

Návrh a konstrukce zařízení pro tvorbu Nanovláken - Elektrospinning

Bc. Pavel Minařík

Diplomová práce
2019



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Pavel Minařík**
Osobní číslo: **T16252**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Návrh a konstrukce zařízení pro tvorbu nanovláken – elektrospinning**

Zásady pro vypracování:

- 1. Navrhněte a sestavte zařízení pro řízené zvlákňování polymerních roztoků metodou elektrospinning**
- 2. Konstrukce zařízení by měla umožnit volbu elektrického napětí při zvlákňování, řízení rychlosti otáček kolektoru, řízení rychlosti dávkování polymerního roztoku z jehly, případně dalších parametrů**
- 3. Pro tvorbu jednotlivých částí konstrukce lze využít metodu 3D tisku**

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **GIBSON, Ian, David ROSEN a Brent STUCKER.** *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing* . 2nd. London: Springer, 2015. ISBN 978-1493944552
2. **BADIRU, Adedeji, Vhance VALENCIA a David LIU.** *Additive Manufacturing Handbook: Product Development for the Defense Industry* . Boca Raton: CRC Press, 2017. ISBN 978-1482264081
3. **Huang, Z.M., Zhang, Y.Z., Kotaki, M., Ramakrishna, S.:** A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites. *Composites Science and Technology* 63, 2223-2253, 2003
4. **Bhardwaj, N., Kundu, S.C.:** Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique. *Biotechnology Advances* 28, 325-347, 2010

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Petr Smolka, Ph.D.

Ústav fyziky a mater. inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

2. ledna 2019

Termín odevzdání diplomové práce:

17. května 2019

Ve Zlíně dne 1. února 2019

L.S.

doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 20.5.2019

.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídně k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Tato diplomová práce je zaměřena na návrh originální konstrukce počítačem řízeného zařízení pro výrobu nanovláken metodou zvanou elektrospinning. V teoretické části jsou popsány základní principy této technologie. Praktická část se zabývá vlastní konstrukcí stroje a volbou nejvhodnějších součástí s důrazem na využití technologie 3D tisku pro výrobu vlastních komponent. Celý stroj je zde rozdělen na nejdůležitější části a podrobně popsán. Diskutován je i proces výroby s ohledem na přínosy a omezení technologie 3D tisku.

Klíčová slova: Elektrospinning, konstrukce, sestava, počítačové řízení

ABSTRACT

This diploma thesis is focused on the design of the original computer-controlled device for the production of nanofibres by the method called electrospinning. The theoretical part describes the basic principles of this technology. The practical part deals with the actual construction of the machine and the choice of the most suitable parts with the emphasis on the use of 3D printing technology for the production of own components. The whole machine is divided into the most important parts and described in detail. The production process is also discussed with regard to the benefits and limitations of 3D printing technology.

Keywords: Electrospinning, construction, assembly, computer controlled

Touto cestou bych chtěl poděkovat panu Ing. Petru Smolkovi, Ph. D. za odborné vedení, konzultace, cenné rady, ale také ochotu a podnětné poznámky a připomínky k mé diplomové práci.

Motto: „*Nic na světě není tak těžké, rozdělíte-li si to na malé práce.*“
Henry Ford

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 ÚVOD DO ELEKTROSPINNINGU	13
1.1 HISTORIE.....	13
1.2 TECHNOLOGICKÝ PROCES.....	14
2 PARAMETRY OVLIVŇUJÍCÍ TVORBU VLÁKEN	16
2.1 VLASTNOSTI ROZTOKU	16
2.1.1 Koncentrace.....	16
2.1.2 Molekulární hmotnost	17
2.1.3 Viskozita	17
2.1.4 Povrchové napětí.....	17
2.1.5 Vodivost a hustota povrchového náboje	17
2.2 PROCESNÍ PARAMETRY	18
2.2.1 Aplikované napětí	18
2.2.2 Rychlost průtoku polymerního roztoku	18
2.2.3 Typy kolektorů	19
2.2.4 Vzdálenost mezi roztokem a kolektorem.....	19
2.3 VLIVY PROSTŘEDÍ	19
3 KOLEKTORY PRO ZAROVNÁNÍ VLÁKEN	21
3.1 ROTUJÍCÍ VÁLCOVÝ KOLEKTOR	21
3.2 POMOCNÁ ELEKTRODA (ÚPRAVA ELEKTRICKÉHO POLE).....	23
3.3 ÚZKÉ KOLO S OSTROU HRANOU.....	25
3.4 RÁMOVÝ KOLEKTOR	26
3.5 VYUŽITÍ NĚKOLIKANÁSOBNÉHO ELEKTRICKÉHO POLE	28
4 VLASTNOSTI NANOVLÁKEN	29
4.1 VADY A DEFEKTY STRUKTURY NANOVLÁKEN	29
4.1.1 Korálkování.....	29
4.1.2 Póry ve vláknech	30
5 APLIKACE	31
5.1 TKÁŇOVÉ INŽENÝRSTVÍ	32
5.2 VÝZTUHY PRO TKÁŇOVÉ INŽENÝRSTVÍ	33
5.3 OBVAZY PRO HOJENÍ RAN.....	33
5.4 PODÁVÁNÍ LÉKŮ.....	33
5.5 FILTRACE	34
5.6 BIOSENSORY	34
5.7 OCHRANNÉ ODĚVY	35
5.8 GENEROVÁNÍ ENERGIE	35
5.9 KOSMETIKA.....	36
5.10 OSTATNÍ APLIKACE A BUDOUCÍ PERSPEKTIVA	36
6 KONSTRUKCE STROJŮ A ZAŘÍZENÍ	37

6.1	OBECNÉ ZÁSADY:.....	37
6.2	PŘEDPOKLAD PRO NÁVRH ZAŘÍZENÍ PRO ELEKTROSPINNING	38
7	SHRNUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI A CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI.....	39
II	PRAKTICKÁ ČÁST	40
8	VSTUPNÍ PARAMETRY	41
8.1	POŽADAVKY NA ZAŘÍZENÍ	41
8.2	PRŮZKUM TRHU.....	41
9	KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ.....	42
9.1	RÁMOVÁ KONSTRUKCE	42
9.2	PRACOVNÍ OSY	45
9.2.1	Počítačem řízená osa X	46
9.2.2	Počítačem řízená osa Y	50
9.2.3	Manuálně ovládané osy Z1, Z2	51
9.3	EXTRUDÉR	55
9.4	VYTLAČOVACÍ HLAVY.....	58
9.4.1	Jednoduchá vytlačovací hlava.....	58
9.4.2	Koextruzní vytlačovací hlava.....	59
9.4.3	Více-štěrbinová vytlačovací hlava	60
9.5	KOLEKTORY	61
9.5.1	Deskový kolektor	61
9.5.2	Tyčový kolektor	62
9.5.3	Stůl osy X - základna	63
9.5.4	Rotační kolektor – válec.....	64
9.5.5	Rotační kolektor – disk	65
9.5.6	Rotační kolektor tyčový	66
9.6	KRYTOVÁNÍ	67
9.7	OSTATNÍ PRVKY	70
9.7.1	Zdroj vysokého napětí.....	70
9.7.2	Úprava stlačeného vzduchu.....	70
9.7.3	Odsávání.....	72
9.7.4	Osvětlení	73
9.7.5	Zabezpečení.....	74
9.8	ŘÍZENÍ A POHONY	75
9.8.1	Požadavky	75
9.8.2	Řídící panel	75
9.8.3	Pohon.....	76
9.9	SESTAVA STROJE	77
10	VÝROBA A VÝVOJ.....	78
10.1	RÁMOVÁ KONSTRUKCE	78
10.2	BUDOUCÍ VÝVOJ.....	79
	ZÁVĚR	81
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	83
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	90
	SEZNAM OBRÁZKŮ	91

SEZNAM TABULEK.....	93
SEZNAM PŘÍLOH.....	94

ÚVOD

Elektrospinning je efektivní technologie, která slouží pro výrobu velmi jemných struktur, skládajících se z nanovláken. V běžné praxi je možné se setkat s polymerními vlákny o průměru cca 10-100 μm , touto metodou je ale možné zhotovit vlákna o průměrech cca 0,01 – 0,1 μm . Oproti jakýmkoliv jiným modifikacím stejného materiálu vynikají nanovlákna zejména vysokým poměrem plochy k objemu a změnou mechanických vlastností (pružnost, tuhost, pevnost v tahu). Vzhledem k výše uvedeným vlastnostem se nabízí mnoho aplikací, mezi které se řadí například: výroba implantátů, vložky pro hojení ran, ochranné oděvy, filtry, optické senzory.

Pro pochopení základních mechanismů a principů je určena teoretická část, vycházející z dostupných literárních studií. Kromě principu technologie elektrospinningu, jsou v této části práce diskutovány využívané materiály, parametry ovlivňující proces tvorby nanovláken a podklady pro návrh funkčních prvků (elektrod). V případě elektrospinningu je možné vyrábět nanovlákna buď z roztoku polymeru a rozpouštědla, nebo z polymerní taveniny. Tato práce je zaměřena na přípravu nanovláken z roztoku. Pro tento přístup je popsáno větší množství materiálů, které lze zpracovávat při nižších, pokojových teplotách.

Praktická část je zaměřena na návrh, konstrukci a vývoj vlastního zařízení. Je kladen důraz na minimalizaci prvků vyrobených z vodivých materiálů v blízkosti elektrod. Vychází se zde z předpokladu, že bude pro výrobu značné části komponent využito 3D tisku. Funkční prvky (elektrody) jsou umístěny v uzavřeném prostoru, tvořeném vlastní rámovou konstrukcí stroje. Mezi požadavky na návrh zařízení se řadí: možnost libovolné změny teploty přivedeného vzduchu, objemového průtoku vzduchu, objemového průtoku polymerního roztoku, velikosti napětí, vzdálenosti mezi elektrodami, rychlosti otáčení rotačního kolektoru a počítačově řízené rastrování ve 2D (vodorovná osa X a Y). Cílem je sestavit variabilně měnitelné zařízení, aby byla možná jeho snadná modifikace v závislosti na požadavcích vycházejících z budoucích experimentů spojených s přípravou nanovláken z originálních typů materiálových soustav.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ÚVOD DO ELEKTROSPINNINGU

První kapitola popisuje základní principy výroby vláken pomocí elektricky nabitého proudu polymerního roztoku, nebo taveniny. Technologie se nazývá elektrospinning. Tato práce je zaměřena na zpracování rozpuštěného polymeru v roztoku.

1.1 Historie

Termín elektrospinning je odvozen z electrostatic-spinning a byl poprvé použit v roce 1994.

Přestože je elektrospinning stará technologie, dostala se do popředí až v posledních dekádách a to především díky využití ve zdravotním průmyslu (tvorba implantátů, náhrad a spousta dalších aplikací). První objev této technologie učinil Rayleigh už v roce 1897, následovala detailní studie electrospraingu (rozprašování pomocí elektrického pole ve formě aerosolů), která byla provedena v roce 1914.

Mezi lety 1934 a 1944 byla vydána série patentů Antonem Formhalsem, popisující postup výroby polymerních filamentů za použití elektrostatických sil. První z těchto patentů, vztahující se na elektrospinning byl zaměřen na výrobu textilních přízí při napětí o hodnotě 57 kV. Tento systém vynikal pohybujícím se sběrným zařízením (kolektorem), který navíjí vlákna v napnutém stavu.

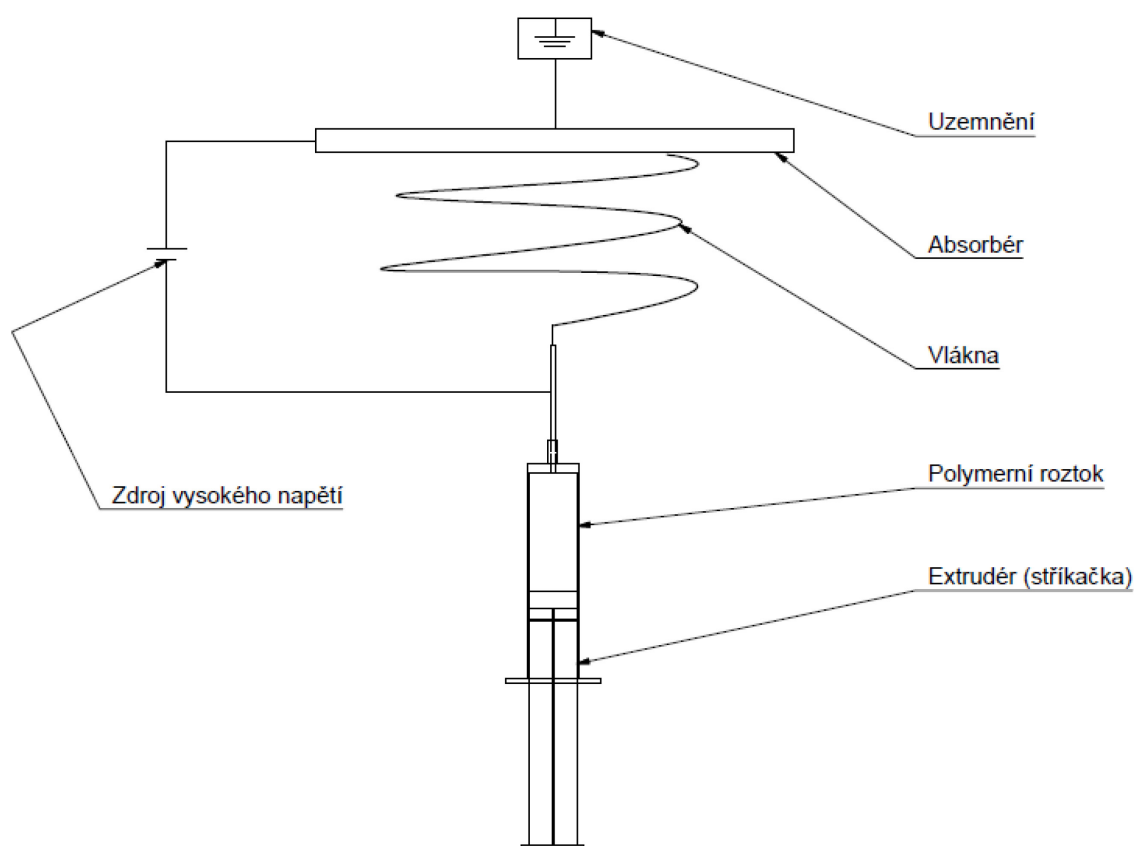
Během následujících 60 let bylo vydáno okolo 50 patentů vztahujících se na elektrospinning. V roce 1952 Vonnegut a Newbauer vynalezli přístroj pro elektronickou atomizaci, kdy dokázali vyrábět proudy velmi nabitých a stejnoměrných kapek, které měly průměr okolo 0,1 mm. Dále se v roce 1955 Drozin zabýval disperzí různých látek na aerosoly za působení velkého elektrického potenciálu.

Simons si roku 1966 nechal patentovat zařízení pro výrobu netkaných textilií, které byly velmi tenké a lehké, za použití elektrického spinningu. Dalším milníkem bylo, když Baungarten v roce 1971 sestrojil zařízení pro elektrospínování akrylických vláken. Rozpětí průměrů vláken se pohybovalo mezi 0,05 až 1,1 μm .

Největší nárůst aplikací této technologie je možný pozorovat od roku 1980 a má do dnes exponenciální průběh. Důkazem je, že se touto technologií zabývá více než 200 univerzit a výzkumných institucí po celém světě. Stále vznikají nové výzkumy a patenty. [7]

1.2 Technologický proces

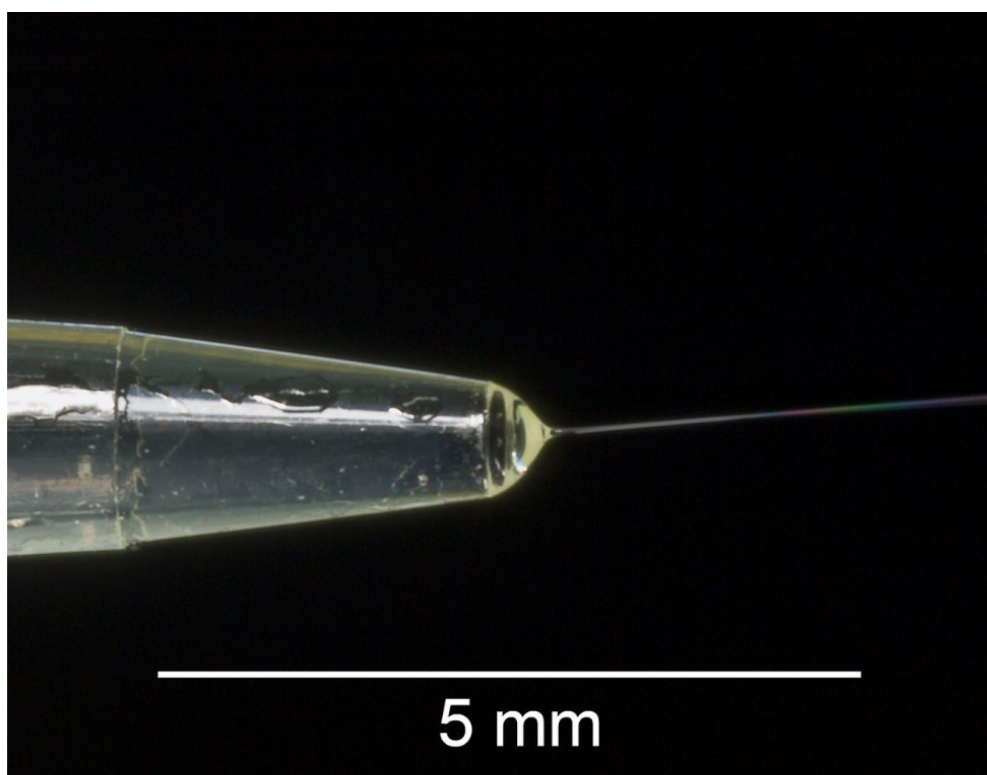
Systém zařízení se skládá ze tří základních prvků, kterými jsou: zdroj vysokého napětí (v řádech desítek kV), extrudér a kolektor. Jako extrudér se vzhledem k malému objemu vytlačovaného polymerního roztoku v laboratorních podmínkách používá injekční stříkačka. Typ a geometrie absorbéru se liší dle požadavků na vlastnosti a orientaci vláken, z pravidla se však jedná o elektricky vodivý prvek, základním typem je kovová destička. Mezi další, podpůrné prvky zařízení se může řadit například přívod, upraveného vzduchu k extrudéru, nebo řízení parametrů prostředí během zpracování (teplota, vlhkost). Základní prvky jsou popsány na obrázku číslo 1. [1,2]



Obrázek 1. Schéma zařízení pro výrobu nanovláken.

Polymerní roztok je tlačěn extrudérem skrz dutou (kovovou) jehlu, než dojde k tvorbě kapky na špičce jehly, kapka drží svůj tvar vlastním povrchovým napětím. Na jehlu je přiveden kladný pól zdroje vysokého napětí, jehla tedy sama o sobě slouží jako kladná elektroda. Zápornou elektrodu tvoří absorbér, který je ve většině aplikací pouze uzemněný. Přivedením potenciálu mezi elektrody, dochází k tvorbě sil v nabitém roztoku a následné změně

tvaru kapky na kužel (viz. obrázek číslo 2). Při překročení kritické hodnoty poměru velikosti napětí/vzdálenosti elektrod se začne polymerní roztok pohybovat tryskovým tokem směrem k záporné elektrodě, díky tomuto dochází k tvorbě velmi dlouhých a tenkých vláken. Během pohybu mezi kladnou a zápornou elektrodou dochází k vypaření rozpouštědel a ztuhnutí. Dle vlastností zpracovávaného roztoku (materiál, koncentrace, teplota) dochází ke ztuhnutí před dopadem na absorbér, nebo až na jeho povrchu. Dosažení elongačního toku ovlivňuje celá řada proměnných, které jsou popsány v kapitolách níže. [3,4]



Obrázek 2. Přechod z tvaru kapky na kužel a následná tvorba vlákna. [6]

Pro účel zhotovení nano-struktur je možná výroba nanovláken i pomocí jiných metod, jako je například šablonová syntéza, kdy jako šablona slouží nano-porózní membrána. Nebo fázová separace, kdy dochází k rozpouštění, želatinaci, mražení, nebo sušení, nicméně tento přístup často je časově náročnější.

Hlavním rysem, kterým je elektrospinning výjimečný je masová výroba velmi dlouhých samostatných vláken, takzvaný „drawing“. Během tohoto procesu je materiál velmi deformován a působí na něj velké napětí, proto se pro tyto účely používají pouze viskoelastické materiály, které dokáží udržet soudržnost při tažení dlouhých nanovláken. [5]

2 PARAMETRY OVLIVŇUJÍCÍ TVORBU VLÁKEN

Pro ideální výrobu vláken jsou důležité níže uvedené zásady, kterých není snadné dosáhnout:

- průměr vláken musí být konzistentní a kontrolovatelný,
- povrch vláken nesmí obsahovat vady, nebo musí být množství vad kontrolovatelné,
- kontinuální samostatné vlákna musí být možné odebírat. [5]

Základní proměnné, které mají vliv na výrobní proces elektrospinningu jsou:

- vlastnosti roztoku,
- procesní parametry,
- vlivy okolního prostředí.

Každý z těchto popsaných parametrů zásadně ovlivňuje řadu vlastností výsledných vláken. Znalost těchto parametrů a pochopení jejich vzájemného propojení vede k tvorbě vláken s požadovanými vlastnostmi. [8]

2.1 Vlastnosti roztoku

Vzhledem k povaze této práce zaměřené na konstrukci, jsou tyto parametry vypsány pouze obecně tak, aby byla ukázána obsáhlost dané problematiky.

2.1.1 Koncentrace

Roztok se vždy skládá z polymeru a jeho rozpouštědla. V některých případech se jedná o směsi polymerů. Nejen koncentrace, ale typ rozpouštědla má vliv na výsledné vlastnosti struny a její strukturu, toto je obecně popsáno v kapitole s názvem: Aplikované materiály.

Přidáváním rozpouštědla dochází k poklesu koncentrace polymerního roztoku. V případě nízké koncentrace polymerního roztoku dochází ke vzniku vady, která se nazývá korálkování (anglicky Beads), tato vada je popsána v kapitole s názvem: Vady a struktury nanovláken. Zvyšováním koncentrace dochází ke změně z tvaru korálků na šroubovice a následně na hladké vlákna. Nevýhodou zvyšování koncentrace je, že roste průměr vlákna, proto je třeba pro každý roztok a procesní parametry nalézt ideální koncentraci. [9]

2.1.2 Molekulární hmotnost

Tento parametr ovlivňuje morfologii výsledných vláken, protože má zásadní vliv na reologické a elektrické vlastnosti polymeru, jako je viskozita, povrchové napětí a vodivost [10].

Obvykle jsou technologií elektrospinningu zpracovávány roztoky s vysokou molekulovou hmotností. Bylo zpozorováno, že v případě příliš nízké molekulové hmotnosti dochází ke stejným defektům jako v případě nízké koncentrace (tedy vznikají vlákna s korálky). Se zvyšováním molekulové hmotnosti korálky mizí a opět roste průměr vláken. Důvodem tohoto jevu je, že v případě vyšší molekulové hmotnosti jsou polymerní řetězce více zapleteny, roste viskozita a je možné zpracovávat roztoky o nižších koncentracích. [11, 12]

2.1.3 Viskozita

Během tvorby vláken z polymerního roztoku hraje viskozita zásadní roli. Dle velikosti viskozity se rozvíjí morfologie a rozměry vláken. V případě příliš nízké viskozity dochází k tvorbě nekontinuálních vláken. Pokud je viskozita příliš vysoká, pak je obtížné vytvořit proud polymeru. Opět je třeba hledat ideální hodnotu, se znalostí závislosti viskozity, molekulární hmotnosti a koncentrace. Tyto 3 parametry jsou vzájemně úzce propojeny. [7]

Při spinnování vláken z roztoku o velmi vysoké viskozitě obvykle dochází k delším relaxacím napětím. Často dochází k praskání výsledných vláken. Zvyšováním viskozity je možné získat delší vlákna rovnoměrnějších rozměrů.

2.1.4 Povrchové napětí

Mezi další ze signifikantních materiálových parametrů ovlivňujících vlastnosti a geometrii vytvořených vláken se řadí povrchové napětí. Různé roztoky dosahují různých hodnot povrchové napjatosti. Obecně lze říci, že snižováním povrchového napětí je možné získat hladší vlákna bez korálků. S vyšší povrchovou napjatostí roste nestabilita spinnovaných pařků a tvoří se kapky [13].

Příliš nízké povrchové napětí vždy neznamená ideální podmínky pro electrospinning, proto pro každý materiál existuje jistý interval optimálních hodnot [2].

2.1.5 Vodivost a hustota povrchového náboje

Až na pár výjimek, které jsou dielektrické, je většina polymerních roztoků vodivá. Nabité ionty v polymerním roztoku mají velký vliv na tvorbu polymerního proudu mezi

nabitou elektrodou a kolektorem. Vodivost roztoku je závislá na druhu polymeru, druhu rozpouštědla a možnosti přidání ionizačních solí.

Zvyšováním vodivosti roztoku dochází k významnému zmenšení průměru vláken a odstranění chyby v podobě korálků, kromě toho mají takto modifikovaná vlákna stejnoměrnější tvar [7].

2.2 Procesní parametry

Stejně jako tomu je v případě vlastností roztoků, jsou procesní parametry popsány pouze přehledově a slouží pro pochopení základních požadavků na navrhované zařízení.

2.2.1 Aplikované napětí

Vzhledem k faktu, že k formaci vláken touto technologií dochází v momentě překročení kritické hodnoty elektrického napětí, je hodnota aplikovaného elektrického napětí rozhodujícím parametrem [14].

Někteří výzkumníci předpokládali, že s rostoucím elektrickým napětím vzroste množství materiálu v toku polymerního vlákna a dojde k nárůstu průměru vlákna. Výzkum však ukázal, že s nárůstem elektrického potenciálu vzrůstají repulsivní síly, působící na polymer, což má za následek zúžení průměru vláken. Dle jednoho výzkumu se podařilo snížit průměr vláken téměř na poloviční hodnotu zvýšením hodnoty elektrického napětí na dvojnásobnou hodnotu [15,7].

S vyšším napětím roste pravděpodobnost defektu v podobě korálkování. Závislost mezi hodnotou velikosti napětí a průměrem vláken se liší vždy v závislosti na koncentraci polymerního roztoku a vzdáleností mezi špičkou kapiláry a kolektorem [16].

2.2.2 Rychlost průtoku polymerního roztoku

Dalším významným procesním parametrem je rychlost průtoku (polymerního roztoku). Tento parametr má vliv na rychlost proudění a tedy i na rychlost přenosu materiálu.

Rychlost proudění polymerního roztoku by měla být co nejnižší, aby byl dodržen dostatečný časový interval pro vypaření rozpouštědel [17]. Se zvyšující se rychlostí proudění roste průměr vláken a velikost pórů na jejich povrchu. Dále často dochází k tvorbě korálků a to z důvodu nedostatečného času, nezbytného pro odpařování rozpouštědel. [18, 17, 7].

2.2.3 Typy kolektorů

Druh zvoleného kolektoru má zásadní vliv na výslednou strukturu vytvářeného vlákna. Dalším aspektem, který je nezbytné vzít v potaz je možnost sejmutí nanovláken z kolektoru. Nejobecnějším příkladem kolektoru je hliníková fólie, kdy není možné nijak vlákna zarovnat a je problematické jejich snímání z povrchu. Dalšími variacemi, které poskytují podobné možnosti, jako hliníkové fólie jsou: vodivý papír, vodivé tkaniny, nebo drátová mřížka. [19].

Pro získání zarovnaných vláken byla navržena celá řada rozličných kolektorů, mezi které se řadí: rovnoběžná nebo drážkovaná tyč, rotační kolo a rotační buben. Mezi další možnosti z hlediska aplikovaných kolektorů se řadí kapalné lázně (zde nedochází k nucenému zarovnání vláken) [19,7].

Parametr, který má v případě kolektorů velký vliv na výslednou morfologii vláken je vodivá plocha kolektoru. Obecně platí, že čím je menší vodivá plocha kolektoru, tím více vad polymerních vláken vzniká (korálkování, póry) [2,7].

Typy nejrozšířenějších kolektorů jsou popsány v samostatné kapitole.

2.2.4 Vzdálenost mezi roztokem a kolektorem

Dalším způsobem jak řídit průměr vláken a jejich morfologii, je změna vzdáleností mezi koncem kapiláry s polymerním roztokem a kolektorem [7].

Je známo, že existuje minimální vzdálenost mezi kapilárou a kolektorem umožňující dostatečné odpaření rozpouštědla. Pokud je tato vzdálenost příliš krátká, nebo dlouhá objevují se chyby v podobě korálků [20, 21, 22]. Nicméně závislost mezi vzdáleností ke kolektoru a morfologií vláken není tak zásadní, jako u ostatních procesních parametrů. U některých materiálů je popsáno, že kratší vzdálenosti ke kolektoru mají za následek tvorbu plochých vláken a s rostoucí vzdáleností vlákna vykazují kruhový průřez [7, 21, 22].

2.3 Vlivy prostředí

Mezi vlivy prostředí se řadí především vlhkost a teplota. S rostoucí teplotou, klesá průměr vláken. Důvodem poklesu průměru vlákna je závislost mezi teplotou a viskozitou. S rostoucí teplotou viskozita klesá [7, 23].

Se zvyšováním vlhkosti může docházet k nárůstu tvorby malých kruhových pórů ve vláknech. S klesající vlhkostí roste rychlost odpařování rozpouštědel, což může být přínosné.

V některých příkladech je odpařování tak rychlé, že dochází k odpaření rozpouštědel už na špičce kapiláry, to má naopak negativní vliv a může zastavit celý proces elektrospinningu, proto je opět třeba hledat ideální vlhkost a teplotu pro danou aplikaci [7,14, 23].

3 KOLEKTORY PRO ZAROVNÁNÍ VLÁKEN

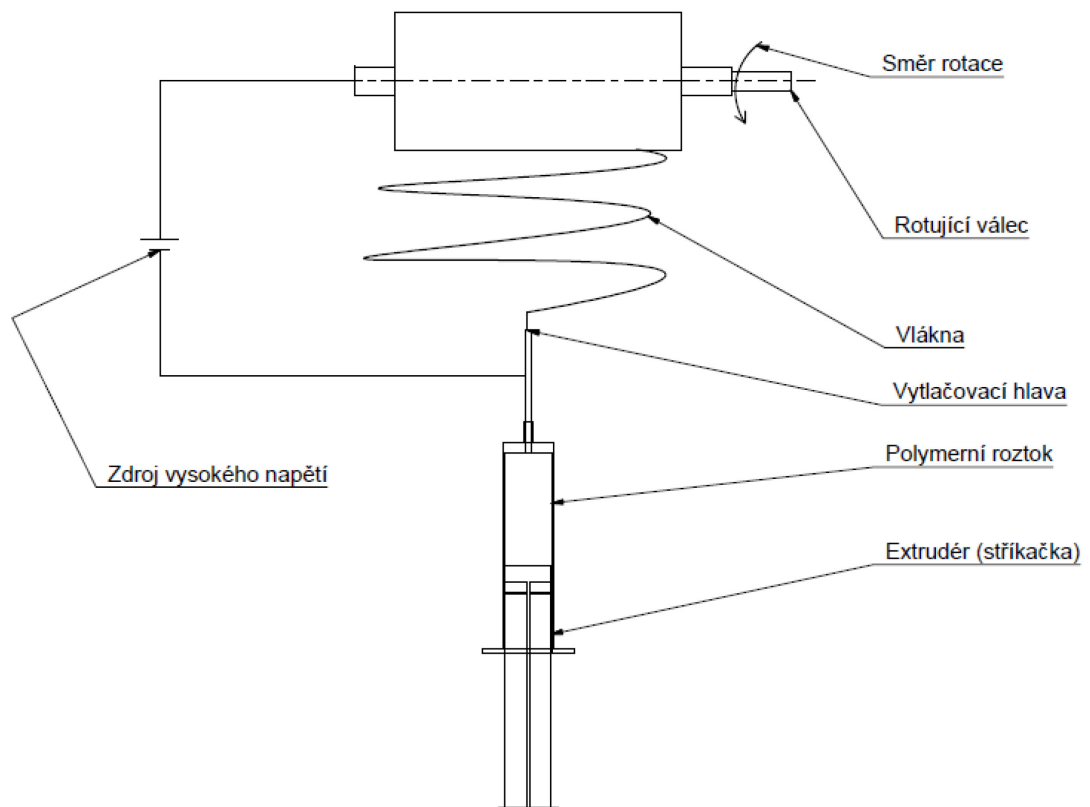
Trajektorie proudu spinnovaných vláken je velice komplikovaná, proto v případě základního typu kolektoru (vodivá deska) získáme pouze vlákna neuspořádané (v podobě netkané textilie). Takováto náhodná orientace vláken limituje jejich aplikační potenciál.

V případě kolektoru, kdy nedochází k žádnému nucenému zarovnávání, připomíná trajektorie vláken „bičování“ ve třech rozměrech.

Pro zajištění široké škály aplikací je nezbytné zarovnat vlákna, ideálně do jednoosého svazku. Tento úkol není vůbec jednoduchý, níže budou rozebrány postupy vedoucí k částečnému nebo téměř úplnému zarovnání vláken. [5]

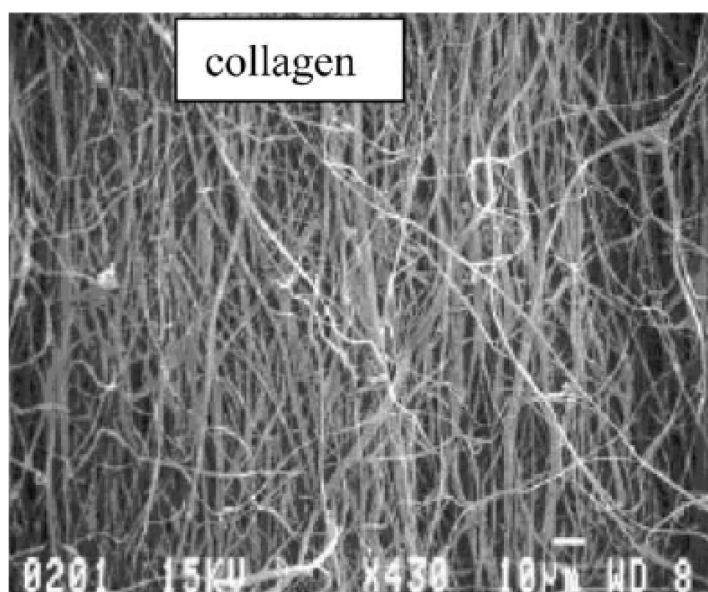
3.1 Rotující válcový kolektor

Velmi rozšířeným způsobem pro zarovnání směru vláken při elektrospinningu je rotující válcový kolektor. Rotující válec, jehož povrch má funkci záporné elektrody, se otáčí rychlostmi až v řádech tisíců otáček za minutu. Výsledná vlákna se pak zarovnávají po obvodu válce. Schématické uspořádání rotujícího kolektoru je uvedeno na obrázku číslo 3.

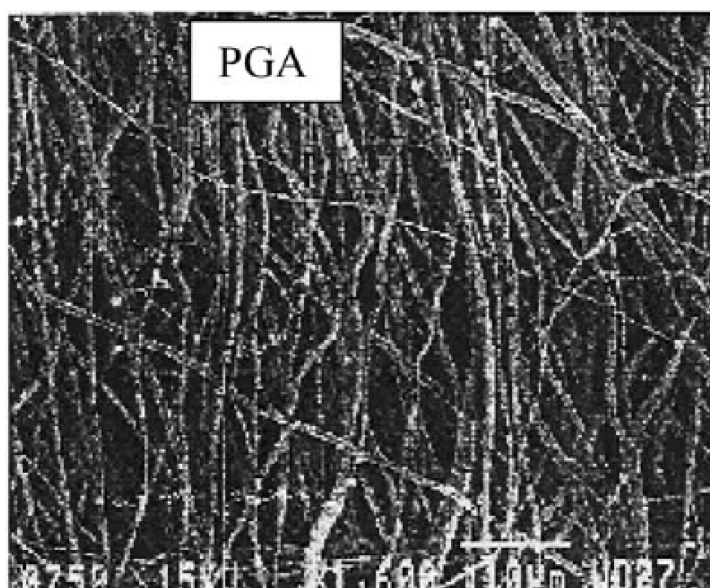


Obrázek 3. Schématické zobrazení kolektoru v podobě rotujícího válce.

Vzhledem k chaotickému chování polymerního proudu, je těžké popsat chování vláken během této aplikace. Předpoklad zní následovně: pro ideální výsledek (vlákna jsou zarovnána po obvodu válce rovnoběžně) se musí obvodová rychlost válce blížit rychlosti proudu polymeru (takzvaná vyrovnaná rychlost). Se snižující obvodovou se rychlostí, roste neuspořádanost vláken. V případě překonání určité limitní obvodové rychlosti, dojde k porušení (přetrhnutí) proudu vláken. Na obrázku číslo 4 je zobrazen vzorek vláken vyrobených z Collagenu při 4500 otáčkách za minutu. Obrázek číslo 5 ukazuje zarovnání materiálu PGA při rychlosti 1000 otáček za minutu na stejném zařízení. [45, 46]



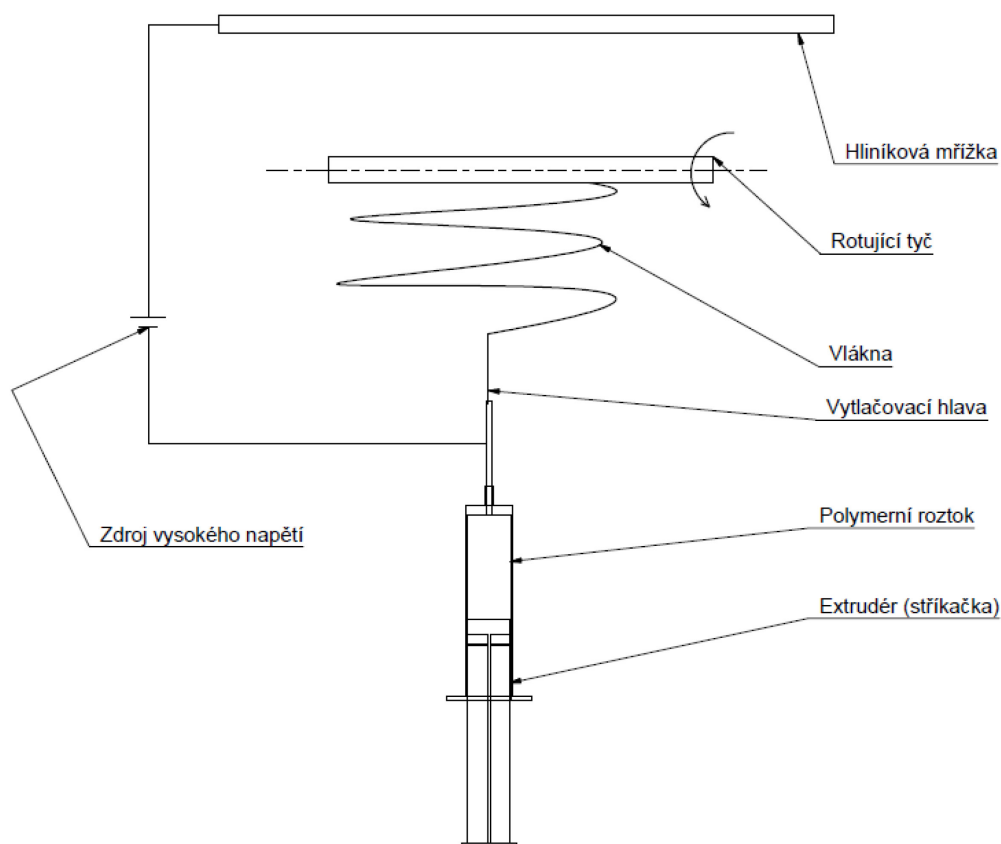
Obrázek 4. Obvodově zarovnaná vlákna Collagenu při 4500 ot/min.[5]



Obrázek 5. Obvodově zarovnaná vlákna PGA při 1000 ot/min. [5]

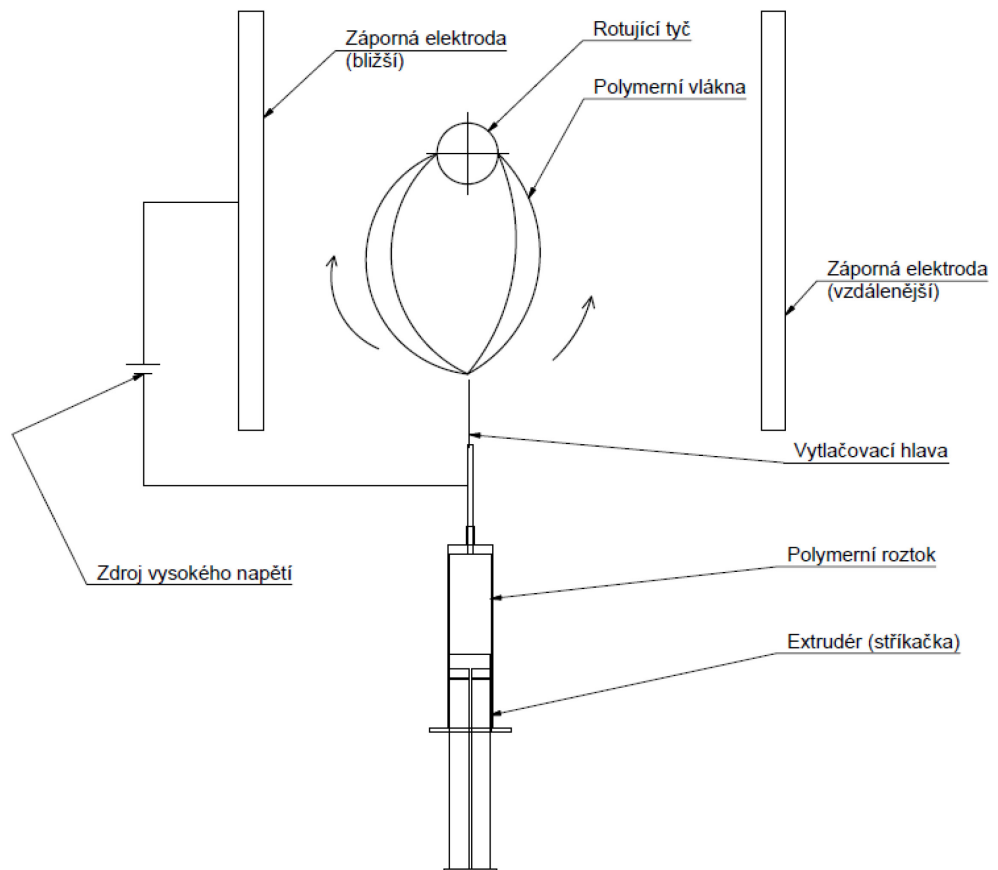
3.2 Pomocná elektroda (úprava elektrického pole)

Metodu pro výrobu dutých vláken určených jako protézy tepen, močovodů a žlučovodů uvádí americký patent číslo 4689186. Výsledkem je značný pokrok v ucelené orientaci vláken. Tento typ kolektoru je schematicky naznačen na obrázku číslo 6, skládá se z teflonové tyče o průměru 4 mm a rotující rychlostí 1165 ot/min. Záporně nabitou elektrodu tvoří mřížka zhotovená z hliníkové fólie, která je umístěna 80 mm za rotující tyčí a je na ni přivezen potenciál -8 kV . Vytlačovací hlava je nabita kladným napětím o velikosti 12 kV . [47]



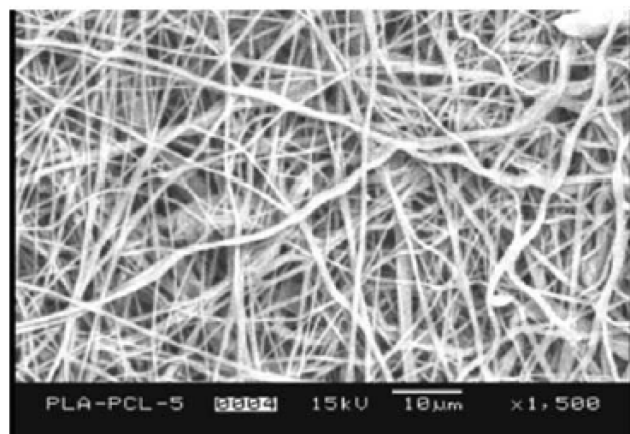
Obrázek 6. Zařízení pro úpravu elektrického pole při elektrospinningu.

Na obdobném principu funguje zařízení s patentovým číslem 5024789. Rotující tyč je asymetricky umístěna mezi dvě nabitě elektrody (obrázek číslo 7). Tímto způsobem byly zhotoveny velmi uspořádané vlákna o relativně velkém průměru vláken. S klesajícím průměrem tyče, neuspořádanost vláken vzrůstá.

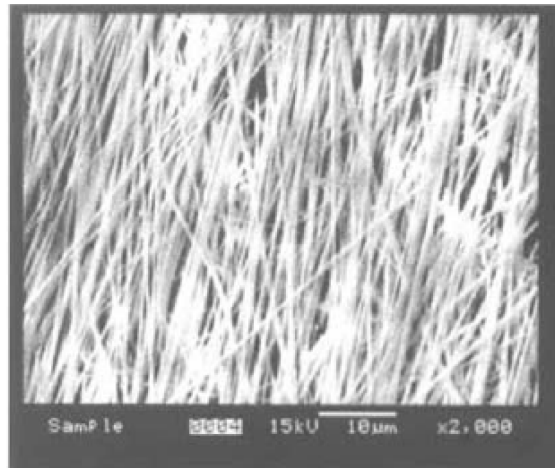


Obrázek 7. Zařízení pro úpravu elektrického pole při elektrospinningu.

Pro ilustraci je na obrázku číslo 8 zobrazena struktura vláken bez aktivních pomocných elektrod. Obrázek číslo 9 ukazuje změnu uspořádání vláken za přítomnosti upraveného elektrického pole. [48, 5]



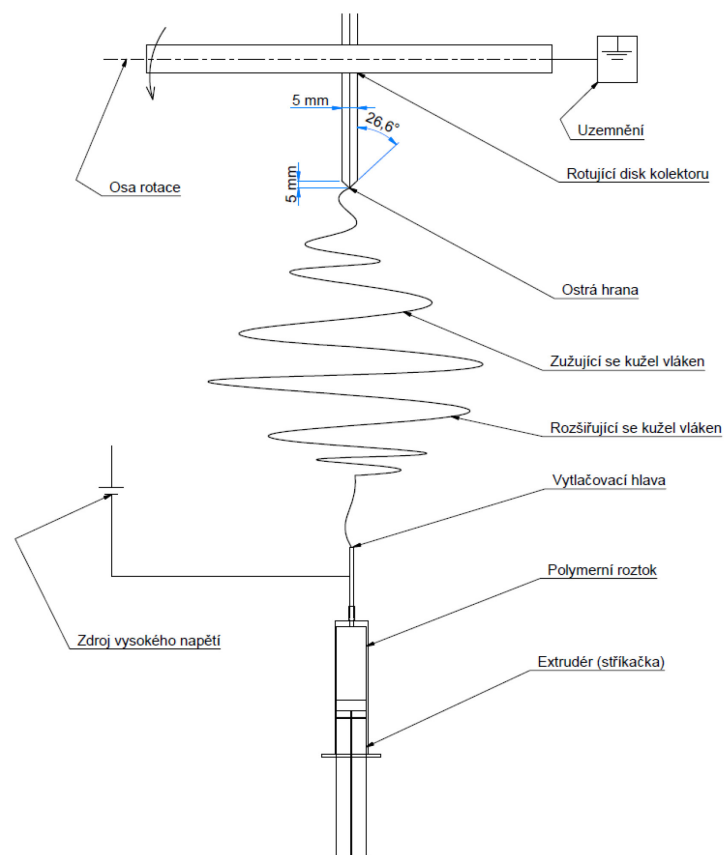
Obrázek 8. Uspořádání vláken bez asistence pomocných elektrod. [5]



Obrázek 9. Uspořádání vláken s asistencí pomocných elektrod. [5]

3.3 Úzké kolo s ostrou hranou

Velmi pokročilým řešením pro modifikaci uspořádání vláken je kolektor, jehož geometrie odpovídá úzkému kolu (disku) s hranou do špičky viz. obrázek číslo 10. Rotující kolo slouží jako elektroda (je uzemněno). [49]



Obrázek 10. Schéma a trajektorie polymerního roztoku v případě kolektoru ve tvaru úzkého rotujícího kola.

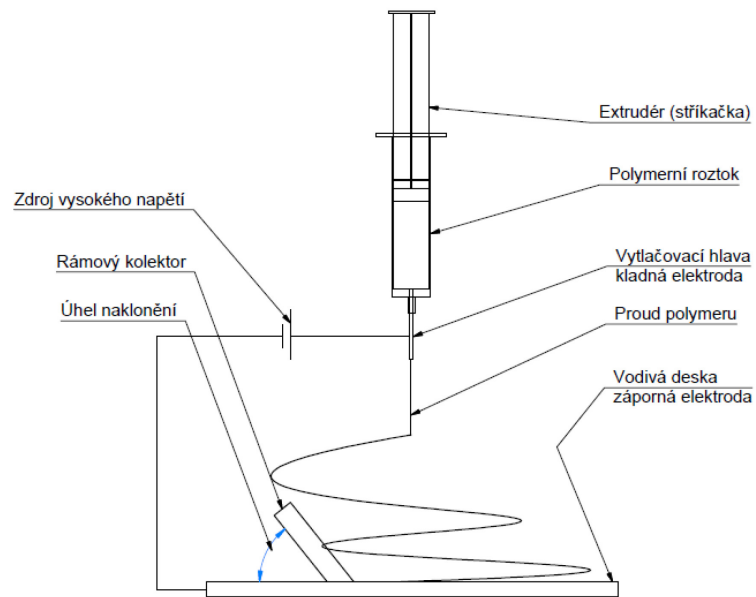
Zúžením špičky dochází k podstatnému nárůstu koncentrace elektrického pole, proto téměř všechna vlákna jsou přitahována na špičku rotujícího kola kolektoru. Na obrázku číslo 11 je zřetelné uspořádání vláken při použití tohoto kolektoru. Vlákna o průměrech v rozmezí 100 až 400 nm jsou vzájemně odděleny mezerami v rozmezí 1 až 2 μm . Tento jev vzniká z důvodu dostatečných zbytkových odpudivých sil uvnitř jednotlivých vláken. Variace mezer mezi vlákny je způsobena rozdílem v průměrech vláken a jednotlivých residuálních elektrických sil uvnitř vláken. V případě obrázku číslo 11 se rychlost otáček rovnala 1070 ot/min (vztažením na obvod kolektoru se rychlost vlákna rovná 22 m/s). [49,5]



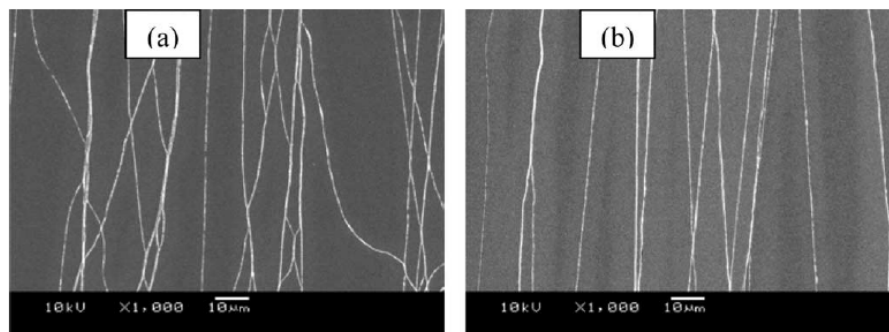
Obrázek 11. Uspořádání vláken z polymeru PEO na špičce kolektoru. [49]

3.4 Rámový kolektor

Jednoduchý typ rámového kolektoru spočívá v položení rámu na vodivou podložku pod určitým úhlem viz. obrázek číslo 12. Dochází k částečnému zachytávání vláken a jejich zarovnání mezi stěnami rámu. Materiál rámu kolektoru má vysoký vliv na výsledné uspořádání vláken. Na obrázku číslo 13 a) jsou zobrazeny vlákna v případě použití rámového kolektoru, vyrobeného ze dřeva. Stejné procesní parametry byly aplikovány na obrázku 13 b), jediným rozdílem je materiál rámu kolektoru (tentokrát hliník). Rozdíl v kvalitě zarovnání vláken je zřetelný na první pohled. [5]



Obrázek 12. Schématické uspořádání rámového kolektoru.



Obrázek 13. Rozdíl v uspořádání vláken při využití rámového kolektoru vyrobeného ze dřeva (a) a z hliníku (b).

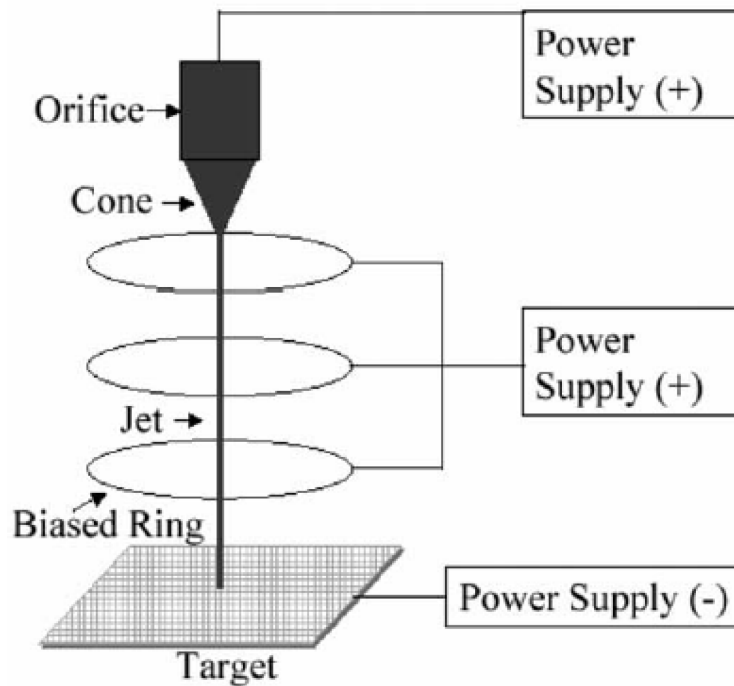
Složitější typ rámové kolektoru je zobrazen na obrázku číslo 14. V tomto případě trojúhelníkový rám rotuje a navíjí výsledná vlákna. Výsledné uspořádání a parametry vláken se odvíjí od počtu stěn, rozměrů, materiálu a rychlosti otáčení kolektoru.



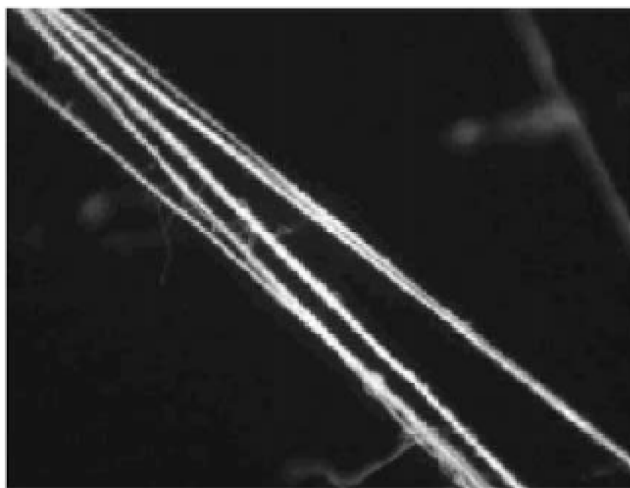
Obrázek 14. Rotující rámový kolektor. [5]

3.5 Využití několikanásobného elektrického pole

Polymerní tok během elektrosponingu má často velmi chaotickou trajektorii. Princip technologie využívající několikanásobného pole je schematicky popsán na obrázku číslo 15. Obrázek číslo 16 zobrazuje výslednou strukturu zarovnaných vláken. [50]



Obrázek 15. Schéma zařízení pro elektrosponing nanovláken za podpory několikanásobného elektrického pole. [1]



Obrázek 16. Výsledná struktura nanovláken při využití principu několikanásobného pole. [1]

4 VLASTNOSTI NANOVLÁKEN

Charakteristickými vlastnostmi nanovláken vyrobených pomocí elektrospinningu jsou:

- vysoký poměr povrchu vláken k objemu,
- vysoká poróznost,
- změna fyzikálních a mechanických vlastností proti jiným modifikacím stejného polymeru. [7]

Pro zkoumání geometrických parametrů nanovláken se používají technologie AFM, TEM a SEM. Jsou zkoumány tyto parametry:

- průměr vlákna,
- distribuce průměrů vláken,
- orientace vláken,
- morfologie (průřez, tvar, drsnost povrchu),
- poróznost povrchu vláken.

Měřené fyzikální parametry:

- propustnost vzduchu,
- propustnost vodních par,
- elektrická vodivost.

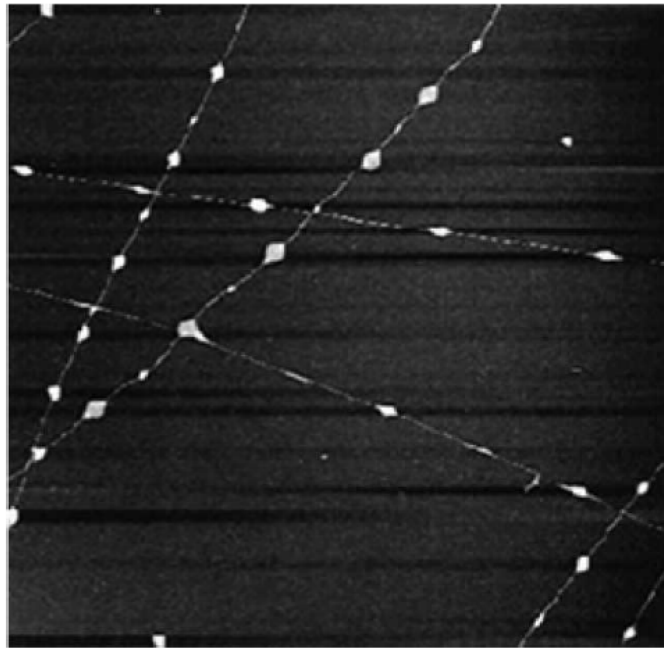
Za účelem měření chemických vlastností (molekulární struktury) se využívá technologie FTIR. Mechanické vlastnosti samostatného nanovlákná zatím nebyly změřeny, doposud měřené vzorky měly strukturu netkaných textilií, nebo částečně zarovnaných vláken. Měření mechanických vlastností v tahu probíhalo pod mikroskopem SEM. [5]

4.1 Vady a defekty struktury nanovláken

V této kapitole jsou stručně popsány zásadní vady, které jsou vztaženy přímo na samotné vlákna. Vlivy způsobující tyto vady a jejich omezení jsou popsány v kapitole číslo 2.

4.1.1 Korálkování

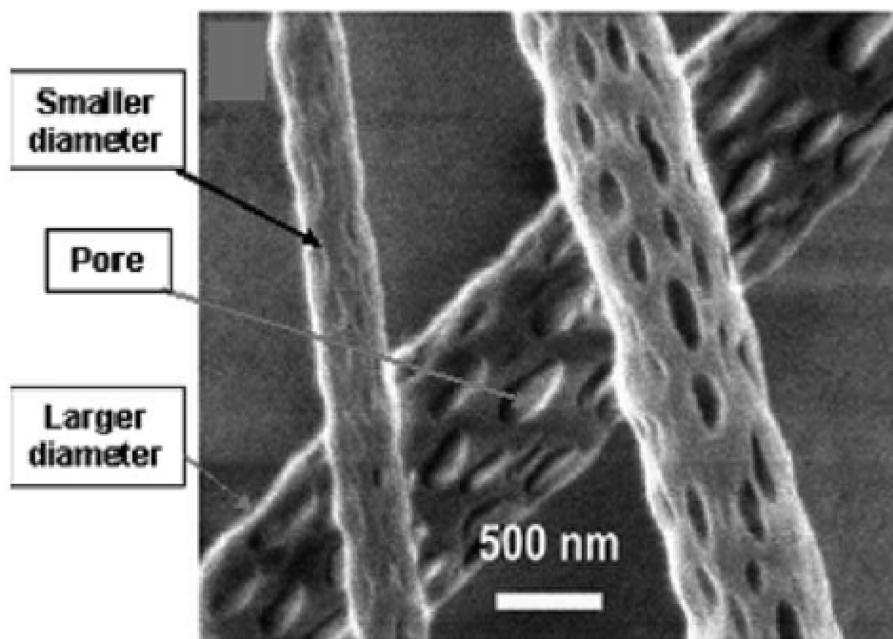
Při tomto jevu, zvaném „korálkování“ tvar výsledného vlákna připomíná přívěsek s korálky. Na vznik tohoto jevu mají vliv jak procesní parametry, tak i vlastnosti polymerního roztoku. Obrázek číslo 17 je snímek z AFM mikroskopu se strukturou obsahující značné množství této vady. [50]



Obrázek 17. AFM obrázek elektrospinnovaných vláken z materiálu PEO. [50]

4.1.2 Póry ve vláknech

Během procesu elektrospinnování může docházet k tvorbě nežádoucích pórů přímo v samotných vláknech. Parametry ovlivňující tvorbu pórů jsou popsány v kapitole číslo 2. Na obrázku číslo 18 je snímek vláken o různých průměrech vlákna a velikosti pórů.



Obrázek 18. Snímek nanovláken o různých průměrech vlákna a velikosti pórů.

[51]

5 APLIKACE

S ohledem na počet vydaných patentů, zhruba dvě třetiny aplikací jsou v lékařském oboru, polovina ze zbylé třetiny jsou filtrace a o druhou polovinu poslední třetiny všech využití se dělí ostatní aplikace [24].

V tabulce číslo 1 jsou uvedeny materiály a jejich kombinace, které již byly využity pro výrobu nanovláken z roztoku, dále jsou uvedeny i jejich perspektivní aplikace. Vzhledem k zaměření této práce především na konstrukci zařízení nejsou řešeny koncentrace roztoků. Jak bylo uvedeno dříve v literatuře, jsou popsány možnosti spinnování dvou polymerů v jednom roztoku. Tímto způsobem je možné docílit odlišných zpracovatelských i materiálových vlastností a struktur, než v případě zpracování těchto polymerů samostatně.

Tab. 1. Perspektivní aplikace vybraných materiálů [5].

číslo	Polymer	Označení	Perspektivní aplikace
1	Nylon 6.6	PA-6.6	Ochranné oděvy
2	Polyurethany	PU	Ochranné oděvy, filtry
3	Polybenzimidol	PBI	Ochranné oděvy, kompozity vyztužené nanovláknny
4	Polykarbonát	PC	Ochranné oděvy, sensory, filtry
5	Polyacrylonotríl	PAN	Uhlíkové nano filtry
6	Polyvinyl alkohol	PVA	-
7	Polymléčná kyselina	PLA	Membrány pro prevenci adheze vyvolané chirurgickým zákrokem, sensory, filtry, systém podávání léků
8	Polyethylen-co-vinyl acetát	PEVA	Systém podávání léků
9	Polymléčná kyselina / Polyethylen-co-vinyl acetát	PLA/PEVA	Systém podávání léků
10	Polymethylmetakrylát	PMMA	-
11	Polymetylenhაკrylát / Tetrahydroperfluorooctylacrylát	PMMA/TAN	-
12	Polyethylénoxid	PEO	Mikroelektronické vedení a zapojení, filtry
13	Collagen / Polyethylénoxid	-	Hojení ran, tkáňové inženýrství, hemostatická činidla
14	Polyanilin / Polystyrén	PNI / PS	Vodivé vlákna
15	Hedvábný polymer s funkcemi fibronektinu	-	Implantované zařízení
16	Polyvinilcarbazol		Sensor, filtr
17	Polyethylén Teraftalát	PET	

18	kyselina polyakrilová- polypyrén methanol	PAA-PM	Optické sensory
19	Polystyrén	PS	Enzymatické biotransformace, ploché stuhý, katalyzátory, filtry
20	Polyamid	PA	Médium filtru na bázi skelného vlákna
21	Polyethylénoxid / Hedvábí	PEO / SILK	Výztuhy biomateriálu
22	Poly vinyl phenol	PVP	Antimikrobiální činitel
23	Polyvinylchlorid	PVC	-
24	Acetát celulózy	CA	Membrány
25	kyselina polyakrilová- polypyrén methanol / Polyurethan	PAA-PM / PU	Optické sensory
26	Polyacrylinad	PAAm	-
27	Collagen	-	Výztuhy pro tkáňové inženýrství
28	Polycaprolakton	PCL	-
29	Poly(2-hydroxymethyl metakrylát)	HEMA	Ploché stuhý
30	Polyvinylidém fluorid	PVDF	Ploché stuhý
31	Polymer imid	PEI	Ploché stuhý
32	Polyethylén gricol	PEG	-
33	Nylon 4.6	PA-4.6	Transparentní kompozity
34	polyethylén-co-vinyl alkohol	-	Biomedikální
35	Polyacrylnitril / TiO ₂	-	Fotovoltaické vodivé polymery

Výzkum z roku 2003 uvádí, že celkem bylo úspěšně elektrospinnováno více, než 50 druhů polymerů. Vzhledem k aktuální atraktivnosti této technologie a rozšiřování electro melt drawingu (výroba dlouhých samostatných vláken z taveniny), bude pravděpodobně počet úspěšně zpracovaných materiálů vyšší. Popis některých aplikací je uveden níže.

5.1 Tkáňové inženýrství

Tkáňové inženýrství je vědní obor, ve kterém se lze setkat s návrhem biologických náhrad, výrobou léčebných prostředků, nebo zlepšováním funkcí tkání. S tkáňovým inženýrství je úzce spjaté pole výzkumu biomateriálů, kdy vyrobené struktury mají například funkci matric pro růst buněk [25, 26, 27].

V porovnání s jinými technologiemi umožňujícími tvorbu nano struktur (například fázová separace), se elektrospinning jeví, jako jednodušší a levnější způsob [7].

5.2 Výztuhy pro tkáňové inženýrství

V případě přípravy živých tkání jsou základním pilířem biologicky rozložitelné výztuhy, které dočasně slouží jako matrice a šablony pro nasazení a růst buněk. Průměry elektrospinnovaných vláken napodobují přirozené prostředí tkáně, z tohoto důvodu byl zaznamenán prudký nárůst využití elektrospinnovaných matic pro výztuhy tkání. Většinou jsou využívány přírodní polymery a to z důvodu jejich biokompatibility [7, 28, 29, 30].

5.3 Obvazy pro hojení ran

Ideální obvazy pro hojení ran by měly mít tyto vlastnosti:

- zastavení krvácení,
- účinná bakteriální bariéra,
- absorpce přebytečných tekutin z rány,
- odpovídající rychlost přenosu vodních par,
- odpovídající schopnost výměny plynů,
- schopnost přizpůsobit se okrajům rány,
- přilnavost,
- bezbolestnost pro pacienta,
- snadné odjímání z rány,
- nízká cena. [31]

Není snadným úkolem splnit výše uvedené parametry. Vlastnosti některých nanovláken, vyrobených pomocí elektrospinningu, odpovídají požadavkům a je možné dosáhnout kompatibility s lidskými buňkami. Přes značné úsilí je výzkum těchto aplikací stále v počátcích [7].

5.4 Podávání léků

Základem pro podávání léčivých přípravků je možnost definování množství terapeutických činidel v čase. V celé řadě výzkumů se podařilo zapouzdřit léčivý přípravek do kapsle vyrobené z nanovláken mícháním léčivých přípravků do polymerního roztoku.

Další přístup pro výrobu léčivých přípravků je využití koaxiálního elektrospinningu (do jedné vytlačovací hlavy se souběžně vtlačuje více roztoků), tímto způsobem je možné zapouzdřit více léků najednou. [5, 7, 32]

5.5 Filtrace

Široce rozšířenou aplikací polymerních nanovláken je oblast vzduchové filtrace. Strukturální elementy filtru musí odpovídat velikosti zachytávaných částic, z tohoto důvodu je možné využít výhod, které nabízejí modifikace spinnovaných vláken. Díky velice malým průměrům vláken je možné vyrobit membrány, které jsou schopny zachytit částice o velikosti v řádech sub mikronů. Obecně lze konstatovat, že efektivita membrány vyrobené z nanovláken roste se snižujícím se průměrem vláken. [33, 34]

Speciální filtry, které jsou nabitě elektrickým nábojem, využívají principu elektrostatické energie pro zachytávání miniaturních částic ze vzduchu, při minimální odporu proudění. V případě takto aplikovaných membrán je možné zachytávat až 100% částic o velikosti mez 1 – 5 μm , za minimálního odporu proudění vzduchu. [35, 36]

5.6 Biosensory

Unikátní vlastností nanovláken je velký poměr plochy k jejich objemu, což umožňuje zachycení většího množství látek ve filtru. Biosensory se nejčastěji používají v těchto oborech:

- životní prostředí,
- potravinářství,
- zdravotnické potřeby.

Nejčastěji se biosensory skládají z bio-aktivní membrány a převodníku. V případě této aplikace je možné se setkat s celou řadou parametrů, které mají vliv na výkon sensoru, jako jsou například:

- citlivost,
- účel použití,
- doba odezvy,
- stáří sensoru.

Všechny z výše uvedených parametrů úzce souvisí právě s použitou biofunkční membránou. Hlavním parametrem je citlivost sensoru, důvodem je požadavek okamžitého zjištění přítomnosti plynu a biologických látek už při malých koncentracích. Se zmenšováním rozměrů vláken roste možnost zmenšování celých zařízení, bez vlivu na přesnost měření.

Dalšími, méně rozšířenými aplikacemi v odvětví sensorů jsou elektrochemické a optické sensory. [5,7, 37, 38]

5.7 Ochranné oděvy

Pro úplnost jsou níže uvedeny požadavky na ochranné oděvy a hlavní vlastnosti membrán vyrobených metodou elektrospinningu.

Ideální ochranný oděv by měl mít následující vlastnosti:

- nízká hmotnost,
- propustnost vzduchu a vodních par,
- nerozpustnost v co nejširší škále rozpouštědel,
- dobrou odolnost vůči toxickým chemickým látkám.

Vlastnosti membrán ze spinnovaných vláken:

- nízká hmotnost,
- velká plocha povrchu,
- vysoká poróznost (vzdušný),
- skvělé filtrační vlastnosti,
- odolnost vůči průniku škodlivých chemických činidel (ve formě aerosolů).

Dle výše uvedených parametrů se oděvy zhotovené z nanovláken jeví jako ideální kandidát pro takovéto aplikace. [39, 40]

5.8 Generování energie

V oblasti elektrické energie mají vodivé membrány z polymerních materiálů vysoký potenciál v celé řadě aplikací, mezi které patří:

- elektrostatická dissipace,
- ochrana proti korozi,
- stínění proti elektromagnetickému rušení,
- fotovoltaické zařízení,
- sensory,
- aktuátory,
- porózní elektrody.

Vzhledem k tomu, že množství elektrochemických reakcí je přímo úměrné ploše elektrody, je zde velký potenciál využití. Aktuálně je velmi atraktivní využití porózních elektrod ve vysoce výkonných bateriích. [7]

5.9 Kosmetika

Elektrospinnované vlákna nacházejí využití taky v kosmetickém průmyslu. Mohou být využity jako pleťové masky s, nebo bez přídavku jiných aditivních látek. Velký poměr plochy k objemu vláken zajišťuje širokou oblast využití, pro vysokou rychlost přenosu aditivních látek do kůže pacienta. Další výhodou je bezbolestná aplikace pleťových masek a jejich bezbolestné sundávání. [5, 34, 44]

5.10 Ostatní aplikace a budoucí perspektiva

Mezi další rozšířené aplikace elektrospinnovaných vláken se řadí imobilizace enzymů a affinitivní membrány.

Pro získání nových možností využití existuje spousta možností speciálních modifikací této technologie, mezi které se řadí:

- koaxiální elektrospinning,
- míchání roztoků a několikanásobný elektrospinning,
- s asistencí stlačeného vzduchu.

V případě koaxiálního elektrospinningu jsou do jedné vytlačovací hlavy dopravovány dva roztoky, z nichž jeden tvoří jádro a druhý obálku. Tato modifikace je nejrozšířeněji aplikovatelná pro podávání léků. Jádro vlákna je funkční složka a vnější obálka má funkci blokátoru, pro pozvolné uvolňování funkčních látek. Elektrospinningem s asistencí stlačeného vzduchu je možné zpracovávat materiály s vysokou molekulární hmotností, které by za běžných podmínek byly obtížně zpracovatelné, nebo by zpracovatelnost nebyla možná. [5,7]

6 KONSTRUKCE STROJŮ A ZAŘÍZENÍ

V této kapitole budou krátce shrnuty obecné zásady pro konstrukci strojů a zařízení. Následně budou porovnány požadavky pro tuto specifickou aplikaci, proti obecným zásadám.

6.1 Obecné zásady:

- a) Pevnost a tuhost
- b) Přesnost
- c) Dlouhá životnost
- d) Bezpečnost

a) Pevnost a tuhost

Pro dosažení dostatečných pevností a tuhostí je nutné při návrhu součástí uvažovat i o značném přetížení, ke kterému může dojít. Toto pravděpodobné přetížení nesmí poškodit zařízení, případně je třeba volit konstrukční řešení tak, aby došlo v první řadě k poškození levné, dostupné a snadno vyměnitelné součásti.

Tuhost u obráběcích, nebo i laboratorních zařízení je důležitá z hlediska tlumení vibrací. Je proto výhodné aplikovat například litinové stoly o velkých hmotnostech. Dalším aspektem ovlivňujícím tlumení vibrací je způsob kotvení do podlahy a materiál, či skladba podlahy samotné. V případě velmi citlivých, například měřících zařízení je kotvení do podlahy naopak nevhodné. Důvodem je přenos vibrací z konstrukce budovy do citlivých mechanismů.

b) Přesnost

K dosažení velkých přesností jednotlivých komponent je možné dosáhnout s využitím obrábění na CNC strojích. Z hlediska finančních nákladů a časového horizontu zhotovení zařízení je často nezbytná redukce obráběných komponent na minimum.

Pro zajištění přímočarého pohybu se běžně používá šroub s maticí, kdy se buď otáčí šroub a matice má zabráněno v pootočení, nebo naopak. Nejlevnějším a nejdostupnějším představitelem pohybových šroubů jsou trapézové šrouby. Za účelem redukce vůlí, které jsou vždy v tomto mechanismu přítomny, je možné aplikovat přesnější, broušené kuličkové

šrouby. Levnou střední cestu mezi těmito možnostmi tvoří kombinace trapézového šroubu s tažnou pružinou, která vymezuje vůli v závitech.

Mezi cenově výhodné varianty přímočarých pohybů se řadí ozubený řemen. Hlavní výhodou, kromě relativně vysoké přesnosti je malá hmotnost tohoto pohonu. Nevýhodou oproti šroubovým mechanismům je vliv síly v ozubeném řemenu na velikost krouticího momentu a s tím spojené vyšší nároky na výkon elektromotoru. Další varianty jsou například: ozubený hřeben/ozubené kolo, řetěz/ozubené kolo, nebo využití elektromagnetických sil.

Přímočarost pohybů os je nezbytné náležitě vymezit a definovat. Klasickým příkladem metod vedení je takzvané rybinové vedení, kdy dochází k pohybu mezi přesně obrobenými plochami (vůle je vymezena speciálními klíny). Aktuálně se s výhodou využívají nakupované lineární vedení a k nim patřící speciální vozíky. Vzájemný pohyb mezi vozíkem a vedením přenáší soustava kuliček, válečků, nebo dochází ke tření mezi plochami.

c) Dlouhá životnost

Během životnosti každého zařízení dochází k opotřebení. Velikost opotřebení je možné redukovat právě volbou funkčních prvků (vedení, šrouby, atd..). Životnost zařízení zásadně ovlivňuje úroveň údržby, proto pro zamezení chyb vyvolaných lidským faktorem je ideální redukovat požadavky na údržbu na minimum.

d) Bezpečnost

Bezpečnostní systém by měl zajistit maximální ochranu obsluhy stroje i nástrojů. Mezi základní představitele bezpečnostních prvků se řadí čidla uzavření krytu stroje (bezpečnost obsluhy). Z hlediska bezpečnosti proti kolizím je vhodné použít snímače koncových poloh. V případě návrhu zařízení, které smí využívat i neškolený uživatel, je často bezpečnostní systém tak komplikovaný, že jeho nároky přesahují požadavky na samotnou funkci. [56]

6.2 Předpoklad pro návrh zařízení pro elektrospinning

Požadované vlastnosti vyrobených nanovláken se odvíjí od celé řady parametrů uvedených v kapitole číslo 2. Výhodou pro konstrukční řešení v tomto případě jsou relativně nízké nároky na přesnost pohybu jednotlivých os. Mezi další ze zásadních výhod se řadí takřka nulové namáhání během pracovního cyklu. Výsledná zátěž jednotlivých komponent se tedy odvíjí pouze od překonání vlastních třecích sil. Jednotlivé prvky celého konstrukčního řešení navrhovaného zařízení jsou popsány v praktické části této diplomové práce.

7 SHRUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI A CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI

V teoretické části této diplomové práce byly nastíněny základní principy, parametry ovlivňující výslednou morfologii vláken a jejich následná aplikace v praxi.

Elektrospinning je univerzální, cenově výhodná a jednoduchá technologie pro výrobu velmi tenkých vláken ve formě netkaných textilií, nebo částečně axiálně zarovnaných. Hlavními parametry, které činí tímto způsobem vyrobená vlákna unikátní, jsou:

- vysoký poměr plochy k objemu,
- poróznost struktury,
- možnost modifikace poróznosti a průměrů vláken.

Mezi parametry zásadně ovlivňující proces zpracování během této technologie se řadí:

- parametry roztoku (viskozita, molekulární hmotnost, koncentrace),
- procesní parametry (aplikované napětí, vzdálenost mezi kapilárou a kolektorem, vodivost),
- vlivy prostředí (teplota, vlhkost).

Všechny z výše uvedených parametrů jsou vzájemně provázány a jejich modifikací je možné měnit morfologii vláken.

Nanovlákna vyrobené metodou elektrospinningu mají široký rozsah využití, který se s dalšími výzkumy rozrůstá. Navzdory značnému množství výhod takto zhotovených vláken a velkému úspěchu na poli této technologie v posledních dekádách se zde vyskytují značné omezení, například malé rozměry pórů a s tím spojená nedostatečná infiltrace živých buněk do zhotovených struktur. Je snaha o odstranění veškerých omezení a to modifikací technologických postupů a roztoků. [7]

Cílem praktické části je návrh a výroba vlastního zařízení, na základě studie uvedené v teoretické části. Navržené zařízení by mělo umožňovat maximální počet stupňů volnosti pro technologii elektrospinningu a jejich řízenou modifikaci.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

8 VSTUPNÍ PARAMETRY

Na základě požadavků na zařízení a průzkumu trhu je třeba učinit rozhodnutí, zda je možné zařízení zakoupit, nebo je třeba přistoupit k vlastnímu návrhu konstrukčního řešení.

8.1 Požadavky na zařízení

Dle studie, popsané v teoretické části této diplomové práce, jsou požadavky pro zařízení určeného k výrobě nanovláken technologií elektrospinningu následující:

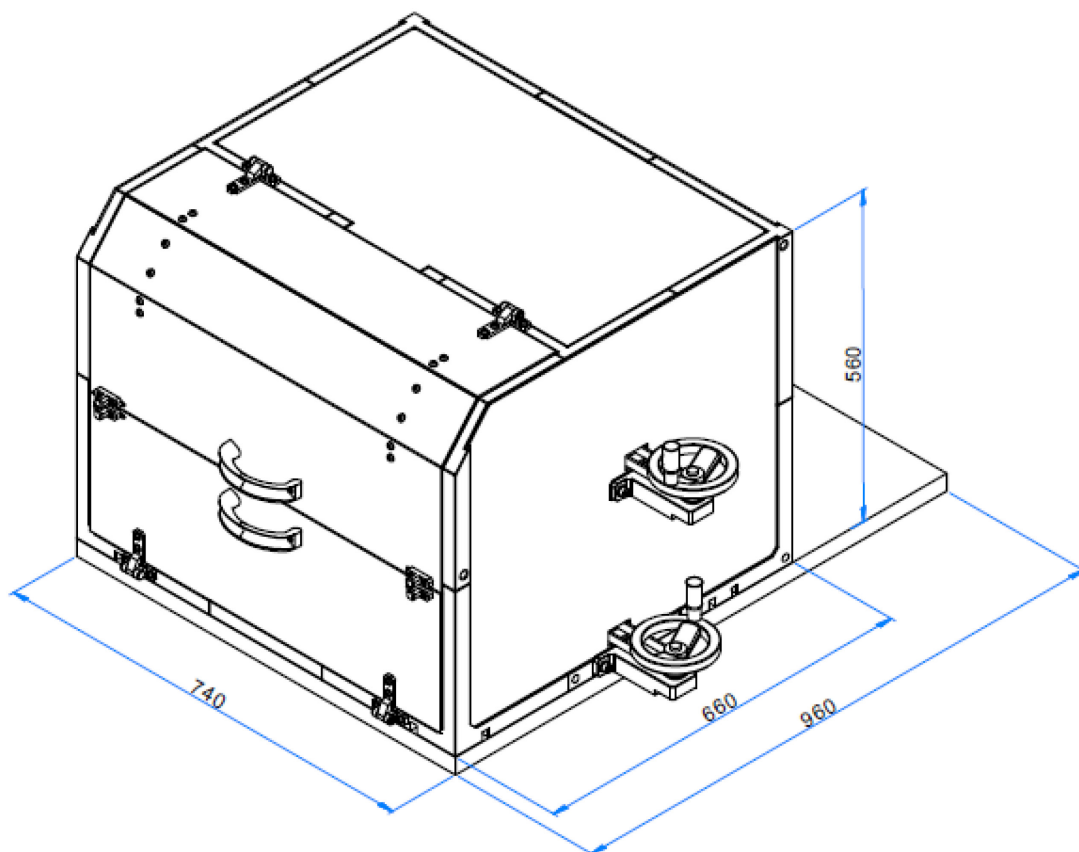
- počítačově řízené vodorovné osy (X a Y),
- manuálně ovládaná svislá osa s kladnou elektrodou a vytlačovací hlavou (Z1),
- manuálně ovládaná svislá osa se zápornou elektrodou a kolektorem (Z2),
- elektronicky řízená rychlost průtoku vytlačovaného roztoku,
- možnosti vytlačování dvou různých roztoků při jednom pracovním cyklu,
- využití různých typů vytlačovacích hlav,
- využití různých typů kolektorů,
- tvorba osově zarovnaných nanovláken,
- možnost asistence stlačeného vzduchu při vytlačování,
- regulace průtoku přivedeného vzduchu,
- vlastní regulace teploty přivedeného vzduchu,
- oddělení pracovního prostředí od okolí,
- regulace vlhkosti vzduchu v pracovním prostředí,
- osvětlení pracovního prostředí,
- odsávání vzduchu z pracovního prostředí,
- minimální množství součástek vyrobených z vodivých materiálů,
- veškerá elektronika umístěna v co největší vzdálenosti od vytlačovací hlavy (s přivedeným elektrickým potenciálem).

8.2 Průzkum trhu

Na základě průzkumu celosvětového trhu bylo zjištěno, že je k dispozici řada různých zařízení s funkcemi pouze částečně odpovídajícími požadavkům pro zde navrhované zařízení. Pro splnění všech výše požadovaných parametrů, bylo přistoupeno k návrhu originálního zařízení. Mimo to se dále vychází z předpokladu, že výroba navrhovaného stroje bude levnější v porovnání s komerčně dostupnými zařízeními, které ne zcela splňují uvedené požadavky.

9 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Tato kapitola popisuje vlastní návrh speciálního zařízení na základě požadavků uvedených v podkapitole 8.1. Podrobný popis jednotlivých konstrukčních prvků tvořících funkční celek je uveden v samostatných podkapitolách. Na obrázku číslo 19 je 3D pohled na kompletní sestavu stroje s jejími hlavními rozměry. Celé zařízení je upevněno k základně z nevodivého materiálu (polymer, nebo dřevo). Spodní základová deska v zadní části značně přesahuje půdorys zařízení, tento prostor je určen pro rozvodnou skříň a další elektroniku. Celková hmotnost zařízení se bude lišit dle použitých materiálů jednotlivých komponent a procesních parametrů nastavení 3D tisku.



Obrázek 19 Sestava navrhovaného zařízení s hlavními rozměry.

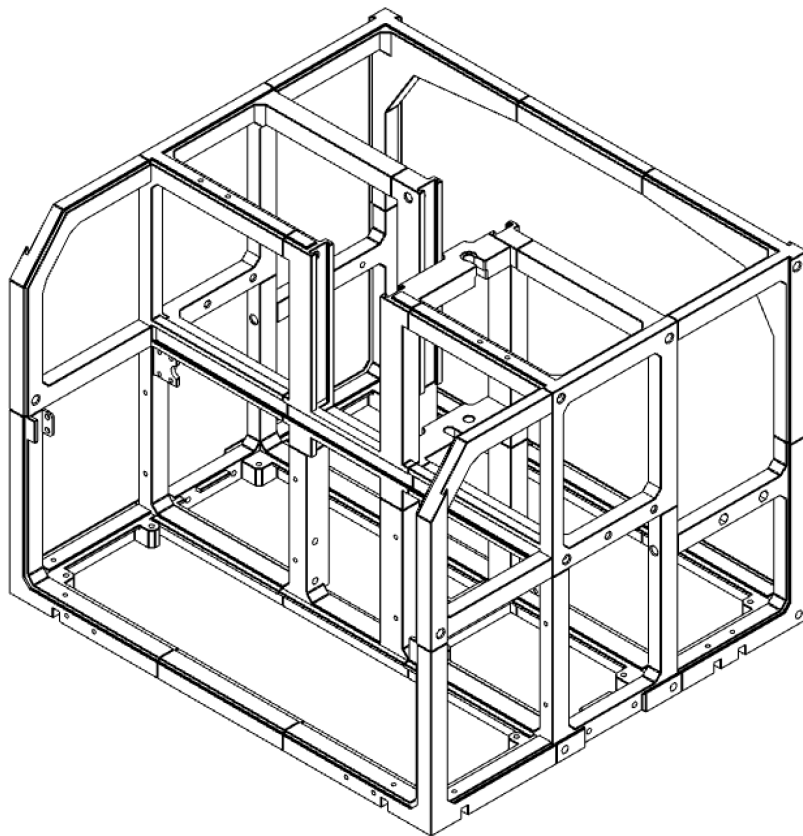
9.1 Rámová konstrukce

Jednou ze zásadních podmínek pro konstrukci tohoto zařízení je minimalizace využití vodivých materiálů. Proto je rámová konstrukce a většina komponent navržena pro výrobu pomocí 3D tisku z polymerních materiálů. Pro výrobu rámové konstrukce byla zvolena 3D tiskárna Ultimaker S5. Z rozměrů tiskového prostoru vychází mezní rozměry pro tištěné

dílce a to: 330/240/300 mm (délka/šířka/výška). Tato tiskárna byla zvolena z důvodu její dostupnosti na Ústavu fyziky a materiálového inženýrství, FT, UTB ve Zlíně. Zvolená 3D tiskárna funguje na principu FDM, tedy vytlačování roztaveného polymerního materiálu z tiskové trysky.

Na obrázku číslo 20 je 3D pohled na kompletní rámovou konstrukci zařízení. Celková hmotnost všech částí rámu se bude pohybovat okolo 18 kg (tato hmotnost se může lišit dle nastavených parametrů tisku, síla stěn, procento výplně). Jednotlivé části rámu jsou tvarově uzpůsobeny a plní mimo jiné následující funkce jako:

- nosná konstrukce,
- tvarové uložení lineárních vedení,
- tvarové upevnění prvků krytování,
- pouzdra pro uložení kluzných ložisek.



Obrázek 20 Trojrozměrný pohled na kompletní rámovou konstrukci.

Všechny díly jsou navrženy s ohledem na minimalizaci geometrie, která není podepřena proti tiskové podložce. Jinými slovy je dbán důraz na co nejnižší počet technologických podpěr, které se musí odstraňovat. Přes veškerou optimalizační snahu a pro komplikovanost

tvaru většiny prvků bude stejně před montáží nutno výtisky upravit (zbavit nezbytných podpěr a obrobit některé funkční plochy).

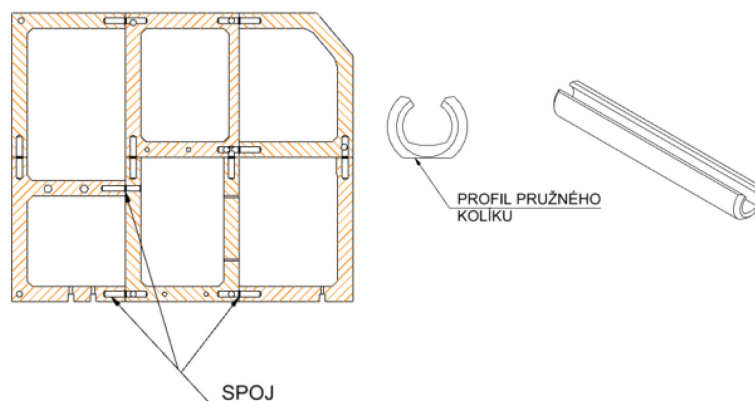
Vzhledem k tomu, že celkové rozměry rámu přesahují mezní rozměry dostupné tiskárny, je nutné rám rozdělit na menší prvky. Tímto dochází ke vzniku problému v podobě nezbytnosti návržení vhodného systému spojů.

System spojování rámové konstrukce musí odpovídat těmto předpokladům:

- je tvarově jednoduchý,
- bez použití vodivých materiálů (kovové šrouby, atd.),
- dočasně rozebíratelný (pro montáž a odzkoušení funkčnosti),
- nesmí příliš zasahovat mimo geometrii rámu.

Dle výše uvedených podmínek byl navržen spoj pomocí pružných kolíků. Na obrázku číslo 21 je zobrazen řez navrženým rámem a profil navrženého pružného kolíku. Tvar pružného kolíku je uzpůsoben pro výrobu pomocí 3D tisku.

Při výrobě dílců pomocí 3D tisku metodou FDM dochází k anizotropii mechanických vlastností vytištěných součástí. Obecně platí, že nejslabším prvkem při namáhání je soudržnost jednotlivých vrstev. Proto u namáhaných součástí je třeba brát ohled na orientaci součásti vůči tiskové desce. Navržená orientace při tisku (šipka s popisem směřujícím na profil pružného kolíku = základní deska tiskárny) odpovídá nejlepším mechanickým vlastnostem pro tento průřez. Navíc, takto situovaný díl má minimální nároky na odstraňování technologických podpěr.

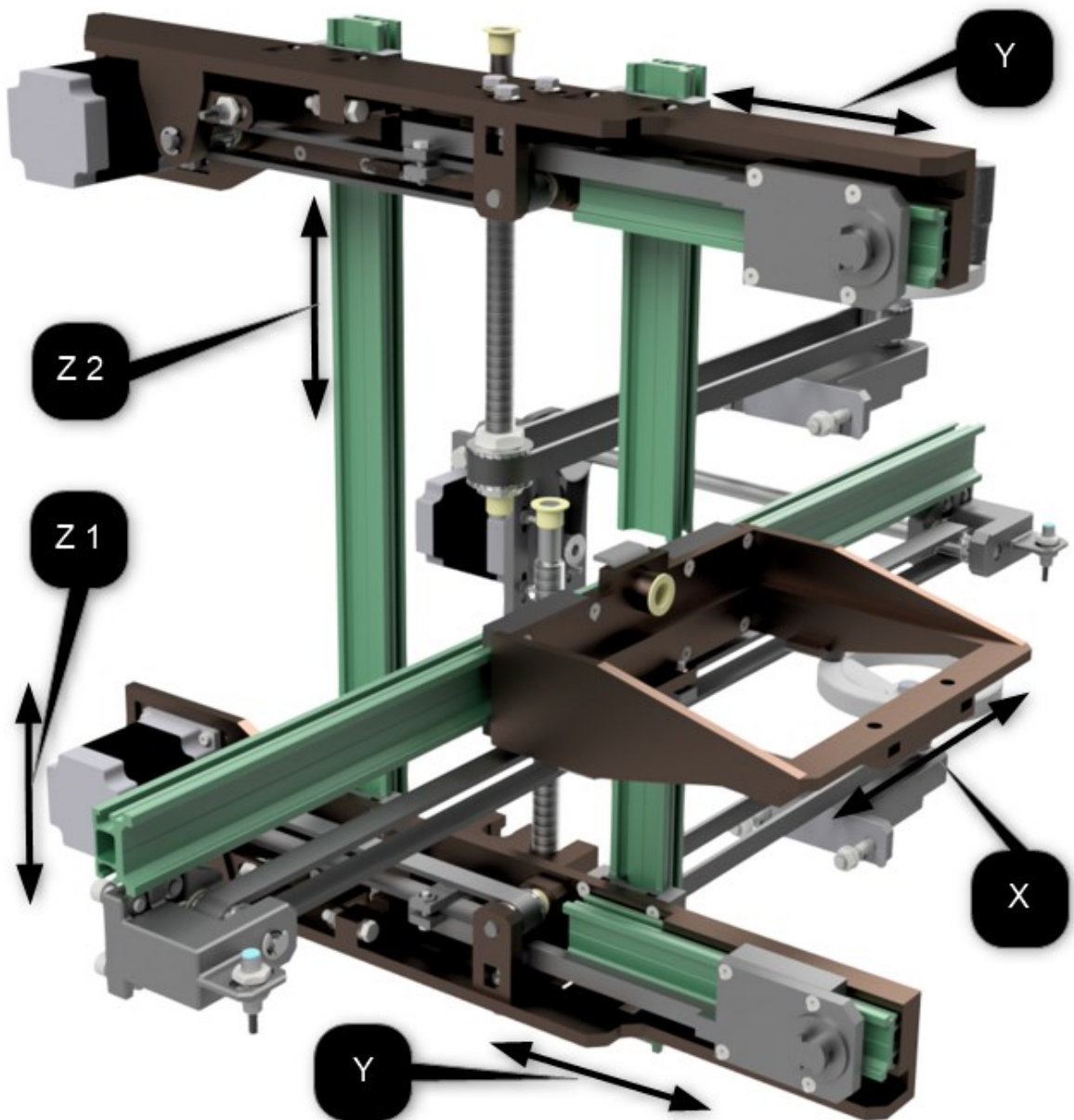


Obrázek 21 Řez rámovou konstrukcí a profil pružného spojovacího kolíku.

Funkčnost tohoto spoje byla před roznesením do celé geometrie rámu odzkoušena na modelovém vzorku.

9.2 Pracovní osy

Pracovní osy navrženého zařízení a směr jejich pohybu je zobrazen a popsán na obrázku číslo 22.



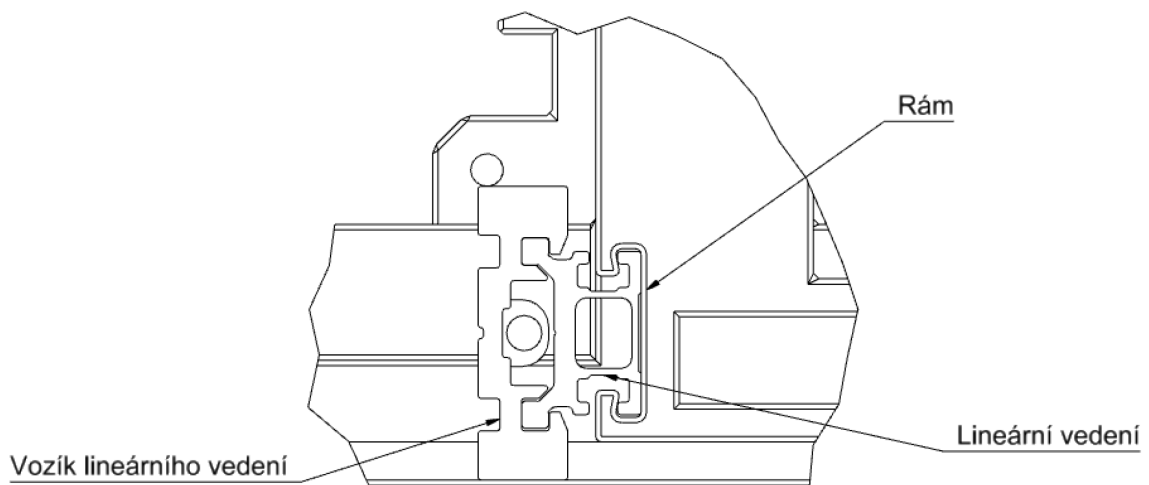
Obrázek 22 Pracovní osy navrhovaného zařízení.

Vodorovné osy X a Y jsou softwarově ovládané a poháněny pomocí krokových motorů. Osa X slouží k upnutí rotačního kolektoru nebo desky a jejich řízenému pohybu. Osa Y se dělí na spodní a horní rameno, obě ramena jsou softwarově synchronizována a proto jsou označovány jako jedna osa. Manuálně ovládaná osa Z1 pohybuje se spodní částí osy Y.

Druhá manuálně ovládaná osa Z2 pohybuje horní částí osy Y, tímto je možné měnit vzdálenost mezi vytlačovací hlavou a primárním nebo sekundárním kolektorem. Všechny osy, které jsou řízené počítačem, jsou vybaveny indukčním spínačem koncové polohy, který plní funkci automatického nulování výchozí polohy po spuštění stroje.

Podmínkou návrhu celého zařízení je dodržení co největší vzdálenosti mezi kladnou elektrodou (vytlačovací hlavou) a veškerými uzemněnými vodiči (elektronikou). Tomuto odpovídá poměrně komplikované konstrukční řešení pracovních os.

S výhodnou možností variability geometrie vytištěných dílců bylo navrženo tvarové upnutí profilu lineárních vedení, viz obrázek číslo 23. Rozměr drážek v rámu je proti rozměru lineárního vedení zvětšen o malou vůli. Smrštěním vytištěného dílu oproti modelu dojde k uložení s přesahem, proto bude vedení do drážky ručně vlisováno, v případě výskytu nepřístupných vůlí může být poloha vedení zajištěna lepeným spojem. Změna rozměrů drážek byla pro zajištění požadovaných rozměrů předem odzkoušena na vytištěném vzorku.



Obrázek 23 Uložení lineárních vedení do rámu stroje.

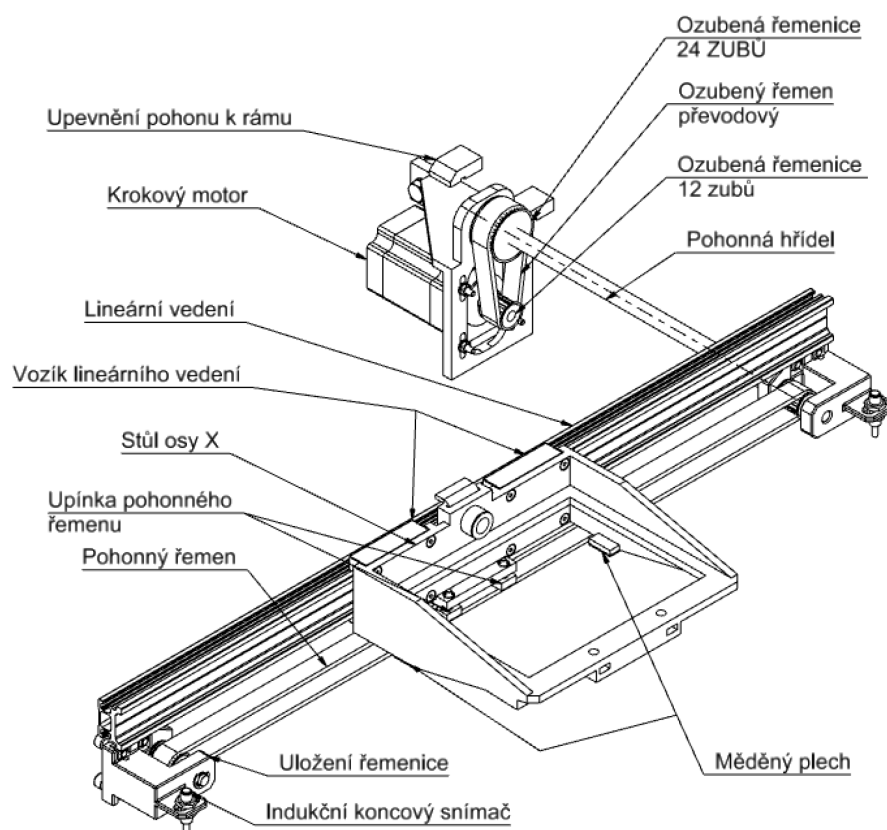
Jedním z mála výrobců celoplastových, kluzných lineárních vedení je společnost Igus. Zvolený systém s názvem DryLin W, se skládá z:

- Kolejnice DryLin W (plněná sklolaminátem), označení: WSPG_063001.
- Montovaný vozík (celoplastový), označení: WWP_06_30_06.

9.2.1 Počítačem řízená osa X

Krokový motor typu 57HS22 od společnosti Leadshine, který je blíže popsán v kapitole řízení a pohony, pohání ozubenou řemenici typu 5M 15 o středním průměru 19,1 mm. Dále

je krouticí moment přenášen přes ozubený řemen na řemenici o středním průměru 38,2 mm, dochází tedy k převodu do pomala 1:2. Krokový motor i kluzné ložisko pohonné hřídele jsou upevněny k rámu pomocí speciálního držáku. Tento držák umožňuje napínání řemenu, posunutím elektromotoru. Pohonná hřídel otáčí řemenicí o středním průměru 19,1 mm. Pohonný řemen přenáší přímočarý pohyb do stolu osy X. Napínání řemenu pomocí drážek by v tomto případě bylo velmi komplikované, z tohoto důvodu je použita řemenice dělená a k jejímu napnutí je určen jeden pár upínek. Řemenice u pohonného řemene jsou uloženy do jejich upínek přes kluzná ložiska od společnosti Igus řady Iglidur J260. Upínky řemenic jsou k rámu upevněny pomocí šroubových spojů. Poloha čepů pro uložení řemenic je zajištěna pojistnými kroužky. Vzhledem k malým hodnotám přenášených krouticích momentů slouží k přenosu krouticího momentu mezi hřídelí a řemenicí dva stavěcí šrouby pro každou řemenici. V řemenici jsou pro tento účel vyrobeny průchozí otvory se závity o velikosti M3.



Obrázek 24 Popis osy X.

Pro nulování souřadnicového systému slouží indukční koncový spínač (na obrázku číslo 24 jsou zobrazeny dva spínače, pravděpodobně bude použit pouze jeden z nich a to ten, který bude při montáži kabeláže dostupnější, přičemž musí být dodržena podmínka dostatečné vzdálenosti kabelů od kladné elektrody. Na spodní straně stolu osy X jsou situovány

ve dvou bodech měděné plechy, které slouží jako protikus k indukčnímu snímači. Tyto plechy jsou přilepeny pomocí oboustranné lepicí fólie, kterou vyrábí společnost 3M.

Výpočet pohonu osy X

Krouticí moment krokového elektromotoru 22HS57 ... $Mk_1 = 2,2 \text{ Nm}$

Střední průměr řemenice na elektromotoru ... $dp_1 = 19,1 \text{ mm} = 0,0191 \text{ m}$

Střední průměr řemenice na pohonné hřídeli ... $dp_2 = 19,1 \text{ mm} = 0,0382 \text{ m}$

Střední průměr řemenice na pohonném řemenu ... $dp_3 = 19,1 \text{ mm} = 0,0191 \text{ m}$

Celková dráha osy X ... $L_c = 480 \text{ mm}$

Předpokládaná maximální rychlost osy X $v_{\max} = 60 \text{ mm/s}$

Mk_1 ... Krouticí moment na motoru [Nm]

$$Mk_1 = F_1 \cdot d_{p1}$$

$$F_1 = \frac{Mk_1}{d_{p1}}$$

$$F_1 = \frac{2,2}{0,0191} = 115,2 \text{ N}$$

Mk_2 ... Krouticí moment na pohonné hřídeli [Nm]

$$Mk_2 = F_1 \cdot d_{p2}$$

$$Mk_2 = 115,2 \cdot 0,0382 = 4,4 \text{ Nm}$$

F_x ... Výsledná síla pohonu osy X [N]

$$F_x = \frac{Mk_2}{d_{p3}}$$

$$F_x = \frac{4,4}{0,0191} = 230,4 \text{ N}$$

n_c ... Počet otáček pro ujetí celé dráhy osy X [-]

O_{p3} ... Obvod středního průměru ozubeného kola [mm]

$$n_c = \frac{L_c}{O_{p3}}$$

$$n_c = \frac{480}{\pi \cdot 19,1} = 8$$

n_v ...počet otáček za sekundu při maximální rychlosti [1/s]

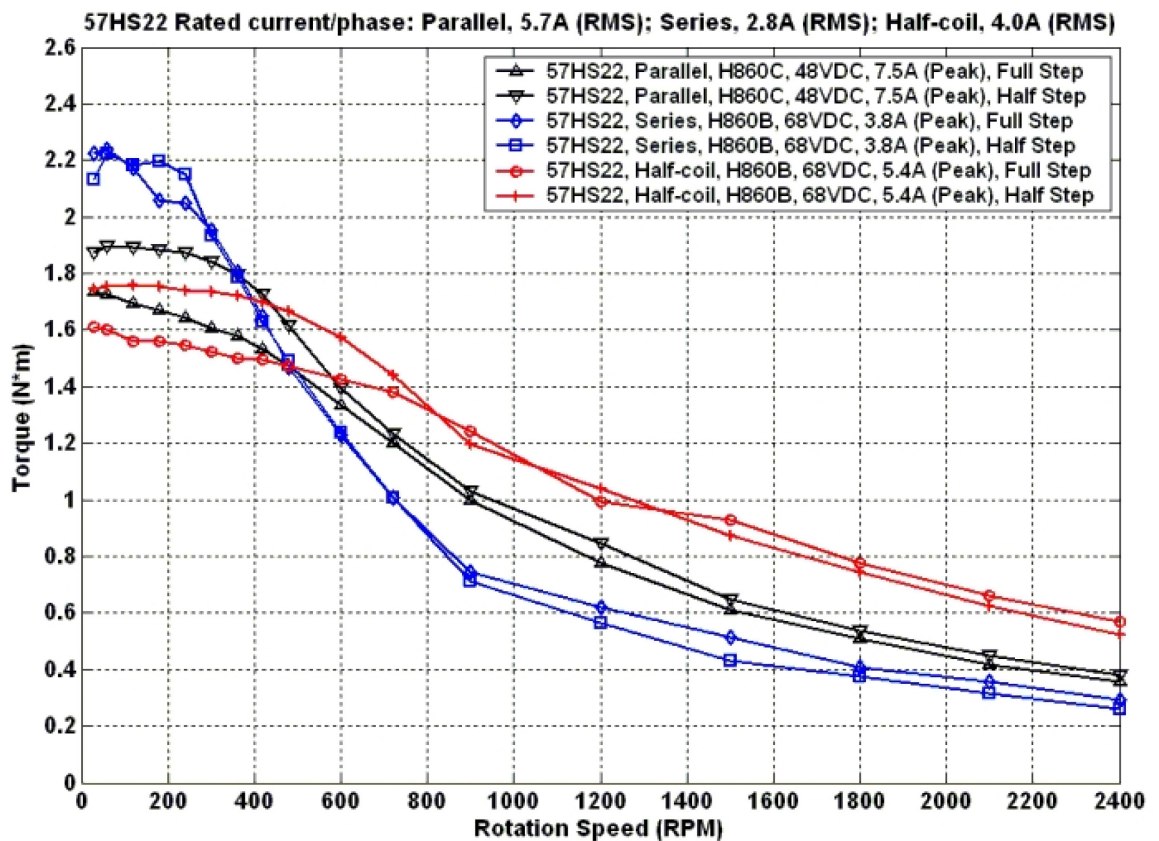
$$n_v = \frac{v_{max}}{O_{p3}}$$

$$n_v = \frac{60}{\pi \cdot 19,1} = 1 \frac{ot}{s}$$

n_m ...maximální počet otáček na elektromotoru [1/s]

$$n_m = \frac{d_{p2}}{d_{p1}} \cdot n_v$$

$$n_m = \frac{38,2}{19,1} \cdot 1 = 2 \frac{ot}{s} = 120 \frac{ot}{min}$$



Obrázek 25 Graf závislosti kroutičho momentu na počtu otáček za minutu motoru 57HS22. [54]

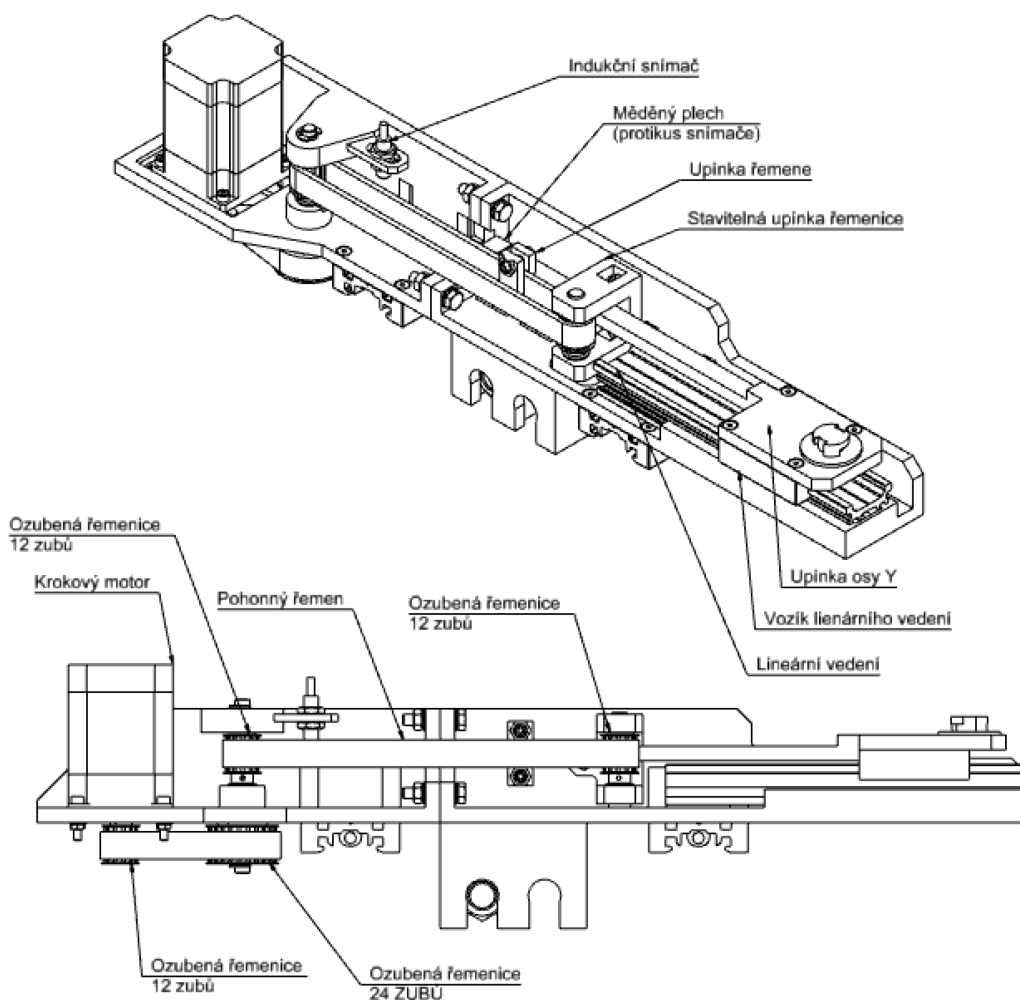
Pomocí převodového poměru řemenice na elektromotoru a na výstupní hřídeli bylo dosaženo dvojnásobné pohonné síly na ose X. Při počtu otáček elektromotoru 120 / min,

tedy maximální přípustné rychlosti, dochází k zanedbatelnému poklesu výstupního krouticího momentu (viz. obrázek číslo 25).

Z průběhu závislosti velikosti krouticího momentu na počtu otáček, lze pozorovat, že při příliš vysokém počtu otáček už není převod do pomala pro tento typ elektromotoru vhodný.

9.2.2 Počítačem řízená osa Y

Horní i spodní rameno osy Y jsou vzájemně zrcadlově symetrické, na obrázku číslo 26 je zobrazeno a popsáno horní rameno osy Y. Typ elektromotoru, řemenic i převodové poměry jsou s osou X identické. Proto se výše uvedený výpočet sil a otáček pro osu X vztahuje i na osu Y.



Obrázek 26 Popis osy Y.

Rameno, ve kterém jsou upnuty všechny prvky osy Y, se pohybuje vertikálně a je ovládáno osou Z1, nebo Z2. Posunutím krokového elektromotoru, je možné napínat převodový ozubený řemen. Pro napnutí pohonného řemenu je určena upínka řemenice, která je připevněna k ramenu přes soustavu třech šroubů. Drážky v ramenu umožňují napínání řemenice. Rameno osy Y se skládá ze dvou částí (přední a zadní), které jsou spojeny šrouby.

Lineární vedení je uloženo tvarově, stejně jako u rámové konstrukce. Na vozíku lineárního vedení je připevněna upínka osy Y, která je protažena směrem k zadní části této osy a vybavena upínkou k řemenu. Upínka osy Y má funkci držáku buď vytláčovací hlavy, nebo kolektoru. Navržený systém funguje na principu bajonetu, hlava, kterou je třeba upnout se na upínku nasune a jejím pootočením dojde k zajištění polohy. Způsob upínání je detailně popsán v kapitole s kolektory.

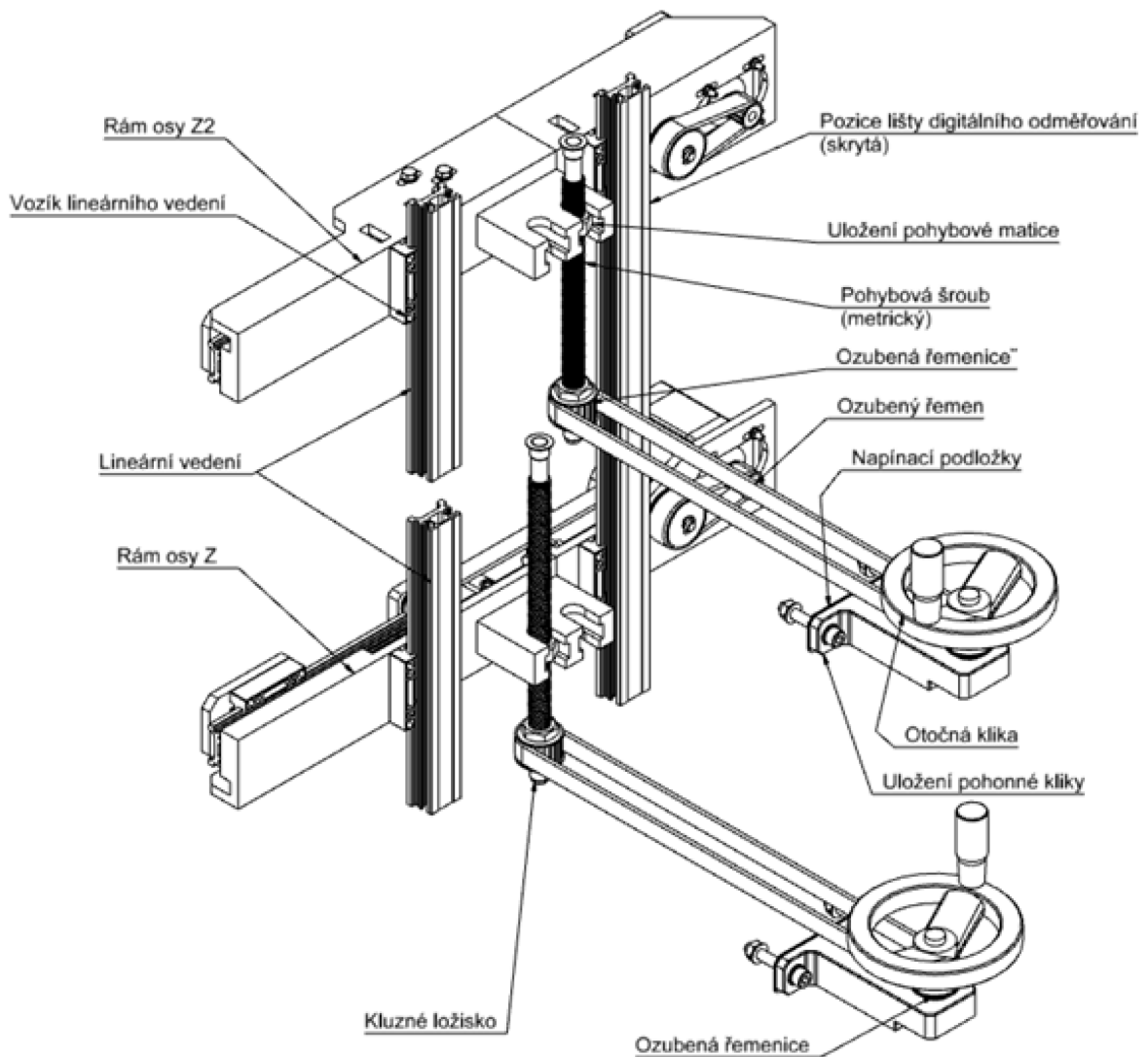
Kromě překonání vlastního tření je u spodní části osy Y třeba překonat velkou tuhost odstíněného přírodního kabelu, dle výše uvedeného výpočtu se síla působící na pohonný řemen rovná 230,4 N, tato síla by měla být dostatečná. Tento typ krokových motorů byly zvoleny především z ekonomických důvodů. Mezi jednu z hlavních nevýhod krokových motorů se řadí ztráta kroku při přetížení, proto musí pohony veškeré zatížení bezpečně zvládat.

Za účelem seřízení nulové pozice po zapnutí zařízení, je v zadní části ramene umístěn koncový spínač, se stavitelnou pozicí. Protikus koncového snímače (přilepený měděný plech) je umístěn na držáku pohonného řemene. Hlavním důvodem tohoto umístění snímačů domovské pozice je dodržení požadavku co nevyšší vzdálenosti elektroniky od elektrody.

9.2.3 Manuálně ovládané osy Z1, Z2

Obrázek číslo 27 zobrazuje trojrozměrný pohled na ručně ovládané osy Z1 a Z2. Toto konstrukční řešení umožňuje změnu vzdálenosti mezi vytláčovací hlavou (kladnou elektrodou) a kolektorem (zápornou elektrodou). Dále je možné nezávisle měnit vzdálenosti obou elektrod od rámu osy X.

Protože není třeba měnit vzdálenosti mezi elektrodami při pracovním cyklu, nejsou osy Z1, ani Z2 počítačem řízené. Za účelem usnadnění práce a redukce chyb způsobených lidským faktorem je ale možné otočné kliky nahradit krokovými, nebo servo motory. Geometrie všech vytláčovacích hlav a kolektorů by pak ale musela být zanesena do softwaru a to by zase komplikovalo možnosti inovace v tomto směru.



Obrázek 27 Manuálně ovládané osy Z.

Princip osy Z1 i osy Z2 je identický, jen jsou tyto osy situovány každá v jiné pozici. Krouticí moment je přenášen z otočné kliky na ozubenou řemenici přes těsné pero. Čep kliky s řemenicí je uložen do pouzdra přes dvě valivá ložiska, toto pouzdro je přišroubováno k rámové konstrukci mimo pracovní prostor, aby bylo možné pohybovat s osami bez nutnosti otevírání dvířek krytu.

Ozubený řemen přenáší sílu na řemenici, která je umístěna na pohybovém šroubu. Tato řemenice má stejný vnitřní závit, jako pohybový šroub. Aby nedocházelo k protáčení, je řemenice zakontrována nízkou maticí. Pohybová šroubovice je závitová tyč M16x2. Metrický závit byl zvolen pro jeho dostupnost i v celoplastovém provedení (trapézový šroub se nepovedlo zajistit). Dalším aspektem ovlivňujícím volbu tohoto závitu je jeho samosvornost, která omezuje samovolný pohyb vlivem vlastní tíhy (z důvodu uzavření pracovního prostoru

nebylo možné aplikovat brzdový systém na lineární vedení). Závit pohybového šroubu je pravotočivý, proto otáčením kliky ve směru hodinových ručiček se bude osa pohybovat směrem dolů, pootočením proti směru hodinových ručiček dojde k pohybu směrem na horu. Pohybová matice je s minimální vůlí uložena přímo v rámu osy Z. Rámy os Z1 a Z2 nesou kompletní mechanismus osy Y.

Pohybové šrouby jsou uloženy do rámové konstrukce přes kluzná ložiska s osazeními, které jsou vyrobeny z materiálu PTFE. Tento typ ložisek byl zvolen pro vhodné kluzné vlastnosti a dlouhou životnost. Před montáží bude nezbytné obrobít otvory pro ložiska výstružníkem, pro dodržení předepsaných tolerovaných rozměrů. Aby nebylo třeba vyrábět další odnímatelná pouzdra a bylo možné využít geometrie rámu je postup montáže pohybových šroubovic následující:

1. vložení spodního kluzného ložiska do pouzdra,
2. osazení pohybového šroubu řemenicí i pohybovou maticí,
3. nasazení pohybového šroubu do spodního kluzného ložiska,
4. nasazení horního kluzného ložiska (z horní strany).

Lineární vedení, které je stejného typu, jako u všech ostatních os je uloženo do rámu stroje. V přední části os Z je vedení rozděleno na dvě části (horní a spodní), důvodem je protínání vedení osy X. Pravděpodobnou nepřesnost vzdáleností mezi předním a zadním lineárním vedením je možné kompenzovat vůlí v upínacích šroubech (těch, které přitahují pohybové vozíky), nebo podložením šroubového spoje mezi polovinami rámu osy Z.



Obrázek 28 Digitální odměřovací systém s napájením pomocí baterií. [57]

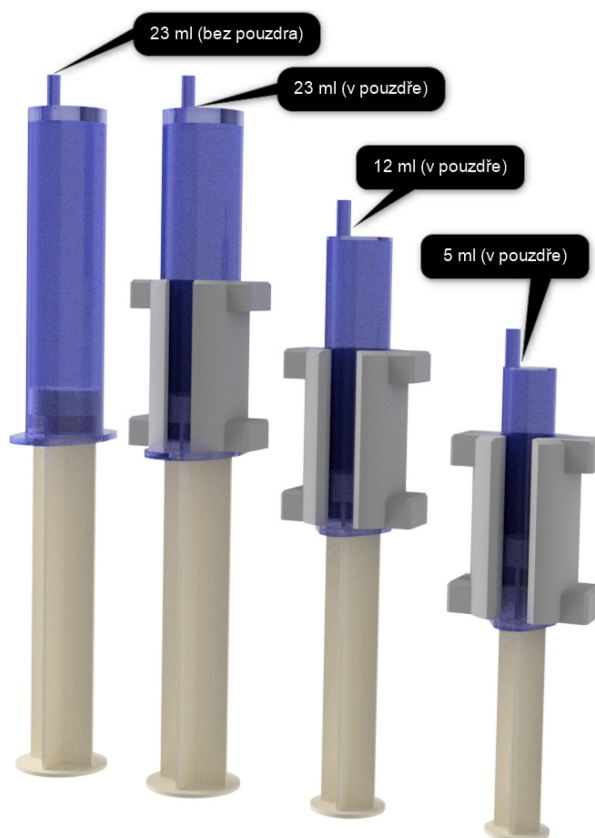
Řemenice u otočné kliky a na pohybovém šroubu mají stejný průměr, proto jedním pootočením kliky dojde k přímočarému posunu osy o vzdálenost 2 mm. Pootočení kliky o 20 stupňů tedy posune osu o cca 0,11 mm, což je pro toto zařízení dostatečné rozlišení spojené s relativně citlivou ruční stavitelností.

Jednou z možností odečítání vzdáleností pohybu os Z je použití takzvaného noniusu, který by byl připevněn na kliku. Dle poměru úhlu pootočení a stoupání závitu by se odečítala požadovaná hodnota. Pro nepřesnosti ve stoupání metrického závitu byl v tomto případě zvolen digitální odměřovací systém s rozlišením 0,01 mm (viz. obrázek číslo 28). Tento systém odměřování se dodává v délkách základní lišty 150, nebo 300 mm, které je možné libovolně zkrátit. K připevnění na rámovou konstrukci slouží upínací koncovky. Měřící vozík je připevněn na pohyblivou část osy. Tento odměřovací systém byl zvolen především pro jeho způsob napájení a to pomocí baterií, nejde tedy o uzemněnou elektroniku a je možné ho použít i v blízkosti kladné elektrody.

Protože odměřovací systém nedisponuje pamětí mezi opětovným zapnutím, bude třeba údaje vzdáleností mezi elektrodami buď poznamenávat, nebo kalibrovat. Pro usnadnění práce při nastavování vzdáleností různými typy vytlačovacích hlav a kolektorů, je vhodné využít přesné kalibry v délkách například: 100 mm, 200 mm, 300 mm. Tvar kalibrační měřky může být například přesně uříznutá tyč. Nejdříve se manuálně nastaví vzdálenosti mezi elektrodami dle kalibru, poté se digitální odměřování vynuluje a následně obsluha najede na požadovanou hodnotu.

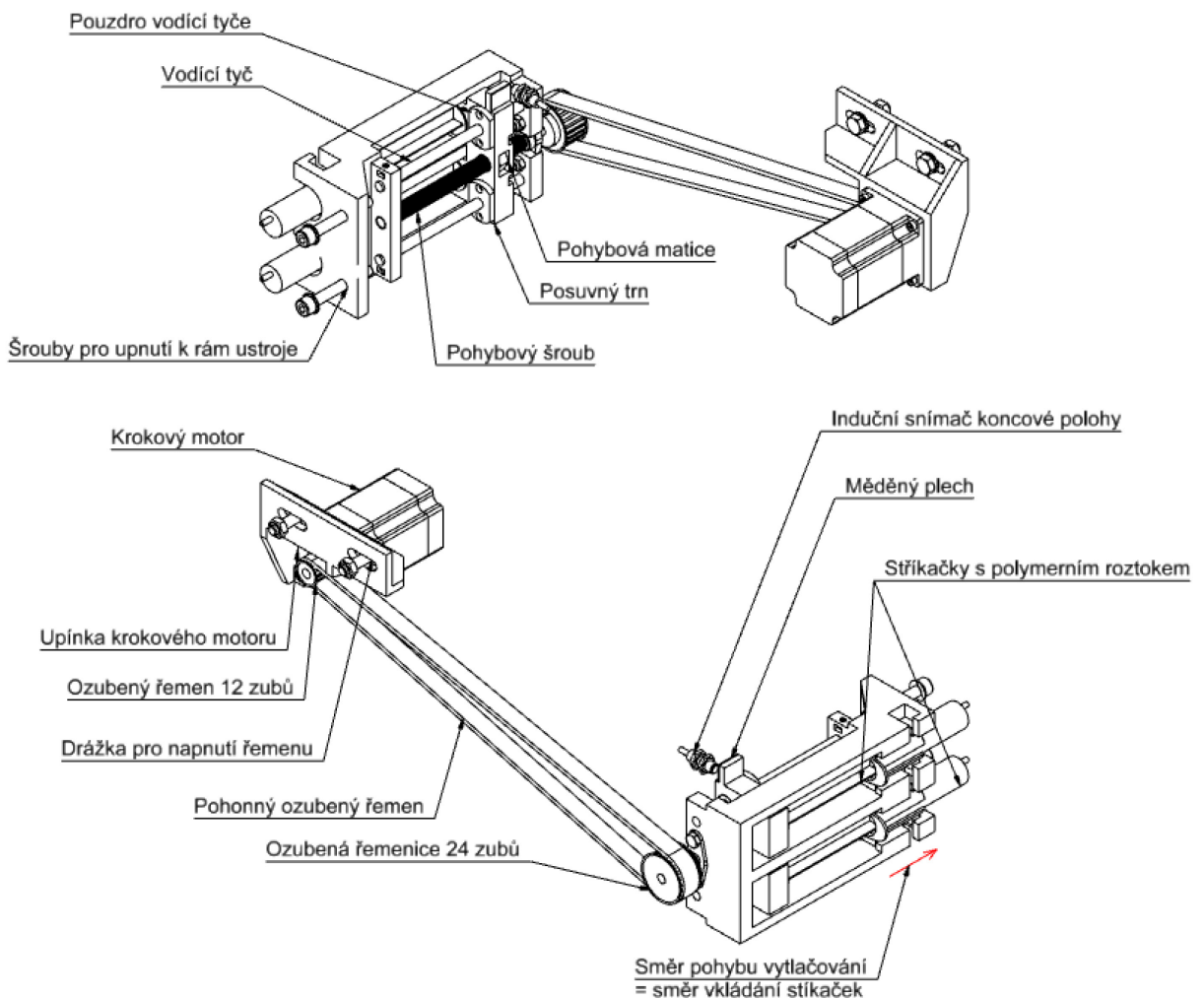
9.3 Extrudér

Rychlost toku polymerního roztoku má velký vliv na vlastnosti vyrobených vláken, proto je třeba tuto veličinu řídit. Dále by extrudér, měl zajišťovat nepřetržitou dopravu polymerního roztoku, bez nahodilých změn v rychlosti toku. Z tohoto důvodu byl navržen mechanismus, který je zobrazen na obrázku číslo 30.



Obrázek 29 Možné zásobníky polymerního roztoku a jejich pouzdra.

Na obrázku 29 jsou popsány tři druhy zásobníků pro polymerní roztok. Jsou to běžně dostupné injekční stříkačky (bez jehel). Nevětší možný objem zásobníku pro navržený extrudér se rovná 23 ml, dále pak 12 ml a 5 ml. Aby bylo možné všechny tyto zásobníky upínat do jednoho těla extrudéru, byly pro všechny rozměry stříkaček navrženy speciální pouzdra, která se nasunou na tělo stříkačky a poté je možné upnutí do rámu extrudéru. Tyto pouzdra jsou vybaveny drážkou, která umožňuje okamžité sledování objemu polymerního roztoku při pracovním cyklu stroje. Různé velikosti objemu zásobníků byly navrženy pro různé objemy zpracované za odlišných podmínek a typů vytlačovacích hlav.



Obrázek 30 Sestava extrudéru s popisem.

Extrudér je poháněn jedním krokovým motorem typu 57HS22. Kroučící moment je z řemenice na motoru přenášen pomocí ozubeného řemenu na řemenici, která je umístěna na pohybovém šroubu extrudéru. Napínání ozubeného řemenu je umožněno drážkami v upínce krokového motoru. Pro pomalé rychlosti vytlačování a navýšení kroučícího momentu se rovná poměr středních průměrů řemenic 1:2 (do pomala). Pootočením pohybového šroubu dochází k lineárnímu posuvu pohybové matice, která je mechanicky zablokována proti pootočení. Matice je uložena v posuvném trnu, který je veden pomocí dvou kalených kluzných tyčí o průměru 8 mm. Kontakt mezi posuvným trnem a vodící tyčí je pro minimalizaci třecího odporu zajištěn přes kuličkové pouzdro.

Tělo extrudéru je z důvodu co nejkratší délky výstupních hadiček připevněno dvěma šrouby k rámu stroje v blízkosti spodní části osy Y, tedy u vytlačovací hlavy. Tělo extrudéru, posuvný trn i upínka krokového motoru jsou vyrobeny z materiálu ABS pomocí 3D tisku.

Toto konstrukční řešení umožňuje využití až dvou různých polymerních roztoků v jednom pracovním cyklu, například za účelem koextruze, nebo zvětšení objemu jednoho zpracovávaného roztoku. Zásobník, který je osazen pouzdem se ze přední strany vloží do těla extrudéru, poté se jeho poloha zajistí pohybem posuvného trnu.

Aby bylo zabráněno kolizi posuvného trnu s tělem extrudéru, je v zadní části umístěn indukční snímač se stavitelnou polohou. Tento snímač reprezentuje nulovou polohu. Po ukončení pracovního cyklu musí být posuvný trn v nulové poloze, aby bylo možné zásobníky vyjmout. Protikus indukčního snímače (měděný plech) je připevněn na posuvný trn pomocí oboustranné lepicí pásky. Ochrana proti kolizi v přední části extrudéru je zajištěna softwarově (každý použitý zásobník polymerního roztoku má vlastní limitní délku zdvihu a tedy i počet otáček pohybového šroubu).

9.4 Vytlačovací hlavy

Tato kapitola je zaměřena na vlastní návrh geometrie a funkce vytlačovacích hlav, které jsou určeny přímo pro navržené zařízení. Pro návrh těchto hlav bylo čerpáno z poznatků, popsaných v teoretické části této diplomové práce.

Každá z vytlačovacích hlav by měla být snadno odnímatelná (jednoduchá výměna typu hlavy), dále by měla být snadno rozebíratelná za účelem čištění.

V podkapitolách jsou uvedeny návrhy, které byly zpracovány na základě teoretických poznatků, pro zajištění adekvátní funkčnosti bude třeba řada praktických zkoušek a potenciálně i úpravy navržené geometrie.

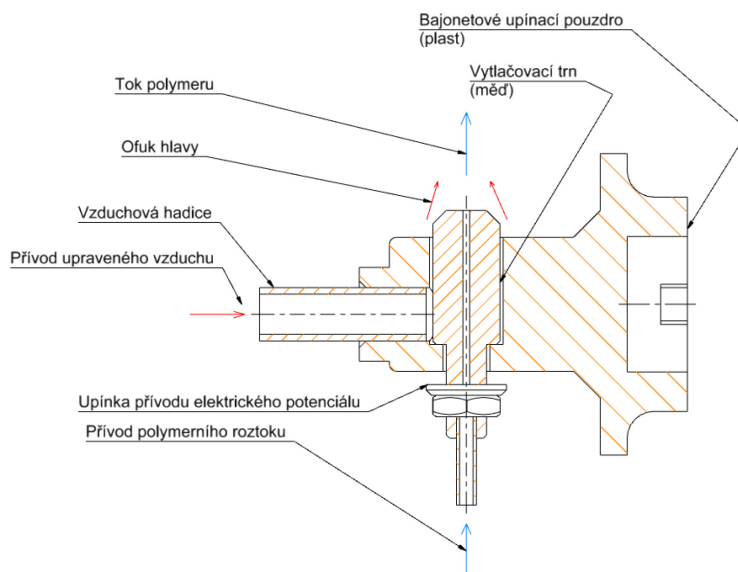
9.4.1 Jednoduchá vytlačovací hlava

Základním typ z navržených vytlačovacích hlav je zobrazen a popsán v řezu na obrázku číslo 31.

Tato geometrie se skládá ze dvou částí. První částí je bajonetové upínací pouzdro, které je vyrobeno z materiálu ABS pomocí 3D tisku. Druhou částí je vytlačovací trn, který je možné z hlavy vyjmout a čistit, například v lázni s rozpouštědlem.

Vytlačovací trn má jeden tokový kanál pro polymerní roztok, který má ve vstupní části průměr 3 mm (vnější průměr hadičky), dále se pak průměr tokového kanálu zužuje na 1 mm. Spodní část trnu je z vnější části vybavena závitem velikosti M6, která má jak funkci upínací, tak i pro připevnění přívodu elektrického napětí. Koncovka přívodního kabelu je přitažena pomocí matice mezi upínací pouzdro a podložku. Pro co nejvyšší elektrickou a tepelnou vodivost je trn navržen z mědi, nebo jiné slitiny s podobnými vodivostními vlastnostmi.

Tato hlava je rovněž vybavena možností využití podpory upraveného stlačeného vzduchu. Přívod vzduchu je situován z boční části upínacího pouzdra. Vnější průměr přívodní vzduchové hadice se rovná 8 mm a v upínacím pouzdře drží pomocí třecích sil (otvor v pouzdře má menší průměr, než vnější průměr hadice). Přívodem vzduchu o určité teplotě dojde ke změně teploty vytlačovacího trnu a polymerního roztoku. Dále má proud vzduchu vliv na výstupní proud polymeru, přičemž dle jeho parametrů ovlivňuje rychlost vypařování rozpouštědla z roztoku.

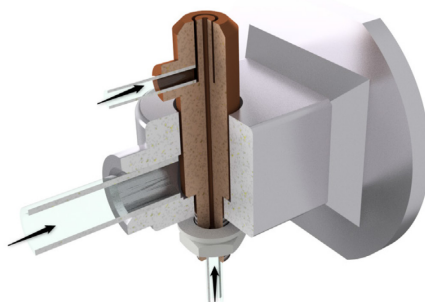


Obrázek 31 Řez jednoduchou vytlačovací hlavou.

9.4.2 Koextruzní vytlačovací hlava

Základní parametry této vytlačovací hlavy jsou identické, jako u výše uvedené jednoduché vytlačovací hlavy. Taky se skládá ze dvou částí (bajonetové upínací pouzdro a vytlačovací trn). Rovněž je vybavena možností asistence přivedeného a upraveného vzduchu. Vytlačovací trn je záměrně předsazen před upínací pouzdro, aby nedocházelo k ofoukávání špičky polymerní taveniny a s tím spojené příliš vysoké rychlosti odpařování rozpouštědla s následným tuhnutím polymerního roztoku na špičce vytlačovací trysky.

Bajonetové upínací pouzdro má stejný tvar a rozměry, jako jednoduchá vytlačovací hlava. Vytlačovací trn je navíc vybaven přívodem druhého polymerního roztoku. Rozvodný kanál vede druhý roztok na špičku vytlačovacího trnu po obvodu prvního polymerního roztoku. Pro složitost této vytlačovací hlavy je navrhován postup výroby metodou 3D tisku z kovového prášku. Částečný řez koextruzní vytlačovací hlavou je popsán na obrázku číslo 32.



Obrázek 32 Částečný řez koextruzní vytlačovací hlavou.

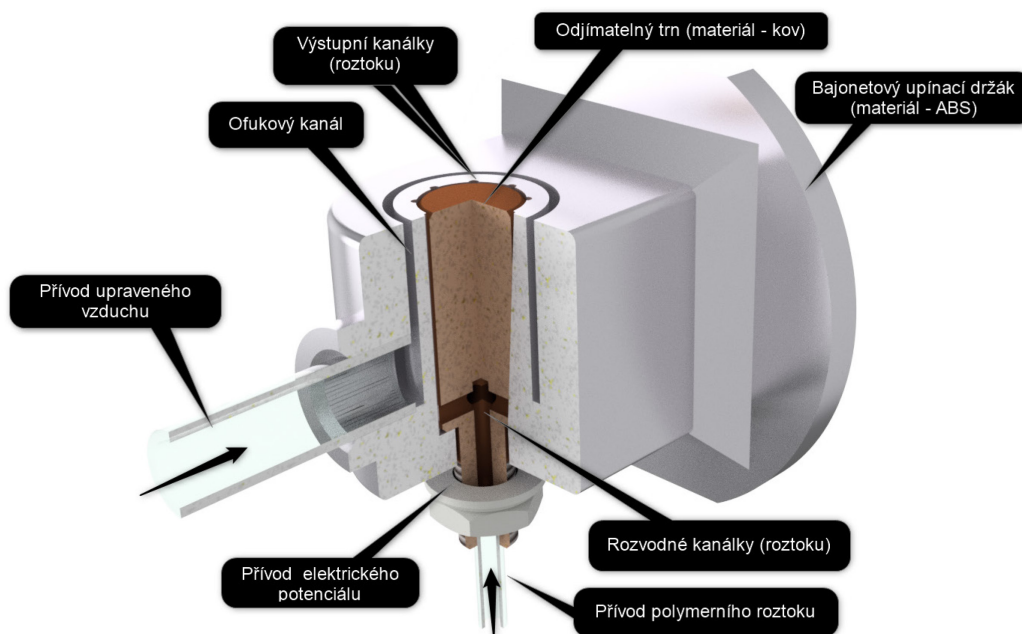
9.4.3 Více-štěrbinová vytlačovací hlava

Při výrobě nanovláken metodou elektrospinningu je jedním z omezujících aspektů malý objem vyrobených vláken. Z tohoto důvodu byla navržena vlastní konstrukce více-štěrbinové hlavy. Běžně vzniká z jedné kapky polymerního roztoku (na špičce vytlačovací hlavy) jeden proud polymeru o malém průměru. Tato konstrukce umožňuje 8 proudů při jednom pracovním cyklu. Počet výstupních štěrbin může být různý.

Polymerní roztok by měl mezi vstupem do vytlačovacího trnu a výstupní štěrbinou urazit ve všech místech stejnou dráhu.

Tato vytlačovací hlava se stejně jako již popsané hlavy skládá z upínacího pouzdra a vytlačovacího trnu. Částečný řez s návrhem této vytlačovací hlavy je popsán na obrázku číslo 33.

Upínací pouzdro je vybaveno vlastní rozvodným kanálem pro přívod stlačeného vzduchu. V tomto případě polymerní roztok teče mezi stěnou upínacího pouzdra a vytlačovacím trnem. Vytlačovací trn, který je vyroben z mědi má hladký, válcový povrch. V upínacím pouzdře je zhotoveno 8 štěrbin, půlkruhového průřezu o poloměru 0,25 mm. Polymerní roztok je na vstupní části rozváděn do štěrbin soustavou rozvodných kanálů.



Obrázek 33 Částečný řez více-štěrbinovou vytlačovací hlavou.

9.5 Kolektory

Tato kapitola je zaměřena na vlastní návrh geometrie a funkce kolektorů, přímo pro navrhované zařízení. Pro návrh těchto kolektorů byly využity poznatky z teoretické části této diplomové práce.

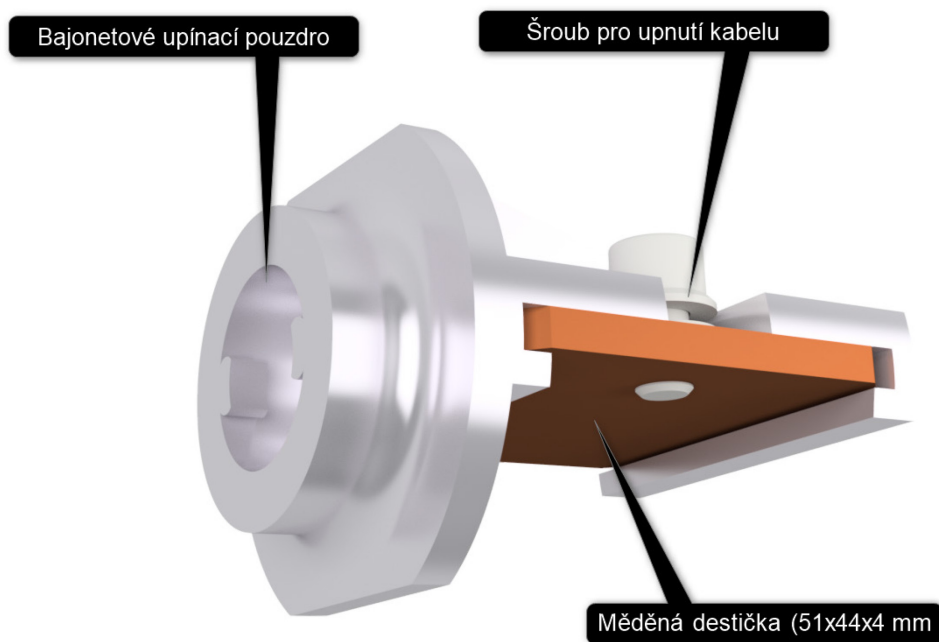
Každý z kolektorů by měl být snadno odnímatelný (jednoduchá výměna typu), dále by měl být snadno rozebíratelný za účelem čištění. Vyrobená vlákna by měla být snadno odnímatelná z plochy kolektoru.

Níže jsou uvedeny návrhy, které byly zpracovány na základě teoretických poznatků, pro zajištění adekvátní funkčnosti bude třeba řada praktických zkoušek a následných úprav navržené geometrie.

9.5.1 Deskový kolektor

Tento kolektor je určen k upnutí na horní osu Y pomocí bajonetového systému upínání. Upínací pouzdro je vybaveno drážkou pro vložení vodivého plechu, který drží v pouzdře díky přechodnému uložení (využití pružnosti materiálu pouzdra).

Uzemnění, nebo záporná elektroda jsou připevněny k vodivé desce (vyrobené z mědi) pomocí šroubu s podložkou.

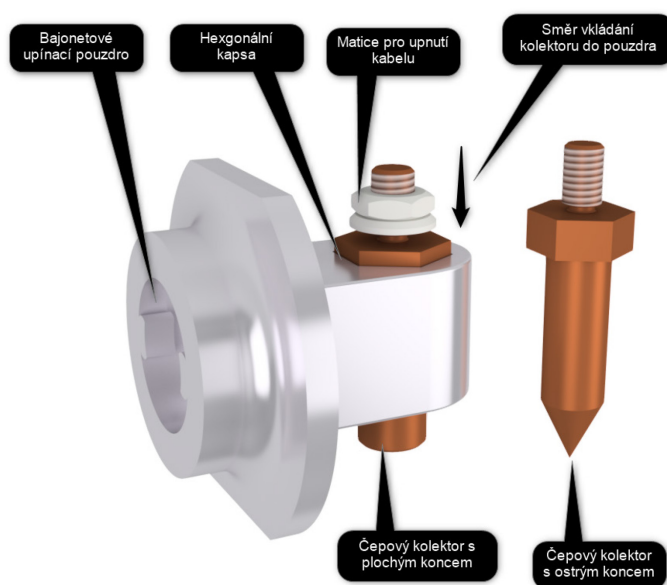


Obrázek 34 3D pohled na deskový kolektor.

9.5.2 Tyčový kolektor

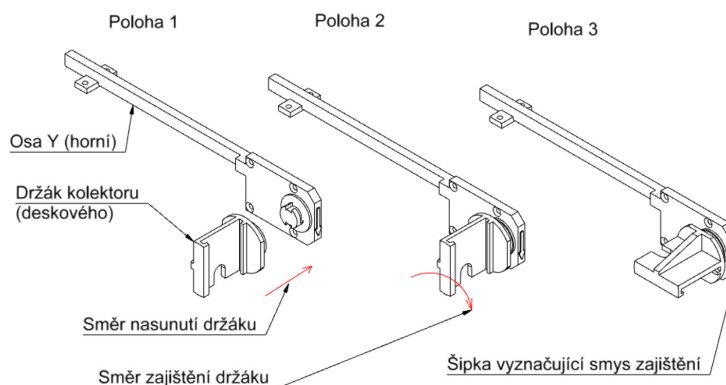
Tyčový typ kolektoru je zobrazen a popsán na obrázku číslo 35. Upínací pouzdro má průchozí válcový otvor a v horní části je osazen šestihrannou kapsou. Čepový kolektor je vyroben z polotovaru v podobě šestihranné tyče. Uložení v šestihranu v kapse s vůlí je navrženo tak, aby nebyl třeba druhý klíč při přitahování zemnicího kabelu. Dalším možným zjednodušením manipulace je nahrazení nízké matice křídlovou maticí.

Druhou variantou tyčového kolektoru je úprava konce kolektoru. Místo plochy je část, kam dopadají vlákna osazena špičkou.



Obrázek 35 Popis tyčového kolektoru.

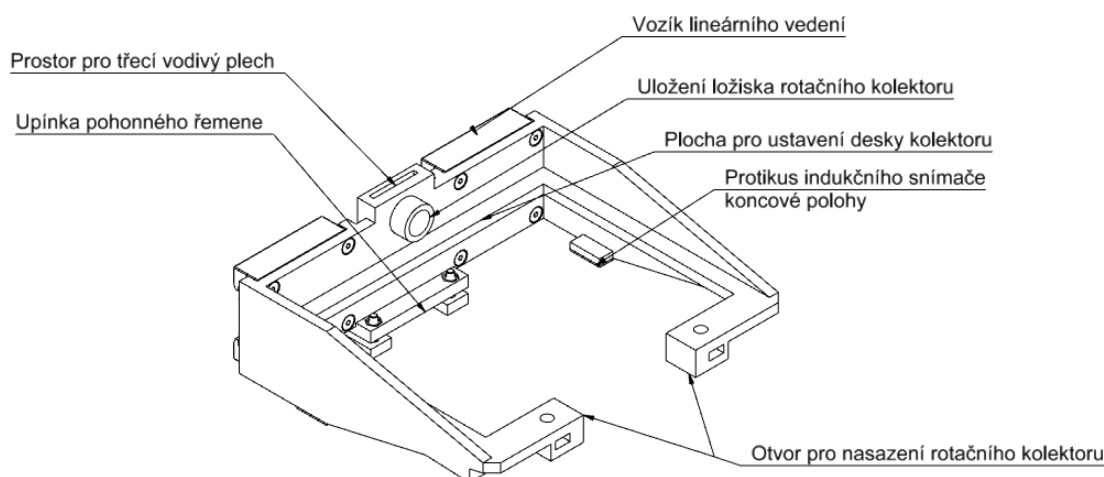
Na obrázku číslo 36 je popsán bajonetový způsob upínání vytlačovacích hlav a kolektorů. Tento systém byl navržen pro co nejjednodušší způsob výměny nástrojů.



Obrázek 36 Instalace bajonetového držáku kolektoru.

9.5.3 Stůl osy X - základna

Stůl osy X, který je popsán na obrázku číslo 37 plní řadu funkcí, mezi které se řadí nosič nevodivé, nebo vodivé desky kolektoru a základna všech rotačních kolektorů (válcový, diskový, tyčový).



Obrázek 37 Stůl osy x s popiskama.

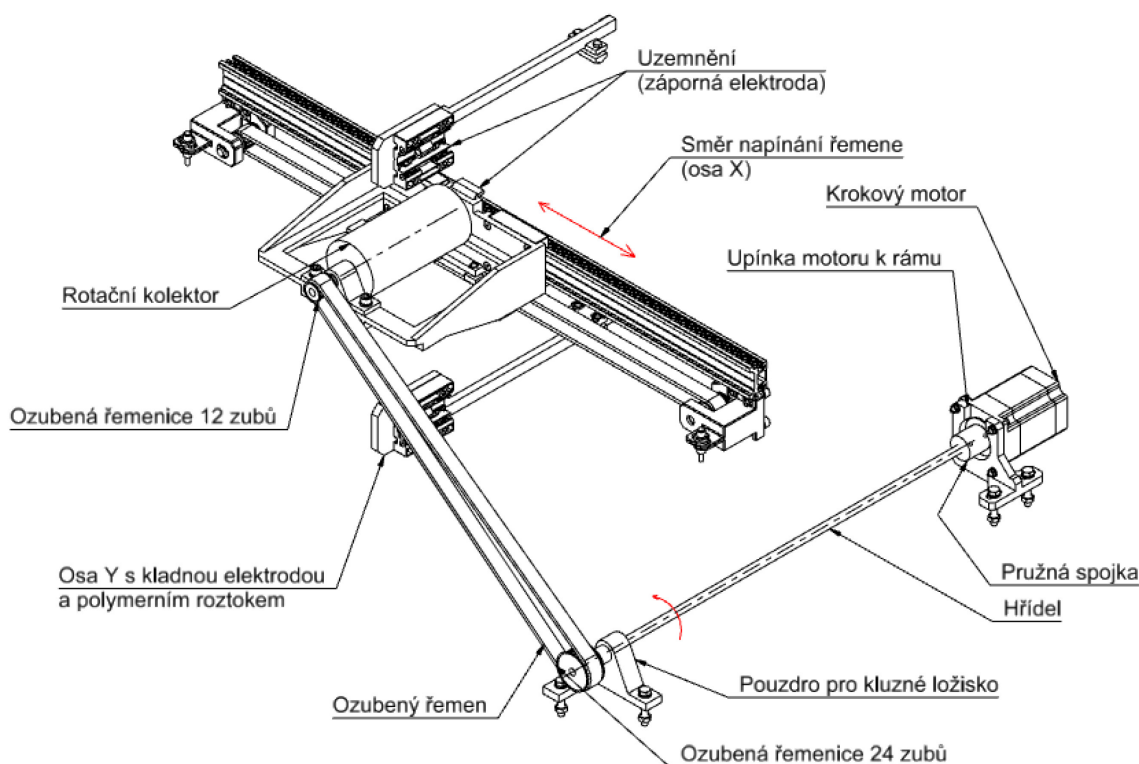
Tento stůl je navržen z polymeru s označením PLA a uzpůsoben pro výrobu pomocí 3D tisku. Čtyřmi šrouby je na něj upevněn každý vozík lineárního vedení. Ve spodní části je umístěna patka, na kterou je přilepen měděný plech, který je určen, jako protikus indukčního spínače. Celá konstrukce tohoto stolu je navržena pro dosažení co nejnižší hmotnosti, za zachování dostatečné tuhosti. Důvodem redukce hmotnosti, nejen v tomto případě, ale i v případě pohyblivé části os X a Y je zachování hybnosti tělesa, kdy při změně směru pohybu dochází ke vzniku nežádoucích vibrací.

Horní vodorovná plocha slouží k uložení a ustavení desky kolektoru. Vzhledem za-
nedbatelným fyzikálním silám při elektrospinningu, není nutné položenou kolektorovou desku zajišťovat. Pokud je na stole osy X položena deska z nevodivého materiálu a záporná elektroda je na horní straně osy Y, pak je možné řízeně nanášet vrstvu nanovláken na plochu této desky.

V přední části je stůl rozdělen otvorem, který umožňuje vkládání rotačních kolektorů, které je třeba zasunout do otvoru pro uložení ložiska. Dále se na okrajích tohoto otvoru nachází díry, určené pro přitažení příruby kolektoru.

9.5.4 Rotační kolektor – válec

Jak bylo zmíněno v teoretické části této diplomové práce, pro řadu aplikací je důležitý jednotný směr orientace vláken. V případě rotačního kolektoru typu válec dochází k přichytávání vláken na plochu válce. Rotací válce dochází k zarovnání vláken po jeho obvodě. Aby bylo dosaženo lepších výsledků, obvodová rychlost válce by měla být co nejvíce podobná rychlosti toku proudu polymeru.



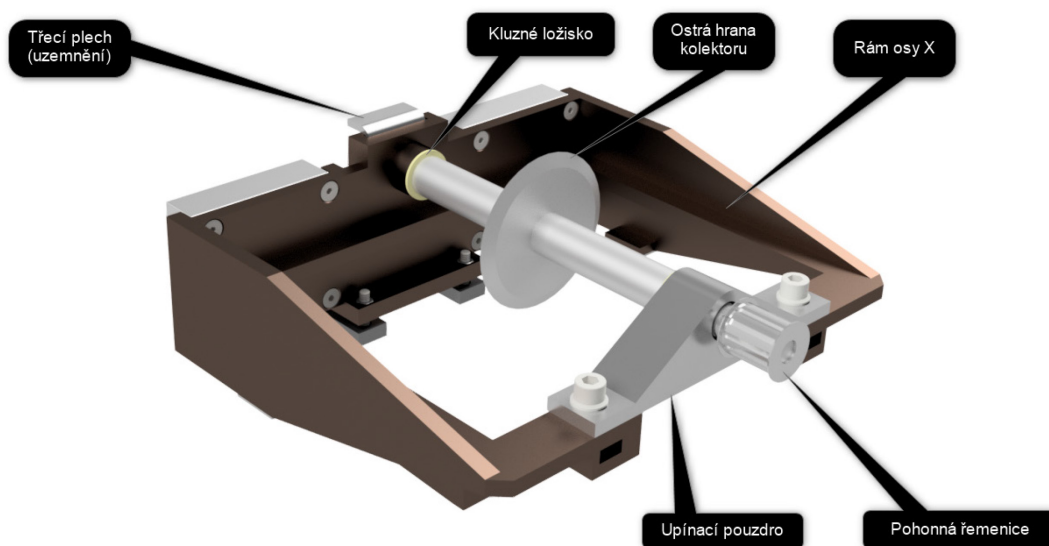
Obrázek 38 Rotační kolektor válcového typu s pohonem.

Pro dodržení podmínky vzdálenosti elektroniky od kladné elektrody je pohonná soustava rotačních kolektorů řešena dle obrázku 38. Krokový motor typu 57HS22 je připevněn k rámu stroje pomocí upínky. Přes pružnou spojku je krokový motor připojen na hřídel, která je na opačném konci uložena do pouzdra s kluzným ložiskem. Pružná spojka má funkci vyrovnání nesouosostí mezi motorem a poháněnou hřídelí. Pomocí ozubeného řemenu dochází k přenosu krouticího momentu z řemenice s 24 zuby na řemenici s 12 zuby. Převodový poměr je v tomto případě 1:2 “do rychla“. Pro nasazení a napnutí pohonného řemenu je určen pohyb stolu osy X.

Záporná elektroda, nebo zemnicí kabel může být přiveden na tělo rotačního válce (přes třecí plech), nebo na horní stranu osy Y.

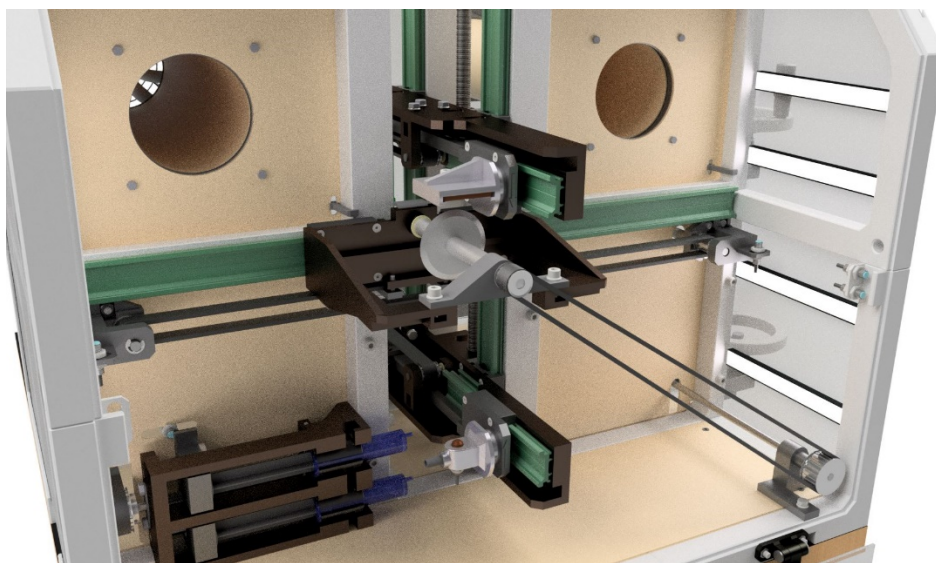
9.5.5 Rotační kolektor – disk

Typ kolektoru popsany na obrázku číslo 39 byl navržen dle studie uvedené v teoretické části, za účelem ověření chování polymerních vláken při této geometrii záporné elektrody. Pohon, uložení do rámu osy X a připojení zemnicího kabelu je identické u všech rotačních kolektorů (viz. kapitola s válcovým kolektorem).



Obrázek 39 Rotační kolektor diskového typu.

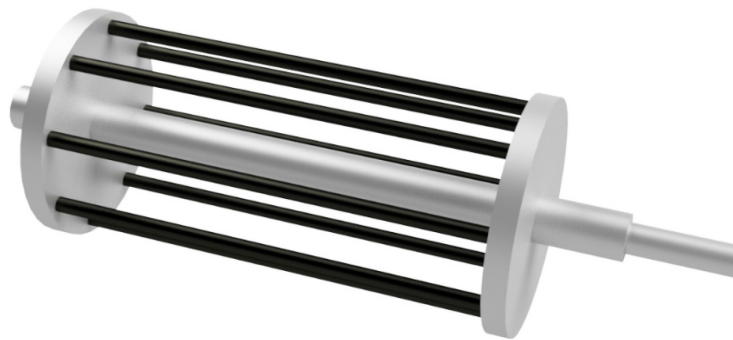
Na obrázku číslo 40 je pro vizualizaci zobrazena dispozice diskového kolektoru v celém stroji. Horní část osy Y je osazena deskovým kolektorem.



Obrázek 40 Sestava stroje osazeného vytlačovací hlavou a kolektorem.

9.5.6 Rotační kolektor tyčový

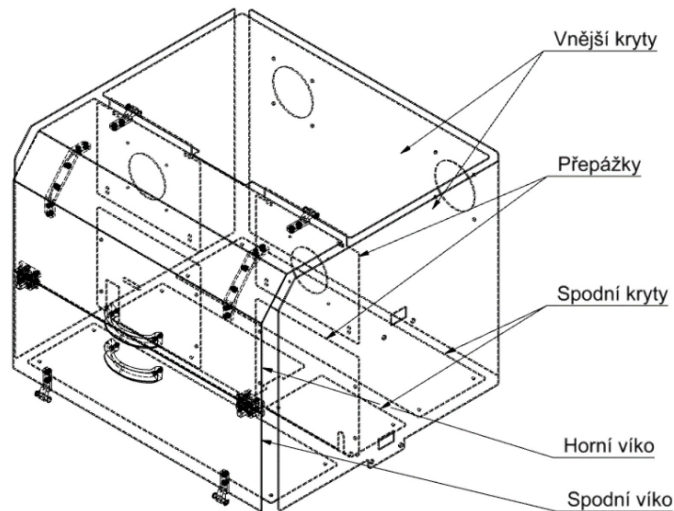
Tato geometrie je alternativou k rotujícímu rámovému kolektoru. Celý kolektor je sestaven z dílců, vyrobených z nevodivých materiálů. Při pracovním cyklu se záporná elektroda nachází za kolektorem. Rotační tyčový kolektor je tedy umístěn v prostoru mezi kladnou a zápornou elektrodou. Tento návrh umožňuje jednoduché odjímání vyrobených vláken (z prostoru mezi sběrnými tyčemi). Navržená geometrie je zobrazena na obrázku číslo 41.



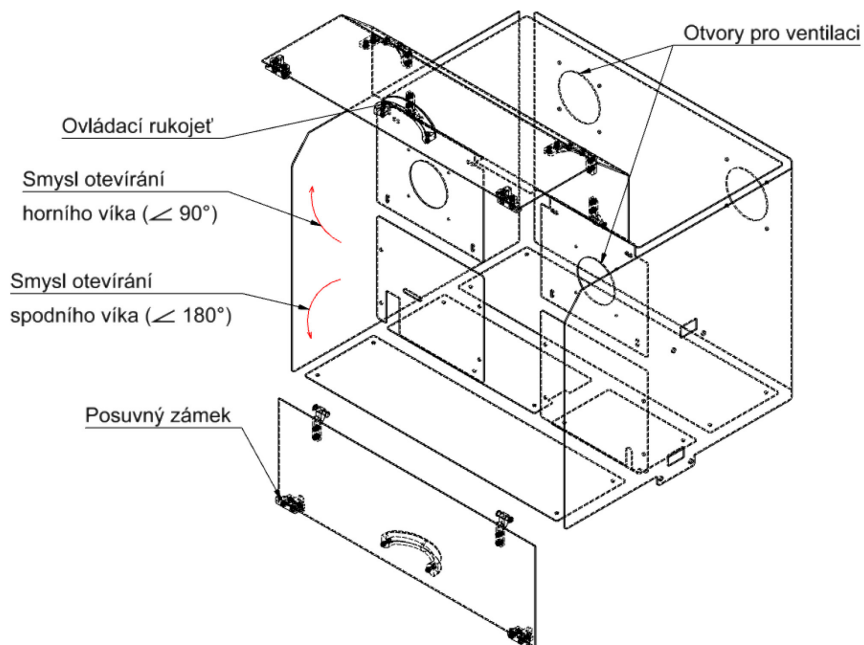
Obrázek 41 Návrh rotačního tyčového kolektoru.

9.6 Krytování

Mezi vstupní parametry pro návrh zařízení patří možnost uzavření celého stroje pomocí krycích desek a maximální možné oddělení pracovního prostředí od ostatních částí zařízení (pomocí přepážek).



Obrázek 42 3D pohled na krycí desky v uzavřeném stavu.



Obrázek 43 3D pohled na krycí desky v otevřeném stavu.

Na obrázku číslo 42 jsou zobrazeny všechny krycí desky v uzavřeném stavu. Obrázek číslo 43 popisuje smysl otevírání dvířek, při úplném otevření.

Soustava krycích desek musí splňovat následující parametry:

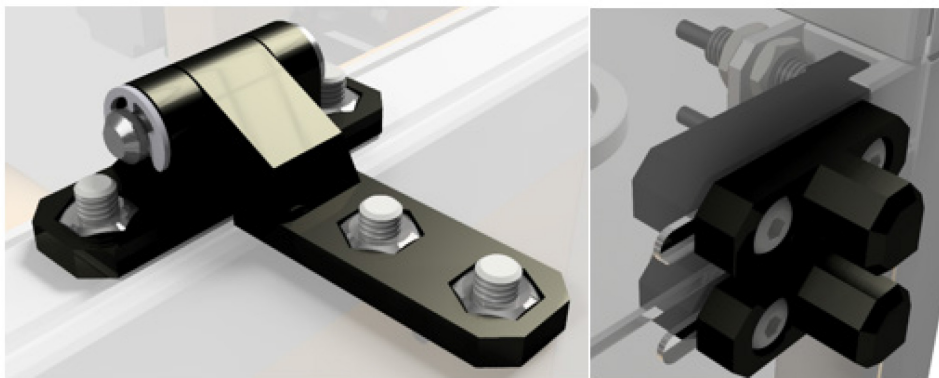
- Uzavření pracovního prostředí pro dostatečné udržení požadované teploty.
- Zajištění bezpečnosti obsluhy (riziko úrazu elektrickým proudem).
- Snadná manipulace v pracovním prostředí stroje (dostatečně velká dvířka).
- Průhlednost (sledování stavu pracovního procesu, bez nutnosti otevření dvířek).
- Snadná montáž a demontáž v případě poruchy, nebo údržby.

Pro zajištění průhlednosti jsou krycí desky navrženy z materiálu PMMA o tloušťce 3 mm. Kompletní geometrie krycích desek, včetně otvorů bude zhotovena pomocí CNC laseru vypálením do polotovaru o stejné tloušťce. Boční kryty jsou nasunuty do drážek v rámové konstrukci stroje. Pro vložení horní krycí desky slouží vybrání v rámu. V případě potřeby může být horní deska přišroubována k rámu. Spodní desky jsou přitáhnuty k základní desce přes rám stroje pomocí samořezných vrtů.

Víko je pro snadnou manipulaci rozděleno na dvě poloviny: spodní a horní polovina. Obě části víka jsou vybaveny manipulační rukojetí, panty a zámky, které jsou k deskám vík přišroubovány.

Spodní víko je navrženo z jedné desky. Aby bylo možné otevřít spodní víko o úhel 180 °, musí přední část zařízení lícovat, nebo přesahovat roh stolu.

Horní víko se skládá ze tří desek, které jsou spojeny plastovými spojkami. K plnému otevření horního víka dojde už při úhlu 90°, aby nedocházelo k jeho samovolnému zavírání, musí úhel otevření přesahovat 100 °. Koncovou polohu horního víka je možné vymezit dorazem, nebo krátkým lankem, umístěným ve vnitřní straně krytu. Další možností je použití páru tlačných plynových pružin. Pro nízkou hmotnost vík nebyly tlačné plynové pružiny do původního návrhu zahrnuty.



Obrázek 44 Pohled na navržený pant a zámek víka.

Na levé straně obrázku 44 je zobrazen návrh pantu. Pant se skládá ze dvou funkčních částí. Základna je přišroubována k rámu stroje, druhá část je přišroubována k víku. Obě části pantu jsou spojeny ocelovým čepem, který je z jedné strany zajištěn osazením a z druhé strany pojistným kroužkem. Pro usnadnění montáže jsou otvory pro šrouby vybaveny šestihranným vybráním pro matici. Materiál pantů je ABS.

Pravá strana obrázku 44 zobrazuje navržené zámky vík. Zámek se skládá ze dvou částí. První část je umístěna z vnitřní strany víka a je vybavena výřezem, který s nepatrnou vůlí zapadá do protikusu (výstupek na rámu). Druhá část zámku je umístěna z vnější části víka a plní funkci ovládací ručky. V desce víka jsou vypáleny oválné drážky, které slouží jako vodící kulisa pro pohyb zámku. Vodící kulisa vymezuje maximální posunutí zámku dorazem vsunutého šroubového spoje. Materiál je stejný jako v případě pantů. Poloha zámků v otevřené, nebo zavřené pozici je zajištěna vlastním třením mezi zámkem a krytem.



Obrázek 45 Upínka dělicí přepážky a úprava rámu pro upnutí krycích desek.

Levá část obrázku číslo 45 představuje řez sestavou navrženého zařízení. Pro minimalizaci počtu šroubových spojů byly pro zajištění polohy přepážek navrženy speciální upínky. V místě upínky je v přepážce vyroben oválný otvor, do kterého se upínka zasune a pootočením dojde k přitáhnutí k rámu stroje.

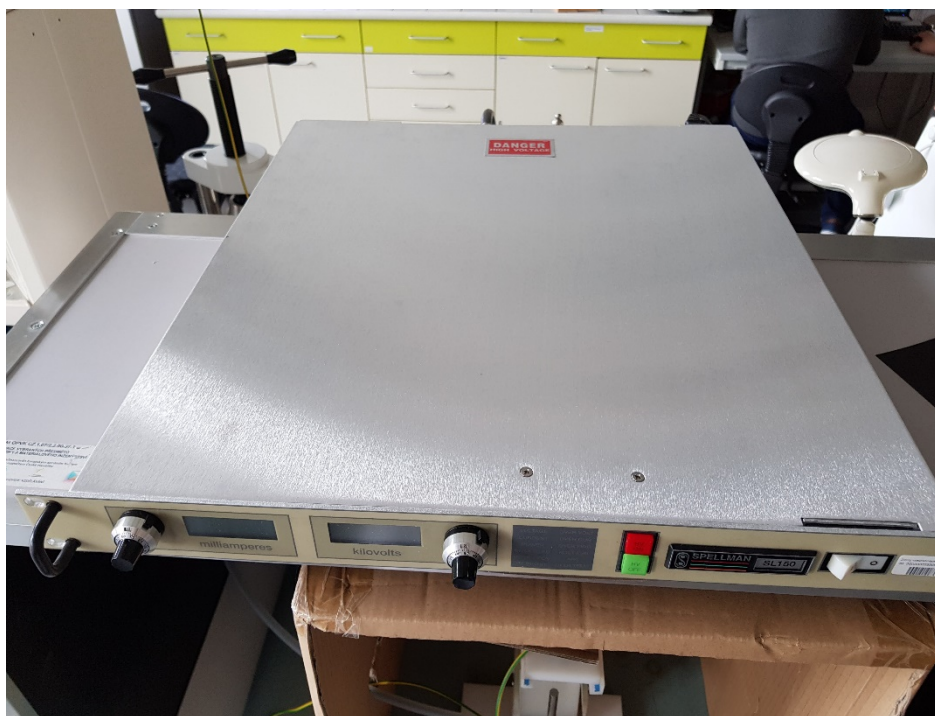
Pravá část obrázku 45 naznačuje úpravu geometrie jednotlivých částí rámu za účelem zjednodušení montáže a zajištění polohy krycích desek. V rámu jsou připraveny kapsy, do kterých se boční kryty nasunou z horní strany. Přišroubováním funkčních prvků z vnější strany krytů dojde k zajištění jejich polohy. Všechny prvky, které nemají vliv na funkčnost zařízení (drážky, upínky, atd..) jsou vyrobeny se značnými vůlemi pro zmenšení pravděpodobnosti kolizí. V aktuální fázi návrhu nejsou krycí prvky vybaveny žádným těsněním. Důvodem je mimo jiné značný počet otvorů, které jsou nezbytné pro funkční prvky. V případě potřeby je možné tyto otvory zakrýt a zaizolovat krycí desky například silikonovým tmelem, nebo samolepícím izolačním profilem.

9.7 Ostatní prvky

Tato kapitola popisuje další prvky zařízení, které mají výrazný vliv na funkci navrženého zařízení, nebo plní roli pomocných systémů.

9.7.1 Zdroj vysokého napětí

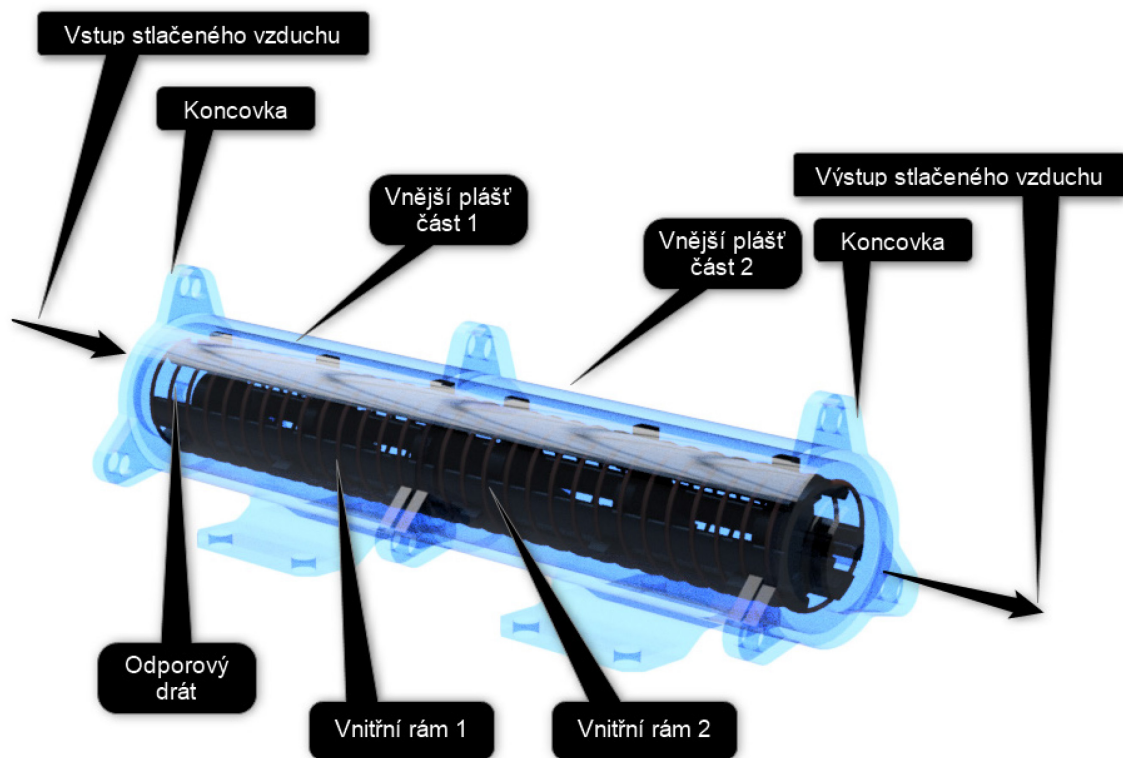
Jako zdroj vysokého napětí byl zvolen typ SL70PM150 od společnosti Spellman. Rozsah výstupního napětí se u tohoto zdroje pohybuje mezi 1kV a 70 kV. Hlavním důvodem využití tohoto typu zdroje, je potřebný rozsah výstupního napětí a jeho stabilita. Zdroj je umístěn na Ústavu fyziky a materiálového inženýrství, FT, UTB ve Zlíně. Fotografie zvoleného typu zdroje je uvedena na obrázku číslo 46. Vzhledem k rozměrům zdroje, může být umístěn například na horním krytu, nebo mimo zařízením.



Obrázek 46 Zdroj vysokého napětí Spellman typu SL70PM150.

9.7.2 Úprava stlačeného vzduchu

Stlačený vzduch je přiváděn z centrálního rozvodného systému budovy. Před přivedením do vytlačovací hlavy je třeba mít možnost řídit jeho objemový průtok a teplotu. Stlačený vzduch nesmí obsahovat přebytečnou vlhkost ani výpary maziv, jinak by došlo k znečištění vytlačovacích hlav a nefunkčnosti zařízení. Zdroj vzduchu by měl těmto požadavkům vyhovovat.



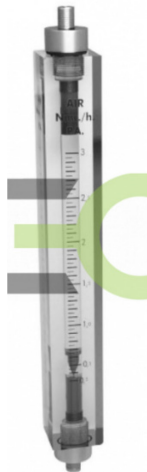
Obrázek 47 Návrh průtokového ohřivače vzduchu.

Na obrázku číslo 47 je uveden a popsán 3D pohled navrženého průtokového ohřivače vzduchu. Vstupní a výstupní otvory jsou upraveny dle vnějšího průměru rozvodných hadic. Sestava ohřivače se skládá z vnitřního rámu, vnějšího pláště, koncovek a odporového drátu. Zdrojem tepla je odporový drát, kdy při procházení elektrického proudu drátem dochází k jeho ohřívání.

Všechny součásti (kromě odporového drátu) budou vyrobeny pomocí 3D tisku z polymerů s relativně vysokou tepelnou odolností. Rovněž i výstupní hadice musí odolat pracovní teplotě s maximální hodnotou 50 °C. Dle požadovaného výkonu je možné upravovat délku ohřivače a tím výkon zvyšovat. Vnitřní rám plní funkci nosiče odporového drátu, po jeho obvodě je připravena drážka, která má průběh ve tvaru šroubovice. Při správném nasazení je drát rovnoměrně rozmístěn po délce ohřivací trubice. Vnější plášť slouží jako obálka ohřivače a příruby kotví vstupní a výstupní vzduchové hadice.

Orientace navrženého ohřivače vzduchu v sestavě stoje je v zadní části a je otočen na výšku. Ve spodní části je umístěn vstup stlačeného vzduchu a ohřátý vzduch odchází

horní částí. Na konci ohřívače je nezbytné měřit teplotu a podle toho upravovat výkon tepelného zdroje. Alternativním řešením je zakoupení ohřívače od některého z dodavatelů laboratorního vybavení.



Obrázek 48 Laboratorní průtokoměr LB/89 od společnosti Ineco. [52]

Na obrázku s číslem 48 je zobrazen laboratorní průtokoměr typu LB/89, který dodává společnost Ineco. Jedná se o plovákový typ průtokoměru, kdy se objemový průtok plynu odečítá ze stupnice dle výšky zdvihu plováku.

Parametry průtokoměru typu LB/89:

- Maximální tepelná odolnost = 70 °C.
- Měřicí rozsah = 0,6 – 10 m³/h.
- Materiál = PMMA.

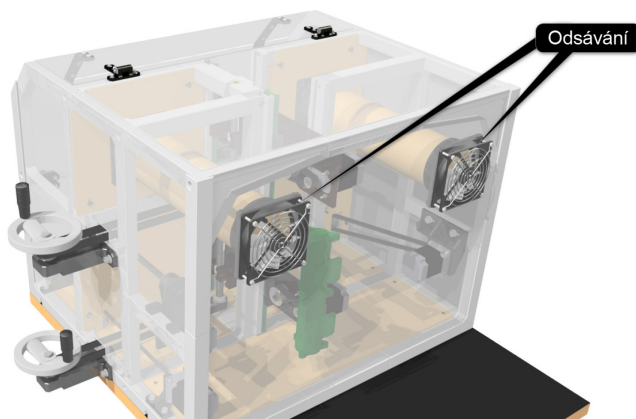
Pro regulaci průtoku je třeba před vstup do průtokoměru umístit redukční ventil.

9.7.3 Odsávání

Při práci s polymerními roztoky může při odpařování rozpouštědel docházet k tvorbě nepříjemného, nebo škodlivého zápachu. Z tohoto důvodu byl navržen odsávací systém, který plynulým a pomalým způsobem odtahuje vzduch z pracovního prostředí stroje. Na výstup odsávání mohou být připojeny roury, které povedou vzduch směrem k připojené filtraci. Dalším smyslem aplikace odsávání je zabránění přehřívání pracovního prostředí.

Zvolený typ ventilátorů je Arctic Fan F12 s průměrem 120 mm a průtokem vzduchu až 90 m³/h. Tento druh ventilátorů není primárně určen k odsávání, ale k ofoukávání, díky

tomu nebude v pracovní prostředí stroje vznikat příliš velký vzduchový proud. V případě nutnosti uzavření pracovního prostoru, je možné zakrýt odsávací otvory krytkami.

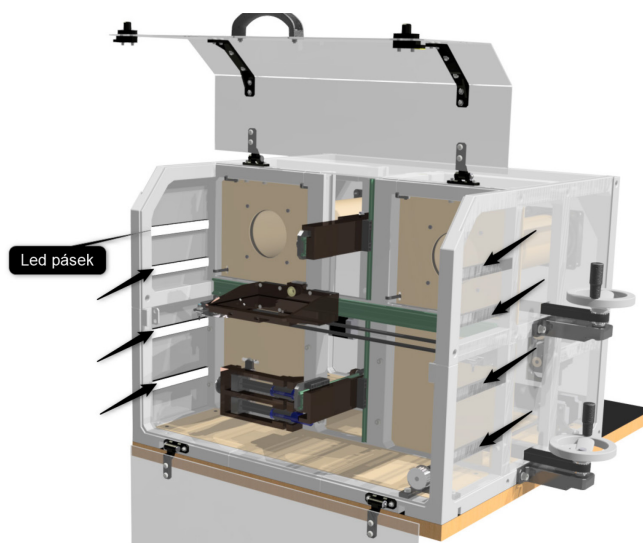


Obrázek 49 Náhled na pozici odsávání.

9.7.4 Osvětlení

Vyráběná vlákna metodou elektrospinningu mají velmi tenký průměr a za běžných podmínek je není snadné shlédnout. Situaci dále ztěžuje nutnost uzavření krytů stroje, z tohoto důvodu bylo nezbytné navrhnout vhodné osvětlení.

Jako osvětlení pracovního prostoru byla zvolena soustava čtyř led pásek z každé boční strany stroje. Led pásky jsou vloženy do plastových lišt, které jsou přišroubovány k bočním krytům. Následně je světelný zdroj překryt krycí transparentní lištou. Zvolený typ osvětlení disponuje možností změny barvy světla. Pozice osvětlení je naznačena na obrázku číslo 50.

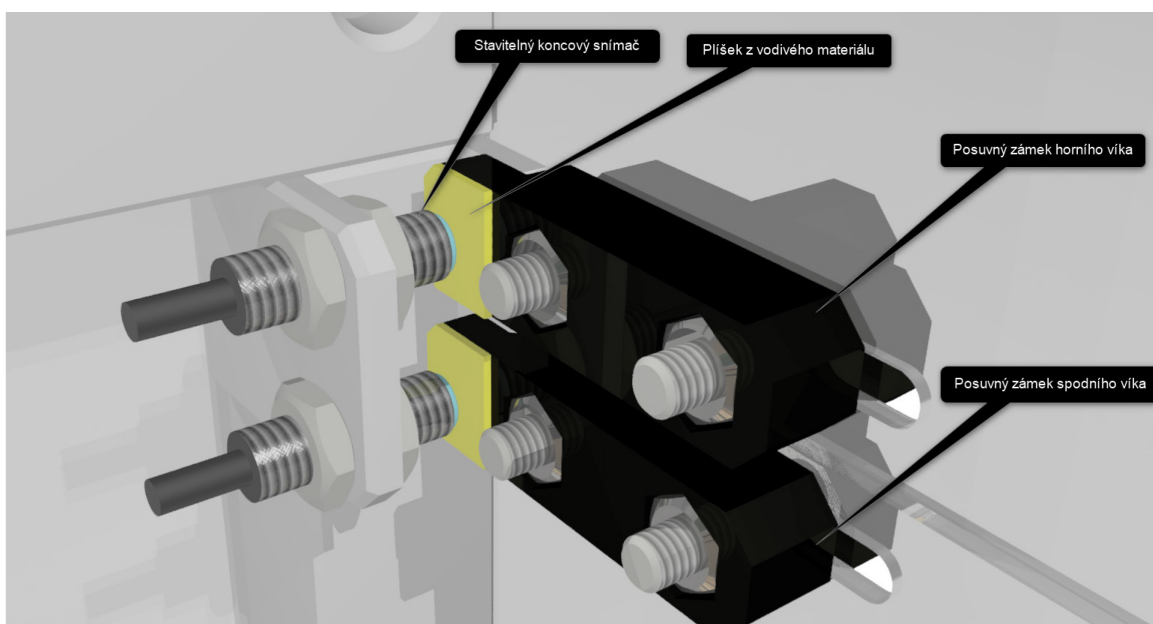


Obrázek 50 Náhled na pozici osvětlovacích led pásků.

9.7.5 Zabezpečení

Jak už bylo zmíněno, jeden z účelů použití krycích desek je zabránění kontaktu obsluhy s nabitou elektrodou. Z tohoto důvodu byla navržena softwarová pojistka, která hlídá uzavření krycích vík. V případě otevřených vík, není možné uvést zdroj vysokého napětí do provozu.

V místě, kde zapadá zámek krytu do protikusu na rámu stroje, jsou umístěny dva indukční snímače. Jeden snímač pro horní víko, druhý snímač pro spodní víko. Na posuvných zámcích jsou přilepeny plíšky, vyrobené z vodivého materiálu, které slouží jako protikusy indukčních snímačů. Polohu snímačů je možné nastavovat pomocí vnějšího závitu na snímači a matic.



Obrázek 51 Bezpečnostní prvek horního a spodního víka.

Na viditelném místě zařízení musí být umístěna značka, která upozorňuje na nebezpečí poranění elektrickým proudem.



Obrázek 52 Značka upozorňující na nebezpečí zranění elektrickým proudem. [55]

9.8 Řízení a pohony

Tato kapitola stručně popisuje požadavky na softwarové vybavení zařízení, použité typy krokových motorů a jejich řídicích jednotek

9.8.1 Požadavky

Softwarové rozhraní navrženého zařízení by mělo umožňovat následující:

- Automatické nulování polohy pracovních os.
- Manuální mód pracovních os (ruční ovládání pomocí nastavení rychlosti a směru pohybu).
- Možnost nahrání programu v podobě G-kódu.
- Nastavitelný režim rastrování (počet kroků, směr, rychlost).
- Nastavení objemového průtoku polymerního roztoku.
- Sledování teploty uvnitř pracovního prostoru.
- Sledování teploty na konci vytlačovací hlavy.
- Bezpečnostní blokaci přívodu elektrického napětí při otevření dvířek stroje.
- Možnost dalších úprav v závislosti na vývoji zařízení.

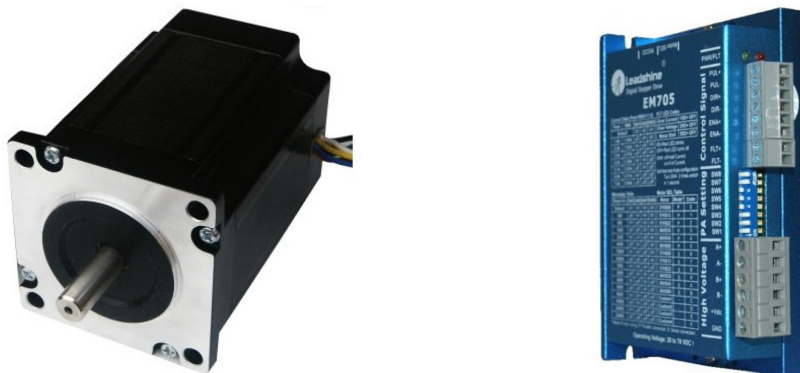
9.8.2 Řídicí panel

Pro nastavení a ovládání celého systému byl zvolen panel typu MT8070iE, který dodává společnost Weintek. Panel je vybaven dotykovou obrazovkou s úhlopříčkou 7“. Software ke konfiguraci tohoto panelu se nazývá Easy Builder Pro. Tento software je k dispozici zdarma. Konfiguraci celého softwarového rozhraní, zapojení a uvedení do provozu veškeré elektroniky bude provádět autorizovaná společnost, která se touto problematikou dlouhodobě zabývá.



Obrázek 53 Displej řídicího systému typu MT8070iE od společnosti Weintek. [53]

9.8.3 Pohon



Obrázek 54 Krokový elektromotor typu 57HS22 a řídicí jednotka typu EM705 od společnosti Leadshine. [54]

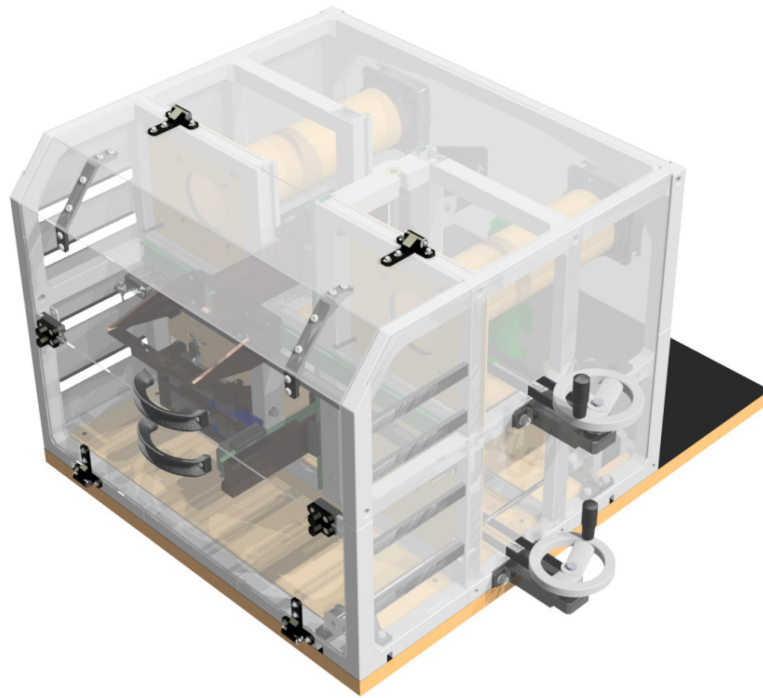
Základní parametry elektromotoru typu 57HS22:

- Krouticí moment: 2,2 [Nm]
- Proud: 5,7[A] (pro Bipolární, paralelní zapojení)
- Úhel pootočení 1,8 [°]
- Rozměry 57x 57 x 81 [mm]
- Výstupní hřídel: $\varnothing 7,5 \times 21$ [mm]
- Příruba: NEMA23

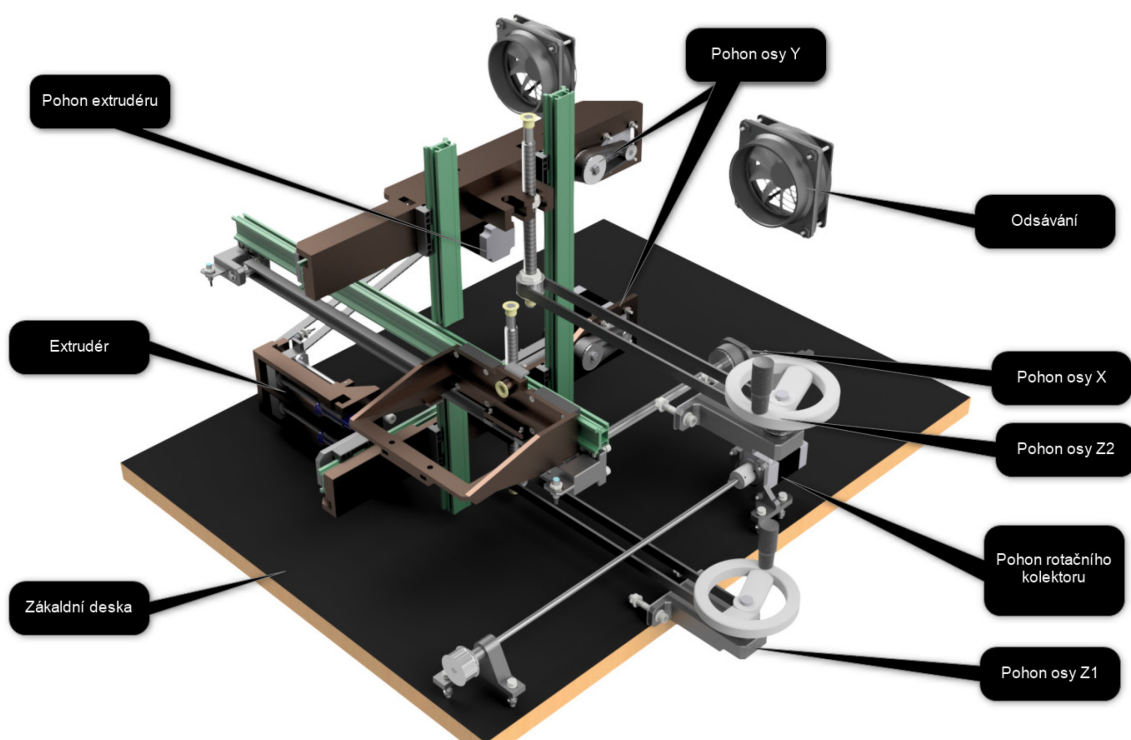
Pro montáž kabelů je možné použít kabelové upínky s možností přilepení, nebo zhotovit otvor do krytu stroje a stáhnout kabely pomocí elektrikařských utahovacích pásek,

9.9 Sestava stroje

V této kapitole je pro ilustraci zobrazeno celé zařízení (obrázek 55) a vzájemná poloha hlavních funkčních prvků navrženého zařízení (obrázek 56).



Obrázek 55 Trojrozměrný pohled na sestavu zařízení.



Obrázek 56 Trojrozměrný pohled na hlavní prvky navrženého zařízení.

10 VÝROBA A VÝVOJ

Tato kapitola popisuje dosavadní poznatky z aktuálního stavu právě vyráběného zařízení. Pokračuje výroba, nákup a montáž součástí, ze kterých se navržené zařízení skládá.

10.1 Rámová konstrukce

Prvním omezujícím aspektem v případě výroby objemnějších součástí pomocí 3D tisku je čas. Proto byla zakoupena tisková tryska s co největším objemovým průtokem, tedy s vyšší tloušťkou vrstvy, na úkor kvality povrchu vytištěných dílců. V tomto případě byla koupena a odzkoušena tryska, se kterou je možné tisknout vrstvy o tloušťce 0,4 mm. Následná jakost a drsnost povrchu je pro tuto aplikaci dostačující.

Před začátkem hromadné výroby, bylo pro optimalizaci výrobního procesu vyrobeno několik zkušebních vzorků z materiálu ABS. Problém takto rozměrných dílů, který nastal, bylo vysoké vnitřní pnutí a docházelo k enormním deformacím, s následným odtržením dílce z tiskové podložky. Byly zkoumány vlivy různých procesních parametrů (teplota tiskové podložky, teplota tiskové hlavy, geometrie a hustota podpěr, geometrie a hustota výplně, počet vrstev stěny, přilnavost taveniny na tiskovou podložku a další). Všechny pokusy o výrobu objemných součástí rámu z materiálu ABS skončily neúspěšně.



Obrázek 57 Deformace rámu při 3D tisku z materiálu ABS.

Po konzultaci s techniky od dodavatele zařízení a materiálu, byl zvolen materiál PLA, který má sice odlišné mechanické vlastnosti, ale teplota taveniny v případě tohoto materiálu dosahuje nižších hodnot. Využitím tohoto materiálu došlo ke zmenšení vnitřních pnutí ve výrobku a po vyladění procesních parametrů byly první zkušební dílce na světě.

U těchto vzorových dílců bylo provedeno měření změny tvaru a smrštění oproti 3D modelům. Měření zvolené veličiny bylo provedeno pomocí digitálního posuvného měřidla, nebo mikrometru v několika místech a dle průměrné hodnoty byla upravena geometrie funkční částí rámu.

Navržený systém spojů pomocí pružných kolíků byl testován s různou geometrií kolíku (změny v průřezu – vnější průměr, tloušťka stěny), a různými průměry děr. Výsledkem těchto zkoušek je otvor v rámu o průměru 12,2 mm, přičemž dojde ke smrštění až na 11,8 mm. Proto jsou všechny otvory v rámu převrtány vrtákem na průměr 12 mm. Pružné kolíky jsou vyrobeny ve dvou variantách. Prvním typem je montážní kolík, pevnost spoje je minimální a spoj lze rozebrat aplikací malé síly. Tento typ je určen pro předběžnou montáž. Druhým typem je pružný kolík, který má vnější průměr ve volném stavu 13 mm. V případě potřeby je možné tyto spoje pojistit lepidlem.

10.2 Budoucí vývoj

Navržené zařízení se aktuálně při výrobě a montáži neustále upravuje, tak aby byla zajištěna bezporuchová funkčnost.

Mezi další prvky, které by v blízké budoucnosti mohly být k navrženému elektrospinneru přidány jsou:

- úprava vlhkosti prostředí,
- energo řetězy,
- vysokorychlostní kamera.

V případě splnění požadavku řízení vlhkosti prostředí, by musely být krycí desky i víka kvalitně zaizolovány a. Alternativní variantou je vložení celého zařízení do boxu s funkcí úpravy vlhkosti. Vhodné zařízení pro úpravu vzdušné vlhkosti je velmi nákladné, proto zatím nebylo do návrhu zahrnuto. Částečná úprava vlhkosti v pracovním prostředí je možná přívodem díky přívodu upraveného vzduchu z centrálního rozvodného systému budovy. Pro výzkum vlivu vlhkosti prostředí na morfologii vláken je vhodné tuto veličinu měřit.

Pokud by při pohybu pracovních os docházelo k poškozování kabelů, nebo jejich kolizím, musely by veškeré vodiče připojené na pohyblivé části být uloženy ve vodících kanálech (tzv. energo řetězech). V tomto návrhu konstrukčního řešení nebyly energo řetězy aplikovány. Důvodem je relativně krátký zdvih pracovních os a nepředpokládá se nepřetržitý provoz.

Vysokorychlostní kamerou by bylo možné zkoumat chování polymerního proudu v závislosti na změně různých procesních parametrů.

ZÁVĚR

Teoretická část této diplomové práce byla zaměřena na studii základní problematiky a principů metody pro výrobu mikro a nanovláken metodou zvanou Elektrospinning. Z dostupné literatury byla zjištěna velká perspektiva této technologie a to především v oblasti medicíny a v oblasti filtračních systémů. Výzkumy dokazují mnoho výhod a aplikací takto zpracovaných materiálů, přesto je ale známo, že je tato technologie v mnoha směrech stále neprobádaná. Z tohoto důvodu bylo přistoupeno k návrhu vlastního zařízení, které bude vyhovovat požadovaným parametrům a zároveň bude umožněn jeho budoucí vývoj, na základě budoucího výzkumu.

Po řadě konzultací s odborníky na tuto problematiku, tedy výzkumnými pracovníky v oblasti materiálového inženýrství, byl sestaven seznam požadovaných parametrů, nezbytných pro návrh stroje. Už samotná návrhová část prošla značným vývojem (na teoretické úrovni) a výsledná podoba celého zařízení byla vybrána z několika přednesených variant.

Praktická část této práce popisuje vlastní návrh zařízení, které je specializované pro tvorbu velmi tenkých a dlouhých struktur (=vláken) z polymerního roztoku. Navržené zařízení disponuje čtyřmi pracovními osami (X, Y, Z1, Z2), z nichž jsou osy X a Y řízeny počítačové, zatím co osy Z1 a Z2 jsou řízeny manuálně. Bylo navrženo několik systémů vytlačovacích hlav a kolektorů. Osu X je možné osadit libovolným rotačním kolektorem, který je součástí návrhu. Pro řízené vytlačování polymerního roztoku byl navržen systém extrudéru. Mezi další samostatné systémy se řadí úprava přivedeného vzduchu a vlastní mírné odsávání za účelem úpravy klimatu pracovního prostředí stroje. Při konstrukci strojních prvků byl kladen důraz na využití technologie 3D tisku z polymerních materiálů.

Kromě návrhu byla dokončena část výroby komponent navrženého zařízení. Z tohoto důvodu byl při konstrukční části brán ohled na vyrobitelnost součástí a jejich správnou funkci.

K ovládání zařízení je určen před-programovaný dotykový displej. Veškerá problematika týkající se elektroniky a softwaru byla konzultována se společností, která se dlouhodobě zabývá řídicími systémy. Stejná firma obstará zhotovení a zapojení celého elektronického systému a jeho seřízení, dle zadaných požadavků.

Tento dokument bude dále díky detailnímu popisu jednotlivých komponent použit pro tvorbu návodu k obsluze zařízení. Návrh konstrukčního řešení proběhl v software Autodesk Inventor Professional 2017.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Deitzel JM, Kleinmeyer J, Hirvonen JK, BeckTNC. Controlled deposition of electrospun poly(ethylene oxide) fibers. *Polymer* 2001;42:8163–70.
- [2] Fong H, Reneker DH. Electrospinning and formation of nanofibers. In: Salem DR, editor. *Structure formation in polymeric fibers*. Munich: Hanser; 2001. p. 225–46.
- [3] Fang X, Reneker DH. DNA fibers by electrospinning. *J Macromolecular Sci-Phys* 1997;B36:169–73.
- [4] Taylor GI. Electrically driven jets. *Proc R Soc London, Ser A* 1969;313:453–75.
- [5] Huang, Zheng-Ming & Zhang, Yanzhong & Kotaki, Masaya & Ramakrishna, S. (2003). A Review on Polymer Nanofibers by Electrospinning and Their Applications in Nanocomposites. *Composites Science and Technology*. 63. 2223-2253. 10.1016/S0266-3538(03)00178-7.
- [7] Bhardwaj, Nandana & Kundu, Subhas. (2010). Bhardwaj, N. & Kundu, S. C. Electrospinning: a fascinating fiber fabrication technique. *Biotech. Adv.* 28, 325-347. *Biotechnology advances*. 28. 325-47. 10.1016/j.biotechadv.2010.01.004.
- [8] Chong, E.J. & Phan, T.T. & Lim, I.J. & Zhang, Yanzhong & Bay, B.H. & Ramakrishna, S & Lim, C.T.. (2007). Evaluation of electrospun PCL/gelatin nanofibrous scaffold for wound healing and dermal reconstitution. *Acta biomaterialia*. 3. 321-30. 10.1016/j.actbio.2007.01.002.
- [9] Sukigara, Sachiko & Gandhi, Milind & Ayutsede, Jonathan & Micklus, Michael & Ko, Frank. (2003). Regeneration of Bombyx mori silk by electrospinning - Part 1: Processing parameters and geometric properties. *Polymer*. 44. 5721-5727. 10.1016/S0032-3861(03)00532-9.
- [10] A.K., Haghi & Akbari, M. (2007). Trends in electrospinning of natural nanofibers. *physica status solidi (a)*. 204. 1830 - 1834. 10.1002/pssa.200675301.

- [11] Tan, S. -H., Inai, R., Kotaki, M., Ramakrishna, S., Ramkumar, S. S., Samuelson, L. A., & Lyoo, W. S. (2005). Systematic parameter study for ultra-fine fiber fabrication via electrospinning process: solving global issues [Online]. *Polymer*, 46(16), 6128-6134. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2005.05.068>.
- [12] Gupta, P., Elkins, C., Long, T. E., & Wilkes, G. L. (2005). Electrospinning of linear homopolymers of poly(methyl methacrylate): exploring relationships between fiber formation, viscosity, molecular weight and concentration in a good solvent [Online]. *Polymer*, 46(13), 4799-4810. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2005.04.021>
- [13] Hohman, M. M., Shin, M., Rutledge, G., & Brenner, M. P. (2001). Electrospinning and electrically forced jets. II. Applications [Online]. *Physics Of Fluids*, 13(8), 2221-2236. <https://doi.org/10.1063/1.1384013>
- [14] K Baumgarten, Peter. (1971). Electrostatic Spinning of Acrylic Microfibers. *Journal of Colloid and Interface Science - J COLLOID INTERFACE SCI.* 36. 71-79. [10.1016/0021-9797\(71\)90241-4](https://doi.org/10.1016/0021-9797(71)90241-4).
- [15] Zhang, C., Yuan, X., Wu, L., Han, Y., Sheng, J., Chu, B., & Lyoo, W. S. (2005). Study on morphology of electrospun poly(vinyl alcohol) mats: An investigation by response surface methodology [Online]. *European Polymer Journal*, 41(3), 423-432. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2004.10.027>.
- [16] Yördem, O. S., Papila, M., Menciloğlu, Y. Z., Okamoto, A., Hsiao, B. S., Chu, B., & Lyoo, W. S. (2008). Effects of electrospinning parameters on polyacrylonitrile nanofiber diameter: An investigation by response surface methodology [Online]. *Polymer International*, 29(1), 34-44. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.12.013>.
- [17] Yuan, X., Zhang, Y., Dong, C., Sheng, J., Hsiao, B. S., Chu, B., & Lyoo, W. S. (2004). Morphology of ultrafine polysulfone fibers prepared by electrospinning: An investigation by response surface methodology [Online]. *Polymer International*, 53(11), 1704-1710. <https://doi.org/10.1002/pi.1538>.
- [18] Wannatong, L., Sirivat, A., Supaphol, P., Okamoto, A., Hsiao, B. S., Chu, B., & Lyoo, W. S. (2004). Effects of solvents on electrospun polymeric fibers: preliminary study on polystyrene [Online]. *Polymer International*, 53(11), 1851-1859. <https://doi.org/10.1002/pi.1599>.

- [19] Wang, X., Um, I. C., Fang, D., Okamoto, A., Hsiao, B. S., Chu, B., & Lyoo, W. S. (2005). Formation of water-resistant hyaluronic acid nanofibers by blowing-assisted electro-spinning and non-toxic post treatments: solving global issues [Online]. *Polymer*, 46(13), 4853-4867. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2005.03.058>.
- [20] Lee, J. S., Choi, K. H., Ghim, H. D., Kim, S. S., Chun, D. H., Kim, H. Y., & Lyoo, W. S. (2004). Role of molecular weight of atactic poly(vinyl alcohol) (PVA) in the structure and properties of PVA nanofabric prepared by electro-spinning [Online]. *Journal Of Applied Polymer Science*, 93(4), 1638-1646. <https://doi.org/10.1002/app.20602>.
- [21] Geng, X., Kwon, O., & Jang, J. (2005). Electrospinning of chitosan dissolved in concentrated acetic acid solution [Online]. *Biomaterials*, 26(27), 5427-5432. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2005.01.066>
- [22] Ki, C. S., Baek, D. H., Gang, K. D., Lee, K. H., Um, I. C., & Park, Y. H. (2005). Characterization of gelatin nanofiber prepared from gelatin-formic acid solution [Online]. *Polymer*, 46(14), 5094-5102. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2005.04.040>.
- [23] Cappello, Joseph & Mcgrath, Kevin. (1993). Spinning of Protein Polymer Fibers. *Silk Polymers*. 544. 311-327. [10.1021/bk-1994-0544.ch026](https://doi.org/10.1021/bk-1994-0544.ch026).
- [24] Burger, Christian & Hsiao, Benjamin & Chu, Benjamin. (2006). Nanofibrous Materials and Their Applications. *Annu. Rev. Mater. Res.* 36. 333-368. [10.1146/annurev.matsci.36.011205.123537](https://doi.org/10.1146/annurev.matsci.36.011205.123537).
- [25] Langer, R., Vacanti, J., Gang, K. D., Lee, K. H., Um, I. C., & Park, Y. H. (1993). Tissue engineering [Online]. *Science*, 260(5110), 920-926. <https://doi.org/10.1126/science.8493529>.
- [26] Nerem, R. M., Sambanis, A., Caterson, E. J., Tuan, R. S., Ko, F. K., Kim, H. Y., & Lyoo, W. S. (1995). Tissue Engineering: From Biology to Biological Substitutes [Online]. *Tissue Engineering*, 1(1), 3-13. <https://doi.org/10.1089/ten.1995.1.3>.
- [27] Lee, E. J., Kasper, F. K., & Mikos, A. G. (2014). Biomaterials for Tissue Engineering [Online]. *Annals Of Biomedical Engineering*, 42(2), 323-337. <https://doi.org/10.1007/s10439-013-0859-6>.

- [28] HE, W., HORN, S., & HUSSAIN, M. (2007). Improved bioavailability of orally administered mifepristone from PLGA nanoparticles [Online]. *International Journal Of Pharmaceutics*, 334(1-2), 173-178.
<https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2006.10.025>.
- [29] Friess, W., & Pinto, D. (1998). Collagen – biomaterial for drug delivery1Dedicated to Professor Dr. Eberhard Nürnberg, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, on the occasion of his 70th birthday.1: A Revolution in Biological and Medical Sciences [Online]. *European Journal Of Pharmaceutics And Biopharmaceutics*, 45(2), 113-136. [https://doi.org/10.1016/S0939-6411\(98\)00017-4](https://doi.org/10.1016/S0939-6411(98)00017-4).
- [30] Li, W. -J., Laurencin, C. T., Caterson, E. J., Tuan, R. S., Ko, F. K., Kim, H. Y., & Lyoo, W. S. (2002). Electrospun nanofibrous structure: A novel scaffold for tissue engineering [Online]. *Journal Of Biomedical Materials Research*, 60(4), 613-621.
<https://doi.org/10.1002/jbm.10167>.
- [31] Thomas S. (1990). Wound management and dressings. Pharm Presse; 1: 37-57.
- [32] Huang, Z. -M., He, C. -L., Yang, A., Zhang, Y., Han, X. -J., Yin, J., & Wu, Q. (2006). Encapsulating drugs in biodegradable ultrafine fibers through co-axial electrospinning [Online]. *Journal Of Biomedical Materials Research Part A*, 77A(1), 169-179. <https://doi.org/10.1002/jbm.a.30564>.
- [33] Kattamuri, N., Shin, J. H., Kang, B., Lee, C. G., Lee, J. K., & Sung, C. (2005). Development and surface characterization of positively charged filters [Online]. *Journal Of Materials Science*, 40(17), 4531-4539.
<https://doi.org/10.1007/s10853-005-2803-0>.
- [34] Ramakrishna, S., Fujihara, K., Teo, W. -E., Yong, T., Ma, Z., Ramaseshan, R., & Lyoo, W. S. (2006). Electrospun nanofibers: solving global issues [Online]. *Materials Today*, 9(3), 40-50. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(06\)71389-X](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(06)71389-X).
- [35] Tsai, P. P., Schreuder-Gibson, H., Gibson, P., Ramakrishna, S., Ramkumar, S. S., Samuelson, L. A., & Lyoo, W. S. (2002). Different electrostatic methods for making electret filters: solving global issues [Online]. *Journal Of Electrostatics*, 54(3-4), 333-341. [https://doi.org/10.1016/S0304-3886\(01\)00160-7](https://doi.org/10.1016/S0304-3886(01)00160-7).
- [36] Subbiah, T., Bhat, G. S., Tock, R. W., Parameswaran, S., Ramkumar, S. S., Samuelson, L. A., & Lyoo, W. S. (2005). Electrospinning of nanofibers: solving global issues [Online]. *Journal Of Applied Polymer Science*, 96(2), 557-569.
<https://doi.org/10.1002/app.21481>.

- [37] Figeys, D., & Pinto, D. (2000). Lab-on-a-Chip: A Revolution in Biological and Medical Sciences [Online]. *Analytical Chemistry*, 72(9), 330 A-335 A. <https://doi.org/10.1021/ac002800y>.
- [38] Zhang, Y. -Q., Zhu, J., Gu, R. -A., Sheng, J., Hsiao, B. S., Chu, B., & Lyoo, W. S. (1998). Improved biosensor for glucose based on glucose oxidase-immobilized silk fibroin membrane: An investigation by response surface methodology [Online]. *Applied Biochemistry And Biotechnology*, 75(2-3), 215-233. <https://doi.org/10.1007/BF02787776>.
- [39] Gibson, P. W., Schreuder-Gibson, H. L., & Rivin, D. (1999). Electrospun fiber mats: Transport properties [Online]. *Aiche Journal*, 45(1), 190-195. <https://doi.org/10.1002/aic.690450116>.
- [40] Shreuder-Gibson HL, Gibson P, Senecal K, Sennett M, Walker J, Yeomans W, et al. (2002). Protective textile materials based on electrospun nanofibers. *J Adv Mater*; 34: 44-55.
- [41] Senecal, K. J., Ziegler, D. P., He, J., Mosurkal, R., Schreuder-Gibson, H., Samuelson, L. A., & Lyoo, W. S. (2001). Photoelectric Response from Nanofibrous Membranes: solving global issues [Online]. *Mrs Proceedings*, 708(3), 40-50. <https://doi.org/10.1557/PROC-708-BB9.5>.
- [42] Norris, I. D., Shaker, M. M., Ko, F. K., MacDiarmid, A. G., Ko, F. K., Kim, H. Y., & Lyoo, W. S. (2000). Electrostatic fabrication of ultrafine conducting fibers: polyaniline/polyethylene oxide blends [Online]. *Synthetic Metals*, 114(2), 109-114. [https://doi.org/10.1016/S0379-6779\(00\)00217-4](https://doi.org/10.1016/S0379-6779(00)00217-4).
- [43] Choi, S. W., Jo, S. M., Lee, W. S., & Kim, Y. -R. (2003). An Electrospun Poly(vinylidene fluoride) Nanofibrous Membrane and Its Battery Applications [Online]. *Advanced Materials*, 15(23), 2027-2032. <https://doi.org/10.1002/adma.200304617>.
- [44] Smith D, Reneker D, McManus A, Schreuder-Gibson H, Mello C, Sennet M, et al. (2001). Electrospun Fibers and an Apparatus Therefore. PCT International Application No: PCT/US00/27776.

- [45] Boland ED, WnekGE, Simpson DG, Palowski KJ, Bowlin GL. Tailoring tissue engineering scaffolds using electrostatic processing techniques: a study of poly(glycolic acid) electrospinning. *J Macromol Sci Pur Appl Chem* 2001;A38(12):1231–43.
- [46] Matthews JA, WnekGE, Simpson DG, Bowlin GL. Electrospinning of Collagen Nanofibers. *Biomacromolecules* 2002;3(2):232–8.
- [47] Bornat A. Production of electrostatically spun products. US Patent 4689186. 1987.
- [48] Berry JP. US patent 4965110, 1990.
- [49] Theron A, Zussman E, Yarin AL. Electrostatic field-assisted alignment of electrospun nanofibres. *Nanotechnology* 2001;12:384–90.
- [50] Jaeger R, SchO"nherr H, Vancso GJ. Chain packing in electrospun poly(ethylene oxide) visualized by atomic force microscopy. *Macromolecules* 1996;29:7634–6.
- [51] Bognitzki M, Czado W, Frese T, Schaper A, Hellwig M, Steinhart M, et al. Nanostructured fibers via electrospinning. *Adv Mater* 2001;13:70–2.
- [56] Bakalářská práce, Návrh CNC laseru pro dělení a gravírování materiálů, Pavel Miňák 2016, UTB.

Internetové zdroje obrázků a literatury

- [6] Wikipedia. [online]. [cit. 2019-01-05].
< <https://en.wikipedia.org/wiki/Electrospinning> >
- [52] Ineco. [online] [cit. 2016-11-05].
< <https://www.in-eco.cz/prutokomery/model-lb-89/> >
- [53] Weintek. [online] [cit. 2016-06-05].
< <https://www.weintek.cz/pdf/MT8070iE.pdf> >

- [54] CNC Shop. [online] [cit. 2016-06-05].
< <http://www.cncshop.cz/57hs22-krokovy-2-fazovy-motor-2-2nm> >
- [55] Reoamos. [online] [cit. 2016-06-05].
< <https://www.reoamos.cz/znacka-vystrahy-vystraha-riziko-urazu-elektrickym-proudem> >
- [57] Uni-max. [online]. [cit. 2016-05-05].
< <https://www.uni-max.cz/produkty/vybaveni-dilen/meridla/digitalni-odmerovaci-systemy/digitalni-meritka-delky> >

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

mm milimetr

μm mikrometr

N Newton

Nm Newton metr

nm Nanometr

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1. Schéma zařízení pro výrobu nanovláken.</i>	14
<i>Obrázek 2. Přejod z tvaru kapky na kužel a následná tvorba vlákna. [6]</i>	15
<i>Obrázek 3. Schématické zobrazení kolektoru v podobě rotujícího válce.</i>	21
<i>Obrázek 4. Obvodově zarovnaná vlákna Collagenu při 4500 ot/min.[5]</i>	22
<i>Obrázek 5. Obvodově zarovnaná vlákna PGA při 1000 ot/min. [5]</i>	22
<i>Obrázek 6. Zařízení pro úpravu elektrického pole při elektrospinningu.</i>	23
<i>Obrázek 7. Zařízení pro úpravu elektrického pole při elektrospinningu.</i>	24
<i>Obrázek 8. Uspořádání vláken bez asistence pomocných elektrod. [5]</i>	24
<i>Obrázek 9. Uspořádání vláken s asistencí pomocných elektrod. [5]</i>	25
<i>Obrázek 10. Schéma a trajektorie polymerního roztoku v případě kolektoru ve tvaru úzkého rotujícího kola.</i>	25
<i>Obrázek 11. Uspořádání vláken z polymeru PEO na špičce kolektoru. [49]</i>	26
<i>Obrázek 12. Schématické uspořádání rámového kolektoru.</i>	27
<i>Obrázek 13. Rozdíl v uspořádání vláken při využití rámového kolektoru vyrobeného ze dřeva (a) a z hliníku (b).</i>	27
<i>Obrázek 14. Rotující rámový kolektor. [5]</i>	27
<i>Obrázek 15. Schéma zařízení pro elektrospinning nanovláken za podpory několikanásobného elektrického pole. [1]</i>	28
<i>Obrázek 16. Výsledná struktura nanovláken při využití principu několikanásobného pole. [1]</i>	28
<i>Obrázek 17. AFM obrázek elektrospinnovaných vláken z materiálu PEO. [50]</i>	30
<i>Obrázek 18. Snímek nanovláken o různých průměrech vlákna a velikosti pórů. [51]</i>	30
<i>Obrázek 19 Sestava navrhovaného zařízení s hlavními rozměry.</i>	42
<i>Obrázek 20 Trojrozměrný pohled na kompletní rámovou konstrukci.</i>	43
<i>Obrázek 21 Řez rámovou konstrukcí a profil pružného spojovacího kolíku.</i>	44
<i>Obrázek 22 Pracovní osy navrhovaného zařízení.</i>	45
<i>Obrázek 23 Uložení lineárních vedení do rámu stroje.</i>	46
<i>Obrázek 24 Popis osy X.</i>	47
<i>Obrázek 25 Graf závislosti kroutičeho momentu na počtu otáček za minutu motoru 57HS22. [54]</i>	49
<i>Obrázek 26 Popis osy Y.</i>	50

<i>Obrázek 27</i>	<i>Manuálně ovládané osy Z.</i>	52
<i>Obrázek 28</i>	<i>Digitální odměřovací systém s napájením pomocí baterií. [57]</i>	53
<i>Obrázek 29</i>	<i>Možné zásobníky polymerního roztoku a jejich pouzdra.</i>	55
<i>Obrázek 30</i>	<i>Sestava extrudéru s popisem.</i>	56
<i>Obrázek 31</i>	<i>Řez jednoduchou vytlačovací hlavou.</i>	59
<i>Obrázek 32</i>	<i>Částečný řez koextruzní vytlačovací hlavou.</i>	59
<i>Obrázek 33</i>	<i>Částečný řez více-štěrbinovou vytlačovací hlavou.</i>	60
<i>Obrázek 34</i>	<i>3D pohled na deskový kolektor.</i>	61
<i>Obrázek 35</i>	<i>Popis tyčového kolektoru.</i>	62
<i>Obrázek 36</i>	<i>Instalace bajonetového držáku kolektoru.</i>	62
<i>Obrázek 37</i>	<i>Stůl osy x s popiskama.</i>	63
<i>Obrázek 38</i>	<i>Rotační kolektor válcového typu s pohonem.</i>	64
<i>Obrázek 39</i>	<i>Rotační kolektor diskového typu.</i>	65
<i>Obrázek 40</i>	<i>Sestava stroje osazeného vytlačovací hlavou a kolektorem.</i>	65
<i>Obrázek 41</i>	<i>Návrh rotačního tyčového kolektoru.</i>	66
<i>Obrázek 42</i>	<i>3D pohled na krycí desky v uzavřeném stavu.</i>	67
<i>Obrázek 43</i>	<i>3D pohled na krycí desky v otevřeném stavu.</i>	67
<i>Obrázek 44</i>	<i>Pohled na navržený pant a zámek víka.</i>	68
<i>Obrázek 45</i>	<i>Upínka dělicí přepážky a úprava rámu pro upnutí krycích desek.</i>	69
<i>Obrázek 46</i>	<i>Zdroj vysokého napětí Spellman typu SL70PM150.</i>	70
<i>Obrázek 47</i>	<i>Návrh průtokového ohříváče vzduchu.</i>	71
<i>Obrázek 48</i>	<i>Laboratorní průtokoměr LB/89 od společnosti Ineco. [52]</i>	72
<i>Obrázek 49</i>	<i>Náhled na pozici odsávání.</i>	73
<i>Obrázek 50</i>	<i>Náhled na pozici osvětlovacích led pásků.</i>	73
<i>Obrázek 51</i>	<i>Bezpečnostní prvek horního a spodního víka.</i>	74
<i>Obrázek 52</i>	<i>Značka upozorňující na nebezpečí zranění elektrickým proudem. [55]</i>	74
<i>Obrázek 53</i>	<i>Displej řídicího systému typu MT8070iE od společnosti Weintek. [53]</i>	76
<i>Obrázek 54</i>	<i>Krokový elektromotor typu 57HS22 a řídicí jednotka typu EM705 od společnosti Leadshine. [54]</i>	76
<i>Obrázek 55</i>	<i>Trojrozměrný pohled na sestavu zařízení.</i>	77
<i>Obrázek 56</i>	<i>Trojrozměrný pohled na hlavní prvky navrženého zařízení.</i>	77
<i>Obrázek 57</i>	<i>Deformace rámu při 3D tisku z materiálu ABS.</i>	78

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Perspektivní aplikace vybraných materiálů [5].</i>	31
---	----

SEZNAM PŘÍLOH

P1: CD disk, který obsahuje tuto práci v elektronické podobě. Dále disk obsahuje sestavu stroje ve formátu step a složku souborů pro Inventor 2017 a vyšší verze.