VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY
INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

KONSTRUKCE 3D TISKÁRNY PRO TISK MATERIÁLU S PŘÍMĚSÍ KARBONOVÝCH VLÁKEN
DESIGM OF THE 3D PRINTER FOR PRINT MATERIAL WITH CARBON FIBERS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — **Bc. Matyáš Chaloupka**
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — **Ing. Jan Pavlík, Ph.D.**
SUPERVISOR

BRNO 2017

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student:	**Bc. Matyáš Chaloupka**
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Výrobní stroje, systémy a roboty
Vedoucí práce:	**Ing. Jan Pavlík, Ph.D.**
Akademický rok:	2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Konstrukce 3D tiskárny pro tisk materiálu s příměsí karbonových vláken

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Navrhněte a konstrukčně zpracujte FDM 3D tiskárnu pro materiály s příměsí karbonových vláken. Navrhněte a realizujte experiment pro srovnání pevnosti součástí vytištěných z materiálu s příměsí uhlíkových vláken a běžně používaných materiálů (PLA, ABS, PET,…).

Cíle diplomové práce:

1. Důkladná analýza problematiky
2. Návrh variant řešení
3. Konstrukční návrh vybrané varianty – 3D model,
4. Výpočtová dokumentace včetně dimenzování hlavních částí
5. Výkresová dokumentace vybraných uzlů

Seznam doporučené literatury:

PRŮŠA, Josef. Základy 3D tisku [online]. 1. Praha: Pusa Research s.r.o., 2014 [cit. 2016-09-30]. Dostupné z: http://www.prusa3d.cz/kniha-zaklady-3d-tisku-josefa-prusi/

SHIGLEY, J.E., Ch.R. MISCHKE a R.G. BUDYNAS. Konstruování strojních součástí. 1. Brno: Naladatelství VUTIUM, 2010. ISBN 978-80-214-2629-0.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D. ředitel ústavu	doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. děkan fakulty

ABSTRAKT

Předkládaná práce se zabývá problematikou 3D tisku metodou FDM s důrazem na tisk materiálů s příměsí karbonových vláken. Cílem této práce je konstrukční návrh FDM 3D tiskárny pro tisk materiálu s příměsí karbonových vláken a návrh a realizace experimentu pro srovnání materiálových vlastností součástí vytištěných z materiálu s příměsí uhlíkových vláken a běžně používaných materiálů (PLA, ABS, PET, aj.). Zařízení zkonstruované v této práci má tiskovou plochu 200 x 200 mm a maximální výšku tisku 200 mm. Tisková podložka je vyhřívaná a celé zařízení je zakrytované. V rámci práce jsou provedeny dva druhy experimentů. První je zaměřen na pevnost v tahu a modul pružnosti v tahu vybraných materiálů pro 3D tisk a druhý srovnává rázovou houževnatost Charpy vzorků s různým procentem výplně u dvou materiálů, PET a PET s karbonovou drtí.

ABSTRACT

The presented thesis deals with FDM 3D printing method with emphasis on printing carbon fiber reinforced plastic (CFRP). The aim of this thesis is to engineer the FDM 3D printer designed for printing CFRP and to execute the experiment targeted on comparison of CFRP material properties against commonly used 3D printing plastics such as PLA, ABS, PET etc. The device designed in this work has printing area of 200 x 200 mm with maximum height of the object of 200 mm. The printing bed is heated and the whole device is enclosed. There are two kinds of experiments carried out within the thesis. The first one is focused on tensile strength and Young's modulus of selected materials, while the second experiment compares Charpy's impact strength of specimen with different infill percentage on two selected materials, PET and PET filled with chopped carbon fiber.

KLÍČOVÁ SLOVA

Aditivní výroba, 3D tisk, FDM, karbonové vlákno, CFRP, testování materiálů

KEYWORDS

Additive manufacturing, 3D printing, FDM, carbon fiber, CFRP, materials testing

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

CHALOUPKA, M. Konstrukce 3D tiskárny pro tisk materiálu s příměsí karbonových vláken. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 98 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Pavlík, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

V prvé řadě bych chtěl poděkovat Ing. Janu Pavlíkovi, Ph.D. za cenné rady, inspiraci a odbornou pomoc při vypracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Lukáši Řehořkovi, Ph.D. za odborné rady a ochotu při realizaci experimentů a Ústavu materiálových věd a inženýrství a Ústavu mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky za možnost využití jejich zařízení pro realizaci experimentů. Velké poděkování patří též rodině za trpělivost a podporu po celou dobu studia.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Jana Pavlíka, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 23.5.2017 ……

Chaloupka Matyáš

OBSAH

1 ÚVOD 15

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ 17

2.1 Additive Manufacturing 17
2.2 Metody 3D tisku 18
2.3 Metoda FDM 18
2.4 3D tisk karbonových vláken 20
2.4.1 Karbonová vlákna 22
2.4.2 Vliv karbonových vláken na trysku FDM 3D tiskárny 25

3 NÁVRH VARIANT ŘEŠENÍ 27

3.1 Druhy konstrukcí FDM 3D tiskáren 27
3.1.1 Kartézská 27
3.1.2 Delta 28
3.1.3 Polar 29
3.1.4 Scara 29
3.2 Rámová konstrukce 30
3.3 Lineární vedení 31
3.4 Pohony 31
3.5 HotEnd 32
3.6 Elektronika a softwarové řízení 3D tiskárny 34
3.6.1 Formát .STL 34
3.6.2 G-kód 34
3.6.3 Firmware 35
3.6.4 Řídící jednotka 35

4 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ 3D TISKÁRNY 37

4.1 Rám tiskárny 38
4.2 Pojezdový systém osy Z 39
4.3 Pojezdový systém v rovině X-Y 42
4.4 Tisková hlava 46
4.5 Extruder 47
4.6 Krytování 48
4.7 Elektronika 49

5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST 51

5.1 Mechanické vlastnosti polymerů 51
5.2 Statické namáhání 51
5.2.1 Tahové vlastnosti polymerů 52
5.3 Tahová zkouška dle ČSN EN ISO 527 54
5.3.1 Zkušební vzorky 54
5.3.2 Tiskové parametry 55
5.3.3 Zkoušené materiály 57
5.3.4 Výsledky 59
5.4 Dynamické rázové namáhání 69
5.5 Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy dle ČSN EN ISO 179-1 69
5.5.1 Zkušební vzorky 71
5.5.2 Tiskové parametry 72
5.5.3 Výsledky 74

6 ZHODNOCENÍ A DISKUZE 81
7 ZÁVĚR 83
8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ 85
9 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK 89
9.1 Seznam tabulek 91
9.2 Seznam obrázků 91
10 SEZNAM PŘÍLOH 95

1 ÚVOD

Rapid Prototyping (RP) je typ výroby, jímž se od poloviny 80. let minulého století označují technologie, které konečný výrobek nevytváří klasickými postupy, ale tzv. vrstveným (aditivním) procesem. Konečný tvar výrobku není dosažen odebíráním materiálu z polotovaru, jako při obrábění, ani se materiál nepřidává najednou, jako při odlévání, ale konečný tvar se získá poskládáním tenkých vrstev materiálu na sebe. Mezi aditivní metody řadíme spékání prášků různého chemického složení, ať už kovových, či plastových. Dále vytvrzování fotopolymeru laserem či nanášení různých druhů materiálů po jednotlivých vrstvách. [1]

Nejznámější a nejpoužívanější metodou aditivní výroby (Additive Manufacturing, AM) je metoda Fused Deposition Modeling (FDM). Tato metoda poskytuje levnou a relativně rychlou výrobu funkčních prototypů, které se svými vlastnostmi blíží konečným produktům. Modely vyrobené pomocí metody FDM mohou mít téměř jakýkoliv tvar, včetně funkčních a nerozebíratelných sestav, a to s minimálním odpadem, který je proti třískovému obrábění zanedbatelný. [2] [3]

V posledních letech se poptávka po vyráběných produktech všeobecně mnohonásobně zvětšila. Pro nové produkty se stalo důležité, ne-li nezbytné, aby se dostaly na trh v co nejkratším možném čase, a to především dříve než produkty konkurence. Aby bylo možné tyto produkty rychle uvést na trh, je nutné mnoho procesů v oblasti návrhu produktu, jeho testování, výroby a uvedení na trh minimalizovat jak z hlediska procesních časů, tak z hlediska materiálových zdrojů.

V současnosti se můžeme setkat se stále se rozvíjejícími kompozitními materiály pro 3D tisk, které dosahují stále lepších materiálových charakteristik. Pokud mluvíme o kompozitech, nejdůležitější pro zpracovatelský průmysl jsou materiály vyztužené karbonem. Vyztužení uhlíkovým vláknem může přinést vyšší pevnost a současně snížení hmotnosti. Tento materiál se používá v oblastech, v nichž nízká hmotnost a vysoká pevnost mají zásadní význam, jako např. v leteckém či automobilovém průmyslu. [4]

Cílem předkládané práce je konstrukční návrh FDM 3D tiskárny pro tisk materiálu s příměsí karbonových vláken a návrh a realizace experimentu pro srovnání materiálových vlastností součástí vytištěných z materiálu s příměsí uhlíkových vláken a běžně používaných materiálů (PLA, ABS, PET, aj.). V první části práce je proveden rozbor aditivních metod s důrazem na technologii FDM, je přiblížena produkce karbonu a použití karbonu v 3D tisku. V druhé části práce jsou podrobně popsány současné přístupy ke konstrukci FDM 3D tiskáren včetně hlavních komponent využívaných při jejich stavbě. Na tuto kapitolu navazuje konstrukční řešení FDM 3D tiskárny pro tisk materiálu s přídavkem karbonových vláken. V experimentální části je realizována série experimentů srovnávající mechanické vlastnosti běžně používaných materiálů pro 3D tisk oproti mechanickým vlastnostem materiálů s přídavkem karbonových vláken. V závěru práce je provedena evaluace a představeno nejlepší řešení.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Rozvoj 3D modelování s sebou přináší vznik nových technologií. Oblast 3D tisku a 3D tiskáren je v posledních letech často zmiňovaným pojmem a pozorujeme výrazný nárůst využití 3D technologií ve všech oblastech lidské činnosti. [2] [6]

3D tiskárna je specifické zařízení, které vytváří trojrozměrné objekty ze specifických digitálních dat z různých materiálů, jako jsou například plast, kov nebo polymer. V současnosti existuje nepřeberné množství různých 3D tiskáren, které se odlišují svou velikostí i druhem materiálu, ze kterého jsou objekty tisknuty. [6]

2.1 Additive Manufacturing

Rapid Prototyping (RP) je technologický proces, jehož cílem je navržení nového výrobku rychleji, než je možné běžnými technologiemi. Aditivní výroba (Additive Manufacturing, AM) je proces, při němž vzniká výrobek postupným nanášením materiálu po tenkých vrstvách konstantní tloušťky. Opakem této metody je CNC obrábění, kdy se materiál odebírá ve formě třísky (subtraktivní metoda). Čas potřebný pro stavbu prototypu je značně redukován a s tím jsou spojeny nižší náklady na jeho výrobu. AM se využívá zejména pro označení procesů, při nichž vzniká koncový výrobek, a nikoliv jen prototyp. Při výrobě těchto modelů odpadá nutnost pracovat s technickou dokumentací, neboť počítačové modelování umožňuje nejen konstruování modelů, ale také sdílení těchto dat na počítačové síti. [1] [2]

Výchozím bodem všech metod RP je úplný trojrozměrný geometrický popis vyráběné součásti, který je za účelem zjednodušení dalšího matematického zpracování nejdříve v CAD systému aproximován pomocí trojúhelníků (triangulace) a následně převeden do výstupního formátu STL. [18]

Vytvořená prototypová součást může být dle typu použité aditivní technologie vytvořena z pryskyřice, termoplastu, vosku nebo kovového prášku. Z tohoto hlediska je zřejmé, že výsledné použití prototypové součásti je již od počátku výroby směrodatným hlediskem pro vhodnou metodu aditivní výroby. [2]

Norma ISO/ASTM 52900:2015 stanovuje a definuje pojmy používané v technologii aditivní výroby (AM), která uplatňuje princip postupného nanášení materiálu, a tak tvorbu fyzické 3D geometrie. Tato norma definuje 7 kategorií aditivní výroby, a to:

- Binder Jetting – jedná se o metodu, kde je kapalné pojivo selektivně uloženo, aby pojilo práškové materiály.
- Directed Energy Deposition – soustředěná termální energie (např.: laser, elektronový paprsek nebo plazmový oblouk) je využita k tavení materiálů v okamžiku, kdy jsou ukládány.
- Material Extrusion – metoda, při níž je materiál selektivně dávkován přes trysku nebo otvor.
- Material Jetting – tento způsob pracuje se selektivním ukládáním kapek stavebního materiálu nejčastěji z fotopolymeru nebo vosku.
- Powder Bed Fusion – metoda AM, při níž termální energie taví vybrané oblasti práškové pracovní podložky.

- Sheet Lamination – postup při němž jsou listy materiálu spojeny, aby vytvořily finální součást.
- Vat Photopolymerization – metoda, při níž je tekutý fotopolymer umístěný v nádrži selektivně vytvrzován světlem aktivovanou fotopolymerizací. [7]

2.2 Metody 3D tisku

Prototypy vytvořené jednou z metod aditivní výroby vznikají pomocí specializovaných zařízení, např. spékáním prášků různých materiálů (kov, plast), nanášením vrstev taveniny (plast, vosk) nebo spojováním speciálních fólií. Všechny tyto metody mají společnou vlastnost v postupném nanášení vrstev materiálu. Metody aditivní výroby je možné rozdělit podle materiálů použitých na stavbu výsledného modelu. [2]

První skupinou jsou modely na bázi fotopolymerů. Tyto modely jsou většinou stavěny v nádobě s kapalnou pryskyřicí, kde pod hladinou dochází k postupnému vytvrzování jednotlivých vrstev. Po těchto jednotlivých vrstvách se postupně vytvoří celý model. Po dokončení tvorby modelu je odvedeno zbytkové množství pryskyřice, model je vyjmut z pracovního prostoru a může být použit pro další operace. Jednotlivé technologie této kategorie se rozlišují podle typu použitého laseru/UV lampy, metody skenování, zvedacího mechanismu a optické soustavy. Mezi výhody těchto metod patří dostatečná přesnost, možnost zhotovení objemnějších modelů, dobrá jakost povrchu. Nevýhody těchto metod jsou převážně spjaty s toxicitou používaných pryskyřic. Do této skupiny patří metody Stereolitografie, Solid Ground Curing a Digital Light Processing. [2]

Další velmi rozšířenou skupinou jsou metody na bázi práškových sádrokompozitních, plastových a kovových materiálů. Tato skupina používá k výrobě modelu jako výchozí materiál jemný prášek. Metody této skupiny se vyznačují svojí pevností, která dovoluje vyrábět funkční součásti z velkého množství materiálů. Dále tyto součásti nepotřebují podpory, neboť nespečený prášek slouží místo podpor. Nevýhodou těchto metod je vysoce energeticky náročné a prostorově objemné zařízení. Kvalita povrchu je v porovnání s ostatními metodami poměrně nízká, srovnatelná s odléváním do pískových forem, z důvodu velikosti částic materiálů vstupujících do procesu. Do této skupiny metod patří například Selective Laser Sintering, Direct Metal Laser Sintering, Electron Beam Melting, Selective Laser Melting, Selective Heat Sintering, Powder Bed and Inkjet Head 3D printing (3DP), LaserCUSING, Ultrasonic Additive Manufacturing a další. [2]

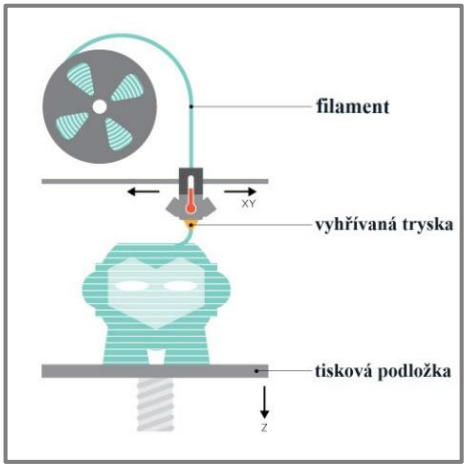
Poslední, avšak patrně nejrozšířenější skupinou jsou metody na bázi tuhých materiálů. Metody této skupiny jsou velice rozdílné a jediným společným znakem je počáteční volba materiálu v tuhé fázi k vytvoření finálního modelu. Postup výroby prototypových součástí těmito metodami je velice rozdílný od výroby modelu na principu kapalné fáze. Do skupiny metod na bázi tuhých materiálů patří technologie Laminated Object Manufacturing, Robocasting nebo Direct Ink Writing, Multi Jet Modeling, Fused Deposition Modeling a Composite Filament Fabrication. [2]

2.3 Metoda FDM

FDM (Fused Deposition Modeling) je v současnosti jednou z nejpoužívanějších technologií aditivní výroby. Tato technologie byla patentována v roce 1989 S. Scottem Crumpem, spoluzakladatelem firmy Stratasys, jež je jednou z největších firem pohybujících se na poli aditivní výroby. Po expiraci patentu v roce 2009 se tato metoda profesionálního 3D tisku rychle

rozšířila mezi běžné uživatele pod označením FFF (Fused Filament Fabrication), neboť označení FDM je registrovanou ochrannou známkou, avšak mezi odbornými kruhy používanou spíše než označení FFF. [5]

Princip této metody spočívá v natavování termoplastu, jenž je navinut ve formě drátu na cívce, ze které je pomocí kladek vtlačován do vyhřívané trysky daného průměru. V trysce je plastové vlákno roztaveno na teplotu vyšší, než je jeho teplota tavení a poté je materiál skrze tuto trysku vytlačován do pracovního prostoru, kde je v tenkých vrstvách nanášen na tiskovou podložku. Okolním vzduchem je materiál ochlazen a ztuhne. Tisková hlava se pohybuje v horizontální rovině (X, Y) dokud nedokončí kompletní tisk jedné vrstvy. Po dokončení vrstvy se tisková hlava nebo tisková podložka (záleží na typu konstrukce) posune vertikálně o výšku jedné vrstvy a proběhne tisk další vrstvy. Tímto způsobem se opakuje celý proces až do kompletního vytisknutí celé součásti (viz Obr. 1). Po dokončení tiskové úlohy je součást vyjmuta z pracovního prostoru 3D tiskárny. V případě použití podpor jsou podpory odstraněny buď mechanicky odlamováním, nebo v případě použití rozpustných podpor je součást ponořena do speciálního roztoku, který podpory ze součásti vyplaví. [2]



Obr. 1) Princip technologie FDM [17]

Touto metodou je možné vyrábět funkční prototypy, které se svými vlastnostmi blíží konečným produktům nebo již samotné koncové součásti. Modely vyrobené metodou FDM mohou mít téměř jakýkoli tvar, a to včetně funkčních a nerozebíratelných sestav (Obr. 2). [2]

Obr. 2) Příklad nerozebíratelné sestavy – funkční ložisko [41]

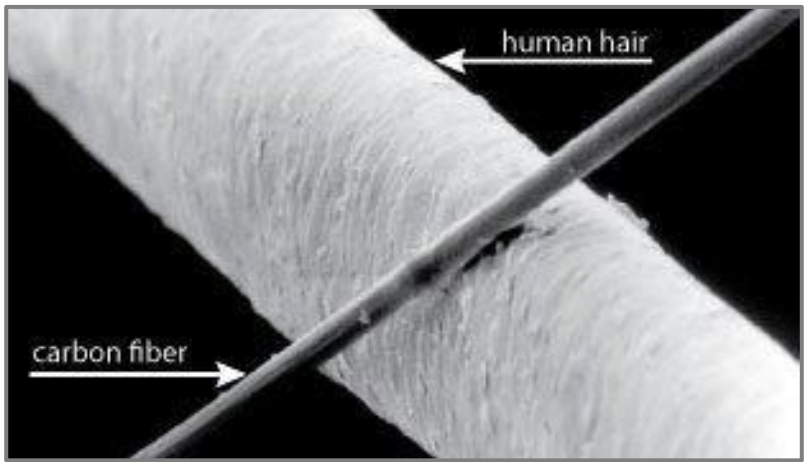
Výhodou této technologie je její ekonomičnost a ekologičnost. Jediný odpad, který při výrobě vzniká, je materiál podpor. Materiály používané pro výrobu jsou netoxické a některé dokonce biologicky rozložitelné. Ve srovnání s ostatními metodami aditivní výroby je FDM levnější. [2]

Nevýhodou této metody je omezená přesnost daná průměrem výstupní trysky a vlastnostmi použitého materiálu. Proces tvorby součásti není příliš rychlý a nelze jej ani výrazně urychlit z důvodu principu metody (tavení materiálu) a vlastností materiálů. S vlastnostmi materiálu je spojena další nevýhoda, jíž je smršťování modelu při tisku a chladnutí, což má za následek deformaci modelu vedoucí až k vadnému tisku. Tento problém je možné částečně odstranit pomocí vhodné volby materiálu, vhodné orientace součásti v tiskovém prostoru a zkušené obsluhy. Dále je možné použít vyhřívanou tiskovou podložku, která částečně zabraňuje efektu smršťování součástí tištěných z materiálů s výraznější teplotní roztažností. [2] [8]

2.4 3D tisk karbonových vláken

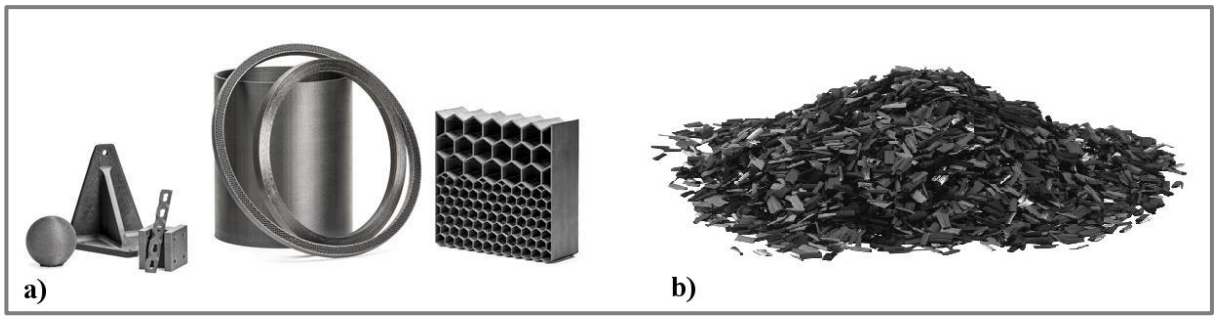
Neuvěřitelná pevnost a tuhost, chemická a teplotní odolnost, elektrická vodivost, nízká hmotnost na stejné úrovni s plastovými součástmi – to vše jsou atributy technologie 3D tisku s karbonovými vlákny. Tato technologie je na nejlepší cestě stát se hlavním trendem průmyslové aditivní výroby současnosti. [9]

3D tisk plastů vyztužených karbonovými vlákny (Carbon Fiber Reinforced Plastic, CFRP) nabízí jedinečné vlastnosti, které jsou stále více vyhledávané, obzvláště v leteckém, automobilovém a obranném průmyslu, dále také v robotice a energetice, a v neposlední řadě pro různé specializované díly v oblasti motorsportu. Karbonové kompozity, které obsahují extrémně tenká karbonová vlákna o průměru 5-10 mikronů (Obr. 3) mají vyšší poměr pevnosti k hmotnosti než téměř každý jiný výrobní materiál. Tyto kompozity mohou být pevnější než ocel, a přesto lehké jako plast. [9]



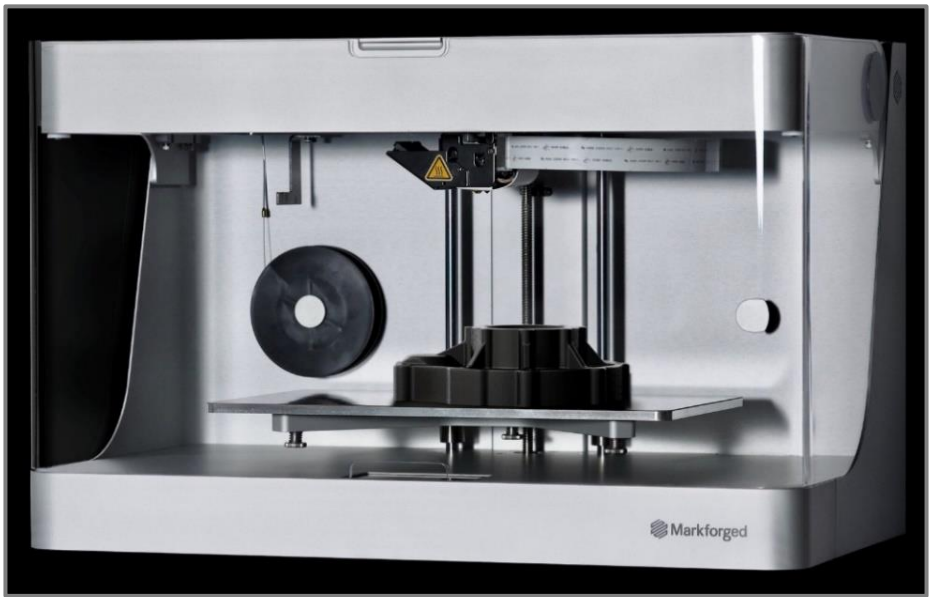
Obr. 3) Srovnání tloušťky karbonového vlákna a lidského vlasu [12]

Ve 3D tisku CFRP se v současnosti nejrychleji vyvíjejí 2 směry. Prvním je 3D tisk na FDM zařízeních, jenž tiskne z plastového materiálu (např. ABS, PLA, PET nebo Nylon), který obsahuje nasekané kousky karbonových vláken (Obr. 4) b)). Tato vlákna jsou již obsažena v tiskové struně a tisk tak probíhá stejným způsobem jako z čistých materiálů bez přidaných karbonových vláken. Ukázky výtisků jsou zobrazeny na Obr. 4) a). [10] [11]

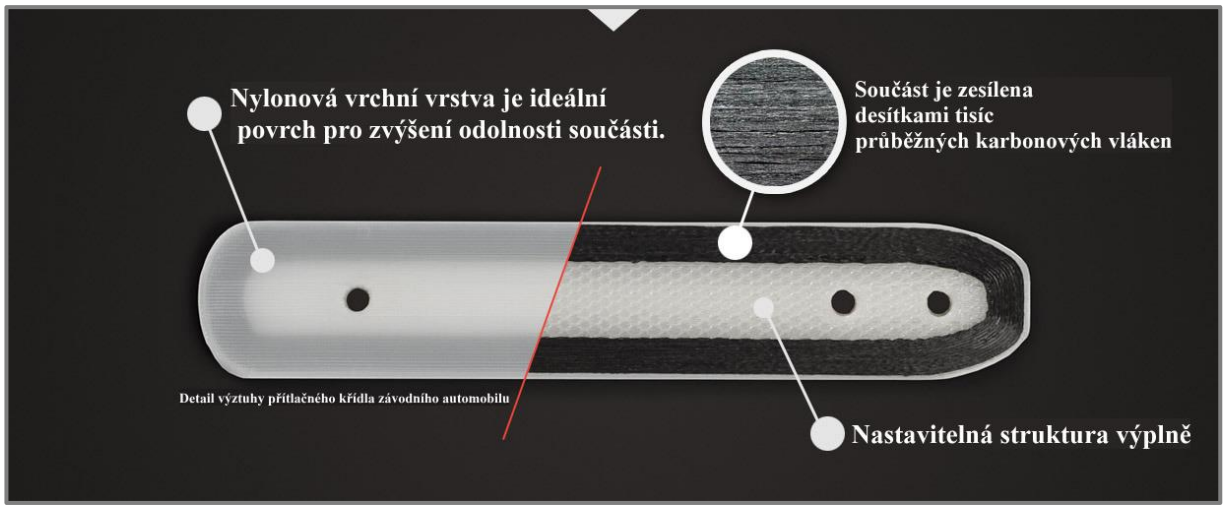


Obr. 4) a) Výtisky z plastového materiálu s přídavkem karbonových vláken
b) Nasekaná karbonová vlákna [12]

Druhý směr v této technologii udává firma Markforged se svojí tiskárnou Mark Two (Obr. 5), která umožňuje tisknout odolné součásti díky patentovanému postupu vytvrzování nylonu spojitými vrstvami karbonových či skelných vláken, případně kevlaru (Obr. 6). 3D tiskárna Mark Two kombinuje tiskovou hlavu se speciální technologií CFF (Composite Filament Fabrication) pro karbonová a skelná vlákna či kevlar s tradiční hlavou využívající technologie FDM pro tisk nylonu. Výsledkem tohoto spojení je aditivní výroba dílů z kompozitního materiálu, který má vyšší poměr pevnosti k hmotnosti, než má například hliník 6061-T6. Tato technologie nalezne uplatnění při tvorbě montážních přípravků, instalačních přípravků a dalších strojírenských nástrojů, konstrukčních součástí, funkčních prototypů i finálních dílů. Díky svým výhodám oproti standardnímu 3D tisku technologií FDM je tato tiskárna využívána předními světovými společnostmi z leteckého, kosmického i obranného průmyslu, největšími automobilkami, výrobci spotřebního zboží, lékařských nástrojů, protéz a ortéz či nejznámějšími americkými technickými univerzitami. [10] [11]



Obr. 5) 3D tiskárna Mark Two od firmy Markforged [11]

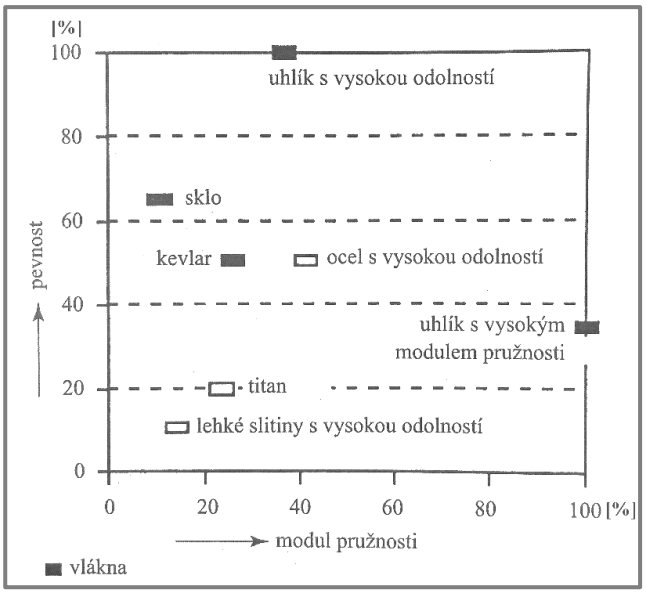


Obr. 6) Technologie CFF [13]

2.4.1 Karbonová vlákna

Karbonové materiály jsou i přes jejich všestranný charakter složeny pouze z jediného prvku a tím je uhlík – C. Velkou proměnlivost vlastností karbonových materiálů nelze ovlivnit, jako v případě kovů, příměsemi nebo složením slitin. Prvek uhlík zůstává jedinou složkou karbonových materiálů a pouze rozmanitost jeho struktury a textury určuje velmi širokou proměnlivost jeho vlastností. Atomy karbonového vlákna jsou spojeny v krystaly orientované paralelně k dlouhé ose vlákna. Díky takovému uspořádání mikroskopických krystalů vyniká karbonové vlákno na svou velmi malou tloušťku vysokou pevností. [14] [15]

Termín „karbonová vlákna“ se vztahuje na vlákna s vysokými mechanickými parametry, jejichž odolnost překračuje odolnost nejlepších ocelí a jejich výhodou je čtyřikrát nižší hustota. Tato vlákna mají vysoký modul pružnosti a vysokou odolnost v tahu. Uhlík netaje, není tažný a je dokonale odolný vůči rozpouštědlům, dále je charakteristický svým vysokým stupněm anizotropie – odlišné fyzikální vlastnosti v různých směrech. Karbonová vlákna jsou k dispozici na cívkách s vlákny o délce několika set metrů, kde každý svazek je složen z 1 000 až 10 000 jednotlivých vláken. [14]

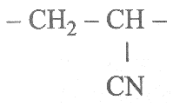


Obr. 7) Srovnání fyzikálních vlastností uhlíku s vybranými materiály [14]

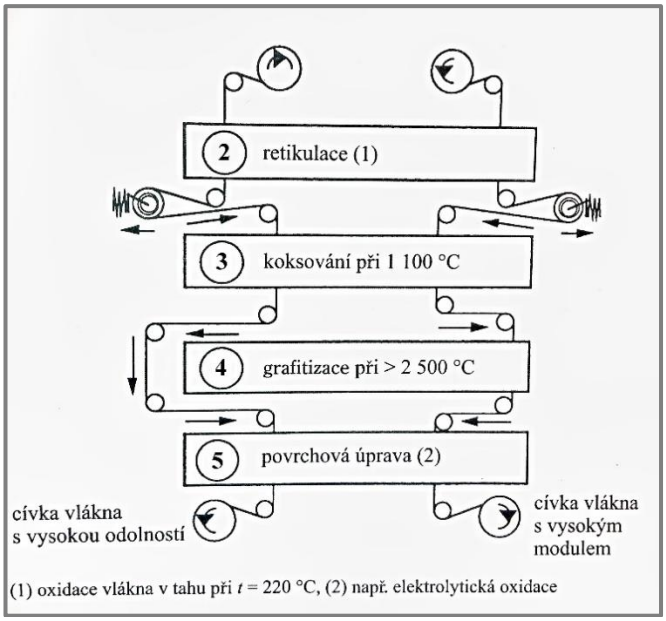
Obr. 7) porovnává pevnost a tuhost karbonových vláken proti některým jiným materiálům. Z obrázku je patrné, že karbonová vlákna s vysokým modulem pružnosti mají modul pružnosti dvaapůlkrát vyšší, než nejlepší oceli a více jak pětkrát vyšší než lehké slitiny používané v aeronautice. Dále je z obrázku patrné, že karbonová vlákna s vysokou odolností mají pevnost vyšší než sklo a desetkrát vyšší než lehké slitiny. Se svoji nízkou hustotou, pouze 1,7 až 2 g/cm^3, je jejich specifická pevnost a modul pružnosti nejvyšší ve srovnání se všemi známými materiály. Vysoká pevnost a vysoký modul pružnosti se většinou neobjevují v jednom materiálu, a proto dělíme karbonová vlákna na vlákna s vysokým modulem a vlákna s vysokou pevností. V současnosti jsou vyráběny také nové série vláken s tzv. prostředním modulem, které v omezené míře kombinují obě vlastnosti. [14]

Výroba karbonových vláken

Největší produkce karbonových vláken je na bázi PAN neboli ze zpracování polyakrylonitrilu. Prekurzorové vlákno je v průběhu výroby nejčastěji vyráběno z polymeru, jehož opakující se motiv je:



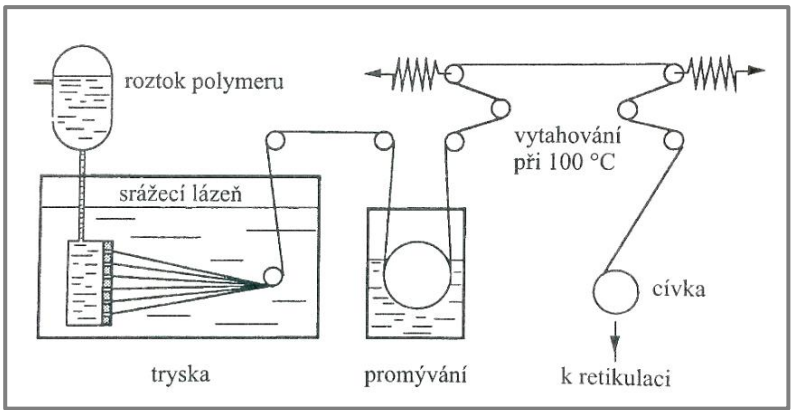
Cílem výroby karbonových vláken je získat materiál s co největší pevností a nejvyšším modulem elasticity podél osy vlákna. Toho lze dosáhnout uspořádáním polymerních řetězců paralelně s touto osou. Modelové schéma výroby je zobrazeno na Obr. 8).



Obr. 8) Výroba karbonových vláken na bázi PAN [14]

Jak je z Obr. 8) patrné, výroba karbonových vláken má několik stupňů výroby.

1. Spřádání – polymer je tlačen přes trysku obsahující 1 000 – 300 000 otvorů o průměru několika desetin milimetru. Vlákna vznikají v průběhu průchodu srážecí lázní nebo v proudu vlažného vzduchu způsobující odpařování rozpouštědla. Po promytí následuje operace vytahování v atmosféře vodní páry, čímž vzniká maximální orientace lamel ve směru osy vlákna. Karbonové vlákno je pak dlouženo na požadovanou jemnost. [14] [15]



Obr. 9) Spřádání [14]

2. Stabilizace (retikulace) – před karbonizací je třeba, aby z dlouhých karbonových vláken vznikla teplotně stabilní zesítěná struktura. Tato operace se provádí na vzduchu zahřátím materiálu na relativně nízké teploty 200–450 °C na 20–30 minut. To způsobí, že karbonové vlákno sbírá kyslíkové molekuly ze vzduchu a dochází tak k přerovnání atomové struktury vlákna. Při stabilizaci vzniká ve vlákně také vlastní teplo, které musí být kontrolováno, aby se zabránilo přehřívání. To by mohlo způsobit slepení vláken mezi sebou nebo vést k fragmentaci polymerních řetězců. Po ukončení stabilizace je vlákno stabilizováno a je netavitelné. V praxi se někdy používá tažení vlákna skrze řadu zahřívaných komor nebo karbonové vlákno prochází přes rozehřáté válce a sypké materiály, které odebírají přebytečné teplo. [14] [15]
3. Karbonizace – jedná se o převod prekurzoru na karbonová vlákna. Provádí se v inertní atmosféře (obyčejně dusíkové), při teplotách v rozmezí 1000–2000 °C. Bez přístupu kyslíku karbonové vlákno nemůže hořet. Vysoká teplota způsobí rozkmitání atomů ve vlákně tak, že většina neuhlíkových atomů je odstraněna. Výsledné vlákno obsahuje 85–95 % uhlíku. [15]
4. Grafitizace – provádí se v inertní atmosféře, při teplotách v rozmezí 2400–3000 °C. Dochází ke zvýšení obsahu uhlíku na cca 99 % a více. Tato operace má za následek zlepšení uspořádání a nárůst velikosti grafenových vrstev. Výsledkem je zlepšení modulu pružnosti. Grafitizace probíhá v dusíkové nebo argonové atmosféře v indukčně vyhřívaných pecích. [14] [15]
5. Povrchová úprava – cílem je zvýšit možnost adheze karbonových vláken k různým matricím (pryskyřici, sklu, keramice, uhlíku), používaných při tvorbě kompozitů. Povrch vlákna se mírně oxiduje. Přidání kyslíkových atomů na povrch umožňuje lepší přilnavost dalších látek a zhrubnutí povrchu pro lepší mechanické spojení s těmito látkami. Okysličení může být dosaženo přístupem plynů, jako je vzduch, oxid uhličitý či ozon nebo ponořením do různých kapalin, jako chlornanu sodného nebo kyseliny dusičné. Karbonové vlákno může být také pokryto ochrannou vrstvou proti poškození při dalším zpracování. [14] [15]

Obr. 10) Karbonové vlákno v různých polotovarech nachystaných pro další výrobu [16]

2.4.2 Vliv karbonových vláken na trysku FDM 3D tiskárny

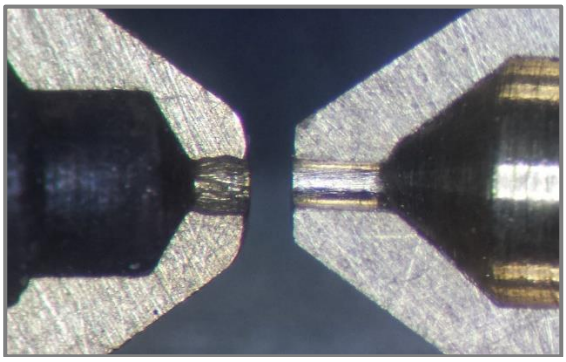
S vývojem stále nových exotických materiálů do FDM 3D tiskáren souvisí i neustále se zvyšující nároky na technologii těchto strojů. Jedním ze současných trendů vývoje zmíněných materiálů je přidávání krátkých vláken vysoce pevnostních materiálů za účelem zlepšení mechanických vlastností konečných součástí. Na trhu můžeme nalézt například nylonové tiskové struny, ve kterých jsou obsaženy drtě z karbonu či aramidu (Kevlar), struny z PLA (kyselina polylaktická) s obsahem karbonových vláken, či PET (polyethylentereftalát) s obsahem karbonu. Dále se do strun z různých materiálů, nejčastěji PLA, přidávají dřevěné štěpy nebo kovový prach. Zde tyto aditiva nemají za následek zvyšování pevnosti, ale pouze vizuální efekt u konečného výtisku (viz Obr. 11).

Obr. 11) Výtisk z materiálu s přídavkem mědi před (vlevo) a po vyleštění (vpravo) [30]

Aditiva obsažená v těchto tiskových materiálech mají velmi vysokou abrazivnost a mohou tak poškodit standardní mosaznou trysku FDM 3D tiskárny. Otázkou zůstává, jak velký vliv mají tato aditiva na trysku a za jak dlouho je na trysce vidět poškození, které by mohlo mít zásadní vliv na kvalitu vytištěných součástí.

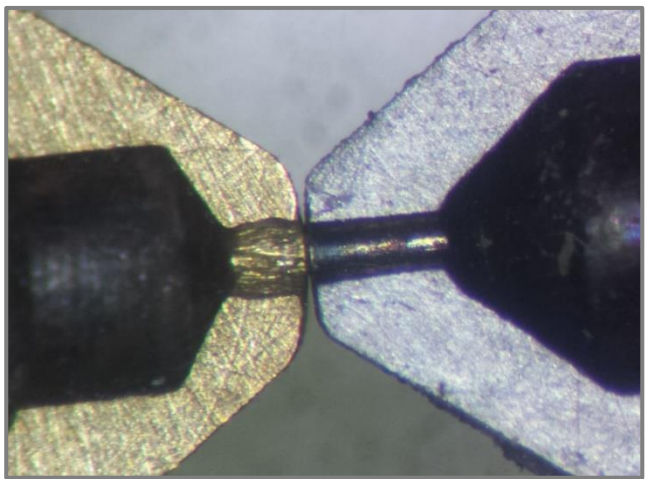
Anglická firma E3D, zabývající se vývojem a výrobou HotEndů pro tato zařízení provedla sérii experimentů zaměřených na vliv materiálů s příměsí karbonových vláken na

standardní mosaznou trysku. Na Obr. 12) je vidět srovnání nové trysky (vpravo) s tryskou po vytisknutí pouze 250 g materiálu s přídavkem karbonových vláken (vlevo). [19]



Obr. 12) Porovnání trysky po tisku materiálu s přídavkem karbonových vláken (vlevo) a nové trysky (vpravo) [19]

Jak je z obrázku výše patrné, celá špička trysky je značně opotřebená. Tryska je podstatně kratší a vlivem abrazivnosti pokládaného materiálu je zaoblená do tvaru kopule. Největší vliv abrazivnosti materiálu je však možné pozorovat uvnitř otvoru trysky, kde je vidět, jak se znatelně a nerovnoměrně zvětšil její průměr. Řešením tohoto problému je použití trysky z tvrzené nerezové oceli, která již začíná být na trhu s FDM 3D tiskárnami běžně dostupná. Porovnání tvrzené trysky se standardní tryskou je zobrazeno na Obr. 13). Vlevo je standardní tryska po tisku 250 g materiálu s příměsí karbonových vláken a vpravo je tvrzená tryska po tisku 2,5 kg stejného materiálu. Jak je z obrázku patrné, na trysce není zjevná žádná známka opotřebení.



Obr. 13) Srovnání mosazné trysky (vlevo) a trysky z tvrzeného nerezu (vpravo) [19]

3 NÁVRH VARIANT ŘEŠENÍ

Tato kapitola blíže popisuje jednotlivé druhy konstrukcí FDM 3D tiskáren a jednotlivé komponenty používané pro jejich stavbu.

3.1 Druhy konstrukcí FDM 3D tiskáren

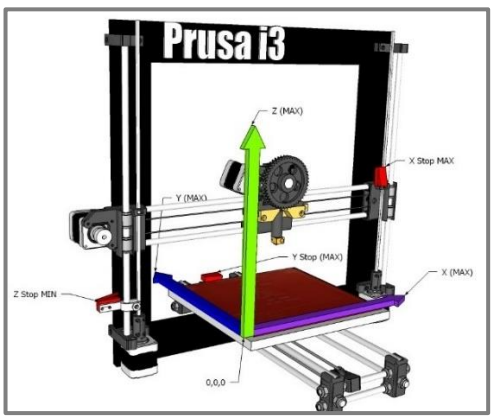
V oblasti 3D tiskáren, jež používají technologii FDM, existují 4 různé konstrukce dle druhu pohybu a jsou dále rozvedeny v této kapitole. První dvě jsou velice časté a hojně využívané a druhé dvě jsou konstruktéry využívány spíše okrajově.

3.1.1 Kartézská

Jedná se o nejtradičnější ovládání pohybu ve třech lineárních osách. Typickou a pravděpodobně nejrozšířenější FDM 3D tiskárnou tohoto typu je Prusa i3, nyní ve verzi MK2 (Obr. 14). Je to design od českého konstruktéra Josefa Průši a v současnosti je dle magazínu „Make:“ nejlepší 3D tiskárnou pro rok 2017 na světě.

Obr. 14) FDM 3D tiskárna Prusa i3 MK2 [21]

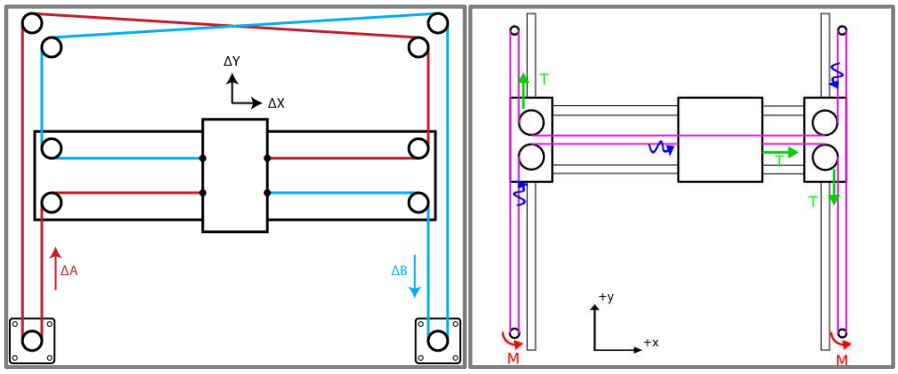
Kinematika pohybu tohoto typu zařízení je následující: model se na tiskové podložce pohybuje v ose Y a tisková hlava koná pohyb v osách X a Z (viz Obr. 15). Tyto tiskárny mají oproti ostatním konstrukcím kartézského typu nejjednodušší design a s tím spojené i nejnižší výrobní náklady.



Obr. 15) Orientace os u FDM 3D tiskáren [22]

Kinematika pohybu

Standardně je k pohybu osy u FDM 3D tiskárny využíván pouze jeden motor, který je nezávislý na ostatních. S rozvojem stále dokonalejších zařízení je nyní více využíván systém pohybu, který kombinuje standardní systém s paralelní kinematikou, a to především v rovině X-Y. Mezi tyto systémy patří například CoreXY nebo H-Bot. Tyto kombinované systémy umožňují redukci pojízdných a setrvačných hmot, neboť jsou motory zajišťující pohyb uloženy staticky. Rychlost pohybu tiskových hlav těchto tiskáren je často vyšší než 100 mm/s. Na Obr. 16) jsou zobrazeny kinematiky CoreXY a H-Bot.



Obr. 16) Zleva: CoreXY a H-bot [23]

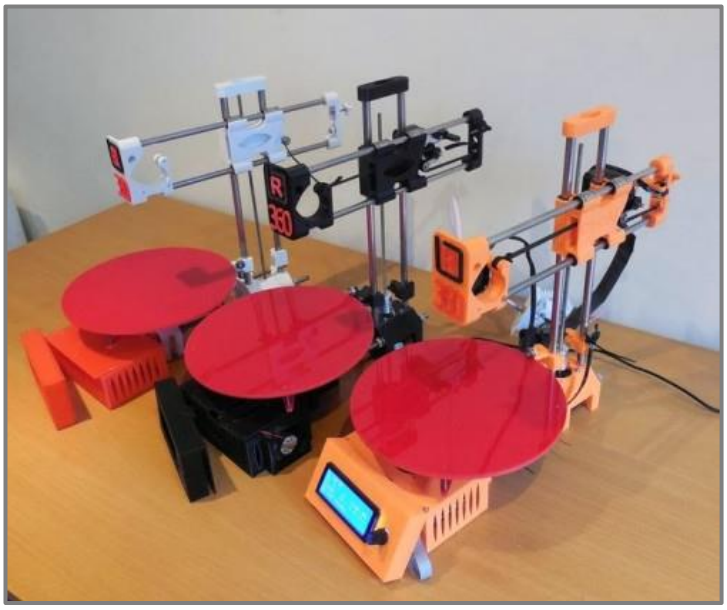
3.1.2 Delta

Delta tiskárny využívají k polohování tiskové hlavy tří staticky uložených, synchronizovaných motorů. Tyto motory ovládají tři ramena, jež jsou rozmístěna po 120° a spojují se právě v místě tiskové hlavy. Delta tiskárny mají velký tiskový prostor a mohou tisknout rychleji z důvodu nízkých setrvačných hmot. Poměrně složitá geometrie dělá tuto 3D tiskárnu těžší na sestavení a kalibraci. K výpočtu pohybu jednotlivých ramen potřebují speciální software. Nevýhodou těchto tiskáren je „mrtvý“ prostor nad tiskovou hlavou, a tudíž velký rozměr tiskárny v ose Z. Mezi nejznámější představitele této konstrukce mezi RepRap tiskárnami patří např. Rostock nebo Kossel (Obr. 17). [20]

Obr. 17) RepRap 3D tiskárna Kossel [20]

3.1.3 Polar

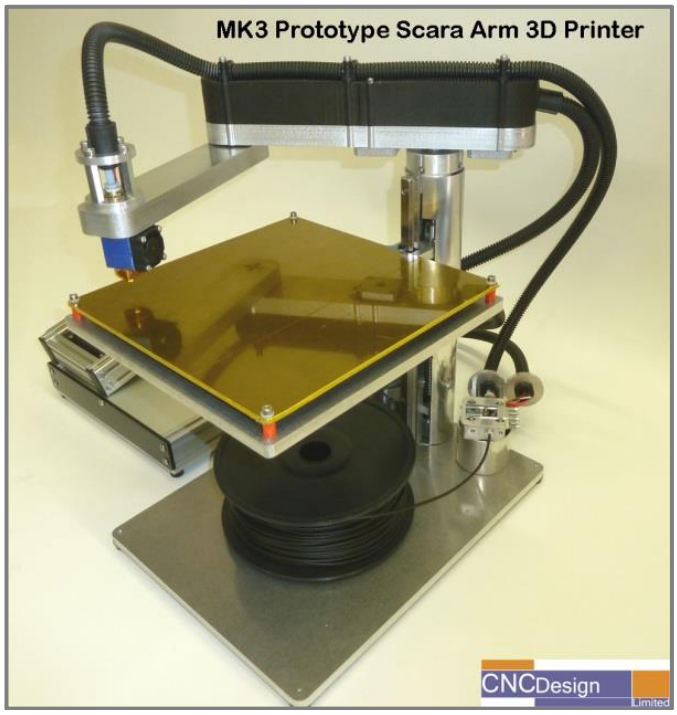
Tyto 3D tiskárny postavené na polárním systému využívají soustavu dvou os pro pohyb tiskové hlavy a rotační podložku. Tento systém je jednodušší na sestavení, ale horší na ovládání. Zároveň není příliš mnoho slicerů, které dokáží převádět 3D modely do křivek pro polární 3D tiskárny. Vytlačování v křivkách má jisté výhody pro tisk určitých modelů, především vázovitého typu. Technologie je velice mladá. [20]



Obr. 18) FDM 3D tiskárna polární konstrukce [20]

3.1.4 Scara

3D tiskárny typu scara jsou poměrně jednoduché na sestavení. Pro ovládaní pohybu extruderu používají dvě robotická ramena nebo jedno dvoukloubé rameno. [20]

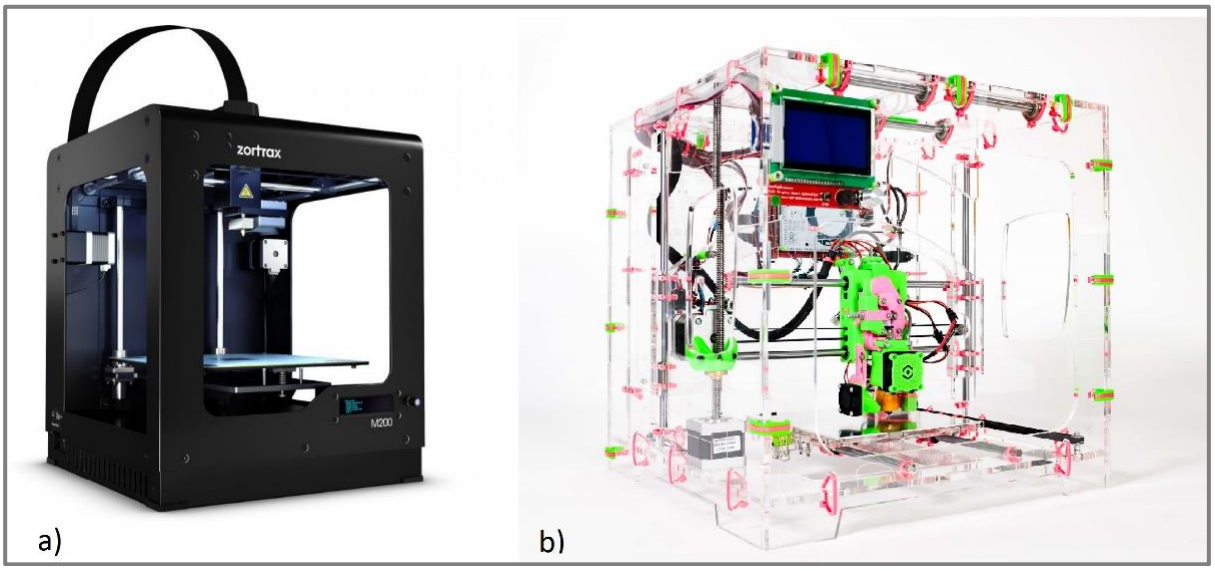


Obr. 19) Prototyp 3D tiskárny typu scara [24]

3.2 Rámová konstrukce

Nejlevnější FDM 3D tiskárny, mezi které se řadí hlavně tiskárny projektu RepRap, jsou konstruovány z běžně dostupných levných součástí, jakými jsou metrické závitové tyče v kombinaci s dřevěnými nebo 3D tištěnými plastovými díly. Nevýhodou těchto zařízení je jejich malá přesnost montáže a malá tuhost celého systému, jež má za následek menší přesnost tištěných součástí. Mezi tyto tiskárny se řadí například Prusa nebo Mendel.

Tiskárny střední třídy jsou vyráběny nejčastěji z plechů v kombinaci s designovým krytováním z různých materiálů (např. Zortrax M200 – Obr. 20)a). Dále sem patří také tiskárny vyráběné z překližkových nebo akrylátových desek (Ultimaker, Jellybox – Obr. 20)b). Tato řešení jsou nejvhodnější pro velkosériovou výrobu z důvodu možné automatizace výroby a následné jednoduchosti osazení rámu jednotlivými komponenty.



Obr. 20) 3D tiskárny a) Zortrax M200 [25] b) Jellybox [26]

Profesionální průmyslové FDM 3D tiskárny jsou vyráběny z ocelového nebo hliníkového, montovaného nebo svařovaného rámu doplněného o plechové nebo plastové krytování. Toto konstrukční řešení zaručuje nejvyšší tuhost a pevnost celé konstrukce, která je nutná pro přesné tisky prototypových a funkčních součástí. Mezi představitele této kategorie můžeme zařadit např. Dimension 1200es nebo uPrint SE (Obr. 21). Tyto profesionální tiskárny se od standardních hobby/poloprofesionálních tiskáren odlišují především uzavřenou a vyhřívanou komorou. Na rozdíl od těchto tiskáren, které umí tisknout desítky různých materiálů, jsou profesionální tiskárny omezeny většinou jen na tisk materiálu ABSplus. Tento odolný plast pro tisk velice pevných prototypů je používán v kombinaci s podpůrným materiálem, jenž je extrudován z druhé tiskové hlavy a bývá většinou rozpustný. Je tím pádem možné zhotovit modely velmi komplikovaných tvarů s dutinami a velmi tenkými stěnami nebo i celé konstrukční sestavy.

Obr. 21) a) Dimension 1200es [27] b) uPrint SE [28]

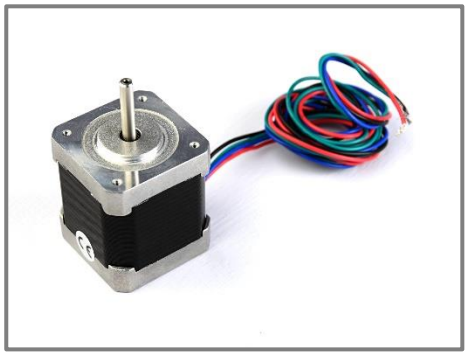
3.3 Lineární vedení

Způsobů lineárního vedení existují desítky typů, avšak v konstrukci 3D tiskáren se používá pouze několik. Mezi základní vedení, používané pro pohyb v rovině X-Y, patří nejčastěji lineární kalené tyče v kombinaci s uzavřenými kuličkovými pouzdry nebo pojezdové kladky pohybující se přímo po rámové konstrukci. Pro přesnější vedení jsou používány podepřené tyče s otevřenými kuličkovými pouzdry v domku nebo kolejnicové lineární vedení HIWIN. K polohování v ose Z se u nejlevnějších tiskáren využívá nejméně přesné řešení, a to kombinace závitové tyče a metrické matice. U dražších strojů střední třídy se využívá přesnější trapézový šroub s maticí a profesionální tiskárny jsou konstruovány s kuličkovým šroubem, což zaručuje nejpřesnější polohování.

3.4 Pohony

Většina stolních 3D tiskáren využívá k pohonu os a extruderu krokové motory bez zpětné vazby. U nejdražších a nejpřesnějších profesionálních 3D zařízení je pak využíváno krokových motorů se zpětnou vazbou, které však vyžadují složitější řídící software a dražší elektroniku. Krokový motor je synchronní motor, kde točivé magnetické pole není vytvářeno střídavým proudem, ale postupným zapínáním jednotlivých cívek statoru. Přesnost polohování zajišťují nejčastěji krokové motory s délkou kroku 1,8°, u dražších zařízení nejsou výjimkou i motory s délkou kroku 0,9°. Pro řízení motorů je nutné použít drivery generující řídicí pulzy pro tyto motory. Tyto drivery navíc umožňují tzv. mikrokrokování, což je rozdělení celého kroku na menší mikrokroky a to buď na 1/16 nebo na 1/32 délky celého kroku. K mechanickému kontaktu dochází u těchto motorů pouze v ložiscích. Tyto motory mají proto velkou mechanickou odolnost, dlouhou životnost a bezúdržbový provoz. Nevýhodou krokových motorů je tzv. ztráta kroku, která může nastat při překročení mezního zatížení a dále také sklon k mechanickému zakmitávání, které může vést k nestabilitě při pohybu. Jmenované negativní vlastnosti lze vyloučit volbou vhodného motoru a ovladače.

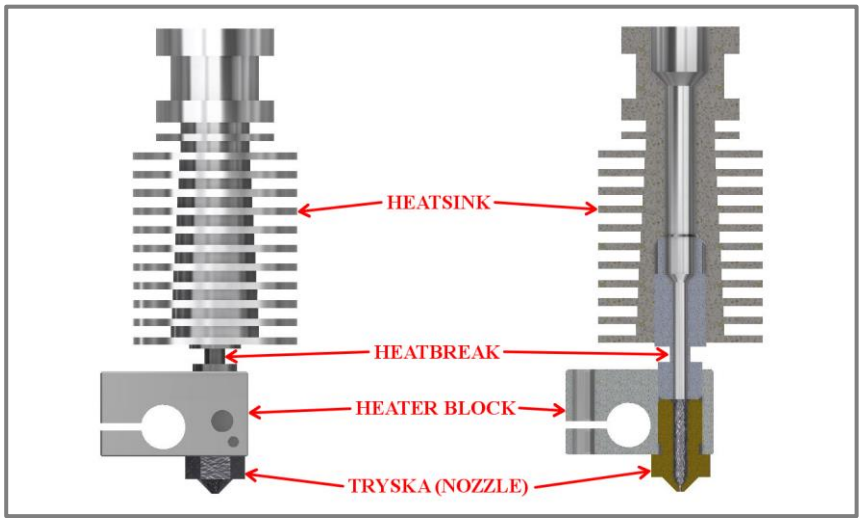
Nejčastěji používané motory v 3D tiskárnách jsou dvoufázové motory s přírubou NEMA 17. Tyto motory se standardně vyrábějí v mnoha variantách lišících se ve velikosti statického momentu od 0,24 do 0,6 Nm.



Obr. 22) Krokový motor s přírubou NEMA 17 [29]

3.5 HotEnd

Část FDM 3D tiskárny obsahující Heatsink, Heatbreak, Heater block a trysku (Nozzle) se souhrnně nazývá HotEnd (obr. 22). V současnosti existuje mnoho výrobců této sestavy, avšak pravděpodobně nejpoužívanější je řešení firmy E3D a jejich HotEnd v6. Tento HotEnd je celokovové konstrukce a umožňuje tak tisk materiálů s vyššími teplotami tavení, a to až do 295°C.



Obr. 23) Sestava trysky E3D V6

Úkolem sestavy HotEndu je přesné dávkování nataveného matriálu do tiskového prostoru. Ohřívací blok je tepelným odporem zahříván na požadovanou teplotu tavení daného materiálu a tepelným vedením předává teplo do trysky. Tryska ohřívá vstupující materiál, stále ve formě struny, taví jej a vlivem síly od extruderu je roztavený materiál tlačen do pracovního prostoru tiskárny. Cílem je natavení struny v co nejkratším možném úseku. K tomu slouží tepelný most a chladič. Tepelný most brání vedení tepla směrem do chladiče, který odvádí zbytkové teplo do okolí a zabraňuje tak natavování vlákna ve větší vzdálenosti od trysky. Dojde-li k zahřátí struny v oblasti chladiče nad teplotu skelného přechodu (Tg), způsobí plasticita materiálu jeho nepřesné dávkování a s tím spojenou zhoršenou kvalitu výtisků.

Tryska přímo charakterizuje vzhled, kvalitu a rychlost tisku. Musí mít dobré tepelné vlastnosti a musí zajišťovat dokonalé natavování materiálu. Pro výrobu trysek se nejčastěji používá mosaz, která je levná a má dobré tepelné charakteristiky. Běžné jsou také trysky ze slitin mědi s povlakem z niklu pro menší přilnavost plastu ke kovu. Tyto trysky mají trojnásobnou tepelnou vodivost oproti mosazi a umožňují tak tisk až do 500°C. Pro tisk materiálů, které mohou způsobit korozi mosazné trysky nebo pro tisk finálních výtisků pro medicínské použití, kde je neakceptovatelná přítomnost olova v mosazné trysce, se používají trysky z nerezové oceli. Poslední skupinou trysek jsou trysky z kalené oceli, které se používají pro tisk abrazivních materiálů jako jsou například materiály s přídavkem karbonových vláken nebo kovových či dřevěných drtí. V tabulce 1 je zobrazeno porovnání fyzikálních vlastností jednotlivých materiálů pro výrobu trysek pro 3D tiskárny.

Tab 1) Porovnání vlastností materiálů pro výrobu trysek pro 3D tiskárny [32]

	Tepelná vodivost λ ($W.m^{-1}.K^{-1}$)	**Hustota ρ ($kg.m^{-3}$)**	**Teplota tání Tm (°C)**	**Měrná tepelná kapacita C ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)**
Měď	386	8900	1064	390
Hliník	237	2700	660	920
Mosaz	120	8400	850-920	385
Ocel	50	7850	1539	460

Tloušťku vlákna vystupující z trysky určuje výstupní průměr trysky. Standardně se trysky vyrábí od průměru 0,15 mm (v současnosti experimentální tryska určená pro tisk extrémně detailních a malých modelů) až do 0,80 mm (tryska určená pro rychlé a málo detailní výtisky). Nejpoužívanější je tryska s výstupním průměrem 0,4 mm, která je vhodným kompromisem mezi dostatečným detailem tištěné součástí a rychlostí tisku. Trysky se dále vyrábí ve dvou variantách, a to 1,75 mm a 3 mm podle použité tiskové struny. Na Obr. 24) je znázorněna řada trysek různých průměrů pro HotEnd E3D v6. V kapitole Přílohy na straně 97 se nachází výkresová dokumentace popisující základní rozměry a tvar těchto trysek včetně rozměrů pro jednotlivé výstupní průměry.

Obr. 24) Trysky různých průměrů pro HotEnd E3D v6 [31]

3.6 Elektronika a softwarové řízení 3D tiskárny

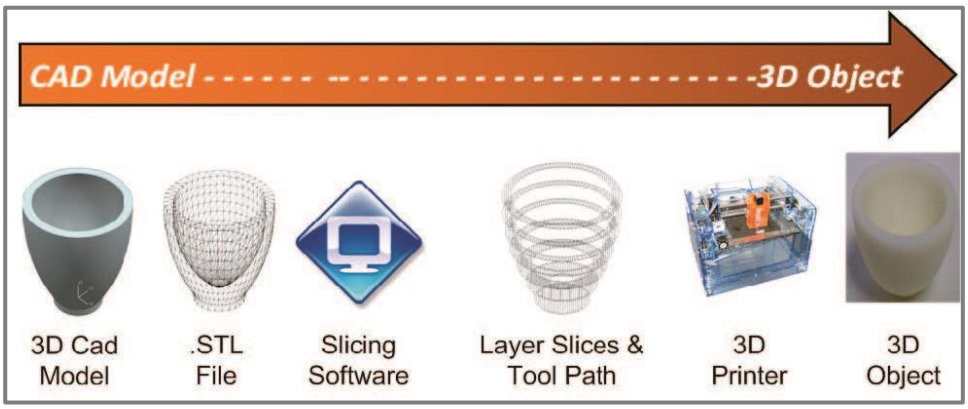
3.6.1 Formát .STL

Zásadním krokem před tiskem modelu je jeho příprava exportováním z CAD programu ve formátu STL (stereolitografie). Jedná se o formát vytvořený firmou 3D Systems a je to nejpoužívanější formát pro práci s 3D tiskárnami. Exportovaný soubor ve formátu STL geometricky popisuje pouze povrch 3D tělesa. Samotný povrch je definován trojúhelníkovými polygony v kartézském trojrozměrném prostoru. Tento formát nezachovává žádné jiné vlastnosti objektu, jako jsou například barva, textura, materiál a další fyzikální vlastnosti. Export objektu v tomto formátu ovlivňuje tisk zaoblených ploch, neboť je při převádění nahradí polygony s definovanou úchylkou přesnosti oproti původnímu geometrickému tvaru. Tuto odchylku nepřesnosti lze nastavit při exportu, avšak platí pravidlo, že čím menší odchylka, tím je potřeba detailnější síť s více polygony a výrazně tak narůstá datový objem exportovaného souboru.

3.6.2 G-kód

Objekt exportovaný z CAD programu není v této chvíli ještě vhodný pro použití na 3D tiskárně. Objekt je nutné softwarově rozřezat na jednotlivé vrstvy kolmo ke svislé ose Z, které mají požadovanou výšku podle cílené detailnosti konečného výtisku. V každé z vrstev je generován systém pohybů, který kopíruje průmět objektu v dané rovině řezu. Tento systém pohybů je generován ve formě G-kódu, který je již vhodný pro použití ve 3D tiskárnách. G-kód je název programovacího jazyka, který řídí NC a CNC obráběcí stroje a stejně tak i 3D tiskárny. Kromě samotného pohybu tiskové hlavy obsahuje G-kód i další parametry tisku, jako je objem a rychlost extruze tiskového materiálu, teplota trysky a teplota vyhřívané podložky, posuvy a další klíčové parametry pro 3D tisk.

Po generování G-kódu jsou data odeslána do 3D tiskárny, kde jsou zpracována pro další použití. Mezi nejrozšířenější software umožňující přípravu pohybů a zajišťující komunikaci s tiskárnou patří Simplify3D, Repetier-Host, Cura či Pronterface. Tyto programy zasílají G-kód do řídící jednotky tiskárny, kde je zpracován pomocí implementovaného firmwaru. V současnosti jsou stále více využívány řídící jednotky vybavené slotem pro SD kartu, které jsou schopné pracovat jako nezávislé zařízení a odpadá tak nutnost propojování 3D tiskárny s počítačem. V tomto případě se G-kód v počítači nahraje na SD kartu, která se zasune do 3D tiskárny a data pro tisk jsou poté získána z této datové karty. Celý proces tvorby modelu je zobrazen na Obr. 25).



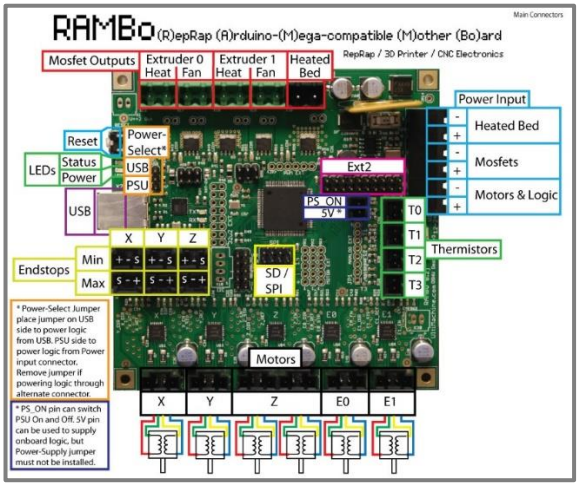
Obr. 25) Proces tvorby 3D modelu [34]

3.6.3 Firmware

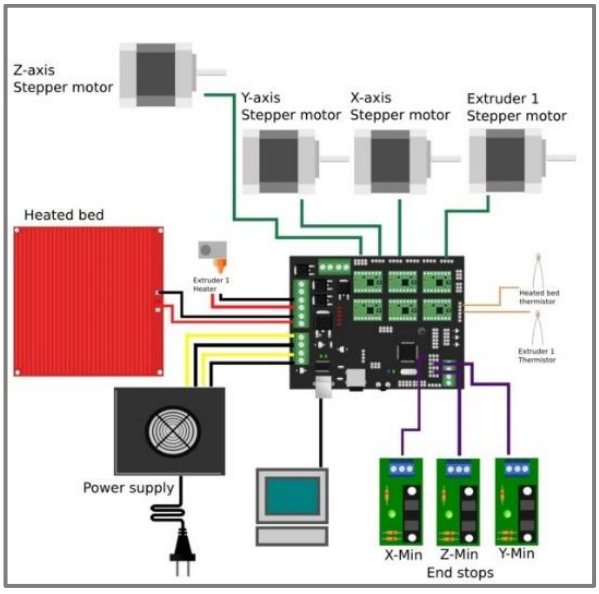
Firmware obsahuje veškerá nastavení dané 3D tiskárny, jako je přesné krokování motorů, přepočty souřadnic, maximální délky drah pojezdů jednotlivých os, bezpečnostní teplotní limity atd. Mezi volně dostupné firmwary, které lze použít i v komerčně prodávaných zařízeních patří Marlin, Repetier, Sprinter či Teacup.

3.6.4 Řídící jednotka

V současnosti je na trhu velké množství různých řídicích jednotek, avšak patrně nejpoužívanější pro stavby RepRap tiskáren je kombinace Arduina řady Mega 2560 a nadstavby RAMPS. Technologicky vyspělejší je RAMBo (RepRap Arduino Mega-compatible Mother Board) nyní ve verzi 1.3L. Jedná se o kompletní základní desku 3D tiskárny, která na jednom 4-vrstvém tištěném spoji obsahuje veškerou elektroniku včetně 5 A4982 driverů pro všechny krokové motory s 1/16 mikrokrokováním, 5 PWM (pulzně šířková modulace) MOSFET tranzistorů, 4 termistory a digitální trimování potenciometrů a mikrokrokování v nastavení firmwaru. Tato řídící jednotka je zobrazena na Obr. 26) a zapojení komponent 3D tiskárny k řídicí desce na Obr. 27).



Obr. 26) Řídící jednotka RAMBo 1.3 [33]

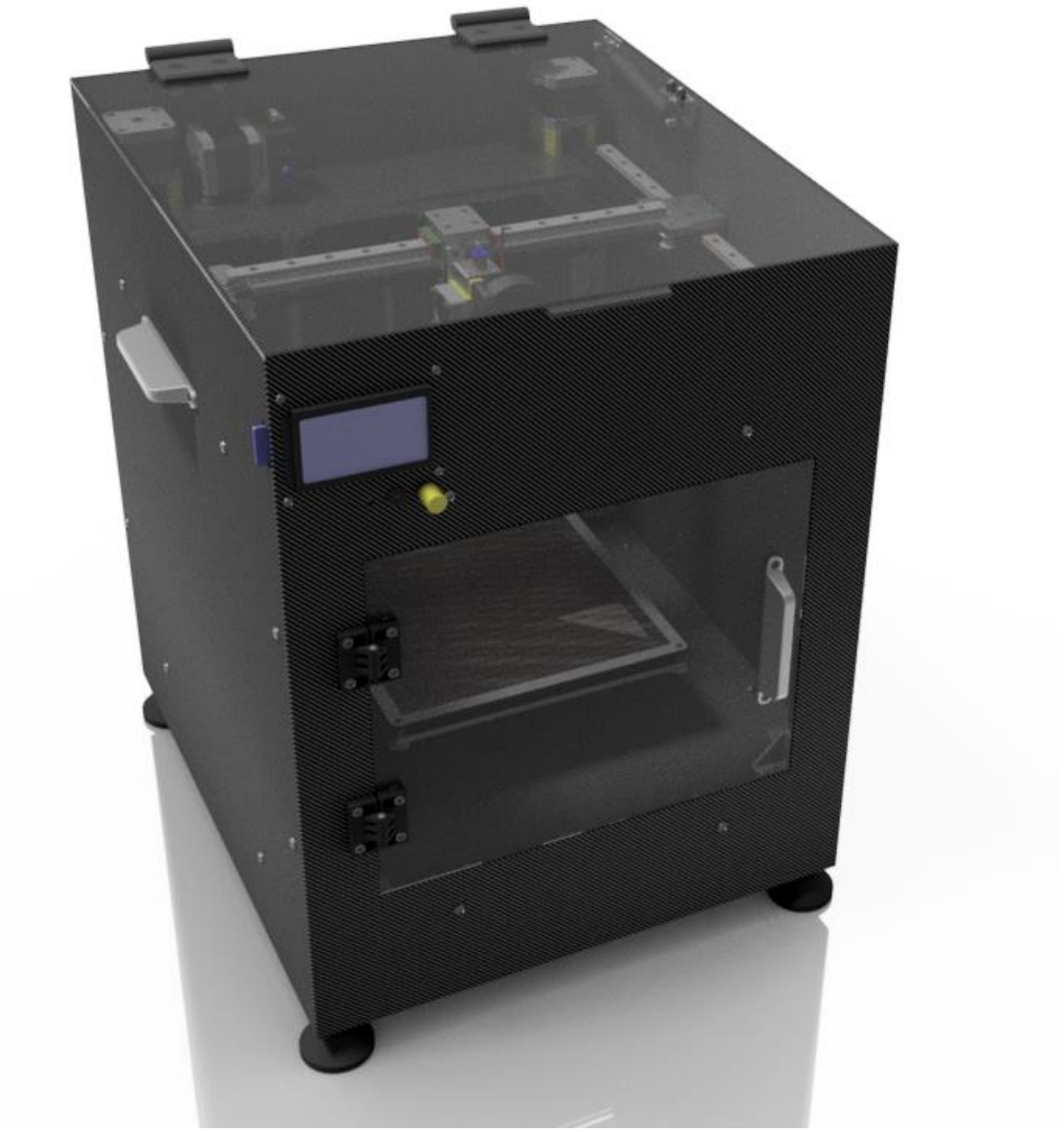


Obr. 27) Grafické znázornění zapojení elektronických prvků 3D tiskárny [43]

4 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ 3D TISKÁRNY

3D tiskárna je komplexním strojem schopným vytvářet trojrozměrné objekty. Většina 3D tiskáren vychází z konstrukcí open source RepRap, proto mají tiskárny obdobný vzhled a disponují podobnými parametry. Většinou se liší pouze tvarem rámu, použitým materiálem a cenou.

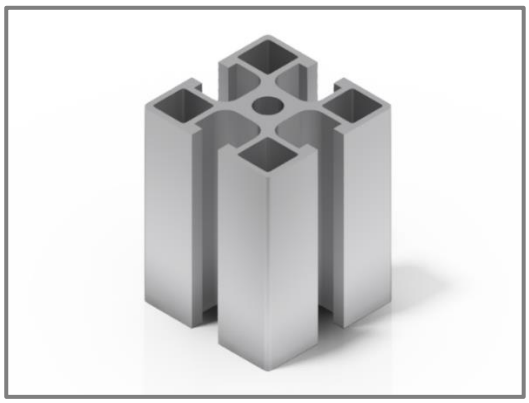
Tato kapitola popisuje základní prvky konstrukčního řešení 3D tiskárny řešené v rámci předkládané práce, uvádí základní schémata jejich řešení a dělí je do jednotlivých sekcí, které se postupně zabývají jednotlivými konstrukčními a řídícími prvky. Finální podoba konstrukčního řešení 3D tiskárny je na Obr. 28).



Obr. 28) Konstrukční řešení 3D tiskárny

4.1 Rám tiskárny

Pro konstrukci rámu byla zvolena stavebnicová konstrukce z hliníkových profilů modulu 30 – drážka 6 od firmy Alutec K&K. Jedná se o hliníkový profil s příčným průřezem 30 x 30 mm zobrazený na Obr. 29). Hliníkový konstrukční systém umožňuje rychlost, jednoduchost realizace a adaptabilitu jednotlivým konstrukčním řešením.



Obr. 29) Profil 103030 od firmy Alutec

Firma Alutec nabízí řezání profilů na požadovanou délku s přesností 0,1 mm, což je pro tyto účely dostatečná přesnost. K fixaci jednotlivých profilů mezi sebou jsou použity fixační úhelníky a čtvercové matice pro drážku 6, a to jak ve variantě s pružinou, tak bez ní. Toto montážní řešení zajišťuje správnou pozici dílů vůči sobě bez možnosti natočení profilu v ose šroubového stroje. Rám je dále vybaven stavěcími patkami pro vyrovnání nerovnosti povrchu, na kterém bude tiskárna umístěna a také pro snížení přenosu vibrací z tiskárny na tento povrch.

Nejdůležitějšími vlastnostmi rámů jsou jejich tuhost a přesnost. Tyto vlastnosti mají přímý vliv na dynamické vlastnosti tiskárny, přesnost polohování a tím pádem i na kvalitu výtisku. Proto je celý rám konstruován s ohledem na zajištění přesné polohy umístění lineárního vedení a minimalizaci rozměrových chyb při výrobě i montáži. Výsledná podoba rámu navržené 3D tiskárny je na Obr. 30).

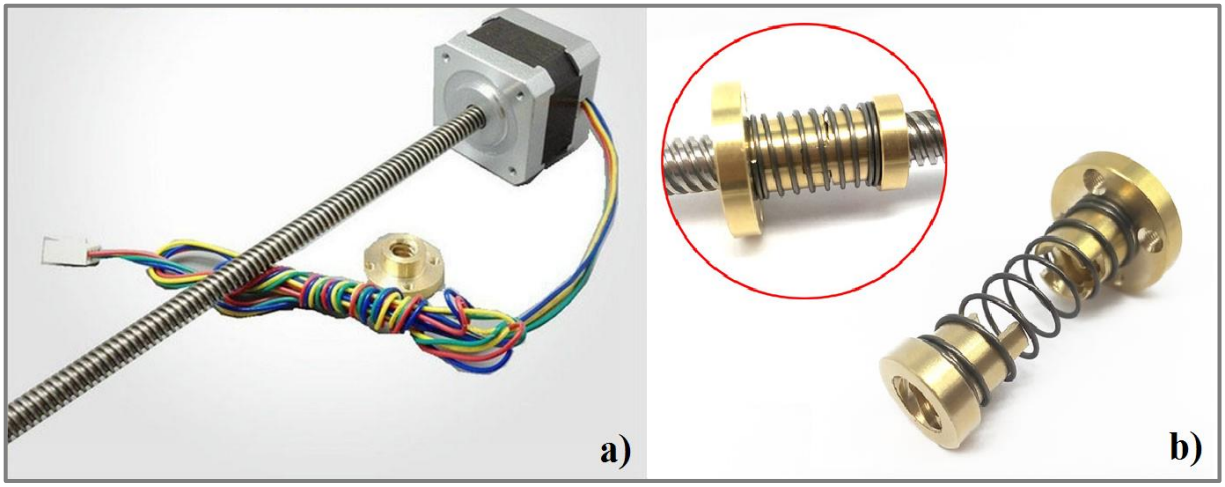
Obr. 30) Rám navržené 3D tiskárny

4.2 Pojezdový systém osy Z

Cílem každé kvalitně zkonstruované 3D tiskárny je bezesporu kvalita a přesnost finálního výtisku. Kvalita výtisku je ovlivňována mnoha faktory, přičemž jedním z nich je rozměrová přesnost. Vzhledem k procesu tvorby 3D modelu existují dva faktory podmiňující přesný výtisk. Prvním je přesnost polohování v rovině X-Y a druhým je přesnost v ose Z. Standardně mají 3D tiskárny 3 stupně nastavení výšky tiskové vrstvy. Nejvyšší (Fast) má výšku 0,3 mm a je určena pro tisk velkých modelů či méně přesných součástí. Střední (Normal) má výšku 0,2 mm a je vhodným kompromisem mezi kvalitou a rychlostí tisku. Nejjemnější vrstva (Detail) má výšku 0,1 mm a je vhodná pro malé a detailní modely.

Polohování v ose Z může být realizováno pomocí ozubeného řemenu, metrického šroubu, trapézového šroubu s maticí nebo pomocí kuličkového šroubu. S ohledem na cenu a dosažitelnou přesnost technologie byla zvolena varianta trapézového šroubu s maticí, která je však konstruována jako matice s vymezením vůle. Zvolené konstrukční řešení zajistí dostatečnou přesnost a opakovatelnost požadované polohy.

Pro polohování v ose Z byl volen krokový motor se zabudovaným trapézovým šroubem v rotoru se statickým krouticím momentem 0,51 Nm a driverem schopným mikrokrokování 1/16. Základní krok tohoto motoru je 1,8°, což se rovná 200 celým krokům na jednu otáčku. Driver je schopný každý krok rozdělit na 16 mikrokroků, což se pak rovná 3200 kroků na otáčku. Trapézový šroub T8 zabudovaný v krokovém motoru má průměr 8 mm a jeho stoupání jsou 2 mm. Krokový motor se zabudovaným trapézovým šroubem a matice s vymezením vůle jsou zobrazeny na Obr. 31).



Obr. 31) a) krokový motor s trapézovým šroubem b) matice s vymezením vůle [39]

Při použití tohoto konstrukčního řešení, tedy krokového motoru se zabudovaným trapézovým šroubem T8 průměru 8 mm a stoupáním 2 mm, dosáhneme při mikrokrokování teoretického posuvu v ose Z o $6{,}25 \cdot 10^{-4}$ mm. Na posun v ose Z o hodnotu výšky vrstvy Detail (0,1 mm) je zapotřebí 160 mikrokroků, neboli 10 celých kroků. Takto detailní posuv je pro účely této práce více než dostatečný a umožní tisk i s menšími hodnotami posuvu pro extra velké detaily malých modelů. Dalším benefitem takto detailního posuvu v ose Z je možnost přesné autokalibrace tiskové plochy. Základní výpočty počtu kroků a hodnot posuvů uvádí rovnice (1) až (3).

Počet kroků potřebný na posuv v ose Z o 1 mm:

$$Z_k = \frac{k \cdot s_m}{P} = \frac{200 \cdot 16}{2} = 1600\ kr. \quad (1)$$

Minimální rozlišitelná vzdálenost na 1 krok:

$$Z_{min} = \frac{1}{Z_k} = \frac{1}{1600} = 0{,}000\ 625\ mm \quad (2)$$

Posuv osy Z na jeden celý základní krok:

$$Z_c = Z_{min} \cdot s_m = \frac{s_m}{Z_k} = \frac{16}{1600} = 0{,}01\ mm \quad (3)$$

kde Z_k je počet kroků systému potřebných k posuv v ose Z o 1 mm, k je počet celých základních kroků motoru na 1 otáčku rotoru, s_m je počet mikrokroků driveru motoru, P je stoupání kuličkového šroubu v mm, Z_{min} je minimální posuv osy Z na jeden krok v mm a Z_c je posuv osy Z na jeden celý základní krok v mm.

Pohyblivým členem tohoto konstrukčního uspořádání je trapézová matice, která je pevně spojená s pojízdnou deskou osy Z. Posuv v této ose probíhá pouze před samotným tiskem, kdy tiskárna kalibruje výšku tiskové plochy od trysky a druhým posuvem v ose Z je posuv po dotisknutí celé vrstvy o hodnotu výšky další vrstvy. Na tuto osu tedy nejsou kladeny velké požadavky na rychlost posuvu a zrychlení. Maximální rychlost této osy (v) bývá přibližně 20 mm/s (=1,2 m/min), které tiskárna dosahuje při prvotním najíždění do kalibračního bodu.

Otáčky n trapézového šroubu jmenovitého průměru d jsou [40]:

$$n = \frac{(v \cdot 1000)}{(d \cdot \pi)} = \frac{(1{,}2 \cdot 1000)}{(8 \cdot \pi)} \cong 48\ ot./min \quad (4)$$

Maximální obvodová rychlost v závitu pro bronzové matice je $v_{max} = 80\ m/min$. Z toho maximální otáčky n_{max} trapézového šroubu jmenovitého průměru d jsou [40]:

$$n_{max} = \frac{(v_{max} \cdot 1000)}{(d \cdot \pi)} = \frac{(80 \cdot 1000)}{(8 \cdot \pi)} \cong 3183\ ot./min \quad (5)$$

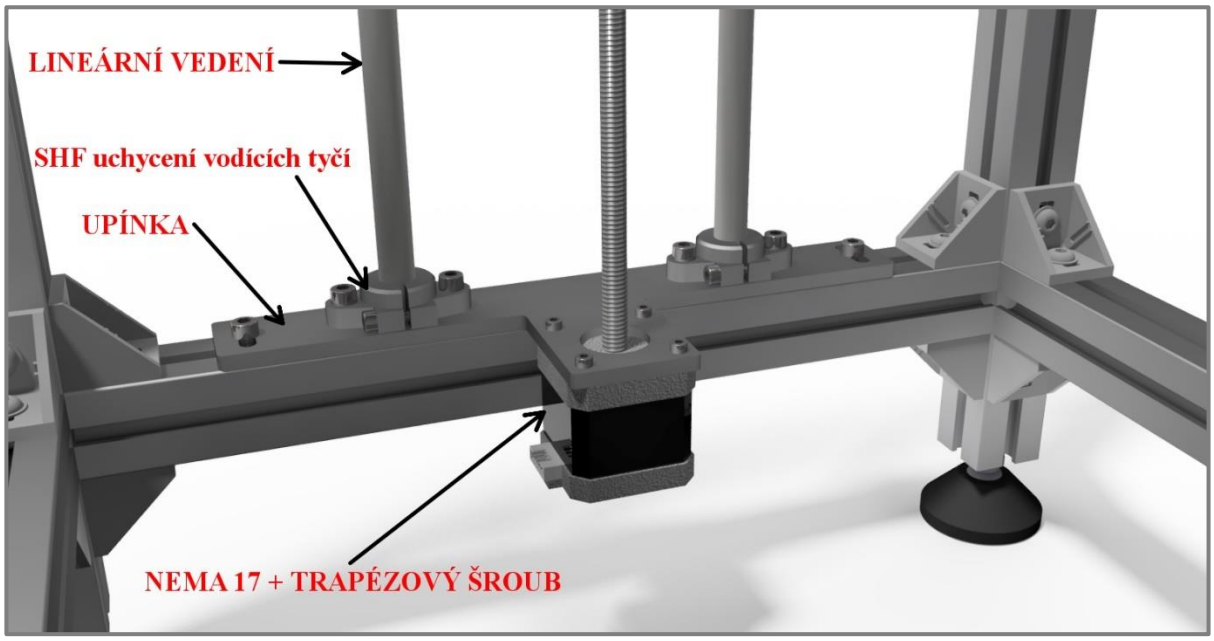
Jak je z porovnání těchto dvou hodnot patrné, rychlosti posuvů v ose Z u 3D tiskáren se ani zdaleka neblíží maximálním otáčkám dovolených výrobcem.

Celá pojízdná deska osy Z váží přibližně 1,5 kg. Pokud k tomu přičteme váhu jedné cívky tiskového materiálu, což je v praxi přibližně maximální množství, jež jde při tisku jedné součásti spotřebovat, zjistíme, že maximální předpokládaná hmotnost všech pohybujících se součástí v ose Z je 2,5 kg. Vzhledem k předpokladu nízké hmotnosti pohybujících se součástí a nízké hodnotě posuvu není dále potřebné počítat krouticí momenty motoru, maximální rychlosti a zrychlení. Toto konstrukční řešení je schopno přenášet pouze sílu působící v ose trapézového šroubu. Je tedy potřeba zajistit i podpůrné vedení, které zajistí dostatečnou stabilitu tiskové plochy a bude schopno přenášet síly a momenty působící i mimo osu.

Konstrukční prvek, který tyto požadavky splňuje je lineární vedení v podobě dvou vodících tyčích průměru 12 mm, jež jsou broušené a indukčně kalené s tvrdostí povrchu 62 HRC. Po těchto vodících tyčích se pohybují uzavřená dvojitá přírubová kuličková pouzdra.

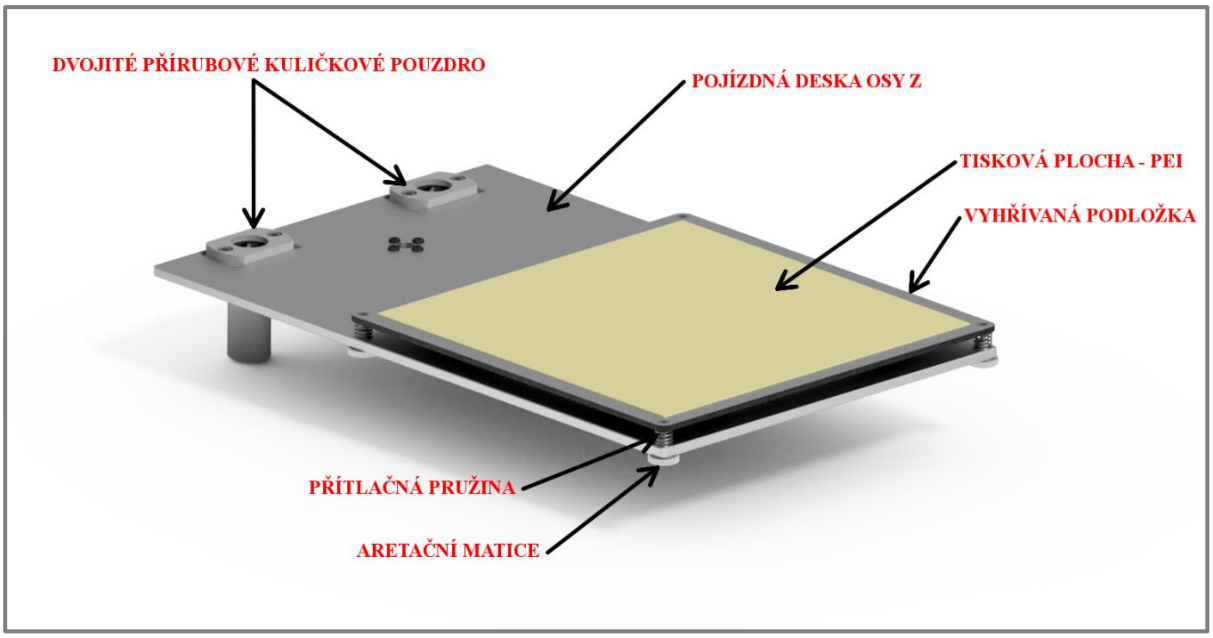
Dvojitá byla volena z důvodu přesnějšího vedení soustavy tiskové plochy, což by mělo zajistit vyšší kvalitu tisku. Tato ložiska jsou pevně spojena s pojízdnou deskou osy Z.

Unikátní konstrukční prvek, který se dosud mezi výrobci FDM 3D tiskáren nevyskytuje, je kompenzace osy Z. V případě, že není zajištěna kolmost mezi rovinou X-Y a pojezdem v ose Z, může při tisku docházet k vychylování této osy a tím pádem i výtisku, který může být deformován. Jedná se především o tisk větších výtisků, kde se úhlové natočení projeví více. Tento problém byl vyřešen pomocí polohovatelné upínky. Jejím pohybem tak lze nastavit dokonalou kolmost mezi vedením v ose Z a tiskovou hlavou pohybující se v osách X a Y. Lineární vedení je k rámu uchyceno pomocí SHF uchycení, která jsou ve vrchní části uchycena přímo k rámu. Ve spodní části jsou k rámu uchycena právě přes upínku, která zajišťuje jejich polohování. K upínce je dále nutné připevnit i krokový motor s trapézovým šroubem, aby byla neměnná osová vzdálenost mezi vodícími tyčemi a trapézovým šroubem. Konstrukční řešení tohoto uzlu je zobrazeno na Obr. 32).



Obr. 32) Kompenzace osy Z

Pojízdná deska osy Z slouží jako platforma pro vyhřívanou tiskovou podložku s tiskovou plochou. Pro účely této práce byla zvolena vyhřívaná tisková podložka MK3 s rozměry 220 x 220 mm a výškou 3 mm. Tato vyhřívaná podložka je z hliníku, což je nezbytné pro správnou funkci indukční kalibrační sondy. Pro hrubou aretaci tiskové podložky slouží 4 rohové aretační matice s pružinami. Pružiny plní úlohu přítlačných členů vyhřívané tiskové podložky. Detailní dostavení polohy je před každým tiskem provedeno pomocí indukční sondy, jež je součástí sestavy tiskové hlavy. Na vyhřívané tiskové podložce je nalepená folie z materiálu PEI (Ultem) o rozměrech 200 x 200 mm. Na tomto materiálu při tisku dobře drží většina plastů používaných pro 3D tisk technologií FDM. Tisková podložka se také stává bezúdržbovou, protože na ni není třeba aplikovat žádné další materiály (lepidlo, lak na vlasy, ABS juice atp.) pro tisk běžně používaných plastů jako v případě použití skleněné tiskové podložky. Sestava osy Z je zobrazena na Obr. 33). Technický výkres pojízdné desky osy Z se nachází v sekci Přílohy této práce.



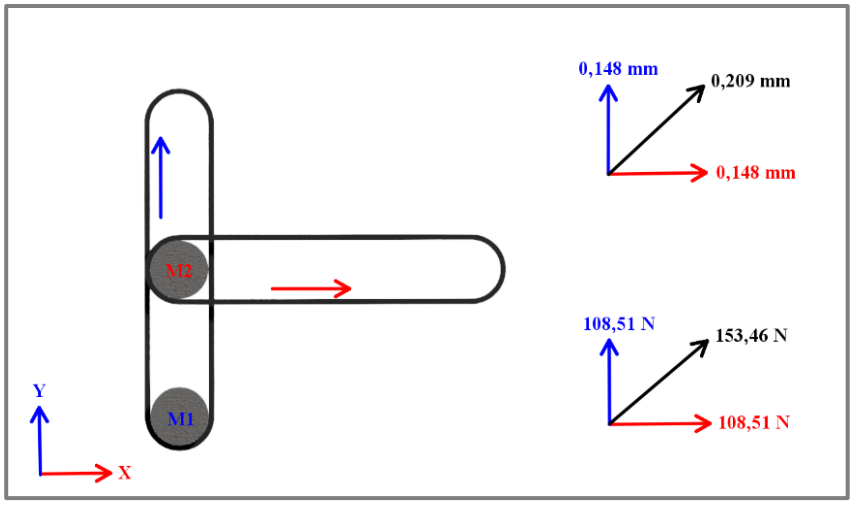
Obr. 33) Sestava osy Z

4.3 Pojezdový systém v rovině X-Y

Pro pohyb v rovině X-Y byl zvolen systém pohybu H-Bot. Tento systém oproti ostatním systémům disponuje výhodami v podobě statického uložení hnacích členů, lepší dynamiky, přesnějšího polohování a větších sil, které je schopen vyvinout za použití stejných motorů. V úvodu této kapitoly budou mezi sebou porovnány systémy H-Bot a klasický systém, kde budou představeny přednosti zvoleného systému na základě ověření maximálních možných sil a minimálních hodnot posuvů.

Klasický systém

U tohoto systému pohybu je každá osa poháněna samostatným motorem nezávislým na druhé ose. Obr. 34) schematicky znázorňuje princip funkce klasického systému a doplňuje jej o vypočtené minimální hodnoty posuvu v jednotlivých osách bez mikrokrokování a o maximální možné silové zatížení v jednotlivých osách. Postup výpočtu těchto hodnot je řešen v rovnicích 6–8.



Obr. 34) Klasický systém pohybu

Minimální posuv v jednotlivých osách při celých krocích:

$$L_{c_{x,y}} = \frac{\pi \cdot r}{180} \cdot \alpha_k = \frac{\pi \cdot 4{,}7}{180} \cdot 1{,}8 = 0{,}148\ mm \tag{6}$$

Minimální posuv při použití driveru schopného mikrokrokování 1/16:

$$L_{m_{x,y}} = \frac{L_{c_{x,y}}}{s_m} = \frac{0{,}148}{16} = 0{,}009\ mm \tag{7}$$

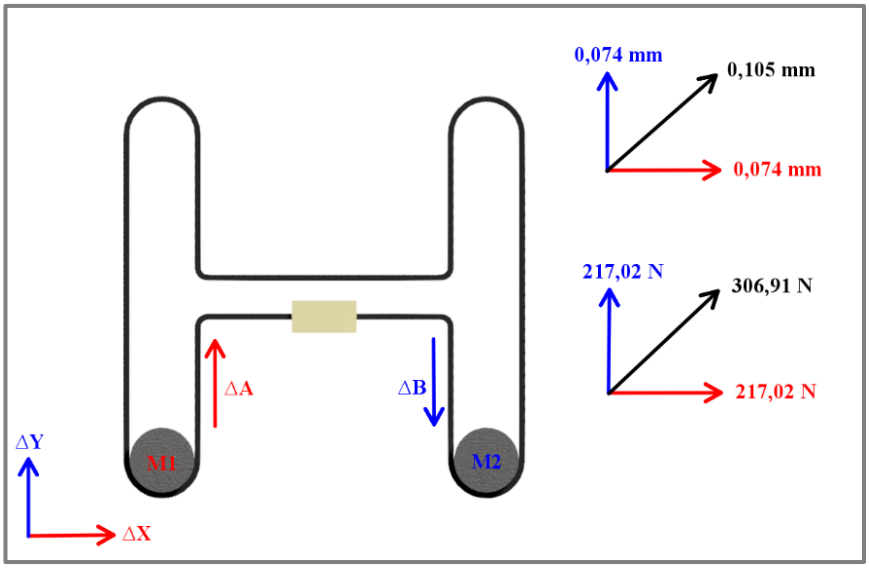
Síla, kterou jsou schopny vyvinout krokové motory (0,51 Nm) pro každou osu:

$$F_{x,y} = \frac{M_k}{r} = \frac{0{,}51}{0{,}0047} = 108{,}51\ N \tag{8}$$

kde $L_{c_{x,y}}$ je minimální vzdálenost v celém kroku, r je poloměr řemenice (GT2 16 zubů) v mm, $\alpha_k$je úhel odpovídající jednomu kroku motoru, $L_{m_{x,y}}$ je minimální vzdálenost na jeden krok při mikrokrokování, M_k je krouticí moment krokového motoru a $F_{x,y}$ je maximální síla.

H-Bot

Tento systém pohybu využívá synchronizovaného pohybu obou motorů na jednom společném řemeni. Obr. 35) schematicky znázorňuje princip funkce systému H-Bot a doplňuje jej o vypočtené minimální hodnoty posuvu v jednotlivých osách bez mikrokrokování a o maximální možné silové zatížení v jednotlivých osách. Postup výpočtu těchto hodnot je řešen v rovnicích 9–14.



Obr. 35) Systém pohybu H-Bot

Obecné pohybové rovnice pro systém pohybu H-Bot [44]:

$$\Delta X = \frac{1}{2}(\Delta A + \Delta B), \qquad \Delta Y = \frac{1}{2}(\Delta A - \Delta B) \tag{9}$$

$$\Delta A = \Delta X + \Delta Y, \qquad \Delta B = \Delta X - \Delta Y \tag{10}$$

Jak je z rovnic patrné, u tohoto typu pohybového systému je třeba počítat s oběma motory při výpočtu polohy v dané ose. Pro posuv v ose X a Y tedy platí:

$$\Delta x = \frac{1}{2}\left(\frac{\pi \cdot r}{180} \cdot \alpha_{k1} + \frac{\pi \cdot r}{180} \cdot \alpha_{k2}\right), \qquad \Delta y = \frac{1}{2}\left(\frac{\pi \cdot r}{180} \cdot \alpha_{k1} + \frac{\pi \cdot r}{180} \cdot \alpha_{k2}\right) \tag{11}$$

Minimální posuv v jednotlivých osách při celých krocích:

$$L_{c_{x,y}} = \frac{1}{2}\left(\frac{\pi \cdot r}{180} \cdot \alpha_{k1,2}\right) = \frac{1}{2}\left(\frac{\pi \cdot 4{,}7}{180} \cdot 1{,}8\right) = 0{,}074\ mm \tag{12}$$

Minimální posuv při použití driveru schopného mikrokrokování 1/16:

$$L_{m_{x,y}} = \frac{L_{c_{x,y}}}{s_m} = \frac{0{,}074}{16} = 0{,}0046\ mm \tag{13}$$

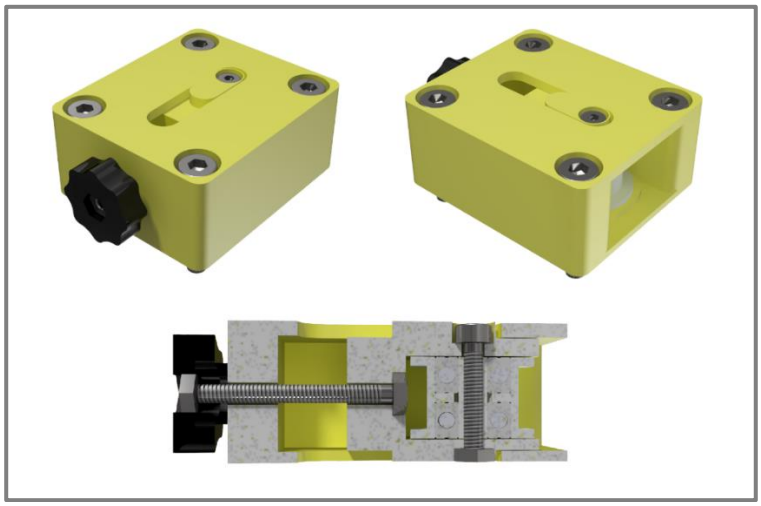
Síla, kterou jsou schopny vyvinout krokové motory (0,51 Nm) pro každou osu:

$$F_{x,y} = \frac{2 \cdot M_k}{r} = \frac{2 \cdot 0{,}51}{0{,}0047} = 217{,}02\ N \tag{14}$$

kde Δx je přírůstek v ose X, Δy je přírůstek v ose Y, α_{k1} je úhel kroku prvního motoru, α_{k2} je úhel kroku druhého motoru, $\alpha_{k1,2}$ je společná hodnota kroku obou motorů.

Výše uvedené výpočty potvrzují výhody systému H-Bot. Pro polohování v rovině X-Y byly použity stejné motory jako pro polohování v ose Z, tudíž krokové motory s přírubou Nema 17 s krokem 1,8° a krouticím momentem 0,51 Nm. Pro přenos krouticího momentu na lineární posuv je použit synchronní řemen typu GT2 tloušťky 6 mm, který obíhá okolo řemenic GT2 se 16 zuby o průměru 9,4 mm. Tento řemen má díky profilu zubů oproti ostatním řemenům plynulejší chod bez vůlí při reverzaci směru. Kladky, které nejsou hnané, jsou hladké se stejným průměrem jako kladka GT2 se 16 zuby. Tyto kladky mají v sobě zalisovaná dvě ložiska pro plynulejší chod a jsou přes podložku, která zajišťuje správnou výšku kladky, přišroubované k soustavě pojezdového systému. Kladky i řemenice mají vyvýšené okraje, jež zajišťují správné vedení řemene.

Součástí hnacího systému je i napínací mechanismus řemene. Správné napnutí řemene je důležité pro přesný chod tiskové hlavy a pro z toho plynoucí dobrou kvalitu výtisku. Soustava napínání řemene se skládá převážně z 3D tištěných dílů. Pro plynulý chod řemene je součástí soustavy kladka s ložisky, okolo které řemen obíhá a napínání probíhá pomocí stavěcího šroubu. Celá sestava je zobrazena na Obr. 36).

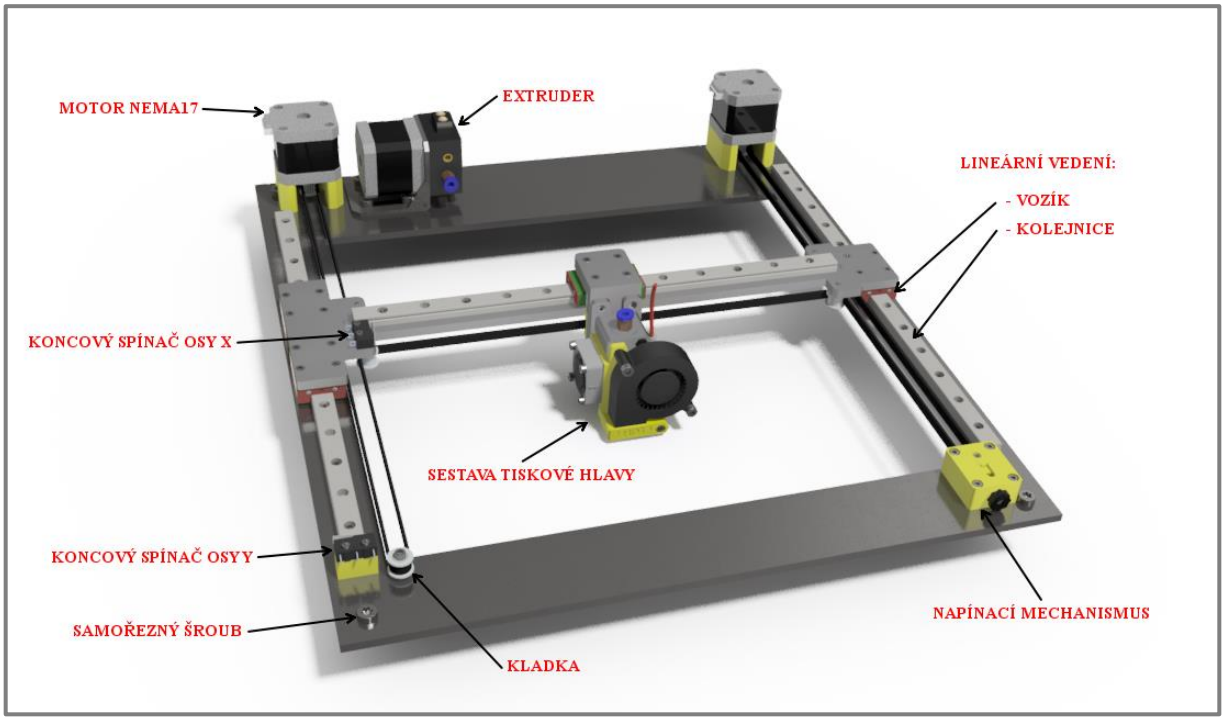


Obr. 36) Sestava napínání řemenu

Jak již bylo uvedeno v předchozí kapitole, která se zabývala pojezdovým systémem osy Z, pro dobrou kvalitu výtisku, a hlavně pro jeho správné rozměry je velice důležité, aby byl zajištěna dokonalá kolmost os. Toto konstrukční řešení přichází s novým přístupem ke konstrukci FDM 3D tiskáren stavebnicové konstrukce, jež bylo nazváno „nezávislé H-Bot horní gantry“. Je to hybridní konstrukce, která v sobě spojuje výhody stavebnicové konstrukce a konstrukce z vypalovaných plechů. Celá sestava pojezdu v rovině X-Y je nezávislým konstrukčním prvkem, který je s rámovou konstrukcí pevně spojen pomocí 4 samořezných šroubů k tomuto účelu určených umístěných v rozích plechu pojezdu v rovině X-Y. Nezáleží tak na dokonalé přesnosti sestavení rámu, neb kolmost os X a Y bude vždy zaručena z důvodu tohoto konstrukčního přístupu. Dostatečnou tuhost celého systému zajišťuje miniaturní lineární vedení HIWIN ve formě lineárních kolejnic MGNR12 a vozíků MGN12H.

Systém H-Bot má však jednu konstrukční vlastnost, se kterou musí být při navrhování pohybových soustav, a především vedení, počítáno. Při pohledu na Obr. 35) vidíme, že pokud chceme pohnout vozíkem ve směru osy X, musí se oba motory točit stejným směrem, a to ve směru proti hodinovým ručičkám. To vytváří velký moment a při málo tuhém vedení může dojít ke příčení os a k jejich zaseknutí. Toto konstrukční řešení tento problém vyřešilo dvojitým vedením na jedné straně, jež by mělo tento moment zachytit a eliminovat tak křížení os.

Z důvodu inkrementálního odměřování polohy jednotlivých os je nutné po zapnutí tiskárny zjistit nulovou polohu. K tomuto účelu slouží skoro u všech FDM 3D tiskáren koncové spínače. Tato konstrukce počítá se dvěma koncovými spínači v ose X a Y, kde do nich při najíždění do nulové polohy narazí systém pojezdu (v ose Y) nebo sestava tiskové hlavy (v ose X). V ose Z není koncový spínač nutný, neb tuto funkci zastává indukční senzor. Celý systém pojezdu v rovině X-Y včetně tiskové hlavy a extruderu je zobrazen na Obr. 37).

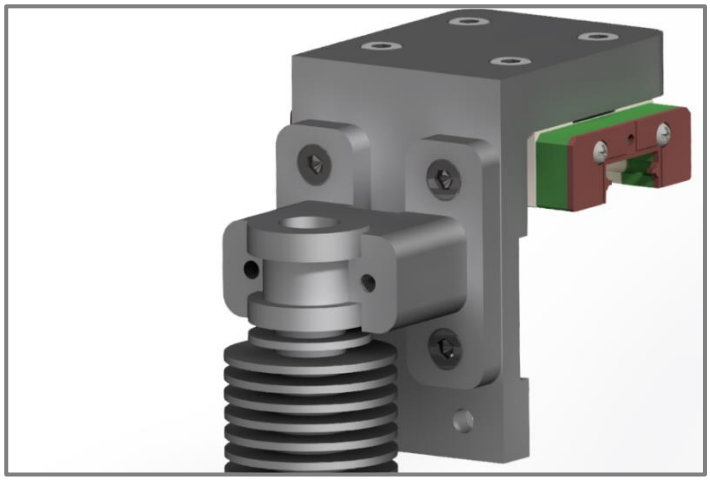


Obr. 37) Sestava pojezdu v rovině X-Y

4.4 Tisková hlava

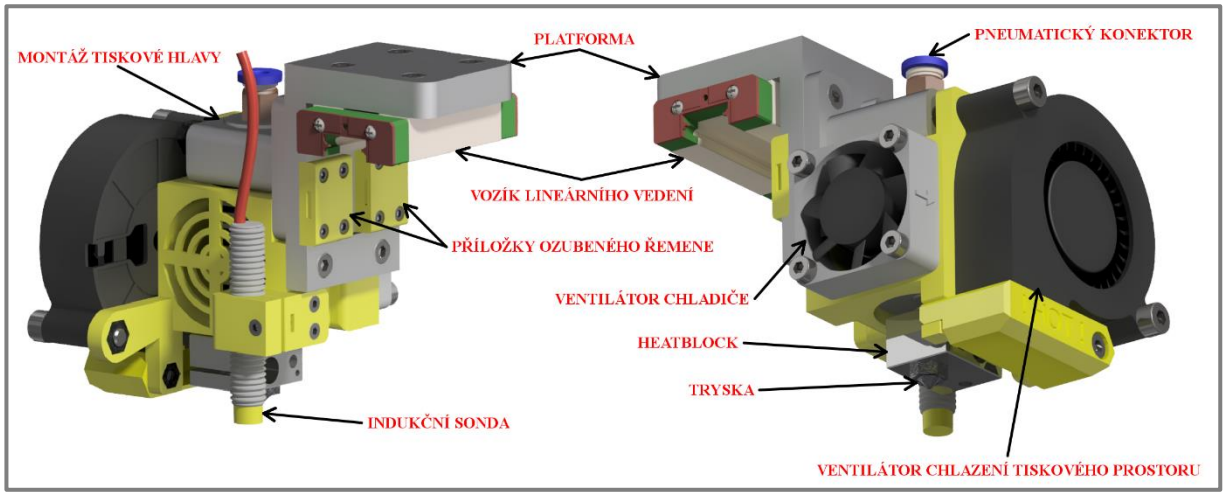
Tisková hlava se skládá z pojízdné platformy, která je pevně spojená s vozíkem lineárního vedení, který se pohybuje po kolejnici, sestavy HotEndu, indukční sondy, ventilátoru chladiče a ventilátoru chlazení tiskového prostoru. Konstrukční řešení využívá nakupovaného HotEndu od firmy E3D a to trysku v6. Tato tryska je velice kvalitně zpracovaná a umožňuje tisk velkého množství materiálů v nadstandardní kvalitě. Autor předkládané práce má s touto tryskou velice kladné zkušenosti.

HotEnd je se soustavou tiskové hlavy spojen pomocí profilové drážky na chladiči HotEndu (viz Obr. 38)



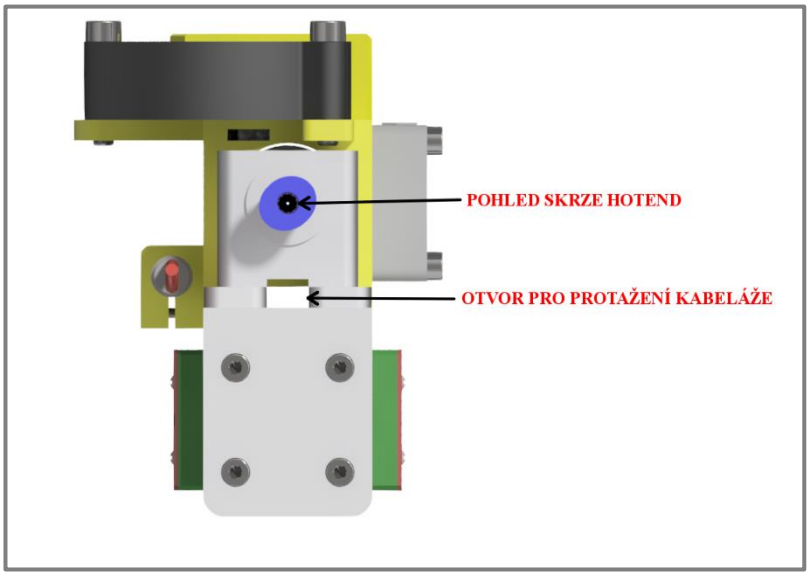
Obr. 38) Uchycení HotEndu E3D v6 k platformě sestavy tiskové hlavy pomocí profilové drážky

Součástí této sestavy je i ventilátor chladiče, ventilátor chlazení tiskového prostoru, indukční sonda a příložky ozubeného řemene. Úchyty těchto komponent byly provedeny pomocí 3D tištěných součástí. Příložky ozubeného řemene slouží k montáži ozubeného řemene. Napínání řemene na tiskové hlavě je jednak složitě řešitelné a také zvýšením hmotnosti pohybujících se hmot se zhoršují dynamické vlastnosti. Proto bylo napínání řemene řešeno jako samostatný modul mimo tiskovou hlavu. Celá sestava tiskové hlavy včetně všech komponent je zobrazena na Obr. 39).



Obr. 39) Konstrukční řešení sestavy tiskové hlavy

Pro jednodušší orientaci kabeláže od elektroniky byla mezi platformou a HotEndem vytvořena mezera, kterou se tyto kabely protáhnou, jak je vidět na Obr. 40).



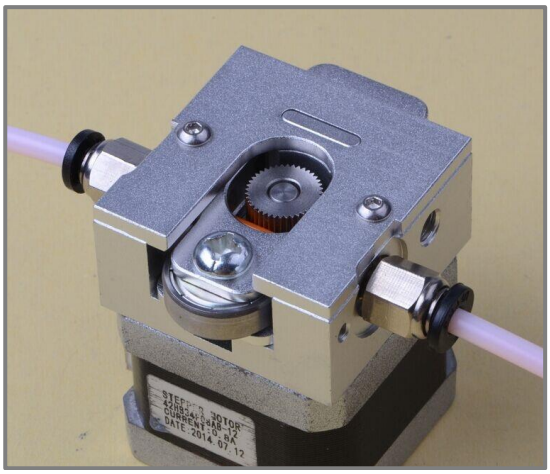
Obr. 40) Horní pohled na sestavu tiskové hlavy

HotEnd E3D v6 má systém výměnných trysek od průměru 0,15 mm do 0,8 mm. Pro účely této práce, která má za cíl konstrukci FDM 3D tiskárny pro tisk materiálů s přídavkem karbonových vláken, je volena tryska z tvrzeného nerezu průměru 0,4 mm kvůli abrazivnosti karbonových vláken jak bylo popsáno v kapitole 2.4.2 této práce.

4.5 Extruder

V konstrukci FDM 3D tiskáren existují dva přístupy k návrhu extruderových sestav. Prvním typem je tzv. direct drive, jenž je systém, který má extruder jako součást tiskové hlavy. Výhodou tohoto uspořádání je minimální vzdálenost mezi tryskou a ozubeným hnacím kolem. Tohle uspořádání je nutné, pokud je po 3D tiskárně požadováno, aby uměla tisknout všechny materiály včetně měkčených plastů. Nevýhodou je vyšší hmotnost pohybujících se hmot a tím pádem horší dynamické vlastnosti. Duhou možností konstrukce je tzv. bowden drive, který má extruder mimo tiskovou hlavu, většinou pevně spojený s rámem, a s tiskovou hlavou je spojen pouze teflonovou trubičkou, kterou je tlačena tisková struna. Tento mechanismus není vhodný pro měkčené materiály, avšak pro běžné plasty používané při 3D tisku metodou FDM je srovnatelný s technologií direct drive. Touto konstrukcí jsme schopni dosáhnout vyšších rychlostí a zrychlení tiskové hlavy.

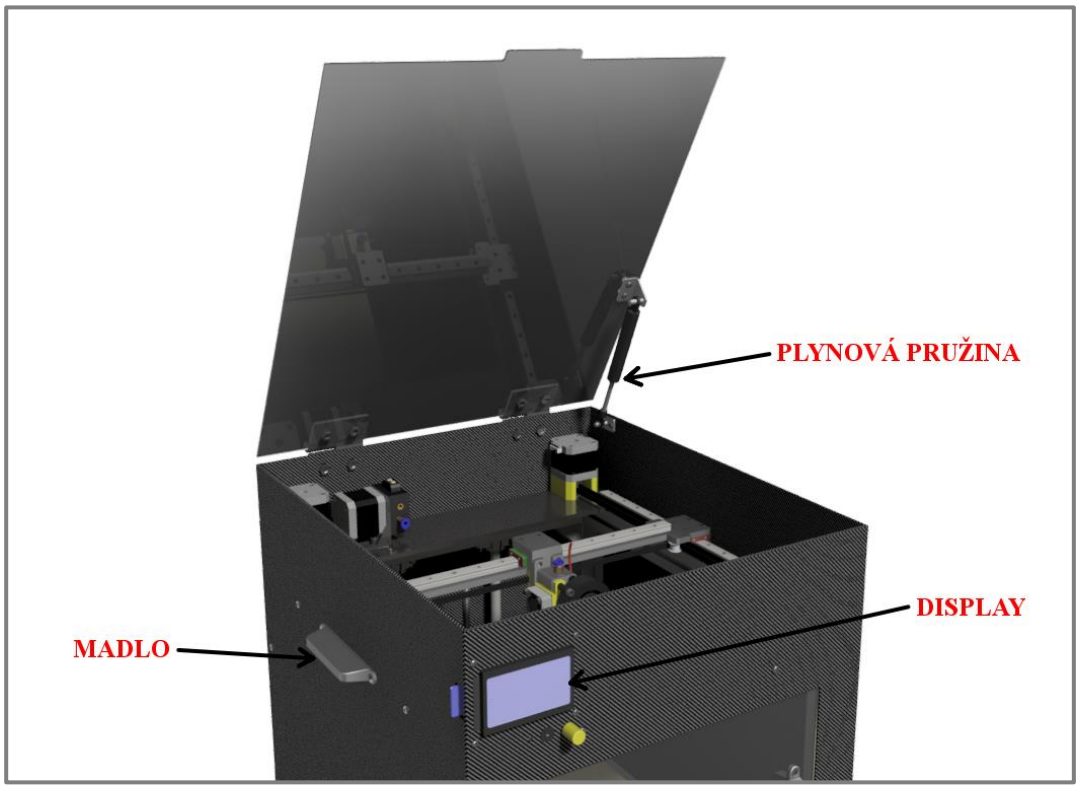
Vzhledem k tomu, že navrhovaná 3D tiskárna je primárně určená pro tisk materiálů s přídavkem karbonových vláken a tyto struny jsou vždy velice pevné, použijeme pro konstrukci tohoto zařízení bowden drive extruder. Zvolené konstrukční řešení využívá nakupovaného dílu, jímž je „bulldog extruder“. Tento extruder je velice pevný s dobrou regulací přítlaku tiskové struny na ozubené hnací kolo. Toto ozubené hnací kolo je poháněno krokovým motorem Nema 17 s krokem 1,8° a krouticím momentem 0,51 Nm. Sestava extruderu je zobrazena na Obr. 41).



Obr. 41) Bulldog extruder s krokovým motorem Nema17 [39]

4.6 Krytování

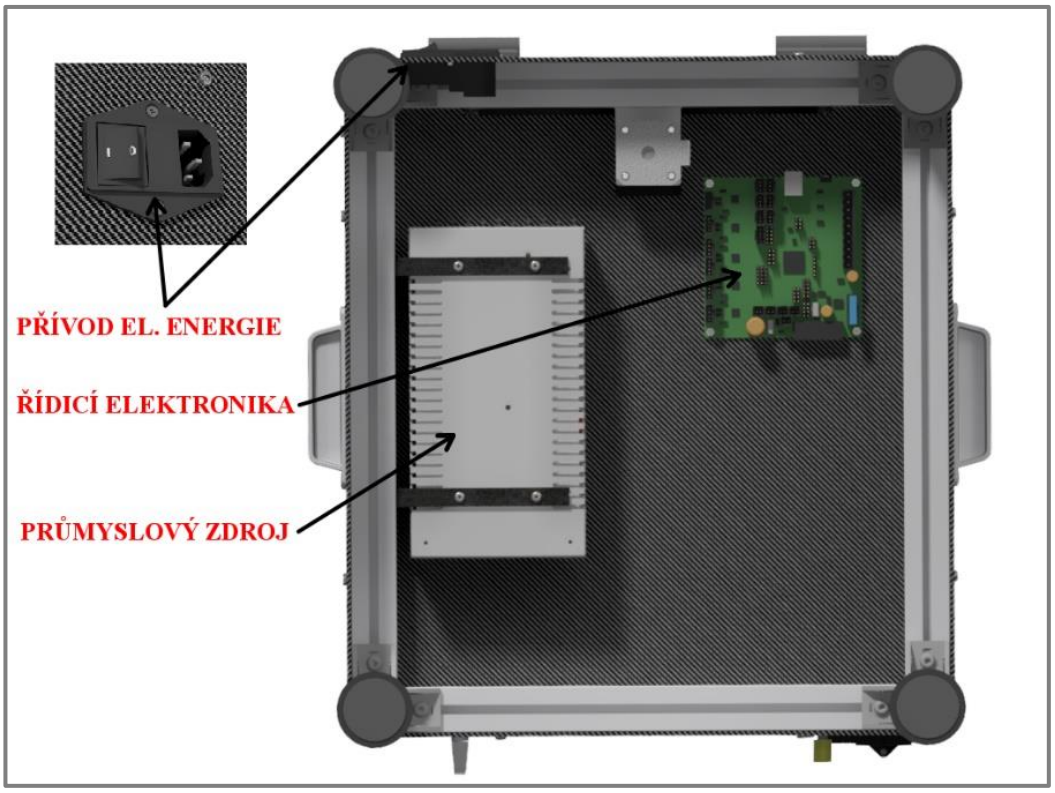
Z estetických a bezpečnostních důvodů bylo provedeno kompletní zakrytování celé 3D tiskárny. Toto zakrytování je provedeno pomocí laserem řezaných dílů z extrudované desky z materiálu polyetylentereftalátu-glykolu (PET-G) v tloušťce 3 mm. Tyto desky jsou čiré a pro docílení profesionálního vzhledu celé tiskárny, jež bude navíc korespondovat s určením této tiskárny, jsou desky polepeny karbonovou folií. Pouze deska víka tiskárny a dveře tiskárny budou ponechány čiré. Pro servisní úkony je víko tiskárny otevíratelné a je opatřeno plynovou pružinou, která při otevření drží víko ve stálé pozici. Pro lepší manipulaci s tiskárnou jsou na bočních stranách madla, která jsou skrze krytování pevně spojená s rámem. Toto konstrukční řešení je zobrazeno na Obr. 42).



Obr. 42) 3D tiskárna se zvednutým víkem

4.7 Elektronika

Pro napájení celé 3D tiskárny je použit průmyslový zdroj o výkonu 350W a napětí 12V, který s rezervou stačí na napájení vyhřívané podložky, krokových motorů, topného tělesa trysky a elektroniky. Pro řízení celé tiskárny je použita řídicí jednotka RAMBo (RepRap Arduino Mega-compatible Mother Board) ve verzi 1.3L, jež je detailně popsána v kapitole 3.6.4. Ovládání 3D tiskárny může probíhat buď přes připojený počítač nebo přes LCD display s ovládacím kolečkem (Obr. 42). Elektronika se nachází mimo tiskový prostor, aby byla chráněna před zvýšenými teplotami.



Obr. 43) Spodní pohled na 3D tiskárnu – řešení elektroniky

5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Tato kapitola popisuje návrh a realizaci experimentu pro porovnání standardně používaných materiálů pro 3D tisk, jakými jsou například ABS, PLA, PET a další v porovnání s materiály vyztuženými karbonovými vlákny.

5.1 Mechanické vlastnosti polymerů

Mechanické vlastnosti materiálů jsou prakticky čtyři (pevnost, pružnost, plasticita a houževnatost), ale mechanických charakteristik, které poskytují důležité informace pro jejich použití, je mnohem více. Chování polymerních materiálů vzhledem k mechanickým vlastnostem je velice komplexní záležitost. Polymery se mohou chovat jako sklo, tekutina, guma nebo jako měkká a pružná pevná tělesa. Toto chování polymerních materiálů závisí na jejich molekulární struktuře. Polymery, které mají svou strukturu ve tvaru prostorové sítě se mají tendenci chovat více křehce než polymery, které takovou strukturu nemají. [35] [36]

Mechanické charakteristiky nejsou absolutní konstantou, ale jsou to veličiny, které závisí i na přípravě a tvaru zkušebních těles, na podmínkách zkoušky apod. Pro experimentální určení těchto vlastností jsou vyrobena zkušební tělesa, na kterých je zkoušen vliv vnější síly. Mechanické charakteristiky, které jsou uváděny v materiálových listech jednotlivých materiálů, jsou stanoveny experimentálně na normalizovaných zkušebních tělesech zhotovených za předepsaných podmínek. [35] [36]

Mechanické charakteristiky lze rozdělit podle různých hledisek. Z časového hlediska je dělíme na krátkodobé, jejichž stanovení netrvá déle než několik minut, a dlouhodobé, které vyjadřují vlastnosti polymerů z dlouhodobého hlediska až 10^5 hodin. Dále můžeme charakteristiky dělit dle charakteru působící síly na statické, kde na těleso působí klidná síla a na dynamické, kde na zkušební těleso působí síla proměnlivá s časem. Posledním dělením je dle způsobu namáhání a zde jsou mechanické charakteristiky rozděleny na tahové, tlakové, ohybové, smykové a v krutu. [36]

5.2 Statické namáhání

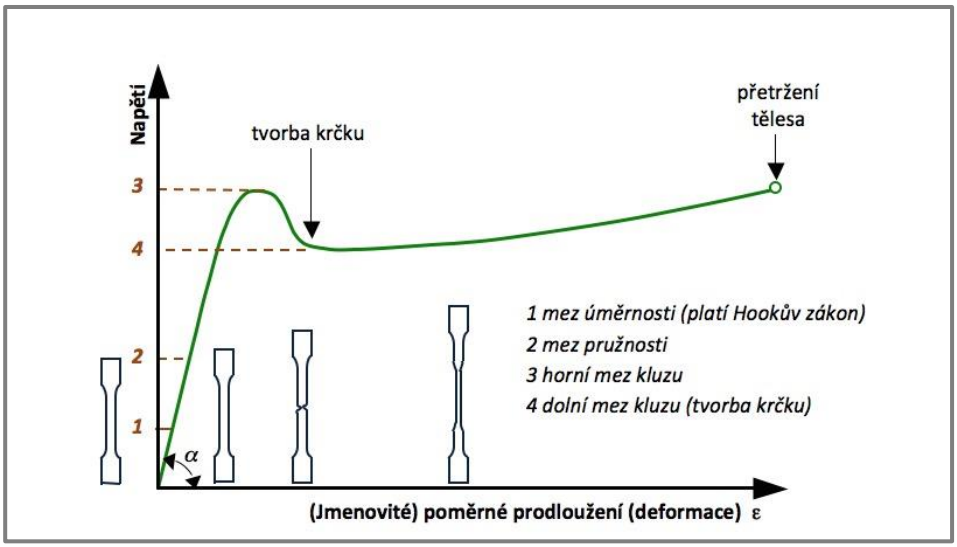
Při namáhání zkušebních těles dochází k jejich deformaci v důsledku působení vnější síly. V případě, že se zkoušené těleso vrátí do původního tvaru, mluvíme o elastické (pružné) deformaci. V případě, že se těleso po odstranění působící síly do původního tvaru již nevrátí, mluvíme o tzv. plastické (trvalé) deformaci. Polymerní materiály mají vzhledem k jejich struktuře deformační chování složitější než u ostatních materiálů. Na vnější namáhání reagují tak, že deformace obsahuje vždy složku elastickou i plastickou, a navíc ještě deformaci zpožděně elastickou (viskoelastickou). Jedná se o tzv. tečení za studena neboli kríp. Z tohoto vyplývá, že celková deformace polymerů je časově závislá. Při krátkodobém zatěžování se polymer chová jako tuhý a pevný materiál, zatímco při dlouhodobém zatěžování je jeho deformace větší a materiál je poddajný. [36]

Kríp není jediným důsledkem viskoelastického chování polymerů. Pokud po určité době přestane na těleso působit napětí, má zdeformované těleso snahu vrátit se do nedeformovaného stavu. Tento následný jev se nazývá elastické zotavení neboli zpětný kríp. Další jev, jenž je pozorovatelný u polymerů je tzv. relaxace napětí. Počáteční změna tvaru polymerního tělesa je

určena elastickou složkou deformace. V závislosti na čase je pak k udržení konstantní deformace polymeru potřebné stále nižší napětí. Z výše uvedeného je zřetelné, že pro polymerní materiály je charakteristická časově zpožděná reakce na okamžité působící vnější napětí. Při krátkodobém zatěžování budou hodnoty mechanických charakteristik nabývat zcela jiných hodnot než v případě dlouhodobého zatěžování. Krátkodobé zkoušky mají pouze informativní charakter a slouží k ověřování stálosti vlastností materiálu a k porovnávání materiálů mezi sebou. Praktický význam mají dlouhodobé zkoušky, které se používají pro konstrukční výpočty. [36]

5.2.1 Tahové vlastnosti polymerů

Nejzákladnějšími charakteristikami materiálu jsou jeho tahové charakteristiky. Pokud je zkušební těleso vystaveno jednoosému namáhání v tahu, je možné sledovat průběh deformace, resp. poměrného prodloužení, v závislosti na normálovém napětí pomocí deformační křivky. Tato křivka je určována experimentálně a poskytuje důležité informace o vlastnostech materiálu (Obr. 44). [36]



Obr. 44) Deformační křivka [36]

Zkušební těleso je upnuto do čelistí zkušebního stroje a na těleso je buďto manuálně nebo automaticky, dle druhu stroje, připevněn průtahoměr. Během zkoušky se zaznamenává závislost působící síly (F) na poměrném prodloužení zkoušeného vzorku. [36]

Pro zhodnocení mechanických vlastností zkoušených materiálů se používá smluvní napětí (σ) a poměrné (relativní) prodloužení (ε), resp. jmenovité poměrné prodloužení (ε_t).

$$\sigma = \frac{F}{S_0}\ [MPa] \tag{15}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0} \cdot 100\ [\%] \tag{16}$$

$$\varepsilon_t = \frac{L_t}{L} \cdot 100\ [\%] \tag{17}$$

Kde F je velikost působící síly [N], S_0 je původní průřez zkušebního tělesa [mm^2], L_0 je počáteční měřená délka zkušebního tělesa [mm], ΔL_0 je zvětšení počáteční měřené délky [mm],

L je upínací vzdálenost mezi čelistmi [mm] a L_t je zvětšení upínací vzdálenosti mezi čelistmi [mm].

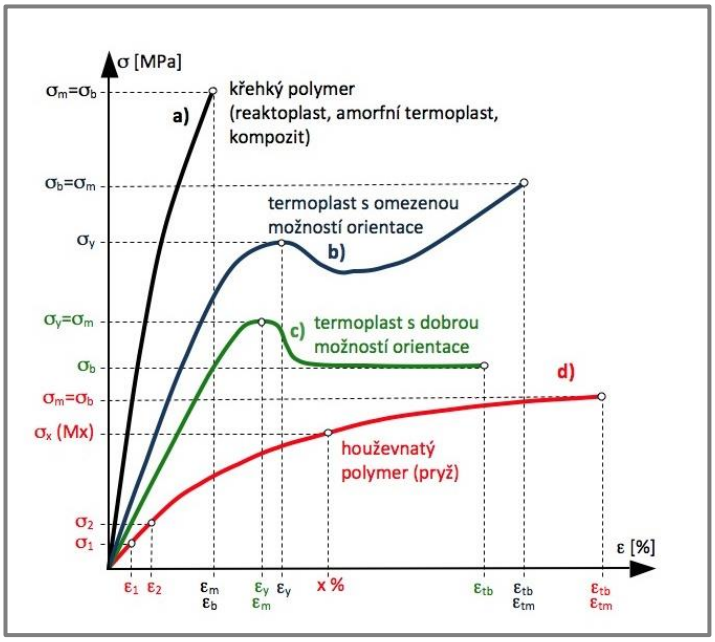
Z deformační křivky jsou určovány pevnostní charakteristiky jako je mez pevnosti, napětí na mezi kluzu a napětí při přetržení.

Mez pevnosti (σ_m) je maximální napětí v tahu, které odpovídá největší síle (F_{max}) naměřené v průběhu zkoušky. Hodnota je stanovena na základě rovnice:

$$\sigma_m = \frac{F_{max}}{S_0}\ [MPa] \tag{18}$$

Napětí na mezi kluzu (σ_y) je napětí, při kterém začíná vznikat plastická deformace a začíná se tvořit tzv. krček, který se dále s rostoucím napětím rozšiřuje. Toto napětí bývá považováno za horní hranici přípustného napětí při provozu součásti. Jejím překročením totiž vznikají velké trvalé deformace. U semikrystalických plastů je napětí na mezi kluzu shodné s mezí pevnosti. (Obr. 45), křivka c). [36]

Napětí při přetržení (σ_b) je napětí, při kterém dojde k přetržení zkušebního tělesa. U křehkých polymerů (např. amorfních termoplastů, reaktoplastů a kompozitů) často bývá shodné s napětím na mezi pevnosti (Obr. 45), křivka a). [36]



Obr. 45) Deformační křivky různých polymerů [36]

Modul pružnosti (E) je další důležitou charakteristikou materiálů, jenž vyjadřuje tuhost. Čím je hodnota modulu pružnosti vyšší, tím je vyšší tuhost materiálu. Hodnota modulu pružnosti se stanovuje z deformačních křivek v oblasti, kde platí tzv. Hookův zákon, který říká, že deformace je přímo úměrná napětí materiálu a kde je jednoznačně určitelná lineární závislost napětí (σ) na poměrném prodloužení (ε). Rovnice modulu pružnosti:

$$\mathrm{E}=\frac{\sigma}{\varepsilon}\ [MPa] \tag{19}$$

5.3 Tahová zkouška dle ČSN EN ISO 527

3D tisk plastů nemá žádnou normu, která by popisovala jejich zkoušení. Proto pro účely této práce je použita norma pro obecné zkoušení plastů a plastových kompozitů. V rámci experimentální části této práce byla provedena tahová zkouška dle ČSN EN ISO 527, jejímž cílem bylo porovnat mezi sebou vybrané materiály běžně používané pro 3D tisk a materiály s přídavkem karbonových vláken.

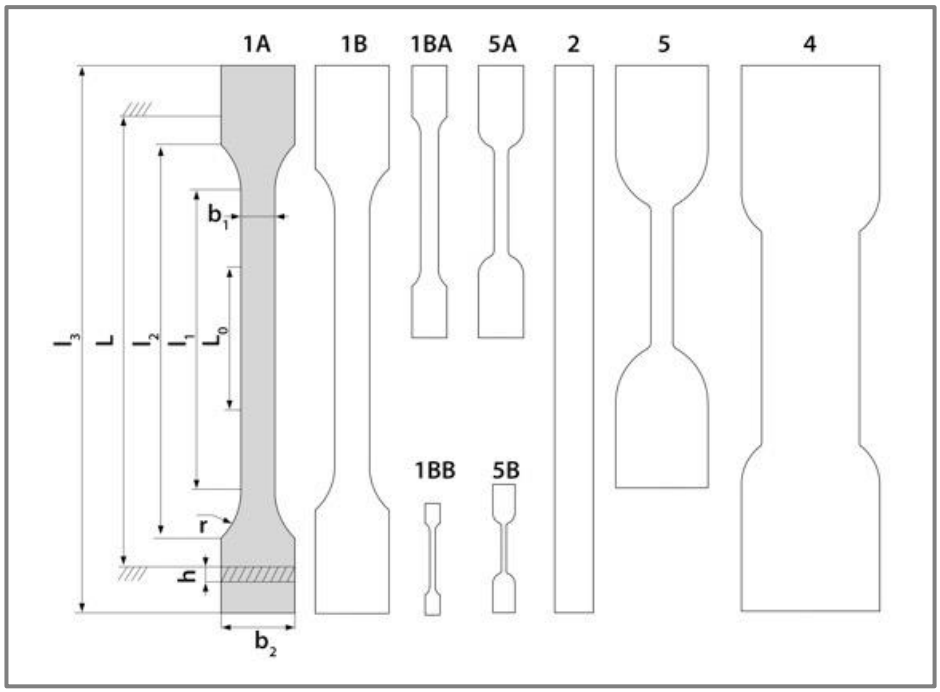
Tato norma stanovuje obecné zásady pro stanovení tahových vlastností plastů a plastových kompozitů. Metody uvedené v této normě se používají k vyhodnocování chování zkušebních těles při namáhání v tahu a pro stanovení meze pevnosti v tahu, modulu pružnosti v tahu a dalších tahových charakteristik ze závislosti napětí v tahu/poměrné prodloužení za daných podmínek. [37]

Zkušební těleso je protahováno ve směru své hlavní podélné osy konstantní zkušební rychlostí do jeho porušení nebo do okamžiku, kdy napětí (zatížení) nebo deformace (prodloužení) dosáhnou předem zvolené hodnoty. Během zkoušky se měří zatížení působící na zkušební těleso a prodloužení. [37]

Obr. 46) Průběh tahové zkoušky na zařízení Zwick Z020

5.3.1 Zkušební vzorky

Norma udává, že kdykoli je to možné, používají se zkušební tělesa tvaru oboustranných lopatek typu 1A a 1B (viz Obr. 47). Typ 1A se používá pro vstřikovaná víceúčelová zkušební tělesa a typ 1B pro mechanicky obráběná zkušební tělesa. Pro účely tahové zkoušky 3D vytištěných vzorků bylo použito těleso 1A, jehož rozměry udává tabulka 2.



Obr. 47) Tvary zkušebních těles [36]

Tab 2) Rozměry zkušebního tělesa 1A

	Typ zkušebního tělesa	**1A**
l3	Celková délka	170
l1	Délka zúžené části s rovnoběžnými hranami	80±2
r	Poloměr	24±1
l2	Vzdálenost mezi rozšířenými částmi s rovnoběžnými hranami	109,3±3,2
b2	Šířka konců	20,0±0,2
b1	Šířka zúžené části	10,0±0,2
h	Doporučená tloušťka	4,0±0,2
L0	Počáteční měřená délka (preferovaná)	75,0±0,5
L	Počáteční vzdálenost mezi čelistmi	115±1

5.3.2 Tiskové parametry

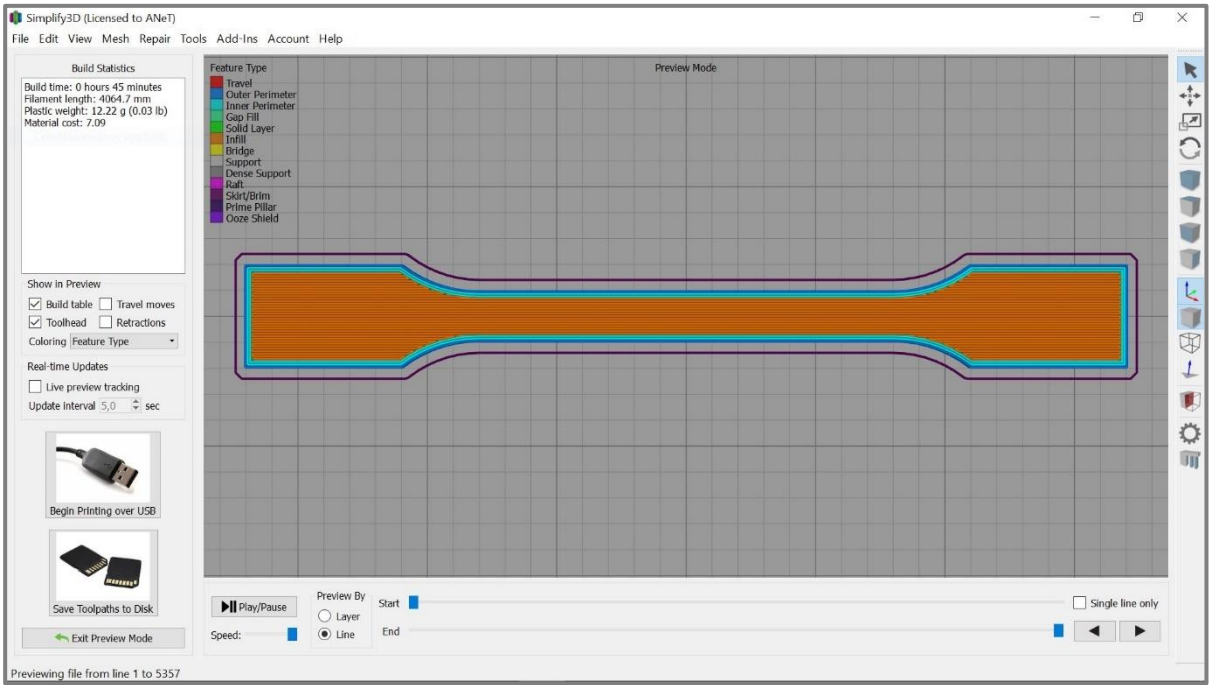
Jak již bylo uvedeno výše, FDM 3D tiskárna formuje součást tak, že je plastová struna natavena v trysce na teplotu vyšší, než je teplota tavení materiálu ze kterého je struna vyrobena a poté je materiál skrze tuto trysku vytlačován do pracovního prostoru, kde je v tenkých vrstvách nanášen na tiskovou podložku. Tisková hlava se pohybuje v horizontální rovině (X-Y) dokud nedokončí kompletní tisk jedné vrstvy. Po dokončení vrstvy se tisková hlava nebo tisková podložka (záleží na typu konstrukce) posune v ose Z (vertikálně) o výšku jedné vrstvy a proběhne tisk další vrstvy. Tento proces se opakuje až do kompletního vytisknutí celé součásti.

Nastavení tiskových vlastností je klíčovým faktorem úspěšnosti či neúspěšnosti výtisku každé součásti. Kromě teploty trysky a teploty podložky vstupují do procesu další možná nastavení jako například rychlosti tisku, a to jak obrysů, tak výplní, dále šířka extruze, extruzní multiplikátor, počet obrysových vrstev, počet plných vrchních a spodních vrstev, chlazení trysky, chlazení tiskového prostoru a pak obzvláště výplň. U výplně nastavujeme druh výplně

(přímočarý, mřížka, trojúhelníkový, včelí plástev/šestihranná struktura atd.), procento výplně a procento překrývání výplně s obrysovými vrstvami.

Pro účely tahové zkoušky, jejímž cílem bylo porovnání materiálů mezi sebou byla zvolena tato tisková nastavení:

První skupina nastavení je společná pro všechny vzorky, aby byly zajištěny stejné podmínky pro všechny zkoušené materiály. Protože je zkoušené těleso při tahové zkoušce namáháno pouze ve směru své hlavní podélné osy, bylo voleno jako nejvhodnější vyplnění vzorku z plna (100 % výplň) a to pouze v orientaci 0° a 180°, tudíž pouze ve směru hlavní podélné osy. Tímto nastavením se předpokládá, že budou mezi sebou porovnávány opravdu jednotlivé materiály, a ne tiskové vlastnosti (např. druhy výplní). Každý vzorek má 3 obvodové vrstvy a žádnou vrchní a spodní vrstvu. Vrchní a spodní vrstvy se tisknou pouze ve výplních typu přímočarý a soustředný, přičemž přímočarý pouze v orientaci -45°, 45°. Je to z vizuálních důvodů a taky aby vrchní vrstva správně, a hlavně kompaktně zakryla výplň. Proto nebyly voleny žádné vrchní/spodní vrstvy, aby byla vlákna tisknuta opravdu jen ve směru své hlavní podélné osy. Výška vrstvy byla volena 0,2 mm, což je nejčastější nastavení při tisku většiny součástí. Rychlosti tisku byly také stejné pro všechny materiály a to 40 mm/s. Snímek obrazovky se vzorkem připraveným pro tisk je zobrazen na Obr. 48).



Obr. 48) 1A vzorek nachystaný pro tisk (software Simplify3D)

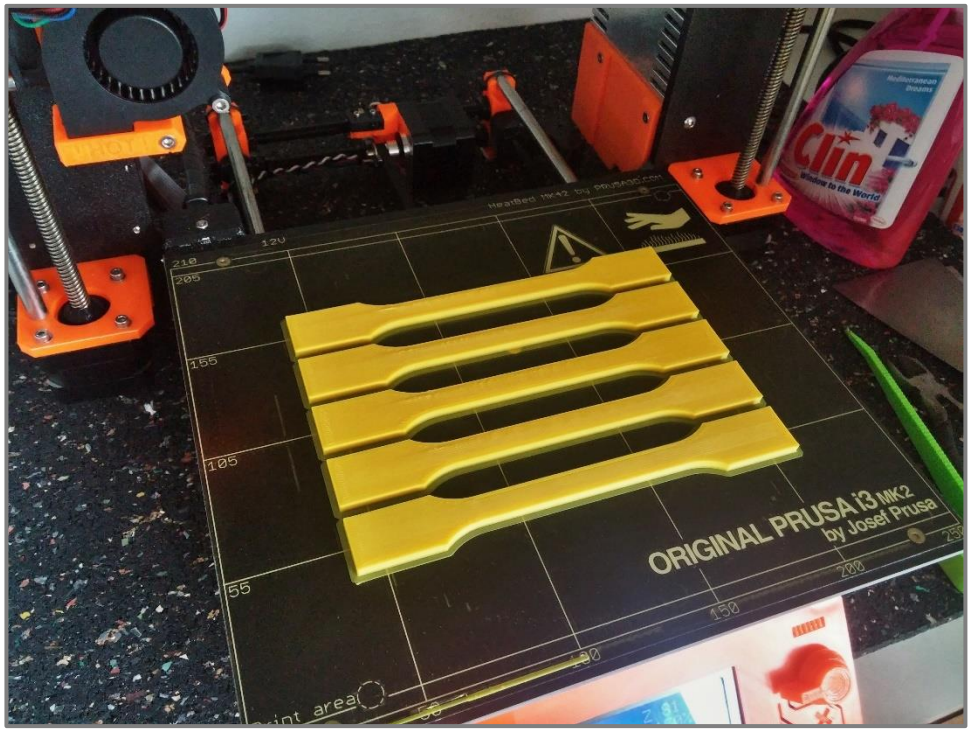
Druhá skupina nastavení je pro každý materiál rozdílná. Jedná se o teplotu trysky a teplotu podložky. Tyto teploty byly voleny podle doporučení výrobce každého materiálu. Dalším individuálním nastavením je lem (skirt), jenž u materiálů jako je ABS a Nylon, které mají velkou teplotní roztažnost, zabrání deplanaci (warping). Tisková nastavení všech materiálů jsou souhrnně zobrazena v tabulce 3:

Tab 3) Vzorky 1A pro tahovou zkoušku

Materiál	Výrobce	Cena v Kč/kg [vč. DPH]	Teplota trysky [°C]	Teplota podložky [°C]	Procento výplně [%]	Orientace výplně	Počet vytištěných vzorků
PLA	Filament PM	545,-	215	55	100	0°, 180°	5
ABS	Filament PM	545,-	255	100	100	0°, 180°	5
ASA	Fillamentum	723,75	255	100	100	0°, 180°	5
PET	Filament PM	605,-	240	90	100	0°, 180°	5
PET/CF	Filament PM	1718,-	240	90	100	0°, 180°	5
Nylon	Fillamentum	1786,25	230	90	100	0°, 180°	3
Nylon/CF	Fillamentum	2851,67	230	90	100	0°, 180°	3
Nylon/Kevlar	Fillamentum	3016,67	230	90	100	0°, 180°	3

Norma ČSN EN ISO 527-1 uvádí, že pro každý zkoušený materiál musí být alespoň 5 vzorků, avšak z důvodu nedostatku vzorového materiálu byly u materiálů Nylon, Nylon/CF a Nylon/Kevlar vytištěny pouze tři vzorky, které sice nejsou dostatečné pro přesnou definici chování jednotlivého materiálu, avšak pro porovnání s ostatními materiály je to množství dostatečné.

Všechny vzorky byly tištěny na FDM 3D tiskárně Prusa i3 MK2 (Obr. 49) a celkový čistý čas tisku zkušebních vzorků pro tahovou zkoušku byl 25h 30min.



Obr. 49) Tisk vzorků 1A z materiálu ABS na zařízení Prusa i3 MK2

5.3.3 Zkoušené materiály

ABS (Akrylonitrilbutadienstyren)

ABS je velice pevný, odolný termoplast, jenž je používaný v mnoha průmyslových odvětvích. Jeho výhodou je mechanická odolnost, odolnost proti nízkým i vysokým teplotám a

chemikáliím (kyseliny, uhlovodíky, oleje) a zdravotní nezávadnost. Jedná se o jeden z nejpoužívanějších materiálů pro 3D tisk metodou FDM s uplatněním od kontroly designu až k výrobě funkčních součástí. Jeho nevýhodou je velká teplotní roztažnost, jež má za následek zvedání výtisků od tiskové podložky a delaminování vrstev. Proto jsou z tohoto materiálu tisknuty převážně menší součásti.

PLA (Polylactic acid – Kyselina polymléčná)

PLA je vedle ABS nejpoužívanějším materiálem pro 3D tisk technologií FDM. Tento termoplastický polyester je získáván z obnovitelných zdrojů, např. z kukuřičného nebo bramborového škrobu a je biologicky odbouratelný v řádu jednotek měsíců. Tento materiál je velmi rozšířen, hlavně kvůli jeho velmi nízké teplotní roztažnosti, která je tak nízká, že ve většině případů není pro tisk potřeba ani vyhřívaná podložka. Ve srovnání s ABS je snadněji a rychleji zpracovatelný při stejných výchozích podmínkách, nicméně výrobky z něj jsou méně odolné vůči vyšším teplotám. Výtisky jsou použitelné maximálně do 60 °C, poté materiál začíná být plastický. Z materiálového hlediska jsou výrobky z PLA oproti ABS méně pružné a mají vyšší lesk.

ASA (Akrylonitril styren akrylát)

Výrobky z materiálu ASA jsou ideální pro výrobu prvních funkčních vzorků před sériovou výrobou, pro funkční prototypování, výrobu nástrojů, ale i pro 3D tisk dílů pro venkovní použití z důvodu vysoké UV stability a dobré rozměrové stálosti. Tento materiál postupně nahrazuje ABS na pozici nejoblíbenějšího všestranného materiálu.

PET (Polyethylentereftalát)

PET je nejbližší alternativou k ABS a PLA. V poslední době si získává velkou oblibu, a to zvláště pro jeho pevnost, stálost a nízkou tepelnou roztažnost. Výtisky z tohoto materiálu mají hezký lesklý povrch a můžou přicházet do styku s potravinami. Materiál je zhruba o třetinu dražší než ABS. Tento materiál je díky malému smrštění při tisku vhodný pro tisk velkých objektů.

PET/CF

Jedná se o materiál vyztužený nasekanými karbonovými vlákny o délce přibližně 10 μm. Výrobní označení tohoto materiálu je CFJet a výrobcem je firma Filament PM. Základem je materiál PET, do kterého je přidáno 20 % karbonových vláken. Materiál se vyznačuje tepelnou odolností, vysokou tuhostí a také vysokou odolností proti nárazům při nízkých teplotách. Výrobky z tohoto materiálu jsou dvakrát tak tuhé, jako kdyby byly vytištěny z PLA a tak se hodí pro mechanicky zatěžované výrobky. Výtisky z materiálu PET s přidaným karbonem mají krásně matnou povrchovou úpravu. Tento materiál se vyznačuje vysokou abrazivností a je potřeba jej tudíž tisknout pomocí trysky z nerezové oceli nebo z tvrzených slitin mědi.

Nylon PA12 (Polyamid)

Nylon 12 je obzvláště vhodný pro aplikace, které vyžadují vysokou únavovou a chemickou odolnost a otěruvzdornost. Tento materiál nabízí ze všech dostupných FDM materiálů nejvyšší houževnatost. Nylon 12 je vhodný pro výrobu přípravků, krytů, panelů a komponentů odolávajícím vibracím. Nevýhodou nylonu je vysoká nasákavost vzdušné vlhkosti, která má za následek špatný tisk z důvodu odpařování vody v rozehřáté trysce a tím tvorbu dutin. Oproti Nylonu PA6, který je levnější, má nižší nasákavost, a tak je vhodný i k delšímu skladovaní mezi jednotlivými tisky.

Nylon/CF

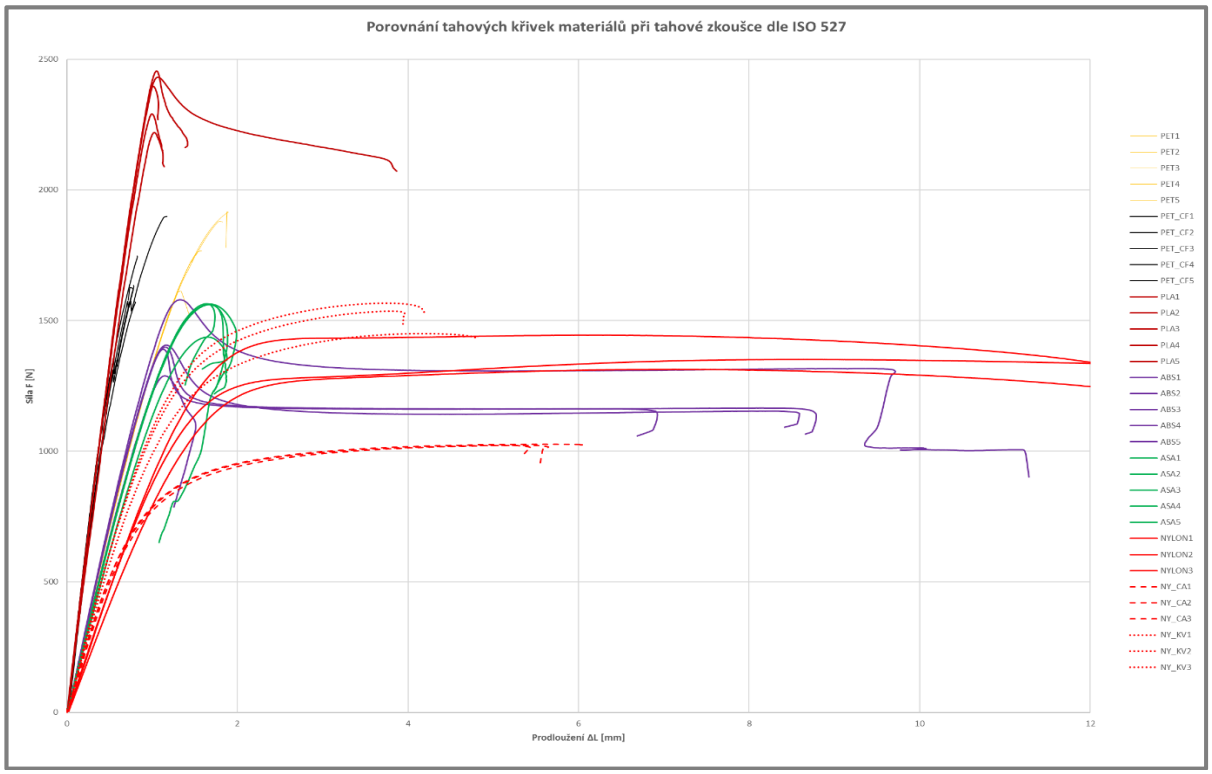
Stejně jako u materiálu PET/CF, i zde se jedná o základní materiál vyztužený karbonovými vlákny. Tento materiál je vyráběn firmou Fillamentum pod obchodním označením Nylon CF15. Karbonová drť je stejně jako u konkurence dlouhá přibližně 10 µm. Největší výhodou této tiskové struny je její vysoká mechanická pevnost a výborná chemická a tepelná odolnost a je proto ideální volbou pro tisk funkčních dílů. Mezi její další výhody patří výborná odolnost vůči nárazu i excelentní reologické (deformační) vlastnosti. Jak již název napovídá, tak struna obsahuje 15 % karbonových vláken. Po konzultaci s výrobcem bylo zjištěno, že se jedná o hmotnostní procento. Ve skutečnosti obsahuje tisková struna přibližně 60 % objemu karbonových vláken. Ze subjektivního pohledu byly výtisky z tohoto materiálu mnohem lehčí než z ostatních materiálů, a to včetně podobného materiálu PET/CF. Získané vzorky tohoto materiálu byly před produkční.

Nylon/Kevlar

Firma Fillamentum vyrábí kromě Nylonu s karbonovými vlákny také Nylon vyztužený aramidovými vlákny pod označením Nylon AF80. Přidáním aramidových vláken do nylonové matrice získáme vysoce otěruvzdorný materiál vhodný pro tisk často namáhaných dílů a díky těmto vláknům mohou být za určitých podmínek použity jako náhrada kovů. Materiál, stejně jako Nylon/CF má kromě vysoké mechanické pevnosti i výbornou tepelnou a chemickou odolnost. Získané vzorky tohoto materiálu byly také před produkční.

5.3.4 Výsledky

Tahová zkouška dle ČSN EN ISO 527 proběhla na zařízení Zwick Z020. Experiment je zaměřen na porovnání pevnosti v tahu výše uvedených materiálů. Na Obr. 50) jsou zobrazeny průběhy tahových křivek všech zkoušených vzorků. V tabulce jež následuje (Tab 4) jsou experimentálně zjištěné hodnoty. Protokol z tahové zkoušky je přiložen v části příloh.



Obr. 50) Průběhy tahových křivek všech materiálů

Tab 4) Hodnoty zjištěné pomocí tahové zkoušky dle ČSN EN ISO 527

Materiál	Vzorek	E modul [N/mm²]	F max [N]	Rm [N/mm²]
PLA	1	3723,76	2290,45	57,26
	2	3564,87	2395,97	59,90
	3	3378,84	2219,44	55,49
	4	3824,03	2431,35	60,78
	5	3887,13	2455,02	61,38
	$\bar{x}$	**3675,73**	**2358,45**	**58,96**
ABS	1	1960,17	1579,63	39,49
	2	1963,10	1389,77	34,74
	3	1989,08	1398,23	34,96
	4	1887,99	1405,92	35,15
	5	1776,32	1288,52	32,21
	$\bar{x}$	**1915,33**	**1412,41**	**35,31**
ASA	1	1867,89	1560,63	39,02
	2	1574,36	1436,66	35,92
	3	1776,60	1562,78	39,07
	4	1743,00	1561,51	39,04
	5	1604,21	1564,26	39,11
	$\bar{x}$	**1713,21**	**1537,17**	**38,43**
PET	1	1839,31	1766,89	44,17
	2	1847,27	1916,16	47,90
	3	1834,28	1879,35	46,98
	4	1876,86	1073,12	26,83
	5	1911,91	1612,08	40,30
	$\bar{x}$	**1861,93**	**1649,52**	**41,24**
PET/CF	1	3619,79	1624,99	40,62
	2	3811,45	1634,63	40,87
	3	3777,54	1747,20	42,68
	4	3685,71	1898,23	47,46
	5	3540,25	1571,85	39,30
	$\bar{x}$	**3686,95**	**1695,38**	**42,19**
Nylon	1	1238,04	1351,28	33,78
	2	1227,55	1443,93	36,10
	3	1071,46	1313,18	32,83
	$\bar{x}$	**1179,02**	**1369,46**	**34,24**
Nylon/CF	1	1394,56	1021,84	25,55
	2	1514,57	1026,85	25,67
	3	1515,62	1022,48	25,56
	$\bar{x}$	**1474,92**	**1023,72**	**25,59**
Nylon/Kevlar	1	1687,02	1536,00	38,40
	2	1659,63	1566,63	39,17
	3	1529,95	1450,24	36,26
	$\bar{x}$	**1625,53**	**1517,62**	**37,94**

Mez pevnosti v tahu

Při bližším prozkoumání tabulky 4 zjistíme, že z běžných materiálů používaných pro 3D tisk technologií FDM, kterými jsou PLA, ABS, ASA, PET a Nylon, má materiál PLA nejvyšší průměrnou mez pevnosti v tahu (*Rm*), odpovídající největšímu zatížení (*Fmax*), které předchází porušení zkušebního vzorku. Druhým nejpevnějším materiálem je PET a dále následují materiály ASA, ABS a Nylon.

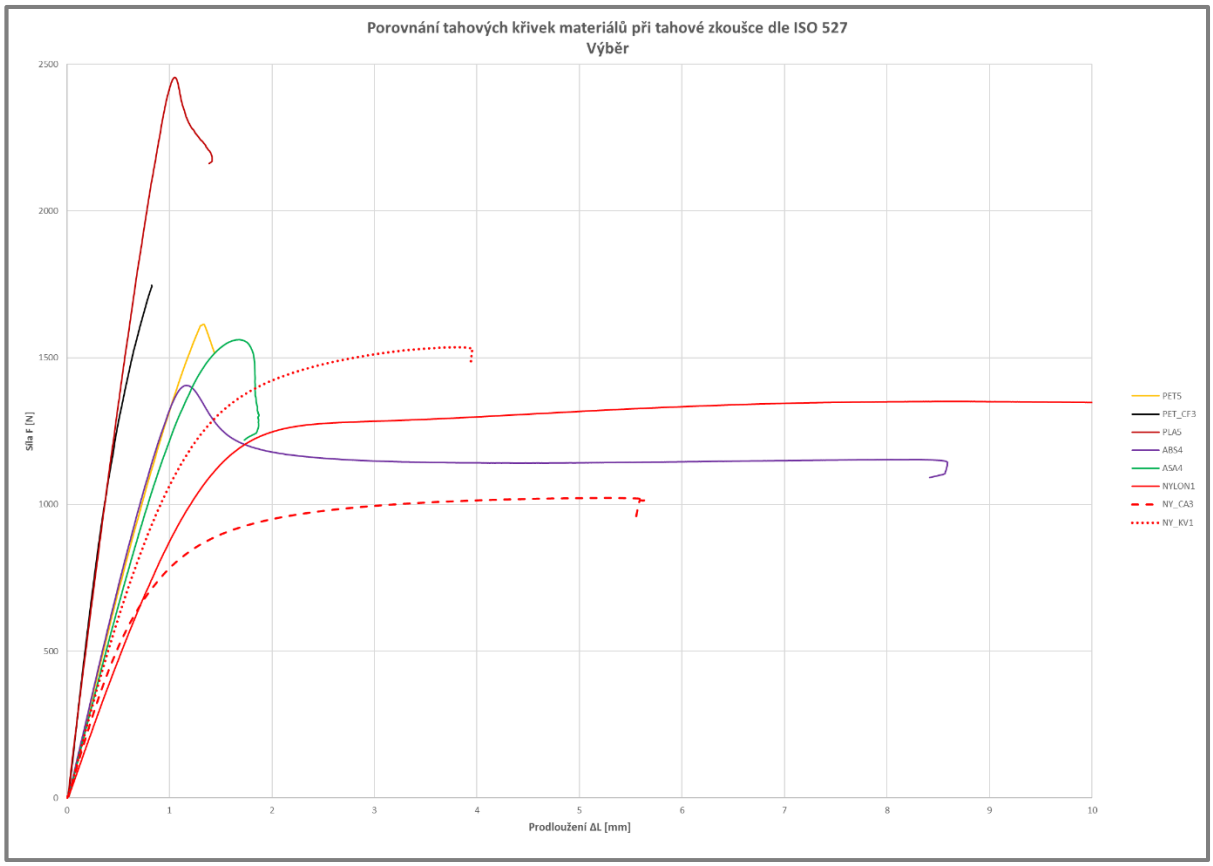
Při porovnání materiálů s přídavkem karbonových vláken oproti jejich čistým základním materiálům, zjistíme že PET/CF má pouze velmi malé zvýšení pevnosti v tahu (*Rm*) oproti základnímu materiálu PET a materiál Nylon/CF má dokonce znatelné snížení pevnosti v tahu (*Rm*) oproti materiálu Nylon. Naopak přidáním aramidových vláken do materiálu Nylon se zvýší pevnost v tahu, avšak jen asi o 10 %.

Modul pružnosti v tahu

Modul pružnosti v tahu (E) geometricky odpovídá směrnici přímkové části diagramu. Tento počáteční přímkový úsek diagramu přísluší pružné deformaci a vyjadřuje úměrnost mezi napětím a deformací podle Hookeova zákona.

Při prozkoumání tabulky hodnot zjištěných pomocí tahové zkoušky dle ČSN EN ISO 527 (Tab 4) zjistíme, že materiál s nejvyšší hodnotou modulu pružnosti v tahu je PET/CF. Srovnatelnou hodnotu Youngova modulu má ještě materiál PLA, který má s materiálem PET/CF hodnotu přibližně dvojnásobnou oproti ostatním materiálům. Nejnižší hodnotu ze všech materiálů má materiál Nylon a jen lehce vyšší jsou materiály s Nylonovou matricí, Nylon/CF a Nylon/Kevlar.

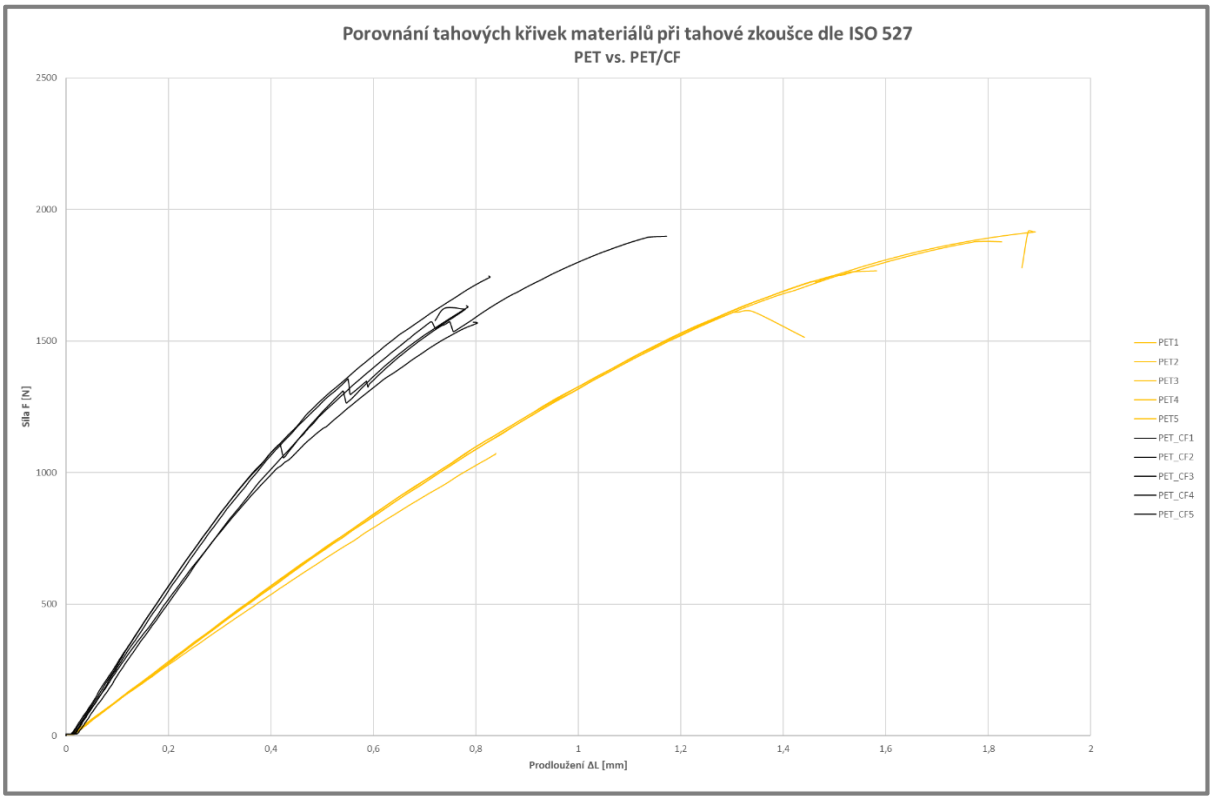
Jak je z Obr. 50) patrné, každý materiál má jiné chování při tahové zkoušce. Pro lepší přehlednost tahových křivek jednotlivých materiálů byly vybrány průměrné tahové křivky a ty byly zaneseny do grafu výběru tahových křivek (Obr. 51). Horizontální osa grafů tahových křivek nemá standardní veličinu napětí (σ) v MPa. Na grafu je vynesena hodnota síly (F) v newtonech z důvodu, že napětí se počítá dle vzorce (15), kde se síla dělí průřezovou plochou vzorku. Z technologie 3D tisku nemůžeme průřezovou plochu prakticky určit, protože nevíme, jak velké jsou ve skutečnosti dutiny mezi jednotlivými vlákny vytlačovaného materiálu. Všechny vzorky mají stejné rozměry, a tudíž se nejvyšší průměrná mez pevnosti v tahu (Rm) teoreticky rovná největšímu zatížení ($Fmax$).



Obr. 51) Výběr z tahových křivek jednotlivých materiálů

Vliv karbonu na tahové vlastnosti

Cílem tohoto experimentu je posoudit vliv karbonových vláken na tahové vlastnosti. Porovnáme proto mezi sebou dva materiály, jeden základní, jímž je materiál PET a druhý vyztužený karbonovými vlákny s matricí ze stejného materiálu, kterým je PET/CF.

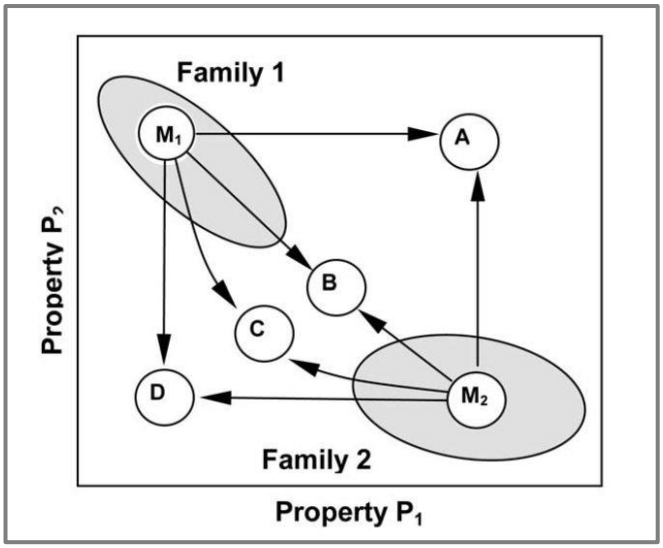


Obr. 52) Porovnání tahových křivek materiálů PET a PET/CF

Jak je z Obr. 52) patrné, oba materiály dosahují srovnatelných největších zatížení (*Fmax*), které předchází porušení zkušebního vzorku. Stejné jsou i tvary deformačních křivek. Při srovnání těchto experimentálně zjištěných tahových křivek s teoretickými na Obr. 45), zjistíme, že se oba materiály porušují křehkým lomem charakteristickým pro křehké polymery, avšak způsob, jakým se vzorky přetrhly byl velice rozdílný. Zatímco zkušební vzorky z materiálu PET/CF se přetrhly na dvě části, tak vzorky z materiálu PET se doslova roztříštily a nebylo možné po zkušební místnosti ani dohledat všechny části přetrženého zkušebního vzorku.

Ashby a Bréchet ve svém výzkumu uvádějí, že v případě, že smícháme dva materiály (M1 a M2), které mají vlastnosti P1 a P2, vznikne jeden ze čtyř výsledných hybridních materiálů, jak je vidět na Obr. 53). Prvním typem hybridního materiálu, jenž může vzniknout smícháním materiálů M1 a M2 je tzv. „The best of both“ neboli nejlepší z obou (bod A). Jedná se o ideální materiál, který přejímá nejlepší vlastnosti obou původních materiálů. Příkladem může být například glazovaná keramika, která přejímá zpracovatelnost a nízkou cenu hlíny a nepropustnost a odolnost skla. Druhým typem hybridního materiálu je tzv. „The rule of mixtures“ neboli pravidlo směsí (bod B). Když jsou v hybridním materiálu kombinovány hromadné vlastnosti jako u konstrukčních kompozitů, často je to nejlepší, co je možno dostat aritmetickým průměrem vlastností jednotlivých materiálů v poměrech ve kterých do výsledného hybridního materiálu vstupují. Třetím typem je tzv. „The weaker link dominates“ neboli slabší vazba dominuje (bod C). Přestože výhody těchto směsí nemusí být vždy působivé,

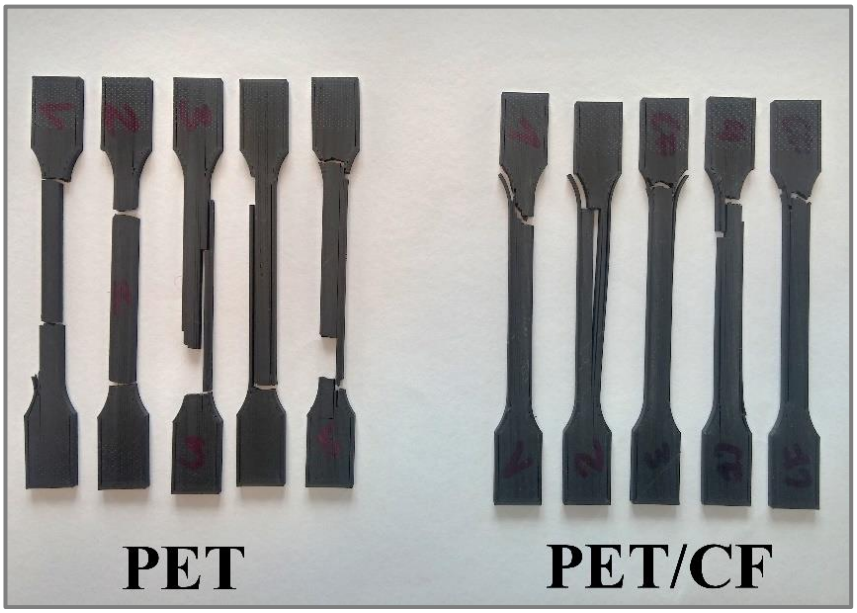
i tak mohou být užitečné. Příkladem může být materiál, od nějž je očekávána vyšší tuhost, ale celkové vlastnosti tohoto materiálu se nachází pod křivkou „The rule of mixture“. Posledním typem je tzv. „The worst of both“ neboli nejhorší z obou (bod D) a je to směs, která přebírá nejhorší vlastnosti obou materiálů a která je nežádoucí. [41]



Obr. 53) Možnosti hybridizace materiálů [41]

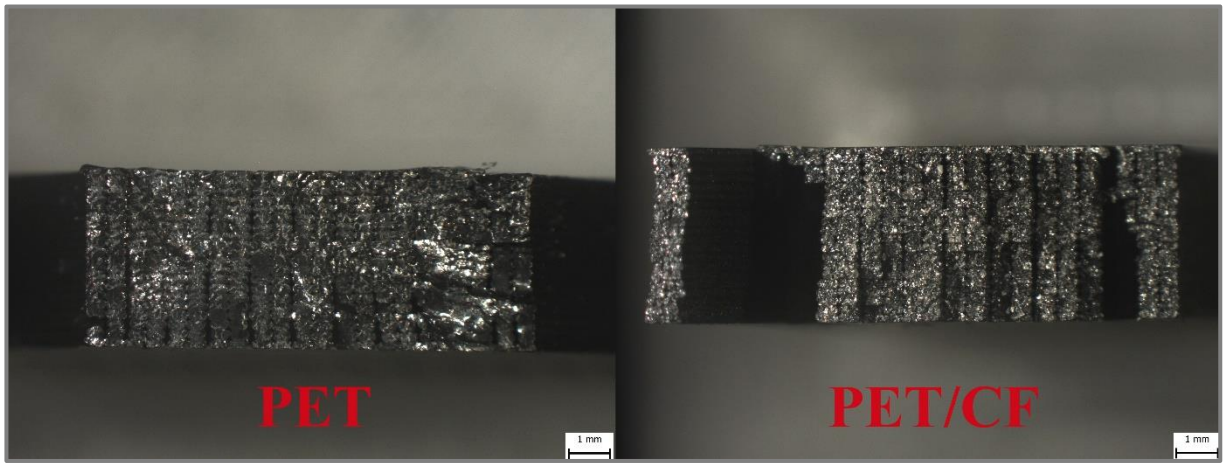
Pokud vezmeme kompozitní materiály jako hybridy, kde základní polymer (materiál 1), v našem případě PET, je smíchán s karbonovými vlákny (materiál 2) a na osu vlastností vyneseme jako vlastnost 1 tuhost a jako vlastnost 2 křehkost, zjistíme že chování tohoto kompozitního materiálu a tím pádem i tvar tahové křivky je opodstatněno. Karbonová vlákna jsou křehká a citlivá na defekty. Tudíž jejich přidáním do směsi získáme sice tužší materiál (vyšší hodnota modulu pružnosti v tahu), ale zároveň i materiál, který je křehčí a vymaže tak přínos karbonových vláken co do pevnosti.

Vzorky těchto materiálů po tahové zkoušce jsou na Obr. 54).

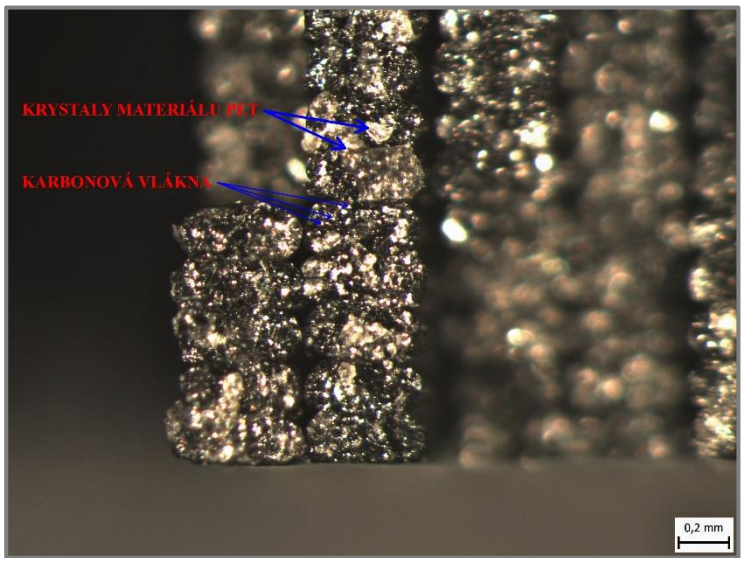


Obr. 54) Srovnání přetržených vzorků materiálů PET a PET/CF

Na fotkách vzorků pořízených pod mikroskopem byly vidět detailní lomové plochy zkoušených materiálů. Materiál PET měl velice lesklou lomovou plochu, zatímco v materiálu PET/CF byla vidět jednotlivá karbonová vlákna a materiál byl spíše matný (Obr. 55). Zajímavé bylo, že všechna viditelná karbonová vlákna byla orientována rovnoběžně se směrem nanášení. Při větším přiblížení materiálu PET/CF (Obr. 56) byly vidět krystaly čirého materiálu PET, který nebyl pravděpodobně dokonale zpracován při tvorbě struny výrobcem.



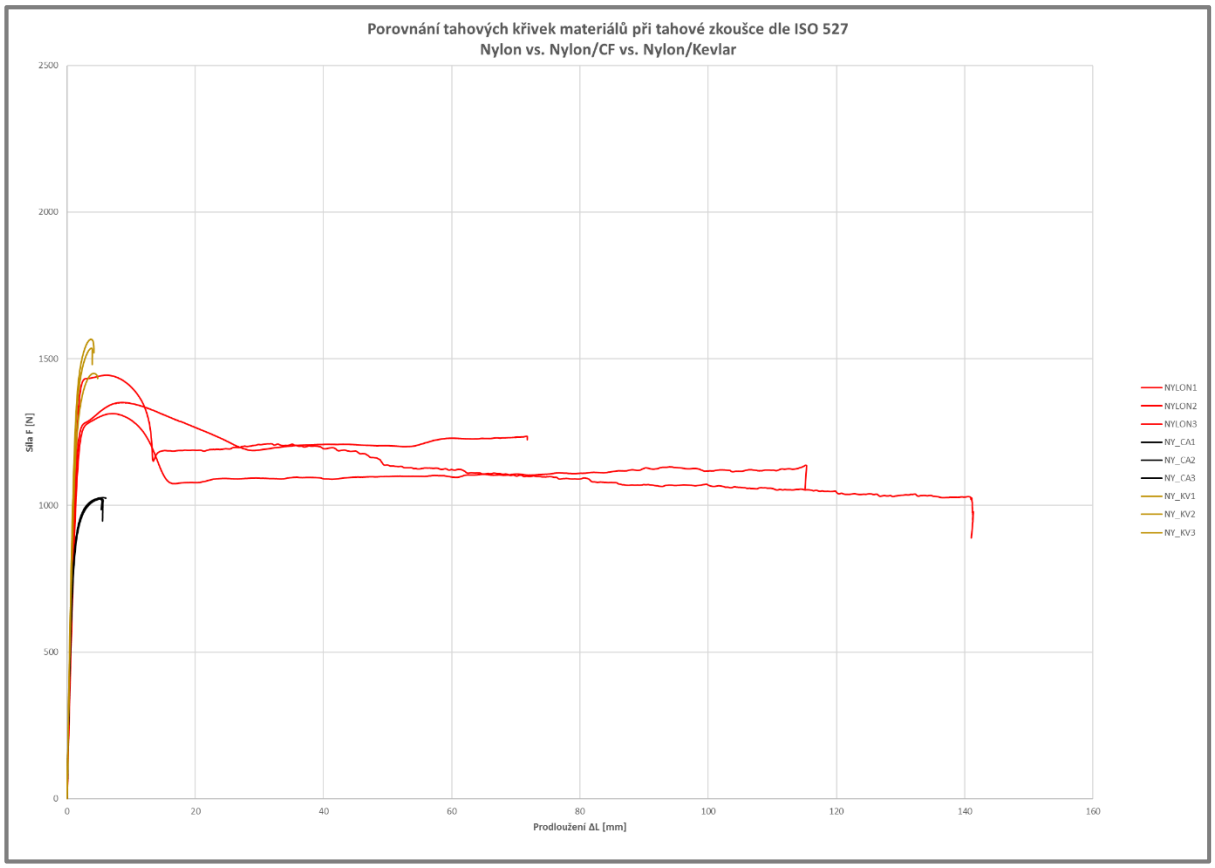
Obr. 55) Porovnání lomové plochy materiálu PET a PET/CF



Obr. 56) Detail lomu materiálu PET/CF

Nylon a nylonové kompozity

Další skupinou jsou materiály s matricí Nylonu. V této skupině máme tři materiály. Čistý Nylon, Nylon plněný karbonem a Nylon plněný Kevlarem. Tahové křivky této skupiny materiálů jsou zobrazeny na Obr. 57).



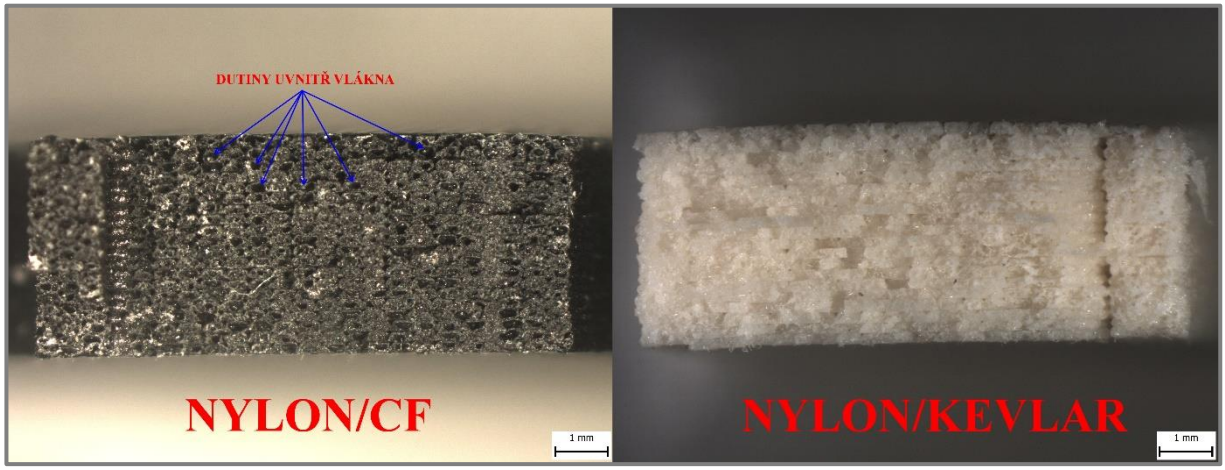
Obr. 57) Srovnání materiálů s matricí z Nylonu

Z grafů tahových křivek této skupiny materiálů (Obr. 57) je vidět, jaký mají vliv aditiva na pevnost, tažnost a celkové chování jednotlivých materiálů pro 3D tisk. Nylon má tahovou křivku charakteristickou pro termoplasty s dobrou možností orientace. Žádný ze vzorků materiálu Nylon nebyl při tahové zkoušce přetržen. Po určité době byl test zastaven neb se u jednoho vzorku rozdělila jednotlivá vlákna od sebe, na dalším vzorku se vytvořil krček na krčku a třetí tahová zkouška třetího vzorku byla ukončena po určité době, která stačila pro přesné vykreslení křivky (viz Obr. 57). Jak je z obrázků Obr. 50) a Obr. 51) patrné, má materiál Nylon největší tažnost ze všech zkoušených materiálů.

Pokud jsou do matrice Nylonu přidána aditiva ve formě karbonové nebo Kevlarové drtě, změní se úplně charakter tahových křivek. Z tahové křivky charakteristické pro termoplasty s dobrou možností orientace, která byla velice dobře pozorovatelná u vzorků z materiálu Nylon, se přidáním aditiv stane kompozitní materiál, pro který je charakteristická taková křivka křehkého polymeru. Tyto tahové křivky jsou pozorovatelné shodně u materiálu Nylon/CF a Nylon/Kevlar.

Obr. 58) Srovnání přetržených vzorků na bázi materiálu Nylon

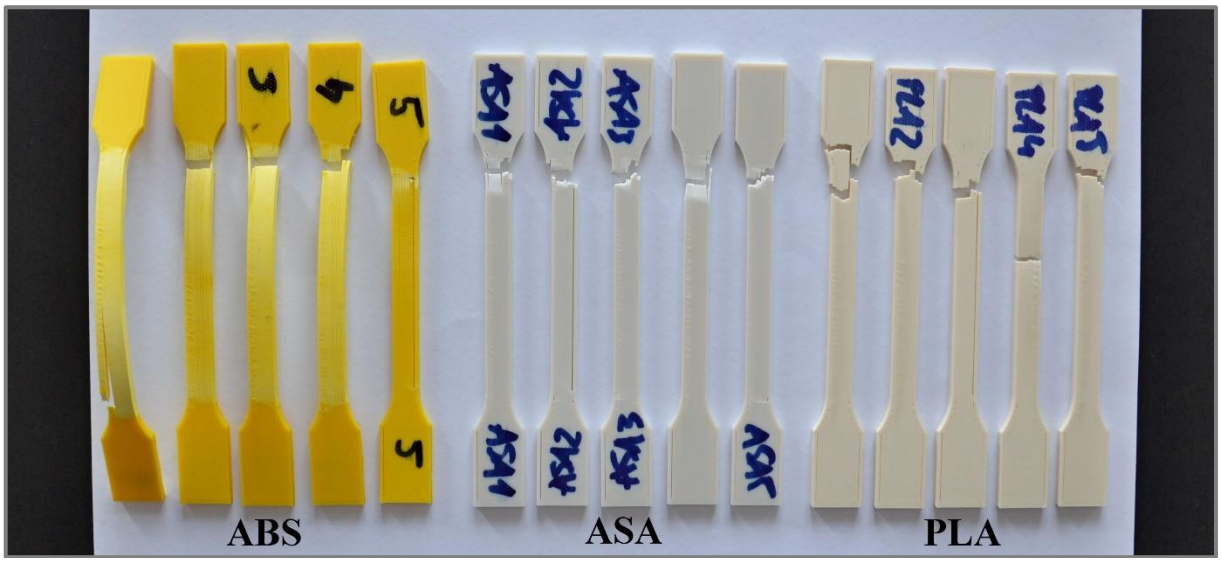
Materiál Nylon/CF měl ze všech vzorků nejnižší mez pevnosti v tahu (*Rm*), odpovídající největšímu zatížení (*Fmax*) a co se týče modulu pružnosti v tahu (E), tak ten byl druhý nejhorší hned po čistém materiálu Nylon. Prvotní domněnka po tahové zkoušce byla, že je v tiskové struně příliš velké množství karbonové drtě a není tam tudíž dostatek pojícího materiálu. Oproti druhému zkoušenému materiálu s přídavkem karbonové drtě, materiálu PET/CF, byly výtisky z materiálu Nylon/CF mnohem lehčí. I z Obr. 58), který srovnává zkušební vzorky této skupiny materiálů po tahové zkoušce, je patrné, že u materiálu Nylon/CF nedochází k dobrému spojování vrstev a oddělují se okrajové vrstvy od výplně. Po prozkoumání lomové plochy pod mikroskopem vyšlo najevo, že důvod nejmenší pevnosti v tahu (*Rm*) nespočívá v množství karbonové drtě, ale právě ve vlhkosti struny zmiňované dříve. Na snímku z mikroskopu jsou jasně patrné vzduchové dutiny uvnitř vlákna, které byly vytvořeny odpařující se vlhkostí při tavení materiálu v trysce. Materiál Nylon/Kevlar má v lomu také nějaké vzduchové dutiny, ale pouze nepatrné množství, které nemělo na pevnost vliv.



Obr. 59) Porovnání lomové plochy materiálu Nylon/CF a Nylon/Kevlar

Konstrukční materiály ABS, ASA a PLA

Poslední skupinou materiálů jsou běžné konstrukční materiály pro 3D tisk, kterými jsou ABS, PLA a ASA. Při zhodnocení tahových křivek z obrázků Obr. 50) a Obr. 51), zjistíme, že materiál PLA se porušuje křehkým lomem, materiál ASA má charakteristiku spíše termoplastu s omezenou možností orientace a ABS se chová jako typický termoplast s dobrou možností orientace. Vyobrazené vzorky na Obr. 60) toto chování potvrzují. Zatímco u materiálu PLA je pozorovatelný křehký lom bez viditelné tvorby krčku, tak u materiálu ASA je vidět tvorba krčků a lom je také tvárnější. Materiál ABS má po materiálu Nylon nejvyšší tažnost. Na vzorcích materiálu ABS na obrázku 55 můžeme pozorovat změnu barvy při jeho deformaci tzv. „crazing“ neboli krejzování. Vznik krejzů je typické pro amorfní polymery pod teplotou skelného přechodu. V důsledku viskoelastického chování dochází během plastické deformace ke vzniku krejzů, jež jsou vady produkující velké množství diskontinuit (dutin). Důsledkem je změna indexu lomu světla a tím pádem změna barvy.

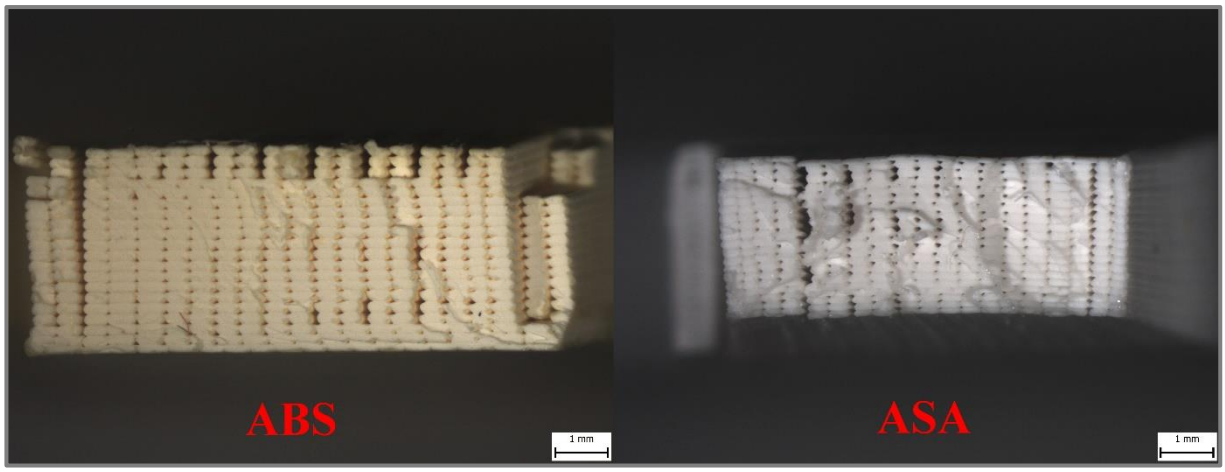


Obr. 60) Vzorky z materiálu ABS, ASA a PLA po tahové zkoušce

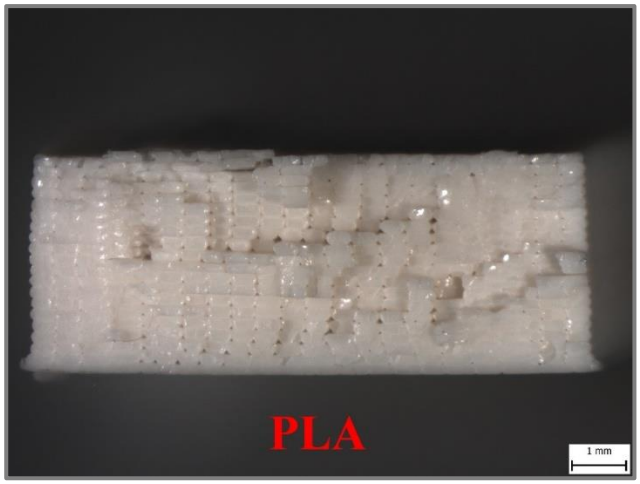
Materiál ABS se také jako jediný deformoval i v příčné ose ke směru zatěžování. Je to z důvodu zbytkové napjatosti, která vzniká při 3D tisku tohoto materiálu. Materiál ABS má velkou teplotní roztažnost a při chladnutí materiálu vznikají ve výtisku velká pnutí. U malých vzorků je dostatečné propojení mezi vrstvami (z angl. interlayer bonding) a po vychladnutí vzorku po tisku není pozorovatelná žádná deformace. U větších vzorků by tento jev měl za následek delaminaci jednotlivých vrstev výtisku. Tato zbytková napjatost se při tahové zkoušce uvolní a těleso se zdeformuje, jak je vidět na Obr. 61). U vzorků vyráběných vstřikováním do formy by toto chování pozorovatelné nebylo.

Obr. 61) Deformace vzorků z materiálu ABS

Detailní prozkoumání lomových ploch těchto konstrukčních plastů pod mikroskopem ukázalo lomové plochy korespondující s tvary tahových křivek. Materiál PLA má křehký lom a materiály ABS a ASA mají lomy tvárné, přičemž u materiálu ASA je pozorovatelné, jak má oproti ostatním materiálům dobře spojená jednotlivá vlákna.



Obr. 62) Porovnání lomové plochy materiálů ABS a ASA



Obr. 63) Lomová plocha materiálu PLA

5.4 Dynamické rázové namáhání

Houževnatost patří spolu s pevností k nejdůležitějším materiálovým charakteristikám. Je to schopnost materiálu odolávat iniciaci a šíření trhliny. Houževnatost představuje energii, kterou je materiál schopen lokálně absorbovat, než se poruší a lze ji ovlivnit volbou aditiv.

Rázová houževnatost materiálu souvisí se schopností materiálu rychle absorbovat energii, tedy deformovat se určitou rychlostí. Materiály s nejvyšší rázovou houževnatostí jsou elastomery. Tyto materiály mají vynikající elastické charakteristiky a útlumové vlastnosti. Při rázovém namáhání plastů (termoplastů nebo reaktoplastů) může dojít k porušení tělesa buď křehkým nebo tvárným lomem. Plasty, které mají teplotu skelného přechodu vyšší, než je standardní teplota okolí, jsou při této teplotě křehké a při zkoušce dojde k jejich přeražení. Polymery, které mají teplotu skelného přechodu nižší, než je teplota okolí mají takovou houževnatost, že k jejich přeražení při zkoušce nedojde. V případě že jsou zkoušeny takové materiály, jsou zkušební tělesa ve středu své délky opatřena vrubem a mluvíme pak o vrubové houževnatosti. V důsledku přítomnosti vrubu dochází v jeho okolí ke koncentraci napětí a při rázovém namáhání pak nastává porušení těles i těchto houževnatých materiálů. [36]

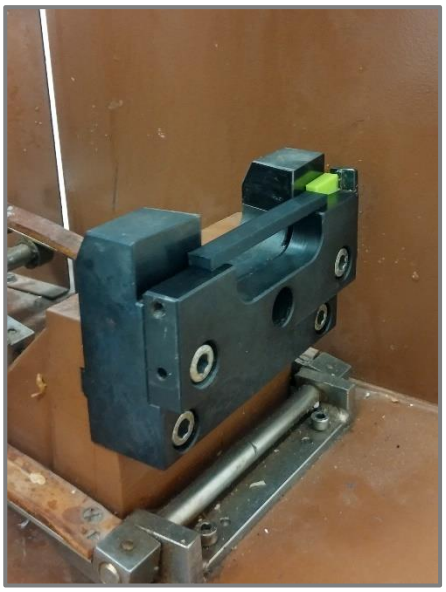
Zkoušky poskytují určité informace o chování plastů při nárazu. Výsledky stanovení závisí na druhu plastu, jeho složení, teplotě, vlhkosti, stárnutí, zkušební metodě, podmínkách provedení zkoušky a tvaru zkušebního tělesa. U plastů se rázové zkoušky provádí především v ohybu pomocí kyvadlového kladiva metodou Charpy nebo Izod (existují také rázové zkoušky v tahu). Rázová kladiva jsou výměnná (s různou nominální energií), aby bylo možné měřit co nejširší paletu polymerů s odlišnou houževnatostí. U elastomerů se hodnotí odrazová pružnost (na přístrojích typu Schob a Lüpke). [36]

5.5 Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy dle ČSN EN ISO 179-1

Cílem tohoto experimentu je zjistit, jaký má vliv karbonová drť v tiskové struně na rázovou houževnatost 3D vytištěných zkušebních vzorků s různým množstvím výplně. Stejně jako u tahové zkoušky, ani zde neexistuje norma pro zkoušení 3D vytištěných součástí. Pro účel této práce je tedy použita obecná norma pro stanovení rázových vlastností Charpy u plastů za stanovených podmínek, která definuje různé typy zkušebních těles a různá uspořádání zkoušky.

Metoda je vhodná mimo jiné i pro tuhé termoplasty pro tváření, vytlačování a lití (včetně plněných a vyztužených materiálů vedle neplněných typů) a desky z tuhých termoplastů. Dále také pro kompozity plněné vlákny na bázi raktoplastů a termoplastů vyztužených v jednom nebo více směrech výztužemi (jako jsou rohože, tkaniny, tkané rovingy, sekaná vlákna, kombinované a hybridní výztuže, rovingy a mleté textily) nebo desky vyrobené z předimpregnovaných materiálů (prepregů), včetně plněných a vyztužených materiálů. [38]

Při hodnocení rázové houževnatosti pomocí metody Charpy je zkušební těleso ve tvaru hranolu umístěné vodorovně na podpěrách (viz Obr. 64) a je přeráženo úderem rázového kladiva, přičemž směr rázu je veden středem vzdálenosti mezi podpěrami na užší nebo na širší stranu (edgewise/flatwise). Zkušební těleso je ohýbáno nominální konstantní rychlostí 3,8 m/s. Během zkoušky je zaznamenávána energie spotřebovaná k přeražení zkušebního tělesa a typ přeražení: C (úplné, včetně kloubového – neúplného přeražení, kdy obě části zkušebního tělesa drží pohromadě pouze tenkou obvodovou vrstvou v podobě kloubu bez zbytkové tuhosti), P (částečné) nebo N (nepřeraženo). [36]



Obr. 64) Zkušební těleso umístěné na podpěrách

Rázová houževnatost Charpy (a_{cU}) je definována jako kinetická energie (E_c) spotřebovaná k přeražení zkušebního tělesa vztažená na jeho původní průřez – tloušťku (h) a šířku (b) podle vzorce:

$$a_{cU} = \frac{E_c}{h \cdot b} \left[\frac{kJ}{m^2}\right] \tag{20}$$

V případě použití zkušebního tělesa opatřeného vrubem je směr rázu veden na užší stranu, a to na opačnou stranu, než na které je umístěn vrub. Vrubová houževnatost Charpy (a_{cN}) je pak definována jako kinetická energie (E_c) spotřebovaná k přeražení zkušebního tělesa opatřeného vrubem vztažena na jeho původní průřez pod vrubem – tloušťku (h) a šířku pod vrubem (b_N) podle vzorce:

$$a_{cN} = \frac{E_c}{h \cdot b_N} \left[\frac{kJ}{m^2}\right], kde\ N = A, B, C\ (typ\ vrubu) \tag{21}$$

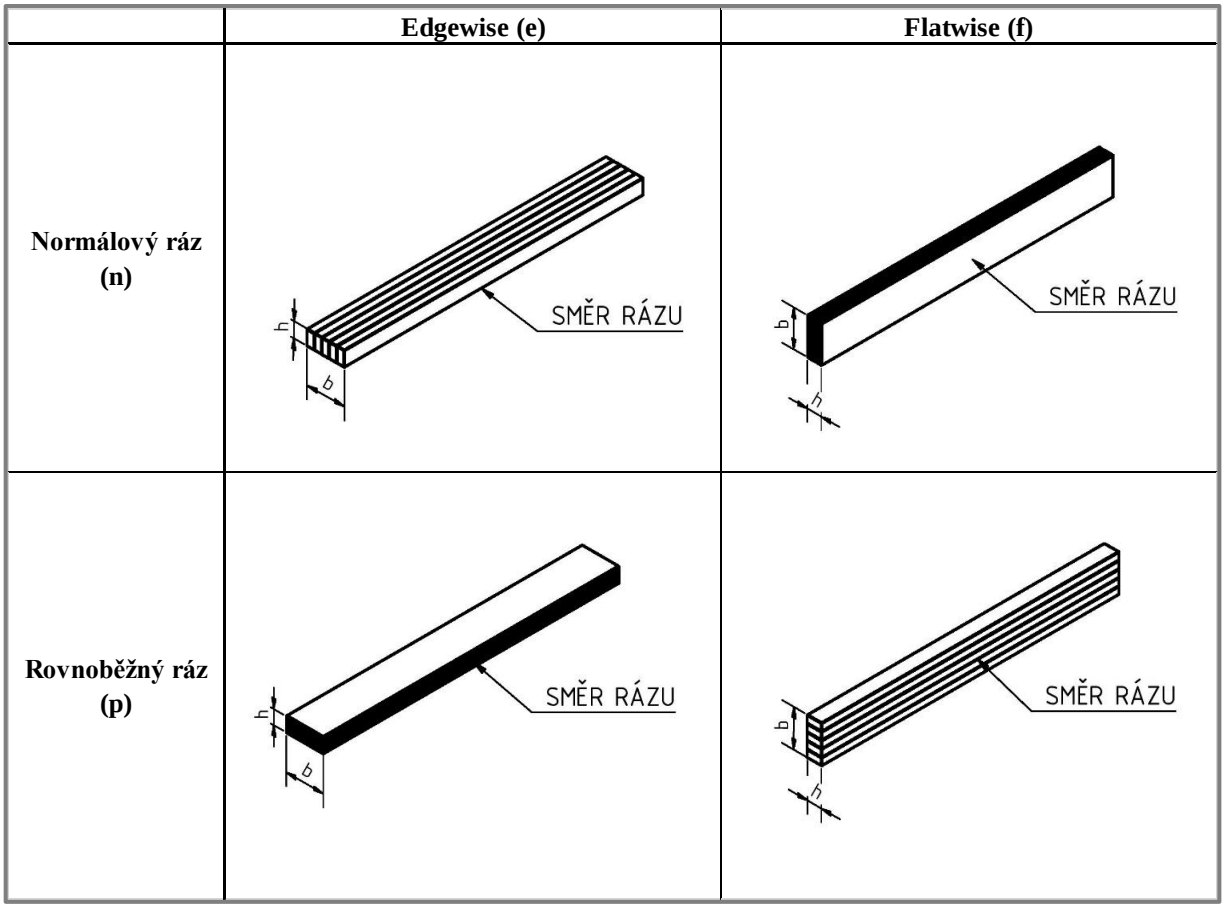
Obr. 65) Zařízení pro měření rázové/vrubové houževnatosti metodou Charpy

5.5.1 Zkušební vzorky

Jak již bylo uvedeno výše, pro účely této zkoušky se použijí zkušební tělesa buďto s vrubem nebo bez vrubu. Norma udává, že zkušební tělesa opatřená vrubem se běžně nepoužívají pro tvrdé lehčené materiály, pro kompozity vyztužené dlouhými vlákny a pro termotropní polymery na bázi tekutých krystalů. Pro tyto materiály lze použít zkušební tělesa bez vrubu.

Vzhledem k povaze 3D tisku, kdy se vzorek tvoří postupným nanášením jednotlivých vrstev, jsou výtisky anizotropní, neboli mají nesouměrné charakteristiky v různých osách namáhání. V takových případech se obvykle připraví dvě skupiny zkušebních těles tak, že jejich podélná osa je rovnoběžná, respektive kolmá k významnému směru desky či panelu. Tento směr je buď viditelný nebo ho lze odvodit ze znalosti způsobu přípravy desky či panelu. [38]

S ohledem na 3D tisk a koncepci experimentu, kde budou zkoušena tělesa s různým množstvím výplně byl volen zkušební vzorek bez vrubu. Z důvodu technologie 3D tisku jsou kvůli anizotropii voleny dvě sady vzorků. Jedna pro směr rázu na užší stranu (edgewise) a druhá pro směr rázu na širší stranu (flatwise). Edgewise (e) a flatwise (f) označují směr rázu vzhledem k tloušťce *h* a šířce *b* zkušebního tělesa. Normálový ráz (n) a rovnoběžný ráz (p) označují směr rázu vzhledem k rovině vrstev (viz Obr. 66). Zkoušky Charpy označené jako „fn“ a „ep“ se používají pro lamináty, zatímco zkouška označená jako „en“ a „ep“ se používá pro všechny ostatní materiály. Zkouška Charpy označená jako „fn“ a „fp“ se používá pro materiály vykazující vliv povrchu. Označení metody pro zkušební vzorek bez vrubu: ISO 179-1/1eU pro směr rázu na užší stranu (edgewise) a ISO 179-1/1fU pro směr rázu na širší stranu (flatwise).



Obr. 66) Schematické znázornění směru rázu

Bylo použito zkušební těleso typu 1. Těleso má tvar hranolu s rozměry uvedenými v následující tabulce (Tab 5).

Tab 5) Rozměry zkušebního tělesa typu 1

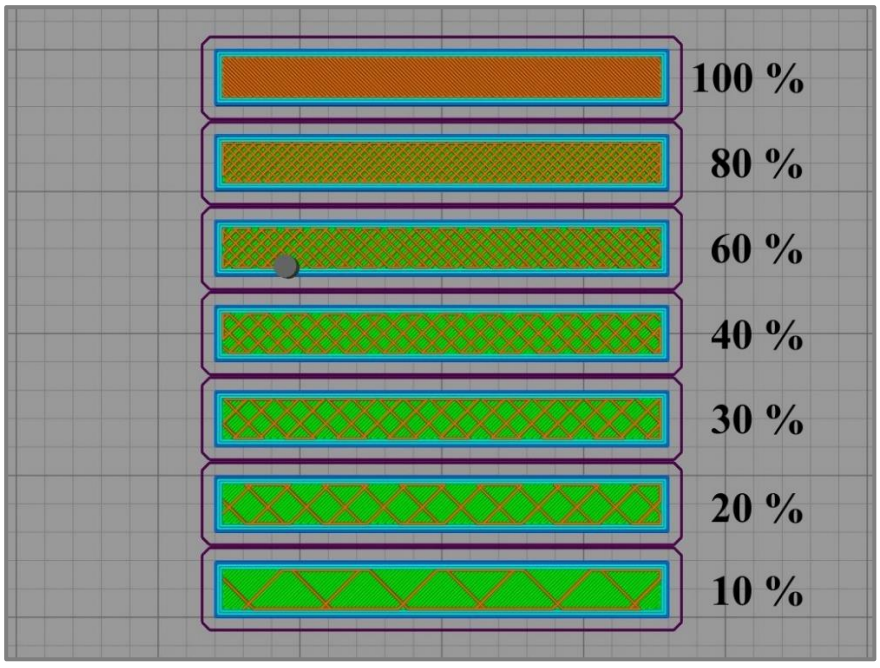
Typ zkušebního tělesa	Délka *l*	Šířka *b*	Tloušťka *h*	Rozpětí podpěr zkušebního tělesa *L*
1	80±2	10±0,2	4,0±0,2	62 (-0,0 +0,5)

5.5.2 Tiskové parametry

Cílem této zkoušky je zjistit vliv karbonových vláken na rázovou houževnatost zkušebních vzorků s různým množstvím výplně. Aby bylo možné určiv vliv těchto vláken, je nutné použít dva druhy materiálů, jeden s karbonovými vlákny a jeden bez nich, které jsou však srovnatelné. Jsou proto voleny materiály PET a PET/CF. PET je čistý materiál a PET/CF je ten stejný materiál, ale s 20 % karbonové drtě.

Všechny vytištěné vzorky mají společné následující tiskové parametry. Každý vzorek má 3 horní a 3 spodní plné vrstvy ve vzoru Rectilinear (přímočará výplň) a 2 okrajové vrstvy. Všechny vzorky mají stejný základní materiál, a tudíž i jejich tiskové vlastnosti jsou stejné. Byly tištěny za stejných teplot (tryska 240 °C, tisková podložka 90 °C) a rychlostí (40 mm/s) a se zapnutým chlazením tiskového prostoru. Výška vrstvy byla opět volena 0,2 mm, jakožto nejpoužívanější a nejuniverzálnější výška pro většinu výtisků. Parametr, ve kterém se jednotlivé skupiny vzorků liší je procento výplně.

V rámci experimentu byly mezi sebou porovnávány vzorky s 10 %, 20 %, 30 %, 40 %, 60 %, 80 % a 100 % (viz tabulka 6). Všechna procenta výplní kromě 100 % byla tištěna s druhem výplně Grid (mřížka) v orientaci -45° a 45°. 100 % výplň není možné tisknout tímto vzorem a byl proto volen vzor Rectilinear. Zobrazení množství výplní je zobrazeno na Obr. 67).



Obr. 67) Procenta výplní jednotlivých vzorků

Norma udává, že v případě, že se zkoušejí lamináty, ke kterým má technologie 3D tisku nejblíže, v normálovém a rovnoběžném směru, musí být pro každý směr použito 10 těles. Tento požadavek byl splněn pro porovnání materiálů PET a PET/CF. Jak je z Tab 6) vidět, byly ještě vytištěny vzorky s trojúhelníkovým (Triangular) vzorem výplně. Tyto vzorky byly vytisknuty pouze z materiálu PET a pouze v množství tří kusů, jež je minimum pro výpočet střední hodnoty. Tato zkušební tělesa byla porovnána se zkušebními tělesy z materiálu PET a druhem výplně Grid. Cílem tohoto experimentu bylo porovnání rázové houževnatosti Charpy jednotlivých druhů výplní.

Tab 6) Vzorky typu 1 pro zkoušku rázové houževnatosti

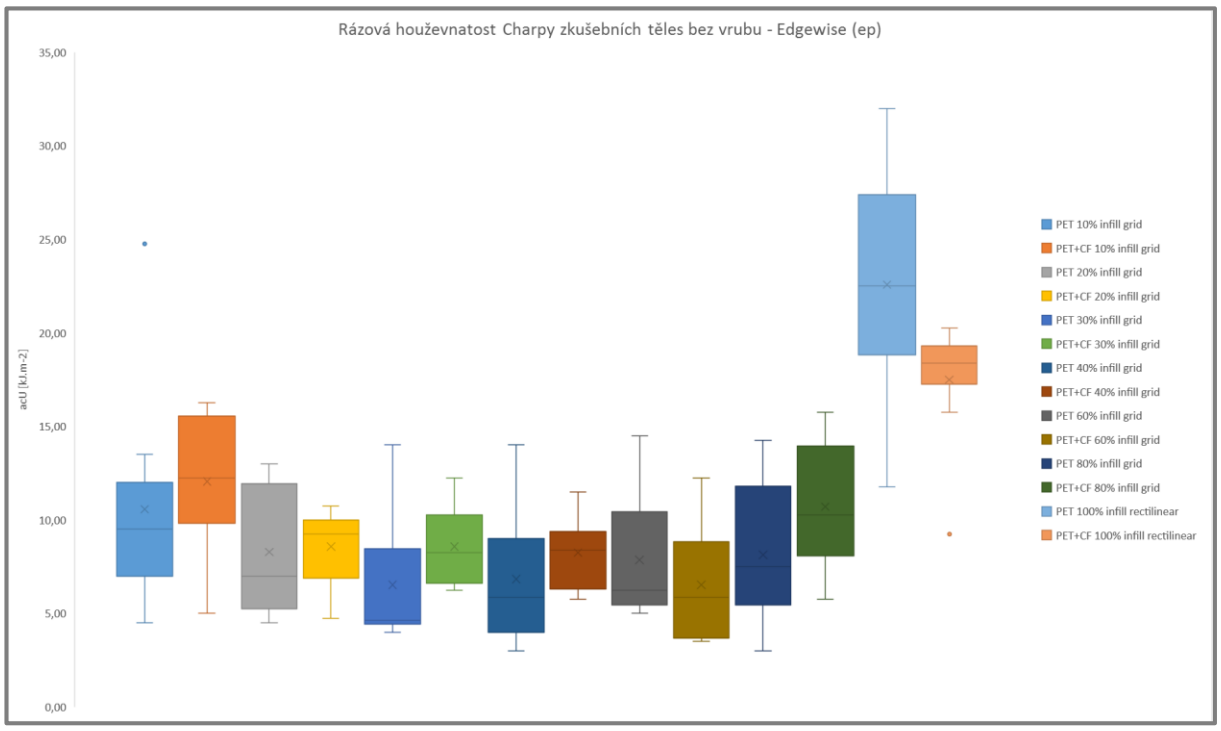
Materiál	Procento výplně [%]	Druh výplně	Orientace výplně	Počet vytištěných vzorků	Směr rázu
PET	10	Grid	-45°,45°	10	edgewise
PET/CF	10	Grid	-45°,45°	10	edgewise
PET	20	Grid	-45°,45°	10	edgewise
PET/CF	20	Grid	-45°,45°	10	edgewise
PET	30	Grid	-45°,45°	10	edgewise
PET/CF	30	Grid	-45°,45°	10	edgewise
PET	40	Grid	-45°,45°	10	edgewise
PET/CF	40	Grid	-45°,45°	10	edgewise
PET	60	Grid	-45°,45°	10	edgewise
PET/CF	60	Grid	-45°,45°	10	edgewise
PET	80	Grid	-45°,45°	10	edgewise
PET/CF	80	Grid	-45°,45°	10	edgewise
PET	100	Rectilinear	-45°,45°	10	edgewise
PET/CF	100	Rectilinear	-45°,45°	10	edgewise
PET	10	Grid	-45°,45°	10	flatwise
PET/CF	10	Grid	-45°,45°	10	flatwise
PET	20	Grid	-45°,45°	10	flatwise
PET/CF	20	Grid	-45°,45°	10	flatwise
PET	30	Grid	-45°,45°	10	flatwise
PET/CF	30	Grid	-45°,45°	10	flatwise
PET	40	Grid	-45°,45°	10	flatwise
PET/CF	40	Grid	-45°,45°	10	flatwise
PET	60	Grid	-45°,45°	10	flatwise
PET/CF	60	Grid	-45°,45°	10	flatwise
PET	80	Grid	-45°,45°	10	flatwise
PET/CF	80	Grid	-45°,45°	10	flatwise
PET	100	Rectilinear	-45°,45°	10	flatwise
PET/CF	100	Rectilinear	-45°,45°	10	flatwise
PET	20	Triangular	0°, 60°, -60°	3	edgewise
PET	20	Triangular	0°, 60°, -60°	3	flatwise
PET	30	Triangular	0°, 60°, -60°	3	edgewise
PET	30	Triangular	0°, 60°, -60°	3	flatwise
PET	40	Triangular	0°, 60°, -60°	3	edgewise
PET	40	Triangular	0°, 60°, -60°	3	flatwise
PET	60	Triangular	0°, 60°, -60°	3	edgewise
PET	60	Triangular	0°, 60°, -60°	3	flatwise
PET	80	Triangular	0°, 60°, -60°	3	edgewise
PET	80	Triangular	0°, 60°, -60°	3	flatwise

Jak je z tabulky výše patrné, tento experiment je velice rozsáhlý. V rámci experimentu bylo vytištěno a následně přeraženo 310 vzorků typu 1. S průměrnou dobou tisku jednoho vzorku

12 minut byl celkový čistý čas tisku vzorků pro tento experiment 62 hodin a byla spotřebována celá 0,5 kg vážící cívka materiálu PET/CF a přibližně 550 g materiálu PET.

5.5.3 Výsledky

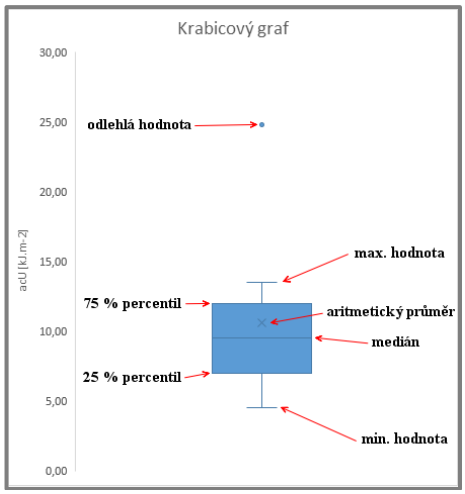
Zkouška rázové houževnatosti dle ČSN EN ISO 179-1 proběhla na digitálním Charpy kladivu Heckert PSd 50/15 (Obr. 65). Zařízení bylo upraveno na 15 Joulové kladivo s nominální konstantní rychlostí 3,8 m/s. Cílem experimentu bylo zjistit vliv karbonových vláken v tiskové struně pro 3D tisk technologií FDM na rázovou houževnatost zkoušených vzorků s různým množstvím výplně. Druhotným cílem tohoto experimentu bylo porovnat vliv typu výplně na rázovou houževnatost zkoušených vzorků.



Obr. 68) Rázová houževnatost Charpy – edgewise (ep)

Krabicový graf na Obr. 68) zobrazuje rázovou houževnatost Charpy zkušebních těles bez vrubu na užší stranu (edgewise). Jednotlivé hodnoty, které byly podkladem pro interpretaci výsledků se nacházejí v souhrnné tabulce v sekci příloh. Pro správnou interpretaci výsledků je však nejprve nutné porozumět grafu.

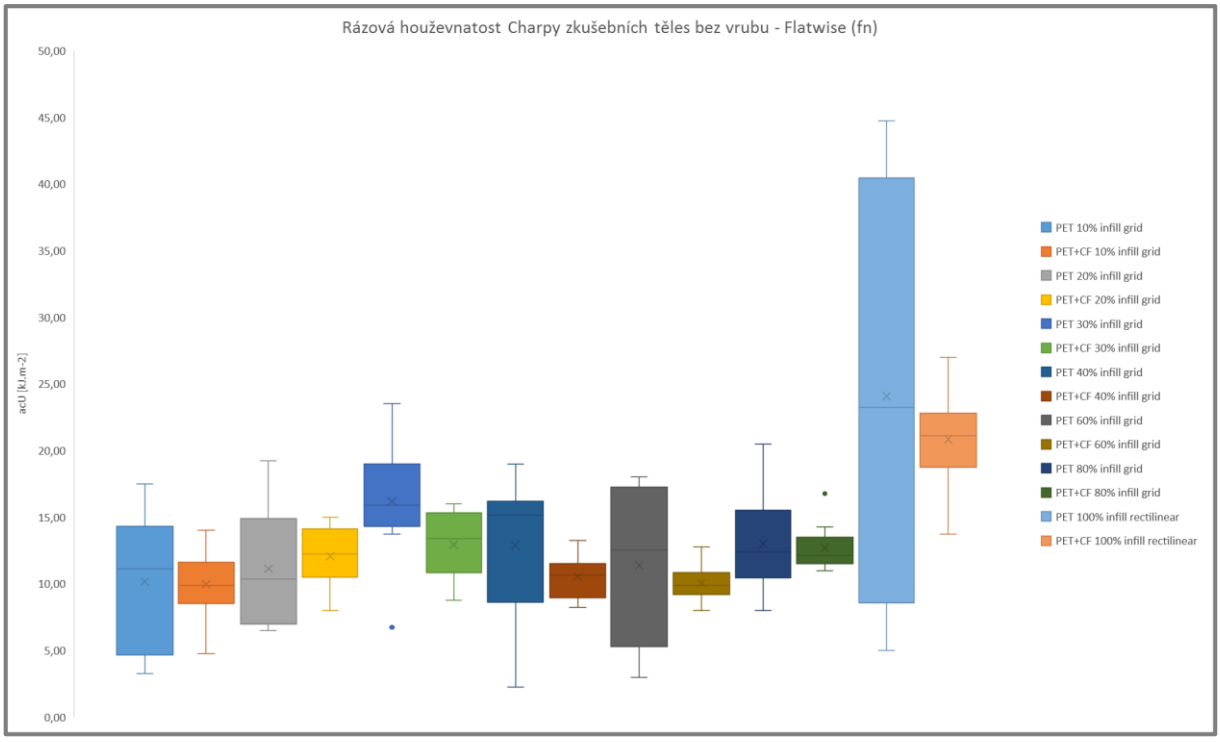
Obecný krabicový graf znázorňuje rozdělení dat do kvartilů a zvýrazňuje medián, aritmetický průměr a odlehlé hodnoty. Z krabic můžou vést vertikální čáry nazývané „vousy“. Tyto čáry označují proměnlivost mimo horní a dolní kvartily a jakýkoliv bod mimo tyto čáry neboli vousy, je považovaný za odlehlou hodnotu. Odlehlá hodnota je hodnota vzdálená od hranice krabice (25 % / 75 % percentil) o více než 1,5násobek rozdílu hodnoty daného bodu a hodnoty hranice krabice. Tyto body jsou ignorovány a nezahrnují se do výpočtu zobrazených ukazatelů. Jednotlivé prvky krabicového grafu jsou popsány na Obr. 69), který popisuje rázovou zkoušku Charpy materiálu PET 10 % infill grid.



Obr. 69) Krabicový graf – teorie

Při prvotním pohledu na graf na Obr. 68) je vidět, že rázová houževnatost Charpy (a_{cU}) při směru rázu na užší stranu (edgewise) je u většiny skupin zkoušených vzorků podobná. Pokud však mezi sebou porovnáme vzorky z materiálu PET a PET/CF, zjistíme, že ve všech procentech výplní kromě dvou (60 % a 100 %) je rázová houževnatost Charpy vyšší u materiálu s přídavkem karbonových vláken než u materiálu čistého. Podobné hodnoty jednotlivých výplní mohou být z důvodu volby 2 okrajových vrstev a tří plných spodních a horních vrstev, které můžou mít na pevnost 3D tištěného vzorku větší vliv než výplň samotná. Všechny vzorky byly přeraženy.

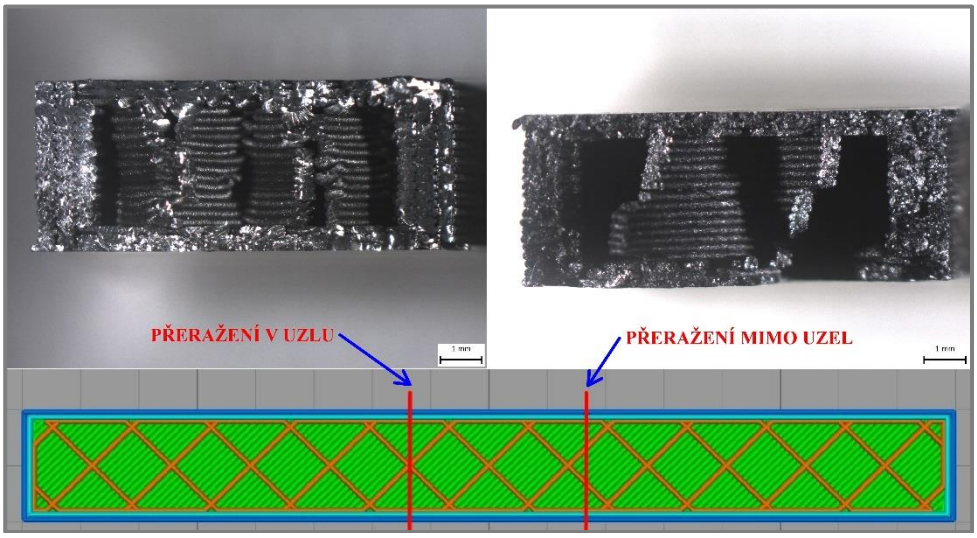
Druhou částí experimentu bylo porovnání rázové houževnatosti Charpy (a_{cU}) při směru rázu na širší stranu (flatwise). Graf s výsledky této zkoušky je zobrazen na Obr. 70).



Obr. 70) Rázová houževnatost Charpy – flatwise (fn)

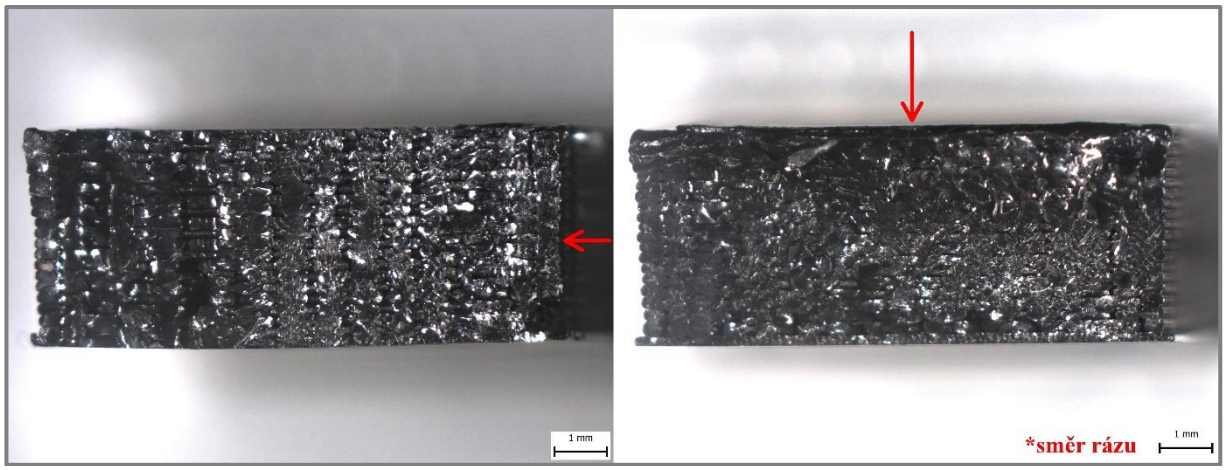
Z grafu rázové houževnatosti Charpy při směru rázu na širší stranu (flatwise) (Obr. 70) je pozorovatelné, že vzorky vyztužené karbonovou drtí mají ve všech procentech výplní kromě 20 %, srovnatelnou nebo nižší průměrnou rázovou houževnatost než vzorky z čistého materiálu PET. Avšak všechny skupiny vzorků z materiálu PET vyztuženého karbonovým vláknem mají oproti čistému materiálu PET podstatně menší rozsah hodnot rázové houževnatosti. V praxi to znamená, že tyto vzorky mají podstatně stabilnější a předvídatelnější chování. Vzorky z materiálu PET/CF se při rázové zkoušce přerážely vždy na dvě části, zatímco vzorky z materiálu PET se přerážely tříštivě na více částí.

Při detailním prozkoumání přeražených vzorků na mikroskopu bylo zjištěno, že vzorky, které vykazovaly nejnižší hodnoty rázové houževnatosti Charpy byly přeraženy v místě, kde se křížily dráhy výplní. Naopak nejvyšší hodnoty rázové houževnatosti Charpy byly u vzorků, které byly přeraženy v místě, které bylo mezi uzly křížení výplní (viz Obr. 71).



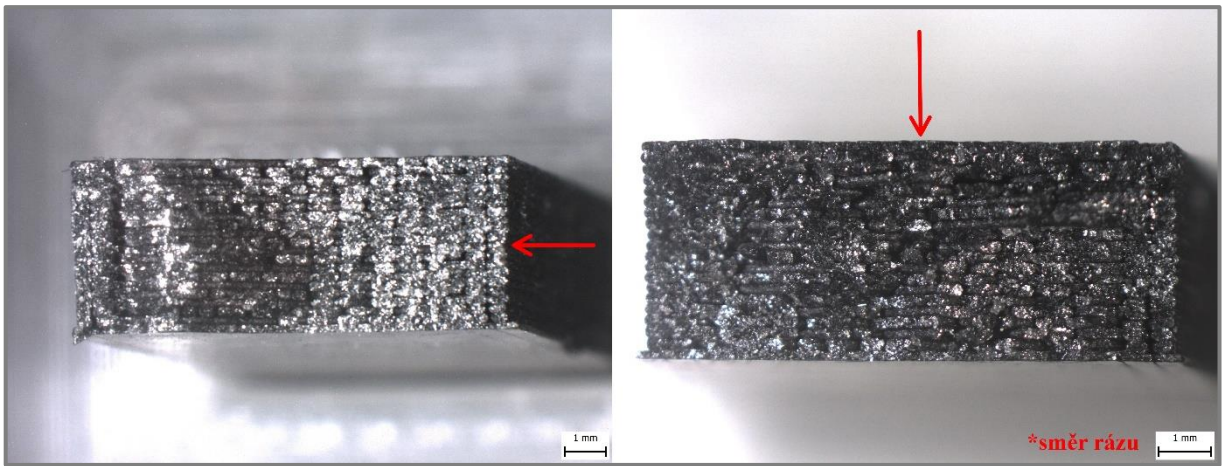
Obr. 71) Místo přeražení zkušebního vzorku

Následující dvě dvojice snímků z mikroskopu porovnávají 100 % výplně obou zkoušených materiálů, a to jak při rázu na užší stranu, tak při druhu rázu na širší stranu.



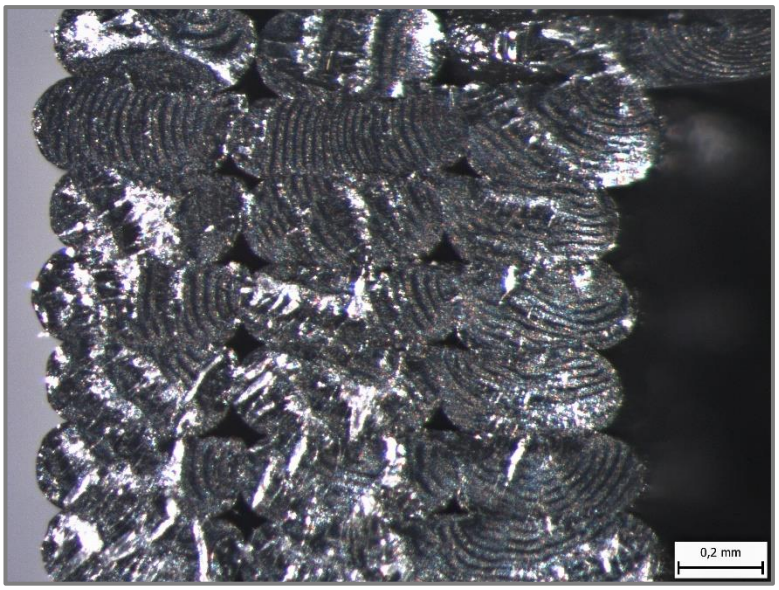
Obr. 72) Porovnání přeražených vzorků se 100 % výplní z materiálu PET

Na přeražených vzorcích se směrem rázu na užší stranu jsou vidět jednotlivé vrstvy a jejich křížení.



Obr. 73) Porovnání přeražených vzorků se 100 % výplní z materiálu PET/CF

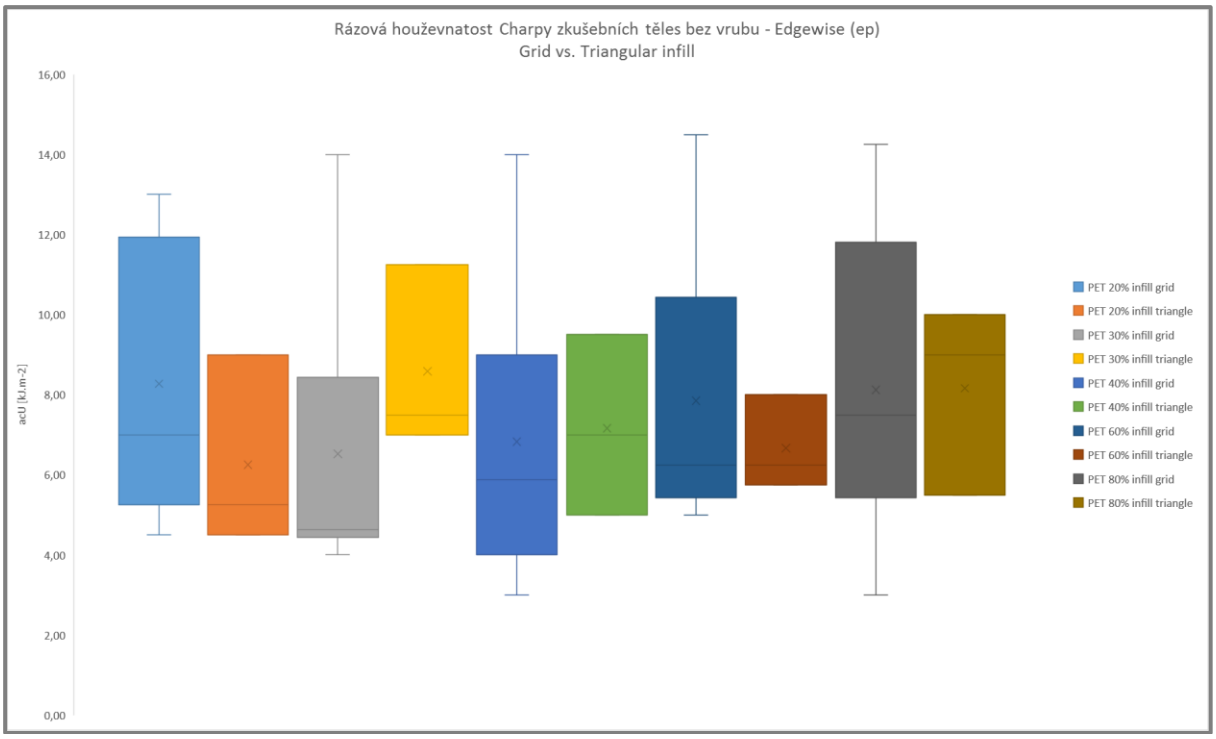
U materiálu PET byly také pod mikroskopem pozorovatelné zajímavé struktury jednotlivých přeražených vláken, kde se pravidelně střídala lesklá a matná vrstva (viz Obr. 74). Není jisté, zda se jedná o strukturu materiálu vlivem destruktivního zkoušení nebo zda je to vlastnost materiálu z výroby tiskové struny.



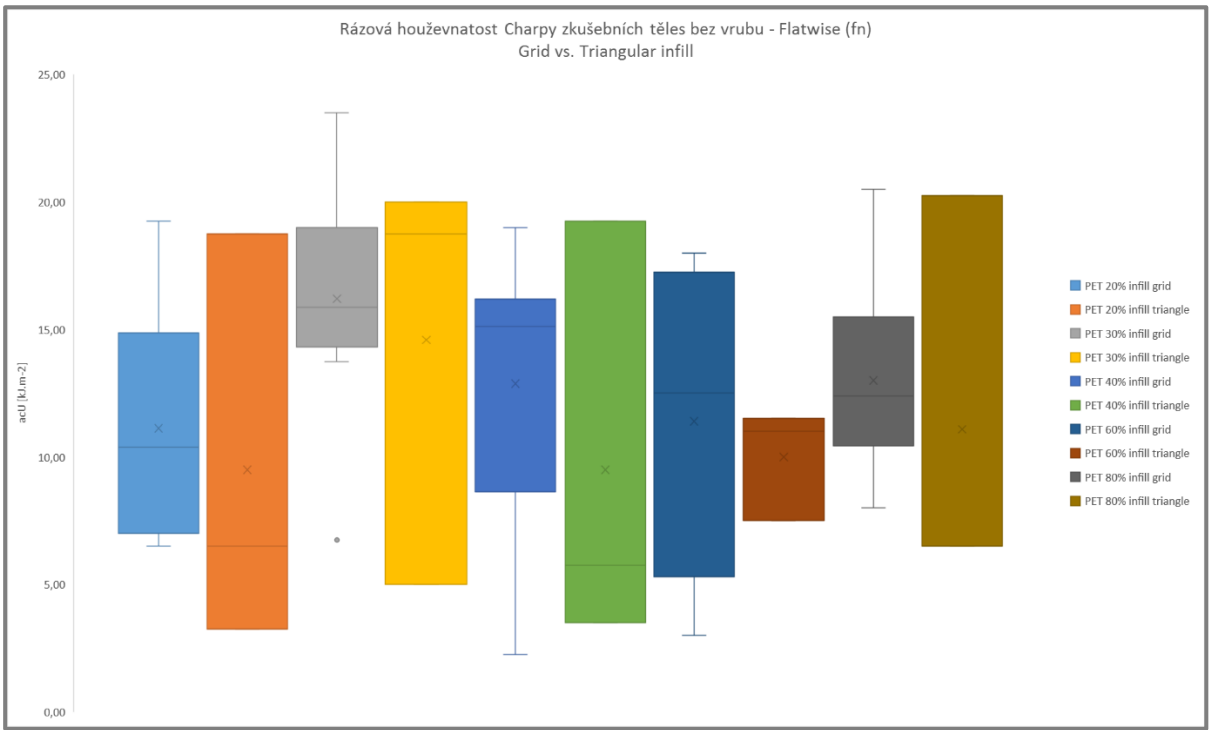
Obr. 74) Detail lomové plochy materiálu PET

Vliv typu výplně na rázovou houževnatost

Druhý experiment byl proveden spíše okrajově a měl za cíl porovnat rázovou houževnatost Charpy dvou skupin zkušebních vzorků, které se od sebe navzájem lišily druhem výplně. Na jedné straně byly vzorky s druhem výplně Grid (mřížka) a na druhé byly výtisky s výplní Triangular (trojúhelníková mřížka). Motivací tohoto experimentu byla různá destrukce dvou typů těles (mřížka/trojúhelník), kterými je vzorek vyplněn. Mřížka je namáhaná na ohyb a trojúhelník je namáhán torzně. Zkušební vzorek s trojúhelníkovou výplní by dle teorie měl být schopen pohltit větší množství energie, což se v praxi nepotvrdilo. Na následujících obrázcích (Obr. 75) a Obr. 76)) jsou krabicové grafy, které porovnávají rázovou houževnatost Charpy těchto dvou typů výplní, a to jak při rázu na užší stranu, tak při druhu rázu na širší stranu.



Obr. 75) Rázová houževnatost Charpy – Grid vs. Triangular (edgewise)



Obr. 76) Rázová houževnatost Charpy – Grid vs. Triangular (flatwise)

Jak již bylo uvedeno dříve, pro účely tohoto experimentu byly tisknuty pouze tři vzorky od každé skupiny vzorků s trojúhelníkovou výplní. Proto je nutné při porovnávání těchto grafů mezi sebou porovnat u vzorků s výplní druhu mřížky rozsah „vousů“ oproti krabici u vzorků s trojúhelníkovou výplní. Takto mezi sebou porovnáme celý rozsah hodnot mezi oběma druhy výplní.

Z obou grafů (Obr. 75) a Obr. 76)) je patrné, že trojúhelníková výplň nemá podstatný vliv na rázovou houževnatost Charpy, a to jak při směru rázu na užší, tak na širší stranu. Hodnoty pro oba typy výplní jsou velice podobné. Výhody trojúhelníkové výplně oproti mřížce by se možná projevily při tisku větších modelů s menším procentem výplně, avšak to tento experiment nepokrývá.

Pro detailnější výzkum vlivu druhu výplně na rázovou houževnatost by bylo vhodné zahrnout do tohoto experimentu i další druhy výplní (obzvláště pak výplň typu včelí plástev) a pro větší přesnost vytisknout vzorky v množství jež udává norma.

6 ZHODNOCENÍ A DISKUZE

V rámci předkládané diplomové práce byla navržena 3D tiskárna technologie FDM pro tisk materiálu s přídavkem karbonových vláken. Tato tiskárna je schopna tisknout všechny běžně používané plastové struny pro 3D tisk, včetně plněných, které mají destruktivní vliv na běžně používané trysky. Z důvodu konstrukčního řešení se staticky uloženým extruderem a vedením struny k tiskové hlavě přes bowden není tiskárna vhodná pro tisk měkčených plastů. Řízení tiskárny je realizováno buď z připojeného PC nebo přímo z ovládacího panelu LCD, který umožňuje též tisk z SD karty. Konstrukční řešení zahrnuje inovativní přístup ustavení kolmosti jednotlivých os, jež eliminuje odchylku kolmosti osy Z od roviny X-Y pomocí nastavitelné příložky spodního uchycení vedení osy Z. Jedinečné je též konstrukční řešení sestavy pojezdu v rovině X-Y, jenž bylo nazváno „nezávislé H-Bot horní gantry“ a jak již název napovídá, celá sestava je nezávislým konstrukčním prvkem. Jedná se o hybridní konstrukci, která v sobě spojuje výhody stavebnicové konstrukce a konstrukce z vypalovaných plechů. Nezáleží tak na dokonalé přesnosti sestavení rámu, neboť kolmost os X a Y bude vždy tímto konstrukčním přístupem garantována.

Experimentální část byla zaměřena na porovnání mechanických vlastností materiálů vytištěných na FDM 3D tiskárně. Cílem experimentů bylo porovnat vliv karbonových vláken v tiskové struně na mechanické vlastnosti výtisků oproti materiálům bez aditiv. Byly provedeny dva experimenty dle charakteru působící síly, a to tahová zkouška, při které působí statická síla a rázová zkouška houževnatosti Charpy, při níž působí síla dynamická.

Při tahové zkoušce byly mezi sebou porovnávány následující materiály: PLA, ABS, ASA, PET, PET/CF, Nylon, Nylon/CF, Nylon/Kevlar. Pro zajištění stejných podmínek všech zkoušených materiálů měly zkušební vzorky jednotlivých materiálů stejné nastavení tiskových parametrů s výjimkou tiskových teplot, které byly voleny podle doporučení výrobce. Jako nejvhodnější bylo vyhodnoceno vyplnění vzorku z plna (100 % výplň), a to pouze v orientaci 0° a 180°, protože při tahové zkoušce je těleso namáháno pouze ve směru své hlavní podélné osy. Tímto nastavením se předpokládá, že budou mezi sebou porovnávány opravdu jednotlivé materiály, a nikoliv tiskové vlastnosti. Z běžných materiálů používaných pro 3D tisk technologií FDM, kterými jsou PLA, ABS, ASA, PET a Nylon, má materiál PLA nejvyšší průměrnou mez pevnosti v tahu (*Rm*), odpovídající největšímu zatížení (*Fmax*), které předchází porušení zkušebního vzorku. Druhým nejpevnějším materiálem je PET a dále následují materiály ASA, ABS a Nylon. Při porovnání materiálů s přídavkem karbonových vláken oproti čistým materiálům bez plniv, zjistíme že PET/CF má pouze velmi malé zvýšení pevnosti v tahu oproti základnímu materiálu PET. Materiál Nylon/CF má dokonce znatelné snížení pevnosti v tahu oproti materiálu Nylon. Naopak přidáním aramidových vláken do materiálu Nylon se zvýší pevnost v tahu, avšak jen o 10 %. Po prozkoumání lomové plochy materiálu Nylon/CF pod mikroskopem bylo zjištěno, že důvod nejmenší pevnosti v tahu nespočívá v přílišném množství karbonové drtě v tiskové struně, jak se autor této práce původně domníval, ale ve vzduchových dutinách uvnitř vlákna. Tyto dutiny se tvoří odpařující se vlhkostí při tavení materiálu v trysce. Nylonové materiály jsou náchylné na toto chování, neboť snadno vážou vzdušnou vlhkost. Materiál s nejvyšší hodnotou modulu pružnosti v tahu (E) je PET plněný karbonovými vlákny, který má tuto hodnotu oproti čistému materiálu PET přibližně dvakrát vyšší. Materiál, který je srovnatelný s hodnotou modulu pružnosti v tahu materiálu PET/CF je materiál PLA. Nylon a Nylon s plnivy měly nejnižší hodnoty modulu pružnosti v tahu, avšak

čistý Nylon měl největší tažnost ze všech zkoušených materiálů. Ostatní zkoušené materiály měly hodnoty modulu pružnosti v tahu srovnatelné s materiálem PET.

Druhý experiment měl za cíl zjištění vlivu karbonové drtě v tiskové struně na rázovou houževnatost 3D vytištěných zkušebních vzorků s různým množstvím výplně. Aby bylo možné porovnat výsledky této zkoušky, bylo nutné použít dva materiály, jeden s karbonovými vlákny a jeden bez nich, které jsou však srovnatelné. Byly proto voleny materiály PET a PET/CF, které se liší pouze tím, že v materiálu PET/CF je 20 % karbonové drtě. V rámci tohoto experimentu bylo vytištěno a přeraženo 310 vzorků s procenty výplní 10 %, 20 %, 30 %, 40 %, 60 %, 80 % a 100 %. Kvůli anizotropii, jež je v 3D tisku metodou FDM znatelná, byly voleny dvě sady vzorků. Jedna pro směr rázu na užší stranu (edgewise) a druhá pro směr rázu na širší stranu (flatwise). Hodnota rázové houževnatosti Charpy (a_{cU}) při směru rázu na užší stranu byla u většiny skupin zkoušených vzorků podobná. Při porovnání vzorků z materiálu PET oproti PET/CF bylo zjištěno, že ve všech procentech výplní kromě dvou (60 % a 100 %) je rázová houževnatost Charpy vyšší u materiálu s přídavkem karbonových vláken než u materiálu čistého. Při směru rázu na širší stranu mají vzorky vyztužené karbonovou drtí ve všech procentech výplní kromě 20 % srovnatelnou nebo nižší průměrnou rázovou houževnatost Charpy než vzorky z čistého materiálu PET, avšak rozsah hodnot rázové houževnatosti Charpy je u vzorků z materiálu vyztužených karbonem podstatně menší. V praxi to znamená, že tyto vzorky mají podstatně stabilnější a předvídatelnější chování. Vzorky z materiálu PET/CF se při rázové zkoušce přerážely vždy na dvě části, zatímco vzorky z materiálu PET se přerážely tříštivě na více částí.

Doplňkem experimentu na zjištění vlivu karbonové drtě v tiskové struně na rázovou houževnatost 3D vytištěných zkušebních vzorků s různým množstvím výplně byl experiment, jež měl za cíl zjistit vliv druhu výplně na rázovou houževnatost Charpy. Zkoušeny byly vzorky s výplní typu mřížka (Grid) proti výplni typu trojúhelník (Triangular), a to pouze v materiálu PET v procentech výplní 20 %, 30 %, 40 %, 60 % a 80 %. Bylo zjištěno, že druh výplně nemá výrazný vliv na rázovou houževnatost Charpy, a to ani ve směru rázu na užší stranu, tak ani ve směru rázu na širší stranu. Je to pravděpodobně zapříčiněno velikostí zkušebního vzorku, který je relativně malý a druh výplně se v toto malém objemu neprojeví.

Návazností experimentální části této práce by mohl být rozsáhlejší experiment zaměřený na porovnání více druhů výplní mezi sebou u větších objektů, kde by se mohla projevit výhoda trojúhelníkové výplně oproti mřížce. Dále by mohlo být analyzováno, zda dosahují výplně typu včelí plástev nebo prostorové mřížky typu 3D včelí plástev a Cubic (krychle) vyšších hodnot rázové houževnatosti Charpy než vzorky zkoušené v rámci této práce.

7 ZÁVĚR

Cílem předkládané práce je návrh a konstrukční zpracování FDM 3D tiskárny pro tisk materiálu s příměsí karbonových vláken a návrh a realizace experimentu pro srovnání materiálových vlastností součástí vytištěných z materiálu s příměsí uhlíkových vláken a běžně používaných materiálů (PLA, ABS, PET, aj.).

Rešeršní část této práce je zaměřena na rozbor aditivních metod s důrazem na metodu FDM, jenž je dále v práci použita pro konstrukci zadané 3D tiskárny. V úvodní kapitole je také popsána produkce karbonových vláken, jejich použití ve 3D tisku a vliv těchto vláken na zařízení pro tisk materiálů plněných karbonovými vlákny. V druhé části práce jsou podrobně popsány současné přístupy ke konstrukci FDM 3D tiskáren včetně hlavních komponent využívaných při jejich stavbě. Na tuto kapitolu navazuje konstrukční řešení FDM 3D tiskárny pro tisk materiálu s přídavkem karbonových vláken řešené v rámci předkládané práce.

V konstrukční části se práce věnuje samotnému řešení jednotlivých konstrukčních celků, kterými jsou rám, pojezdový systém osy Z, pojezdový systém v rovině X-Y, konstrukční celek tiskové hlavy, extruder, krytování a elektronika. Zařízení zkonstruované v této práci má tiskovou plochu 200 x 200 mm a maximální výšku tisku 200 mm. Tisková plocha je vybavena vyhřívanou tiskovou podložkou. Celá tiskárna je zakrytována z důvodu vyšší bezpečnosti a zvýšení kvality tištěných součástí vlivem vyšší teploty tiskového prostoru.

Hlavním cílem experimentální části bylo srovnání mechanických vlastností materiálů používaných pro 3D tisk technologií FDM. Byly provedeny dva experimenty. Prvním byla tahová zkouška pro zjištění pevnosti materiálů vyztužených karbonem a srovnání těchto hodnot s materiály bez příměsí. Mezi zkoušené materiály byly zařazeny materiály čisté, kterými jsou PLA, ABS, ASA, PET a Nylon a materiály s aditivy PET/CF, Nylon/CF a Nylon/Kevlar. Z porovnání tahových křivek mezi sebou a z porovnání hodnot meze pevnosti v tahu (odpovídající největšímu zatížení) a modulu pružnosti v tahu bylo zjištěno, že karbonová vlákna v tiskové struně mají velký vliv právě na modul pružnosti v tahu. Oproti neplněnému materiálu tato hodnota vzrostla dvojnásobně. Na pevnost tato vlákna v materiálu PET nemají téměř žádný vliv.

Druhý experiment byl zaměřen na porovnání rázové houževnatosti Charpy vzorků s různým procentem výplně u dvou materiálů, PET a PET s karbonovou drtí. Z důvodu anizotropie byly voleny dvě sady vzorků. Jedna pro směr rázu na užší stranu a druhá pro směr rázu na širší stranu. Hodnoty rázové houževnatosti Charpy u směru rázu na užší stranu byly u vzorků s obsahem karbonových vláken lehce vyšší než u vzorků bez příměsí u většiny skupin zkoušených vzorků. Při hodnocení rázové houževnatosti Charpy ve směru rázu na širší stranu dosahují všechny skupiny vzorků plněných karbonem kromě 20 % výplně srovnatelných nebo lehce horších hodnot než vzorky z čistého materiálu, avšak rozsah hodnot u vzorků plněných karbonem je podstatně menší. V rámci tohoto experimentu bylo také provedeno porovnání vzorků z materiálu PET s různými druhy výplní. Rozdíl v rázové houževnatosti Charpy byl u vzorků s výplní typu mřížky oproti vzorkům s výplní typu trojúhelníku zanedbatelný.

Z obou experimentů vyplývá, že materiál s příměsí karbonových vláken se chová oproti stejnému materiálu bez příměsí stabilněji a méně tříštivě.

Všechny cíle této práce byly splněny. Konstrukční řešení přináší tyto inovativní prvky do konstrukce FDM 3D tiskáren: nezávislá sestava pojezdu v rovině X-Y, hybridní konstrukce 3D tiskárny, nastavitelná příložka spodního uchycení vedení osy Z.

Realizované experimenty potvrdily, že tisk z materiálu s příměsí karbonových vláken má v některých ohledech lepší mechanické vlastnosti než stejný materiál bez příměsí. A to konkrétně v těchto ohledech: dvojnásobná hodnota modulu pružnosti v tahu u vzorků plněných karbonovými vlákny oproti vzorkům neplněným, méně tříštivé chování vzorků vyztužených karbonovými vlákny jak u tahové, tak u rázové zkoušky, menší rozsah hodnot rázové houževnatosti Charpy.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

[1] RAPID PROTOTYPING. 3dtech [online]. 2016 [cit. 2017-02-07]. Dostupné z: http://www.3dtech.cz/rapid-prototyping/

[2] PÍŠKA, Miroslav. Speciální technologie obrábění. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, 247 s. ISBN 978-80-214-4025-8.

[3] NAVRÁTIL, Ing. Robert. Rapid Prototyping [online]. leden 2000 [cit. 2015-02-07]. Dostupné z: http://robo.hyperlink.cz/rapid/index.html

[4] Best 3D Printer Materials: Carbon Fiber Edition. *ENGINEERING.com* [online]. 2016 [cit. 2017-02-08]. Dostupné z: http://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/12957/Best-3D-Printer-Materials-Carbon-Fiber-Edition.aspx

[5] 3D-tisk.cz [online]. Nová média, s. r. o, 2014 [cit. 2017-02-08]. Dostupné z: http://www.3d-tisk.cz/

[6] KRATOCHVÍLOVÁ, Jitka. 3D tisk. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, 2015. ISBN 978-80-7414-936-8.

[7] ISO/ASTM 52900:2015: Additive manufacturing — General principles — Terminology. 2015.

[8] Základy 3D tisku od Josefa Průši. *Kniha základy 3D tisku od Josefa Průši* [online]. 2014, , 12 s [cit. 2017-02-09]. Dostupné z: http://www.prusa3d.cz/kniha-zaklady-3d-tisku-josefa-prusi/

[9] The strongest players in carbon fiber 3D printing today. *3ders.org: 3D printer and 3D printing news* [online]. 2016 [cit. 2017-02-22]. Dostupné z: http://www.3ders.org/articles/20160229-the-strongest-players-in-carbon-fiber-3d-printing-today.html

[10] Mark Two umí tisknout díly s pevností kovu za cenu plastového prototypu. *3d-tisk.cz* [online]. Vydavatelství Nová média, 2016 [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: http://www.3d-tisk.cz/mark-two-umi-tisknout-dily-s-pevnosti-kovu-za-cenu-plastoveho-prototypu/

[11] THE MARK TWO. *Markforged* [online]. [cit. 2017-02-22]. Dostupné z: https://markforged.com/mark-two/

[12] CARBONX™ CARBON FIBER ABS 3D PRINTING FILAMENT. *3DXTECH* [online]. 3DXTech, 2017 [cit. 2017-02-22]. Dostupné z: http://www.3dxtech.com/carbonx-carbon-fiber-abs-3d-printing-filament/

[13] MarkForged Mark One Composite 3D Printer for Carbon Fiber. *3D printing blog* [online]. 2015 [cit. 2017-02-23]. Dostupné z: http://3dprinting-blog.com/tag/cff/

[14] LEGENDRE, André. Uhlíkové materiály: od černé keramiky k uhlíkovým vláknům. Praha: Informatorium, 2001. ISBN 80-86073-82-3.

[15] UHLÍKOVÉ VLÁKNO. *KORDCARBON* [online]. [cit. 2017-02-23]. Dostupné z: http://www.kordcarbon.cz/uhlikove_vlakno

[16] *ZOLTEC: Toray Group* [online]. ZOLTEK™ Carbon Fiber, 2017 [cit. 2017-02-23]. Dostupné z: http://zoltek.com/

[17] Technologies: How do the different 3D printing technologies work? *3D Hubs* [online]. 3D Hubs, 2017 [cit. 2017-02-23]. Dostupné z: https://www.3dhubs.com/what-is-3d-printing#technologies

[18] VESELKA, František a Aleš MIKULČÍK. Speciální technologie. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. Učební texty vysokých škol. ISBN 978-80-7204-621-8.

[19] Is carbon killing your nozzle?: A technical analysis and solution from E3D. *E3D-online* [online]. Velká Británie: E3D-Online.com, 2014 [cit. 2017-03-12]. Dostupné z: http://e3d-online.com/is-carbon-killing-your-nozzle

[20] Typy 3D tiskáren: Základní rozdělení. *MakersLab* [online]. Praha: MakersLab - Paralelní Polis, 2106 [cit. 2017-03-22]. Dostupné z: http://www.makerslab.cz/typy-3d-tiskaren/

[21] *Prusa Research s.r.o.* [online]. Praha: Prusa Research, 2017 [cit. 2017-03-22]. Dostupné z: http://www.prusa3d.cz/

[22] How does the home position work on a Prusa i3 RepRap Printer? In: *3D printing beta* [online]. Stack Exchange, 2016 [cit. 2017-03-22]. Dostupné z: https://3dprinting.stackexchange.com/questions/2593/how-does-the-home-position-work-on-a-prusa-i3-reprap-printer

[23] Kinematics. *Gianluca Pugliese: Fablab Torino* [online]. Turín: Fablab Torino, 2015 [cit. 2017-03-23]. Dostupné z: http://fabacademy.org/archives/2015/eu/students/pugliese.gianluca/project02.html

[24] Another Scara Arm 3D Printer under development. *3ders.org: 3D printer and 3D printing news* [online]. 2014 [cit. 2017-03-23]. Dostupné z: http://www.3ders.org/articles/20140620-another-scara-arm-3d-printer-under-development.html

[25] Zortrax M200 3D Printer. In: *Zortrax* [online]. Zortrax, 2016 [cit. 2017-03-24]. Dostupné z: https://zortrax.com/printers/zortrax-m200/

[26] JELLYBOX. In: *IMade3D* [online]. Vienna, VA: IMade3D [cit. 2017-03-24]. Dostupné z: https://www.imade3d.com/jellybox/

[27] Stratasys Dimension 1200es. *3D Hubs* [online]. 3D Hubs, 2017 [cit. 2017-03-25]. Dostupné z: https://www.3dhubs.com/3d-printers/dimension-1200

[28] UPrint SE Plus. *Stratasys* [online]. Stratasys, 2017 [cit. 2017-03-25]. Dostupné z: http://www.stratasys.com/3d-printers/idea-series/uprint-se-plus

[29] NEMA 17 Stepper Motor. *LulzBot* [online]. Aleph Objects, 2016 [cit. 2017-03-25]. Dostupné z: https://www.lulzbot.com/store/parts/nema-17-stepper-motor

[30] ColorFabb copperFill Metal Filament 1.75mm. In: MatterHackers [online]. California, USA: MatterHackers, 2017 [cit. 2017-03-25]. Dostupné z: https://www.matterhackers.com/store/3d-printer-filament/colorfabb-copperfill-metal-filament-1.75mm-075-kg

[31] V6 Extra Nozzle. *E3D-Online* [online]. Anglie: E3D-Online.com, 2014 [cit. 2017-03-25]. Dostupné z: http://e3d-online.com/v6-Extra-Nozzle-1.75mmx0.80mm

[32] CHAJDA, Radek. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky: pro střední školy*. Praha: Ottovo nakladatelství, 2012. ISBN 978-80-7451-222-3.

[33] RAMBo 1.3. *UltiMachine* [online]. UltiMachine, 2017 [cit. 2017-03-25]. Dostupné z: https://ultimachine.com/products/rambo-1-3

[34] 3D Scanning, Imaging, and Printing in Orthodontics. *INTECH: open science, open minds* [online]. IN TECH, 2015 [cit. 2017-03-25]. Dostupné z: https://www.intechopen.com/books/issues-in-contemporary-orthodontics/3d-scanning-imaging-and-printing-in-orthodontics

[35] NICHOLSON, John W. *The chemistry of polymers*. 3rd ed. Cambridge, UK: RSC Pub., c2006. ISBN 08-540-4684-4.

[36] BĚHÁLEK, Luboš, Ing., Ph.D. *Polymery* [online]. online: Code Creator, s.r.o.; distribuce publi.cz, 2016 [cit. 2017-04-03]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: https://publi.cz/books/180/Cover.html

[37] ČSN EN ISO 527-1: Plasty – Stanovení tahových vlastností – Část 1: Obecné principy. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.

[38] ČSN EN ISO 179-1: Plasty - Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy - Část 1: Neinstrumentovaná rázová zkouška. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.

[39] *AliExpress* [online]. 2016 [cit. 2017-04-13]. Dostupné z: https://www.aliexpress.com

[40] POHYBOVÉ KLUZNÉ ŠROUBY: „trapézové, pilové, ACME“. *KULIČKOVÉ ŠROUBY KUŘIM, a.s.* [online]. 2017 [cit. 2017-04-13]. Dostupné z: http://www.ksk-pm.cz/fileadmin/user_upload/Ostatni_pdf_soubory/kluzne_srouby_CZ.pdf

[41] ASHBY, M.F. a Y.J.M. BRÉCHET. Designing hybrid materials. *Acta Materialia* [online]. Acta Materialia, 2003, **2003**(51), 2-13 [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/222410146_Designing_Hybrid_Materials

[42] 3D-printed ball bearing. *Flickr* [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: https://www.flickr.com/photos/creative_tools/15665998192/in/photostream/

[43] *RepRap* [online]. RepRap Wiki, 2017 [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: http://www.reprap.org/wiki/Main_Page

[44] Support for reverse x-axis direction of H-bot is needed. *GitHub* [online]. 2017 [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: https://github.com/MarlinFirmware/Marlin/issues/2587

9 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

Zkratka	Význam
3D	Třídimenzionální
3DP	Třídimenzionální tisk
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
ABSplus	Akrylonitrilbutadienstyren plus
AM	Aditive Manufacturing (Aditivní výroba)
ASTM	Americká společnost pro zkoušení a materiály
CAD	Computer aided design
CF	Carbon Fiber, karbonové vlákno
CFF	Composite Filament Fabrication
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Plastic/Part
CNC	Computer numerical control
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
HRC	Tvrdost podle Rockwella
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci
Kevlar	Obchodní označení pro aramidová vlákna
LCD	Liquid Crystal Display
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
NC	Numerical control
Nylon	Obchodní název pro Polyamid
PAN	Polyakrylonitril
PEI	Ultem
PET	Polyetylentereftalát
PETG	Polyetylentereftalát-glykol
PLA	Polylactid acid
PWM	Pulse width modulation, pulzně šířková modulace
RAMBo	RepRap Arduino Mega-compatible Mother Board
RAMPS	RepRap Arduino Mega Pololu Shield
RepRap	Replicating rapid prototyper
SD	Secure Digital, typ paměťové karty
STL	Stereolitografie

Symbol	Jednotka	Popis
a_{cN}	[kJ/m^2]	Vrubová houževnatost Charpy
a_{cU}	[kJ/m^2]	Rázová houževnatost Charpy
b	[mm]	Šířka vzorku
b_N	[mm]	šířka vzorku pod vrubem
C	[J.kg^{-1}.K^{-1}]	Měrná tepelná kapacita
d	[mm]	jmenovitý průměr trapézového šroubu
E	[MPa]	Modul pružnosti
E_c	[J]	kinetická energie spotřebovaná k přeražení zkušebního tělesa
F	[N]	Velikost působící síly
F_{max}	[N]	Největší síla naměřená v průběhu zkoušky
$F_{x,y}$	[N]	Maximální síla krokového motoru pro každou osu
h	[mm]	Tloušťka vzorku
k		Počet celých základních kroků motoru na 1 otáčku rotoru
L	[mm]	Upínací vzdálenost mezi čelistmi
L_0	[mm]	Počáteční měřená délka zkušebního tělesa
$L_{c_{x,y}}$	[mm]	Minimální vzdálenost v celém kroku
$L_{m_{x,y}}$	[mm]	Minimální vzdálenost na jeden krok při mikrokrokování
L_t	[mm]	Zvětšení upínací vzdálenosti mezi čelistmi
M_k	[Nm]	Krouticí moment krokového motoru
n	[min^{-1}]	Otáčky trapézového šroubu
n_{max}	[min^{-1}]	Maximální otáčky trapézového šroubu
P	[mm]	Stoupání kuličkového šroubu
Rm	[MPa]	Mez pevnosti v tahu
r	[mm]	Poloměr řemenice
S_0	[mm^2]	Původní průřez zkušebního tělesa
s_m		Počet mikrokroků driveru motoru
Tg	[°C]	Teplota skelného přechodu (glass temperature)
Tm	[°C]	Teplota tavení vlákna (melting temperature)
v	[mm/s]	Maximální rychlost osy Z

v_{max}	[m/min]	Maximální obvodová rychlost v závitu
Z_c	[mm]	Posuv osy Z na jeden celý základní krok
Z_k		Počet kroků systému potřebných k posuv v ose Z o 1 mm
Z_{min}	[mm]	Minimální posuv osy Z na jeden krok
α_k	[°]	Úhel odpovídající jednomu kroku motoru
α_{k1}	[°]	Úhel kroku prvního motoru
α_{k2}	[°]	Úhel kroku druhého motoru
$\alpha_{k1,2}$	[°]	Společná hodnota kroku obou motorů
ΔL_0	[mm]	Zvětšení počáteční měřené délky
Δx		Přírůstek v ose X
Δy		Přírůstek v ose Y
ε	[%]	poměrné (relativní) prodloužení
ε_t	[%]	jmenovité poměrné prodloužení
λ	[$W.m^{-1}.K^{-1}$]	Tepelná vodivost
ρ	[$kg.m^{-3}$]	Hustota
σ	[MPa]	smluvní napětí
σ_b	[MPa]	Napětí při přetržení
σ_m	[MPa]	Mez pevnosti
σ_y	[MPa]	Napětí na mezi kluzu

9.1 Seznam tabulek

TAB 1) POROVNÁNÍ VLASTNOSTÍ MATERIÁLŮ PRO VÝROBU TRYSEK PRO 3D TISKÁRNY [32] 33

TAB 2) ROZMĚRY ZKUŠEBNÍHO TĚLESA 1A 55

TAB 3) VZORKY 1A PRO TAHOVOU ZKOUŠKU 57

TAB 4) HODNOTY ZJIŠTĚNÉ POMOCÍ TAHOVÉ ZKOUŠKY DLE ČSN EN ISO 527 60

TAB 5) ROZMĚRY ZKUŠEBNÍHO TĚLESA TYPU 1 72

TAB 6) VZORKY TYPU 1 PRO ZKOUŠKU RÁZOVÉ HOUŽEVNATOSTI 73

9.2 Seznam obrázků

OBR. 1) PRINCIP TECHNOLOGIE FDM [17] 19

OBR. 2) PŘÍKLAD NEROZEBÍRATELNÉ SESTAVY – FUNKČNÍ LOŽISKO [41] 19

OBR. 3) SROVNÁNÍ TLOUŠŤKY KARBONOVÉHO VLÁKNA A LIDSKÉHO VLASU [12] 20

OBR. 4) A) VÝTISKY Z PLASTOVÉHO MATERIÁLU S PŘÍDAVKEM KARBONOVÝCH VLÁKEN B) NASEKANÁ KARBONOVÁ VLÁKNA [12] 21

OBR. 5) 3D TISKÁRNA MARK TWO OD FIRMY MARKFORGED [11] 21

OBR. 6) TECHNOLOGIE CFF [13] 22

OBR. 7) SROVNÁNÍ FYZIKÁLNÍCH VLASTNOSTÍ UHLÍKU S VYBRANÝMI MATERIÁLY [14] 22

OBR. 8) VÝROBA KARBONOVÝCH VLÁKEN NA BÁZI PAN [14] 23

OBR. 9) SPŘÁDÁNÍ [14] 24

OBR. 10) KARBONOVÉ VLÁKNO V RŮZNÝCH POLOTOVARECH NACHYSTANÝCH PRO DALŠÍ VÝROBU [16] 25

OBR. 11) VÝTISK Z MATERIÁLU S PŘÍDAVKEM MĚDI PŘED (VLEVO) A PO VYLEŠTĚNÍ (VPRAVO) [30] 25

OBR. 12) POROVNÁNÍ TRYSKY PO TISKU MATERIÁLU S PŘÍDAVKEM KARBONOVÝCH VLÁKEN (VLEVO) A NOVÉ TRYSKY (VPRAVO) [19] 26

OBR. 13) SROVNÁNÍ MOSAZNÉ TRYSKY (VLEVO) A TRYSKY Z TVRZENÉHO NEREZU (VPRAVO) [19] 26

OBR. 14) FDM 3D TISKÁRNA PRUSA I3 MK2 [21] 27

OBR. 15) ORIENTACE OS U FDM 3D TISKÁREN [22] 27

OBR. 16) ZLEVA: COREXY A H-BOT [23] 28

OBR. 17) REPRAP 3D TISKÁRNA KOSSEL [20] 28

OBR. 18) FDM 3D TISKÁRNA POLÁRNÍ KONSTRUKCE [20] 29

OBR. 19) PROTOTYP 3D TISKÁRNY TYPU SCARA [24] 29

OBR. 20) 3D TISKÁRNY A) ZORTRAX M200 [25] B) JELLYBOX [26] 30

OBR. 21) A) DIMENSION 1200ES [27] B) UPRINT SE [28] 31

OBR. 22) KROKOVÝ MOTOR S PŘÍRUBOU NEMA 17 [29] 32

OBR. 23) SESTAVA TRYSKY E3D V6 32

OBR. 24) TRYSKY RŮZNÝCH PRŮMĚRŮ PRO HOTEND E3D V6 [31] 33

OBR. 25) PROCES TVORBY 3D MODELU [34] 34

OBR. 26) ŘÍDÍCÍ JEDNOTKA RAMBO 1.3 [33] 35

OBR. 27) GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ ZAPOJENÍ ELEKTRONICKÝCH PRVKŮ 3D TISKÁRNY [43] 35

OBR. 28) KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ 3D TISKÁRNY 37

OBR. 29) PROFIL 103030 OD FIRMY ALUTEC 38

OBR. 30) RÁM NAVRŽENÉ 3D TISKÁRNY 38

OBR. 31) A) KROKOVÝ MOTOR S TRAPÉZOVÝM ŠROUBEM B) MATICE S VYMEZENÍM VŮLE [39] 39

OBR. 32) KOMPENZACE OSY Z 41
OBR. 33) SESTAVA OSY Z 42
OBR. 34) KLASICKÝ SYSTÉM POHYBU 42
OBR. 35) SYSTÉM POHYBU H-BOT 43
OBR. 36) SESTAVA NAPÍNÁNÍ ŘEMENU 44
OBR. 37) SESTAVA POJEZDU V ROVINĚ X-Y 45
OBR. 38) UCHYCENÍ HOTENDU E3D V6 K PLATFORMĚ SESTAVY TISKOVÉ HLAVY POMOCÍ PROFILOVÉ DRÁŽKY 46
OBR. 39) KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ SESTAVY TISKOVÉ HLAVY 46
OBR. 40) HORNÍ POHLED NA SESTAVU TISKOVÉ HLAVY 47
OBR. 41) BULLDOG EXTRUDER S KROKOVÝM MOTOREM NEMA17 [39] 48
OBR. 42) 3D TISKÁRNA SE ZVEDNUTÝM VÍKEM 48
OBR. 43) SPODNÍ POHLED NA 3D TISKÁRNU – ŘEŠENÍ ELEKTRONIKY 49
OBR. 44) DEFORMAČNÍ KŘIVKA [36] 52
OBR. 45) DEFORMAČNÍ KŘIVKY RŮZNÝCH POLYMERŮ [36] 53
OBR. 46) PRŮBĚH TAHOVÉ ZKOUŠKY NA ZAŘÍZENÍ ZWICK Z020 54
OBR. 47) TVARY ZKUŠEBNÍCH TĚLES [36] 55
OBR. 48) 1A VZOREK NACHYSTANÝ PRO TISK (SOFTWARE SIMPLIFY3D) 56
OBR. 49) TISK VZORKŮ 1A Z MATERIÁLU ABS NA ZAŘÍZENÍ PRUSA I3 MK2 57
OBR. 50) PRŮBĚHY TAHOVÝCH KŘIVEK VŠECH MATERIÁLŮ 59
OBR. 51) VÝBĚR Z TAHOVÝCH KŘIVEK JEDNOTLIVÝCH MATERIÁLŮ 61
OBR. 52) POROVNÁNÍ TAHOVÝCH KŘIVEK MATERIÁLŮ PET A PET/CF 62
OBR. 53) MOŽNOSTI HYBRIDIZACE MATERIÁLŮ [41] 63
OBR. 54) SROVNÁNÍ PŘETRŽENÝCH VZORKŮ MATERIÁLŮ PET A PET/CF 63
OBR. 55) POROVNÁNÍ LOMOVÉ PLOCHY MATERIÁLU PET A PET/CF 64
OBR. 56) DETAIL LOMU MATERIÁLU PET/CF 64
OBR. 57) SROVNÁNÍ MATERIÁLŮ S MATRICÍ Z NYLONU 65
OBR. 58) SROVNÁNÍ PŘETRŽENÝCH VZORKŮ NA BÁZI MATERIÁLU NYLON 66
OBR. 59) POROVNÁNÍ LOMOVÉ PLOCHY MATERIÁLU NYLON/CF A NYLON/KEVLAR 66
OBR. 60) VZORKY Z MATERIÁLU ABS, ASA A PLA PO TAHOVÉ ZKOUŠCE 67
OBR. 61) DEFORMACE VZORKŮ Z MATERIÁLU ABS 68
OBR. 62) POROVNÁNÍ LOMOVÉ PLOCHY MATERIÁLŮ ABS A ASA 68
OBR. 63) LOMOVÁ PLOCHA MATERIÁLU PLA 68

OBR. 64) ZKUŠEBNÍ TĚLESO UMÍSTĚNÉ NA PODPĚRÁCH 70
OBR. 65) ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ RÁZOVÉ/VRUBOVÉ HOUŽEVNATOSTI METODOU CHARPY 70
OBR. 66) SCHEMATICKÉ ZNÁZORNĚNÍ SMĚRU RÁZU 71
OBR. 67) PROCENTA VÝPLNÍ JEDNOTLIVÝCH VZORKŮ 72
OBR. 68) RÁZOVÁ HOUŽEVNATOST CHARPY – EDGEWISE (EP) 74
OBR. 69) KRABICOVÝ GRAF – TEORIE 75
OBR. 70) RÁZOVÁ HOUŽEVNATOST CHARPY – FLATWISE (FN) 75
OBR. 71) MÍSTO PŘERAŽENÍ ZKUŠEBNÍHO VZORKU 76
OBR. 72) POROVNÁNÍ PŘERAŽENÝCH VZORKŮ SE 100 % VÝPLNÍ Z MATERIÁLU PET 76
OBR. 73) POROVNÁNÍ PŘERAŽENÝCH VZORKŮ SE 100 % VÝPLNÍ Z MATERIÁLU PET/CF 77
OBR. 74) DETAIL LOMOVÉ PLOCHY MATERIÁLU PET 77
OBR. 75) RÁZOVÁ HOUŽEVNATOST CHARPY – GRID VS. TRIANGULAR (EDGEWISE) 78
OBR. 76) RÁZOVÁ HOUŽEVNATOST CHARPY – GRID VS. TRIANGULAR (FLATWISE) 78

10 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Výkres trysky E3D v6

Příloha 2: Protokol o zkoušce tahem

Externí přílohy

Příloha 3: Souhrnná tabulka hodnot rázové houževnatosti Charpy

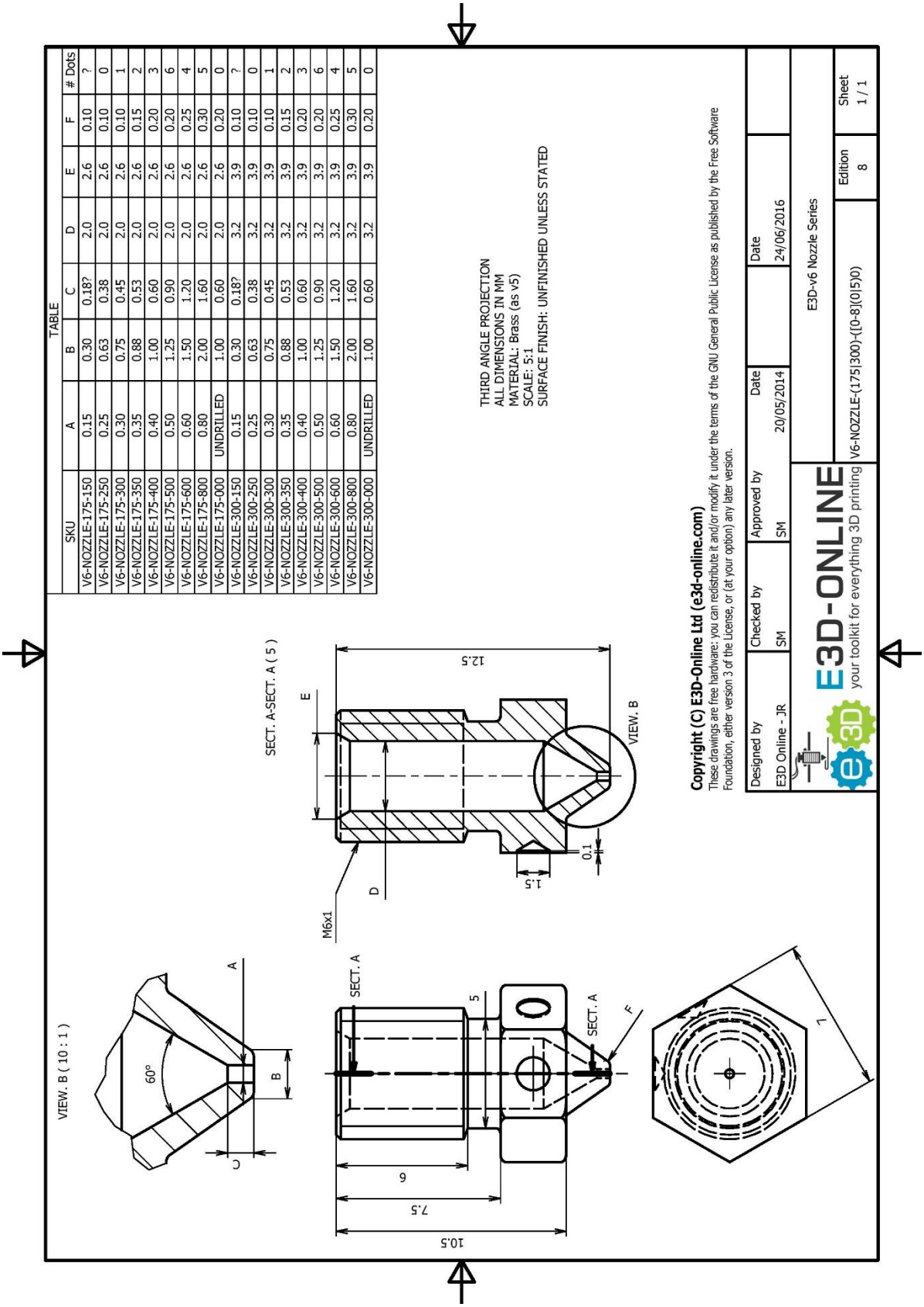
Příloha 4: CD

Příloha 5: Výkres sestavy 3D tiskárny (3D_001)

Příloha 6: Výkres pojízdné desky osy Z (3D_002)

PŘÍLOHY

Příloha 1: Výkres trysky E3D v6



TABLE

SKU	A	B	C	D	E	F	# Dots
V6-NOZZLE-175-150	0.15	0.30	0.187	2.0	2.6	0.10	7
V6-NOZZLE-175-250	0.25	0.63	0.38	2.0	2.6	0.10	0
V6-NOZZLE-175-300	0.30	0.75	0.45	2.0	2.6	0.10	1
V6-NOZZLE-175-350	0.35	0.88	0.53	2.0	2.6	0.15	2
V6-NOZZLE-175-400	0.40	1.00	0.60	2.0	2.6	0.20	3
V6-NOZZLE-175-500	0.50	1.25	0.90	2.0	2.6	0.20	6
V6-NOZZLE-175-600	0.60	1.50	1.20	2.0	2.6	0.25	4
V6-NOZZLE-175-800	0.80	2.00	1.60	2.0	2.6	0.30	5
V6-NOZZLE-175-000	UNDRILLED	1.00	0.60	2.0	2.6	0.20	0
V6-NOZZLE-300-150	0.15	0.30	0.187	3.2	3.9	0.10	7
V6-NOZZLE-300-250	0.25	0.63	0.38	3.2	3.9	0.10	0
V6-NOZZLE-300-300	0.30	0.75	0.45	3.2	3.9	0.10	1
V6-NOZZLE-300-350	0.35	0.88	0.53	3.2	3.9	0.15	2
V6-NOZZLE-300-400	0.40	1.00	0.60	3.2	3.9	0.20	3
V6-NOZZLE-300-500	0.50	1.25	0.90	3.2	3.9	0.20	6
V6-NOZZLE-300-600	0.60	1.50	1.20	3.2	3.9	0.25	4
V6-NOZZLE-300-800	0.80	2.00	1.60	3.2	3.9	0.30	5
V6-NOZZLE-300-000	UNDRILLED	1.00	0.60	3.2	3.9	0.20	0

THIRD ANGLE PROJECTION
ALL DIMENSIONS IN MM
MATERIAL: Brass (as v5)
SCALE: 5:1
SURFACE FINISH: UNFINISHED UNLESS STATED

Copyright (C) E3D-Online Ltd (e3d-online.com)
These drawings are free hardware: you can redistribute it and/or modify it under the terms of the GNU General Public License as published by the Free Software Foundation, either version 3 of the License, or (at your option) any later version.

Designed by	Checked by	Approved by	Date
E3D Online - JR	SM	SM	20/05/2014

Date	
24/06/2016	

E3D-v6 Nozzle Series

E3D-ONLINE
your toolkit for everything 3D printing

V6-NOZZLE-{175|300}-{[0-8]|0|5}0

Edition	Sheet
8	1 / 1

Příloha 2: Protokol o zkoušce tahem

Protokol o zkoušce tahem **24.03.2017**

VUT FSI, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Zkušební parametry:

Zadavatel	:	Snímač síly	:
Imatrikulace / Typ	: OK - 4075	Průtahoměr	:
Materiál	:	Upínací čelisti	:
Zkušební stroj	: ZWICK Z020	Rychlost zkoušky	: 50 mm/min

Výsledky zkoušek:

Nr	Vzorek	E modul N/mm²	F max N	Rm N/mm²
1	test1	3537,60	2213,27	55,33
2	PLA1	3723,76	2290,45	57,26
3	PLA2	3564,87	2395,97	59,90
4	PLA3	3378,84	2219,44	55,49
5	PLA4	3824,03	2431,35	60,78
6	PLA5	3887,13	2455,02	61,38
7	ABS1	1960,17	1579,63	39,49
8	ABS2	1963,10	1389,77	34,74
9	ABS3	1989,08	1398,23	34,96
10	ABS4	1887,99	1405,92	35,15
11	ABS5	1776,32	1288,52	32,21
12	NYLON1	1238,04	1351,28	33,78
13	NYLON2	1227,55	1443,93	36,10
14	NYLON3	1071,46	1313,18	32,83
15	NY_CA1	1394,56	1021,84	25,55
16	NY_CA2	1514,57	1026,85	25,67
17	NY_CA3	1515,62	1022,48	25,56
18	NY_KV1	1687,02	1536,00	38,40

Nr	Vzorek	E modul N/mm²	F max N	Rm N/mm²
19	NY_KV2	1659,63	1566,63	39,17
20	NY_KV3	1529,95	1450,24	36,26
21	ASA1	1867,89	1560,63	39,02
22	ASA2	1574,36	1436,66	35,92
23	ASA3	1776,60	1562,78	39,07
24	ASA4	1743,00	1561,51	39,04
25	ASA5	1604,21	1564,26	39,11
26	PET1	1839,31	1766,89	44,17
27	PET2	1847,27	1916,16	47,90
28	PET3	1834,28	1879,35	46,98
29	PET4	1876,86	1073,12	26,83
30	PET5	1911,91	1612,08	40,30
31	PET_CF1	3619,79	1624,99	40,62
32	PET_CF2	3811,45	1634,63	40,87
33	PET_CF3	3777,54	1747,20	43,68
34	PET_CF4	3685,71	1898,23	47,46
35	PET_CF5	3540,25	1571,85	39,30

Zkoušel : -