



**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

**KONSTRUKČNÍ NÁVRH EXTRUDERU PRO 3D TISK  
KOMPOZITNÍCH SOUČÁSTÍ**

DESIGN OF THE EXTRUDER FOR 3D PRINTING THE COMPOSITE PARTS

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Petr Šmalec**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Petr Kočíš**

**BRNO 2017**



# Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student:	<b>Bc. Petr Šmalec</b>
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Výrobní stroje, systémy a roboty
Vedoucí práce:	<b>Ing. Petr Kočiš</b>
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:

## **Konstrukční návrh extruderu pro 3D tisk kompozitních součástí**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Student navrhne extruder pro 3D tiskárnu se schopností tisku kompozitního materiálu. Extruder bude schopen současně nanášet vrstvy tvořené uhlíkovými nebo skelnými vlákny a termoplastovou maticí.

### **Cíle diplomové práce:**

- Přehled dostupných řešení 3D tiskáren s více tiskovými hlavami
- Konstrukční návrh zařízení
- Potřebné strojírenské výpočty
- Výkres sestavy
- Výrobní výkresy
- Ekonomické zhodnocení
- Dle možností výroba prototypu

### **Seznam literatury:**

Výrobky z plexiskla a jiných plastů [online]. Jedovnice: Koplast, c2008-2016 [cit. 2016-09-23]. Dostupné z: <http://www.koplast.cz/>

Marlin Firmware v1, Basic Configuration Set-up Guide. Airtripper's 3D Printer and Arduino Blog [online]. c2014 [cit. 2016-09-23]. Dostupné z: <http://airtripper.com/1145/marlin-firmware-v1-basic-configuration-set-up-guide/>

Software pro RepRap. Www.C-N-C.cz: Hobby cnc mašinky a jiné domácí cnc projekty [online]. c2007 [cit. 2016-09-23]. Dostupné z: <http://www.c-n-c.cz/viewtopic.php?f=81&t=11416&p=113345&hilit=pronterface>

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**

Diplomová práce je zaměřena na 3D tisk kompozitních součástí. Práce pojednává o metodách aditivní výroby a popisuje princip funkce vybraných technologií 3D tisku. Vedle aditivních technologií je v teoretické části uveden přehled kompozitních materiálů a způsoby výroby kompozitů. Následně jsou uvedeny 4 koncepce řešení, které vedou k 3D tisku kompozitních součástí vyztužených nekonečnými vlákny. Pomocí multikriteriální analýzy je vybrána výsledná varianta a ta je konstrukčně zpracována. Navržený extruder umožňuje 3D tisk kompozitního materiálu. Princip funkce spočívá v prosycení vláken výztuže matricí uvnitř topné kostky, a následné nanášení kompozitu na tiskovou podložku. Součástí extruderu je také mechanismus dělení vláken. Schopnost extruderu je ověřena experimentem.

## **ABSTRACT**

The diploma thesis is focused on 3D printing of composites parts. Thesis deals with methods of additive manufacturing and describes principle of selected 3D printing technologies. In addition to additive technologies, the theoretical part presents an overview of composite materials and methods of composite production. Then there are four concepts that lead to 3D printing of continuous fiber reinforced composites components. The final concept is selected according to multi-criteria analysis and then designed. Designed extruder allows 3D printing of composite materials. The principle of the function consists of fiber impregnation by matrix inside the heat chamber and then deposition of composite on printing platform. The extruder also consist of fiber cutting mechanism. The extruder's ability is verified by the experiment.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

3D tisk, aditivní výroba, kompozitní materiály, extruder 3D tiskárny, 3D tisk kompozitních materiálů, kompozity vyztužené nekonečnými vlákny

## **KEYWORDS**

3D printing, additive manufacturing, composite materials, 3D printer extruder, 3D printing of composite materials, continuous fiber reinforced composites



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

ŠMALEC, P. *Konstrukční návrh extruderu pro 3D tisk kompozitních součástí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 80 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Kočíš.



## **PODĚKOVÁNÍ**

Chtěl bych poděkovat vedoucímu diplomové práce panu Ing. Petru Kočišovi za vedení této práce. Dále bych chtěl poděkovat rodičům za podporu při studiích na vysoké škole.

# ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením pana Ing. Petra Kočiše a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 26. 5. 2017

.....

Petr Šmalec

# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>MOTIVACE</b> .....	<b>15</b>
<b>3</b>	<b>PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ</b> .....	<b>17</b>
3.1	Aditivní technologie .....	17
3.1.1	Historie .....	18
3.1.2	Postup výroby .....	20
3.1.3	Přehled technologií .....	21
3.2	Kompozitní materiály .....	28
3.2.1	Výztuž.....	28
3.2.2	Matrice.....	30
3.2.3	Mechanika vláknových kompozitů.....	31
3.2.4	Technologie výroby .....	32
3.3	3D tisk kompozitních materiálů.....	34
<b>4</b>	<b>ANALÝZA PROBLÉMU A CÍLE PRÁCE</b> .....	<b>35</b>
4.1	Analýza problému.....	35
4.2	Cíle práce .....	35
<b>5</b>	<b>KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ</b> .....	<b>36</b>
5.1	Extruder 3D tiskárny.....	36
5.2	Návrh variant řešení.....	38
5.2.1	Varianta 1 .....	38
5.2.2	Varianta 2 .....	39
5.2.3	Varianta 3 .....	40
5.2.4	Varianta 4 .....	41
5.3	Výběr varianty .....	42
5.3.1	Kritéria hodnocení .....	42
5.3.2	Stanovení vah kritérií.....	43
5.3.3	Bodové ohodnocení variant .....	44
<b>6</b>	<b>KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ</b> .....	<b>47</b>
6.1	Vedení vlákna .....	47
6.1.1	Výpočet přitlačné síly .....	49
6.1.2	Volba pohonu pramence .....	51
6.1.3	Mechanismus stříhání vlákna .....	52
6.1.4	Silový rozbor střížného mechanismu .....	54
6.2	Vedení matrice .....	55
6.2.1	Volba pohonu matrice .....	56
6.2.2	Výpočet přitlačné síly .....	56
6.3	Koncový člen .....	58
6.3.1	Topná kostka.....	58
6.3.2	Oblast nízké teploty .....	58
6.3.3	Kovová trubka a tryska.....	59
6.4	Princip funkce .....	59
6.5	Připojovací rozhraní.....	60
<b>7</b>	<b>EXPERIMENT</b> .....	<b>61</b>
7.1	Cíl experimentu.....	61

7.2	Podmínky experimentu.....	61
7.3	Průběh experimentu.....	62
7.4	Výsledky a zhodnocení experimentu.....	63
<b>8</b>	<b>EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....</b>	<b>65</b>
<b>9</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>67</b>
<b>10</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....</b>	<b>69</b>
<b>11</b>	<b>SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK.....</b>	<b>72</b>
11.1	Seznam symbolů.....	72
11.2	Seznam zkratk.....	75
11.3	Seznam tabulek.....	76
11.4	Seznam obrázků.....	76
<b>12</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>79</b>

# 1 ÚVOD

3D tisk je aditivní způsob výroby součástí, který se v posledních letech rychle rozvíjí. Spočívá v postupném nanášení materiálu na tiskovou podložku a tvorbě výsledné součásti vrstvu po vrstvě. Je tak opakem subtraktivních metod výroby, které jsou v dnešní době stále nejrozšířenější. Vývoj nových metod aditivní technologie sebou přináší i nové možnosti výroby a také možnost použít jiné materiály. Běžnými materiály pro 3D tisk jsou polymery a kovy v různých podobách. Méně používané jsou kompozitní materiály, které ale mohou díky synergickému účinku jednotlivých fází kompozitu nabídnout vlastnosti jinak nedosažitelné. Kompozitní materiály jsou nejčastěji tvořeny dvěma fázemi, matricí a výztuží. Účelem matrice v kompozitu je přenos zatížení na výztuž a ochrana kompozitu proti vnějším vlivům. Výztuž plní funkci pevnostní. Nejčastějším typem výztuže jsou vlákna. Kompozitní materiály jsou výhodné hlavně díky nízké hmotnosti při dosažení dobré pevnosti. Používají se v letectví, kosmonautice nebo závodních automobilech. Oblast 3D tisku kompozitních součástí je zastoupena především tiskem kompozitů s krátkými vyztužujícími vlákny. Výrobou kompozitních součástí s nekonečnými vyztužujícími vlákny se zabývá na trhu pouze společnost Markforged, která používá pro výrobu kompozitů nylonovou matrici s uhlíkovými, skleněnými a aramidovými vyztužujícími vlákny. Použití jiných materiálů je v případě tohoto výrobce nemožné. Je proto vhodné zkoumat metody výroby kompozitních součástí s nekonečnými vyztužujícími vlákny pomocí 3D tisku, a tak dosáhnout nových možností pro návrh a výrobu dílů.

Cílem diplomové práce je navrhnout extruder pro 3D tisk kompozitních součástí, který bude schopen nanášet vrstvy vyztužujících vláken s termoplastovou matricí. Vyztužujícími vlákny budou uhlíková a skleněná vlákna a matricí budou dostupné termoplastové materiály pro 3D tisk.



## 2 MOTIVACE

3D tisk je poslední dobou rychle se rozvíjející oblastí nekonvenčních technologií výroby. Pomocí 3D tisku je možné tisknout složité tvary a vnitřní struktury, které jsou konvenčními metodami buď velmi těžko dosažitelné, nebo až nemožné. Konstrukterům jsou díky tomu otevřeny širší možnosti pro návrh součástí.

Dnes jsou možnosti 3D tisku poměrně rozsáhlé, i když se s ním neseťkáváme denně. V technické praxi zatím převládají konvenční metody a součásti vyrobené 3D tiskem si spíše hledají své uplatnění. Dnes nelze posoudit, kterým směrem se bude 3D tisk ubírat do budoucna, jisté ale je, že nabízí možnosti, kterých jinak není možné dosáhnout.

Mezi rozšířené oblasti 3D tisku patří tisk kovových a plastových součástí. Obě tyto oblasti mají své výhody a nevýhody a existuje několik metod výroby, které je možné pro výslednou součást použít, což dokazuje množství nabízených profesionálních strojů na trhu. Pro dosažení ještě lepších vlastností je možné materiály kombinovat, a proto vznikly kompozity. Ty eliminují nevýhody jednotlivých materiálů a dosahují vlastností lepších než samotný materiál, ze kterého je kompozit vytvořen. Velmi rozšířené jsou kompozitní materiály v oblasti letectví a kosmonautiky, protože dosahují nízkého poměru hmotnosti k dosažené pevnosti.

Konvenční metody výroby kompozitů jsou zastoupeny především lisováním a vstřikováním. Kompozity s nekonečnými vyztužujícími vlákny se vyrábějí především lisováním plochých součástí, což omezuje možnosti využití vlastností těchto kompozitů pro objemové součásti. 3D tisk nabízí řešení tohoto problému, i když dosažené vlastnosti se mohou lišit. Je proto žádoucí prozkoumat tuto oblast, která by ve výsledku mohla nabídnout součásti s vlastnostmi lepšími než dosud vyráběné konvenčními metodami. Na trhu existuje pouze jedna profesionální 3D tiskárna s možností tisku kompozitních součástí a proto jsem se rozhodl tuto oblast prostudovat a navrhnout jinou metodu, kterou by bylo možné pro výrobu kompozitních součástí použít.



## 3 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

### 3.1 Aditivní technologie

Aditivní technologie, dříve nazývané jako Rapid prototyping<sup>1</sup>, je soubor technologií, které v posledních letech zažívají velký rozvoj. Aditivní technologie jsou definovány ISO normou jako: „Proces spojování materiálu pro vytvoření objektu z 3D modelových dat, obvykle vrstvu po vrstvě, jako protiklad subtraktivním procesům výroby.“<sup>2</sup> Z definice technologie vyplývá, že díky aditivní výrobě můžeme přeměnit digitální data v podobě 3D modelu do reálného objektu a to s žádným nebo minimálním odpadním materiálem. [26]

Dřívější označení Rapid prototyping bylo používáno z důvodu výroby prototypů za mnohem kratší dobu, než bylo zvykem konvenčními metodami. Prototypy jsou uplatňovány při návrhu nových předmětů, na kterých je možné si za relativně krátkou dobu odzkoušet funkční vlastnosti, tvar a celkovou ergonomii. Díky zrychlení celého procesu výroby prototypu je významně zkrácena doba návrhu a zvětšila se možnost reagovat na případné nesrovnalosti v konstrukci.

Poslední dobou je technologie využívána v širším odvětví průmyslu a nachází uplatnění nejenom v průmyslové sféře. Proto je častěji používán název aditivní technologie, který více poukazuje na způsob výroby součástí postupným přidáváním materiálu. ISO norma rozděluje výrobní procesy do 7 skupin [26]:

- a) Vytlačování materiálu (*Material Extrusion*)
- b) Nanášení tryskáním (*Material Jetting*)
- c) Tryskání pojiva (*Binder Jetting*)
- d) Laminace plátů (*Sheet Lamination*)
- e) Fotopolymerace (*Vat Photo-polymerization*)
- f) Spékání práškové vrstvy (*Powder Bed Fusion*)
- g) Přímé energetické nanášení (*Directed Energy Deposition*)

Jednotlivé technologie budou popsány v kapitole 3.1.3. V široké veřejnosti je často používán název 3D tisk. Ten může být chápán jako výrobní technologie, která využívá pro nanášení materiálů tiskovou hlavu a trysku. V této práci bude význam pojmu 3D tisk ekvivalentní pojmu aditivní výroba. Zařízení pro aditivní výrobu bude 3D tiskárna.

<sup>1</sup> Z angl. Rapid = rychlý a Prototype = prototyp

<sup>2</sup> Definice podle normy ISO/ASTM 52900:2015

### 3.1.1 Historie

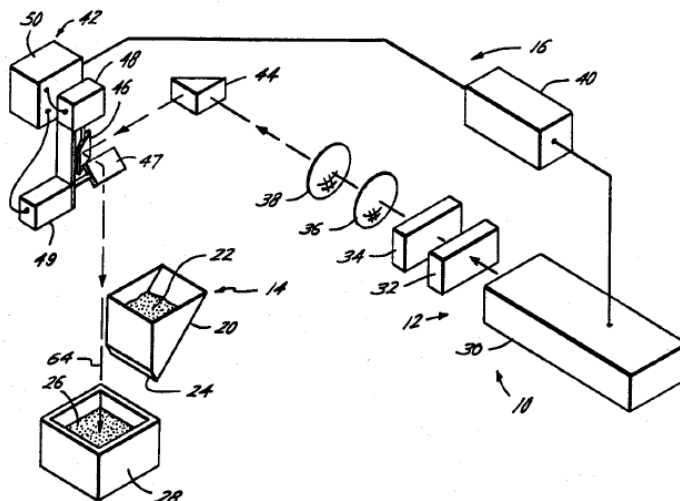
Historický vývoj aditivních technologií je úzce spojen se zavedením a rozšířením elektroniky v průmyslu, zejména počítačů. S klesající cenou počítačů bylo rozšířeno jejich využití v průmyslu a tím také zavedení oblasti výroby s nimi spojených. Jednalo se o počítačem podporované navrhování (CAD), počítačem podporovanou výrobu (CAM) a číslicové řízení strojů (CNC). S těmito systémy je aditivní výroba úzce spjata a bez nich by zřejmě nevznikla. V Tab. 1 jsou uvedeny technologie, které nejvíce ovlivnily vývoj aditivní výroby. [13] [24] [35]

**Tab. 1** Vývoj technologií [24]

Rok vzniku	Technologie
1770	Mechanizace
1946	První počítač
1952	První numericky řízený stroj
1960	První komerční laser
1961	První komerční robot
1963	První interaktivní grafický systém (dřívější verze CAD softwaru)
1988	První komerční rapid prototyping systém

Historie této technologie sahá až do šedesátých let 20. století. Tehdy profesor Herbert Voelcker zkoumal možnosti počítačově řízených aplikací a automatických nástrojů. Zjišťoval, zdali je možné automaticky naprogramovat stroj na základě dat z počítačového návrhu. Výsledkem jeho práce byl matematický popis třídímenzionálního objektu a tyto matematické algoritmy se později staly základem počítačových programů pro návrh součástí. [3][13]

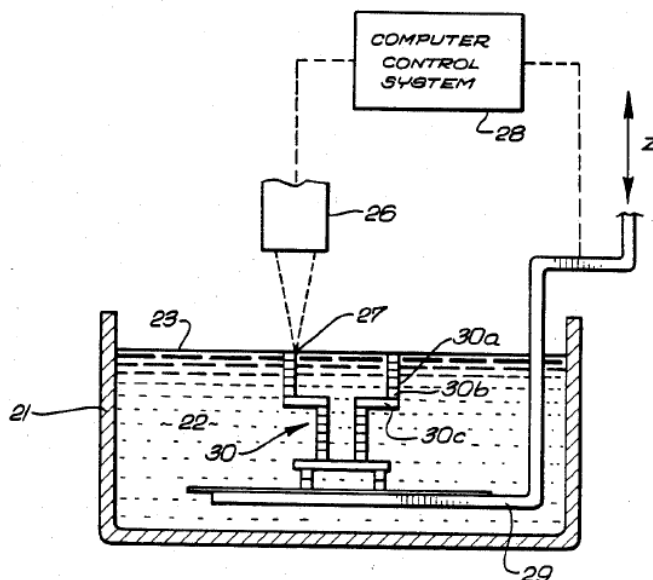
Na začátku osmdesátých let Carl Deckard, výzkumný pracovník z Texaské univerzity v Austinu, přišel s myšlenkou výroby součástí vrstvu po vrstvě. Pro výrobu 3D součástí použil laser, kterým taval prášek materiálu. V roce 1989 získal patent na tuto technologii a nazval ji Selective Laser Sintering. Na Obr. 1 můžeme vidět schéma a popis jeho zařízení. [11][13]



**Obr. 1** Schématický nákres zařízení SLS [36]

10 - zařízení SLS, 12 - laser, 14 - zásobník prášku, 16 - řídicí jednotka laseru,  
 20 - zásobník, 22 - prášek, 24 - otvor, 26 - tisková plocha, 28 - uzavřená nádoba,  
 30 - laserová hlava, 32 - bezpečnostní klapka, 34 - sklo, 36, 38 - optické čočky,  
 40 - počítač, 42 - skener, 44 - optický hranol, 46, 47 - zrcadlo, 48, 49 - galvanometr,  
 50 - řídicí prvek galvanometrů

V roce 1986 si nechal Charles Hull patentovat novou technologii 3D tisku, stereolitografii. Tato technologie měla výrazně zkrátit dobu výroby prototypů. Metoda je založena na vytvrzování fotopolymeru UV zářením. Na Obr. 2 je schéma a popis patentovaného zařízení. Ve stejném roce byl Charles Hull spoluzakladatelem firmy 3D Systems, dnes velké společnosti zabývající se aditivní technologií. [1][13][44]



**Obr. 2** Schéma zařízení stereolitografie [8]

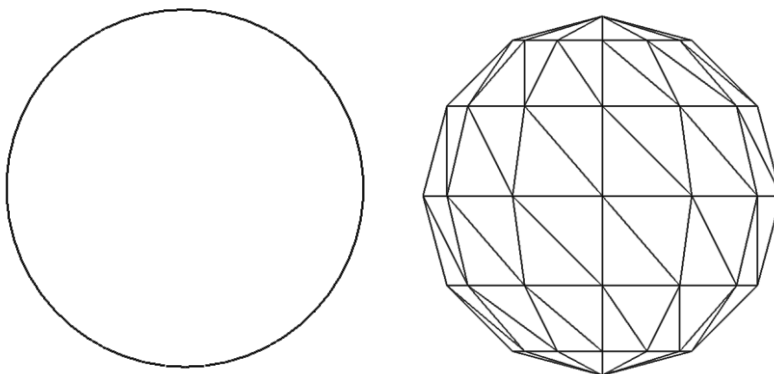
21 - nádoba, 22 - fotopolymer, 23 - pracovní rovina, 26 - UV zářič,  
 27 - UV paprsek, 28 - řídicí počítač, 29 - tisková podložka, 30 - 3D tištěný objekt

### 3.1.2 Postup výroby

Základem pro aditivní výrobu je 3D model součásti. Ten může být vytvořen pomocí CAD softwaru nebo za pomoci reverzního inženýrství skenováním reálného objektu, který bude digitalizován. Tyto digitální data jsou následně uložena ve formátu STL. Jedná se o formát, který byl vytvořen pro stereolitografii a následně byl rozšířen mezi většinu technologií aditivní výroby. Formát STL aproximuje povrch 3D objektu jednoduchými trojúhelníky a mnohoúhelníky a výsledek je vidět na Obr. 3. Některé technologie podporují i jiné vstupní formáty, jako např. IGES. [39]

Následně jsou data zpracována softwarem, který 3D objekt rozdělí na jednotlivé vrstvy. Tento software obsahuje potřebné vlastnosti o 3D tiskárně a je zkalibrován na konkrétní typ tiskárny. Součástí softwaru je i nastavení tiskových parametrů, kterým jsou dány kvalitativní parametry výtisku jako např. drsnost povrchu. Softwarem je určen výrobní postup za pomoci algoritmů a výsledkem je G-kód<sup>3</sup>, kterým je řízena 3D tiskárna.

Řídicí G-kód je zpracováván 3D tiskárnou a postupně je tvořen reálný objekt vrstvu po vrstvě. Součástí výsledného objektu mohou být podpory, které jsou po dokončení výroby odstraněny buď mechanickou nebo chemickou cestou. Na závěr vyžadují některé technologie dodatečné vytvrzení objektu po procesu výroby. Povrch objektu může být upraven (broušením, lakováním) nebo použit tak, jak byl vyroben.



**Obr. 3** STL formát – vlevo koule ve formátu .ipt, vpravo stejná koule ve formátu .stl

<sup>3</sup> G-kód je programovací jazyk, kterým jsou řízeny také CNC stroje

### 3.1.3 Přehled technologií

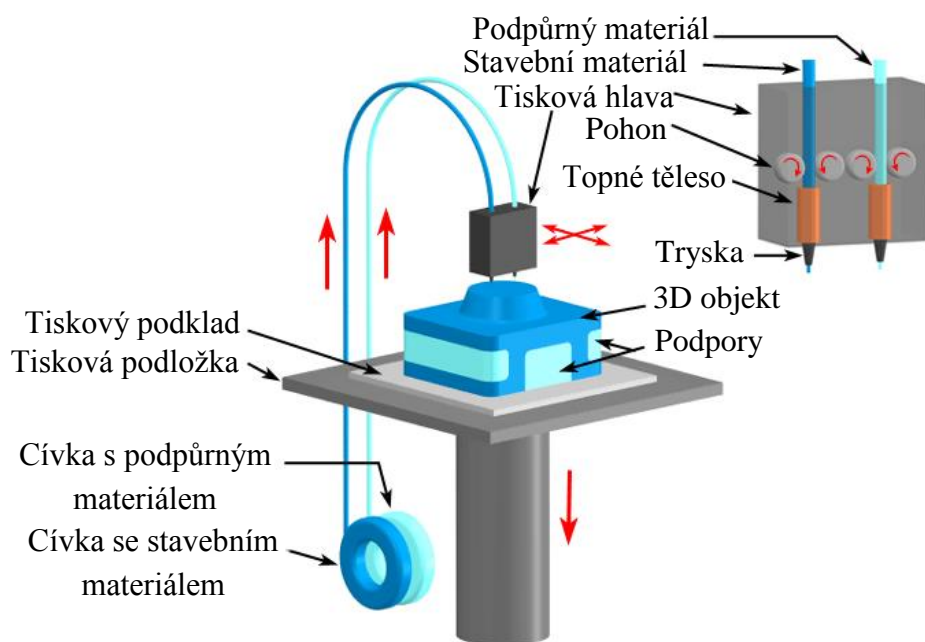
Norma ISO/ASTM 52900:2015 rozděluje aditivní výrobu do 7 výrobních procesů. U každého procesu bude vysvětlen princip a budou uvedeny základní výhody a nevýhody technologií. [26]

#### Vytlačování materiálu (Material Extrusion)

##### **Fused Deposition Modelling**

Technologie, kterou má patentována firma Stratasys od roku 1992. V dnešní době se jedná o nejrozšířenější metodu 3D tisku, kterou si oblíbila velká komunita lidí z celého světa díky dnes už velmi rozšířeným levným tiskárnám a projektu RepRap<sup>4</sup>. Kvůli patentovanému názvu technologie je pro stejnou technologii používáno označení Fused Filament Fabrication. [24]

Princip této technologie je znázorněn na Obr. 4 a spočívá v tavení materiálu. Vstupním materiál je filament<sup>5</sup>, který je dodáván do tiskové hlavy, kde je ohříván nad teplotu tání. Poté je vytlačován tryskou, která nanáší taveninu na tiskovou podložku. Na tiskové podložce materiál chladne. Tisková hlava se pohybuje v ose X a Y a nanáší materiál na určené místo. Takto je nanášena jedna vrstva, podložka klesne o výšku vrstvy a tisková hlava nanáší další vrstvu až je vrstva po vrstvě vytvořen celý model. Způsobů uspořádání a pohybů tiskové hlavy a podložky je několik. Často je užíváno dvou různých materiálů, jeden je stavební a druhý podpůrný. Podpůrný materiál je používán pro tisk podpor a po tisku je mechanicky nebo chemicky odstraněn. Materiálem pro tuto technologii jsou termoplasty.



**Obr. 4** Fused Deposition Modelling [29]

<sup>4</sup> RepRap je projekt s cílem vyrobit výrobní stroj (3D tiskárnu), který je sestaven ze součástek vyrobených na jiném stroji projektu RepRap. Jedná se o replikaci součástí pro vytvoření dalších strojů. Projekt se zasloužil o rozšíření 3D tiskáren mezi širokou veřejností díky cenově dostupným řešením.

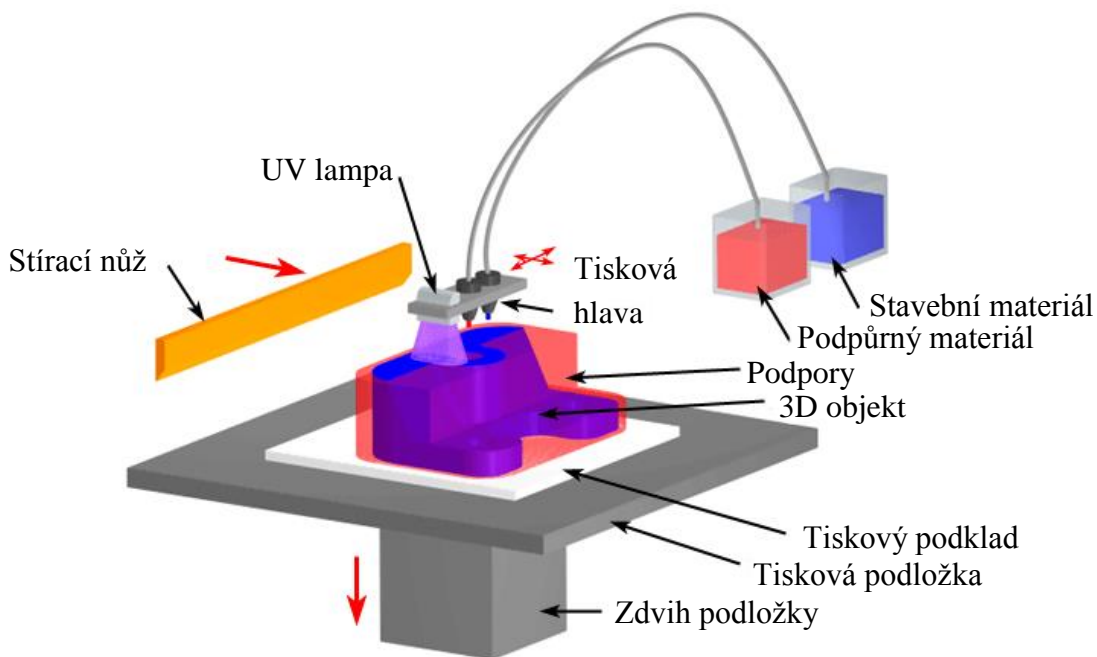
<sup>5</sup> Filament je vlákno v nekonečné délce namotané na cívce.

Výhody této technologie spočívají ve velkém množství materiálů, který lze pro tisk použít. Při tisku vzniká minimum odpadu, případný podpurný materiál lze odstranit vodou apod. Výhodou je také velký tiskový objem. Nevýhodou je špatná kvalita výsledného povrchu, která je dána minimální výškou vrstvy. Ta se pohybuje okolo 0,1 mm. Výsledná přesnost výtisku je ovlivněna velikostí trysky a výškou vrstvy.

## Nanášení tryskáním (Material Jetting)

### **PolyJet**

3D tisk technologií PolyJet je velice podobný klasické inkoustové tiskárně na papír. Tiskárna obsahuje dva materiály (stavební a podpurný materiál, viz Obr. 5). Materiál je nanášen na tiskový podklad pomocí tiskové hlavy, která obsahuje velké množství trysek, a tak může nanášet větší šířku materiálu najednou. Trysky nanášejí malé kapky materiálu a ihned po nanesení je materiál vytvrzen UV lampou. Materiálem tiskárny je fotonpolymer, podpurný materiál je odstranitelný mechanicky nebo vodou.



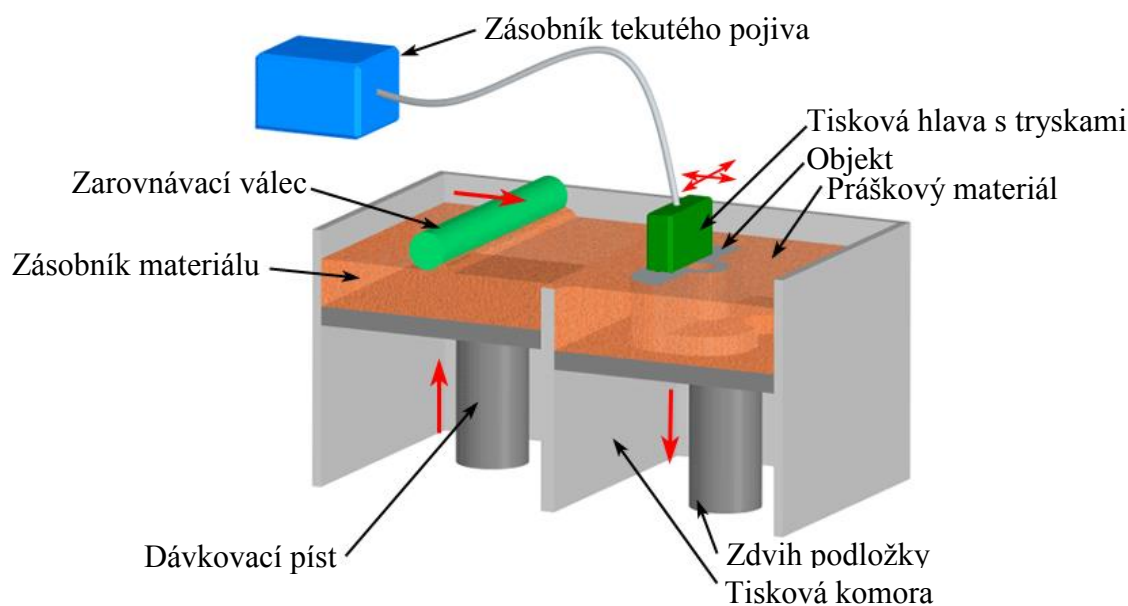
**Obr. 5** PolyJet [30]

Technologie PolyJet poskytuje vysokou kvalitu vytištěných součástí. Výška vrstvy může být až 0,014 mm (Stratasys J750), což má za následek dobrou finální kvalitu povrchu. Technologie je rychlejší než stereolitografie, protože najednou je nanášena širší vrstva materiálu podle šířky tiskové hlavy. K dispozici je velký výběr materiálů a jejich barev. Jistou nevýhodou této technologie je odstraňování podpor, které musí být odstraněny tlakem vody. [24][30]

## Tryskání pojiva (Binder Jetting)

### ColorJet Printing

Technologie aditivní výroby, která nanáší tiskovou hlavou pojivo a tím spojuje práškový materiál (Obr. 6). Pojivo má čtyři barvy CMYK pro dosažení barevného spektra. Jakmile je tisk hotový, nespojený prášek je vysán a může být použitý pro další tisk. Podle účelu je možné výsledný model ponechat bez následných úprav nebo povrchově upravit pro dosažení delší životnosti barevných odstínů. Používaným práškovým materiálem je VisiJet PXL.



**Obr. 6** ColorJet Printing [34]

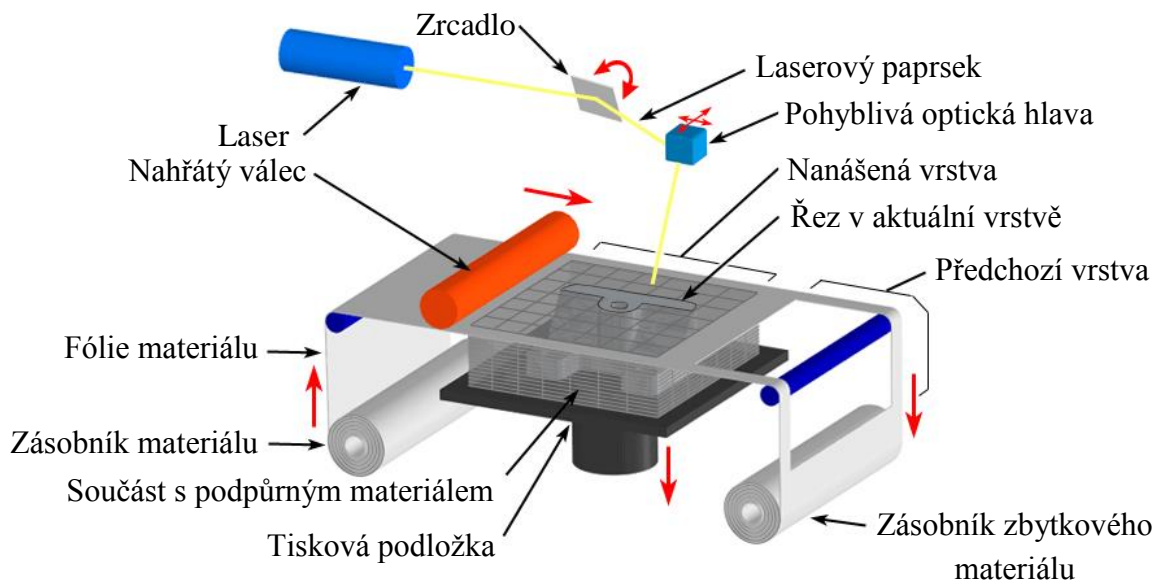
Výhodou metody je rychlý tisk, protože tisková hlava nanáší širokou vrstvu pojiva. Vrstva vznikne během několika sekund. Metodu je možné použít v širokém odvětví průmyslu pro návrh produktů a díky barevnému výslednému objektu je snazší posoudit výsledný dojem. Nevyužitý materiál je možné znovu použít. Na druhou stranu výsledné objekty nemají velkou pevnost a povrch objektu je často nedostačující a potřebuje následný postprocessing<sup>6</sup>. [24][34]

<sup>6</sup> Fáze úpravy modelu, která následuje po výrobě.

## Laminace plátů (Sheet lamination)

### Laminated Object Manufacturing

Materiálem pro tuto technologii je jakýkoliv typ tenké fólie, nejčastěji používaná je fólie papírová (může být ale použita i tenká kovová nebo plastová fólie). Fólie má z jedné strany nanesenou tenkou vrstvu lepidla, které je aktivováno teplem. Samotný tisk začíná navinutím nové vrstvy materiálu na tiskovou podložku, následně je nahřátým válcem aktivováno lepidlo. Tím je vrstva fólie spojena s tiskovou podložkou. Pak je CO<sub>2</sub> laserem vyřezán do fólie obrys součásti a tím je jedna vrstva hotová. Bod řezu je řízen pomocí pohyblivé optické hlavy (viz Obr. 7). Proces pokračuje přetažením nové vrstvy fólie, válcem je fólie přilepena k předchozí vrstvě a laserem je vyřezána nová vrstva. Materiál, který bude po tisku odstraněn, je laserem nařezán na menší části. Tento proces nevyžaduje zvláštní podpory, protože podpory zajišťuje zbytkový materiál. Po tisku se zbytkový materiál mechanicky odstraní a součást je hotova.



**Obr. 7** Laminated Object Manufacturing [31]

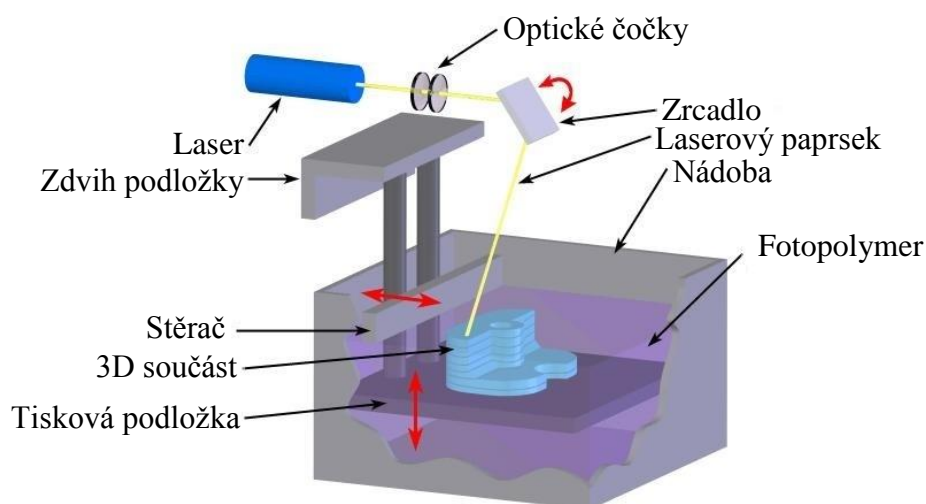
Výhody tisku spočívají v možnosti použití nejrůznějšího materiálu, který je vyroben ve formě tenké fólie a lze řezat laserem. Další výhodou je rychlý čas tisku a vysoká přesnost dána přesností polohování laseru. Nevýhodou metody je špatná tvorba tenkých stěn a časově náročné odstranění zbytkového materiálu. [24][31]

## Fotopolymerace (Vat Photo-polymerization)

### Stereolitografie

Stereolitografie je nejstarší metoda 3D tisku. První tiskárna této technologie byla prodávána už v roce 1988. Technologii vlastní společnost 3D Systems.

Proces této metody začíná naplněním nádoby tekutým fotopolymerem (viz Obr. 8). Následně je tisková podložka vysunuta pod povrch hladiny fotopolymeru o vzdálenost výšky první vrstvy. Ovládáním zrcadla je postupně ozářena jedna vrstva. Jakmile je celá vrstva ozářena, posune se tisková podložka o výšku vrstvy dolů směrem do nádoby tak, aby vytvrzený povrch zalil tekutý fotopolymer. Následně je ozařována další vrstva. Takto se pokračuje, až je vyroben celý objekt. Pro některé objekty je potřeba tisknout podpory, které jsou po tisku mechanicky odstraněny.



**Obr. 8** Stereolitografie [33]

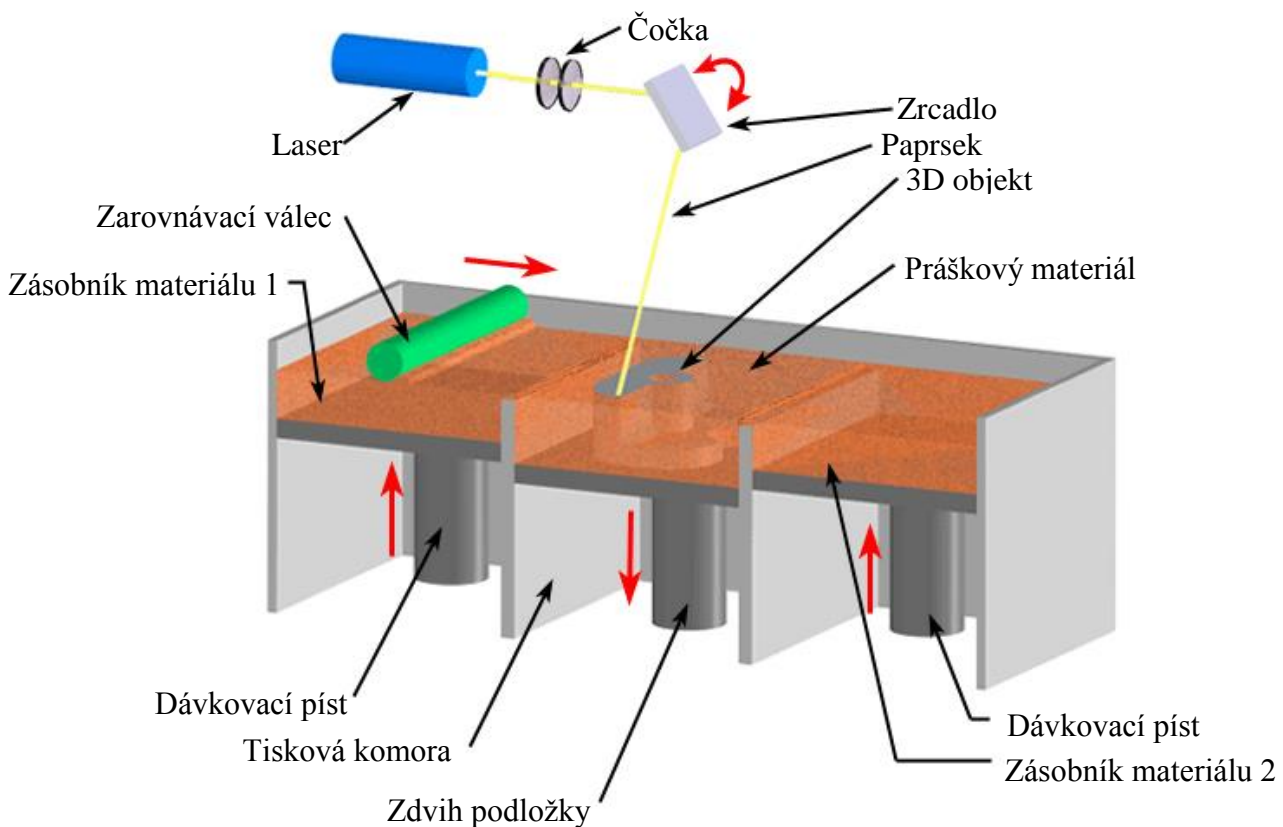
Výhody této metody spočívají v dobré přesnosti tisku. Díky malému průměru laserového paprsku můžeme dosáhnout větších detailů a tisknout malé objekty. Výsledná kvalita povrchu je dobrá, protože výška vrstvy může být až 0,03 mm. Nevýhodou této metody je nutnost podpor pro složitější objekty, postprocessing pro odstranění nechtěného materiálu a někdy je zapotřebí objekt dodatečně vytvrdit pro lepší soudržnost. Jedná se o časově náročnější metodu. [24][33]

## Spékání práškové vrstvy (Powder Bed Fusion)

### Selective Laser Sintering

Technologie SLS je jednou z nejstarších metod 3D tisku. Dnes tuto technologii vlastní společnost 3D Systems, nicméně na velmi podobném principu existují také tiskárny jiných firem. Práškový materiál může být polymerový nebo kovový.

Stavebním materiálem je polymerní prášek nebo kovový prášek s povrchovou úpravou. Působením laserového paprsku je nataven povrch prášku. Při výrobě nedochází k úplnému tavení a tím je zamezeno stékání materiálu mimo požadovanou plochu. Polohování paprsku zajistí spečení celé vrstvy výsledného objektu. Zarovnávací válec následně nahrne tenkou vrstvu nového prášku do tiskové komory a další vrstva může být spékána. Schéma metody je na Obr. 9.



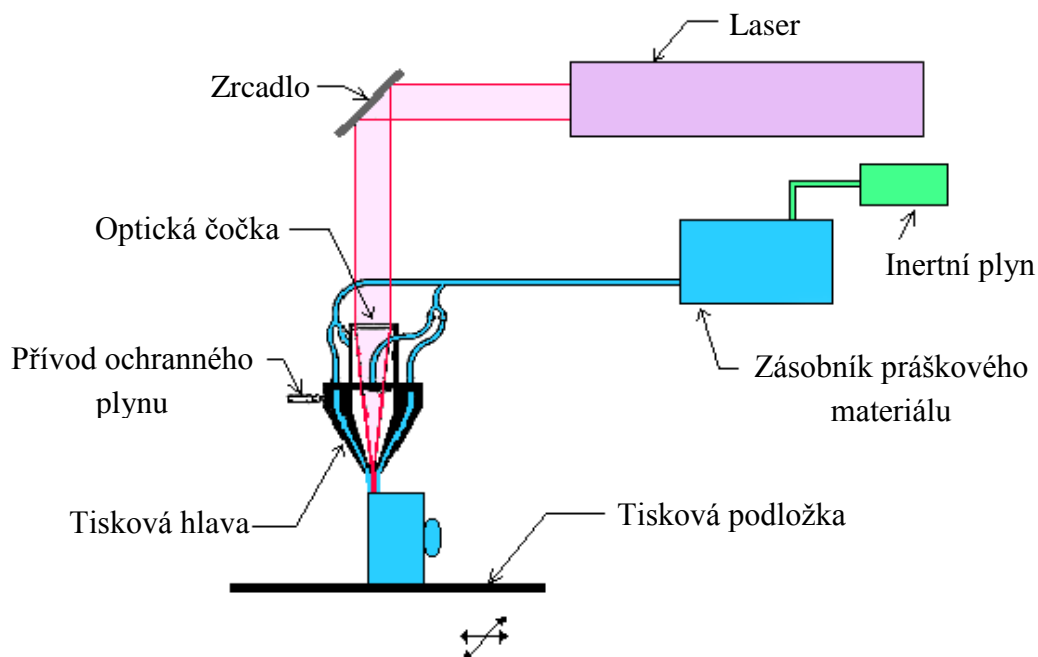
**Obr. 9** Selective Laser Sintering [32]

Touto metodou je možné vytvářet funkční modely díky široké nabídce materiálů, které lze použít (nylon, polykarbonát, kov, keramika, atd.). Technologie nepotřebuje podpurný materiál, protože tím je samotný nenatavený stavební materiál. Nevýhodou jsou větší zástavbové rozměry tiskárny kvůli zásobníkům materiálu a vyšší spotřeba energie. Výsledný povrch objektu má horší kvalitu závislou na velikosti částic prášku. [24][32]

## Přímé energetické nanášení (Directed Energy Deposition)

### Laser Engineered Net Shaping

Technologie LENS využívá pevný Nd-YAG laser s výkonem přibližně 750 až 1000 W pro tavení prášku. Na Obr. 10 je schématický obrázek technologie. Laserový paprsek je ostřen do místa tisku. Inertním plynem je dopravován kovový prášek a pomocí trysek je směřován do ostřeného laserového paprsku, kde je následně taven a nanášen na předchozí vrstvu. Celá tisková komora je hermeticky uzavřena, aby bylo zabráněno oxidaci nataveného materiálu.



**Obr. 10** Laser Engineered Net Shaping [2]

Metoda je používána pro nanášení kovu v hybridních obráběcích strojích a může být také použita pro opravy součástí. Výhodou technologie je široké spektrum kovových materiálů ve formě prášku, lepší materiálové vlastnosti v porovnání s odlitkem a materiálová úspora díky nulovému odpadnímu materiálu. Nevýhodou metody je nižší přesnost a horší kvalita povrchu. [2][24]

## 3.2 Kompozitní materiály

„Kompozit je každý materiálový systém, který je složen z více (nejméně dvou) fází, z nichž alespoň jedna je pevná, s makroskopicky rozeznatelným rozhraním mezi fázemi, a který dosahuje vlastností, které nemohou být dosaženy kteroukoli složkou (fází) samostatně ani prostou sumací.“ [9]

Z definice je patrné, že kompozitní materiály jsou složeny ze dvou nebo více různě odlišných fází, a proto do této kategorie může patřit velké množství materiálů. Důležitým odlišujícím parametrem kompozitů od ostatních materiálů je synergický účinek jednotlivých složek, kterým je dosaženo lepších vlastností než prostou sumací. Pevnější nespojitou složku kompozitu nazýváme výztuž, spojitou poddajnější složku nazýváme matrice. Matrice má menší modul pružnosti a zajišťuje přenos zatížení na výztuž. Zároveň plní funkci odolnosti vůči okolnímu prostředí, a tak chrání materiál výztuže proti mechanickému poškození nebo proti oxidaci. Výztuž přebírá v kompozitu funkci pevnostní. Požadované vlastnosti kompozitů se mohou lišit, např. pro vysokopevnostní kompozit je důležité spojení matrice a výztuže, ale pro dosažení vysoké houževnatosti stačí i soudržnost slabá. Kompozity mohou být přírodní (např. dřevo) nebo umělé. Pro technickou praxi mají význam umělé kompozity. [9]

### 3.2.1 Výztuž

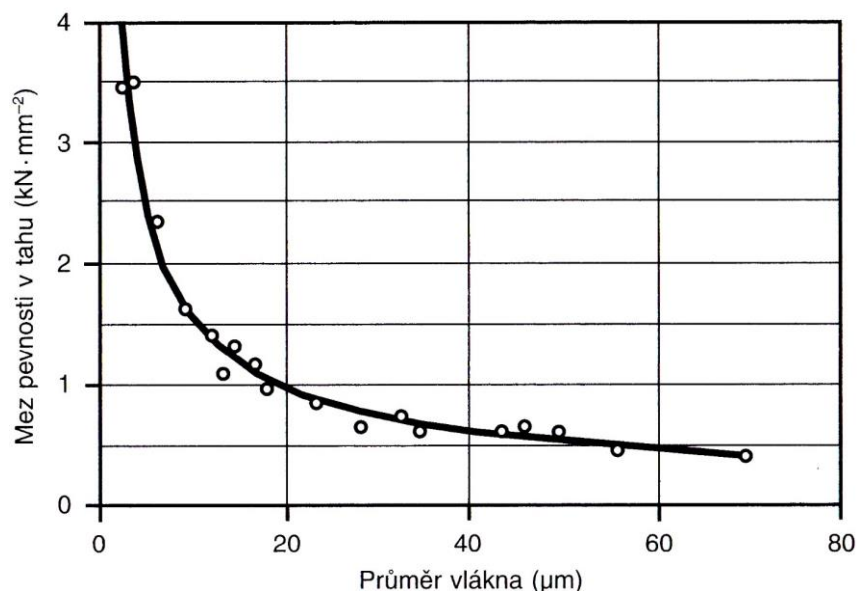
Kompozity mohou obsahovat výztuž různých rozměrů. Podle toho je dělíme na makrokompozity, které mají velikost částic řádově v milimetrech a využívají se nejvíce ve stavebnictví (beton vyztužený ocelovými pruty), mikrokompozity s velikostí částic řádově v mikrometrech a nanokompozity s částicemi rozměru nanometrů. Ve strojírenství se nejčastěji vyskytují mikrokompozity. Podle tvaru výztuže dělíme kompozity na dvě skupiny [9][12][28]:

- a) Vláknové kompozity
  - a. S kontinuálními vlákny
  - b. S krátkými vlákny
- b) Částicové kompozity
  - a. Sférické částice
  - b. Destičkovité částice

Mezi nejčastější výztuž kompozitů patří vlákna. Materiál ve formě vlákna má větší pevnost než v kompaktní podobě (0). Na Obr. 11 je vidět, že pevnost roste se zmenšujícím se průměrem vlákna. Tato vlastnost je dána výrobou vláken, protože se zmenšujícím se průměrem se také zmenšují rozměry vad. Vlákna jsou nejčastěji vyráběna s kruhovým průřezem o průměru 5 až 20  $\mu\text{m}$ . [9][12][28]

**Tab. 2** Porovnání mechanických vlastností vláken a kompaktních materiálů [28]

Materiál	Modul pružnosti [GPa]	Mez pevnosti v tahu [MPa]
Skleněné vlákno typu E	73	2500
Sklovina E	73	100
Uhlíkové vlákno	230 - 950	2000 – 6000
Polykrystalický grafit	10	20
Keramické vlákno SiC	300	3000
SiC monolitický	410	500
UHMW polyethylenové vlákno	90 – 170	3000
Lineární polyethylen	0,4	26



**Obr. 11** Vliv průměru skleněného vlákna na jeho pevnost [12]

Vlákna pro kompozity jsou vyráběna skleněná, uhlíková, polymerní, keramická a kovová. Skleněná vlákna jsou vyráběna tažením z taveniny. Průměr vláken je 3,5 až 20 μm a po tažení z taveniny jsou velmi křehká a abrazivní, proto je při výrobě těchto vláken aplikován na povrch povlak. Výhodou skleněných vláken je nízká cena. Uhlíková vlákna jsou krystalická a mají vysokou hodnotu modulu pružnosti, dobrou teplotní odolnost a nízkou měrnou hmotnost. Díky nízké hmotnosti a vysoké pevnosti jsou tyto vlákna často používána v letectví, kosmických aplikacích nebo závodních automobilech. Polymerní vlákna jsou výhodná díky nízké hustotě. Svou pevnost a tuhost dosahují vlákna orientací makromolekul v podélném směru.

Významným zástupcem polymerních vláken jsou aramidová vlákna<sup>7</sup>. Nevýhodou polymerních vláken je nízká teplotní odolnost. Keramická vlákna mají výbornou odolnost vůči okolnímu prostředí, vysokou tuhost a vysokou tepelnou odolnost (1350-1600 °C). Jsou používány především jako výztuž kovů a keramiky. Kovová vlákna vyztužují polymerní, keramické nebo kovové matrice. Cena těchto vláken je poměrně vysoká (s výjimkou ocelových a hliníkových vláken).

Vlákna jsou dodávány navinutá na cívce (tzv. roving<sup>8</sup> nebo příze) nebo ve formě textilií (rohože, tkaniny). Pro určení velikosti průřezu jednoho pramence je používána jednotka lineární délkové hmotnosti tex (označuje hmotnost 1 km pramence v gramech) a hustota vláken. V případě uhlíkových vláken je používáno tzv. číslo K (s řádem 10<sup>3</sup>), udávající počet základních vláken v pramenci.

Částice jsou do kompozitu přidávány pro zvýšení tuhosti součástí. Záleží na velikosti částic, protože při špatném výběru velikosti mohou mít negativní následek. Důležité je rovnoměrné rozložení částic v součásti, aby bylo dosaženo rovnoměrných vlastností. Destičkovité částice mohou navíc zvýšit pevnost součástí.

### 3.2.2 Matrice

Matrice je materiál v kompozitní součásti, kterým je obklopena výztuž. Jedná se o spojitou fázi, která má menší modul pružnosti než výztuž. Matrice má za úkol:

- Přenášet namáhání na výztuž
- Zajistit geometrickou polohu výztuže a tvarovou stálost součásti
- Chránit výztuž před vlivy okolí

Důležité pro správnou funkci matrice je, aby dokázala vytvořit dobré spojení matrice-výztuž a tím zajistila správnou funkci. Proto je potřeba, aby viskozita matrice během smáčení výztuže byla co nejmenší a byl zajištěn dobrý kontakt s výztuží bez vzduchových bublin. Podle materiálu matrice rozlišujeme kompozity na:

- Polymerní
- Kovové
- Keramické
- Ostatní anorganické

U polymerních kompozitů jsou matrice děleny na termoplasty a reaktoplasty. Z Tab. 3 vychází, že reaktoplasty, díky mnohem nižší viskozitě, budou lépe smáčet výztuž a vazba matrice-výztuž bude lepší. Nevýhodou reaktoplastů je pozdější chemická reakce vytvrzování, kterou jsou měněny výsledné vlastnosti materiálu. Původně se pro kompozitní součásti používaly pouze reaktoplasty, ale v dnešní době se zvyšuje podíl kompozitních materiálů s termoplastovou maticí. Polymerní matrice tvoří nejpočetnější skupinu kompozitních součástí. [9][12][28]

<sup>7</sup> Známá pod obchodní značkou Kevlar

<sup>8</sup> Prameneček, který vzniká sručením určitého počtu základních pramenů bez jejich zkrucování

Kompozity s kovovou maticí mají oproti polymerním kompozitům dobrou elektrickou a tepelnou vodivost a jsou nehořlavé. Tyto kompozity je možné povlakovat a tím zvýšit odolnost vůči vnějšímu prostředí. Nevýhodou těchto kompozitů jsou vyšší výrobní náklady kvůli energetické náročnosti procesu. Nejrozšířenější kovovou maticí je hliník a jeho slitiny, který je možné použít do 600 °C. Matrice je vyráběna z prášku, fólie (lisování za tepla) nebo taveniny. Jako další materiál kovové matrice jsou používány slitiny titanu a superslitiny, které mají teplotní odolnost až 1200 °C. [12]

Keramická matrice má vysokou pevnost i při vysokých teplotách. Je ale křehká, má vysoký modul pružnosti v tahu, a proto není možné použít všechny druhy vyztužujících vláken. Pro matici jsou používány oxidy, nitridy nebo karbidy různých prvků, a proto může být vyrobena v různých formách s různými vlastnostmi. U keramických maticí je potřeba vhodně volit kombinaci matrice a výztuže, aby kvůli chemické reakci výztuž úplně nezankla.

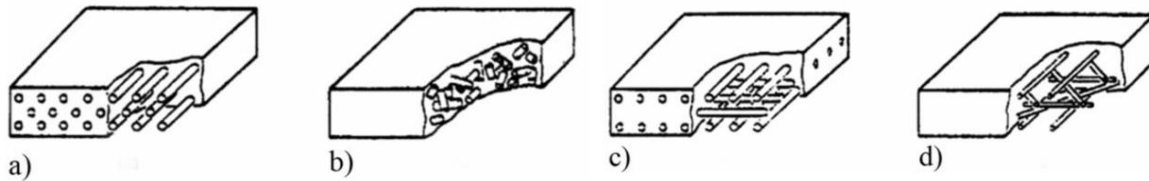
**Tab. 3** Porovnání viskozit termoplastových tavenin a kapalných reaktivních pryskyřic při typických zpracovatelských teplotách [12]

Matrice	Teplota při zpracování	Viskozita při teplotě zpracování
Nevyztužená nenasycená polyesterová pryskyřice (UP-R) vytvrzovaná za studena	10 až 40 °C	stovky mPa·s
Nenasycená polyesterová pryskyřice (UP-R) vytvrzovaná za tepla (např. SMC pasta)	≈ 140 °C	≈ 1000 mPa·s
Nevyztužená epoxidová pryskyřice (EP-R) vytvrzovaná za tepla	≈ 130 °C	stovky mPa·s
Polypropylen (PP)	200 až 270 °C	10 <sup>3</sup> Pa·s
Polyéteréterketon (PEEK)	≈ 350 až 400 °C	10 <sup>3</sup> až 10 <sup>4</sup> Pa·s

### 3.2.3 Mechanika vláknových kompozitů

Struktura kompozitů hraje významnou roli pro výsledné vlastnosti materiálu. Vlákna jsou do kompozitů přidávána pro zvýšení pevnosti a tuhosti. Protože vlákna jsou schopna přenášet zatížení pouze v podélném směru, je důležitá jejich orientace v matici. Na Obr. 12 jsou zobrazeny základní orientace vláken, mezi které patří jednosměrné uspořádání dlouhovláknového kompozitu (Obr. 12a), náhodné uspořádání krátkovláknového kompozitu (Obr. 12b), dvousměrné uspořádání dlouhovláknového kompozitu (Obr. 12c) a náhodné uspořádání dlouhovláknového kompozitu (Obr. 12d). Pro vyztužující účinek vláken musí být splněny tři základní podmínky [12][27][28]:

- Vlákna musí mít větší mez pevnosti než matrice
- Youngův modul pružnosti vláken je vyšší než matrice
- Matrice se nesmí porušit dříve než vlákno



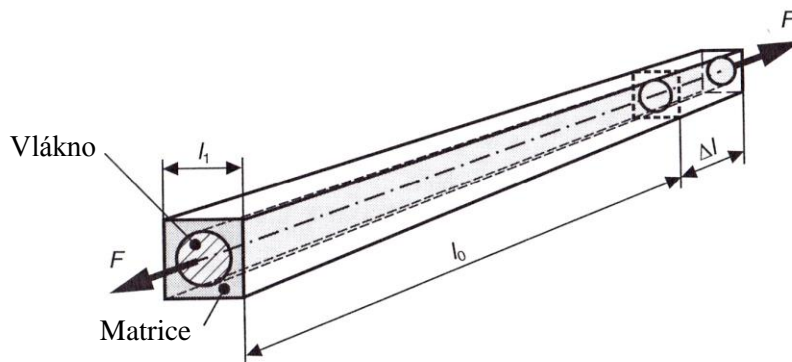
**Obr. 12** Uspořádání vláken v kompozitu [46][48]

Na Obr. 13 je model elementárního vlákna uloženého v matrici a zatíženého tahovou silou. Za podmínky, že se vlákna a matrice přetvářejí stejně až do porušení, platí pro výsledný Youngův modul pružnosti a pevnost kompozitu vztah

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m \quad (1)$$

$$\sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \quad (2)$$

kde  $\sigma_m$  je napětí dosažené v matrici při porušení vláken, maximálně však pevnost matrice. Vztahy (1) a (2) jsou nazývány směšovací pravidla a v případě více než dvou složek kompozitů je na pravé straně rovnic suma všech složek [9][12][48].



**Obr. 13** Model elementárního vlákna uloženého v matrici [12]

### 3.2.4 Technologie výroby [9][12][28]

Výroba kompozitních součástí a polotovarů je závislá na druhu kompozitu a liší se podle použité matrice i výztuže. Výroba kompozitů s reaktoplastovou matricí využívá nízké viskozity reaktoplastu a prosycování vláken je díky tomu jednodušší. Při výrobě kompozitů s termoplastovou matricí je potřeba prosycovat vlákna za zvýšené teploty, a proto je proces energeticky náročnější. Zpracování reaktoplastové matrice trvá déle kvůli procesu vytvrzování. Pro potřeby této práce budou uvedeny pouze technologie výroby kompozitů s termoplastovou matricí.

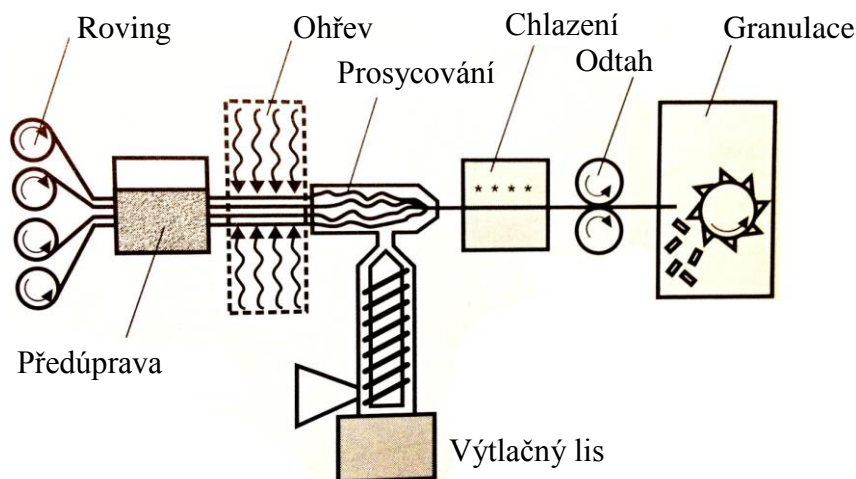
Pro výrobu kompozitů vyztužených krátkými vlákny (0,1 – 5mm) se využívá vstřikovacích lisů. Zde je jako termoplastová matrice použit granulát daného polymeru, který se smísí s nasekanými vlákny. Smíšení může být provedeno až v extruderu nebo je granulát již

vyroben s příměsí vláken. Následně je granulát roztaven a pod tlakem vstřikován do formy, kde chladne. Nevýhoda tohoto postupu je nemožnost orientace vláken a výsledná součást je silně anizotropní. Výhodné je použití vstřikolisu, který je základním zařízením pro zpracování plastů. Filamenty, obsahující krátká vlákna, určené pro 3D tisk jsou vyráběny extruzí. Do zásobníku je přidán granulát a vyztužující vlákna. V extruderu jsou obě složky smíšeny a následně je kompozit protlačován přes kalibrační otvor. Po ochlazení je kontrolován průměr a následně je filament namotán na cívku.

Výroba kompozitu s dlouhými vlákny probíhá ve dvou krocích. Nejprve je vyroben polotovar kontinuální technologií pultruze. Na Obr. 14 je schéma tohoto zařízení. Roving je protahován roztaveným termoplastem a následně ochlazen. Takto jsou vlákna prosycena matricí. V poslední fázi je vlákno nasekáno na granulát požadované délky, která u kompozitů s dlouhými vlákny bývá 10-50 mm. Ve druhém kroku je použit granulát do lisu, kde je lisován do finálního tvaru.

Kompozity s nekonečnými vlákny jsou vyráběny také technologií pultruze, kdy je vyroben profil o daném průřezu, který může sloužit jako polotovar. Zařízení je upraveno podle vyráběného profilu. Roviny jsou protahovány přes otvor, který definuje tvar profilu. Součástí zařízení je kalibrační otvor pro dosažení požadované přesnosti, dopravník pro dlouhé profily a pila, která dělí profil po určitých délkách.

Kompozitní desky jsou vyráběny lisováním rohože a termoplastové fólie. Pro výrobu je použit dvoupásový lis, který nejprve materiál ohřeje nad teplotu tavení materiálu fólie, teplotou a tlakem se prosytí rohož termoplastem, a následně je deska ochlazená. Takto připravený polotovar je zpracováván lisováním do finálního tvaru, kdy je nutné nejprve polotovar předeřhát nad teplotu tavení a následně lisovat pod tlakem.



**Obr. 14** Schéma pultruzního zařízení [9]

### 3.3 3D tisk kompozitních materiálů

V oblasti 3D tisku je výroba kompozitních součástí zaměřena hlavně na kompozity s krátkými vyztužujícími vlákny a termoplastovou maticí. Pro technologie aditivní výroby využívající polotovar ve formě prášku nabízejí výrobci kompozitní prášek, který vznikne smícháním polymerového nebo kovového prášku a vyztužujících vláken. Při výrobě jsou vlákna spojena s tavícím se práškem a vzniká kompozitní součást. Velikost vláken při této metodě je značně omezená a nepřesahuje velikost částic prášku, je tedy nemožné použít dlouhá nebo nekonečná vlákna. Kompozitní součásti mají vyšší tuhost, pevnost a teplotní odolnost. Složení kompozitního prášku většinou není známo a materiály jsou nabízeny pod obchodním názvem. Příkladem kompozitního materiálu pro technologii SLS je DuraForm HST Composite společnosti 3D Systems.

Druhým častým způsobem výroby kompozitních součástí pomocí 3D tisku je technologie FDM. Při výrobě kompozitů vyztužených krátkými vlákny se používají kompozitní filameny. Na trhu existuje mnoho dostupných kompozitních filamentů a výběr závisí na uživateli. K dostání jsou filameny s uhlíkovými, skleněnými nebo aramidovými vlákny a nylonovou, ABS nebo PLA maticí. Vlákna se do těchto materiálů přidávají z důvodů vyšší tuhosti, lepší tepelné odolnosti a rázové houževnatosti, ale také pro zmenšení teplotní roztažnosti materiálu matrice, což má za následek snadnější a uživatelsky přívětivější tisk součástí.

V oblasti 3D tisku kompozitů vyztužených nekonečnými vlákny existuje na trhu jediný výrobce. Společnost Markforged nabízí 3D tiskárny pracující na podobném principu jako FDM. Tiskárna obsahuje dvě trysky, jedna je stejná jako u ostatních zařízení FDM a tiskne pouze plastový filament. Druhá tryska je upravena pro tisk kompozitních vláken. Vstupním materiálem jsou vlákna opatřena termoplastovým povlakem, který slouží jako matrice. Materiál je zaveden do extruderu, kde podávací válce pohánějí vlákna dále do trysky, ve které se povlak taví. Následně je vlákno a matrice pokládáno na tiskovou podložku. Firma Markforged má tuto metodu patentově chráněnou. Nákres metody je v příloze 1.

## 4 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍLE PRÁCE

### 4.1 Analýza problému

Z rešeršní části vyplývá, že procesy aditivní technologie na výrobu kompozitních součástí se soustředí zejména na kompozity vyztužené krátkými vlákny s termoplastovou matricí. Tyto kompozity se vyrábějí na stejných 3D tiskárnách, jako součásti, pro které byly tiskárny navrženy a není tak potřeba žádná modifikace zařízení. U metody FDM je rozdíl pouze v rychlejší opotřebovávání trysky extruderu díky abrazivním účinkům vláken. Výrobci tiskových materiálů v tomto směru vyvíjí nové kompozitní materiály. Příkladem vývoje těchto materiálů může být kompozitní materiál pro FDM tiskárny od českého výrobce filamentů Fillamentum, který kombinuje aramidová vlákna a nylonovou matricí. Tento materiál je prozatím ve fázi testování.

Na stejných zařízeních pro aditivní výrobu je nemožné vyrábět kompozity vyztužené nekonečnými vlákny. Pro výrobu je vhodný způsob extruze materiálu doplněn o možnost dělení vláken pro případ přejezdů a konců vrstvy. Na trhu existuje pouze jeden výrobce zaměřený na tyto kompozitní materiály, který využívá nylonovou matrici v kombinaci s uhlíkovými, skleněnými a aramidovými vlákny. Přidávané vyztužující vlákna jsou povlakovaná, což je obsahem patentu. Materiály pro tuto technologii jsou omezeny pouze na nylonovou matrici a uhlíková, skleněná nebo kevlarová vlákna.

Díky rychlému vývoji aditivních technologií a polymerních materiálů pro 3D tisk je vhodné navrhnout zařízení, které bude schopné vyrábět kompozitní součásti z dostupných materiálů a na kterém bude možné testovat materiálové charakteristiky různých stávajících i nových polymerů v kombinaci s nekonečnými vyztužujícími vlákny.

### 4.2 Cíle práce

Cílem práce je navrhnout extruder pro 3D tiskárnu se schopností tisku kompozitního materiálu s nekonečnými vlákny a termoplastovou matricí. Materiálem matrice budou dostupné polymerní materiály určené pro 3D tisk a vyztuží budou nekonečná uhlíková nebo skleněná vlákna. Extruder musí umožňovat dobré spojení vlákna a matrice a být schopný přerušit tisk z důvodu přejezdu nebo konce vrstvy.

## 5 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

### 5.1 Extruder 3D tiskárny

Extruder je součástí tiskáren technologie FDM. Jedná se o tiskovou hlavu, která má za úkol tavit materiál a nanášet ho na tiskovou podložku. Na Obr. 15 je schéma extruderu, na kterém jsou vidět základní komponenty, ze kterých je složen.

Filament je polymerní termoplastický materiál, který je za pokojové teploty pevný a při zahřátí nad teplotu tavení mění skupenství na kapalné. Pro potřeby FDM tiskáren se dodává navinutý na cívce. Vyrábí se nejčastěji o průměru 1,75 mm nebo 2,85 mm s tolerancí  $\pm 0,05$  mm. V Tab. 4 je seznam materiálů používaných pro technologii FDM s uvedenou teplotou tavení a hustotou.

*Tab. 4 Seznam používaných termoplastů pro FDM technologii*

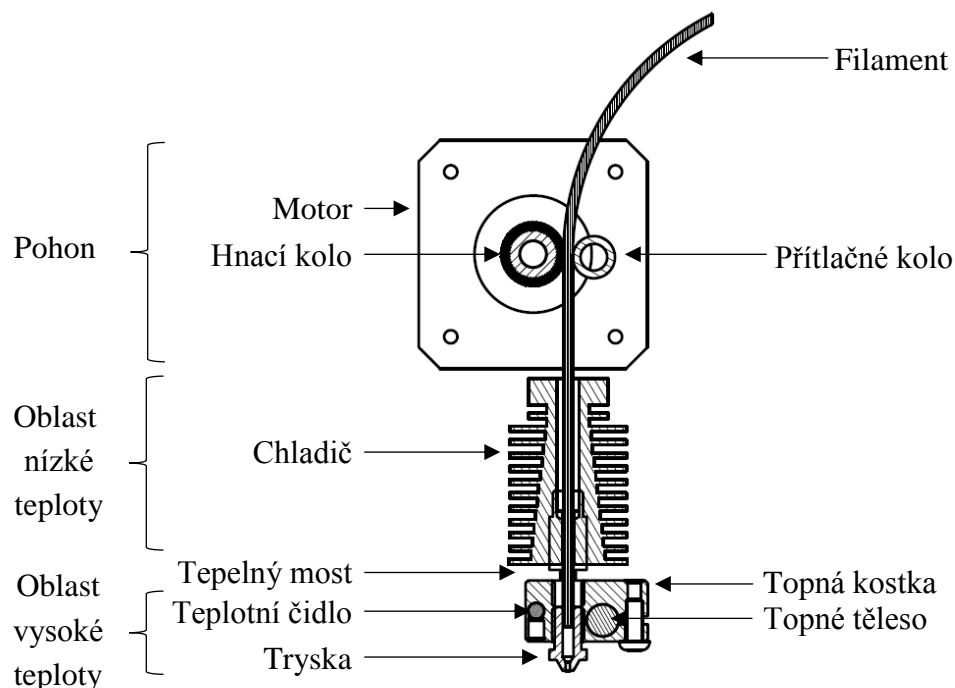
<b>Materiál</b>	<b>Teplota tavení [°C]</b>	<b>Hustota [kg/m<sup>3</sup>]</b>	
ABS	225-245	1100	[46]
PLA	145-160	1240	[20]
PEEK	338	1300	[4]
POM-C	165	1350	[5]
PVDF	169	1780	[6]
Nylon	178	1010	[19]
ASA	220-250	1070	[17]
TPU	215-235	1220	[18]
PEI	320-355	1270	[43]
PC	255	1200	[47]

O pohon se stará motor, který pomocí hnacího a přítlačného kola posouvá filament do tavné komory. Nenatavený filament funguje na principu plunžru, kterým je vyvíjen tlak na taveninu v tavné komoře. Hnací kolo bývá drážkované a spolu s přítlačným kolem, které je působením síly ve stálém kontaktu s filamentem, je zajištěn plynulý pohyb filamentu do tavné komory. Pohon hnacího kola může být napřímo z motoru nebo přes převodový mechanismus. Nejčastějším typem používaného motoru je krokový motor. Tato aplikace nevyžaduje velké otáčky, ale vysoký moment při nízkých i nulových otáčkách, což krokový motor splňuje. Přesnost je zvýšena pomocí mikrokrokování a řídicí elektroniky. Celý pohon může být součástí tiskové hlavy nebo uložen mimo ni. V případě uložení mimo tiskovou hlavu je filament veden ve flexibilní trubičce, která zajišťuje podepření filamentu a přenos pohybu od pohonu do trysky.

Výhodou této varianty je menší zatížení tiskové hlavy, což vede k její lepší dynamice. Nevýhodou je větší vůle ve vedení, která je dána délkou flexibilní trubičky.

Oblast nízké teploty má za úkol udržet filament v pevném stavu. Pro nižší teploty tavení je možné použít materiál s nízkým součinitelem tepelné vodivosti a dobrou teplotní odolností, kterým je například polymerní materiál PEEK. Pro vyšší teploty je používáno aktivní chlazení, které obsahuje chladič a ventilátor. Chladič je kovový, žebrovaný pro zvětšení chlazeného povrchu a lepšího odvedení tepla do okolí. Je vyroben z materiálu s dobrou tepelnou vodivostí. Díky ventilátoru je zrychlena výměna tepla mezi chladičem a okolím.

Tepelný most odděluje oblast nízké a vysoké teploty a má zajistit co největší teplotní gradient. Tavenina by se měla vytvořit až za tepelným mostem. Oblast vysoké teploty je oblast tavení materiálu. Skládá se z trysky, topného tělesa, topné kostky a teplotního čidla. Důležitým parametrem trysky je tvar a velikost výstupního otvoru. Běžné průměry trysek jsou od 0,15 mm do 1 mm. Topné těleso je zdroj tepla. Jedná se o elektrickou součástku měnící energii elektrického proudu na teplo. Teplo, vyvinuté topným tělesem, je vedeno topnou kostkou do trysky. Teplota trysky je snímána teplotním čidlem, díky kterému je zpětně regulována. Používaná teplotní čidla jsou NTC termistory, Pt100 nebo termočlánky.



**Obr. 15** Schéma extruderu technologie FDM

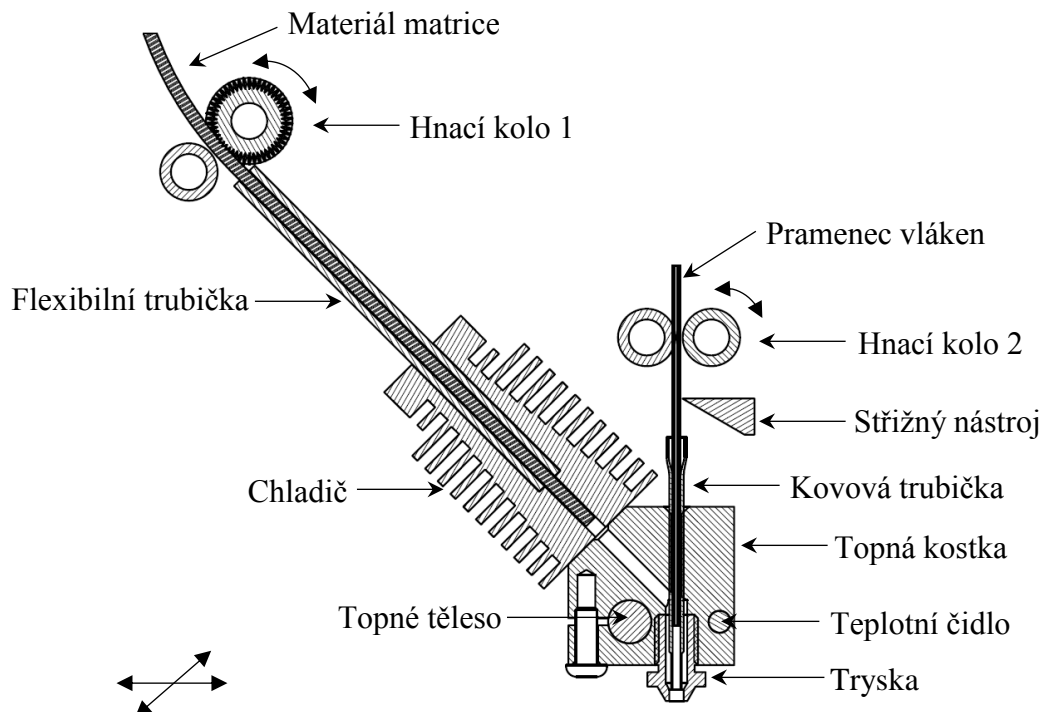
## 5.2 Návrh variant řešení

V rámci práce byly zpracovány 4 varianty řešení. Všechny varianty byly navrženy s ohledem na vstupní materiál, kterým je plastový filament dodávaný na cívce určený pro technologii FDM jako materiál matrice a roving vláken jako materiál výztuže. Obě fáze se mísí až v oblasti extruderu nebo v jeho blízkém okolí.

### 5.2.1 Varianta 1

Varianta 1 je schématicky znázorněna na Obr. 16. Materiál matrice a vlákna jsou dodávány každé zvlášť až do topné kostky, kde se navzájem mísí. Pohon matrice je mimo tiskovou hlavu. Pramenec vláken je přiveden do kovové trubičky, která je zasunuta do trysky a hraje významnou roli pro správnou funkci. Hnací kolo 1 zajišťuje posun matrice a vytváří v topné kostce tlak. Hnací kolo 2 tahá pramenec vláken z cívky a v případě ustřížení pramence posune nová vlákna do kovové trubičky.

Princip funkce spočívá v unášení vláken termoplastovou matricí směrem ven z trysky. Vlákna jsou unášena na tiskovou podložku, kde matrice i vlákna tuhnou a vytváří kompozitní součást. Pro případ přejezdů nebo konce vrstvy je extruder opatřen střížným nástrojem, který oddělí souvislý pramenec vláken. Hnací kolo 2 poté posune vlákna na konec trysky, aby byla připravena pro další vrstvu. Topné těleso zajišťuje zdroj tepla a spolu s teplotním čidlem je teplota zpětnovazebně řízena. Pohyb extruderu není omezen a může se pohybovat v rovině kolmé na osu trysky.

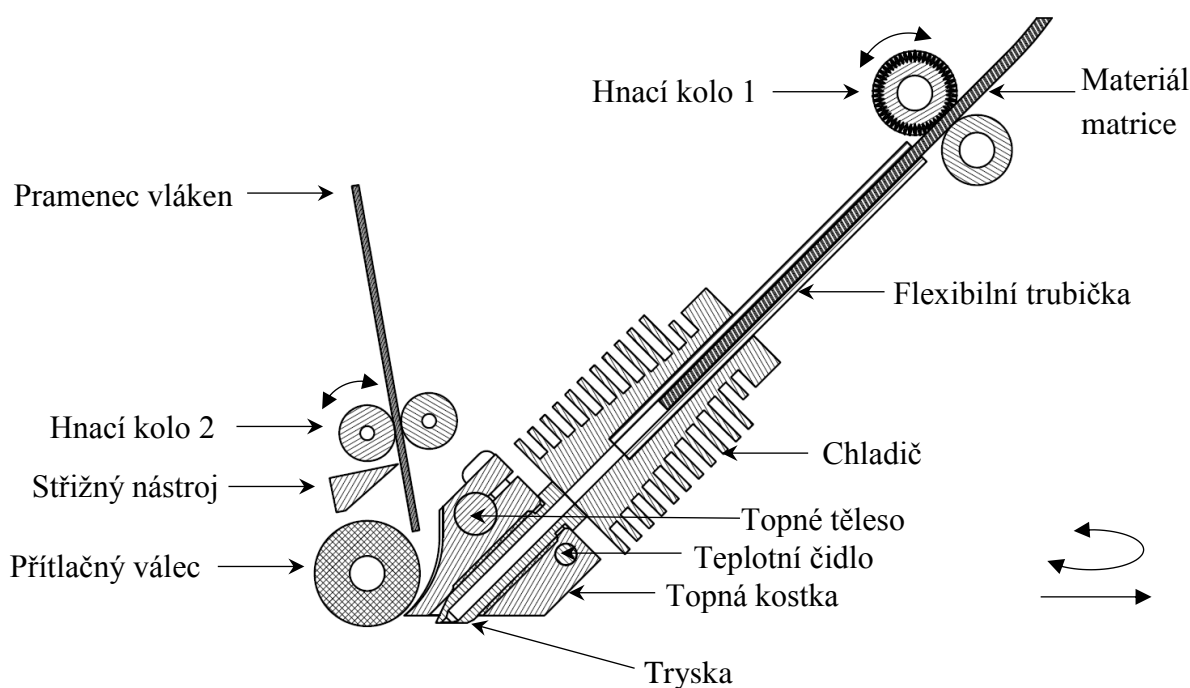


**Obr. 16** Schéma varianty 1

## 5.2.2 Varianta 2

Varianta 2 je schématicky zobrazena na Obr. 17. Vlákna jsou přidávána do matrice za topnou kostkou na tiskovou podložku. Pohon matrice je mimo tiskovou hlavu a matrice je vedena flexibilní trubičkou. Hnací kolo 1 pohání materiál matrice, hnací kolo 2 posouvá pramenec vláken. Přítlačný válec slouží ke zvýšení tlaku na podložku.

Princip funkce spočívá v přidávání vláken do roztavené matrice na tiskové podložce. Materiál matrice je nanesen tryškou na tiskovou podložku a následně jsou do ní přidávány vlákna. Upravený tvar topné kostky zahřívá matrici na tiskové podložce, aby neztuhla dřív, než jsou do ní přidána vlákna a zároveň ohřívá pramenec vláken, aby došlo k lepšímu spojení mezi matricí a vlákny. Přítlačný válec zvýšením tlaku zlepšuje kontakt mezi fázemi i jednotlivými vrstvami. Až za válcem materiál chladne. Teplota topné kostky je snímána teplotním čidlem a zpětnovazebně je řízeno topné těleso. Tato varianta počítá s nutností otáčení extruderu a následným pohybem pouze jedním směrem.

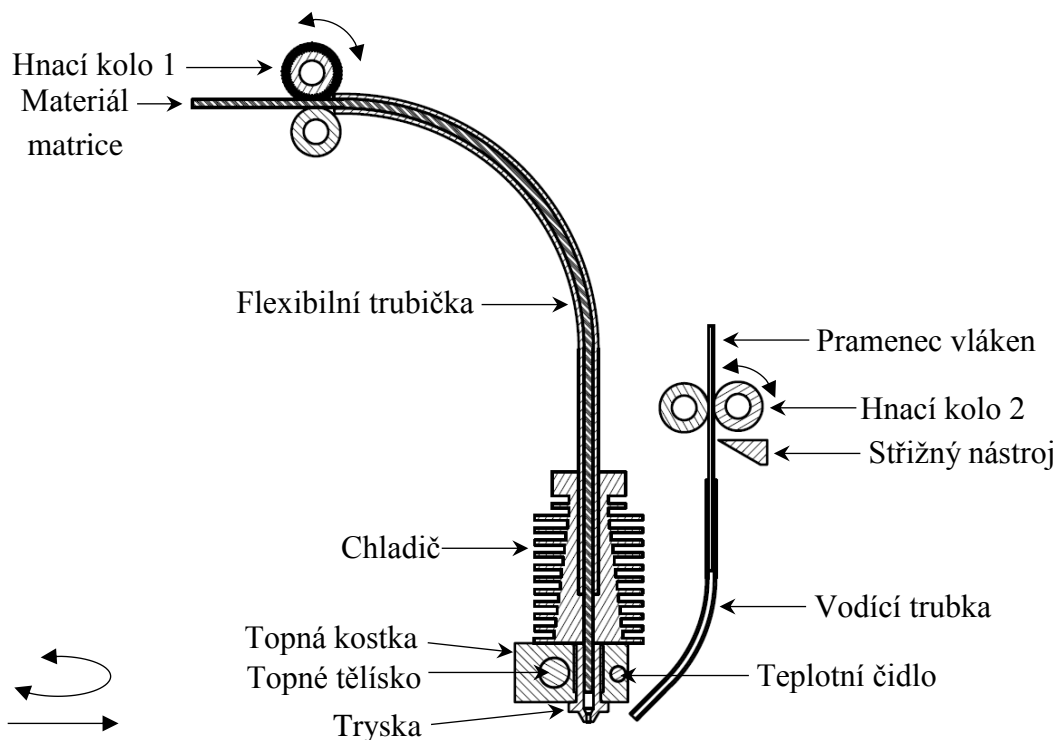


Obr. 17 Schéma varianty 2

### 5.2.3 Varianta 3

Schématický náčrt varianty 3 je na Obr. 18. Matrice a vlákna jsou spojována v opačném sledu, než tomu bylo ve variantě 2. Vlákna jsou kladena na tiskovou podložku a následně je přidávána matrice. Matrice je poháněna hnacím kolem 1 a přes trysku vytlačována na tiskovou podložku. Pohon matrice je mimo tiskovou hlavu a z pohonu je matrice vedena ve flexibilní trubičce. Pramenec vláken je poháněn hnacím kolem 2 a pomocí střížného nástroje je směřován těsně před trysku.

Princip funkce této varianty doplňuje variantu 2 o možnost opačného sledu přidávání fází kompozitu. Napřed jsou na tiskovou podložku položena vlákna těsně před trysku, ze které je dávkována do vláken matrice. Střížným nástrojem je oddělen pramenec vláken v případě potřeby. Délka pramence vláken od střížného nástroje k trysce udává nejkratší možnou délku pramence, který může být použit. Malá vzdálenost mezi koncem vodící trubky a tryskou je důležitá kvůli nevybočení vláken. Je zapotřebí větší průměr trysky než průměr pramence, aby se matrice spojila s tiskovou podložkou, resp. s předchozí vrstvou. Pro správnou funkci musí být vlákna vždy před matricí, a proto je pohyb extruderu omezený. Nutností je rotace ve směru osy trysky a pohyb pouze jedním směrem.

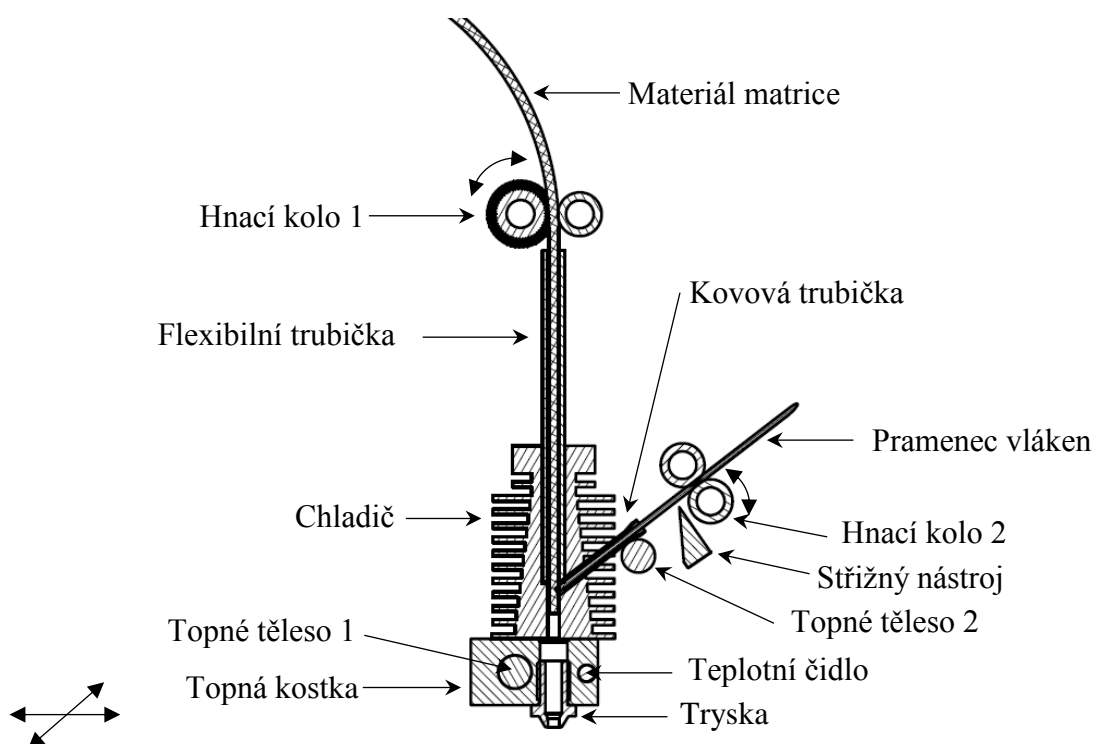


**Obr. 18** Schéma varianty 3

### 5.2.4 Varianta 4

Varianta 4 je poslední navrženou koncepcí řešení. Schématický náčrtek je na Obr. 19. Pramenec vláken je přidáván do materiálu matrice před jejím tavením. Hnací kolo 1 podává materiál matrice do trysky. Hnací kolo 2 podává pramenec vláken do oblasti nízké teploty extruderu, topným tělesem 2 je pramenec vláken zahříván a kovovou trubičkou veden dále k matrici. Topná kostka obsahuje topné těleso 1 a teplotní čidlo pro regulaci teploty v trysce.

Princip funkce této varianty spočívá v přidávání pramence vláken do matrice ještě před oblastí tavení matrice. Pramenec vláken je pomocí topného tělesa 2 nebo odporového drátu zahříván pro lepší spojení vlákna a matrice v oblasti chladiče. Dále je pramenec vláken unášen matricí, která je do extruderu tlačena pomocí pohonu. V topné kostce je matrice tavena, vlákna jsou taveninou smáčena a následně je kompozitní materiál vytlačen na tiskovou podložku. Teplota topné kostky je regulována pomocí teplotního čidla a topného tělesa. Střížný nástroj v případě potřeby dělí pramenec vláken za hnacím kolem 2. Tato varianta nemá omezení pohybu a může se pohybovat v rovině osy trysky jakýmkoliv směrem.



**Obr. 19** Schéma varianty 4

## 5.3 Výběr varianty

Stanovení výsledné varianty, která byla konstrukčně zpracována, probíhalo pomocí vícekritériální analýzy. Cílem bylo porovnat varianty a vybrat tu, která nejvíce vyhovuje stanoveným požadavkům (kritériím). Zároveň analýza zohledňuje váhy jednotlivých kritérií a jejich důležitost pro navrhované řešení. Z metod vícekritériální analýzy byla vybrána bazická metoda, která patří do jednoduchých metod stanovení hodnoty variant. Postup metody spočívá ve stanovení jednotlivých kritérií, určení vah kritérií a bodové ohodnocení jednotlivých variant. [10]

### 5.3.1 Kritéria hodnocení

Kritéria hodnocení jsou stanovena v souladu se stanovenými cíli zadání práce. Jsou definována tak, aby mohla posoudit rozdíly mezi jednotlivými variantami řešení. Všechny varianty byly navrženy pro nekonečně dlouhá vlákna s možností jejich dělení, proto tyto kritéria nebyly do analýzy zahrnuty.

Bodovací stupnice jednotlivých kritérií je označena HBS a může nabývat hodnot  $0,1 \div 1$  s dělením po desetínách. Hodnota  $HBS = 1$  znamená nejlepší hodnotu kritéria,  $HBS = 0,1$  nejhorší hodnotu kritéria. Pro každé kritérium je níže popsán význam maximální a minimální hodnoty.

#### K1 – Spojení výztuže a matrice

- Pro kompozitní materiál je důležité spojení fází kompozitu, v tomto případě termoplastové matrice a vyztužujících vláken. Nejlepšího výsledku a hodnoty kritéria  $HBS = 1$  se dosáhne při úplném prosycení vláken matricí tak, aby byla všechna vlákna matricí obklopena ze všech stran. Takto se dosáhne největší pevnosti součástí. Hodnota  $HBS = 0,1$  znamená žádnou interakci vláken a matrice.

#### K2 – Míra ohýbání vyztužujících vláken

- Extruder musí být schopen šetrně zacházet s pramencem vláken i při jejich manipulaci. Kritérium zohledňuje hlavně míru ohýbání jednotlivých vláken. Skleněná vlákna jsou křehká a při nadměrném ohýbání se lámou, což by způsobovalo zhoršení vlastností kompozitu. Hodnota  $HBS = 1$  tohoto kritéria znamená, že nedojde k ohybu vláken,  $HBS = 0,1$  značí časté ohýbání vláken s minimálním poloměrem ohybu.

#### K3 – Míra omezení pohybu

- Parametr hodnotí omezení pohybu extruderu vlivem jeho správné funkce. Kritérium ovlivňuje složitost konstrukčního řešení i složitější řízení pohybu extruderu, protože při nutnosti otáčení extruderu je potřeba konstrukčně vyřešit vedení vstupního materiálu, aby nedocházelo ke kroucení. Hodnota kritéria  $HBS = 1$  znamená konstrukci neomezující pohyb extruderu,  $HBS = 0,1$  složitou konstrukci s úplným omezením pohybu.

## K4 – Spojení sousedních vrstev

- Výsledné vlastnosti technologie FDM ovlivňuje spojení sousedních vrstev. Pro dobrou soudržnost vrstev je vedle správně nastavených parametrů tisku potřebné nanášení taveniny na předchozí vrstvu. Hodnotu  $HBS = 1$  dosáhne kritérium dokonalým spojením nanášené vrstvy s předchozí vrstvou (soudržnost vrstev rovna vsťikované součásti),  $HBS = 0,1$  znamená nespojené sousední vrstvy.

### 5.3.2 Stanovení vah kritérií

Váha jednotlivých kritérií určuje důležitost zvoleného parametru, někdy je také nazývána kritériem významnosti. Z metod stanovení vah kritérií byla vybrána metoda přímého stanovení pomocí bodové stupnice. Stupnice hodnotí důležitost kritérií body na zvolené stupnici o rozsahu  $1 \div 10$  v oboru celých čísel. Následně se váhy kritérií převedou na normovanou stupnici, aby byla metoda srovnatelná s jinými metodami. Normované hodnoty  $\omega_j$  se určí podle vztahu

$$\omega_j = \frac{v_j}{\sum_{k=1}^n v_k}, j = 1, 2 \dots n \quad (3)$$

V Tab. 5 jsou přiřazeny body jednotlivým kritériím a vypočtena jejich váha. Zároveň tabulka obsahuje zdůvodnění počtu bodů pro dané kritérium.

**Tab. 5** Váhy hodnotících kritérií

Kritérium	Počet bodů	Váha	Zdůvodnění počtu bodů kritéria
K1	10	$\omega_1 = 0,34$	Kritérium hodnotí výsledné vlastnosti a kvalitu vytvořené kompozitní součásti.
K2	8	$\omega_2 = 0,28$	Kritérium hodnotí zacházení s vyztužujícími vlákny a předpoklad pro správný tvar vláken v kompozitní součásti.
K3	4	$\omega_3 = 0,14$	Míra omezení pohybu extruderu je vedlejším kritériem, které neovlivňuje kvalitu kompozitní součásti, ale složitost zařízení.
K4	7	$\omega_4 = 0,24$	Kritérium hodnotí soudržnost vrstev, která má vliv na výsledné vlastnosti vyrobené součásti. Kritérium je ovlivněno pouze materiálem matrice, který soudržnost zprostředkovává.
Celkem	29		

### 5.3.3 Bodové ohodnocení variant

V této kapitole jsou bodově ohodnoceny jednotlivé navržené varianty. Výsledná hodnota varianty VHV se vypočítá ze vztahu (4).

$$VHV_i = \sum_{j=1}^n \omega_j \cdot HBS_{ij} \quad (4)$$

Konkrétní bodové ohodnocení variant je uvedené v následujících tabulkách s příslušným zdůvodněním ohodnocení. Varianta 1 je ohodnocena v Tab. 6, varianta 2 v Tab. 7, varianta 3 v Tab. 8 a varianta 4 v Tab. 9.

**Tab. 6** Bodové ohodnocení varianty 1

Kritérium	Bodové ohodnocení	Zdůvodnění
K1	$HBS_{11} = 0,7$	Vlákna jsou smáčena přímo v tavenině uvnitř trysky. Nedokonalost může nastat při použití většího pramence vláken a neúplném prosycení celého pramence.
K2	$HBS_{12} = 0,6$	Vlákna jsou vedena přímo do trysky, ale na výstupu z trysky jsou ohýbána při pokládání materiálu na tiskovou podložku. Velikost ohybu je dána velikostí a tvarem výstupního otvoru.
K3	$HBS_{13} = 1$	Pohyb tiskové hlavy není omezen.
K4	$HBS_{14} = 0,8$	Extruder umožňuje dobré spojení vrstev na úrovni technologie FDM.

**Tab. 7** Bodové ohodnocení varianty 2

Kritérium	Bodové ohodnocení	Zdůvodnění
K1	$HBS_{21} = 0,3$	Vlákna jsou smáčena až za oblastí topné kostky, kde je teplota výrazně nižší. Matrice tuhne a vlákna se špatně spojují s matricí.
K2	$HBS_{22} = 0,8$	Vlákna jsou mírně ohýbána při pokládání na tiskovou podložku, poloměr ohybu je ale dostatečně velký.
K3	$HBS_{23} = 0,5$	Pohyb tiskové hlavy je omezen na rotaci a pohyb jedním směrem.
K4	$HBS_{24} = 0,8$	Extruder umožňuje dobré spojení vrstev na úrovni technologie FDM.

**Tab. 8** Bodové ohodnocení varianty 3

Kritérium	Bodové ohodnocení	Zdůvodnění
K1	$HBS_{31} = 0,5$	Tavenina je nanášena na vlákna ihned za tryskou. Vlákna jsou smáčena pouze z jedné strany a nemusí dojít k prosycení matrice přes celý pramenec vláken.
K2	$HBS_{32} = 0,8$	Vlákna jsou mírně ohýbána při pokládání na tiskovou podložku, poloměr ohybu je ale dostatečně velký.
K3	$HBS_{33} = 0,5$	Pohyb tiskové hlavy je omezen na rotaci a pohyb jedním směrem.
K4	$HBS_{34} = 0,4$	Nanášením matrice na vlákna dochází pouze k částečné interakci matrice se sousední vrstvou.

**Tab. 9** Bodové ohodnocení varianty 4

Kritérium	Bodové ohodnocení	Zdůvodnění
K1	$HBS_{41} = 0,8$	Vlákna jsou smáčena přímo v tavenině uvnitř trysky. Pramenec vláken je společně s matricí veden až do místa tavení, kde dochází k dobré impregnaci vláken.
K2	$HBS_{42} = 0,4$	Vlákna jsou přiváděna do pevného materiálu matrice, který může vlákna porušit o hranu součásti v místě styku i přes nahřívání vláken. V tomto místě vzniká velký ohyb vláken. Následně jsou vedena spolu s matricí v těsném otvoru, ve kterém může dojít k ořezu pramence a dalšímu poškození vláken. Na výstupu z trysky jsou vlákna znovu ohýbána stejně jako ve variantě 1.
K3	$HBS_{43} = 1$	Pohyb tiskové hlavy není omezen.
K4	$HBS_{44} = 0,8$	Extruder umožňuje dobré spojení vrstev na úrovni technologie FDM.

Výsledná bodová hodnota variant je dána vztahem (4). Výpočet varianty 1 je znázorněn v rovnici (5), varianta 2 v rovnici (6), varianta 3 v rovnici (7) a varianta 4 v rovnici (8).

$$VHV_1 = 0,34 \cdot 0,7 + 0,28 \cdot 0,6 + 0,14 \cdot 1 + 0,24 \cdot 0,8 \quad (5)$$

$$VHV_1 = 0,74$$

$$VHV_2 = 0,34 \cdot 0,3 + 0,28 \cdot 0,8 + 0,14 \cdot 0,5 + 0,24 \cdot 0,8 \quad (6)$$

$$VHV_2 = 0,59$$

$$VHV_3 = 0,34 \cdot 0,5 + 0,28 \cdot 0,8 + 0,14 \cdot 0,5 + 0,24 \cdot 0,4 \quad (7)$$

$$VHV_3 = 0,56$$

$$VHV_4 = 0,34 \cdot 0,8 + 0,28 \cdot 0,4 + 0,14 \cdot 1 + 0,24 \cdot 0,8 \quad (8)$$

$$VHV_4 = 0,72$$

Z výpočtu vyplývá, že nejvýhodnější variantou pro konstrukční návrh extruderu na kompozitní součásti vyztužené nekonečnými vlákny je varianta 1.

## 6 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Z kapitoly 5 vyplynulo nejvýhodnější koncepční řešení, kterým je varianta 1 (schématicky popsána na Obr. 16). Konstrukční řešení bude rozděleno do 3 oblastí na vedení vlákna, vedení matrice a koncový člen.

### 6.1 Vedení vlákna

Tento konstrukční uzel řeší vedení pramence vláken, jeho odvíjení z dodávané cívky a podávání do trysky extruderu. Součástí je i mechanismus dělení vlákna.

V první řadě je potřeba zvolit pramenec vláken, který bude tvořit výztuž kompozitní součásti. Materiálem výztuže budou uhlíková a skleněná vlákna. Velikost nejmenších dodávaných pramenců uhlíkových vláken a základní mechanické vlastnosti jsou uvedeny v Tab. 10, v Tab. 11 pak vlákna skleněná. Pramenec bude do trysky veden kovovou trubičkou o daném průměru, který nebude možné měnit. Z toho důvodu je potřeba volit pramenec uhlíkových a skleněných vláken o přibližně stejném průměru. Pro výpočet teoretického průměru pramence můžeme odvodit vztah (9), který vychází z předpokladu kruhového průřezu o průměru  $d_p$  a délce  $l_p$ .

$$d_p = \sqrt{\frac{4 \cdot m_p}{\rho_p \cdot l_p}} \quad (9)$$

**Tab. 10** Uhlíková vlákna společnosti Toho Tenax Co., Ltd. [45]

Označení	Průměr vlákna [ $\mu\text{m}$ ]	Počet vláken [ $10^3$ ]	Délková hmotnost [tex ; $\frac{\text{g}}{\text{km}}$ ]	Hustota [ $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ]	Mez	Modul	Tažnost [%]
					pevnosti v tahu [MPa]	pružnosti v tahu [GPa]	
Tenax <sup>®</sup> -J HTA40	7	1K	67	1770	4100	240	1,7
Tenax <sup>®</sup> -E HTA40	7	3K	200	1770	4100	240	1,7
Tenax <sup>®</sup> -J/E HTA40	7	6K	400	1770	4100	240	1,7
Tenax <sup>®</sup> -J HTS40	7	3K	200	1770	4400	240	1,8
Tenax <sup>®</sup> -J HTS40	7	6K	400	1770	4400	240	1,8
Tenax <sup>®</sup> -E HTS40	7	12K	800	1770	4400	240	1,8

**Tab. 11** Skleněná vlákna společnosti PPG Fiber Glass [15][16]

Označení	Průměr vlákna [ $\mu\text{m}$ ]	Délková hmotnost [ $\text{tex}$ ; $\frac{\text{g}}{\text{km}}$ ]	Hustota [ $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ]	Mez pevnosti v tahu [ $\text{MPa}$ ]	Modul pružnosti v tahu [ $\text{GPa}$ ]
HYBON <sup>®</sup> 2002	14	275		2290	
HYBON <sup>®</sup> 2002	14	300		2290	
HYBON <sup>®</sup> 2002	12 / 15	600		2290	
NTY 2002	12	198			
NTY 2002	10	134			
NTY 2002	10	68			
Cem-FIL <sup>®</sup> 5325*		320	2680	1700	72

\*Produkt výrobce Owens Corning pro doplnění chybějících parametrů [42]

V textilním průmyslu se místo hmotnosti uvádí délková hmotnost s vedlejší jednotkou soustavy SI tex. Pro přepočítání se použije vztah (10).

$$T = \frac{m_p}{l_p} \quad (10)$$

$$\left[ \text{tex} = 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{m}} \right]$$

Díky vztahům (9) a (10) můžeme vypočítat teoretický průměr pramence vyráběných vláken. U skleněných vláken, které nemají v Tab. 11 uvedenou hustotu, budeme předpokládat hustotu  $2680 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  podle [42]. Výsledné teoretické průměry  $d_p$  jsou uvedeny v Tab. 12.

**Tab. 12** Teoretické průměry pramenců vláken

Typ vlákna	Délková hmotnost $T$ [ $\text{tex}$ ]	Hustota $\rho_p$ [ $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ]	Průměr $d_p$ [ $\text{mm}$ ]
Uhlíková vlákna	67	1770	0,39
	200	1770	0,67
	400	1770	0,95
	800	1770	1,34
Skleněná vlákna	68	2680	0,32
	134	2680	0,45
	198	2680	0,54
	275	2680	0,64
	300	2680	0,67
	320	2680	0,69
	600	2680	0,95

Pro zajištění dobrého smáčení v trysce extruderu je vhodné vybírat menší průměry pramenců vláken. Tím bude zajištěno lepší prosycení taveninou matrice a také možnost menšího průměru výstupní trysky. Z uvedených důvodů byl zvolen pramenec uhlíkových vláken s délkovou hmotností 67 tex (počet vláken 1K) a teoretickým průměrem 0,39 mm a pramenec skleněných vláken s délkovou hmotností 68 tex a teoretickým průměrem 0,32 mm.

Pramenec vyztužujících vláken je z cívky, na které je dodáván, veden pomocí teflonové hadice k tiskové hlavě. Teflonová hadice je vyráběna o nejmenším vnitřním průměru 1 mm a má dobré kluzné vlastnosti, vnější průměr hadice je 2 mm [40]. Konce hadice jsou připojeny pomocí pneumatického přímého šroubení Festo QSM-M5-2 [14]. Jeden konec je šroubením spojen s rámem stroje nebo pomocným držákem poblíž cívky s vlákny, druhý konec šroubení je spojen s ramenem přítlačku, které je součástí tiskové hlavy.

### 6.1.1 Výpočet přítlačné síly

Rameno přítlačku je součást, která díky přítlačného kola svírá s hnacím kolem pramenec vláken a má za úkol vytvořit neustálý kontakt s hnacím kolem. Přítlak je vyvozen pružinou přes pákový mechanismus. Spolu s motorem tvoří pohon pramence vláken, který lze vidět na Obr. 21. Hnací a přítlačné kolo mají na povrchu pryžový válec o tloušťce stěny 1 mm z důvodu zvýšení tření. Pryžový válec je vyroben z pryžové tyče o vnějším průměru 16 mm z materiálu NBR. Do tyče je vyvrtán otvor průměru 14 mm a pryž je nalepena na kovové kolo. Vlivem přítlačku je pryž deformována a je zvětšena třecí plocha.

Pro výpočet přítlačné síly byla použita Hertzova teorie kontaktu dvou válců, ze které lze odvodit vztah (11) pro polovinu šířky kontaktní plochy. Vyjádřením síly z tohoto vztahu dostáváme rovnici (12).

$$b = \sqrt{\frac{2F_{př}}{\pi l} \cdot \frac{(1 - \mu_1^2)/E_1 + (1 - \mu_2^2)/E_2}{1/d_1 + 1/d_2}} \quad (11)$$

$$F_{přt} = \frac{b^2 \pi l}{2} \cdot \frac{1/d_1 + 1/d_2}{(1 - \mu_1^2)/E_1 + (1 - \mu_2^2)/E_2} \quad (12)$$

Hertzova teorie vychází z kontaktu dvou těles s materiálovými konstantami  $E$  a  $\mu$ . Dle [41] má pryž hodnotu modulu pružnosti v tahu  $E = 0,0015$  GPa a Poissonovu konstantu  $\mu = 0,49$ . Šířka kontaktní plochy musí být zvolena s ohledem na tloušťku stěny a průměr pryžového válce. Z geometrie mezikruží můžeme vypočítat šířku kontaktní plochy při stlačení o tloušťku stěny  $2b_{\max} = 7,7$  mm bez vlivu deformací. Při takovém stlačení by nastalo porušení pryže vlivem velkého napětí, proto volím šířku kontaktní plochy  $2b = 4$  mm. Tomu odpovídá stlačení 0,254 mm. Ze vztahu (12) můžeme vypočítat sílu potřebnou pro zvolenou šířku kontaktní plochy dvou pryžových válců o průměru 16 mm a délce 10 mm. Výpočet je uveden v rovnici (13), všechny jednotky jsou převedeny na základní jednotky soustavy SI.

$$F_{přt} = \frac{(2 \cdot 10^{-3})^2 \cdot \pi \cdot 10^{-2}}{2} \cdot \frac{1/(16 \cdot 10^{-3}) + 1/(16 \cdot 10^{-3})}{\frac{(1 - 0,49^2)}{(1,5 \cdot 10^6)} + \frac{(1 - 0,49^2)}{(1,5 \cdot 10^6)}} \quad (13)$$

$$F_{přt} = 7,8 \text{ N}$$

Z výpočtu (13) vyplývá, že pro dosažení kontaktní plochy o šířce 4 mm dvou stejných pryžových válců je potřeba síla 7,8 N. Přítlačné a hnací kolo nejsou vyrobeny pouze z pryže a díky kovovému kolu uvnitř bude velikost kontaktní plochy menší, to ale nemá vliv na správnou funkci popsanou na začátku kapitoly 6.1.1, a proto bude tato skutečnost dále zanedbána.

Přítlačná síla je vyvozena pružinou přes pákový mechanismus. Silové rozložení je zobrazeno na Obr. 20. Velikost síly pružiny vypočteme z momentové rovnováhy k ose rotace, pasivní odpory budou zanedbány.

$$\sum M_z = 0 \quad F_{přt} \cdot 15,5 - F_{pružt} \cdot 37 = 0 \quad (14)$$

$$F_{pružt} = F_{přt} \cdot \frac{15,5}{37} = 7,8 \cdot \frac{15,5}{37}$$

$$F_{pružt} = 3,3 \text{ N}$$

Z výpočtu (14) vychází síla 3,3 N, kterou musí pružina vyvodit. Z nabídky firmy Hennlich byla vybrána tlačná pružina 42/4/2 s průměrem drátu 0,63 mm, vnějším průměrem 6,93 mm, volnou délkou 17 mm a tuhostí 1,17 N/mm [21]. V zatíženém stavu je stlačena o 3,5 mm. Skutečná síla pružiny je vypočtena v rovnici (15). Výsledná přítlačná síla je vypočtena z rovnice (14).

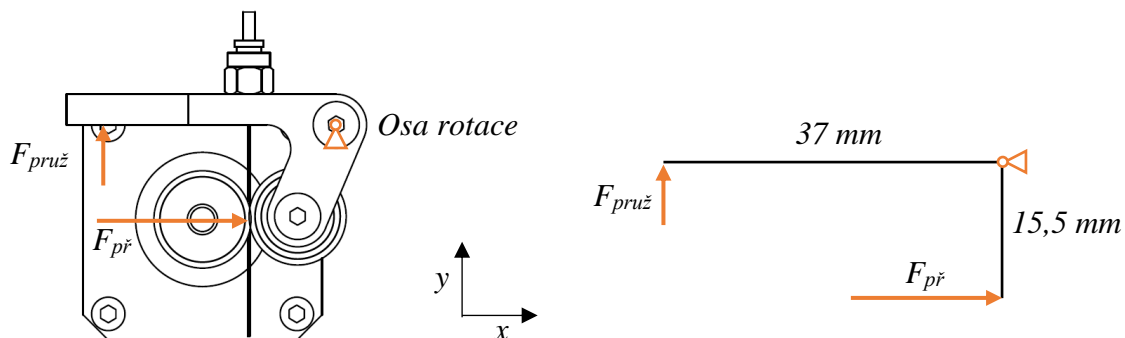
$$F_{pruž1} = k_1 \cdot y_1 = 1,17 \cdot 3,5 \quad (15)$$

$$F_{pruž1} = 4,1 \text{ N}$$

$$F_{př1} = F_{pruž1} \cdot \frac{37}{15,5} = 4,1 \cdot \frac{37}{15,5} \quad (16)$$

$$F_{př1} = 9,8 \text{ N}$$

Výsledná velikost síly, kterou působí pružina na pákový mechanismus, je 4,1 N. Skutečná přítlačná síla je z rovnice (16) rovna 9,8 N.



**Obr. 20** Silové rozložení ramena přítlaku pramence

### 6.1.2 Volba pohonu pramence

Motor zajišťuje odvíjení pramence z cívky a přidržení pramence při stříhání. Rychlost motoru je závislá na rychlosti tisku. Pro tuto aplikaci se hodí krokový motor z důvodu jeho vysokého statického momentu a možnosti řízení bez potřeby zpětné vazby. Pro výpočet momentu motoru vyjdeme z předpokladu, že odpor pramence ve vedení je minimální díky teflonové hadici a největší význam má valivý odpor způsobený deformací pryže hnacího a přítlačného kola. Ostatní pasivní odpory budou zanedbány. V kapitole 6.1.1 byla stanovena šířka kontaktní plochy  $2b = 4 \text{ mm}$  a v rovnici (16) vypočtena velikost přítlačné síly  $F_{př} = 9,8 \text{ N}$ . Přítlačná síla působí kolmo ke kontaktní ploše, a tak je to také síla normálová. Působíště normálové síly je vlivem deformace pryže posunuto o rameno valivého odporu. V našem případě použijeme velikost ramena valivého odporu rovnu polovině šířky kontaktní plochy. Ze vztahu (17) můžeme vypočítat velikost momentu způsobeného valivým odporem.

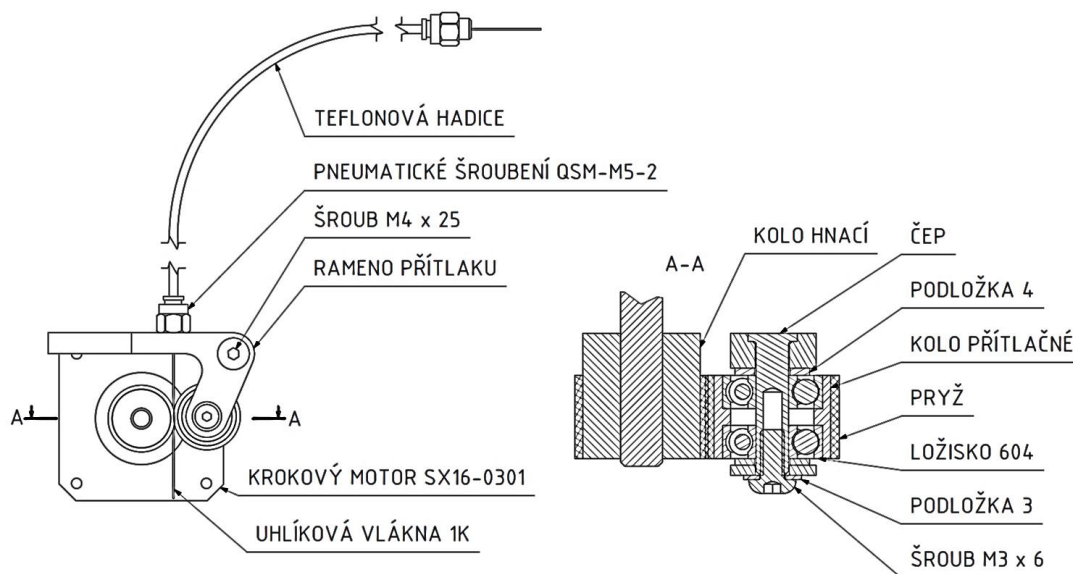
$$M_{val} = N \cdot e \quad (17)$$

$$M_{val} = 9,8 \cdot 2 \cdot 10^{-3}$$

$$M_{val} = 0,02 \text{ Nm}$$

Tento moment působí proti momentu motoru, a proto musí motor tento moment překonat. Z katalogu krokových motorů firmy Microcon [37] byl vybrán nejmenší motor řady SX s typovým označením SX16-0301, který má statický moment  $0,11 \text{ Nm}$ , délku kroku  $1,8^\circ$  a přípojovací přírubu NEMA17. Délka pramence, kterou motor odvine, je dána počtem kroků a průměrem hnacího kola. Minimální délka odvinutého pramence pro jeden krok je  $0,25 \text{ mm}$ , při použití řídicí elektroniky s mikrokrokováním je možné tuto hodnotu ještě zmenšit.

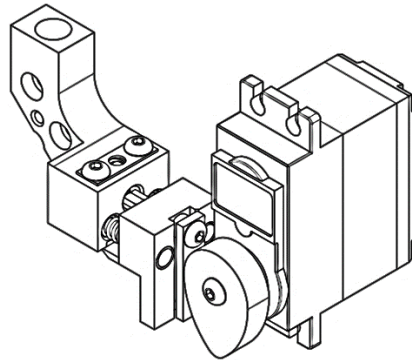
Hřídel motoru je uložena na dvou valivých ložiscích. Kolo hnací je s hřídeli spojeno stavěcím šroubem. Kolo přítlačné je uloženo na dvou valivých ložiscích na čepu, který je šroubem spojen s ramenem přítlaku.



**Obr. 21** Sestava pohonu pramence

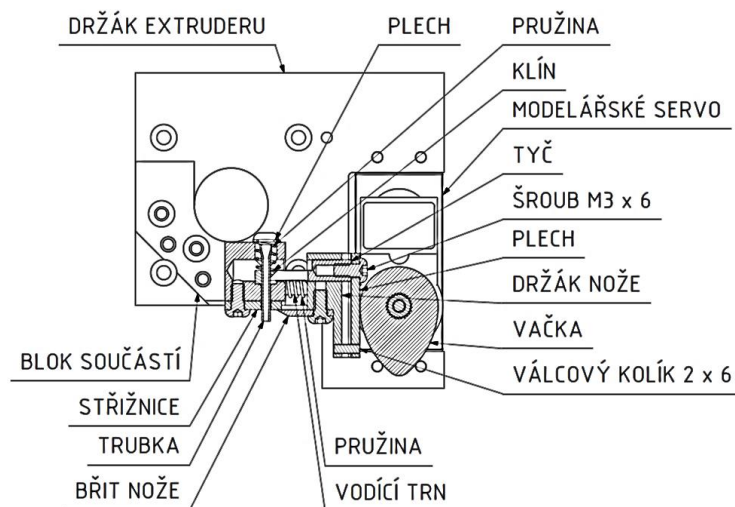
### 6.1.3 Mechanismus stříhání vlákna

Vlákno je nutné stříhat kvůli přejezdům trysky ve chvíli, kdy zrovna netiskne a také v případě dokončení tisku součásti. Dělení vlákna navíc umožňuje jednodušší řízení pohybu trysky při tisku v tom smyslu, že není nutné vytlačovat materiál kontinuálně po celou vrstvu. Plánování pohybu trysky může být optimalizováno na správný směr kladení vláken a tím zvýšit pevnost kompozitu v určitém směru. Na Obr. 22 je izometrický pohled navrženého mechanismu. Popsaná sestava mechanismu stříhání vlákna je na Obr. 23.



**Obr. 22** Izometrický pohled mechanismu stříhání vlákna

Pramenec vláken je za pohonem veden kovovou trubkou do výstupní trysky. Firma Albion Alloys vyrábí trubky přesného rozměru od vnitřního průměru 0,3 mm a tloušťky stěny od 0,05 mm [25]. Pro vedení vlákna byla vybrána mosazná trubka s vnějším průměrem 2 mm a tloušťkou stěny 0,45 mm. Vnitřní průměr je 1,1 mm. Trubka byla vybrána s ohledem na jednodušší zavádění pramence vláken, kvůli kterému je vstupní otvor trubky tvářením zvětšen na hodnotu vnitřního průměru 2,2 mm. Materiálem trubky byla zvolena mosaz z důvodů lepších kluzných vlastností, protože trubka se pohybuje podél osy nahoru a dolů. Při tisku je kovová trubka v dolní poloze a v případě stříhání vlákna se trubka vysune nahoru. O pohyb se stará klínový mechanismus.



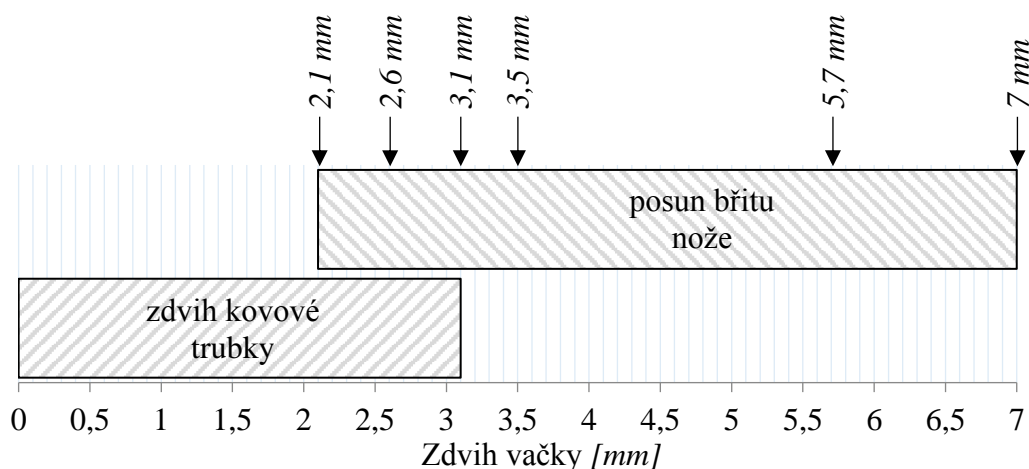
**Obr. 23** Sestava stříhání vlákna

Klínový mechanismus je vytvořen klínem spojeným s kovovou trubkou a tyčí se šikmou plochou. Pohyb je přenesen z tyče na trubku díky šikmé ploše s úhlem zešíkmení  $45^\circ$ . Zpětný pohyb je vyvozen pružinou. Trubka se pohybuje o 3,1 mm. Pro zpětný pohyb byla zvolena tlačná pružina z nabídky firmy Hennlich s označením 40/3/1 s průměrem drátu 0,5 mm, vnějším průměrem 4,5 mm, volnou délkou 7 mm a tuhostí 2,85 N/mm [21]. Tyč je vedena v díře držáku nože a spojena s plechem, který pomocí válcového kolíku zamezuje rotaci tyče. Princip pohybu tyče bude vysvětlen níže.

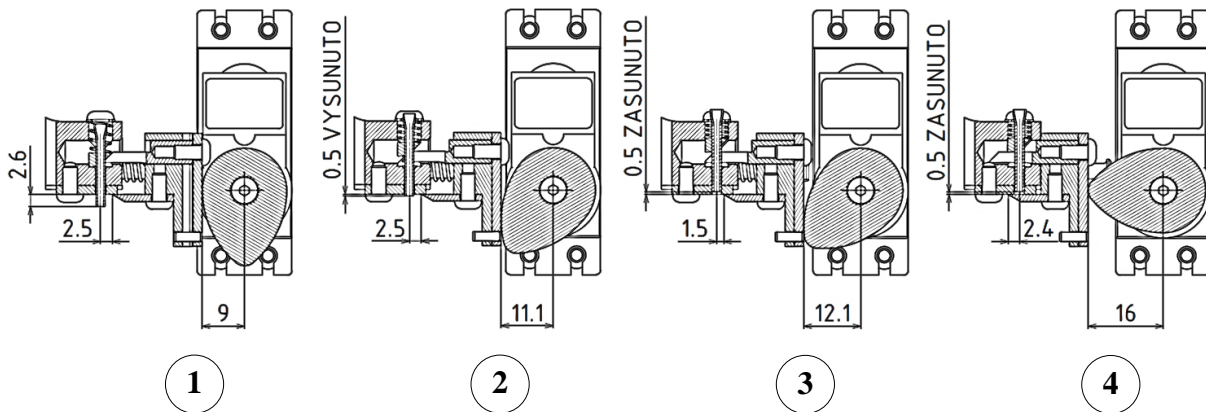
Střížná část se skládá z držáku nože, který obsahuje výměnný břit a střížnice, která je pevně spojena s blokem součástí. Držák nože je pohyblivá součást, která je vedena dvěma vodícími trny a pružinami vrácena do klidové polohy. Břit nože a střížnice jsou vyrobeny z nástrojové oceli 1.4034.

O pohon mechanismu se stará modelářské digitální servo. Servo bylo vybráno z důvodu malých rozměrů, velkého krouticího momentu daného převodovkou a přesného řízení natočení pomocí PWM. Pro správnou funkci mechanismu stačí úhel natočení  $90^\circ$ . Modelářské serva využívají pro snímání natočení hřídele potenciometr, který svými pevnými dorazy omezuje rozsah natočení. Nejčastěji bývá rozsah natočení hřídele serva  $\pm 90^\circ$ . Přenos rotačního na lineární pohyb zajišťuje vačka. Tvar vačky je tvořen kruhovými oblouky. Maximální zdvih navržené vačky je 7 mm.

V klidové poloze, tj. poloha mechanismu v době, kdy není potřeba stříhat pramenec vláken, je kovová trubka zasunuta do střížnice a přesahuje o 2,6 mm. Proces stříhání začíná posunem tyče. Při zdvihu vačky o 2,1 mm je plech dotlačen na držák nože a následně se začne pohybovat i břit nože. Při zdvihu 3,1 mm je dosaženo maximálního zdvihu kovové trubky, v tu dobu je trubka zasunuta do střížnice o 0,5 mm. Poté se pohybuje pouze břit nože. Začátek střížného otvoru dosáhne břit nože při zdvihu vačky 3,5 mm. Střížný otvor má průměr 2,2 mm. Pohyb břitu nože končí 1,3 mm za střížným otvorem. Obr. 24 znázorňuje pohyb kovové trubky a břitu nože v závislosti na zdvihu vačky. Na Obr. 25 jsou graficky znázorněny čtyři fáze střížného procesu.



**Obr. 24** Diagram pohybu součástí v závislosti na zdvihu vačky



**Obr. 25** Fáze střížného procesu

#### 6.1.4 Silový rozbor střížného mechanismu

Silový rozbor střížného mechanismu slouží ke stanovení potřebného momentu modelářského serva. Největší zatěžující síly v mechanismu vznikají při maximálním stlačení pružin a při stříhání pramence. Vlivem vačky se mění působíště síly od serva a mění se také rameno síly. Mechanismus je navržen tak, aby při střížném procesu byla vymezena vůle mezi břitem nože a střížnicí. Vymezení vůle je způsobeno vlivem klopného momentu, který vzniká od síly motoru. Pro výpočet síly motoru budeme uvažovat variantu, kdy síla motoru působí na největším ramenu a proti této síle působí střížná síla a síla pružin držáku nože. Tření bude zanedbáno. Velikost síly motoru vypočteme z rovnice (18).

$$F_{Mservo} = F_{stříž} + 2 \cdot F_{pr3max} \quad (18)$$

Střížná síla se vypočítá ze vztahu (19). Pevnost ve stříhu se pro vyztužující vlákna neuvádí, protože vlákna přenášejí pouze tahové zatížení. Pro výpočet použijeme maximální hodnotu pevnosti ve stříhu kompozitní součásti s epoxidovou maticí a uhlíkovými vlákny dle srovnání materiálových vlastností výrobců podle [38]. Uváděná maximální hodnota pevnosti ve stříhu kompozitu s uhlíkovými vlákny je 124 MPa. Z důvodu nepřesného určení pevnosti ve stříhu bude zvolen součinitel 1,5, který zahrnuje různé vlivy zvyšující střížnou sílu. Za předpokladu kruhového průřezu pramence je výsledná střížná síla vypočítaná v rovnici (19).

$$F_{stříž} = n \cdot S \cdot \tau \quad (19)$$

$$F_{stříž} = 1,5 \cdot \frac{\pi \cdot 0,39^2}{4} \cdot 124$$

$$F_{stříž} = 22,2 \text{ N}$$

Síla pružin držáku nože je navržena tak, aby překonala třecí sílu mezi klínem a tyčí. Součinitel tření mezi ocelí a ocelí je 0,15. Minimální hodnota síly pružin je rovna třecí síle a vypočtena v rovnici (20).

$$F_{pr3min} = F_{t2} = F_{pr2max} \cdot f_2 = k_2 \cdot y_{2max} \cdot f_2 \quad (20)$$

$$F_{pr3min} = 2,85 \cdot 3,5 \cdot 0,15$$

$$F_{pr3min} = 1,5 \text{ N}$$

Z nabídky firmy Hennlich [21] byly vybrány tlačné pružiny s označením 40/3/3 s průměrem drátu 0,5 mm, vnějším průměrem 4,5 mm, volnou délkou 15 mm a tuhostí 1,17 N/mm. Pružiny jsou montovány v předepnutém stavu s délkou 12,5 mm a v klidové poloze působí dohromady silou 5,85 N. Síla se zvyšuje, a tak je podmínka (20) splněna. Maximální síla, kterou vyvodí pružina je vypočtena v rovnici (21).

$$F_{pr3max} = k_3 \cdot y_{3max} = 1,17 \cdot 7,5 \quad (21)$$

$$F_{pr3max} = 8,8 \text{ N}$$

Obě pružiny působí při maximálním stlačení silou 17,6 N. Dosazením do rovnice (18) dostaneme potřebnou velikost síly modelářského serva.

$$F_{Mservo} = 22,2 + 17,6$$

$$F_{Mservo} = 39,8 \text{ N}$$

Maximální rameno síly je z geometrie vačky 8,4 mm. Výpočet potřebného momentu je uveden v rovnici (22).

$$M_{servomin} = F_{Mservo} \cdot r_{vačka} \quad (22)$$

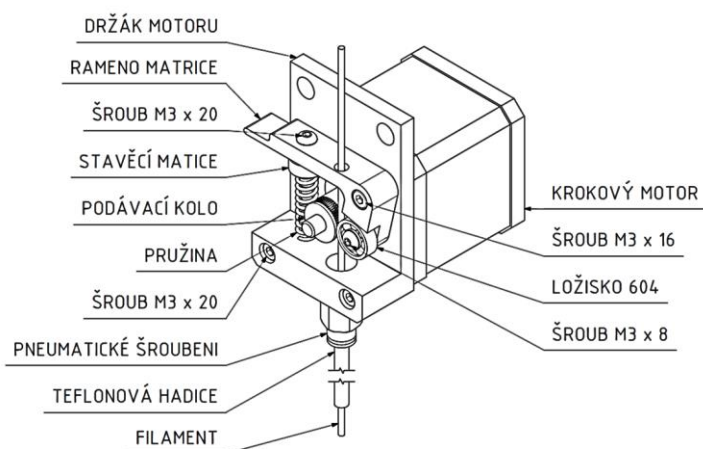
$$M_{servomin} = 39,8 \cdot 8,4 \cdot 10^{-3}$$

$$M_{servomin} = 0,3 \text{ Nm}$$

Z nabídky výrobce Futaba bylo vybráno servo s označení S3152 a maximálním momentem 0,65 Nm. Maximální sřižná síla, kterou je schopné motor vyvinout, se vypočítá z rovnice (18) a (22). Její velikost je 53,8 N a pro srovnání z rovnice (19) vyplývá, že přestřihne i materiál s mezi pevnosti  $\tau = 350 \text{ MPa}$  při koeficientu  $n = 1$  stejného průměru.

## 6.2 Vedení matrice

Vedení matrice je konstrukční uzel, který zahrnuje pohon matrice a vedení do výstupní trysky. Pohon matrice se nachází mimo tiskovou hlavu z důvodu jejího odlehčení. Matrice je za pohonem vedena v teflonové hadici až k výstupní trysce. Sestava pohonu matrice je zobrazena na Obr. 26.



**Obr. 26** Sestava pohonu matrice

Tento konstrukční uzel je běžně používaný v tiskárnách technologie FDM. Způsob dávkování matrice je shodný s dávkováním plastového filamentu. Při návrhu tohoto konstrukčního uzlu byly uplatněny zkušenosti s projektem RepRap.

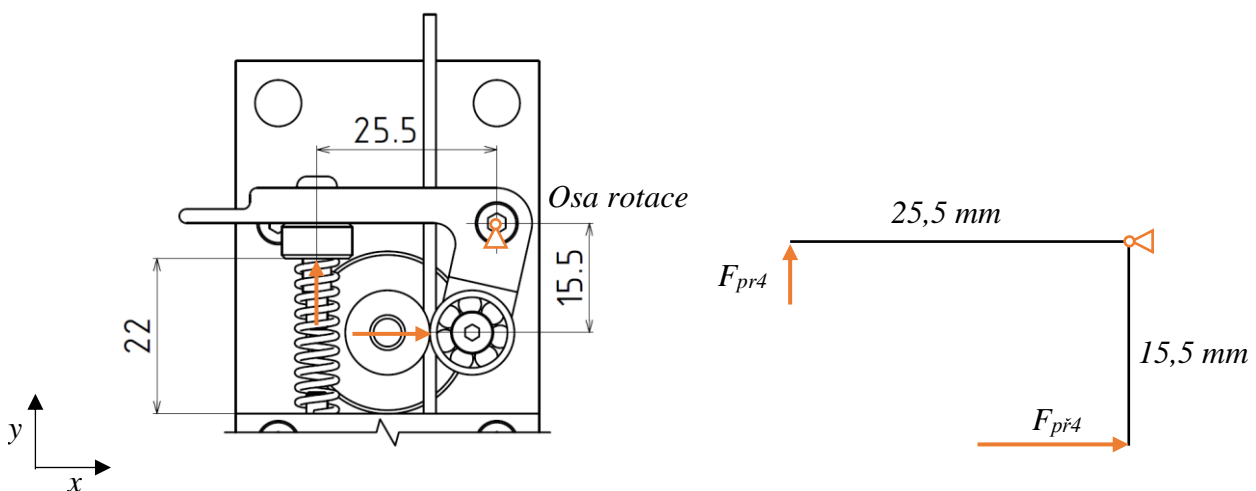
V kapitole 5.1 je uvedeno, že filament je vyráběn nejčastěji o průměrech 1,75 mm a 2,85 mm. Rozdíl je hlavně v rychlosti podávání materiálu do trysky. Pro stejnou tiskovou rychlost a stejný výstupní rozměr trysky je potřeba vlákno o menším průměru rychleji vhanět do trysky. Větší průměry filamentů je vhodné použít pro větší průměry výstupních trysek a větší tiskové rychlosti. Pro potřeby tisku kompozitního materiálu se nepředpokládá vysoká tisková rychlost, a proto byl vybrán filament o průměru 1,75 mm.

### 6.2.1 Volba pohonu matrice

Pohon filamentu zajišťuje krokový motor a přes podávací kolo posouvá filament do trysky. Krokový motor je z důvodů uvedených v kapitole 5.1 vhodným řešením. Pro pohon filamentu byl zvolen krokový motor z katalogu firmy Microcon [37] s typovým označením SX17-1005VLQCEF. Statický moment motoru je 0,52 Nm a délka kroku 1,8°. Podávací kolo má vnější průměr 12 mm a drážku ve tvaru oblouku kružnice. Filament je podáván na průměru 10,2 mm. Minimální délka matrice pro jeden krok je 0,16 mm. Vlivem mikrokrokování může být tato hodnota ještě menší.

### 6.2.2 Výpočet přitlačné síly

Ložisko zajišťuje funkci přitlačného kola, které působí silou proti podávacímu kolu a zvyšuje tření mezi filamentem a podávacím kolem. Silové rozložení je naznačené na Obr. 27. Přitlačná síla je vytvořena pružinou přes pákový mechanismus. Z katalogu firmy Hennlich [22] byla vybrána tlačná pružina s označením 46/15/4 s průměrem drátu 1 mm, vnějším průměrem 6,3 mm, volnou délkou 24,4 mm a tuhostí 6,53 N/mm.



**Obr. 27** Silové rozložení ramena přitlaku matrice

Velikost přitlačné síly je možné měnit pomocí stavěcí matice, která mění stlačenou délku pružiny v rozsahu 8,2 mm. Maximální stlačená délka pružiny je 13,8 mm. Minimální a maximální síla vyvozená pružinou je vypočtena v rovnici (23) a (24).

$$F_{pr4min} = k_4 \cdot y_{4min} = 6,53 \cdot 2,4 \quad (23)$$

$$\mathbf{F_{pr4min} = 15,7 N}$$

$$F_{pr4max} = k_4 \cdot y_{4max} = 6,53 \cdot 10,6 \quad (24)$$

$$\mathbf{F_{pr4max} = 69,2 N}$$

Z Obr. 27 můžeme odvodit vztah pro výpočet přítlačné síly z momentové rovnováhy.

$$\sum M_z = 0 \quad F_{př4} \cdot 15,5 - F_{pr4} \cdot 25,5 = 0 \quad (25)$$

$$F_{př4} = F_{pr4} \cdot \frac{25,5}{15,5}$$

$$F_{př4min} = F_{pr4min} \cdot \frac{25,5}{15,5} = 15,7 \cdot \frac{25,5}{15,5}$$

$$\mathbf{F_{př4min} = 25,8 N}$$

$$F_{př4max} = F_{pr4max} \cdot \frac{25,5}{15,5} = 69,2 \cdot \frac{25,5}{15,5}$$

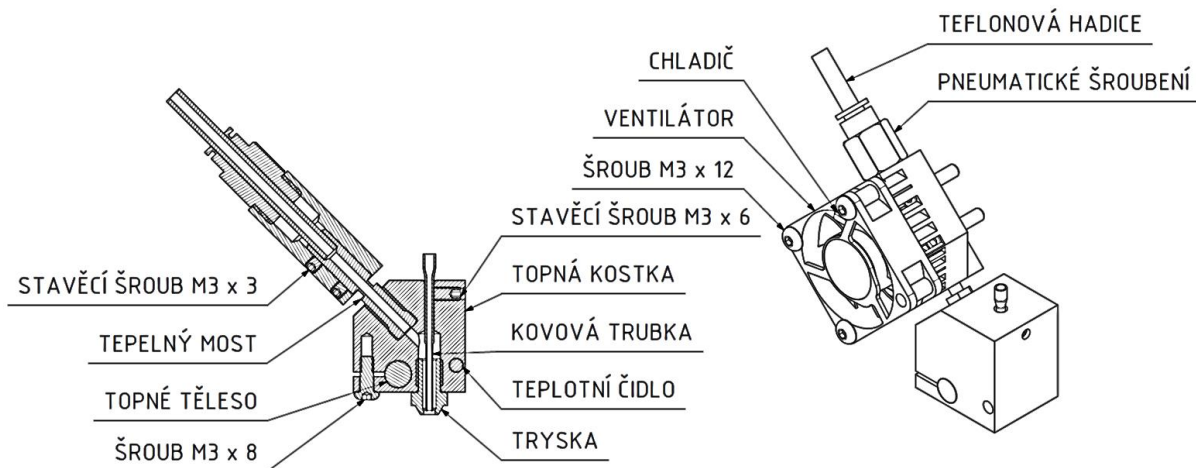
$$\mathbf{F_{př4max} = 113,8 N}$$

Minimální přítlačná síla pohonu filamentu je 25,8 N a maximální přítlačná síla je 113,8 N.

Filament je za pohonem veden do teflonové hadice s vnitřním průměrem 2 mm a vnějším průměrem 4 mm. Hadice je připevněna pomocí přímého pneumatického šroubení s označením QSM-1/8-4.

## 6.3 Koncový člen

Koncový člen je část extruderu, ve kterém se spojují obě fáze kompozitní součásti, a proto hraje významnou roli pro správnou funkci zařízení. Konstrukční uzel zahrnuje stěžejní komponenty, kterými jsou topná kostka, kovová trubka a tryska.



*Obr. 28 Sestava výstupní trysky*

### 6.3.1 Topná kostka

Primární úlohou topné kostky je vedení tepla a tím zajištění tavení materiálu matrice. Topná kostka je navržena pro vstup dvou materiálů, matrice a vyztužujících vláken. Vlákna jsou přiváděna v ose výstupní trysky, aby byl odpor pohybu vláken co nejmenší. Matrice je vedena pod úhlem 45° k ose trysky. Topná kostka je vyrobena z hliníku, který má dobrou teplotní vodivost. Zdrojem tepla je keramické topné těleso o výkonu 40 W, které má tvar válce o průměru 6 mm a délku 20 mm. V topné kostce je připevněno svěrným spojením pro zajištění lepšího přenosu tepla. Teplota, kterou topné těleso vyvine, je snímána teplotním snímačem. Běžně se ve 3D tiskárnách projektu RepRap používají termistory, které jsou schopné měřit teplotu do 300 °C. V tabulce Tab. 4 byly uvedeny materiály a jejich teploty tavení. Materiál PEEK nebo PEI má vyšší teplotu tavení a termistor pro snímání teploty je nevyhovující. Pro vyšší teploty je vhodné použít termočlánek. Snímač je možné sehnat v kovovém pouzdře o průměru 3 mm a délkou 15 mm. V topné kostce je zajištěn stavěcím šroubem proti vysunutí.

### 6.3.2 Oblast nízké teploty

Matrice je teflonovou hadicí přivedena do oblasti nízké teploty extruderu. Hadice je zajištěna pneumatickým přímým šroubením, které má průchozí vnitřní průměr 4 mm a zastrčena až do tepelného mostu. Tím se zredukuje počet přechodů, které mohou způsobovat problémy při zavádění filamentu.

Tepelný most je s topnou kostkou spojen závitem M6. Drážka vnitřního závitu v topné kostce a plochy pro utahovací klíč na tepelném mostu slouží pro dotažení čela tepelného mostu proti stěně v topné kostce. Tím dojde k utěsnění závitu. V tepelném mostu dochází k tavení

materiálu matrice, a proto musí být závit utěsněn. V chladiči je tepelný most pojištěn dvěma stavěcími šrouby z důvodu jednodušší demontáže. Z důvodu vůle ve spoji s chladičem je pro lepší přenos tepla vyplněna teplovodivou pastou.

Chladič odvádí teplo do okolí a zajišťuje, aby se materiál taval až v oblasti topné kostky. Je vyroben z hliníku a na povrchu jsou vytvořena žebra, která zlepšují přestup tepla. Ventilátor zvyšuje proudění vzduchu. Chladičem je výstupní člen spojen s držákem součástí pomocí dvou šroubů.

### **6.3.3 Kovová trubka a tryska**

Vyztužující vlákna vstupují do topné kostky kovovou trubkou. Trubka má stejný průměr, materiál a úpravu vstupního otvoru, jako trubka uvedena ve druhém odstavci kapitoly 6.1.3. Délka trubky ovlivňuje správnou funkci extruderu, což bylo vyzkoušeno experimentem popsaným v kapitole 7. Pokud byla trubka zasunuta málo, docházelo vlivem vnitřního tlaku k ucpání taveninou matrice. Trubka končí v oblasti trysky za hranou výstupního zúžení průměru trysky. Koncový průměr je zmenšený na hodnotu 1,5 mm. Úprava vnějšího průměru umožňuje použít menší výstupní průměr trysky. Trubka je zajištěna stavěcím šroubem a utěsněna žáruvzdorným tmelem.

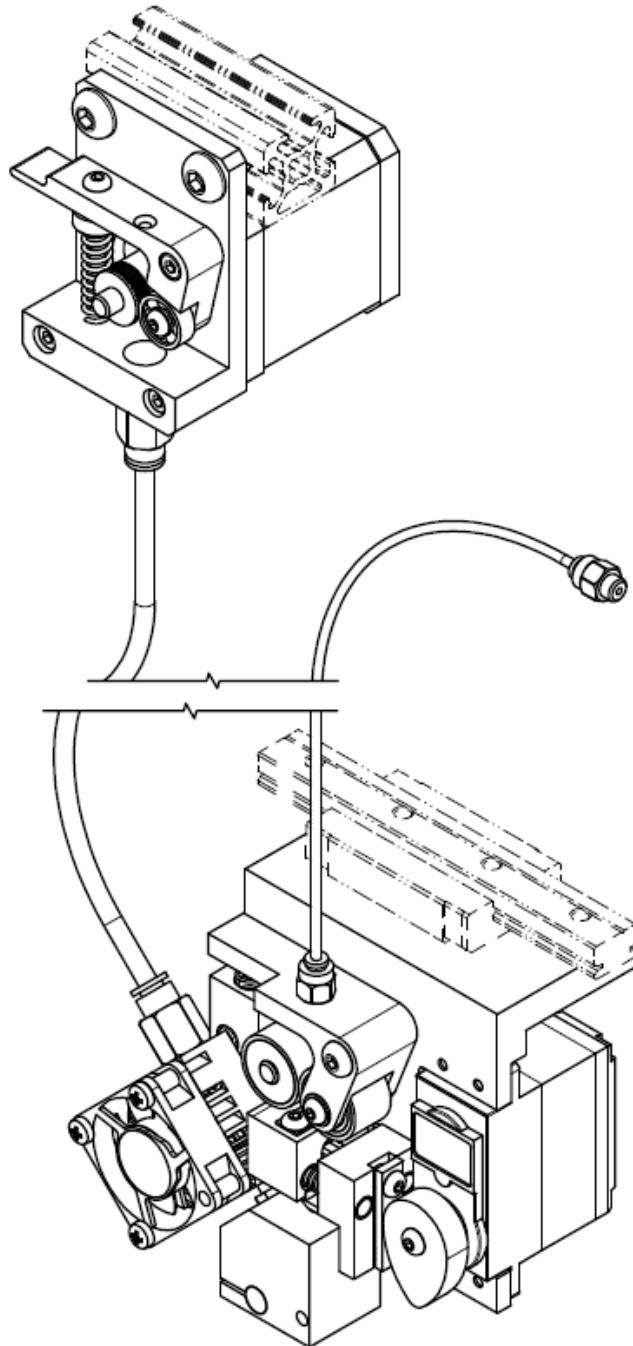
Tryska má výstupní průměr 2 mm a výstupní hrana je zaoblena a broušena, aby neporušovala vlákna pramence. Je vyrobena z oceli a tepelně upravena kalením pro zvýšení tvrdosti povrchu kvůli abrazivním vlastnostem vyztužujících vláken. Závit trysky M6 je během kalení chráněn. Tryska má šestihran pro dotažení do topné kostky.

## **6.4 Princip funkce**

Pramenec vláken je pohonem vsunut do kovové trubky uvnitř topné kostky až k jejímu konci. Pohon matrice pohání filament do topné kostky, kde je materiál taven. Nenatavený materiál se chová jako píst a vytváří v topné kostce tlak, díky kterému proudí tavenina směrem k výstupnímu otvoru trysky. Při extruzi z trysky přibírá tavenina pramenec vláken, který na tiskové podložce tuhne. Na konci vrstvy nebo při změně místa tisku je pramenec vláken přestřižen. Mechanismus stříhání je spuštěn s předstihem daným vzdáleností břitu nože od tiskové podložky. Pohon pramence při tisku kopíruje pohon matrice a při stříhání vlákna dotlačí nová vlákna do kovové trubky.

## 6.5 Připojovací rozhraní

Na Obr. 29 je vidět izometrický pohled výsledného modelu extruderu pro tisk kompozitních součástí. Pohon matrice je mimo tiskovou hlavu a držák motoru matrice je spojen s hliníkovým profilem reprezentujícím rám tiskárny. Tisková hlava je schématicky připevněna k lineárnímu vedení, na kterém se může pohybovat. Připojovací rozhraní závisí na typu 3D tiskárny, pro kterou je extruder určen a je možné ho libovolně přizpůsobit.



*Obr. 29 Model extruderu pro 3D tisk kompozitních součástí*

## 7 EXPERIMENT

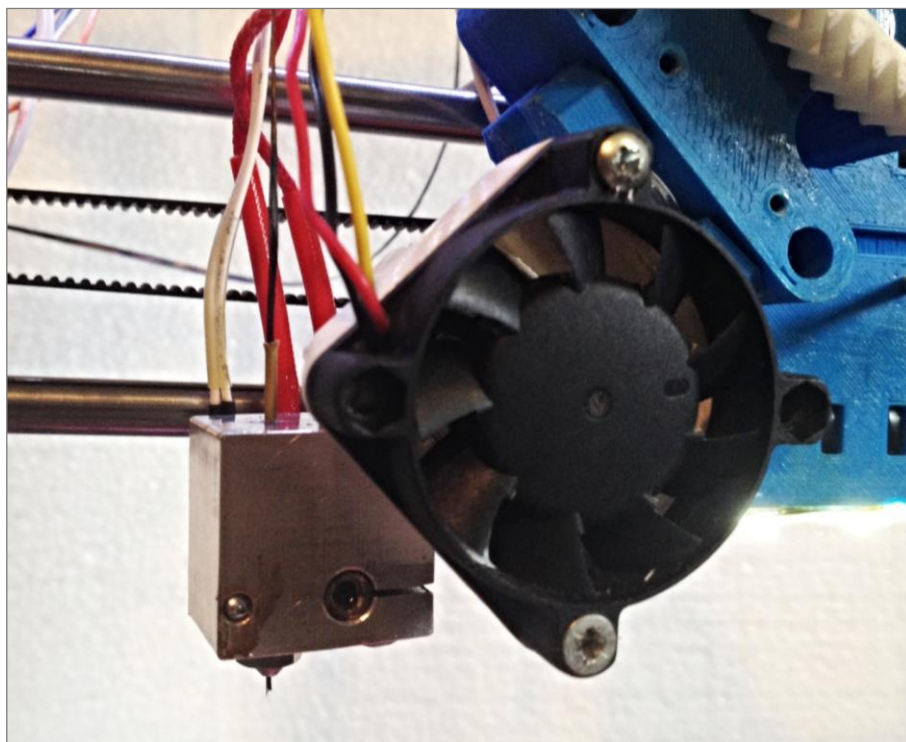
Po vypracování konstrukčního návrhu byl realizován jednoduchý experiment pro ověření principu funkce tisku kompozitních součástí a testování různých nastavení polohy kovové trubky uvnitř topné kostky.

### 7.1 Cíl experimentu

Cílem experimentu bylo ověřit funkci extruderu, konkrétně schopnost unášení vláken pomocí matrice v navrženém uspořádání. Součástí experimentu bylo zjistit optimální hodnotu nastavení kovové trubky uvnitř topné kostky.

### 7.2 Podmínky experimentu

Experiment byl proveden na zařízení projektu RepRap s názvem RebeliX X2, které vlastním. Na ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky VUT v Brně byla vyrobena topná kostka. Oblast nízké teploty byla realizována tepelným mostem a chladičem výrobce E3D a chlazená ventilátorem, který byl připevněn k chladiči vytisknutým držákem. Od firmy Albion Alloys byla zakoupena mosazná trubka o vnějším průměru 1,5 mm s tloušťkou stěny 0,1 mm, kvůli které byl otvor v topné kostce pro výrobu zmenšen na průměr 1,5 mm. Vstupní otvor trubky nebyl pro potřeby experimentu upraven. Tato varianta byla zvolena kvůli nižším finančním nákladům na experiment. Jako výstupní tryska byla použita mosazná tryska o průměru 0,8 mm výrobce E3D. Na Obr. 30 je vidět snímek extruderu během testování.



*Obr. 30 Fotka extruderu použitého pro experiment*

Vstupním materiálem výztuže byl pramenec uhlíkových vláken. Protože se nepodařilo sehnat pramenec o počtu vláken 1K, byl použit roving 12K, který byl rozdělen na menší prameny. Materiálem matrice bylo bílé PLA o průměru filamentu 1,75 mm od výrobce Devil Design. Doporučená teplota tavení od výrobce je 200–235 °C, teplota při tisku byla nastavena na 220 °C. Tisková rychlost byla 10 mm/s.

### 7.3 Průběh experimentu

Nejprve byl testován extruder bez použití kovové trubky. Pramenec vláken byl do topné kostky vložen manuálně. Lze předpokládat, že tavenina poteče otvorem trubky vlivem menšího odporu. Při tavení matrice došlo k ucpání vstupního otvoru a tavenina proudila ven více otvorem s vláknou než výstupní tryskou.

Ve druhém testu byla do topné kostky vložena kovová trubka. Konec trubky byl 10 mm od výstupního otvoru trysky. Při extruzi matrice nebyla výztuž unášena a došlo k ucpání trubky, které se projevilo vytlačujícím se materiálem matrice u vstupu kovové trubky. Během této zkoušky se projevila také netěsnost mezi kovovou trubkou a otvorem v topné kostce.

Ve třetím testu byla kovová trubka vložena až na doraz v trysce a povytažena o 1 mm. Matrice proudila z trysky lépe než v předchozích dvou případech, ale pramenec vláken nebyl matricí unášen. Po tomto testu byl zvětšen výstupní otvor trysky z hodnoty 0,8 mm na 2 mm.

Kovová trubka byla ve čtvrtém testu zarovnána s výstupní hranou trysky. Při extruzi proudila matrice z výstupní trysky a neucpávala kovovou trysku. Pokud byl pramenec vláken vložen až za konec trubky, došlo k unášení výztuže vlivem proudící matrice.

V posledním testu nastavení vzdálenosti kovové trubky byla trubka zasunuta do topné kostky o 1 mm. Test se od třetího pokusu lišil větším výstupním otvorem. Matrice proudila z trysky ven, ale docházelo k nerovnoměrnému unášení vláken.

Další testy zkoumaly nanášení materiálu na tiskovou podložku s nastavením shodným, jako ve čtvrtém testu. Pro tyto potřeby byl naprogramován G-kód:

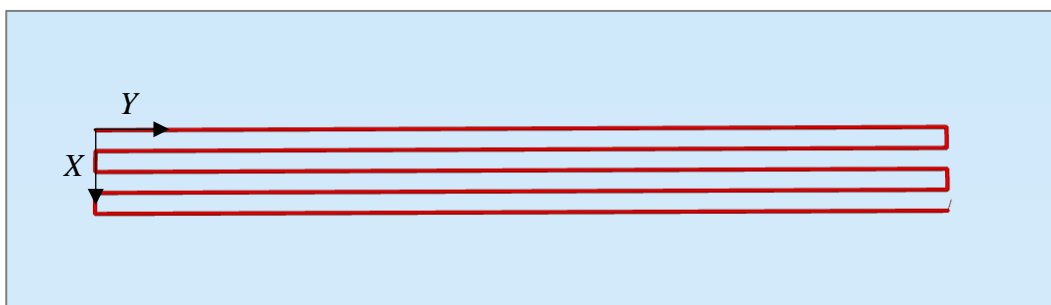
```
G91 ; relativni pohyb x, y, z
M83 ; relativni pohyb extruderu
M106 S204 ; ventilator - aktivni chlazení
          hlinikoveho chladice
M109 S220 ; teplota extruderu
G92 E0 ; nastavení hodnoty extruderu
          (poc. souradnice)

; první vrstva
G1 X0 Y80 E20 F600 ; F = rychlost mm/min
G1 X2 Y0 E2
G1 X0 Y-80 E20
G1 X2 Y0 E2
G1 X0 Y80 E20
G1 X2 Y0 E2
```

```

G1 X0 Y-80 E20
G1 X2 Y0 E2
G1 X0 Y80 E20
G1 Z5 E5 F1000 ; zdvih na konci
M84 ; vypnutí motoru
  
```

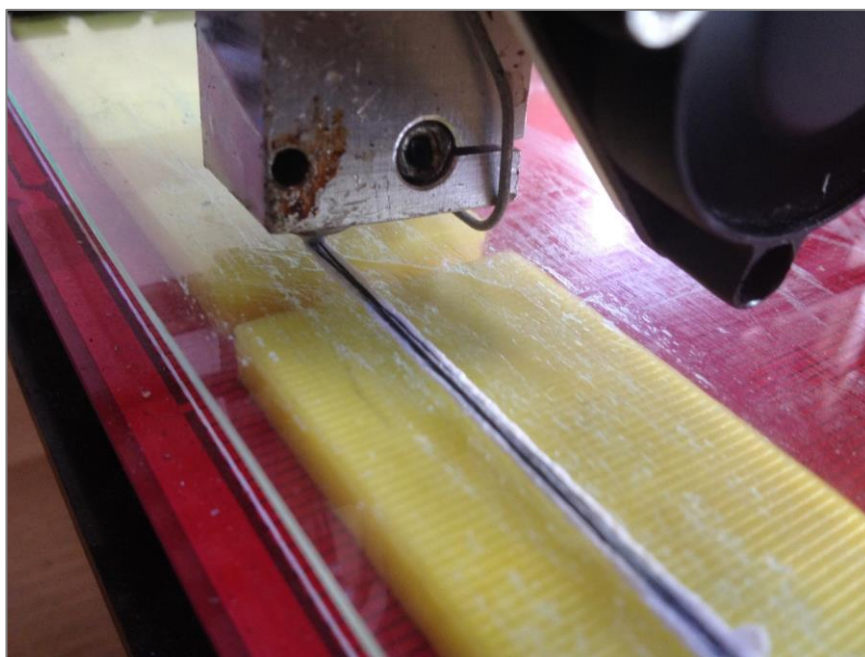
Trasa trysky tohoto zdrojového kódu je na Obr. 31. G-kód byl během tisku upravován podle výsledků tisku, proto je množství extrudovaného materiálu odlišné od klasické metody FDM. Před spuštěním tisku byla tryska nastavena do počáteční pozice manuálním ovládáním, výška trysky nad tiskovou podložkou byla 1 mm.



*Obr. 31 Trasa trysky naprogramovaného G-kódu*

## 7.4 Výsledky a zhodnocení experimentu

Experimentem bylo zjištěno, že nastavení vzdálenosti kovové trubky uvnitř topné kostky má velký vliv na funkci zařízení. Přijatelných výsledků bylo dosaženo při zarovnání kovové trubky s tryskou. Pro unášení vláken byl zapotřebí větší průměr výstupní trysky daný vnějším rozměrem kovové trubky.



*Obr. 32 Tisk kompozitní součásti*

Na Obr. 32 je vidět nanášení kompozitního materiálu na tiskovou podložku. V příloze 2 jsou snímky vzorků, které byly vytištěny během experimentu. Každý vzorek je vyfocen z obou stran. Na začátku tisku je možné pozorovat větší množství materiálu matrice, které je způsobené časovou prodlevou mezi manuálním najetím do požadované polohy a spuštěním tisku. Zhoršená kvalita tisku vzorku 1 a 2 byla způsobena vlivem špatně nastavené výšky vrstvy a tím zhoršené adhezi s tiskovou podložkou. Vzorek 3 byl ze všech vzorků nejlepší. U vzorku 4 je vidět, že při posledním tahu trysky se nespojil pramenec vláken s matricí. Ze všech vzorků je patrné, že při velké změně směru pohybu trysky vlákno nekopíruje trasu trysky. V ohybech se kumuluje teplo a matrice nestihne ztuhnout natolik, aby dostatečně udržela vlákna výztuže.

Experiment prokázal nutnost použití kovové trubičky pro vedení vláken uvnitř topné kostky. Vlákna byla unášena při zarovnání konce trubičky s koncem výstupního otvoru trysky a tím byl splněn cíl experimentu. Výstupní otvor trysky byl zvětšen na průměr 2 mm. Z důvodu nepřesného otvoru výstupní trysky nebyla extruze materiálu rovnoměrná, a to se projevilo zhoršenou kvalitou zkušebních vzorků. Projevila se také zhoršená soudržnost vláken a matrice. Pro hodnocení kvality vyrobeného kompozitního materiálu je potřebná přesná výroba navržených součástí, která nebyla cílem experimentu.

## 8 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

V této kapitole budou stanoveny přibližné náklady na výrobu extruderu. Protože se jedná o zařízení, které není samostatným funkčním celkem a zároveň je svého typu unikátním, není možné porovnat náklady na výrobu s konkurencí. Pro přibližné srovnání můžou být náklady porovnány s poměrnou částí ceny 3D tiskárny Markforged. Model tiskárny Markforged Mark Two stojí 13.500 \$, což při kurzu dolaru 24 Kč/\$ odpovídá ceně zařízení 324.000 Kč [23]. Cena samotného extruderu je odhadnuta na 10 % z ceny zařízení, tzn. 32.400 Kč.

Náklady na výrobu extruderu jsou rozděleny na náklady nakupovaných součástí a výrobní náklady. Vypočítají se součtem viz (26). Náklady na montáž zařízení budou zanedbány, protože je obtížné odhadnout časovou náročnost smontování extruderu. Náklady na nákup součástí jsou stanoveny z cen internetových obchodů a uvedeny v Tab. 14. Celkové náklady nakupovaných součástí činí **2.948 Kč**.

Výrobní náklady budou stanoveny přibližně, protože ceny výrobních operací se mezi jednotlivými výrobci liší. Cena výroby mnohonásobně převyšuje cenu materiálu z důvodu malých rozměrů, a proto bude cena materiálu zanedbána. Náklady na výrobu byly stanoveny podle tabulky technologických operací. Ceny jednotlivých operací byly stanoveny odhadem a jsou uvedeny v Tab. 13.

**Tab. 13** Ceny technologických operací

Technologická operace	Cena
Broušení	3.000 Kč/h
Dělení materiálu	30 Kč/řez
Frézování	1.400 Kč/h
Soustružení	1.000 Kč/h
Tváření otvoru trubky	150 Kč
Vrtání otvoru	20 Kč
Vystružování otvoru	100 Kč

Výsledné náklady na výrobu součástí jsou z důvodu rozsáhlosti tabulky uvedeny v příloze 3. Celkový součet nákladů na výrobu činí **10.641 Kč**.

Výsledná cena extruderu pro tisk kompozitních součástí je

$$N_{celk} = N_{nak} + N_{vyr} \quad (26)$$

$$N_{celk} = 2948 + 10641$$

$$N_{celk} = \mathbf{13589 \text{ Kč}}$$

Rozdíl mezi odhadnutou cenou extruderu Markforged a cenou navrženého zařízení je 18.811 Kč ve prospěch navrženého extruderu.

**Tab. 14** Ceny nakupovaných dílů

Název dílu	Cena
Topné těleso 40 W	69 Kč
Ložisko 604 (3 ks)	231 Kč
Pneumatické šroubení QSM-M5-2 (2ks)	90 Kč
Termočlánek typ K	305 Kč
Ventilátor 30 x 30 mm	159 Kč
Krokový motor SX16-0301	177 Kč *
Krokový motor SX17-1005VLQCEF	249 Kč
Modelářské servo Futaba S3152	879 Kč
Teflonova hadice 4-2 (1 metr)	221 Kč
Teflonová hadice 2-1 (1 metr)	84 Kč
Pružiny	100 Kč *
Pneumatické šroubení (2ks)	90 Kč *
Spojovací materiál	500 Kč *
<b>Celkem</b>	<b>2.948 Kč</b>

\*ceny byly stanoveny odhadem

Z ekonomického zhodnocení vyplývá, že navržený extruder může konkurovat jedinému dostupnému řešení na trhu Markforged, protože náklady na výrobu extruderu jsou poměrně nízké. Svou cenou se navržený extruder řadí mezi dostupné varianty řešení tisku kompozitních součástí a zdaleka nedosahuje ceny profesionálních řešení.

## 9 ZÁVĚR

Cílem závěrečné práce byl konstrukční návrh extruderu pro 3D tisk kompozitních součástí. V úvodní části práce byla představena historie aditivní technologie a vývoj 3D tisku až k současným metodám. Norma ISO rozděluje aditivní výrobu do 7 skupin. Následně byly představeny technologie 3D tisku, které zastupují jednotlivé skupiny aditivní výroby a vysvětlena podstata principu metod. Dále rešeršní část pojednává o kompozitních materiálech. Zabývá se popisem kompozitů, materiálu matrice a výztuže a podrobněji o výrobě kompozitních součástí. V oblasti 3D tisku je výroba kompozitních součástí zaměřena hlavně na kompozity s krátkými vyztužujícími vlákny. Díky malým rozměrům vyztužujících vláken nemusí být základní princip metod odlišný, a proto v této oblasti existuje velké množství řešení. Na rozdíl tomu pro výrobu kompozitů s nekonečnými vyztužujícími vlákny je na trhu dostupné pouze jedno řešení. V analýze problému byly rozebrány specifické požadavky pro 3D tisk kompozitů s nekonečnými vlákny a cíle, které musí navržený extruder splňovat.

Konstrukční část předchází 4 koncepční návrhy řešení, které vedou k 3D tisku kompozitů a neporušují patenty chráněnou metodu společnosti Markforged. Pomocí multikriteriální analýzy byla vybrána výsledná varianta pro konstrukční návrh. Konstrukční část je rozdělena do třech významných uzlů a podrobně popisuje navržené řešení. Zabývá se vedením pramence vláken, vedením matrice a výstupním členem s tryskou. V prvním konstrukčním uzlu je popsáno vedení pramence vláken, jakožto i mechanismus stříhání vlákna a způsob zamezení zasekávání vláken při průchodu do trysky. Vedení matrice je realizováno pohonem, který se nachází mimo tiskovou hlavu. Ve výstupním členu dochází ke styku obou fází kompozitu a následně je materiál nanášen na tiskovou podložku. Princip 3D tisku kompozitních materiálů spočívá v unášení vláken pomocí matrice směrem ven z trysky na tiskovou podložku.

Pro ověření funkčnosti principu nanášení kompozitu na tiskovou podložku byl realizován experiment, který dokázal schopnost matrice unášet vlákna z trysky. Experiment prokázal nutnost použití kovové trubky uvnitř trysky a její správné nastavení. Během experimentu byly vyrobeny 4 kompozitní vzorky pro ověření schopnosti tisku. Výtisky ukazují, že extruder je schopný tisknout kompozitní materiál. Dosažení lepších výsledků závisí na parametrech tisku a pro hodnocení materiálových charakteristik kompozitů vyrobených pomocí navrženého extruderu je potřeba výroba prototypu zařízení.

V poslední části je zpracováno ekonomické zhodnocení, ve kterém je stanovena přibližná cena výroby extruderu. Protože se jedná o dílčí část výsledného zařízení, je obtížné srovnat cenu s konkurencí, kterou je v tomto případě pouze společnost Markforged.

Možným pokračováním práce je výroba prototypu zařízení a testování vlivu jednotlivých tiskových parametrů na vlastnosti kompozitu. Prototyp zařízení nebyl z finančních a časových důvodů realizován. Tímto byly všechny cíle diplomové práce uvedené v zadání splněny.



## 10 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *3DSYSTEMS: Charles W. Hull Co-Founder and Chief Technology Officer* [online]. [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <https://www.3dsystems.com/sites/default/files/downloads/3D-Systems-Charles-W-Hull-Executive-Bio.pdf>
- [2] *ADINA - Finite Element Analysis Software: Schematic of the Laser Engineered Net Shaping (LENS®) process* [online]. 2017 [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://www.adina.com/newsgH68.shtml>
- [3] *Advanced Manufacturing: Masters of Manufacturing: Herbert B. Voelcker* [online]. 2017 [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: <http://advancedmanufacturing.org/masters-manufacturing-herbert-b-voelcker/>
- [4] *Apium Additive Technologies GmbH: Apium PEEK 450 Natural* [online]. 2017 [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: <https://apiumtec.com/>
- [5] *Apium Additive Technologies GmbH: Apium POM-C ESD White* [online]. 2017 [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: <https://apiumtec.com/>
- [6] *Apium Additive Technologies GmbH: PVDF 1000HD* [online]. 2017 [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: <https://apiumtec.com/>
- [7] *Apparatus for fiber reinforced additive manufacturing*. 2015. WO2016011252 Patent. Uděleno 21.1.2016. Zapsáno 16.7.2015.
- [8] *Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography*. US4575330 A Patent. Uděleno 11.3.1986. Zapsáno 8.8.1984.
- [9] BAREŠ, Richard A. *Kompozitní materiály*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1988.
- [10] BROŽOVÁ, Helena, Milan HOUŠKA a Tomáš ŠUBRT. *Modely pro vícekritériální rozhodování*. Dotisk. Praha: Česká zemědělská univerzita, Provozně ekonomická fakulta, 2014. ISBN 978-80-213-1019-3.
- [11] *Department of Mechanical Engineering: Selective Laser Sintering, Birth of an Industry* [online]. 2016 [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://www.me.utexas.edu/news/news/selective-laser-sintering-birth-of-an-industry>
- [12] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. Praha: SCIENTIA, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [13] *EzineArticles Submission: Prototype Machining History and Rapid Prototyping Assembly History* [online]. 2017 [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://ezinearticles.com/?Prototype-Machining-History-and-Rapid-Prototyping-Assembly-History&id=1254470>
- [14] *Festo Czech Republic: Šroubení s nástrčnými koncovkami QS* [online]. 2017 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: [https://www.festo.com/cms/cs\\_cz/9462.htm](https://www.festo.com/cms/cs_cz/9462.htm)
- [15] *Fiber Glass: HYBON 2002* [online]. 2015 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.ppgfiberglass.com/Home.aspx>
- [16] *Fiber Glass: NTY 2002* [online]. 2015 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.ppgfiberglass.com/Home.aspx>
- [17] *Fillamentum: ASA Extrafill* [online]. 2017 [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: <https://fillamentum.com/>

- [18] *Fillamentum: Flexfill 98A* [online]. 2017 [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: <https://fillamentum.com/>
- [19] *Fillamentum: Nylon FX256* [online]. 2017 [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: <https://fillamentum.com/>
- [20] *Fillamentum: PLA Extrafill* [online]. 2017 [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: <https://fillamentum.com>
- [21] *HENNLICH - řešení pro průmysl: Tlačné pružiny - pružinová ocel; d=0,50 - 0,56 mm* [online]. 2017 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <https://www.hennlich.cz/hennlich.html>
- [22] *HENNLICH - řešení pro průmysl: Tlačné pružiny - pružinová ocel; d=1,0 mm* [online]. 2017 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <https://www.hennlich.cz/hennlich.html>
- [23] *High Strength 3D Printing - Markforged: The Mark Two* [online]. 2015 [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <https://markforged.com/product/mark-two-enterprise-kit/>
- [24] CHUA, Chee Kai a Kah Fai LEONG. *3D PRINTING AND ADDITIVE MANUFACTURING: Principles And Applications*. 5.ed. of Rapid Prototyping. Singapore: World Scientific Publishing, 2017. ISBN 978-981-3146-76-1.
- [25] *Ing. Petr Litomyský - železniční modely: Katalog a ceník kovových modelářských materiálů značky Albion Alloys* [online]. 2014 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: [http://www.litomysky.cz/#utm\\_source=firmy.cz&utm\\_medium=ppd&utm\\_campaign=firmy.cz-495575](http://www.litomysky.cz/#utm_source=firmy.cz&utm_medium=ppd&utm_campaign=firmy.cz-495575)
- [26] ISO/ASTM 52900:2015. *Additive manufacturing -- General principles -- Terminology*. 2015.
- [27] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Brno: VUT, 2003, 194 s. ISBN 8021424435.
- [28] MACHEK, Václav a Jaromír SODOMKA. *Nauka o materiálu. 4. část, Polymery a kompozity s polymerní maticí*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2008, 86 s. : il. ; 30 cm. ISBN 9788001039274.
- [29] *Manufacturing Cost Estimation: Fused Deposition Modeling (FDM)* [online]. 2017 [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>
- [30] *Manufacturing Cost Estimation: Jetted Photopolymer* [online]. 2017 [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/jetted-photopolymer>
- [31] *Manufacturing Cost Estimation: Laminated Object Manufacturing (LOM)* [online]. 2017 [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/laminated-object-manufacturing>
- [32] *Manufacturing Cost Estimation: Selective Laser Sintering (SLS)* [online]. 2017 [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/selective-laser-sintering>
- [33] *Manufacturing Cost Estimation: Stereolithography (SLA)* [online]. 2017 [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/stereolithography>
- [34] *Manufacturing Cost Estimation: Three Dimensional Printing (3DP)* [online]. 2017 [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/3d-printing>
- [35] *Mechanical Engineering / A Complete Online Guide for Every Mechanical Engineer: RAPID PROTOTYPING / HISTORY / PROTOTYPING TECHNOLOGIES* [online]. 2017 [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://www.mechanicalengineeringblog.com/1408-rapid-prototyping-history-prototyping-technologies/>

- [36] *Method and apparatus for producing parts by selective sintering*. US4863538 A Patent. Uděleno 5.9.1989. Zapsáno 17.10.1986.
- [37] *Microcon: Hybridní dvoufázové krokové motory řady SX* [online]. 2017 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://microcon.cz/>
- [38] *Online Materials Information Resource - MatWeb: Overview of materials for Epoxy/Carbon Fiber Composite* [online]. 2017 [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=39e40851fc164b6c9bda29d798bf3726&ckck=1>
- [39] PALOŮŠEK, David. *3D optická digitalizace a rapid prototyping v ortotice a protetice = 3D optical digitizing and rapid prototyping in orthotics and prosthetics: zkrácená verze habilitační práce*. Brno: VUTIUM, 2014, 32 s. : il. ISBN 9788021448490.
- [40] *P-LAB=Potřeby pro laboratoř, Chemikálie, Life Science: Hadička PTFE/BOLA* [online]. 2017 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.p-lab.cz/>
- [41] *Portál pro strojní konstruktéry: Mechanické vlastnosti pevných látek* [online]. 2017 [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/mechanicke-vlastnosti-pevných-latek>
- [42] *Roofing, Insulation, and Composite Materials / Owens Corning: Cem-FIL 5325 AR direct roving product sheet* [online]. 2017 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://cem-fil.com/>
- [43] *SABIC: ULTEM Resin 1000* [online]. 2017 [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: <https://www.sabic.com/en>
- [44] *The Guardian: Chuck Hull: the father of 3D printing who shaped technology* [online]. 2017 [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <https://www.theguardian.com/business/2014/jun/22/chuck-hull-father-3d-printing-shaped-technology>
- [45] *Toho Tenax - Your partner for advanced carbon fiber solutions: Product Data Sheet (EU) Tenax filament yarn* [online]. 2017 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.tohotenax.com/>
- [46] *Ultimaker: 3D Printers: Technical data sheet ABS* [online]. 2017 [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: <https://ultimaker.com/>
- [47] *Ultimaker: 3D Printers: Technical data sheet PC* [online]. 2017 [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: <https://ultimaker.com/>
- [48] VRBKA, Jan. *MECHANIKA KOMPOZITŮ* [online]. Brno, 2008 [cit. 2017-05-25].

# 11 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

## 11.1 Seznam symbolů

Symbol	Rozměr	Veličina
$E_c$	[GPa]	Youngův modul pružnosti kompozitu
$E_f$	[GPa]	Youngův modul pružnosti vlákna
$E_m$	[GPa]	Youngův modul pružnosti matrice
$F_{Mservo}$	[N]	Síla modelářského serva
$F_{př}$	[N]	Přítlačná síla
$F_{př4}$	[N]	Přítlačná síla
$F_{př4max}$	[N]	Maximální přítlačná síla
$F_{př4min}$	[N]	Minimální přítlačná síla
$F_{pr2max}$	[N]	Maximální síla pružiny 2
$F_{pr3max}$	[N]	Maximální síla pružiny 3
$F_{pr3min}$	[N]	Minimální síla pružiny 3
$F_{pr4}$	[N]	Síla pružiny 4
$F_{pr4max}$	[N]	Maximální síla pružiny
$F_{pr4min}$	[N]	Minimální síla pružiny 4
$F_{pružt}$	[N]	Teoretická síla pružiny
$F_{stříž}$	[N]	Střížná síla
$F_{t2}$	[N]	Třecí síla
$HBS_{11}$	[-]	Bodové hodnocení kritéria K1 pro variantu 1
$HBS_{12}$	[-]	Bodové hodnocení kritéria K2 pro variantu 1
$HBS_{13}$	[-]	Bodové hodnocení kritéria K3 pro variantu 1
$HBS_{14}$	[-]	Bodové hodnocení kritéria K4 pro variantu 1
$HBS_{21}$	[-]	Bodové hodnocení kritéria K1 pro variantu 2
$HBS_{22}$	[-]	Bodové hodnocení kritéria K2 pro variantu 2
$HBS_{23}$	[-]	Bodové hodnocení kritéria K3 pro variantu 2
$HBS_{24}$	[-]	Bodové hodnocení kritéria K4 pro variantu 2
$HBS_{31}$	[-]	Bodové hodnocení kritéria K1 pro variantu 3

Symbol	Rozměr	Veličina
$HBS_{32}$	[-]	Bodové hodnocení kritéria K2 pro variantu 3
$HBS_{33}$	[-]	Bodové hodnocení kritéria K3 pro variantu 3
$HBS_{34}$	[-]	Bodové hodnocení kritéria K4 pro variantu 3
$HBS_{41}$	[-]	Bodové hodnocení kritéria K1 pro variantu 4
$HBS_{42}$	[-]	Bodové hodnocení kritéria K2 pro variantu 4
$HBS_{43}$	[-]	Bodové hodnocení kritéria K3 pro variantu 4
$HBS_{44}$	[-]	Bodové hodnocení kritéria K4 pro variantu 4
$M_{servomin}$	[Nm]	Minimální moment modelářského serva
$M_{val}$	[Nm]	Valivý moment
$VHV_1$	[-]	Výsledná bodová hodnota pro variantu 1
$VHV_2$	[-]	Výsledná bodová hodnota pro variantu 2
$VHV_3$	[-]	Výsledná bodová hodnota pro variantu 3
$VHV_4$	[-]	Výsledná bodová hodnota pro variantu 4
$V_f$	[-]	Objemový podíl výztuže
$V_m$	[-]	Objemový podíl matrice
$d_p$	[mm]	Průměr pramence
$f_2$	[-]	Součinitel tření
$k_2$	[N/m]	Tuhost pružiny 2
$k_3$	[N/m]	Tuhost pružiny 3
$k_4$	[N/m]	Tuhost pružiny 4
$l_p$	[m]	Délka pramence
$m_p$	[kg]	Hmotnost pramence
$r_{vačka}$	[m]	Rameno vačky
$v_j$	[-]	Počet bodů hodnocení varianty j
$v_k$	[-]	Součet bodů hodnocení všech kritérií
$y_{2max}$	[m]	Maximální stlačení pružiny 2
$y_{3max}$	[m]	Maximální stlačení pružiny 2
$y_{4min}$	[m]	Minimální stlačení pružiny 4
$\rho_p$	$[\frac{kg}{m^3}]$	Hustota materiálu pramence
$\sigma_c$	[MPa]	Mez pevnosti kompozitu
$\sigma_f$	[MPa]	Mez pevnosti vláken

Symbol	Rozměr	Veličina
$\sigma_m$	[MPa]	Mez pevnosti matrice
$\omega_1$	[-]	Normovaná hodnota váhy kritéria 1
$\omega_2$	[-]	Normovaná hodnota váhy kritéria 2
$\omega_3$	[-]	Normovaná hodnota váhy kritéria 3
$\omega_4$	[-]	Normovaná hodnota váhy kritéria 4
$\mu$	[-]	Poissonova konstanta
$E$	[GPa]	Youngův modul pružnosti v tahu
$N$	[N]	Kolmá tlaková síla
$S$	[Nm]	Střižná plocha
$T$	[tex]	Délková hmotnost
$b$	[m]	Šířka kontaktní plochy
$d$	[mm]	Průměr
$e$	[m]	Rameno valivého odporu
$l$	[m]	Délka kontaktní plochy
$n$	[-]	Součinitel zahrnující vlivy zvyšující střižnou sílu
$\tau$	[MPa]	Pevnost ve stříhu

## 11.2 Seznam zkratk

Zkratka	Význam
ABS	Akrylonitril-butadien-styren
ASA	Akrylonitril-styren-akrylát
CAD	Computer aided design
CAM	Computer aided manufacturing
CJP	ColorJet printing
CNC	Computer numerical control
DLP	Digital light processing
EP-R	Nevyztužená epoxidová pryskyřice
FDM	Fused deposition modelling
FFF	Fused filament fabrication
HBS	Hodnota bodovací stupnice
LENS	Laser engineered net shaping
LOM	Laminated object manufacturing
NTC	Negative temperature coefficient
PC	Polykarbonát
PEEK	Polyéteréterketon
PEI	Polyéterimid
PLA	Polylactic acid
POM-C	Polyoxymetylén
PP	Polypropylén
PVDF	Polyvinylidenfluorid
PWM	Pulzně šířková modulace
SLA	Stereolitografie
SLM	Selective laser melting
SLS	Selective laser sintering
STL	Stereolitography (formát souboru)
TPU	Termoplastický polyuretan
UP-R tabulka	Nenasycená polyesterová pryskyřice

### 11.3 Seznam tabulek

TAB. 1	VÝVOJ TECHNOLOGIÍ [16] .....	18
TAB. 2	POROVNÁNÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ VLÁKEN A KOMPAKTNÍCH MATERIÁLŮ [21].....	29
TAB. 3	POROVNÁNÍ VSKOZIT TERMOPLASTOVÝCH TAVENIN A KAPALNÝCH REAKTIVNÍCH PRYSKYŘIC PŘI TYPICKÝCH ZPRACOVATELSKÝCH TEPLOTÁCH [9].....	31
TAB. 4	SEZNAM POUŽÍVANÝCH TERMOPLASTŮ PRO FDM TECHNOLOGIÍ	36
TAB. 5	VÁHY HODNOTÍCÍCH KRITÉRIÍ .....	43
TAB. 6	BODOVÉ OHODNOCENÍ VARIANTY 1.....	44
TAB. 7	BODOVÉ OHODNOCENÍ VARIANTY 2.....	44
TAB. 8	BODOVÉ OHODNOCENÍ VARIANTY 3.....	45
TAB. 9	BODOVÉ OHODNOCENÍ VARIANTY 4.....	45
TAB. 10	UHLÍKOVÁ VLÁKNA SPOLEČNOSTI TOHO TENAX CO., LTD. [38]..	47
TAB. 11	SKLENĚNÁ VLÁKNA SPOLEČNOSTI PPG FIBER GLASS [12][13].....	48
TAB. 12	TEORETICKÉ PRŮMĚRY PRAMENCŮ VLÁKEN .....	48
TAB. 13	CENY TECHNOLOGICKÝCH OPERACÍ .....	65
TAB. 14	CENY NAKUPOVANÝCH DÍLŮ .....	66

### 11.4 Seznam obrázků

OBR. 1	SCHÉMATICKÝ NÁKRES ZAŘÍZENÍ SLS [28] .....	19
OBR. 2	SCHÉMA ZAŘÍZENÍ STEREOLITOGRAFIE [4].....	19
OBR. 3	STL FORMÁT .....	20
OBR. 4	FUSED DEPOSITION MODELLING [22] .....	21
OBR. 5	POLYJET [23] .....	22
OBR. 6	COLORJET PRINTING [27].....	23
OBR. 7	LAMINATED OBJECT MANUFACTURING [24].....	24
OBR. 8	STEREOLITOGRAFIE [26].....	25
OBR. 9	SELECTIVE LASER SINTERING [25] .....	26
OBR. 10	LASER ENGINEERED NET SHAPING [2] .....	27
OBR. 11	VLIV PRŮMĚRU SKLENĚNÉHO VLÁKNA NA JEHO PEVNOST [9]....	29
OBR. 12	USPOŘÁDÁNÍ VLÁKEN V KOMPOZITU [39].....	32
OBR. 13	MODEL ELEMENTÁRNÍHO VLÁKNA ULOŽENÉHO V MATRICI [9].	32
OBR. 14	SCHÉMA PULTRUZNÍHO ZAŘÍZENÍ [5] .....	33

OBR. 15	SCHÉMA EXTRUDERU TECHNOLOGIE FDM .....	37
OBR. 16	SCHÉMA VARIANTY 1.....	38
OBR. 17	SCHÉMA VARIANTY 2.....	39
OBR. 18	SCHÉMA VARIANTY 3.....	40
OBR. 19	SCHÉMA VARIANTY 4.....	41
OBR. 20	SILOVÉ ROZLOŽENÍ RAMENA PŘÍTLAKU PRAMENCE.....	50
OBR. 21	SESTAVA POHONU PRAMENCE.....	51
OBR. 22	IZOMETRICKÝ POHLED MECHANISMU STŘÍHÁNÍ VLÁKNA.....	52
OBR. 23	SESTAVA STŘÍHÁNÍ VLÁKNA.....	52
OBR. 24	DIAGRAM POHYBU SOUČÁSTÍ V ZÁVISLOSTI NA ZDVIHU VAČKY.....	53
OBR. 25	FÁZE STŘIŽNÉHO PROCESU .....	54
OBR. 26	SESTAVA POHONU MATRICE.....	55
OBR. 27	SILOVÉ ROZLOŽENÍ RAMENA PŘÍTLAKU MATRICE .....	56
OBR. 28	SESTAVA VÝSTUPNÍ TRYSKY .....	58
OBR. 29	MODEL EXTRUDERU PRO 3D TISK KOMPOZITNÍCH SOUČÁSTÍ .....	60
OBR. 30	FOTKA EXTRUDERU POUŽITÉHO PRO EXPERIMENT .....	61
OBR. 31	TRASA TRYSKY NAPROGRAMOVANÉHO G-KÓDU .....	63
OBR. 32	TISK KOMPOZITNÍ SOUČÁSTI.....	63



## 12 SEZNAM PŘÍLOH

<b>PŘÍLOHA 1</b>	SCHÉMA PATENTU MARKFORGED Č. WO 2016/011252 A1 [7]
<b>PŘÍLOHA 2</b>	VZORKY EXPERIMENTU
<b>PŘÍLOHA 3</b>	NÁKLADY NA VÝROBU SOUČÁSTÍ
<b>PŘÍLOHA 4</b>	1-00-001 EXTRUDER – SESTAVA
<b>PŘÍLOHA 5</b>	2-10-001 POHON MATRICE
<b>PŘÍLOHA 6</b>	3-10-006 DRŽÁK MOTORU
<b>PŘÍLOHA 7</b>	3-50-002 TOPNÁ KOSTKA
<b>PŘÍLOHA 8</b>	3-50-005 CHLADIČ
<b>PŘÍLOHA 9</b>	3-50-006 BLOK SOUČÁSTÍ
<b>PŘÍLOHA 10</b>	3-50-011 DRŽÁK EXTRUDERU
<b>PŘÍLOHA 11</b>	4-10-002 RAMENO MATRICE
<b>PŘÍLOHA 12</b>	4-10-003 PODÁVACÍ KOLO
<b>PŘÍLOHA 13</b>	4-10-004 DISTANČNÍ TRUBKA 2
<b>PŘÍLOHA 14</b>	4-10-005 STAVĚCÍ MATICE
<b>PŘÍLOHA 15</b>	4-11-001 RAMENO PŘÍTLAKU
<b>PŘÍLOHA 16</b>	4-20-002 RAMENO PRAMENCE
<b>PŘÍLOHA 17</b>	4-20-003 DISTANČNÍ TRUBKA
<b>PŘÍLOHA 18</b>	4-20-004 ČEP
<b>PŘÍLOHA 19</b>	4-21-001 PŘÍTLAČNÉ KOLO
<b>PŘÍLOHA 20</b>	4-21-002 KOLO PŘÍTLAČNÉ
<b>PŘÍLOHA 21</b>	4-22-001 HNACÍ KOLO
<b>PŘÍLOHA 22</b>	4-22-002 KOLO
<b>PŘÍLOHA 23</b>	4-22-003 PRYŽ
<b>PŘÍLOHA 24</b>	4-30-001 STŘIŽNÝ NÁSTROJ
<b>PŘÍLOHA 25</b>	4-30-002 DRŽÁK NOŽE
<b>PŘÍLOHA 26</b>	4-30-003 BŘIT NOŽE
<b>PŘÍLOHA 27</b>	4-40-001 KLÍNOVÝ ZDVIH
<b>PŘÍLOHA 28</b>	4-40-002 TYČ
<b>PŘÍLOHA 29</b>	4-40-003 PLECH 2
<b>PŘÍLOHA 30</b>	4-50-001 TRYSKA
<b>PŘÍLOHA 31</b>	4-50-003 KOVOVÁ TRUBKA

<b>PŘÍLOHA 32</b>	4-50-004	TEPELNÝ MOST
<b>PŘÍLOHA 33</b>	4-50-007	VODÍCÍ TRN
<b>PŘÍLOHA 34</b>	4-50-008	VAČKA
<b>PŘÍLOHA 35</b>	4-50-009	PLECH
<b>PŘÍLOHA 36</b>	4-50-010	STŘIŽNICE
<b>PŘÍLOHA 37</b>	4-50-012	PNEUMATICKÉ ŠROUBENÍ ÚPRAVA
<b>PŘÍLOHA 38</b>	4-50-013	KOVOVÁ TRUBKA 2
<b>PŘÍLOHA 39</b>	4-60-001	TRUBKA S KLÍNEM
<b>PŘÍLOHA 40</b>	4-60-003	KLÍN