Graf 2 Termogravimetrická analýza materiálu PA12+CF15



Z grafu termické analýzy u obou materiálů je možné sledovat, že relativní hmotnost z Graf 1 a Graf 2 prudce kolísá při teplotě na hranici 180°C, což je teplota tání PA12. Od 400°C, obě křivky začínají prudce klesat kvůli tepelné degradaci (samovznícení), až do teploty přes 480°C, kdy se PA12 kompletně vypaří (shoří). U PA12+ CF15 kdy se již odpařil veškerý PA12 zbývá 20% hmotnosti, což by mělo být pouze uhlíkové vlákno, které podle výrobce má tvořit obsah jen 15%.

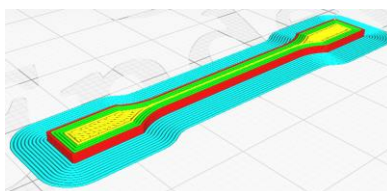
3.2 3D tisk zkušebních tyčí

Základní parametry, jako je teplota tisku nebo podložky, byly stanoveny pomocí termické analýzy. Bylo zjištěno, že ideální teplota tisku je 245 °C $\pm 5^{\circ}\text{C}$ a teplota podložky 90°C jak pro PA12, tak i PA12+CF15. Je nutno podotknout, že tiskárna, na které byly výtisky zhotoveny, sice dokáže vyvinout teploty až do 255°C, ale kvůli konstrukci hotendu, ve kterém je bowden v podobě teflonové hadičky zasazen skrz tepelný blok až k trysce, je tiskárna omezena na teplotu 245 °C. Nad touto teplotou začne docházet k degradaci teflonu a ten začne ztrácet své kluzné vlastnosti. Pro první zkušební výtisk bylo použito PA12, kdy byly tři varianty, jak výtisky na podložku orientovat. První možná varianta byla tisknout zkušební tyč postavenou ve směru osy Z (Obr. 15 A). Tato varianta nabízela tisk bez podpor ale s minimální stabilitou. Dalším faktorem je působení síly při tahové zkoušce, která by byla kolmá na tištěné vrstvy. V tomto směru jsou výtisky obecně nejslabší. To by vedlo k nestabilním výsledkům, protože jako další proměnná by zde byla soudržnost vrstev. Druhá varianta byla orientovat výtisk ve směru os XY postavenou na bok. (Obr. 15 B) V tomto případě by tahová zkouška byla ve směru vláken výtisku, ale bylo by nutné využít podpůrného materiálu. Problémem by bylo také vnitřní pnutí. Plocha, kterou se zkušební tyč dotýká podložky je velmi malá, a tak pnutí snadněji odtrhne výtisk od podložky a pokrouť. Optimální tisk byl v osách XY, kdy byl výtisk orientován největší styčnou plochou k podložce (Obr. 15 B). Nebylo nutné využívat podpůrného materiálu, vrstvy byly v ose tahové zkoušky a výtisky měli největší možnou plochu ve styku s podložkou.



Obr. 15 Možnosti orientace tisku

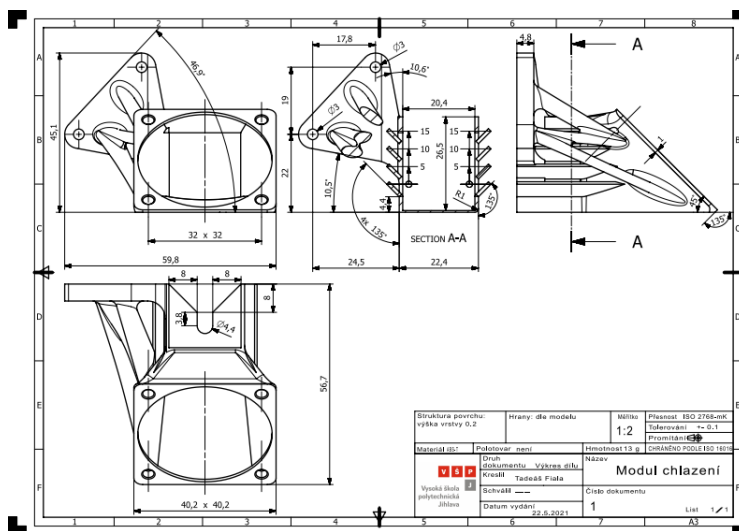
Tisk tedy probíhal v oblasti naměřených teplot pro PA12 a rychlostmi pod 45 mm/s bez jakýchkoliv adhezivních prostředků přímo na vyhřívanou skleněnou podložku. Výsledkem tohoto testu bylo extrémní zkroucení výtisku v podélné ose od podložky, která vedla ke sražení výtisku z podložky tryskou hotendu. V momentě sražení z podložky byl výtisk z 60% hotov (2.4mm z celkového rozměru). Následný výtisk byl podpořen tuhým lepidlem na papír značky Kores, které sice nezabránilo zkroucení, ale udrželo výtisk na podložce. Další zkušební tisk byl obohacen límcem (tzv. brim), který přidá perimetry okolo výtisku pouze v první vrstvě, což vedlo k výraznému zvětšení plochy mezi výtiskem a podložkou, jako je vyobrazeno na Obr. 16.



Obr. 16 Orientace modelu pro FFF 3D tisk

Tato modifikace vedla k výraznému zlepšení kvality tisku, ale stále se dostavovaly chyby vedoucí k opětovnému kroucení. Proto jsem vyzkoušel další adhezivum ve formě spreje od značky 3DLAC. Adhezivum ve formě spreje bylo podstatně účinnější (viz. Obr. 20). Výtisky se při chladnější dnech stále kroutili mnohem více oproti dnům, kdy venkovní teploty přesahovali 25°C. Tento zásadní parametr byl jasně důvodem ke kroucení výtisků. Bylo tedy nutné vybavit tiskárnu komorou, kde bude možné teplotu regulovat. Komora byla zhotovena z OSB desek o tloušťce 16mm, které byly vhodné pro své izolační vlastnosti a jednoduchost konstrukce. Zhotovená tepelná komora umožnila udržovat teplotu v prostředí tiskového prostoru až do 50 °C a vlhkostí mezi 16–22 %, která byla měřena

pomocí vlhkoměru/teploměru zabudovaného do konstrukce tiskárny. Teplota a vlhkost tedy byla pro tisk dobrá. U dalších výtisků bylo prohnutí podstatně menší, ale pro tisk modelů jiných, než jsou testovací tyče, by bylo stále nevyhovující. Proto bylo otestováno další adhezivum ve formě tekutého lepidla na bázi polyvinylacetátu (PVA) od značky Herkules. Tímto lepidlem byl vytvořen film, ke kterému výtisk dobře přilnul. V některých případech se ale výtisky stále kvůli pnutí od podložky odtrhávali. Důvod zbylého prohýbání bylo proudění vzduchu v okolí trysky. Aktivní dochlazování extrudovaného materiálu bylo vypnuté, přesto stále docházelo k proudění vzduchu, který nerovnoměrně ochlazoval výtisk. Toto nerovnoměrné chladnutí je viditelné na Obr. 19, kde části výtisku zabarvené doběla již zchladly pod teplotu skelného přechodu, a tudíž měly tendenci se smršťovat více než zbylá část, a docházelo k nerovnoměrnému pnutí. Vzdušné proudění bylo způsobené turbulencemi, které vytvářel samotný ventilátor heatsinku nasávající vzduch, a proto bylo nutné zkonstruovat alternativu chladiče hotendu. (Výkres Obr. 17 a hotový díl Obr. 18)



Obr. 17 Výkres dílu chladiče



Obr. 18 Zhotovený díl chladiče

Bylo nutné usměrnit sání i výfuk hotendu směrem vzhůru od podložky tak, aby vzduch pod tryskou byl „statický“ a nedocházelo k průvanu, který způsoboval zmíněné kroucení. Konstrukce nového chlazení trvala několik dní, během nichž byl filament vystaven vyšší vlhkosti, jelikož zůstal v tiskárně. To vedlo k jeho výraznému navlhnutí, které v mnoha směrech znemožnilo tisk. Vždy, když filament navlhnul, měl častěji tendence lepit se na trysku, průtok materiálů byl nestálý, zejména kvůli vypařující se vlhkosti v materiálu a velmi často docházelo k ucpání trysky. V neposlední řadě navlhnutí filamentu také přispívalo ke kroucení výtisků. Díky této chybě ve skladování, bylo možné otestovat vysoušení filamentu, kdy po několika pokusech vyšlo najevo, že optimální teplota pro sušení je 95 °C po dobu 6 hodin. Mnohých případech, kdy filament nebyl vlhku vystaven déle než 2 dny, tak pro vysušení stačil čas dvou hodin při stejné teplotě. Při tisku z PA12+CF15 bylo použito stejné nastavení i modifikace chronologicky jako u PA12, ale s výraznými změnami v chování výtisků během procesu 3D tisku. Výtisky z PA12+CF15 se nijak výrazně nekroutily a při teplých dnech nad 25 °C se výtisky nekroutily vůbec (viz Obr. 21), což je způsobeno uhlíkovým vláknem, které redukovalo vliv teplené roztažnosti PA12. Proto bylo postačující využívat adhezivum ve formě spreje, které se snadněji nanášelo (E-Konstrukter, 2013) (Fiberlogy, 2021). Bohužel ve dnech, kdy teploty klesaly pod 25 °C, zkroucení výtisků bylo stále problémem, ale bylo opět možné toto řešit adhezivy a límcem okolo výtisků.



Obr. 19 Nerovnoměrné chladnutí materiálu



Obr. 20 Vytištěné vzorky PA12



Obr. 21 Vytištěné vzorky PA12+CF15

3.3 Adheziva

Za zmínku také stojí použitá adheziva. První, již zmíněné tuhé lepidlo na papír značky Kores na bázi glycerinu, které bylo nutné aplikovat před každým novým tiskem. Jelikož docházelo k jeho zatuhnutí, případně částečné odtržení vzniklé vrstvy, vedlo k nerovnostem na podložce a bylo tedy po dokončeném tisku nutné lepidlo odstranit. Odstranění lepidla bylo mnohdy velmi obtížné, ať už mechanickým odstraněním špachtlí nebo rozpuštěním lepidla v teplé vodě.

Další variantou bylo adhezivum ve formě spreje značky 3DLAC přímo určené pro tiskové podložky. Velká výhoda této varianty byla v tom, že nebylo nutné adhezivum z podložky odstraňovat po každém tisku, protože sprej byl nanášen rovnoměrně ve výrazně tenčí vrstvě.

Velkou nevýhodu však byla potřeba udržovat podložku bez mastnot, jinak sprej neměl žádný účinek. Proto bylo vhodné tento sprej využívat s alkoholem na případné odmaštění podložky.

Poslední a zároveň nejlepší adhezivum bylo lepidlo na bázi polyvinylacetátu. Mělo náročnou aplikaci z důvodu precizního rozetření stěrkou na předeřátou podložku tak, aby byl vytvořen rovnoměrný film. Po vytvoření filmu byla komplikovaná aplikace vykompenzována možností znovuvyužití již natřené podložky až do momentu, než byla tato vrstva mechanicky poškozena.

3.4 Mechanické testování vytištěných vzorků pomocí tahové zkoušky

Každý vzorek musí být vytištěn několikrát se stejným nastavením a ideálně za stejných podmínek. Z vytisklých zkušebních tyčí se náhodně vyberou dva sety po minimálně pěti kusech, které se ponoří na 24 hodin do vody. Jeden z těchto dvou máčených setů se před pevnostní zkouškou vysuší a všechny tyto zkušební tyče jak suché, tak i mokré, se následně podrobí tahové zkoušce a výsledky se porovnají ještě s referenční sadou, která nebyla máčena ani sušena. To, že některé zkušební tyče budou vystaveny přímému kontaktu s vodou, ukáže změny ve vlastnostech vzhledem k prostředí.

Máčené vzorky PA12 vykazovaly zhoršení mechanických vlastností oproti referenční sadě, ale vysušená sada naopak dosahovala pevnosti v tahu v průměru o 10MPa vyšší než u referenční sady, ale výsledky byly značně nestálé. Podezřelé bylo, že některé vzorky z této sady vykazovaly zlepšení vlastností a zbylé vzorky připomínaly svými hodnotami výsledky z pouze máčené sady. Je tedy možné, že výtisky nebyly správně vysušeny. Bylo tedy nutné vytisknout ještě jednu sadu vzorků z PA12, kde byl proces máčení a sušení zopakován. Druhý set vykazoval při tahové zkoušce mnohem konzistentnější výsledky. Druhá sada opět vykazovala zvýšení pevnosti v tahu o více jak 10MPa, ale s mnohem menší odchylkou. Tato skutečnost odhaluje důležitost regulování vlhkosti ve výtiscích z PA12, která vede k 50% zvýšení pevnosti v tahu oproti referenčnímu setu, který nebyl máčen ani sušen (Jančář, 2007). Z výsledku v Tabulka 5 má materiál PA12+CF15 oproti PA12 větší odchylku v naměřených hodnotách, ale disponuje vyšší pevností a nižší protažením. To je zajištěno přidaným uhlíkovým vláknem, které díky svým vlastnostem zajišťuje vyšší pevnost materiálu. (Fiberlogy, 2021). Ovšem výrobcem deklarovaných 125Mpa PA12+CF15 rozhodně nedosahuje, jelikož deklarovaná hodnota je měřena na nezpracované struně. Viz. Tabulka 5.

Tabulka 5 Průměrné hodnoty testovaných setů

Sada vzorků		Maximální Zatížení	Tahové napětí při Maximální Zatížení	Youngův modul pružnosti	Směrodatná odchylka Youngova modulu pružnosti	Tahová deformace	Tahové napětí při Mez kluzu
		(N)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(%)	(MPa)
PA12 – referenční/nemáče no	Prum.	710,71	19,42	806,89	0,02	7,70	20,26
	Sm.	26,13	0,86	150,51	0,01	2,14	0,43
	Odch.						
PA12 – máčeno/nesušeno	Prum.	665,53	18,32	711,68	0,02	8,07	19,39
	Sm.	29,11	0,97	131,80	0,01	1,40	0,54
	Odch.						
PA12 – máčeno/sušeno sada 1	Prum.	1093,29	28,83	832,11	0,02	11,22	30,73
	Sm.	155,27	2,40	39,14	0,00	0,93	0,25
	Odch.						
PA12 – máčeno/sušeno sada 2	Prum.	1297,53	29,13	865,77	0,03	9,38	29,87
	Sm.	15,91	0,85	17,67	0,00	0,96	0,33
	Odch.						
PA12+CF15 – referenční/nemáče no	Prum.	1243,13	30,04	1824,57	0,04	3,72	30,15
	Sm.	88,87	1,86	100,49	0,00	0,18	1,16
	Odch.						
PA12+CF15 – máčeno/nesušeno	Prum.	1243,32	30,54	1698,59	0,04	4,29	31,77
	Sm.	97,96	2,63	28,10	0,01	0,33	0,18
	Odch.						
PA12+CF15 – máčeno/sušeno	Prum.	1322,95	31,95	1534,94	0,04	4,41	29,68
	Sm.	71,41	2,13	22,15	0,00	0,30	0,63
	Odch.						

4 Závěr

Polyamidy zpracované za pomoci 3D tisku podle výsledků z mechanického testování nedosahují stejné pevnosti v tahu jako při zpracování konvenčními metodami. Odlitky z PA12 dosahují až 50 MPa (záleží na výrobcí) (Ensinger Plastics, 2021), (AKplast, 2021). Přesto dosahují přívětivých hodnot vzhledem k poměru hustoty materiálu a pevnosti. Tištěný PA12 dosahuje pevnosti do 20MPa a při využití povýrobního ošetření máčením a následným vysoušením, je možné pevnost výrazně zvýšit. Vzhledem k výsledkům je vhodné udržovat PA12 suchý, ale atmosférická vlhkost, kterou následně pojme, je možné brát za výhodnou. PA12 je tedy vhodný jak pro výrobu funkčních prototypů, tak pro výrobu náhradních dílů, které musí odolávat relativně vysokému zatížení. Například ozubená kola, u kterých je velkou výhodou otěruvzdornost, kterou PA12 disponuje. Materiály na bázi polyamidů se jeví jako velice versatilní materiály, jelikož jsou chemicky stálé a vzhledem k použité geometrii výrobku PA12 dokážou být jak vysoce elastické, tak i pevné a houževnaté. Tyto výhody jsou prozatím zastíněny vyšší cenou oproti ostatním běžně používaným materiálům jako je ABS nebo PLA a problematickou výrobou pomocí technologie FFF. Náročnost z hlediska výroby je způsobena zejména kvůli tepelné roztažnosti, respektive smrštivosti, která způsobovala v mnohých případech pokroucení výrobku. To ve většině případů znamenalo neúspěšný tisk, ať už kvůli tomu, že se díl odtrhl od podložky, nebo kvůli deformaci, která výrobek znehodnotila. Na podobný problém jsem byl již na začátku práce upozorněn bezprostředně poté, kdy došlo na téma, jaký typ tiskárny bude použit. Ihned po prvních pokusech bylo jasné, že při využití stolní tiskárny nižší cenové kategorie je tisk z PA12 velmi problematický. Toto nepříliš překvapivé zjištění se stalo podnětem pro testování samotného procesu tisku. Při mnoha nezdárných pokusech jsem pozoroval chování materiálu, které jsem se snažil systematicky eliminovat. Největší problém u PA12 je jeho citlivost na teplotu okolí během tisku, kdy minimální teplota tiskového prostoru byla 40°C, jinak pnutí ve výtisku způsobené smrštivostí způsobovalo masivní deformace výtisků. Tento problém jsem vyřešil výrobou tepelné komory, která držela stabilní teplotu v prostoru tiskárny. Další významný faktor související s teplotou je vzdušné proudění v tiskovém prostoru, které musí být minimální pro rovnoměrné chladnutí výtisku, což vede k rovnoměrnému pnutí ve výtisku způsobené tepelnou smrštivostí. Z hlediska turbulentního proudění byl problémem samotný ventilátor hotendu, na který bylo nutné zkonstruovat sací hlavici. Do sací hlavy proudil vzduch z větší vzdálenosti od trysky, a tím se redukovalo proudění vzduchu nad tiskovou podložkou. Stejným principem byl

řešen odvod teplého vzduchu od hotendu. Po realizaci úprav bylo možné testovací vzorky tisknout bez vážných problémů. Tisk materiálů na bázi polyamidů je na běžné stolní tiskárně náročný, ale nikoliv nemožný. Je pouze nutné stabilizovat prostředí ve kterém dochází k tisku.

5 Bibliografie

3D FACTORY, 2017. HISTORIE 3D TISKU. In: *[3dfactory]* [online]. Miroslav Kováčik Dr.Šavrdy 3014/14 70030 Ostrava: Miroslav Kováčik [cit. 2020-10-26]. Dostupné z: <https://3dfactory.cz/2017/10/27/historie/>

AKPLAST, 2021. *Materiálový list PA 12 TR* [online]. Ledec nad Sázavou: AKplast [cit. 2021-07-28]. Dostupné z: http://www.akplast.cz/admin/files/ck/files/TechData/PA12TR_mat_list.pdf

ALL3DP, 2021. Fused Filament Fabrication – Simply Explained. In: *All3DP* [online]. Mnichov: All3DP [cit. 2021-04-16]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/fused-filament-fabrication-fff-3d-printing-simply-explained/>

AMFG, 2018. Nylon 3D Printing: All you Need to Know. In: *AMFG* [online]. London: AMFG [cit. 2021-04-25]. Dostupné z: <https://amfg.ai/2018/06/15/nylon-3d-printing-all-you-need-to-know/>

BĚLÁŠKOVÁ, Marie, 2017. *Morfologie polyamidu 12 a polyamidu 11 vzniklá za zvýšeného tlaku v kalorimetru* [online]. Brno [cit. 2021-07-27]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=145685. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA CHEMICKÁ. Vedoucí práce Radka Bálková.

BITFAB, 2020. Guide to Choosing My 3D Printer Extruder. In: *[bitfab]* [online]. Madrid: Bitfab [cit. 2020-11-02]. Dostupné z: <https://bitfab.io/blog/3d-printer-extruder/>

COLO LAB EXPERTS, 2021. DRYSC43 Laboratory Drying Oven Economic 43L. In: *COLO Lab Experts* [online]. Slovenia: COLO Lab Experts [cit. 2021-07-26]. Dostupné z: https://img.unimed.cz/files/Prospekty/COLO%20lab%20experts/DRYSC43_Laboratory_Drying_Oven_Economic_43L.pdf

CREALITY, 2021. Creality3D Ender-3 pro High Precision 3D Printer. In: *Creality* [online]. Hong Kong: Creality [cit. 2021-07-26]. Dostupné z: <https://creality3d.shop/products/creality3d-ender-3-pro-high-precision-3d-printer?variant=40194847015062>

CRUMP, S., 1989. *Apparatus and method for creating three-dimensional objects*. Spojené Státy. US5121329A. Uděleno 30.10.1989. Zapsáno 30.10.1989. Dostupné také z: <https://patents.google.com/patent/US5121329A/en>

DRATEK.CZ, 2021. *Digitální LCD Teploměr a Vlhkoměr Vnitřní do Panelu* [online]. Havlíčkův Brod: Dratek.cz [cit. 2021-07-28]. Dostupné z: <https://dratek.cz/arduino/1363-digitalni-lcd-teplomer-a-vlhkomer-vnitri-do-panelu.html>

E-KONSTRUKTÉR, 2013. Lineární teplotní roztažnost materiálů. In: *E-konstrukter* [online]. Brno: Nová média [cit. 2021-07-22]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/linearni-teplotni-roztaznost-materiálu>

ENSINGER PLASTICS, 2021. *TECAMID 12 natural PA 12* [online]. Nufringen: Ensinger [cit. 2021-07-28]. Dostupné z: <https://www.ensingerplastics.com/cs-cz/polotovary/plast/pa12-tecamid-12-natural>

FIBERLOGY, 2021. NYLON PA12+CF: CARBON EXCELLENCE. In: *Fiberlogy* [online]. Poland: Fiberlab [cit. 2021-07-22]. Dostupné z: https://fiberlogy.com/en/fiberlogy-filaments/pa12cf_en/

GREEN CHEMICALS, 2013. Evonik develops lauric acid-based PA12. In: *Green Chemicals Blog* [online]. New York: De Guzman [cit. 2021-04-25]. Dostupné z: <https://greenchemicalsblog.com/2013/07/30/evonik-develops-lauric-acid-based-polyamide-12/>

HEYMAN, 2020. Vlastnosti materiálu: Všeobecné vlastnosti materiálu polyamid (PA). In: *Heyman* [online]. Brno-střed: HEYMAN Manufacturing GmbH [cit. 2020-10-29]. Dostupné z: https://www.heyman.cz/media/useruploads/files/documentation_cz/Kazub/Vlastnosti%20polyamidu.pdf

CHALUPOVÁ, Marie, 2020. *Plasty - Stanovení obsahu vody*. 13. dopl. vyd. Zlín: Institut pro testování a certifikaci a. s.

CHALUPOVÁ, Marie, 2020. *Plasty – Stanovení tahových vlastností – Část 1: Obecné principy*. 4. dopl. vyd. Zlín: Institut pro testování a certifikaci a. s.

INSTRON, 2021. *LOW FORCE UNIVERSAL TESTING SYSTEMS* [online]. usa: INSTRON [cit. 2021-07-27]. Dostupné z: <https://www.instron.com/en/products/testing-systems/universal-testing-systems/low-force-universal-testing-systems>

JANČÁŘ a NEZBEDOVÁ, 2007. *ZKOUŠENÍ PLASTŮ*. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Skripta. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA CHEMICKÁ.

LIČKOVÁ, AGMAR, 2016. *VLASTNOSTI A ZKOUŠENÍ MATERIÁLU* [online]. Ostrava: Technická univerzita Ostrava [cit. 2021-07-27]. Dostupné z: https://homel.vsb.cz/~lic098/files/3.cviceni_VZM.pdf

LIČKOVÁ, DAGMAR LIČKOVÁ, 2016. Universální diagram tahové zkoušky. In: *Homel.vsb.cz* [online]. Brno: Technická univerzita Ostrava [cit. 2021-07-27]. Dostupné z: https://homel.vsb.cz/~lic098/files/3.cviceni_VZM.pdf

MATCA, 2020. Fused deposition modelling. In: *[Matca]* [online]. U Slovanky 1388/5 182 00 Praha – Libeň: Matca [cit. 2020-10-26]. Dostupné z: <https://matca.cz/technologie/3d-tisk/fused-deposition-modelling/>

METROSERVIS, 2021. MB23 ANALYZÁTOR VLHKOSTI OHAUS. In: *Ohausvahy* [online]. Hostouň: METROSERVIS [cit. 2021-07-26]. Dostupné z: <https://www.ohausvahy.cz/laboratorni-vahy/mb23-analyzator-vlhkosti-ohaus/>

MITUTOYO, 2021. *Digital ABS AOS posuvná měřítka 0-150mm* [online]. Teplice: Mitutoyo [cit. 2021-07-27]. Dostupné z: [https://shop.mitutoyo.cz/web/mitutoyo/cs_CZ/mitutoyo/01.03.05a/Digital%20ABS%20AOS%20posuvn%C3%A1%20m%C4%9B%C5%99%C3%ADtka/\\$catalogue/mitutoyoData/PR/500-181-30/index.xhtml](https://shop.mitutoyo.cz/web/mitutoyo/cs_CZ/mitutoyo/01.03.05a/Digital%20ABS%20AOS%20posuvn%C3%A1%20m%C4%9B%C5%99%C3%ADtka/$catalogue/mitutoyoData/PR/500-181-30/index.xhtml)

MMSPEKTRUM, 2014. Tvar taveniny vytlačené z trysky vstřikovacího stroje do volného prostoru u suchého a vlhkého polymeru. In: *Mmspektrum* [online]. Praha: MMSpektrum [cit. 2021-04-16]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/snizeni-rizika-vzniku-vad-pri-vstrikovani-plastovych-dilu>

OMNEXUS, 2021. Polyamide (PA) or Nylon: Complete Guide (PA6, PA66, PA11, PA12...). In: *Omnexus* [online]. Paris: Specialchem [cit. 2021-04-16]. Dostupné z: <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyamide-pa-nylon#PA12>

PRUSA RESEARCH, 2021. https://help.prusa3d.com/cs/article/nylon_167188/ [online]. Praha: PrusaResearch [cit. 2021-07-23]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/>

SARTALEX, 2021. Analytické váhy Sartorius Secura. In: *Sartalex* [online]. Ústí nad Labem: SARTALEX [cit. 2021-07-26]. Dostupné z: <https://sartorius.cz/produkt/analyticke-vahy-sartorius-secura/>

STRATASYS, 2020. What is 3D printing?. In: *[Stratasys]* [online]. Rechovot, Izrael: Stratasys Ltd. [cit. 2020-10-24]. Dostupné z: <https://www.stratasys.com/explore/article/what-is-3d-printing>

STRATASYS, 2021. The Benefits of CNC Machining FDM Parts. In: *[Stratasys]* [online]. Rechovot: Stratasys [cit. 2021-03-31]. Dostupné z: <https://www.stratasysdirect.com/technologies/cnc-machining/benefits-cnc-machining-fdm-parts>

STRATASYS, 2021. CNC machining. In: *[Stratasys]* [online]. Rechovot: Stratasys [cit. 2021-03-31]. Dostupné z: <https://www.stratasysdirect.com/technologies/cnc-machining/benefits-cnc-machining-fdm-parts>

SVĚT HARDWARE, 2019. 3D tisk: jak funguje FDM/FFF tiskárna?. In: *[Svět hardware]* [online]. Karel Polívka, Londýnské náměstí 881/6, 639 00 Brno: oXy Online s.r.o. [cit. 2020-10-26]. Dostupné z: <https://www.svethardware.cz/3d-tisk-jak-funguje-fdm-fff-tiskarna/48457>

TA INSTRUMENTS, 2012. STA 504 SIMULTANEOUS THERMAL ANALYZER. In: *TA Instruments* [online]. New Castle: TA Instruments [cit. 2021-07-26]. Dostupné z: <https://tainstruments.com.cn/wp-content/uploads/STA.pdf>

TRILAB, 2020. TRILAB DeltiQ L. In: *[TRILAB]* [online]. Hradec Králové: TRILAB [cit. 2020-12-27]. Dostupné z: <https://store.trilab.cz/wp-content/uploads/2019/04/deltiq-l-553x1024-1.jpg>

ZÁLEŠÁK, Martin, 2016. *Kvantifikace vlivu aditiv na mechanické vlastnosti plastů a kompozitů pro palné zbraně*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 95 s. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/38969>. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav inženýrství polymerů. Vedoucí práce Beníček, Lubomír.

Seznam obrázků

Obr. 1 Obrábění tištěného dílu z PA (Stratasys, 2021)	9
Obr. 2 Princip FFF tisku (Matca, 2020)	12
Obr. 3 Direct drive (A) vs bowden drive extruder (B) (Bitfab, 2020)	13
Obr. 4 kartézský souřadný systém v programu Ultimaker CURA	14
Obr. 5 Delta tiskárna TRILAB DeltiQ (TRILAB, 2020)	15
Obr. 6 Struktura taveniny vytlačené z trysky vstřikovacího stroje do volného prostoru u suchého a vlhkého polymeru (MMSpektrum, 2014)	16
Obr. 7 Molekulární struktura PA12 (Omnexus, 2021)	17
Obr. 8 Výkres s rozměry zkušební tyče	19
Obr. 9 Obecný diagram tahové zkoušky (LIČKOVÁ, 2016)	20
Obr. 10 výrobky z PA12 vytištěné technologií FFF (AMFG, 2018)	22
Obr. 11 Pedál pro jízdní kola z PA12 (Bikester, 2021)	22
Obr. 12 Upravená 3D tiskárna Ender3pro v tepelné komoře	26
Obr. 13 Uživatelské prostředí programu Ultimaker Cura	27
Obr. 14 Posuvné měřítko Mitutoyo	29
Obr. 15 Možnosti orientace tisku	35
Obr. 16 Orientace modelu pro FFF 3D tisk	35
Obr. 17 Výkres dílu chladiče	36
Obr. 18 Zhotovený díl chladiče	37
Obr. 19 Nerovnoměrné chladnutí materiálu	38
Obr. 20 Vytištěné vzorky PA12	38
Obr. 21 Vytištěné vzorky PA12+CF15	38

Seznam Tabulek

Tabulka 1 Deklarované parametry od výrobce pro materiál PA12.....	24
Tabulka 2 Deklarované parametry od výrobce pro materiál PA12+CF15.....	25
Tabulka 3 Parametry tisku pro PA12	30
Tabulka 4 Parametry tisku pro PA12+CF15	31
Tabulka 5 Průměrné hodnoty testovaných setů.....	41

Seznam grafů

Graf 1 Termogravimetrická analýza materiálu PA12	33
Graf 2 Termogravimetrická analýza materiálu PA12+CF15	33

Seznam příloh

Příloha A Výsledky tahové zkoušky