



Bakalářská práce

Konstrukce jádrové zvlákňovací elektrody

Studijní program:

B0715A270008 Strojírenství

Autor práce:

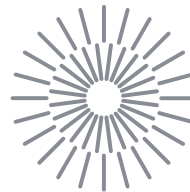
Vít Šantrůček

Vedoucí práce:

Ing. Ondřej Bařka, Ph.D.

Katedra textilních a jednoúčelových strojů

Liberec 2024



Zadání bakalářské práce

Konstrukce jádrové zvlákňovací elektrody

Jméno a příjmení:

Vít Šantrůček

Osobní číslo:

S20000191

Studijní program:

B0715A270008 Strojírenství

Zadávající katedra:

Katedra textilních a jednoúčelových strojů

Akademický rok:

2023/2024

Zásady pro vypracování:

1. Provedte rešerši v oblasti electrospinningu a zvlákňovacích elektrod pro AC-electrospinning.
2. Navrhněte konstrukci elektrody pro výrobu jádrové nanopříze.
3. Vypracujte výrobní dokumentaci.
4. Podle možností proveďte experimentální ověření funkčnosti.

<i>Rozsah grafických prací:</i>	10
<i>Rozsah pracovní zprávy:</i>	35
<i>Forma zpracování práce:</i>	tištěná/elektronická
<i>Jazyk práce:</i>	čeština

Seznam odborné literatury:

- [1] POKORNÝ, Pavel. Analýza procesu elektrostatického zvlákňování a možnosti jeho řízení. 2011.
- [2] LUKÁŠ, David. Nanovlákná : teorie, technologie a použití. Vydání první. B.m.: Academia, 2023. Gerstner. ISBN 978-80-200-3400-7.
- [3] XUE, Jiajia, Tong WU, Yunqian DAI a Younan XIA. Electrospinning and Electrospun Nanofibers: Methods, Materials, and Applications. Chemical Reviews [online]. 2019, 119(8), 5298–5415. ISSN 0009-2665. Dostupné z: doi:10.1021/acs.chemrev.8b00593
- [4] BAŤKA, Ondřej. Zvlákňovací elektrody pro AC-electrospinning. Liberec, 2023. Disertační práce. TUL.
- [5] JÍRA, Martin. Zvlákňovací elektroda s integrovaným systémem dodávky polymerního roztoku při elektrickém zvlákňování [online]. B.m., 2019 [vid. 2022-08-22]. b.n. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/152162>
- [6] SOUČEK, J., J. VALTERA a T. KALOUS. Electrode for continuous production of composite nanofiber material using ac-electrospinning method. In: NANOCON 2017 – Conference Proceedings, 9th International Conference on Nanomaterials – Research and Application. 2018, s. 378–383.

Vedoucí práce: Ing. Ondřej Baťka, Ph.D.
Katedra textilních a jednoúčelových strojů

Datum zadání práce: 21. listopadu 2023
Předpokládaný termín odevzdání: 31. května 2025

L.S.

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
děkan

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
garant studijního programu

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

Konstrukce jádrové zvlákňovací elektrody

Anotace

Bakalářská práce se zaměřuje na vývoj a experimentální ověření jádrové zvlákňovací elektrody pro AC electrospinning. Vyvinutá elektroda umožňuje realizovat novou technologii výroby jádrové nanovlákněné příze. V práci je představen postup návrhu konstrukce jádrové elektrody a také experimentální ověření její funkčnosti. Navržená elektroda byla úspěšně použita při výrobě jádrové nanopříze.

Klíčová slova

Jádrová nanopříze, nanovlákněná, electrospinning, AC-electrospinning, zvlákňovací elektroda

Construction of the core spinning electrode

Annotation

The bachelor's thesis focuses on the development and experimental verification of a core spinning electrode for AC electrospinning. The developed electrode enables a new technology for producing core nanofiber yarn. The thesis presents the design process of the core electrode's construction as well as the experimental verification of its functionality. The proposed electrode was successfully used in the production of core nanoyarn.

Key words

Core nanoyarn, nanofibers, electrospinning, AC-electrospinning, Spinning electrode

Obsah

1	Úvod.....	9
2	Definice nanovlákn.....	10
3	Metody výroby nanovláken.....	11
3.1	Odstředivé zvlákňování	11
3.2	Rozfuk kapaliny.....	11
3.3	Rozfuk taveniny.....	12
4	Elektrostatické zvlákňování	13
4.1	Historie elektrostatického zvlákňování	13
4.2	DC electrospining.....	13
4.2.1	Jehlová elektroda.....	13
4.2.2	Bezjehlové elektrody.....	14
4.2.3	Strunová elektroda.....	15
4.3	AC electrospining.....	15
4.3.1	Přeplovací elektroda	16
4.3.2	Bikomponentní elektrody.....	17
4.3.3	Elektroda pro výrobu koaxiálních nanovláken.....	18
5	Současný stav výroby jádrové nanopříze	20
6	Návrh elektrody.....	21
6.1	Požadavky na navrhovanou elektrodu.....	21
6.2	Technologie použité pro výrobu	22
6.3	Materiál pro výrobu elektrody.....	22
6.4	Koncepce návrhu	23
6.5	Hlava elektrody.....	24
6.5.1	Třítrubkový systém	24
6.5.2	Dvoutrubkový systém bez těsnění.....	25
6.5.3	Dvoutrubkový systém s těsněním	26

6.6	Stopka elektrody	26
6.7	Základna elektrody	27
7	Experimentální ověření funkčnosti	29
7.1	Ověření funkčnosti elektrody	29
7.2	První test výroby nanovláken	29
7.2.1	Přeplovací test	30
7.2.2	Zvlákňovací test	31
7.3	Shrnutí testu výroby nanovláken	33
7.4	Optimalizace tvaru elektrody.....	33
7.5	Zvlákňovací test modifikovaných elektrod	34
7.5.1	Elektroda A modifikovaná.....	34
7.5.2	Elektroda B.....	35
7.5.3	Elektroda C.....	35
7.5.4	Elektroda D	36
7.6	Výroba jádrové nanopříze	36
8	Závěr.....	40
9	Zdroje	41
10	Seznam příloh.....	43

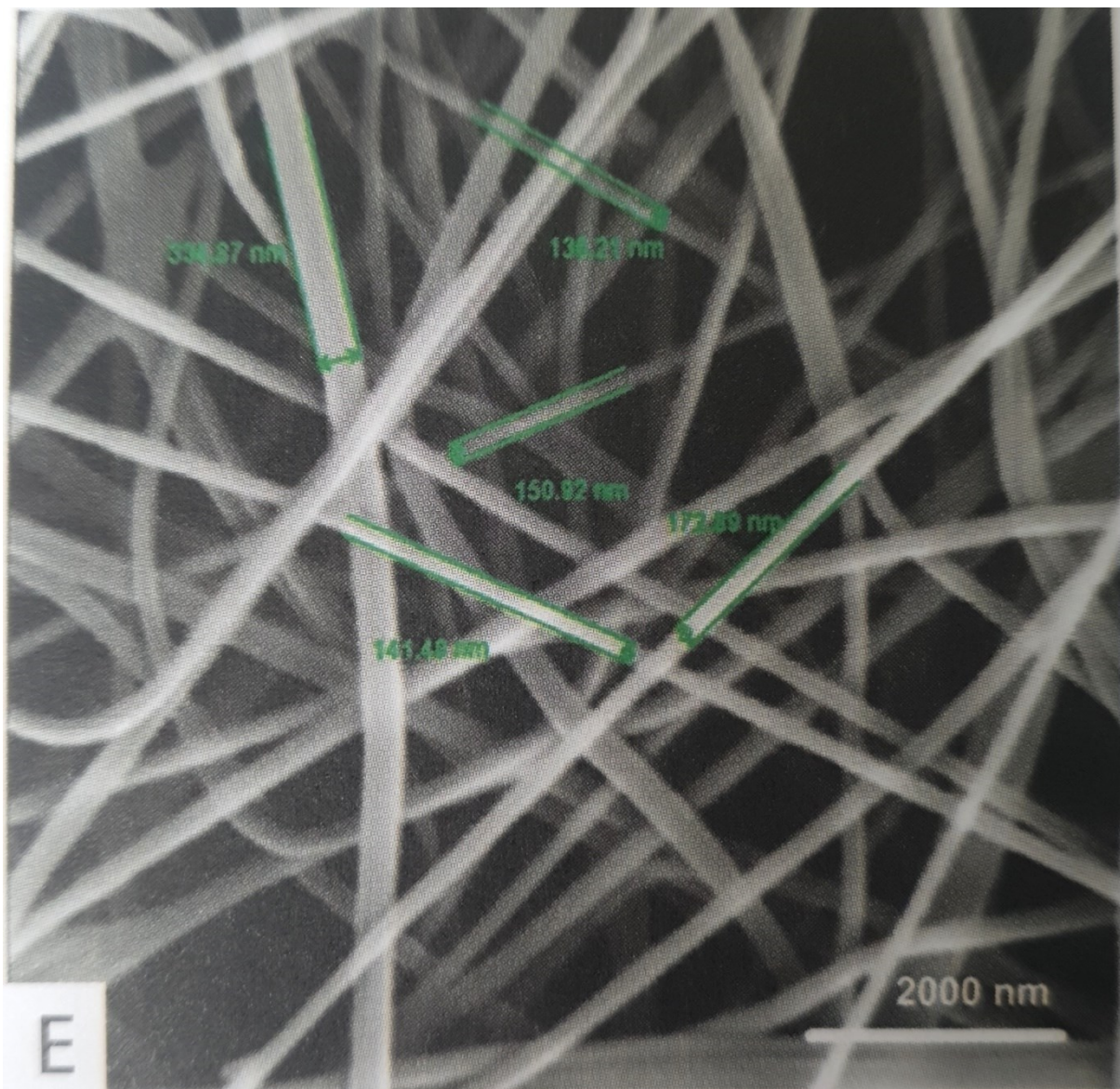
1 Úvod

V současné době patří electrospinning k nejčastěji používaným metodám výroby nanovláken a nanovlákných struktur. Jednou z takových struktur je jádrová nonovlákná příze vyvinutá na Technické univerzitě v Liberci [1]. Její potenciál spočívá například ve výrobě svíčkových filtrů obohacených funkčními částicemi [2], nebo v medicínských aplikacích.

Tato práce se bude zabývat návrhem jádrové elektrody pro AC electrospining, umožňující provozování nové technologie výroby jádrové nanovlákné příze. Současná metoda výroby jádrových nanovláken je popsána v patentu [1]. Tato metoda využívá přeplavovací elektrody pro AC-electrospinning, příze, na kterou jsou nanovlákná zachytávána, balonuje nad elektrodou. Nový návrh popsáný v této práci umožňuje výrobu jádrové nanopříze podélně se směrem vláken, na rozdíl od současně používané technologie. Podélná výroba by měla umožnit pravidelnější a pevnější navinutí nanovláken na přízi. Vedení příze středem zvláknovací elektrody s sebou přináší řadu konstrukčních a technologických komplikací, jejich řešení je součástí této práce.

2 Definice nanovláknna

Pojem nanovláknno je složen ze dvou slov, *nano* neboli 10^{-9} označující rozměr v soustavě SI a *vlákno*, běžně chápané jako tenké a velmi dlouhé poddajné těleso. Nanovláknno je tedy velmi tenké vlákno, které má průměr řádově jednotky až stovky nanometrů. Protože takto tenká vlákna nelze pozorovat optickým mikroskopem, můžeme se setkat i s definicí: „*Vlákna, která nelze pozorovat optickým mikroskopem lze považovat za nanovláknna.*“ Roger Champman uvádí [3]: „*Nanovláknna jsou obvykle válcovité struktury s vnějším průměrem pod 1000 nm a délkovým poměrem A_r větším než 50.*“

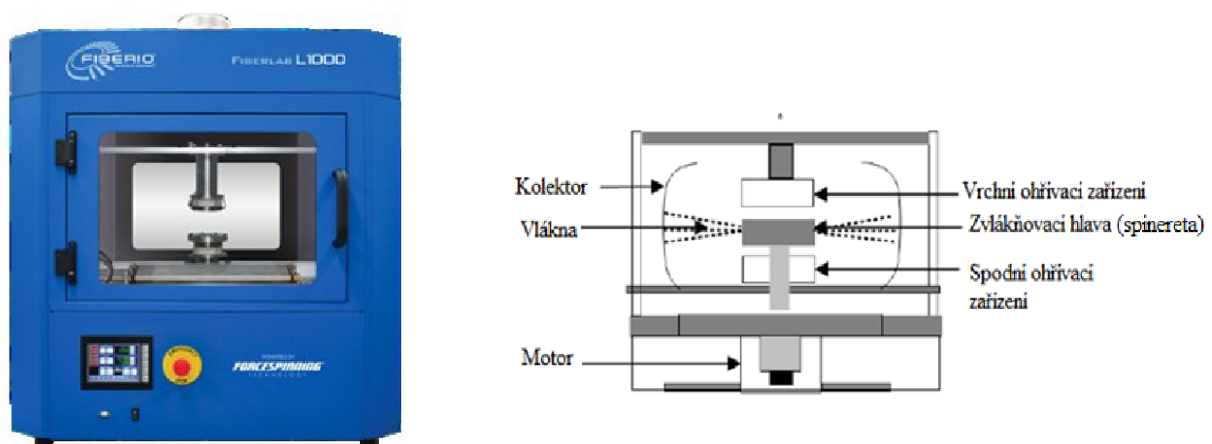


Obrázek 1 Snímek nanovláknenné vrstvy z rastrovacího elektronového mikroskopu, převzato z [4]

3 Metody výroby nanovláken

3.1 Odstředivé zvlákňování

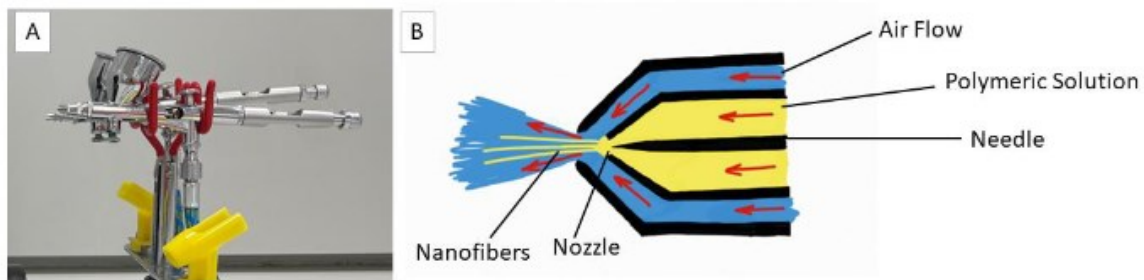
Metoda odstředivého zvlákňování využívá mechanických sil pro výrobu nanovláken. Tato metoda je dobře známá pro výrobu cukrové vaty z taveniny cukru. Princip této technologie spočívá v dávkování roztoku na rotující zvlákňovací hlavu. Metodu lze rozdělit na dvě základní uspořádání, kapilární (označované též jako jehlové) a bezjehlové. [4] Výhodou této technologie je její jednoduchost, kdy je možné vyrábět nanovlákná za využití mechanické práce, bez potřeby zdroje vysokého napětí jako u electrospiningu. Díky tomu je možné vytvořit mobilní zvlákňovače kompaktních rozměrů. [5]



Obrázek 2 Zařízení pro odstředivé zvlákňování a popis jeho částí, převzato z [5]

3.2 Rozfuk kapaliny

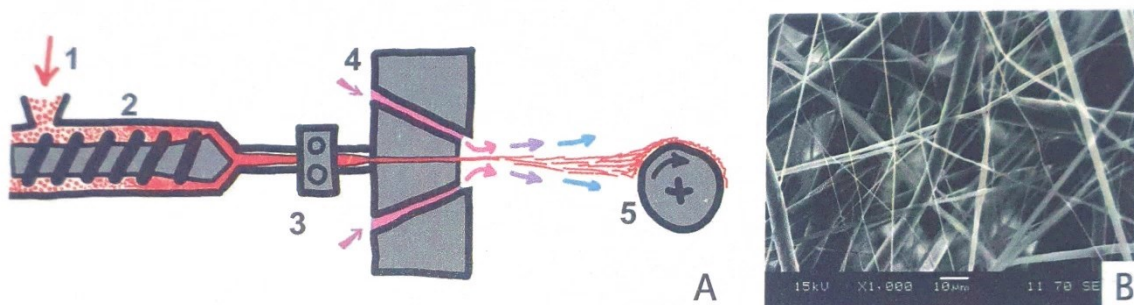
Metoda rozfuku kapaliny (air-jet spinning) funguje obdobně, jako airbrush, kapka roztoku je unášena proudem vzduchu. V případě barvy vzduch atomizuje kapku barvy, v případě roztoku polymeru proud vzduchu začne z kapky vytahovat nanovlákná. Pro tuto metodu lze použít komerčně dostupné airbrushy. Metoda umožňuje jednoduchou a bezpečnou aplikaci nanovláken. Její budoucí užití můžeme spatřit v nanovlákných náplastech, kde nanovlákná mohou být aplikována přímo na poraněné místo. [4, 6]



Obrázek 3 A) Airbrush uchycený v držáku po výrobu nanovláken, B) Schéma technologie rozfuk kapaliny převzato z [6]

3.3 Rozfuk taveniny

Metoda rozfuku polymerní taveniny (meltblown) je vysoce produktivní metoda pro výrobu netkaných textilií z mikrovláken. [4] Tavenina je obdobně jako při extruzi termoplastu vytlačována skrz extruzní hlavu, zde lze využít pojem tryska. Kolem trysky proudí vysokou rychlostí ohřátý vzduch. Vytvořená vlákna se nejčastěji ukládají na rotující válec.



Obrázek 4 A) Rozfuk taveniny polymeru schéma 1)granulát polymeru, 2) tavicí extruder, 3) čerpadlo, 4) ohřátý vzduch proudící spolu s roztaveným polymerem zvláknovací tryskou, 5) vlákněný materiál je zachytáván na perforovaný buben, B) snímek z rastrovacího elektronového mikroskopu materiálu vyrobeného technologií meltblown, převzato z [4]

4 Elektrostatické zvlákňování

4.1 Historie elektrostatického zvlákňování

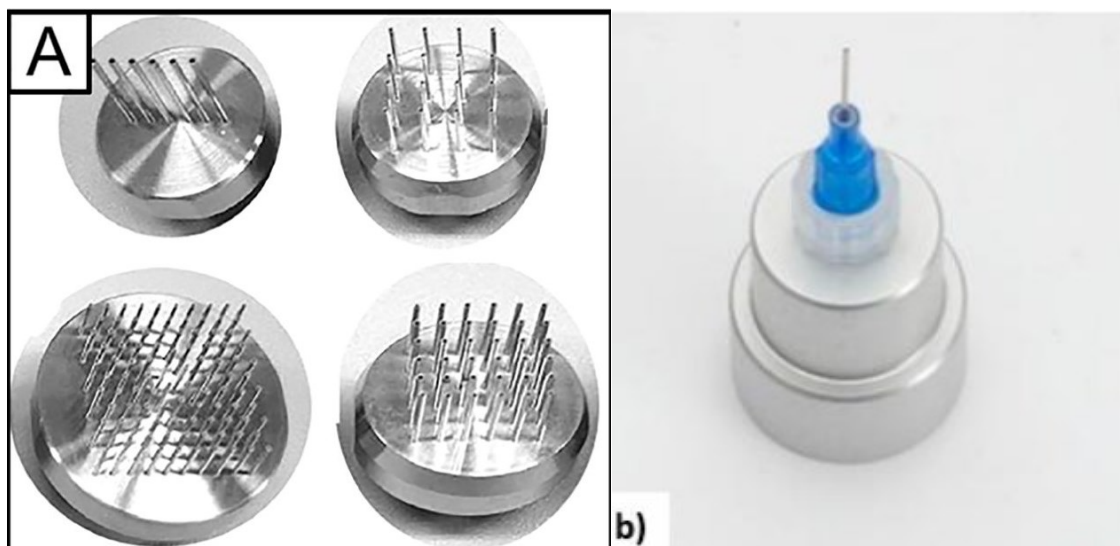
První zmínku o elektrostatickém zvlákňování nalezneme v patentech z počátku 20. století. Vynálezci W. J. Morton a J. F. Cooley ve svých patentech popisují využití vysokého napětí k rozptýlení polymerního roztoku. Zjistili, že při použití želatinového roztoku o vysoké viskozitě nebo kolodia se začínají mezi elektrodami oddělovat velmi rychle vysychající tenká vlákna. Pokud je do procesu dodáván roztok plynule, proces tvorby vláken nekončí. Je potřeba je nějakým způsobem navíjet a dále zpracovávat. [7, 8] Tyto metody však nenašly průmyslové využití. Na počátku 20. století nebylo možné optickým mikroskopem změřit průměr vláken a zatím se pro takováto nanovlákna nenašlo využití. První průmyslové využití technologie electrospinning můžeme najít v Sovětském svazu během druhé světové války při výrobě filtrů do vojenských masek. [9]

4.2 DC electrospinning

Tato metoda umožňuje vyrábět nanovlákna za použití stejnosměrného proudu vysokého napětí (běžně desítky kilovoltů). Zvlákňování probíhá na zvlákňovací elektrodě a nanovlákna jsou ukládána na kolektor. Mezi zvlákňovací elektrodou a kolektorem musí být rozdíl potenciálů, běžně má zvlákňovací elektroda kladný náboj a kolektor záporný. Rám zařízení je uzemněn. Vytvořená nanovlákna se nejčastěji ukládají na povrch netkané textilie, která je průběžně odvíjena. Základ této metody byl položen v jehlovém zvlákňování, kde byl polymerní roztok dávkován tenkou jehlou. Nevýhodou se ukazuje nízká produktivita. Zvýšení produktivity řešil tým pod vedením Oldřicha Jirsáka na Technické univerzitě v Liberci. Výsledkem jejich práce je patent popisující výrobu nanovláken z volné hladiny (needless electrospinning). Tato metoda využívá smáčený válec jako elektrodu a umožňuje výrobu nanovláken s vysokou produktivitou. [10]

4.2.1 Jehlová elektroda

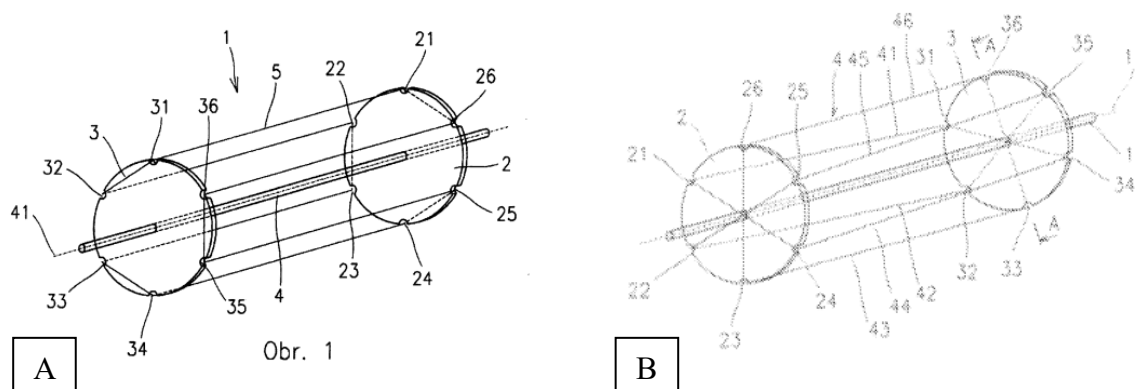
První pokusy s výrobou nanovláken využívaly jehlovou elektrodu. Tato elektroda (obrázek 4 B) je levná na výrobu a jednoduchá na použití, často není potřeba dávkovacích čerpadel, ale lze použít škrťací ventil a gravitační dávkování polymeru. Při pokusech o zefektivnění výroby bylo přidáváno více jehel do jedné elektrody, tak vznikli vícejehlové elektrody (obrázek 4 A). [4]



Obrázek 5 A) vícenásobná jehlová elektroda, B) Jednoduchá jehlová elektroda, převzato z [11]

4.2.2 Bezjehlové elektrody

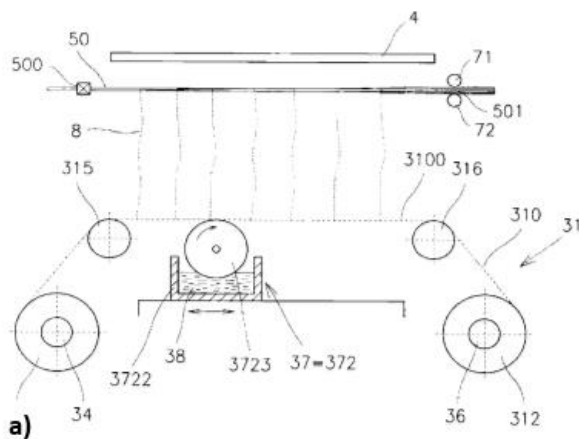
Výrazný pokrok v produktivitě výroby nanovláken přinesl již zmiňovaný objev týmu profesora Jirsáka – bezjehlové zvlákňování z volné hladiny. První prototypy používaly rotující válec, který byl částečně smáčen v roztoku. K dalšímu pokroku vedl objev, že není třeba plný válec, ale místo válce stačí pouze několik rovnoběžných drátů místo válce viz obrázek 6A. Nevýhodou tohoto řešení je fakt, že každý drát opouští roztok a začíná se na něm zvlákňovat v jeden okamžik po celé délce, což vede k tvorbě nehomogenní struktury. Tato metoda byla vylepšila tím, že dráty byly pootočený do mimoběžné polohy, a tak se drát nesmácel naráz ale, do roztoku vstupoval postupně a zvlákňování též neprobíhalo naráz po celé délce, ale vždy pouze na části drátu, viz obrázek 1B. [12, 13]



Obrázek 6 A) Rotační zvlákňovací elektroda, převzato z [12], B) Rotační zvlákňovací elektroda s mimoběžnými zvlákňovacími dráty, převzato z [13]

4.2.3 Strunová elektroda

Přelom v DC electrospinningu představila společnost Elmarco v roce 2007. Tímto objevem byla strunová elektroda. Princip jejího fungování spočívá v nanášení polymerního roztoku pohyblivým vozíkem, který koná vratný přímočarý pohyb. Struna je kontinuálně převíjena, aby se zabránilo jejímu opotřebení v jednom místě. V místě, kde se se nachází pohyblivý vozík, nedochází k výrobě nanovláken a vzniká tak nehomogenita výsledného produktu. V praxi je toto prázdné místo nejčastěji řešeno principem druzení, tedy umístěním většího počtu elektrod vedle sebe. [14]



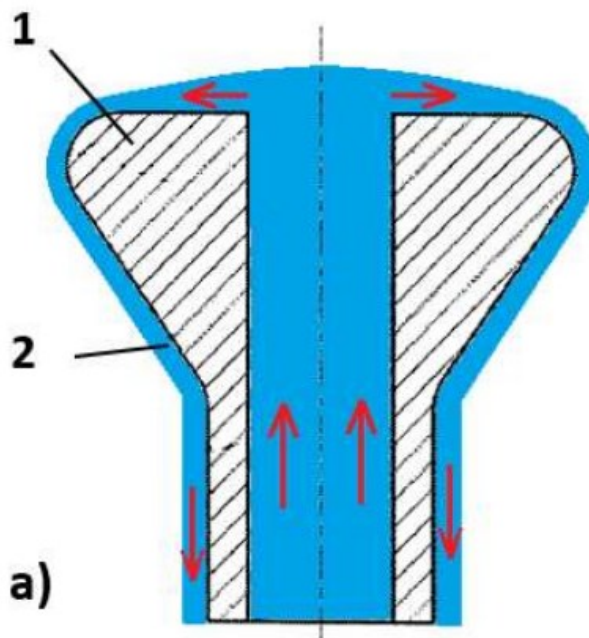
Obrázek 7 Strunová elektroda, převzato z [14]

4.3 AC electrospinning

Metoda zvlákňování pomocí střídavého elektrického proudu byla vyvinuta na Technické univerzitě v Liberci. Předností této metody je absence elektricky nabitého kolektoru. Pro zachytávání vláken proto můžeme použít různé druhy netkaných textilií, případně různé druhy přízí. Další výhodou AC electrospinningu oproti DC electrospinningu je větší produktivita výroby nanovláken. Vzniklé vlákno si zachovává část náboje, po změně polarity elektrody pomáhá s formováním dalšího vlákna tím, že jej k sobě přitahuje. [11]

4.3.1 Přeplavovací elektroda

U metody AC-electrospinningu není vhodné použít jako elektrodu pouze jehlu nebo drát, jako je tomu u DC-electrospinningu. Vlákna, která vznikají, nejsou přitahována opačně nabitým kolektorem. Vlákna se mohou přichytávat k samotné elektrodě až do takové míry, že dojde ke kritickému zanesení elektrody, což má za následek znehodnocení zvlákňovacího procesu. Tomuto jevu lze zabránit pomocí přeplavovací elektrody, viz obrázek 8 . U těchto elektrod polymerní roztok vytéká středem elektrody a poté v tenké vrstvě kopíruje hlavu elektrody a stéká dolů po těle elektrody, kde rozpouští možná zachycená vlákna a nedochází tak k jejímu zanesení. Hlava elektrody může mít různé tvary. Nejjednodušší je kulovitý tvar. Modifikací vzniká tvar elektrody s několika rádiusy. Při zkoumání výkonnosti elektrody vznikly elektrody s více-
stupňovými zvlákňovacími patry, viz [11].



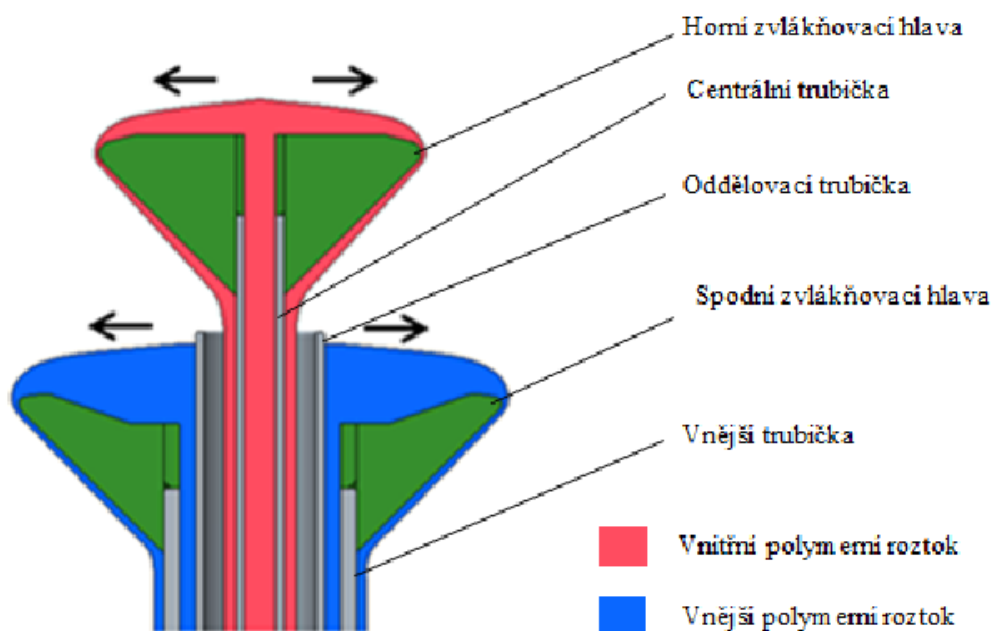
Obrázek 8 Jádrová elektroda v řezu 1) tělo elektrody 2) polymerní roztok přeplavující elektrodu, převzato z [19]



Obrázek 9 Vícestupňová jádrová elektroda vyrábějící nanovláknna., převzato z [11]

4.3.2 Bikomponentní elektrody

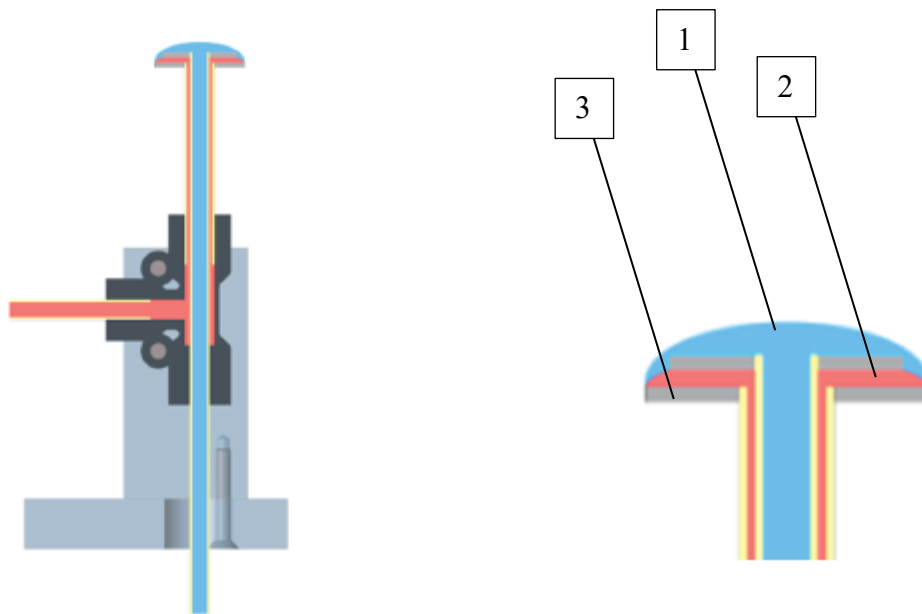
Bikomponentní elektroda slouží k výrobě nanovláknenného kompozitu ze dvou rozdílných roztoků. Tato elektroda dávkuje každý roztok samostatně pomocí peristaltického čerpadla a pomocí dalšího čerpadla odčerpává přeplavené roztoky. Oddělovací trubička zabraňuje mísení roztoků. Konstruktérskou výzvou u této elektrody je vzájemné středění tří trubek, které slouží pro přívod a odvod roztoku. Na horní zvláknovací hlavě je použita kuželová zvláknovací elektroda. Na spodní hlavě je použita kuželová zvláknovací elektroda se zásobníkem roztoku. [15]



Obrázek 10 Zvlákňovací elektroda pro výrobu směšového nanovláknenného materiálu. Převzato z [15]

4.3.3 Elektroda pro výrobu koaxiálních nanovláken

Koaxiální nanovláknna mají strukturu jádro-plášť, kdy jádro může a nemusí být ze zvláknitelného materiálu. Tato elektroda (obrázek 11) umožňuje výrobu nanovláken, kde roztok dodávaný do vnitřního prostoru je nezvláknitelný(2). Vznikající nanovláknna z roztoku přeplavující elektrodu(1) vytahují částice roztoku z vnitřního prostoru a unáší je jako jádro nanovláknennou vlečkou. *Tato vlákna nabízejí neobvyklé možnosti kombinace vlastností a materiálů, které neposkytují žádná jiná vlákna.* [16]

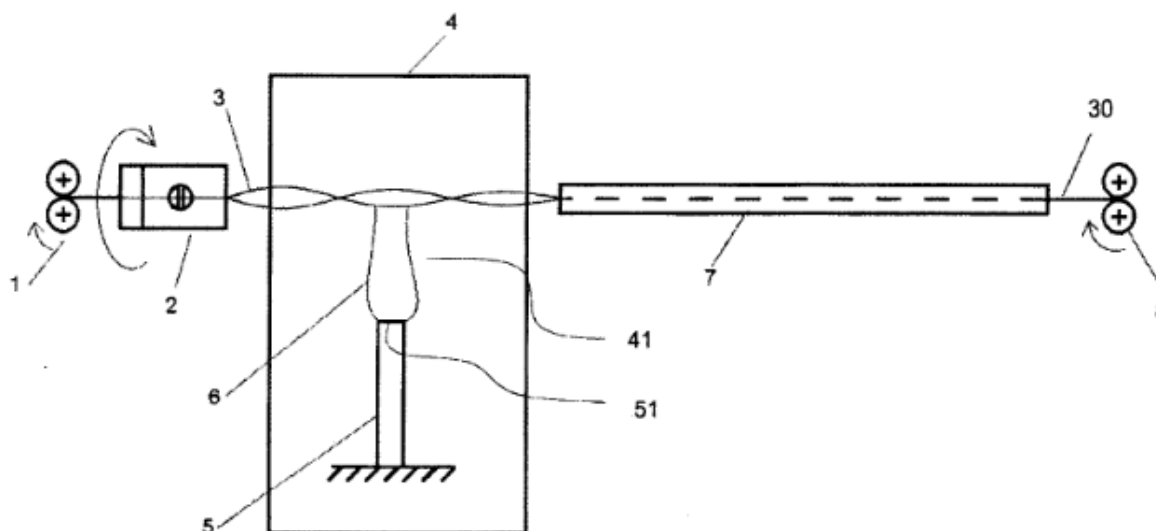


Obrázek 11 Disková elektroda pro výrobu koaxiálních nanovláken 1) Zvláknitelný roztok, 2) Roztok vytvářející jádro, 3) Tělo elektrody, převzato z [20]

5 Současný stav výroby jádrové nanopříze

Jádrová nanopříze [17] kombinuje výhody pevného jádra a nanovláčenného opletu. Nyní se využívá nejčastěji k výrobě filtrů pro filtraci vody, budoucí využití by mohla jádrová nanopříze nalézt ve filtračních a medicínských aplikacích.

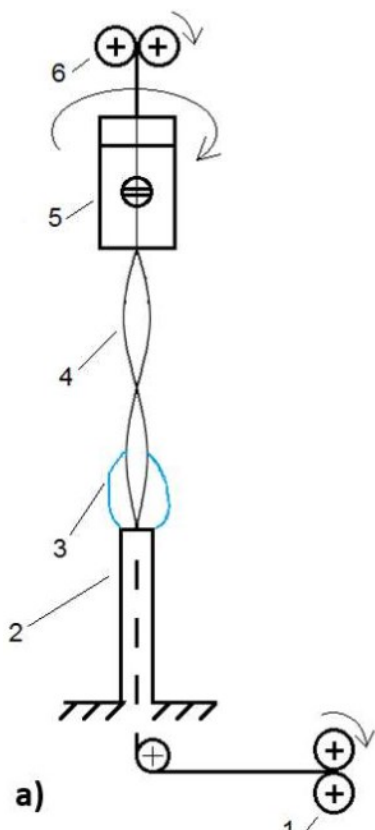
Na obrázku 8 je schematicky vyobrazen základní princip technologie. Spočívá v ovíjení balonující příze (3) pásem nanovláken (6), které vznikají na zvláknovací elektrodě (5). Je zde možnost použít více elektrod pro vyšší produktivitu nanovláken. Příze je převíjena pomocí členů (1 a 8), dále je vedena skrz zákrutové ústrojí (2), kde je vytvářeno balonování příze. Balonování usnadňuje ovinutí příze nanovláčenným obalem. Dále je příze vedena do sušicího zařízení (7). Výhodou této metody je produktivita závislá na počtu zvláknovacích hlav a jejich tvarech. Není problém zde použít vícestupňové elektrody, které opět zvyšují produktivitu výroby. Vlákna se navíjejí na přízi v poměrně širokém pásmu, což má za následek méně utažený návin, zároveň při navíjení v širším pásmu může docházet k nekonzistentnímu zachytávání nanovláčenné vrstvy vlivem rozdílného průměru po délce balonu. Tyto jevy by měly být odstraněny novou technologií výroby jádrových nanovláken, kdy je příze vedena středem elektrody.



Obrázek 12 Schéma zařízení pro výrobu jádrové nanopříze 1, 8) Převínovací zařízení 2) zákrutové ústrojí 3) balonující příze 5) zvláknovací elektroda 6) nanovláčenná vlečka 7) vysoušecí zařízení [1]

6 Návrh elektrody

Úkolem je navrhnout elektrodu, umožňující provádět novou technologii výroby jádrové nanopríže. Nově vyvíjená technologie vede přízi, na kterou jsou navíjena nanovláknna, středem elektrody. Technologie je schematicky zobrazena na obrázku 13. Na TUL již byly provedeny prvotní experimenty výroby jádrových nanovláken touto metodou. Elektroda byla vyrobena metodou 3D tisku z materiálu PLA.



Obrázek 13 Schéma nové technologie výroby nanovláken 1) podávací kladky, 2) zvláknovací elektroda, jejím středem prochází příze, 3) nanovláknenná vlečka, 4) balonující příze, 5) zákrutové ústrojí, 6) podávací kladky, převzato z [19]

6.1 Požadavky na navrhovanou elektrodu

Nově vyvíjená elektroda musí splňovat několik základních konstrukčních parametrů:

- Příze vedená středem elektrody tak, aby nemohlo dojít ke kontaktu zvláknovaného roztoku a procházející příze.
- Přeplavování všech ploch elektrody roztokem.
- Korozivzdorný materiál schopný dlouhodobě odolávat působení rozpouštědel, zejména kyselin.
- Výměnné pláště elektrody pro optimalizaci tvaru elektrody.

- Základna umožňující seřízení elektrody do vodorovné polohy.
- Výškově nastavitelný člen, který vede přízi.
- Spolehlivý start zvlákňování a jeho bezproblémový chod.

6.2 Technologie použité pro výrobu

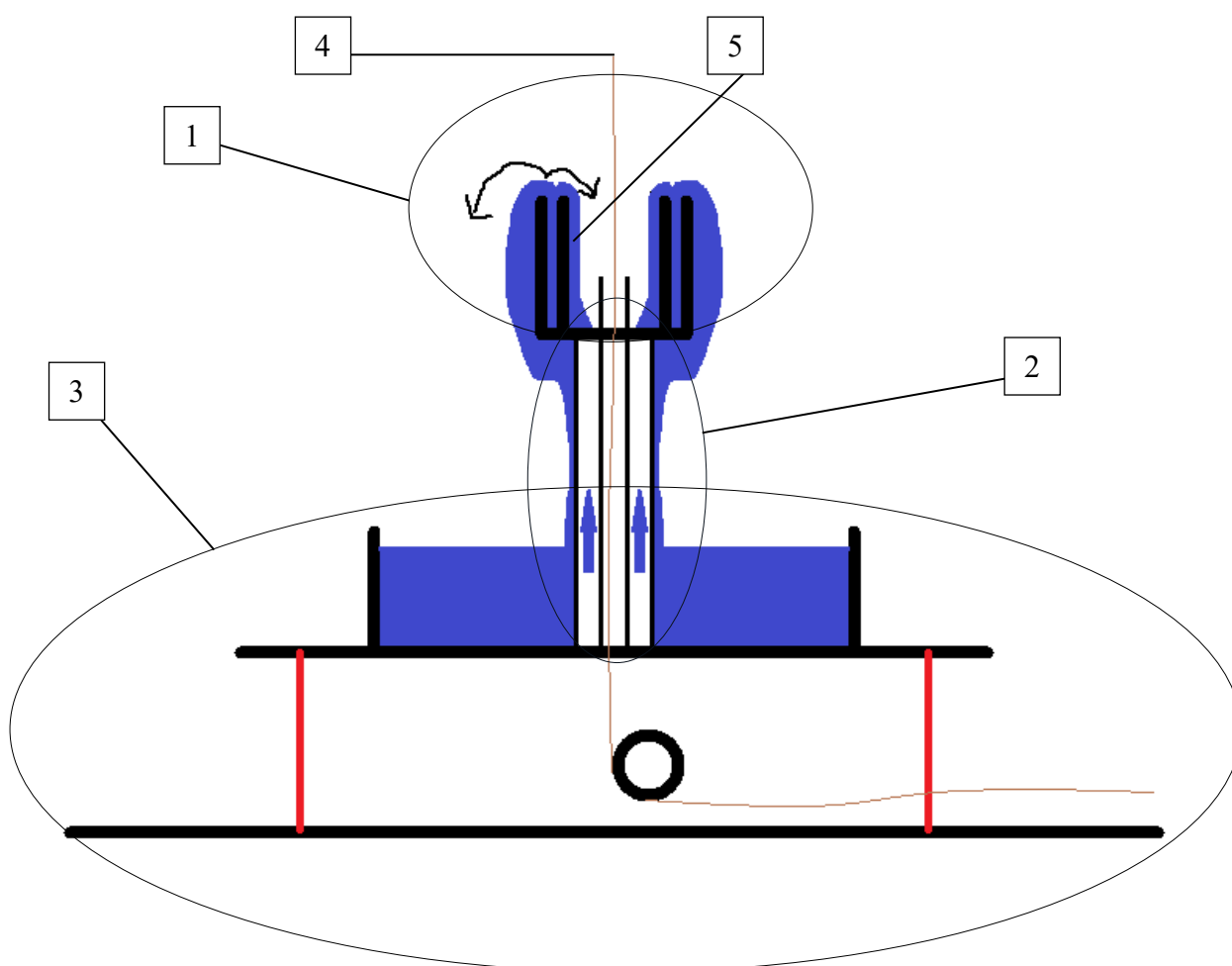
Při znalosti optimálního tvaru elektrody by se jako nejvhodnější způsob výroby jevil 3D tisk z nerezové oceli. Takto vyrobená elektroda by byla finančně nákladná, ale bylo by možné efektivně optimalizovat vnitřní geometrii pro proudění zvlákňovaného roztoku. Zároveň by celá elektroda mohla mít kompaktnější rozměry, které kladně ovlivňují efektivitu výroby nanovláken. Vyvíjená elektroda bude vyrobena klasickými obráběcími technologiemi, jako je vrtání, frézování a soustružení. Primární důvod této volby je nižší cena.

6.3 Materiál pro výrobu elektrody

Prvotní pokusy využívaly elektrodu vyrobenou metodou 3D tisku z materiálu PLA. Pro efektivní zvlákňování z různých druhů materiálů je potřebné, aby materiál elektrody byl co nejvíce chemicky odolný vůči rozpouštědlům, zejména kyselinám. Běžná ocel třídy S235JR nebo 11600 nemá dostatečnou chemickou odolnost a může velmi rychle korodovat. Zvolena byla nerezová ocel. Z různých druhů nerezových ocelí byla zvolena ocel EN 1.4301, a to primárně z důvodu největších skladových zásob různých polotovarů. Nemá největší korozní odolnost, ale pro tuto aplikaci by měla být dostatečná, navíc má velmi dobrou obrobitelnost. Optimální volbou je korozivzdorná ocel EN 1.4401.

6.4 Koncepce návrhu

Elektroda je rozdělena na 3 funkční celky, dále budou popsány jejich návrhy a funkce schematicky zobrazené na obrázku 10. Prvním funkčním celkem je hlava elektrody (1), zde dochází ke zvlákňování a jejím středem musí procházet příze. Dále musí umožnit odtok roztoku z vnitřního prostoru (5). Druhým celkem je dopravní systém polymeru a příze (2), zde dochází k dávkování polymeru do hlavy elektrody, je zde vedena příze (4) do hlavy a distancuje hlavu od základny. Třetím celkem je základna (3), sloužící k vyrovnaní hlavy elektrody do vodorovné pozice, k upevnění do zvlákňovací komory, k navedení příze do celého systému a slouží jako zásobník zvlákňovaného polymeru.



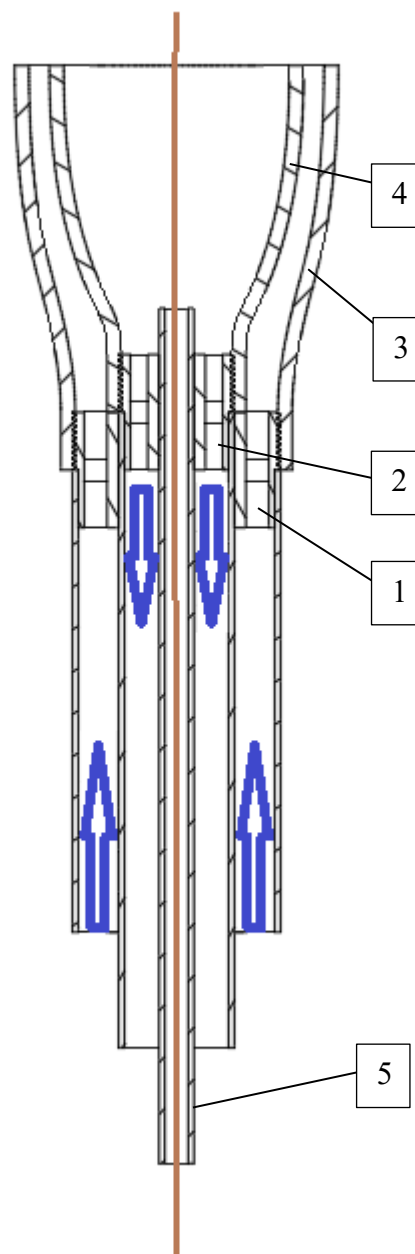
Obrázek 14 Koncepční návrh elektrody, 1) Hlava elektrody, 2) Stopka elektrody, 3) Základna elektrody, 4) Příze, 5) Vnitřní prostor elektrody

6.5 Hlava elektrody

Zde byly provedeny 3 koncepční návrhy. Bylo zvoleno, že pro nalezení optimálního tvaru elektrody by bylo vhodné, aby byla možnost výměny hlav, zároveň by bylo vhodné, aby bylo možné nastavit délku vedení příze a také celkovou vzdálenost hlavy elektrody od základny.

6.5.1 Třítrubkový systém

První koncepční návrh (obrázek 15) využívá 3 soustředné trubky pro dopravu roztoku do hlavy elektrody, odvod roztoku z přeplavovaného vnitřního prostoru a pro přívod příze. Trubky jsou uloženy s přesahem na dílech pro přívod (1) a odvod (2) roztoku. Na vnější straně těchto dílů se nachází závit, na které se šroubují vnější plášť (3) a vnitřní plášť (4). Vize je taková že trubka pro přívod příze (5) se může posouvat ve (2) a tím je možné nastavit výšku trubky pro přívod příze. Kladem tohoto systému by měla být poměrně jednoduchá výroba a jednoduchá výměna plášťů elektrod. Důkladným zkoumáním tohoto řešení bylo nalezeno několik nedostatků a kritických míst s potenciálními problémy. Největší problém je, že při takto navržených plášťích elektrod není prakticky možné vyšroubovat vnitřní plášť. Druhý problém se týká tolerancí pro uložení trubek, které by měly být nalisované, bylo by velmi obtížné a nákladné udržet všechny obráběné díly v požadovaných tolerancích. Třetím problémem je těsnost závitů, tato koncepce neumožňuje použití těsnících prvků. Závit sám o sobě není schopen těsnit, bylo by potřeba zde použít teflonovou



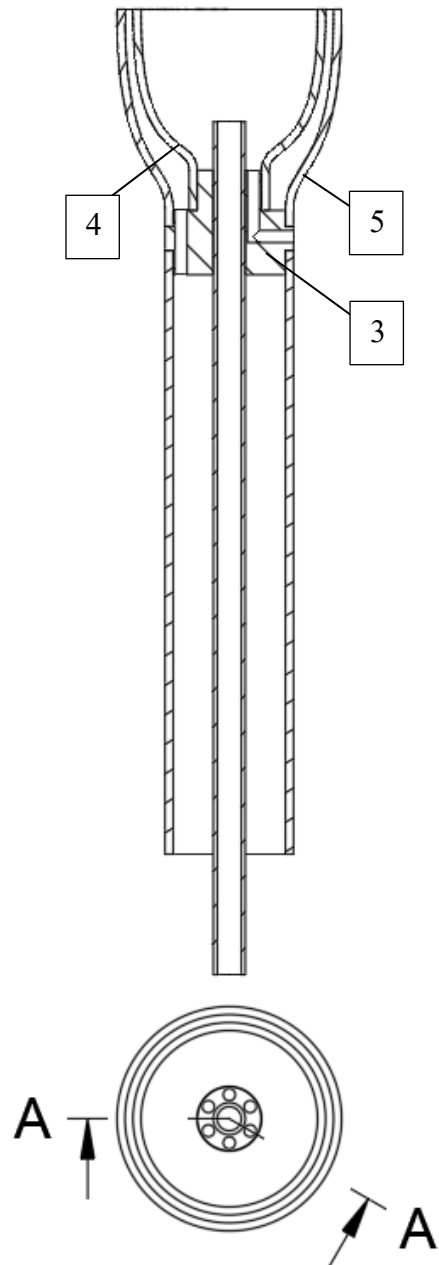
Obrázek 15 Koncepční návrh elektrody třítrubkový systém

těsnící pásku, která se používá například při těsnění rozvodů vody. Dalším problémem by byl v možnosti demontáže, z praxe je známo, že zvláknované roztoky jsou v případě jejich nedostatečného odstranění schopny zalepiti i dávkovací pumpu. V případě zalepení závitů by již bylo velmi obtížné elektrodu demontovat. Po prvních testech zvláknování zde byl nalezen ještě jeden

nedostatek, a to odvod roztoku z vnitřního prostoru. Navržené díry o průměru 2 mm by nestíhaly roztok odvádět, tudíž by muselo být použito přídavné čerpadlo pro odčerpávání roztoku.

6.5.2 Dvoutrubkový systém bez těsnění

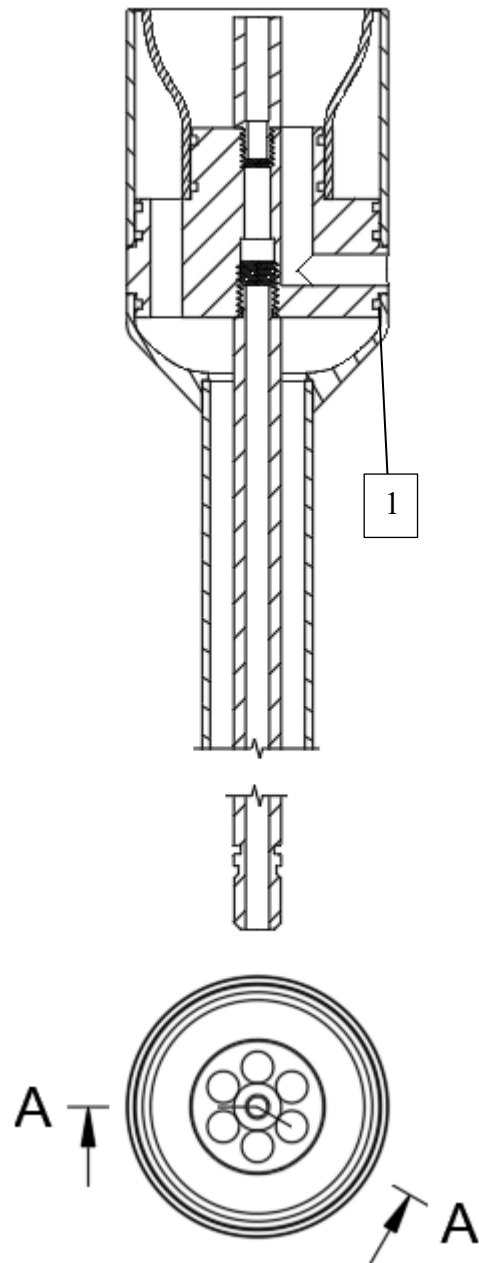
Druhý koncepční návrh (obrázek 16) spojuje díly (1) a (2) z předchozího systému do jednoho (3), zároveň tento díl slouží k odvodu přeplaveného roztoku z vnitřního prostoru elektrody. Vnitřní a vnější plášť elektrody je zde nasunut na tělo elektrody (3), není zde žádné těsnění, těsnost spoje by byla předpokládána přesným uložením mezi díly tělo elektrody (3), vnitřní elektroda (4) a vnější elektroda (5). Výhodou tohoto řešení jsou menší rozměry, které by měly vést k vyšší produktivitě elektrody. Díry pro odvod roztoku z vnitřního prostoru elektrody jsou zde navržené o průměru 2 mm. Díra je vrtaná do tvaru L. Po experimentálním ověření funkčnosti elektrody bylo konstatováno, že díra o průměru 2 mm by pro odvod roztoku nebyla dostatečná.



Obrázek 16 Koncepční návrh elektrody dvoutrubkový systém bez těsnění

6.5.3 Dvoutrubkový systém s těsněním

Třetí koncepční návrh (obrázek 17) navazuje na předchozí návrh, s tím, že je zde přidáno těsnění mezi tělo elektrody a vnitřní a vnější plášť elektrody. Pláště lícují na dotykových plochách a těsnící O-kroužek zajišťuje jejich přidržení na místě a těsnost proti průniku roztoku. Přidáním těsnících O-kroužků (1) a zvětšením odtokových děr na průměr 4 mm, narůstá celý průměr elektrody. Větší průměr snižuje intenzitu elektrického pole, což snižuje produktivitu výroby nanovláken. Po prvních přepravovacích testech se rozhodnutí zvětšit otvory pro odvod roztoku jeví jako správný krok. Trubička prodloužení je do těla elektrody šroubovaná pomocí závitu M4. Trubička prodloužení je vyměnitelná a slouží k nalezení optimální délky pro výrobu nanovláken. Její výměna bude také potřeba při testování různých délek vnější a vnitřní elektrody. Celý systém je navržen co nejvíce variabilně aby, bylo možné jednoduše vyměnit pláště elektrody za jiný tvar a testovat výrobu nanovláken jiným tvarem elektrody.



Obrázek 17 Koncepční návrh dvoutrubkový systém s těsněním

6.6 Stopka elektrody

Stopka elektrody konstrukčně navazuje na hlavu elektrody, proto byly navrhovány společně. Detailní návrh byl vypracován pouze u použitého dvoutrubkového systému s těsněním.

Hlavním cílem stopky je distancovat hlavu elektrody od základny, tak aby elektrické pole bylo základnou co nejméně ovlivňováno. Stopka slouží k dopravě roztoku ze základny elektrody do hlavy elektrody. V případě jádrové zvláknovací elektrody musí být středem elektrody dopravována příze. Řešení stopky elektrody odpovídá hlavě elektrody, v případě třítrubkového systému (kapitola 7.5.1) by zde byly použity tři tenkostěnné trubky, které z vnitřního prostoru postupně

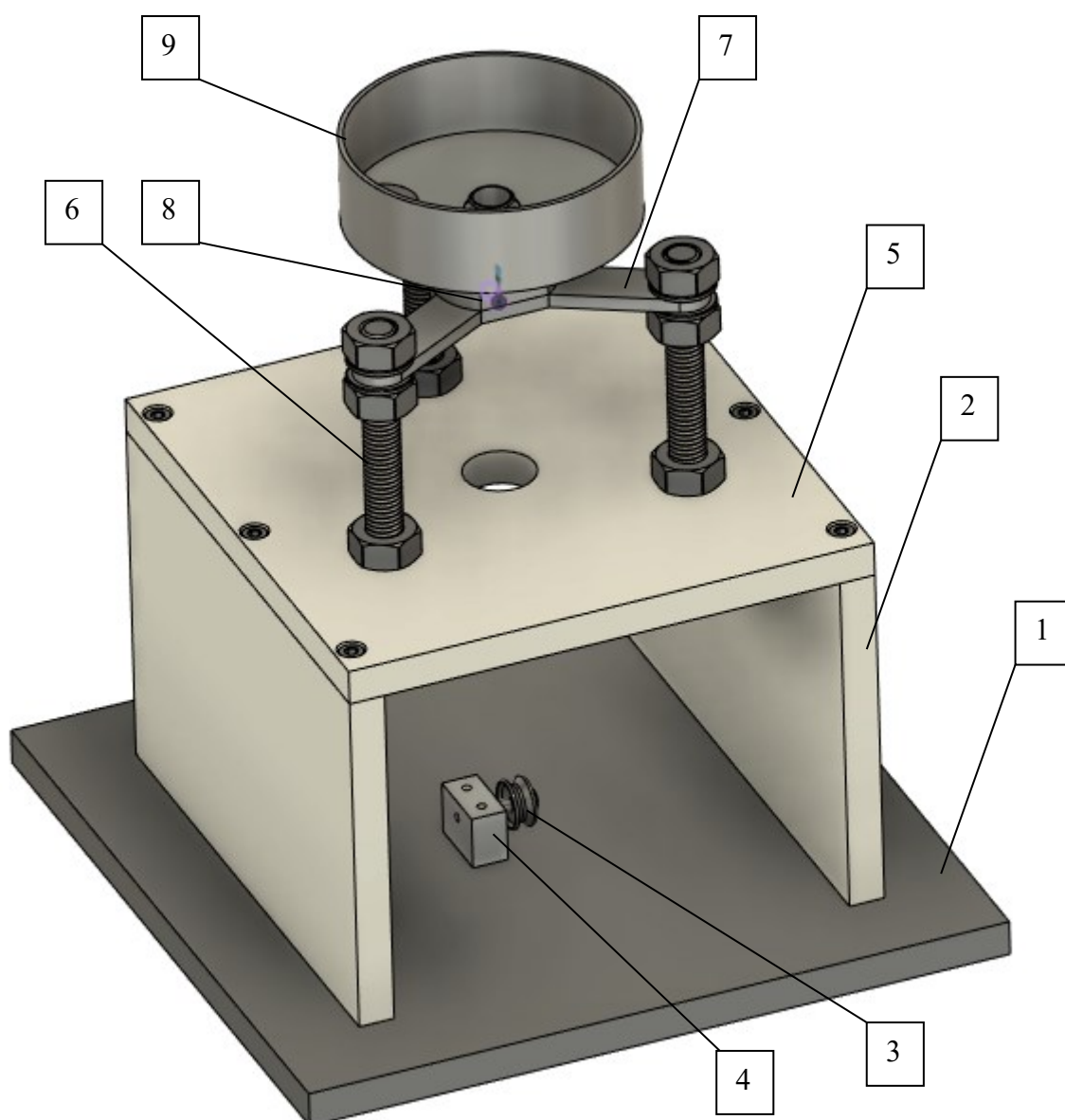
slouží k transportu příze, odvodu přeplaveného roztoku do vnitřního prostoru elektrody, dávkování čerstvého roztoku. Jejich zakončení v základně elektrody nebylo dále řešeno, protože třítrubkový systém nebyl shledán vyhovujícím pro všechny parametry elektrody.

Dvoutrubkový systém (kapitola 7.5.3) zajišťuje dopravu příze a roztoku do hlavy elektrody. Odvod roztoku z vnitřního prostoru elektrody je zajištěn vnitřními kanály v hlavě elektrody. Stopka elektrody se skládá ze 3 součástí, vnitřní trubička, vnější trubka a přechodky. Celý systém je navržen tak, aby ve vnitřní trubičce byl tah. Vnitřní trubička slouží jako šroub pro upevnění hlavy elektrody. Přechodka je nalisována na vnější trubku, celá tato sestava je namáhána tlakem. Přechodka lícuje s hlavou elektrody a vnější trubka lícuje se základnou, tím je dodržena opakovatelné přesné sestavení při rozebírání. Vnější průměr trubky byl zvolen 14 mm a síla stěny 1 mm. Primárně byla tato volba učiněna momentální skladovou dostupností rozměrů trubky. Jinou variantou by bylo použití trubky o průměru 12 mm a síle stěny 1 mm. Pod hodnotu vnějšího průměru 12 mm by již bylo obtížné vyrobit základnu elektrody způsobem jakým je navržena. Vnitřní trubička má vnější průměr 6 mm a sílu stěny 1,5 mm. Menšího rozměru trubičky by zde bylo velmi obtížné použít, protože standardně vyráběné O-kroužky mají průměr 1 mm.

6.7 Základna elektrody

Základna elektrody byla navrhována jako poslední část. Nebyly zde provedeny žádné koncepční návrhy, ale pouze finální návrh, který splňuje požadavky na konstrukci elektrody. Základna slouží k přívodu roztoku, přívodu příze, k upevnění elektrody do stroje a má možnost nivelovat hlavu elektrody. Spodní plát (1) je vyroben z oceli S235JR a slouží jako závaží, aby elektroda byla stabilní, zároveň se pomocí něj může elektroda upnout do zvlákňovací komory. Bočnice (2) jsou vyrobeny z polyamidu PA6, jejich hlavní funkcí je izolovat spodní plát od zbytku elektrody, zároveň umožňují jednoduchou manipulaci s přízí. Kladka (3) slouží pro navedení příze středem elektrody. Tento typ kladičky se v textilním průmyslu pro vedení příze běžně používá. Držák kladky (4) slouží pro uchycení kladky ke spodnímu plátu. Horní plát (5) je vyroben z polyamidu PA6 a slouží pro upevnění nivelačních šroubů, v jeho středu je otvor pro průchod příze. Bočnice, spodní plát a horní plát jsou sešroubovány pomocí šroubů M4. Nivelační šroub (6) se skládá ze šroubu M10, tří matek M10 a dvou podložek M10. Jeho hlavní funkcí je umožnit dorovnávání hlavy elektrody do vodorovné pozice, nezávisle na sklonu spodního plátu. Ve většině případů se počítá s minimální úhlovou odchylkou mezi hlavou elektrody a spodním plátem. Zvlákňovací komory jsou konstruovány tak, aby měli vodorovnou pracovní plochu, proto není třeba dorovnávat velké úhlové chyby. Y-kříž (7) je nastavován pomocí

stavěcích šroubů a přenáší nastavení úhlu na hlavu elektrody. Nápust' (8) je díl vyrobený z nerezové oceli sloužící pro přívod roztoku z dávkovacího čerpadla a jeho další dopravu směrem k hlavě elektrody, jeho středem zároveň vede příze. Nápust' je přichycena k Y-kříži pomocí tří M3 šroubů. Nápust' je opatřena otvorem o průměru 4mm pro připojení konektoru vysokonapěťového kabelu. Stopka elektrody je přichycena pomocí matice M6. Kádinka (9) je nádoba pro zachytávání přeplaveného roztoku a jeho odvod směrem k dávkovacímu čerpadlu. Kádinka je svařena z nerezového plechu. Odvod roztoku z kádinky a přívod roztoku do nápustě je řešen pomocí šroubení se závitem G 1/8.



Obrázek 18 Návrh základny elektrody 1) spodní plát, 2) bočnice, 3) kladka, 4) držák kladky, 5) horní plát, 6) stavěcí šroub, 7) Y-kříž, 8) Nápust', 9) kádinka

7 Experimentální ověření funkčnosti

7.1 Ověření funkčnosti elektrody

První uskutečněný test ověřoval funkčnost elektrody. Přeplavování probíhalo pomocí ethanolu. Cílem bylo zkoumat úniky ethanolu mezi tělem elektrody a pláští elektrody. Nikde nebyl únik zaznamenán. Těsnění pomocí O-kroužků funguje velmi dobře. Výměna plášťů elektrod nasazených na O-kroužcích probíhá velmi rychle, plášť elektrody dosedne na lícovanou plochu. Přesnost sestavení je dána tolerancí lícovaných ploch. Opakované sestavení elektrody nevykazovalo žádné obtíže. Během testu docházelo k plnohodnotnému přeplavování vnějšího i vnitřního pláště elektrody ethanolem. Předpokládá se, že zvlákněvané roztoky mají vyšší hustotu a vazkost, proto bude jejich odvod z vnitřního prostoru elektrody obtížnější.



Obrázek 19 Přeplavování elektrody ethanolem

7.2 První test výroby nanovláken

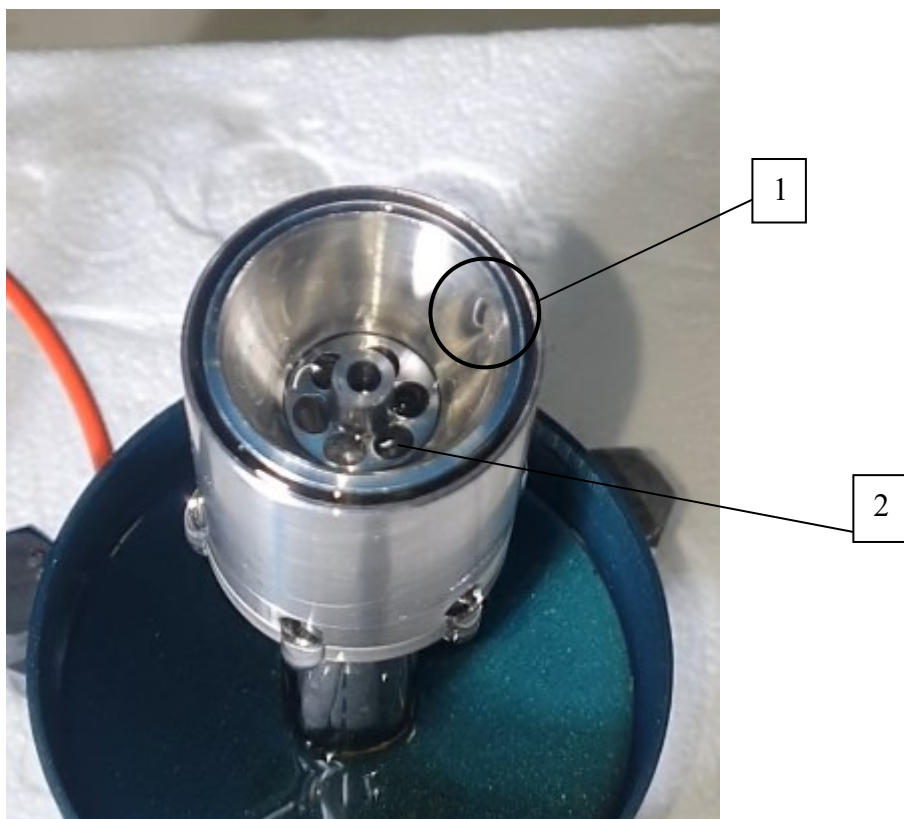
Podmínky testu:

- Teplota 25 °C
- Relativní vlhkost 35 %
- Zvlákněvaný roztok PVB 10 %
- Frekvence zdroje vysokého napětí 50 Hz

Cílem prvního zvláknovacího testu je ověřit funkčnost přeplavování elektrody a následnou výrobu nanovláken.

7.2.1 Přeplavovací test

Při přeplavovacím testu bylo pozorováno chování roztoku při průtoku elektrodou a následném rozdělení proudu přetékačící přes vnější plášť a přetékačícího do vnitřního prostoru elektrody. V počátku testu se přeplavení vnějšího i vnitřního pláště jevílo jako problematické, roztok nepřeplovoval plnohodnotně po celém obvodu elektrody. Homogenizace proudění musela být provedena manuálním zásahem obsluhy. Při zahájení přeplavování hrozí riziko, že přeplavovaný roztok před zásahem obsluhy bude přetékat pouze do vnitřní části elektrody. Při příliš vysoké hodnotě průtoku by odtokové otvory nemuseli roztok odvádět dostatečně a mohlo by dojít k zanesení prodloužení hrdla roztokem, tudíž by došlo i k zanesení příže. Bylo tedy provedeno měření maximálního průtoku roztoku, který přeplavoval pouze vnitřní prostor, tak, aby roztok z vnitřního prostoru elektrody stíhal odtékat a nezanášel prodloužení hrdla (obrázek 7). Maximální průtok, při kterém roztok stíhal odtékat: 8,4 g/min. Měření bylo provedeno s čerstvým roztokem, průnik roztoku do prodloužení hrdla byl pozorován okem. Na obrázku 8 je zobrazen optimální stav proudění roztoku přes vnější i vnitřní plášť současně.



Obrázek 20 Test přeplavování elektrody při průtoku 7,2 g/min, přeplavování probíhá pouze do vnitřního prostoru elektrody, 1) Suché místo, 2) hromadění roztoku nad odtokovými otvory



Obrázek 21 Optimální přelavování elektrody bez vystavení elektrickému poli.

7.2.2 Zvlákňovací test

Cílem zvlákňovacího testu bylo pokusit se pomocí elektrody vyrobit nanovlákná. Při ustálení přelavování dochází k přivedení elektrického napětí na elektrodu. Experiment ukázal, že po přivedení napětí na elektrodu se deformuje hladina roztoku a jeho absolutní většina začne přetékat přes vnější plášť a do vnitřního prostoru elektrody nepreteče téměř nic. To má za následek zanášení vnitřního prostoru elektrody parazitními nanovlákná. Tvoří se zde vrstva, která

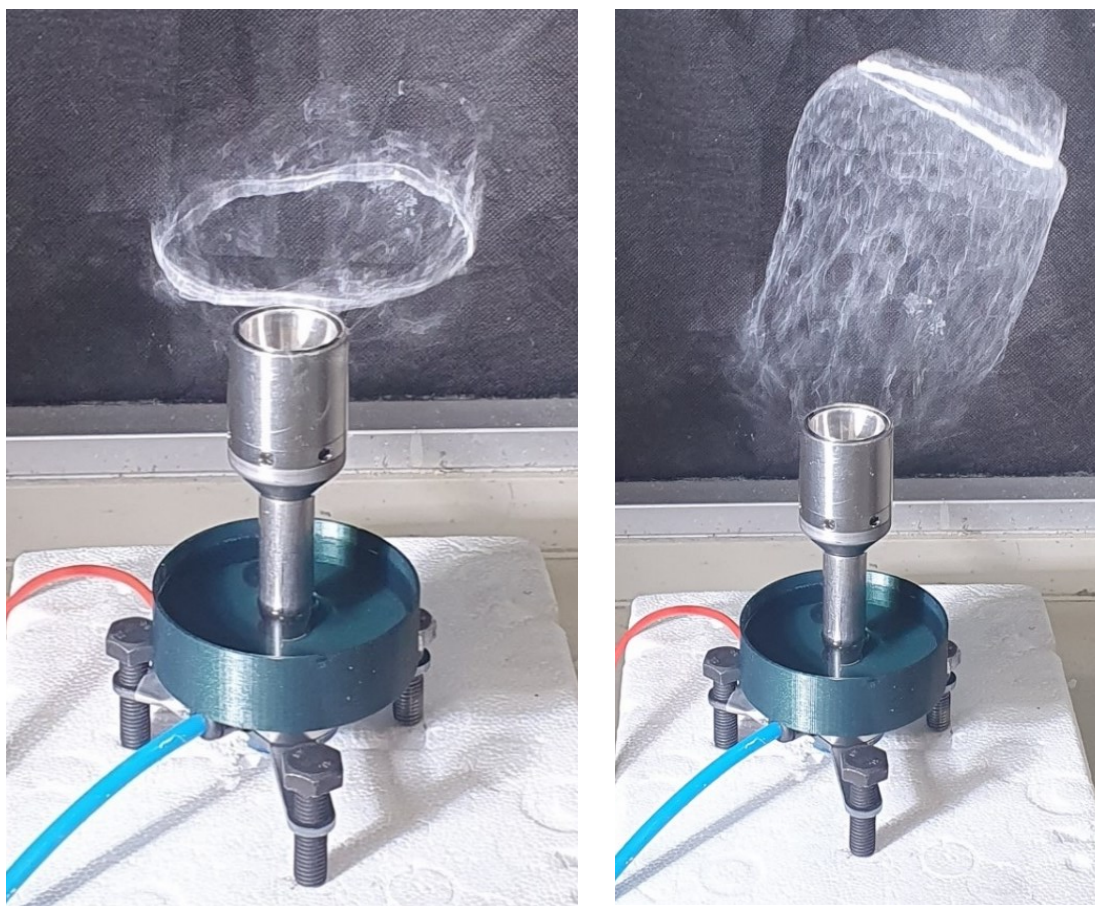
posupně narůstá na síle a toto narůstání může vést až k znehodnocení či zastavení procesu zvlákňování.

Dalším problémem je roztok samotný, při jeho přeplavování a následném opětovném zachytávání se mění jeho koncentrace a tím tedy vlastnosti proudění, s čerstvým roztokem není přeplavování problematické. Pokud je ale použit roztok, který je v procesu cca 30 min, zvýší se jeho viskozita a přestane odtékat z vnitřního prostoru elektrody i při dávkování kdy čerstvý roztok v pořádku odtékal. Zároveň se mění průměr vláken [18]. Tento jev je dlouhodobě znám u přeplavovacích elektrod. V průmyslovém využití je možné jej eliminovat průběžným ředěním roztoku na konstantní koncentraci.

Na produktivitu výroby nanovláken má velký vliv napětí a tloušťka vrstvy zvlákňovaného roztoku. Proto je vhodné přeplavovat elektrodu co nejmenším množstvím roztoku, toto množství musí být ale dostatečné pro pokrytí celé plochy elektrody. Zároveň je vhodné docílit co nejmenšího množství odpadního roztoku. Optimální by bylo veškerý dodaný roztok zvláknit, což však u technologie AC-electrospinnig není možné.



Obrázek 22 Zanášení vnitřního nepřeplaveného prostoru parazitními nanovláknky



Obrázek 23 Vznik nanovlákněné duté vlečky

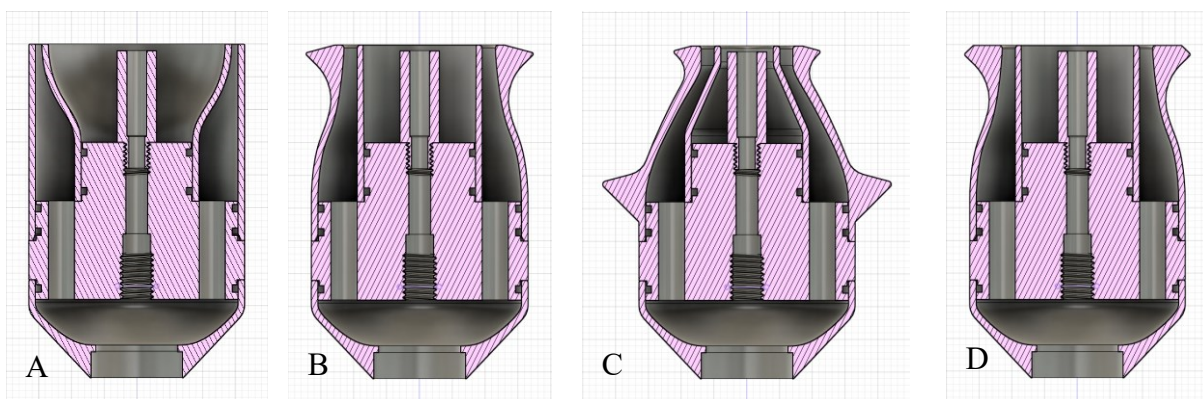
7.3 Shrnutí testu výroby nanovláken

Elektroda prvotního návrhu s přímým tvarem je schopna fungovat velmi dobře, testována byla vždy po dobu přibližně 20 min. Elektroda je schopná stabilního přeplavování bez připojeného napětí. Vysoké napětí deformuje hladinu a roztok přestane přeplavovat vnitřní plášť elektrody. To má za následek jeho zanášení, viz obrázek 22 . Dále je na této elektrodě možné pozorovat tvorbu vláken po celém jejím povrchu, a ne pouze na horní hraně, jak by bylo žádoucí. Na zachycení tohoto jevu by byla třeba vysokorychlostní kamera. Na obrázku 23 můžeme pozorovat vznik nanovlákněné vlečky.

7.4 Optimalizace tvaru elektrody

Doposud používaný přímý tvar elektrody (obrázek 24A) je schopen fungovat, ale neposkytuje optimální podmínky pro přeplavování roztoku do vnějšího i vnitřního prostoru elektrody. Experimenty ukázaly, že dochází ke vzniku vláken nejen z ostré hrany elektrody, ale také z válcového povrchu vnějšího pláště. Tato vlákna se velmi často nezachytí nanovlákněné vlečky a znečišťují okolí elektrody. Tvar (B) byl navržen podle tvaru elektrody uvedeném v [11].

Elektroda vyrábí vlákna spolehlivě, ale jejím problémem je však nedostatečné přeplavování vnitřního prostoru. Elektroda je schopna bez působení vnějšího elektrického pole přeplavovat vnější i vnitřní prostor. Po přivedení napětí na elektrodu začne veškerý roztok přeplavovat vnější prostor a ve vnitřním prostoru dochází k zanášení parazitními vlákny. Elektroda není schopna dlouhodobého provozu. Elektroda (C) je vícestupňová elektroda, oproti elektrodám (A, B) má průměr vnitřní elektrody zmenšený na 8 mm. Elektroda je schopná vyrábět nanovlákna pouze po nuceném nastartování procesu, kdy je třeba začít zvlákňovat, ještě dokud není elektroda plně přeplavena, poté je třeba zvýšit dávkování pumpy, elektrické pole vychýlí tok roztoku přes vnější plášť elektrody, a v ideálním případě se celý vnější povrch postupně přeplaví. Poté je možné snížit dávkování roztoku na obvyklou mez. Dále je proces stabilní, protože se nepřeplovuje žádný roztok do vnitřního prostoru, dochází k postupnému zanášení parazitními vlákny. Tato elektroda v této konfiguraci není schopná vyrábět jádrová nanovlákna, protože není možné proces bezproblémově rozběhnout. Elektroda (D) je vývojem elektrody (B), kdy na horní plochu elektrody byla přidána ploška. Tato ploška omezuje vliv elektrického pole na deformaci hladiny a umožňuje stabilnější přeplavování vnějšího i vnitřního prostoru. Elektroda je schopná bezproblémového započetí zvlákňování. S tímto typem elektrody byl následně proveden test výroby jádrové nanopříze.



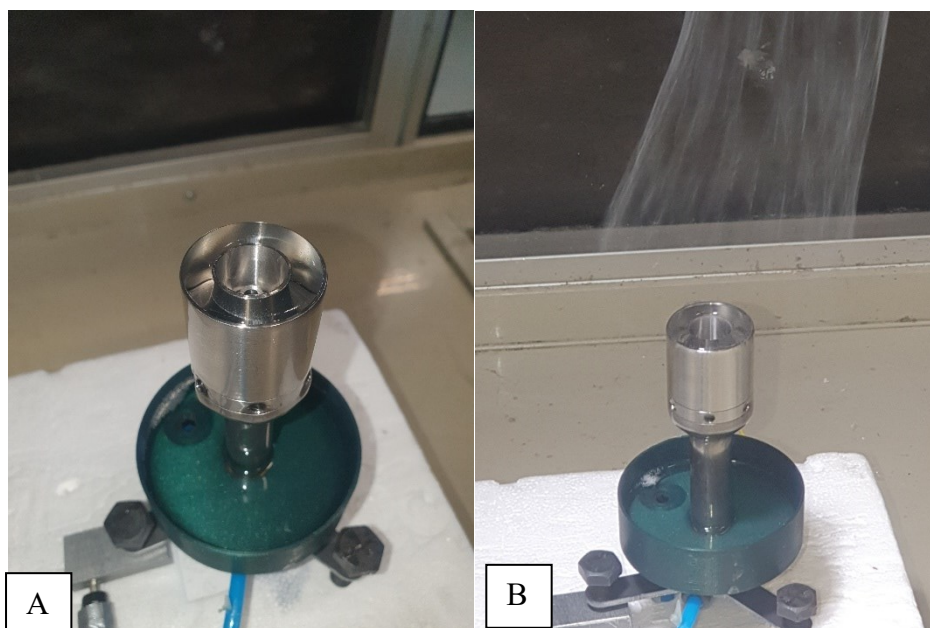
Obrázek 24 Navržené tvary elektrody, A) Přímý tvar, B) Upravený tvar s skosením, C) Dvoustupňový tvar, D) optimalizovaný tvar pro lepší přeplavování

7.5 Zvlákňovací test modifikovaných elektrod

7.5.1 Elektroda A modifikovaná

Funkčnost elektrody A je popsána v kapitole zvlákňovací test. Zde bude popsán test modifikované elektrody, kdy je vnější plášť použit z elektrody A a vnitřní plášť je použit z elektrody B. Vzniká tak mezera 6 mm mezi vnitřním a vnějším pláštěm elektrody pro dávkování roztoku. Tento krok má za cíl sledovat ovlivnění hladiny roztoku se zvětšující se šířkou štěrbinu pro

přívod roztoku. Elektroda po přivedení napětí přeplavuje lépe než elektroda A, ale cíle konstantně přeplavovat vnitřní i vnější plášť zde po přivedení napětí nebylo dosaženo. Zvětšený objem, který musí roztok vyplnit, není přínosný pro provoz elektrody.



Obrázek 25 A) Přeplavování elektrody modifikované A, B) Zvlákňování elektrody modifikované A

7.5.2 Elektroda B

Tato elektroda by měla podle testů provedených na kuželových elektrodách fungovat velmi dobře. Elektroda zvlákňuje v místě přechodu kuželů, je zde minimalizován vznik parazitních vláken podél elektrody. Přeplavování bez přivedeného napětí probíhá konzistentně, přeplavován je vnitřní i vnější plášť elektrody. Bohužel po přivedení napětí začne roztok proudit pouze přes vnější plášť elektrody a vnitřní prostor elektrody přestane být přeplavován. Vnitřní prostor se začne zanášet parazitními vlákny.

7.5.3 Elektroda C

Tato dvoustupňová elektroda byla testována za účelem zvýšení produktivity. Jak je vidět na obr. Vrchní zvlákňovací stupeň byl zmenšen na průměru, prostor pro odtok roztoku byl zmenšen. U této varianty se vyskytl opačný problém, při zahájení přeplavování elektrody roztokem většina roztoku přetéká přes vnitřní plášť elektrody. Přinutit roztok téci i přes vnější plášť elektrody bylo skoro nemožné. Bylo zde přistoupeno k zahájení zvlákňování metodou „Force start“. Tato metoda není použitelná pro výrobu jádrových nanovláken, protože dojde k úniku roztoku vnitřní trubičkou, která slouží pro přívod příze. První krok je nastavit velmi vysoké dávkování roztoku v tomto případě cca 300 ot/min. Roztok začne elektrodu přeplavovat, vnitřní prostor se přeplní roztokem, ten je nucen unikat přes vnější plášť. Prstem je poté možné pomoci roztoku

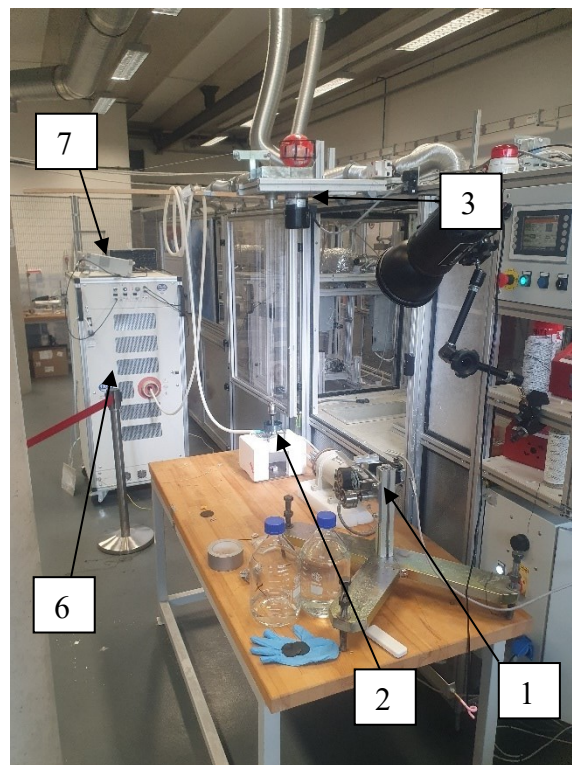
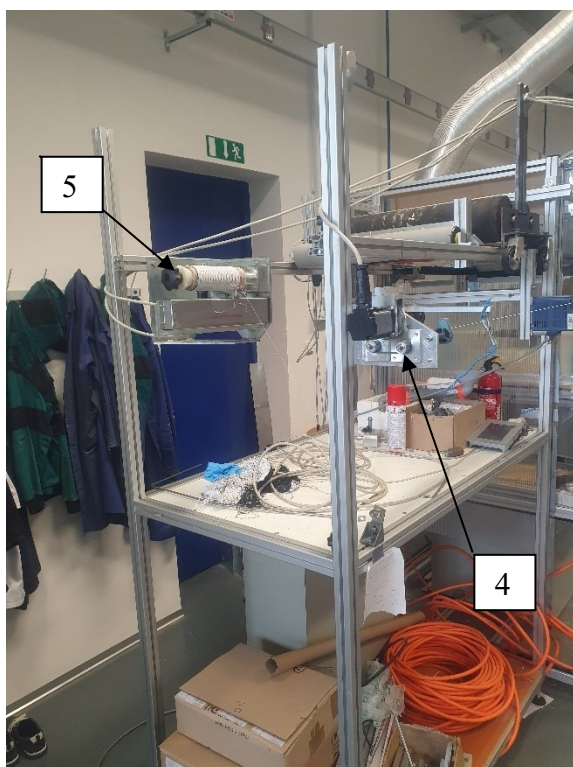
pokryt celý povrch. Poté je přivedeno napětí na elektrodu. Elektroda začne zvlákňovat, ale toto zvlákňování není konzistentní. Elektrické pole pomůže roztoku přeplavovat pouze vnější prostor. Po dokonalém přeplavení vnějšího prostoru je možné nastavit průtok na 3,2 g/min, kdy je vrstva polymeru co nejtenčí, ale stále spolehlivě přeplavuje celý vnější povrch elektrody. Dále elektroda vyrábí nanovlákná spolehlivě. Po cca 20 min je možné pozorovat vznik plachetek, které vznikají ve vnitřním prostoru elektrody. Tato elektroda potřebuje delší variantu prodloužení hrdla, která se v žádném pokusu neosvědčila. Vždy vznikala na jejím vrchním konci parazitní nanovlákná.

7.5.4 Elektroda D

Tato elektroda vznikla pozorováním elektrod A a B. Tvar je modifikovaný z elektrody B. Tvar byl modifikován odhadem proudění roztoku a ovlivnění proudění roztoku eklektickým polem. Přidaná rovná ploška na vnějším plášti eliminuje vliv elektrického pole na proudění roztoku. Elektroda je schopná plynulého přeplavování vnitřního i vnějšího pláště elektrody bez působení elektrického pole. Elektrické pole díky přidané plošce minimálně ovlivňuje proudění roztoku, proto elektroda spolehlivě přeplavuje vnitřní plášť elektrody i při vystavení elektrickému poli a výrobě nanovláken. Obdobně jako u elektrody B zde nevznikají parazitní vlákna po celé ploše vnějšího pláště elektrody. Test výroby nanovláken probíhal cca 40 min. Po této době nebylo zaznamenáno žádné zanesení vnitřního prostoru. Test potvrdil, že elektroda spolehlivě přeplavuje vnitřní i vnější plášť elektrody. Elektrodu D lze prohlásit za optimální z hlediska přeplavování a funkčnosti při výrobě nanovláken. Z hlediska maximální výrobnosti tato elektroda určitě není optimální a mohl by zde být proveden další výzkum pro nalezení elektrody s maximální výrobností.

7.6 Výroba jádrové nanopříze

Cílem tohoto experimentu byla výroba jádrové nanopříze, jádro bylo z polypropylenového multifilu, na který byla nanesena nanovlákná. Experimentální pracoviště bylo sestaveno podle schématu na obrázku 13 (kapitola 6). Pracoviště na obrázku 26 se skládá z podávací galety 1 (1), samotné elektrody (2), rotujícího členu vytvářející balonování příze (3), odvíjecí galety (4) a navíjecího ústrojí pro uložení nanopříze do formy návínu (5). Jako zdroj vysokého napětí byl použit vysokonapěťový zesilovač TREK 50/12 (6) s generátorem funkcí OWON AV2022 (7).



Obrázek 26 Laboratorní zařízení pro experimentální výrobu jádrových nanovláken 1) podávací mechanismus přize, 2) zvláčkňovací jádrová elektroda, 3) rotující člen, 4) napínací člen, 5) navíjecí buben pro uložení jádrové nanopříze

Pro úspěšné provedení experimentu je třeba spolehlivého převíjení jádrového materiálu a zvláčkňovací elektrody, která je schopná spolehlivého přeplavování. Nesmí zde dojít k přeplnění vnitřního prostoru elektrody roztokem, protože poté dojde ke kontaminování jádra. Roztok poté znečišťuje a zanáší ostatní části zařízení. Nepatrné znečištění rotujícího členu má ve většině případů za následek přetržení přize. Poté je třeba přízi pracně navést celým zařízením.

Pro výrobu jádrové nanopříze byl zvolen tvar elektrody D zajišťující optimální přeplavování.

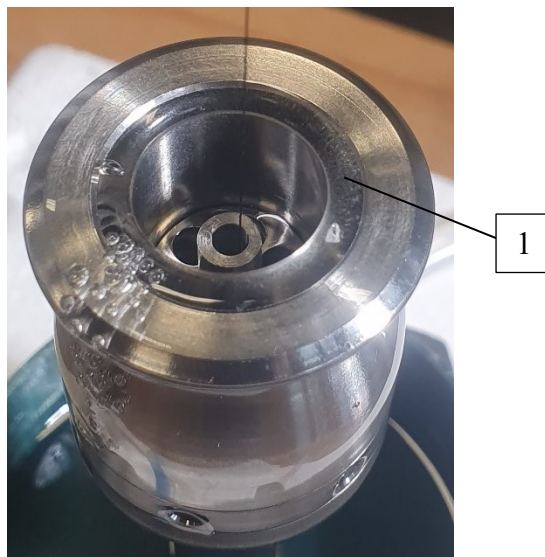
Podmínky experimentu:

- Teplota v místnosti $t = 23 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Relativní vlhkost v místnosti $\varphi = 37 \%$
- Průtok roztoku elektrodou $m = 3,2 \text{ g/min}$
- Zvláčkňovaný roztok PVB 10 %
- Otáčky zákrutového ústrojí $n = 8000 \text{ 1/min}$
- Excentricita zákrutového ústrojí $e = 5 \text{ mm}$
- Výška balónu přize $H = 760 \text{ mm}$
- Rychlost převíjení přize $v = 10 \text{ m/min}$
- Napětí v přízi nastaveno poměrem rychlostí galet - průtah 102 %

- Napětí $U_{ef} = 35,4 \text{ kV}$
- Frekvence $f = 50 \text{ Hz}$
- Funkce generovaná generátorem funkcí $f(x) = \sin$

Prvním krokem experimentu bylo ověření funkčnosti převíjení jádrového materiálu, funkčnost zákrutového ústrojí a spolehlivost přeplavování elektrody. Po ověření jednotlivých funkčních podskupin bylo přistoupeno k výrobě jádrových nanovláken. Jako první se musí spustit převíjení příze, poté se spustí zákrutové ústrojí a jako poslední se přivádí napětí na elektrodu. Při záměně pořadí těchto kroků může dojít k přetržení příze. Při ukončení experimentu se postupuje v opačném pořadí.

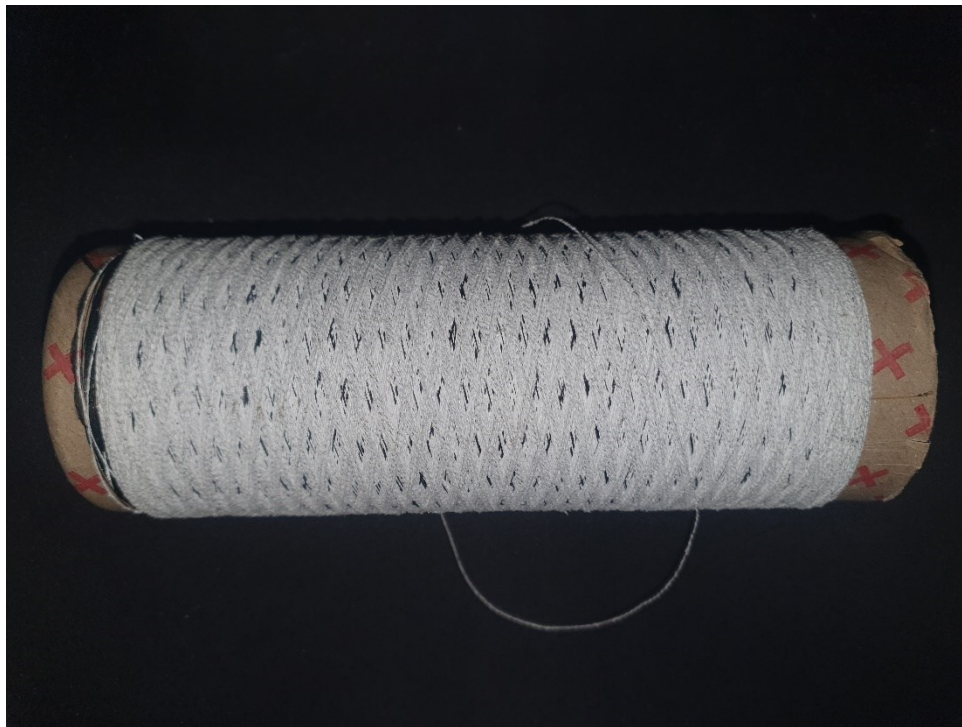
Na obrázku 28 je zobrazen úspěšný průběh výroby jádrových nanovláken. Experiment probíhal po dobu 60 min, než došlo ke zvláknění veškerého roztoku. Během experimentu bylo pozorováno mírné zanášení vnitřního prostoru elektrody. Vznikala zde plachetka, viz obrázek 27, která nezastavila průběh experimentu, ale omezila přeplavování roztoku do vnitřního prostoru elektrody. Pro potvrzení dlouhodobé stability procesu bude v budoucnu nutné provést několikahodinové experimenty. Bylo vytvořeno přibližně 600 m jádrové nanopříze obrázek 29. Dle kontroly pohledem je nanovláknenný oplet pevně ovinut kolem jádra ve šroubovici, jak bylo zamýšleno.



Obrázek 27 Zanesení elektrody po 60 min zvláknování 1) vzniklá plachetka



Obrázek 28 výroba jádrové nanopříze



Obrázek 29 Vyrobená jádrová nanopříze

8 Závěr

V této práci je popsán návrh nového typu řešení výroby jádrové nanopříze. Inovací tohoto návrhu je příze, která prochází středem elektrody. Byly představeny tři možné návrhy konstrukce, z nichž jeden byl vybrán a dále vypracován do finální podoby. Finální řešení konstrukce elektrody splňuje všechny požadavky, které na něj byly kladeny. Největším benefitem navržené elektrody je možnost velmi jednoduché výměny vnějšího a vnitřního pláště. Tím může být změněn tvar, počet zvláknovacích stupňů, průměr, případně i materiál elektrody. Zajištění vnějšího a vnitřního pláště bylo voleno prostřednictvím O-kroužků za účelem snadné montáže a demontáže elektrody. Toto řešení bylo ověřeno několika experimenty, které prokázaly spolehlivost. Prodloužení hrdla, součástka, která vede přízi ve vrchní části elektrody je našroubovaná do těla elektrody a je také velmi jednoduše vyměnitelná. Celá elektroda je jednoduše rozebíratelná pro její důkladné čištění.

Provedené experimenty s roztokem PVB 10 % ověřily funkčnost navržené konstrukce elektrody. Bylo testováno několik variant tvaru elektrody a bylo ověřeno, že jsou schopny zvláknovat, přičemž v některých případech vykazovaly experimenty určité komplikace. Elektroda D, která vykazovala nejlepší chování, co se týče spolehlivosti přeplavování a tvorby nanovláken, byla využita při výrobě jádrové nanopříze. Na vyrobené jádrové nanopřízi bylo pozorovatelné výrazné opředení. Defekty v podobě nerovnoměrně navinutého nanovláknenného opletu se téměř nevyskytovaly. Elektroda je schopna výroby jádrové nanopříze zamýšlenou technologií, a to tak, že je příze vedena středem elektrody.

9 Zdroje

- [1] BERAN, Jaroslav, Jan VALTERA, Martin BĀ-LEK, Ondřej BAŤKA, Josef SKŘIVÁNEK, Petr ŽABKA, Jiří KOMÁREK, David LUKÁŠ, Pavel POKORNÝ, Eva KUŽELOVÁ-KOŠŤÁKOVÁ, Petr MIKEŠ, Jiří CHVOJKA, Tomáš KALOUS a Filip SANETRŇ-K. Lineární vláknenný útvar s pláštěm z polymerních nanovláken obalujícím nosný lineární útvar tvořící jádro, způsob a zařízení k jeho výrobě [online]. CZ2015382A3. 18. leden 2017. [vid. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/CZ2015382A3/cs?inventor=valtera&oq=valtera>
- [2] SKRIVANEK, J., R. JIRKOVEC, O. BATKA, P. HOLEC, T. KALOUS, P. ZABKA, M. BILEK a P. POKORNÝ. Production of Modified Composite Nanofiber Yarns with Functional Particles. *ACS Omega* [online]. 2023, **8**(1), 1114–1120. ISSN 2470-1343. Dostupné z: doi:10.1021/acsomega.2c06468
- [3] CHAMPAN, ROGER A. *Applications of nonwovens in technical textiles*. B.m.: Woodhead Publishing in textiles. Boca Raton: CRC Press, 2010. ISBN ISBN 978-1-84569-437-1.
- [4] DAVID LUKÁŠ A KOL. *Nanovlákná: Teorie, technologie a použití*. Praha: Academia, 2023. ISBN 978-80-200-3400-7.
- [5] PUHALOVÁ, Ivana. Odstředivé zvláknování biodegradabilních vláknenných materiálů [online]. 2014 [vid. 2024-05-21]. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/17727>
- [6] CHUDOBOVÁ, Ema, Šárka HAUZEROVÁ, Kristýna HAVLÍČKOVÁ, Luboš BĚHÁLEK, Jana MÜLLEROVÁ, Věra JENČOVÁ, David LUKÁŠ a Eva KUŽELOVÁ KOŠŤÁKOVÁ. Air-jet spinning of Biocompatible Polymeric Nanofibers for Wound Dressings. In: *NANOCON 2022* [online]. 2022, s. 181–187 [vid. 2024-05-21]. Dostupné z: doi:10.37904/nanocon.2022.4605
- [7] WILLIAM JAMES MORTON. Method of dispersing fluids [online]. No. 705691. New York. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/US705691A>
- [8] JOHN F. COOLEY. APPARATUS FOR ELECTRICALLY DISPERSING FLUIDS [online]. No. 692631. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/US692631A/en>
- [9] Y. FILLATOV, A. BUDYKA, a V. KIRICHENKO. *Electrospinning of micro-and nano fibers: Fundamentals in Separation and Filtration Processes*. New York: Begell house, nedatováno. ISBN 978-1-56700-241-6.
- [10] JIRSKÁK OLDŘICH, SANETRŇÍK FILIP, LUKÁŠ DAVID, KOTEK VÁCLAV, MARTINOVÁ LENKA, a CHALOUPEK JIŘÍ. Způsob výroby nanovláken z polymerního roztoku elektrostatickým zvláknováním a zařízení k provádění způsobu. 2003–2421.
- [11] BAŤKA ONDŘEJ. *Zvláknovací elektrody pro AC-electrospinning*. Liberec, 2022. Disertační práce. TUL.
- [12] PETRÁŠ@DAVID, MALÝ@MIROSLAV, POZNER@JAN, TRDLICKA@JAN a KOVÁČ@MARTIN. Rotary spinning electrode [online]. CZ299549B6. 27. srpen 2008. [vid. 2024-05-21]. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/CZ299549B6/en>
- [13] SÝBA, František a Miroslav MALÝ. Rotační zvláknovací elektroda [online]. CZ308360B6. 24. červen 2020. [vid. 2024-05-21]. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/CZ308360B6/en/en26>

- [14] PETRÁŠ@DAVID, MALÝ@MIROSLAV, KOVÁČ@MARTIN, STROMSKÝ@VÍT, POZNER@JAN, TRDLICKA@JAN, MAREŠ@LADISLAV, CMELÍK@JAN a JAKUBEK@FRANTIŠEK. Zpusob zvláknování kapalné matrice, zařízení pro výrobu nanovláken elektrostatickým zvláknováním kapalné matrice a zvláknovací elektroda pro takové zařízení [online]. CZ2007485A3. 22. duben 2009. [vid. 2024-05-21]. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/CZ2007485A3/cs?q=cz+pv+2007-485>
- [15] SOUČEK, Jiří. Zvláknovací elektroda pro výrobu směsového nanovláknenného materiálu [online]. 2019 [vid. 2024-05-21]. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/150926>
- [16] VODSEĎÁLKOVÁ, Kateřina. *Koaxiální elektrostatické zvláknování* [online]. B.m., 2018 [vid. 2024-05-21]. Technická Univerzita v Liberci. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/39037>
- [17] VALTERA, J., T. KALOUS, P. POKORNY, O. BATKA, M. BILEK, J. CHVOJKA, P. MIKES, E.K. KOSTAKOVA, P. ZABKA, J. ORNSTOVA, J. BERAN, A. STANISHEVSKY a D. LUKAS. Fabrication of dual-functional composite yarns with a nanofibrous envelope using high throughput AC needleless and collectorless electrospinning. *Scientific Reports* [online]. 2019, 9(1). ISSN 2045-2322. Dostupné z: doi:10.1038/s41598-019-38557-z
- [18] VINTER, Jan. Vliv molekulové hmotnosti PVB na jeho zvláknitelnost střídavým proudem [online]. 2021 [vid. 2024-05-21]. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/160799>
- [19] O. FRIEDRICH, J. SKŘIVÁNEK, O. BAŤKA, P. HOLEC, O. ĎURAČKA, T. JANEČEK, J. VALTERA, O. MELICH, M. BÍLEK, J. BERAN. *Výzkum a vývoj zařízení na výrobu nanovláknenných materiálů- Výzkumná zpráva za rok 2023*. 2023.
- [20] SKRIVANEK JOSEF, , VALTERA JAN, , BATKA OND, EJ, , SOUKUPOVA JULIE, , VYSLOUZILOVA LUCIE, , KOMAREK JIRI, , ZABKA PETR, , BILEK MARTIN, a , BERAN JAROSLAV. *Design of electrode for coaxial electrospinning*. Nanocon. B.m.: TUL. 2016.

10 Seznam příloh

Výkresová dokumentace