



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní



PRODUKCE NANOVLÁKEN METODOU TAŽENÍ

Disertační práce

Liberec 2015



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní



PRODUKCE NANOVLÁKEN METODOU TAŽENÍ

NANOFIBERS PRODUCTION USING DRAWING TECHNIQUE

Studijní obor: Výrobní systémy a procesy

Studijní zaměření: Aplikovaná kybernetika

Autor práce: Ing. Lukáš STANISLAV

Školitel: prof. Ing. Miroslav Olehla, CSc.

Počet stran: 125

Počet příloh: 9

Počet obrázků: 75

Počet tabulek: 8

Počet rovnic: 43

Anotace

Tato disertační práce pojednává o tažení nanovláken. Metoda výroby nanovláken tažením je v práci podrobně popsána jak teoreticky z pohledu fyziky zvlákňování, tak i z pohledu řízení a stavby automatizovaných produkčních strojů pro opakovatelnou výrobu s danou mírou spolehlivosti. Dále jsou popsány podpůrné modulární součásti pro rozšíření možností, jako je zákrutné zařízení, detektor přetrhu a krytí. Technologie je ve všeobecném smyslu směřována k aplikacím ve zdravotnictví a hledání vhodných aplikací pro její unikátní výrobky.

Klíčová slova: nanovlákná, nanopříze, metoda tažení, scaffoldy, servopohony

Summary

This dissertation discusses the technique of nanofibers drawing. This work describes the method in detail in terms of both theoretical physics of spinning, and from the viewpoint of the equipment design and automated production for reproducible quality and reliability. Further development consisted of auxiliary devices for improving technology usability, such as twisting device, rupture detection or protection shield. Technology is in the general sense is directed to applications in health care and finding suitable applications for its unique products.

Keywords: nanofibers, nanoyarns, drawing method, scaffolds, servo drives

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou doktorskou práci se vztahuje zákon č.121/2000 o právu autorském, zejména §60 (školní dílo) a §35 (o nevýdělečném využití díla k vnitřní potřebě školy).

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé práce a prohlašuji, že souhlasím s případným užitím mé práce (prodej, zapůjčení, ...).

Jsem si vědom toho, že užít své doktorské práce, či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem Technické univerzity v Liberci, která má právo ode mne požadovat přiměřený licenční příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

V Liberci, 20. března 2015

Ing. Lukáš STANISLAV

Místopřísežné prohlášení

Místopřísežně prohlašuji, že jsem doktorskou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury, pod vedením vedoucího a konzultanta práce.

V Liberci, 20. března 2015

Ing. Lukáš STANISLAV

Poděkování

Chtěl bych na tomto místě poděkovat svému školiteli prof. Ing. Miroslavu Olehlovi, CSc. a konzultantovi prof. RNDr. Davidu Lukášovi, CSc. za odborné vedení a připomínky k problematice, bez kterých by tato práce nemohla vzniknout.

V neposlední řadě bych rád poděkoval kolegům (zejména Ing. Janě Bajákové) za součinnost při experimentech i za cenné rady, a dále rodině, která mi byla celou dobu velkou oporou.

Obsah

PŘEHLED SYMBOLŮ A OZNAČENÍ.....	10
I. ÚVOD.....	14
II. PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU.....	17
III. TEORIE.....	21
1. Základy teorie zvlákňování.....	22
1.1. Přetržení vlivem meze pevnosti.....	22
1.2. Přetržení vlivem povrchové nestability.....	24
1.3. Makroskopický pohled.....	27
1.4. Vliv hydrodynamické stability.....	31
2. Servopohony.....	32
2.1. Servoměniče.....	34
2.2. Stejnosměrné motory (DC).....	36
2.3. Střídavé motory (AC).....	38
2.4. Dimenzování pohonů.....	40
2.4.1. Propustné pásmo.....	40
2.4.2. Nerovnoměrnost malých rychlostí.....	41
2.4.3. Dosažitelné polohové zesílení.....	42
2.4.4. Dynamická tuhost.....	42
2.4.5. Dvouhmotový systém.....	44
2.4.6. Ideální převod.....	45
2.5. Chyby interpolace.....	46
IV. PRAKTICKÁ ČÁST.....	49
1. Použitý princip dloužení.....	52
2. Návrh a realizace mikromanipulátoru I.....	54
2.1. Koncepce.....	54
2.2. Konvence v orientaci strojových souřadnic.....	56
2.3. Vedení.....	56
2.4. Pohon.....	60
2.4.1. Maximální rychlost.....	62
2.4.2. Kontrola maximálních otáček.....	62
2.4.3. Kontrola vzpěrné tuhosti šroubu.....	62
2.4.4. Volba řemenového převodu.....	63
2.4.5. Analýza vůlí.....	63
2.4.6. Minimální krok.....	64
2.5. Rám.....	64
2.6. Elektronika a software.....	66
2.7. Vyhodnocení konstrukce.....	68
3. Podpůrné moduly.....	70
3.1. Kryt stroje.....	70

3.2. Detektor přetrhu vláken.....	71
3.2.1. Optická vodivost.....	72
3.2.2. Elektrická vodivost.....	73
3.2.3. Akustická rezonance.....	74
3.2.4. Obrazová analýza.....	75
3.3. Dávkování polymeru.....	77
3.4. Ukládání vláken pro přepravu a lepení.....	78
3.5. Zákrutové zařízení.....	79
4. Návrh a realizace mikromanipulátoru II.....	83
4.1. Vedení a pohon.....	85
4.2. Elektronika a software.....	86
4.3. Vyhodnocení konstrukce.....	86
V. EXPERIMENTY A APLIKACE.....	89
1. Výrobní parametry.....	90
2. Struktury.....	92
2.1. Paralelní struktura.....	93
2.2. Křížená paralelní struktura.....	95
2.3. Příze.....	96
2.4. Vícekomponentní složení struktur.....	97
2.5. Spojování struktur.....	98
3. Scaffoldy pro tkáňové inženýrství.....	99
3.1. In-vitro studie.....	99
3.1.1. Závěrem.....	101
3.2. In-vivo studie.....	102
3.2.1. Podmínky studie.....	102
3.2.2. Hodnocení vzorků.....	103
3.2.3. Biomechanické hodnocení odebraných vzorků.....	105
VI. PŘÍPRAVA KOMERCIALIZACE.....	107
1. Patentové řízení.....	109
VII. ZÁVĚR.....	112
1. Doporučení dalšího postupu.....	114
POUŽITÁ LITERATURA A ZDROJE.....	116
VLASTNÍ PUBLIKAČNÍ ČINNOST.....	120
SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK.....	122
Obrázky.....	122
Tabulky.....	124
SEZNAM PŘÍLOH.....	125

Přehled symbolů a označení

Seznam zkratek

PLC	programovatelný logický automat (Programmable Logic Controller)
AFM	mikroskopie atomických sil (Atomic Force Microscopy)
SEM	řádkovací elektronový mikroskop (Scanning Electron Microscope)
PCL	poly(kaprolakton)
PVA	poly(vinyl alkohol)
PEO	poly(etylen oxid)
PVB	poly(vinyl butyral)
PMMA	poly(metyl metakrylát)
HA	kyselina hyaluronová
FG	rybí želatina
SGS	Studentnská grantová soutěž
CNC	číslicově řízené stroje (Computer Numeric Control)
CNT	uhlíkové nanotrubičky (Carbon Nano-Tubes)
LED	svítivá dioda (Light Emitting Diode)
AC	střídavé napětí (Alternating Current)
DC	stejnoseměrné napětí (Direct Current)
PC	osobní počítač (Personal Computer)
AgNO ₃	dusičnan stříbrný

Seznam symbolů

τ	relaxační čas
η	viskozita
p^*	napětí v tahu
E	youngův modul
K	kritická elastická energie jednotky objemu
x^*	dosažitelná délka vlákna bez přetrhu
x_p^*	dosažitelná délka vlákna bez pevnostního přetrhu
x_k^*	dosažitelná délka vlákna bez kapilárního přetrhu
v	rychlost
v_0	počáteční (úst'ová) rychlost tažení

ξ	axiální deformační gradient
δ	míra narušení, chyba
δ_0	počáteční narušení
R	rádus
R_0	počáteční rádus
λ	vlnová délka
μ	růstový faktor míry narušení
α	povrchové napětí
ε	poměrné prodloužení, úhlové zrychlení
L	délka
L_0	počáteční délka
σ	napětí, konduktivita
F	síla
S	plocha
ρ	měrná hmotnost
x_e	sledovací odchylka
K_v	zesílení polohové smyčky
K_r	zesílení rychlostní smyčky
K_m	konstanta motoru
K_C	konstanta převodů
x_l	vykonaná vzdálenost jednoho inkrementu
R_r	počet inkrementů enkodéru
d_{vst}	průměr vstupního členu
$d_{výst}$	průměr výstupního členu
Δn	rozdíl otáček
$n_{stř}$	střední otáčky
k_R	rázová dynamická tuhost
k_F	frekvenční dynamická tuhost
F_{EXT}	externí síla
F_{EXT0}	počáteční externí síla
x_{e0}	špičková hodnota výchylky
J	moment setrvačnosti
J_z	moment setrvačnosti zátěže
J_m	moment setrvačnosti motoru

J_{red}	redukovaný moment setrvačnosti
T_N	časová konstanta přechodu
f_N	frekvence zlomu frekvenční charakteristiky regulátoru
φ	úhel natočení
ω	úhlová rychlost
a	zrychlení
x	poloha
x_0	počáteční poloha
M	moment síly
m	hmotnost
k	tuhost
b	tlumení
Z	zatížení členu
Z_{red}	redukované zatížení členu
i	převodové číslo
i_{opt}	optimální převodové číslo
ε_z	úhlové zrychlení zátěže
ε_m	úhlové zrychlení motoru
Δ_x	odlehlost v ose x
Δ_y	odlehlost v ose y
Δ_{xy}	odlehlost
K_{vx}	zesílení polohové smyčky osy x
K_{vy}	zesílení polohové smyčky osy y
F_{POL}	přechodová funkce na hranici kvadrantu kruhové interpolace
ω_V	propustné pásmo pohonu
y_{max}	maximální průhyb
F_g	tíhová síla
d	průměr
l	délka
I_y	kvadratický moment průřezu
F_r	maximální řezná/technologická síla
F_t	třecí síla ve vedení. Velikost je většinou nutno odhadnout.
F_n	maximální síla, způsobená nevyvážením suportu (nevývažek)
v_r	rychloposuvová rychlost

v_p	maximální pracovní rychlost
f	frekvence
U	napětí, rozdíl potenciálu
I	elektrický proud
Q	elektrický náboj
G	konduktance
E_σ	aktivační energie vodivosti
z	počet závitů

I. Úvod

Dne 29.12.1959 vedl laureát Nobelovy ceny za fyziku Richard P. Feynman řeč na výročním zasedání Americké asociace pro fyziku při California Institute of Technology, která se stala světoznámou vědeckou přednáškou dvacátého století. Byla nazvaná „There's Plenty of Room at the Bottom“ [1]. Představil vizi extrémní miniaturizace několik let před tím, než bylo známo slovo „čip“. Mluvil o problematice manipulování a kontrole miniaturizovaných objektů. Pomocí známých fyzikálních principů, jevů a jejich extrapolováním předurčil technologii, využívající přírodu jako stavebnici atomů a molekul. Mnoho vynálezů a objevů ve výrobě nano-objektů potvrdilo tuto vizi [2].

Podíváme-li se na historii v této oblasti blíže, je nutné zahrnout i řadu dalších, třeba i nepřímých pionýrů nanotechnologie. První zmínky o nanovlákních jsou známy již z roku 1902, a to v podobě patentu Johna F. Cooleyho, Apparatus for electrically dispersing fluids. Cooley se zabýval sprejováním v elektrickém poli. Následuje patent z roku 1929, kde je popsána příprava umělého hedvábí v přítomnosti elektrického pole. Metoda známá pod názvem electrospinning je považována za první metodu umožňující tvorbu nanovláken, poprvé byla zveřejněna v roce 1934. Patentoval ji Anton Formhals (US patent, 1-975-504). Další, kdo učinil krok ve vývoji nanovláken, byl profesor Harold L. Simons, který v roce 1966 patentoval přístroj na výrobu ultratenkých a ultrajemných nanovláknenných tkanin s různými vzory při použití elektrického zvláknování. Profesor Peter K. Baumgarten v roce 1971 zhotovil přístroj k elektrovláknování akrylických vláken s průměrem v rozsahu 0,05 – 1,1 μm . Dalšími následovníky byli Darell Renker, Iksoo Chuna, L. Larrond a John Manley, na které navázal tým profesora Oldřicha Jirsáka z Technické univerzity v Liberci. [3][4][5]

Pojem nanotechnologie je v posledních letech jedním z nejskloňovanějších termínů řady vědních oborů, ale i laické veřejnosti. Pojem „nano“ je odvozen z řeckého jazyka – *nanos* (trpaslík) a *techné* (zkušenost, dovednost). Nanotechnologie doslova znamená „technologie v měřítku nanometrů, využívaná v reálném světě“ [2]. Zabírá produkci a aplikaci fyzických, chemických a biologických systémů v měřítku od jednotlivých atomů až po submikrony, stejně jako jejich integraci do větších či složitějších systémů. Nanotechnologie mají obrovský význam pro světovou ekonomiku a společnost na přelomu století, zcela zřejmě v oboru polovodičů, informačních technologií a molekulárním inženýrství. Věda a výzkum v rozměrech nanometrů předkládá možnosti pro posun materiálovém inženýrství, nanoelektronice, medicíně, energetice, biotechnologiích, informačních technologiích, atd. Je označována jako další průmyslovou revolucí. [2]

V praxi nanotechnologie zahrnuje jevy techniky, zařízení nebo struktury, jejichž rozměry odpovídají úrovni nanometrů, tedy atomové a molekulární úrovni. Za nanotechnologie lze označit jen takové systémy, materiály, jejich aplikace nebo způsoby tvorby, které mají alespoň jeden rozměr nebo svoji vnitřní strukturu v intervalu velikostí 1-1000 nm (0,001-1 μm) a využívají fyzikálních nebo chemických vlastností na úrovni atomů a molekul tak, že mají neobvyklé charakteristiky v porovnání se stejným materiálem nebo systémem, který nemá složky s nanorozměry. Nanovlákná lze připravit několika způsoby:

- Podložková syntéza je způsob výroby, který využívá membránu s póry o velikosti nanorozměrů pro tvorbu nanovláken nebo nanotrubiček. Takto vyrobené nanoproducty mohou být z různých materiálů, např. elektricky vodivých polymerů, kovů, polovodičů a uhlíku. Při použití této metody však není možné vyrobit jednotlivá nanovlákná.
- Fázová separace je založena na rozpouštění, želatinace, extrakce použitím různých rozpouštědel, mrazením a sušením, s nanorozměrnou pórovitou pěnou jako výsledkem. Proces je časově náročný.
- Samoorganizování je proces, při kterém se jednotlivé prvotní složky organizují do požadovaných vzorů a funkcí. Tento způsob je také časově náročný.
- Elektrostatické zvlákňování je postup pro masovou výrobu nanovláken z různých polymerů. Tímto způsobem vzniká neorientovaná nanovláknenná vrstva. Použitím speciálních kolektorů lze orientaci nanovláken ovlivnit. Jedná se o nejvyužívanější metodu [6].
- Tažení (dloužení, drawing) je postup založený na mechanickém vytahování a dloužení jednotlivých vláken z polymerních roztoků nebo tavenin.

Ponecháme-li pro začátek stranou práci kolegů našeho týmu z jiných oborů, kteří také velmi významně přispívají k výzkumu a rozvoji technologie, dá se nutný teoretický základ pro výrobu ojednocených nanovláken metodou tažení omezit na dvě oblasti: teorie zvlákňování a teorie servopohonů. Řešení problematiky vyžaduje silně mezioborový pohled a tyto dvě oblasti jsou základem k stavbě strojního zařízení, které se bude snažit blížit k dokonalému, ač nedosažitelnému, stavu pomocí všech dohledatelných a dostupných principů. Tedy i z jiných oborů.

II. Přehled současného stavu

Metoda tažení individuálních nanovláken je prvně popsána v článku Ondarçuhu a Joachim [7] z roku 1998. Autoři popsali technologii ručního tažení vláken z kapky polymerního roztoku pomocí mikropipety a demonstrovali, že průměry těchto vláken mohou sahát do oblasti nanometrů. Ukázali, že způsobem podobným suchému zvlákňování mohou být tažena nanovlákná s rozměry srovnatelnými s jednostěnnými uhlíkovými nanotubicemi. Významný rozdíl s trubicemi je, že vytvořená nanovlákná jsou vyráběna jedno po druhém. Také bylo prokázáno, že nanovláknó může být umístěno přesně na podklad při jeho zhotovení, dále může být řezáno nebo s ním manipulováno pomocí AFM hrotu.

Tažení vlákna vyžaduje materiál s výrazným viskoelastickým chováním, který vydrží silné deformace, přičemž musí být dostatečně soudržný pro udržení napětí vyvinuté během tažení. Kromě toho je proces tažení vždy doprovázen tuhnutím, které přetváří výchozí polymerní roztok do pevného vlákna. V případě zvlákňování z taveniny je tuhnutí docíleno ochlazením polymerní taveniny, v případě zvlákňování z roztoku dochází k odpařování rozpouštědla z výchozího polymerního roztoku v průběhu dlouhého procesu. Tyto složité procesy utvářejí finální průřez vlákna, který je velmi závislý na rychlosti dloužení, rychlosti chlazení nebo vypařování rozpouštědla a na přesném složení materiálu [8].

Proces tažení může být považován za suché zvlákňování na molekulární úrovni. Výroba polymerních vláken o průměru v rozsahu od mikrometrů do nanometrů vyvolal značný zájem vzhledem k jejich možným aplikacím, jako je nano-elektronika [9] a optické senzory [10][11][12]. Tyto aplikace vyžadují zhotovení jedno (1D), dvou (2D) či trojrozměrné (3D) sítě nanovláken. Nejprve jsou vytvořeny jednotlivé komponenty a ty jsou následně sestavované do větších struktur. Prvním krokem v tomto výrobním postupu je vytvoření jednotlivých vláken [13]. Vodivé polymery mohou být použity jako elektrické propojení a nevodivá vlákna mohou být také použity jako mechanické prvky mikro-elektro-mechanických systémů nebo jako bio mimetické fibrilární lepidla. Navíc, zhotovení vláken pomocí proximálních sond může být použito pro studium reologického chování polymerů na submikronové úrovni [13][14].

Další možné použití jednotlivých nanovláken je pro výrobu přízí s přesně stanoveným počtem nanovláken. Nanopříze mohou být použity jako biologické sondy pro snímání nepatrného množství kapaliny jako v článku [15] nebo pro identifikaci nebezpečných látek uvolňovaných do ovzduší. Vhodnými teoretickými nástroji pro popis zkoumaného jevu formování jednotlivých nanovláken jsou hydrodynamika a termodynamika. Hydrodynamika

popisuje proces formování vlákna a jeho Plateau-Rayleigh nestabilitu [16], zatímco termodynamika popisuje sol-gel přechod, který stabilizuje a tvoří vlákno.

Teorie zvlákňování popisují vztah mezi dloužicí rychlostí a viskozitou použitého polymerního roztoku na jedné straně a délkou vlákna na straně druhé. Vztah mezi parametry technologie drawing a průměrem vytaženého vlákna zůstává nejasný. Provedli jsme předběžný průzkum a praktické experimenty týkající se technologie tažení individuálních nanovláken. Podařilo se nám vyrobit nanovlákná z následujících polymerních roztoků: Polykaprolakton (PCL), polyvinylalkohol (PVA), polyetylen oxid (PEO), polyvinylbutyral (PVB), polymethylmetakrylát (PMMA) a směs kyseliny hyaluronové (HA) a rybí želatiny (FG). Ze všech zmíněných materiálů jsme vyrobili vlákna s průměry menšími než jeden mikrometr. Vlákna byla většinou tažena ručně a umístěna na papírovém podkladu pro další manipulaci a testování. Proces, při kterém byla vlákna vyrobena, byl vždy stejný. Nejprve byla připravena koncentrační řada konkrétního polymerního roztoku pro následné testování a nalezení nejvhodnější koncentrace roztoku. Koncentrace a molekulová hmotnost polymeru má značný vliv na tažení vláken pomocí dloužicího elementu. Tyto parametry spolu s dloužicí rychlostí mají významný vliv na konečný průměr vlákna. Nejjemnější vlákna byla vytažena z 40% roztoku PVA s molekulovou hmotností 67 000. Průměr vláken byl okolo 200 ± 9 nm. Rychlost tažení pro všechny materiály byla asi 0,02 m/s. Předpokládali jsme následné uplatnění individuálních nanovláken pro výrobu přesných přízí, tj. přízí s definovaným počtem nanovláken. V článku [17] je popsán postup výroby příze z devíti nanovláken.

Další experiment ukázal tvorbu jednotlivých nanovláken z kapalinového sloupce. Kapalným sloupce polymerního roztoku byl vytvořen mezi dvěma kapilárními otvory. Kapiláry se od sebe pohybují rychlostí v . V průběhu vzájemného vzdalování kapilár mění kapalinový útvar svůj tvar z původního válce na katenoid (útvary s konstantní hodnotou křivosti). Kapalinový útvar tvořený nízkomolekulární kapalinou, např. vodou, se následně rozpadá v důsledku Rayleigh-Plateau nestability. Nicméně polymerní roztoky vykazují zcela odlišné chování. Pro některé systémy polymerních roztoků a pro určité hodnoty rychlosti pohybu kapilár vzniká mezi kapilárami tenké a stabilní válcové těleso. Tenká cylindrická část vlákna je delší než Plateauova mezní hodnota a proto vlákno musí být vytvořeno z pevného polymerního gelu. Okamžitá přeměna mezi polymerním kapalným roztokem a gelem lze popsat pomocí nerovnovážné termodynamiky.

Práce [18] se zabývá nanomateriály používanými jako nanosenzory. Srovnává konvenční senzory s těmi založenými na nanomateriálech pro měření různých fyzikálních veličin, jako je elektrická vodivost, vlhkost, koncentrace různých sloučenin. V této práci jsou také popsány chemické senzory z nano-drátků, které jsou schopny detekovat chemikálie zachycené nebo absorbované na senzorech pomocí změny jejich elektrického odporu.

Výsledky výzkumu elektrické vodivosti poly(vinylidenfluoridových) nanokompozitů, plněné dokonale čistými vícesměnnými uhlíkovými nanotrubicemi, jsou popsány v práci [19].

III. Theorie

1. ZÁKLADY TEORIE ZVLÁKNOVÁNÍ

Termín zvláknitelnost, nemající žádnou exaktní definici, znamená prakticky schopnost tvořit vlákna z daného materiálu. Materiál označujeme jako zvláknitelný, pokud je schopný obrovských nevratných deformací, pokud jsou vystaveny jednosměrným zatížením. Měřítkem zvláknitelnosti je pak dosažitelná délka. Je zřejmé, že zvláknitelnost je sice nezbytnou, ale ne jedinou podmínkou pro tvoření vláken – například med výše popsané splňuje, neoznačili bychom jej však za schopný tvořit vlákna. Přesněji lze vláknotvorbu definovat jako: materiál je schopen dloužit vlákna, pokud při daných plynulých deformacích nevykáže jakékoliv porušení – přetrh [20]. Příčinami výskytu přetrhu se tedy zabývá teoretická část.

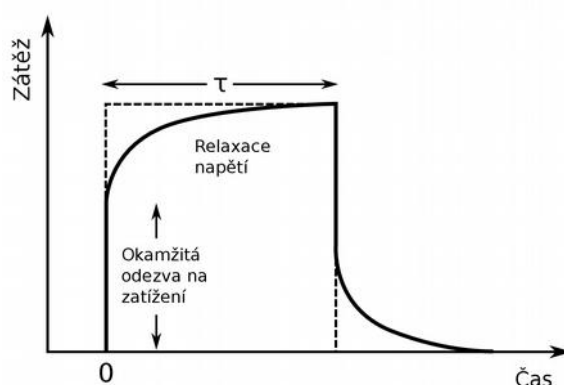
Jako základní přístup v cestě za porozuměním a popisu pochodů při zvláknování lze použít analogii prodlužování plastického válce a volného vodního proudu. Oba jevy byly podrobně popsány v řadě publikací (Plateau, Rayleigh, Nitschman and Schrade, Hirai, Takserman-Krozer, ...). Pro postavení teorie je nutné najít fyzikální příčiny vzniku přetrhu a tím identifikaci jednotlivých parametrů.

1.1. Přetržení vlivem meze pevnosti

Prvním důvodem k narušení dloužení je kohezní princip, tedy pevnost/křehkost. K přetržení dochází, pokud napětí překročí mez pevnosti v tahu. Elasticita vlákna je zde klíčem – v ideálně viskózní kapalině by se válec nekonečně deformoval a deformační energie disipovala. Ve skutečné, viskoelastické kapalině se však část deformační energie uchovává a při překročení kritické hodnoty (meze pevnosti) dojde k narušení [20].

Pro pochopení mechanismu přetržení je třeba zavést pojem relaxace napětí a relaxační čas (τ) (tedy čas, za který dojde k relaxaci napětí). Reálná viskoelastická kapalina není spojitá, jako ta ideální, a dokáže přenášet tečná napětí. Je složena z molekul a ty mezi sebou vykazují vazby druhého a vyššího řádu. Při vybuzení deformace struktury se zvýší napětí mezi vazebnými body a jejich přeskupení do nové, energeticky výhodnější polohy není okamžité – trvá právě relaxační čas (obrázek 1). V technické praxi je jev označován jako „tečení“ a vykazují ho všechny polymery [21]. Viskozita η je přímo úměrná relaxačnímu času.

$$\eta = \frac{E}{3} \tau \quad (1)$$



Obr. 1: Relaxace napětí viskoelastické kapaliny

Jako příklad lze uvést lineární viskoelastickou kapalinu (Maxwellovu kapalinu), u které je napětí v tahu p^* vyjádřeno:

$$p^* = (2 \cdot E \cdot K)^{1/2} \quad (2)$$

K je kritická elastická energie jednotky objemu a E Youngův modul. K přerušení dojde, pokud je dlouhící rychlost větší nebo rovna určité kritické hodnoty

$$\dot{e}_{xx} \geq \left(\frac{2K}{E \cdot \tau^2} \right)^{1/2} \quad (3)$$

kde τ je relaxační čas.

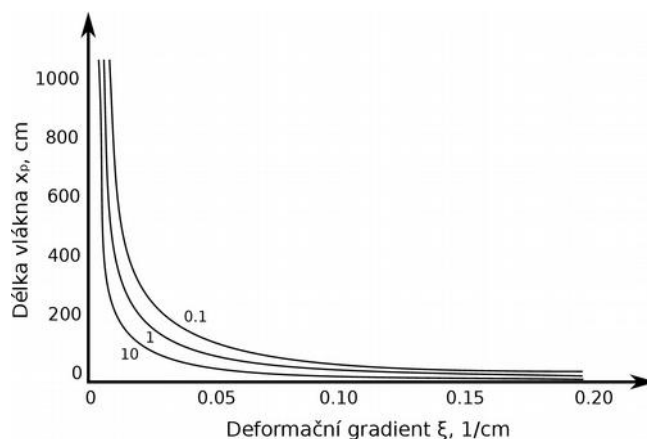
Pro naši úlohu je však nejdůležitějším parametrem dosažitelná délka vlákna bez pevnostního přetrhu x_p^*

$$x_p^* = \frac{\ln\left(\frac{2K}{E}\right) - 2 \ln(v_0 \cdot \tau \cdot \xi)}{2\xi} \quad (4)$$

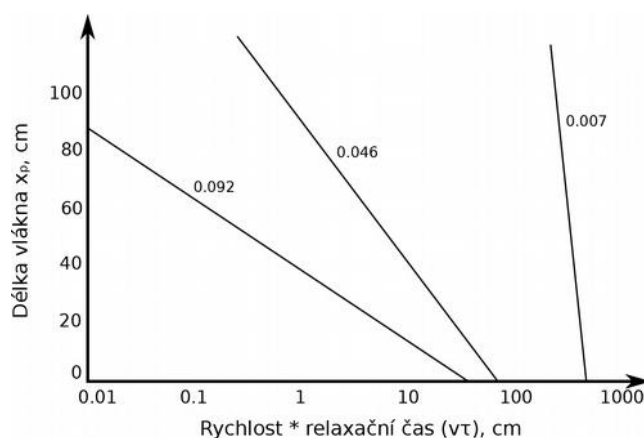
kde v_0 je počáteční (úst'ová) rychlost tažení a ξ axiální deformační gradient, závislý na rychlosti v :

$$\xi = \frac{d(\ln v)}{dx} \quad (5)$$

Jak je vidět ze vztahu a obrázků 2 a 3, x_p^* se zvyšuje s kritickou elastickou energií K a snižuje s deformačním gradientem ξ , rychlostí v_0 a relaxačním časem τ . [20][22][23].



Obr. 2: Kritická délka dle pevnostního přetruhu proti deformačnímu gradientu. Označen násobek rychlosti a relaxačního času



Obr. 3: Kritická délka dle pevnostního přetruhu proti násobku rychlosti a relaxačního času. Označen deformační gradient

1.2. Přetržení vlivem povrchové nestability

Další proces, vedoucí k přetruhu kapiláry je spojen s povrchovým napětím a vlnami, vedoucími k finální globulizaci válce. Jako první popsal tuto nestabilitu Joseph Plateau v roce 1873 pomocí experimentálního pozorování. Přišel s poznatkem, že k nestabilitě

dochází v momentě, kdy délka sloupce dosáhne přibližně 3.13 násobek jeho průměru [24]. Později bylo jeho pozorování doplněno analytickým řešením Lorda Rayleigha, který na něj přímo navázal v [25].

Výzkum byl prováděn zejména za účelem vysvětlení mechanismů, působících v akustice při směšování (respektive izolace) proudu tekutiny do statického prostředí. Do té doby nebyl tento jev dostatečně popsán. Zpočátku byly jako parametry, ovlivňující průběh jevu, identifikovány rozdíly mezi měrnými hmotnostmi dvou médií a dle Plateaua rychlostní gradient v dělicí vrstvě. Zkoumán byl vodní sloupec, padající v měřicí aparatuře z výše položeného ústí zásobníku [25].

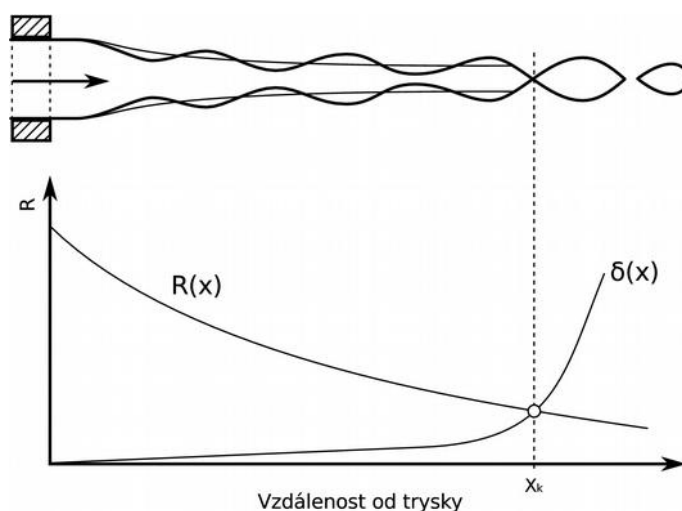
Nestabilita je dle Rayleigha způsobena přítomností malých chaotických rušení v každém tekutém systému. Všechny reálné proudy tekutiny jsou vystaveny nepredikovatelným a prakticky nezjistitelným rušením, které exponenciálně přerostou v nestabilní systém tím, že vyvolávají svými následky větší a větší nepravidelnost v pružné stěně toku. Ve sloupci se nestabilita projevuje rotačními sinusoidami na povrchu, které, po projekci do časové osy, vykazují řád astatismu, popsány v [26].

Nestabilní povrch lze popsat nenulovou křivostí v axiálním směru. Na některých místech pozitivní, na některých negativní. Díky Youngovi-Laplaceovi lze říci, že zúžené oblasti vykazují vyšší tlak než rozšířené. Tento pružný kmitající systém se časem vybuduje do rozměrů, kdy dojde k narušení slabší části a vlivem povrchového napětí se uzavře tak, že vzniknou kapky – jak je vidět na obrázku 4.

Rayleigh-Plateau nestabilita je definována dvěma faktory: míra růstu narušení a délka, po kterou nestabilita roste. V tomto systému je čas letu – dloužení – v přímé korelaci s délkou, dělenou rychlostí letu. Rychlost nárůstu odchylek je důležité, protože charakterizuje to, co zahájilo nestabilitu. Míra narušení δ roste spontánně z počátečního narušení δ_0 , které musí existovat z důvodu geometrické nedokonalosti počátečního stavu.

$$\delta(t) = \delta_0 \exp(\mu \cdot t) \cos\left(\frac{2\pi \cdot x}{\lambda}\right) , \quad (7)$$

kde λ je vlnová délka pro kterou platí $\lambda > 2\pi R$ a μ růstový faktor míry narušení. Počáteční narušení geometrické dokonalosti δ_0 (obvykle řádu 10^{-5} až 10^{-6}) je tvořena nepravidelností tvořícího elementu (tryska, jehla, ...) nebo fluktuacemi hustoty kapaliny. K přetržení dojde v momentě, kdy narušení dosáhne hodnoty zmenšujícího se průměru tělesa (obrázek 5) [20].

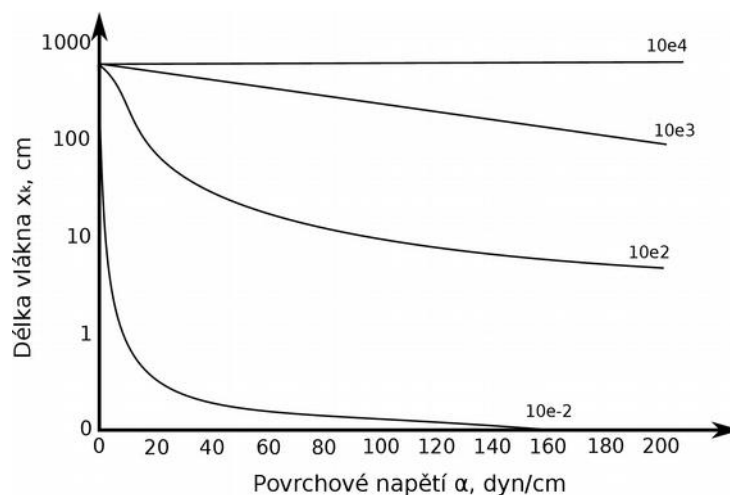


Obr. 4: Přetržení v důsledku kapilárních vln

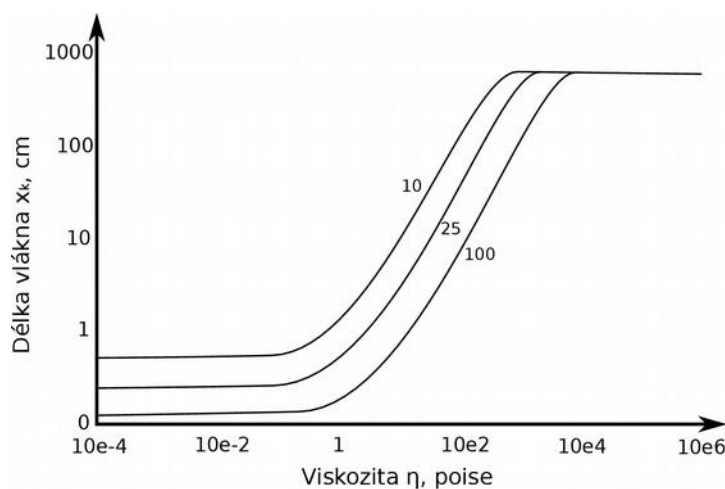
Obecná podmínka pro přetrhnutí je dána rovnicí:

$$\delta(x) = R(x) \quad \text{při} \quad x = x^* . \quad (8)$$

Kvantitativní teorie přetrhu rozvlněním povrchu izotermních newtonovských kapalin formuloval Weber [27], Tomotika [28]. Je to zjednodušený model, který je pro nenewtonovské kapaliny mnohem komplexnější. Jeho přibližné výsledky však pro orientaci postačují (obrázky 5 a 6).



Obr. 5: Dosažitelná délka vlákna před přetržením vlivem kapilárních vln proti povrchovému napětí; vyznačena viskozita



Obr. 6: Dosažitelná délka vlákna před přetržením vlivem kapilárních vln proti viskozitě; vyznačeno povrchové napětí

Jak je ze závislostí zřejmé, dosažitelná délka se zvyšuje s viskózitou a klesá s povrchovým napětím kapaliny. Přibližný vztah pro vyšší viskozity a nižší povrchové napětí je teoretické určení délky:

$$x_k^* \approx \frac{2 \ln\left(\frac{R_0}{\delta_0}\right) - \left(\frac{2\alpha}{3\eta \cdot v_0 \cdot R_0 \cdot \xi}\right)}{\xi}, \quad (9)$$

kde ξ značí deformační gradient, α povrchové napětí. [20].

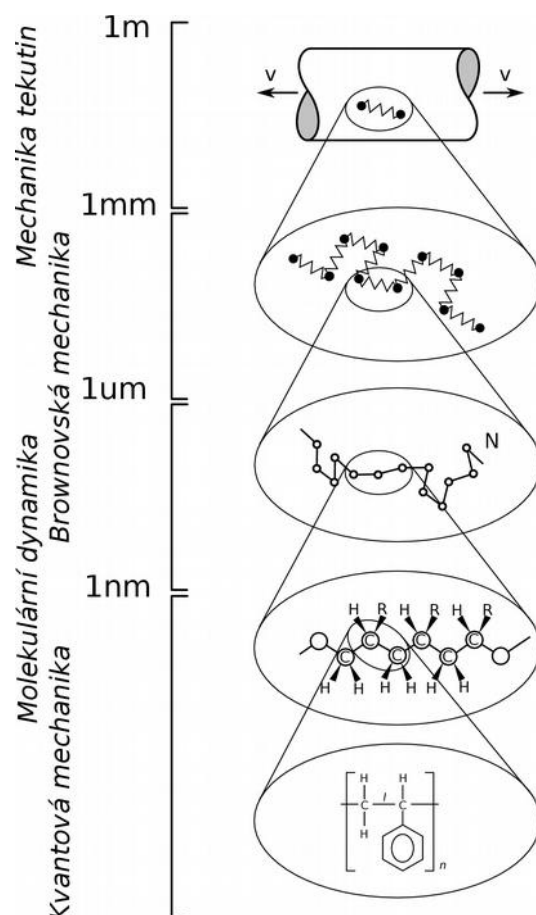
1.3. Makroskopický pohled

Zvláknování z roztoku nebo taveniny polymeru lze obecně definovat jako transformace newtonovských tekutin ve formě cylindrické formace mezi dvěma koncovými body [29]. Koncové body se od sebe vzdalují předepsaným pohybem tak, že je formace podrobována značným dlouhým deformacím. Pochody uvnitř tělesa při dloužení popisuje obor, nazývaný rheologie (nauka o deformaci látek v závislosti na čase) a ke svým popisům používá měřicí přístroj, tzv. deformační rheometr, neboli trhací zkušební stolice.

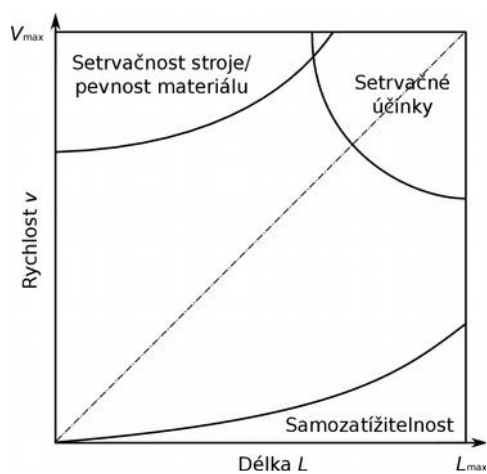
Měřené vztahy při prodlužování jsou závislé na funkci míry prodloužení a vyvolaném napětí. Zároveň jsou v souladu se vztahovými rovnicemi mezimolekulárních sil komplexních tekutin. Dynamická odezva vlákna je krom toho dále závislá na rheologii použité tekutiny a může vést k nestabilitám viskoelastického tečení, jako je tvorba krků nebo přímo přetrhu [29].

Nonnewtonská mechanika tekutin se liší od newtonovské mechaniky tekutin. A polymerní kapaliny vykazují řadu vlastností, které není možné pozorovat u newtonovské kapaliny. Viskoelastická povaha materiálu znamená, že část napětí v elementu kapaliny závisí na celé historii deformací, jimž byl tento prvek vystaven. Napětí tedy může být vyjádřeno jako funkční závislost gradientu rychlosti, času a dalších mikrostrukturálních detailů. Řada stavových rovnic, které byly vyvinuty pro polymerní materiály mohou být vhodně implementovány mnoha různými způsoby v závislosti na pohledu uživatele.

Rozvoj kinetické teorie pro polymery se stal skvělým výstupem rheologie jako oboru a umožňuje popis dějů v polymerním roztoku v různých měřítkách. Progresivní rozlišování v hierarchii mikrostrukturního modelu roztoku polymeru je znázorněno na obrázku 7. Uvedené číselné hodnoty jsou typické pro PS (molekula s molekulovou hmotností $2,25 \times 10^6$ g/mol.) [29]. Uvedené vztahy jsou jen náhledem do oboru, který dal zejména základ k pochopení vnějšího chování polymerního vlákna při jeho dloužení v podobě makro-vztahů. Nejdůležitější vztah rychlosti a tažené délky je uveden na obrázku 8.



Obr. 7: Progresivní rozlišování v hierarchii mikrostrukturního modelu roztoku polymeru



Obr. 8: Náčrtek předpokládané situace obecného dloužení

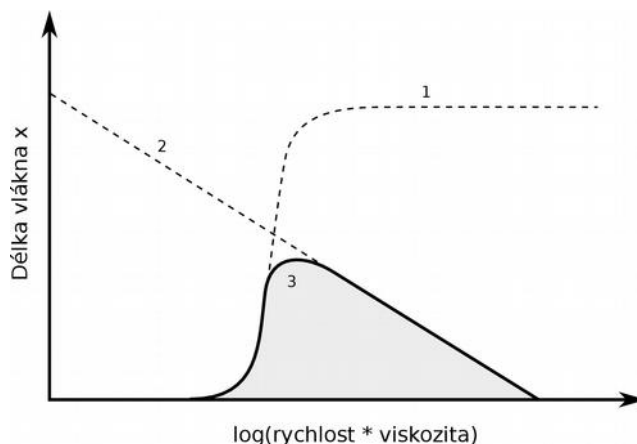
Vývoj stavu vlákna v průběhu dloužení na rheometru se dá rozdělit do následujících částí: prodlužování, relaxace napětí, porušení. Testy se provádějí na vlákně kruhového průřezu. Pro snazší měřitelnost je testovacím materiálem takový, který je schopný vykazovat tečení, ale nachází se v tuhém stavu – typicky polyolefin, například PS. Pro potřeby popisu stavu testovacího vzorku zavedeme poměrné prodloužení $\varepsilon = L/L_0$. Měření probíhá za konstantní rychlosti, snímána je pouze vyvíjená (tedy odporová) síla a příčný průřez vzorku.

Během počátečního dloužení se exponenciálně zmenšuje plocha průřezu. Na začátku (při $\varepsilon < 1$) je patrný vrchol zatěžující síly, následovaný plynulým snižováním, způsobeným snižováním plochy průřezu. Další událost nastává při $\varepsilon \approx 3$, kde se zatěžující síla opět zvyšuje z důvodu deformačního zpevnění v tahovém napětí. Protože průřez se stále exponenciálně zmenšuje, zvyšující se síla ($\sigma = F/S$) prokazuje, že napětí ve vlákně rychleji, než $\exp(\varepsilon)$. Další vrchol ve funkci zátěžové síly nastává při větších poměrných prodloužení ($\varepsilon > 5$), po kterých je odporové napětí nasyceno a viskozita materiálu dosáhne konstantní části.

Nastává druhá část procesu dloužení – relaxace, při kterém vnitřní tahová napětí klesají, zatímco průřez zůstává téměř neměnný, následovaný poslední fází – porušením vlákna. To je způsobeno zúžením tělesa na části, která je aktuálně nejvíce náchylná k nestabilitě, kde se vnitřním napětím nestimulovaný průřez poddá svému povrchovému napětí a vlivem Rayleigh-Plateau nestability dojde ke globulizaci hmoty, a tím k porušení souvislého vlákna [30].

Z testu je zřejmé, že při dloužení nanovláken z polymerního roztoku je nejkritičtější fáze relaxace vnitřního napětí a působení Rayleigh-Plateau nestability, která fázi ukončí. Pro úspěšné vydlovení významně dlouhého vlákna je třeba nestabilitu prozkoumat a ovládnout parametry procesu, které ji způsobují. Pokud je jak předpokládáno poměrné prodloužení v přímé korelaci s kontrakcí (poměrné zúžení průřezu), je oddálení momentu porušení klíčem pro úspěšnou a zejména determinovanou produkci nanovláken metodou mechanického tažení.

Proces porušení (přetržení) vlákna lze popsat pomocí analogie volného pádu vodního sloupce, který je bez významného vlivu okolí subjektem přirozeného rozpadu vlivem povrchového napětí. Jak sloupec padá, jeho délka dosáhne kritické hodnoty. V tomto kritickém momentě válec ztratí svůj tvar a začne se rozpadat na proud kapiček.



Obr. 9: Délka vlákna proti $\log(\text{rychlosti} * \text{viskozity})$ jako výsledek vlivu dvou mechanismů přetrhu; křivka 1: pevnostní mez; křivka 2: kapilární narušení; křivka 3: reálná kombinace obou

Výše jsme si uvedli dva principy, dle nichž je omezená tvorba vláken. Oba principy jsou závislé na počáteční geometrii, ze které se vychází a lze tedy s určitou tolerancí říci, že je můžeme aplikovat pro nanovlákná pouhou změnou měřítka. Miniaturní výchozí bod pak bude vést k vydloužení nanovlákná, pokud zamezíme (nebo lépe řečeno oddálíme) moment, kdy dojde k přetržení. Spojíme-li oba principy a zanedbáme méně důležité parametry, dostaneme následující závislost dosažitelné délky (obrázek 9).

1.4. Vliv hydrodynamické stability

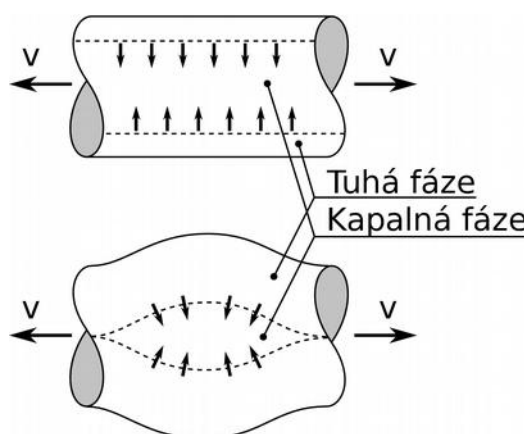
Zvláknitelnost byla výše popsána jako schopnost vydloužit vlákno bez přetrhu. Byla definována pracovní oblast, vymezená jakýmkoliv přetrhem. Taková definice je nutná pro naši technologii, kdy chceme dosáhnout dlouhé, spojitě vlákno o stabilních vlastnostech.

V klasické hydrodynamice je stabilita toku definována jinak. Tok je hydrodynamicky stabilní tehdy, když malá výchylka s časem nenaroste do teoreticky nekonečných rozměrů s časem, ale buď dosáhne rovnovážného stavu, nebo se utlumí. Jinými slovy je koeficient růstu výchylky μ menší nebo roven nule. Ten lze dle [27] vyjádřit jako:

$$\mu = \frac{\alpha}{R_0(6\eta + \sqrt{8\rho\alpha R_0})}, \quad (10)$$

kde figuruje povrchové napětí α , viskozita η , měrná hmotnost ρ a radius kapiláry R_0 . Ze vztahu je zřejmé, že řídicí parametry jsou vlastní materiálu.

Při procesu tažení z kapky polymeru zde však působí ještě další, mechanický princip – solidifikace povrchu. Vytváří se tak fázový kompozit jádro-plášť, kde stále kapalně jádro působí jako zásobník materiálu; a pevný plášť jako ochrana před vlivy atmosféry a vodič kapaliny. Tento jev je nejen výhodný pro zamezení vytváření výchylek, ale dokonce tlumí již existující výchylky z důvodu stejnoměrné solidifikace, dané gradientem koncentrací rozpouštědla. Chování je vidět na obrázku 10. Stejný princip zlepšuje stabilitu při ochlazování u zvláknování z taveniny [31][32][20].



Obr. 10: Stabilizace kapilárních vln solidifikací povrchu

2. SERVOPOHONY

Klíčovým elementem v cestě za mechanickým zvláknováním nanovláken jsou vhodné navržené pohony produkčního stroje. Stroj a jeho správná funkčnost je podmíněna řadou parametrů, které jsou dány celým kinematickým řetězcem, který ale není ohraničen pouze mechanikou. Jeho vhodnost a kvalita je určena i elektronickou a software částí – celkově tedy mechatronikou. Všechny články působí navzájem a ač i zde platí, že řetěz je tak silný jako jeho nejslabší článek, dobře zvolený pohon je zcela zásadní.

Slovo *servo* pochází z latinského slova *servus*, které označuje služebníka, či nohsleda. Dle této definice lze servo definovat jako systém, schopný udržovat určité parametry dle uživatelsky definovaných pravidel – dle přání. Zatímco první část definice zvládl již Ktesbios Alexandrijský cca v roce 200 př. n. l. jeho vynálezem vodních hodin, druhou část, tedy kontinuální adaptace na výchylky, se dá připisat až Jamesu Wattovi v roce 1788 díky jeho vynálezu odstředivého regulátoru parního stroje. Následující vynálezy, jako byly

například redukční ventily, významně přispěly historicky k nastartování průmyslové revoluce a technologicky ke vzniku vědy o servomechanismech. Krom těchto „hardware“ inovací přišla řada nových matematických postupů, jako byla Lyapunova teorie stability (1890) nebo frekvenční analýza (1920). Velký rozmach servopohonů zaznamenalo období druhé světové války, kdy byla tato technologie využívána pro nejrozmanitější účely, zejména vojenského charakteru [33].

Servomechanismus je tedy zpravidla označení pro polohově řízený pohon. Fyzikální princip řízeného pohonu je libovolný a typicky jsou elektrické, pneumatické a hydraulické. Jejich sklad a základní funkcionalita je mezi odbornou veřejností všeobecně známa a nebude tedy podrobně popsána. Lze říci, že servopohon lze obecně vytvořit z jakéhokoliv motoru přidáním zpětnovazební smyčky a příslušného regulátoru.

Pro naše účely omezím přehled na polohovací servopohony, které se dají kromě speciálních typů rozdělit na přímočaré a rotační. Z možných principů vybereme ty elektrické, neboť jsou pro přesné polohování u manipulátorů a výrobních strojů (jako je ten náš) využívány téměř výhradně. Ty se tedy mohou principiálně rozdělit na stejnosměrné (kartáčové a elektricky komutované) a střídavé (synchronní a asynchronní). Z následujícího textu vyplynou požadavky na ideální pohon a ty daly vzniknout zvláštnímu druhu elektrického pohonu, tedy přímočarému. Jeho princip je stejný jako u zmíněných rotačních, nicméně rozvinutím statoru i rotoru lze z kinematického řetězce vypustit veškeré převodové členy (typicky rotační-rotační-přímochary) a dosáhnout tak nebývalé dynamiky a spolehlivosti. Proti jejich použití však hovoří jejich vysoká pořizovací cena.

Prakticky využívané a dostupné motory jsou stejnosměrné (DC) kartáčové a střídavě napájené (AC) synchronní. Jsou pro ně samozřejmě dostupné příslušné servoměniče, tedy silové prvky řetězce.

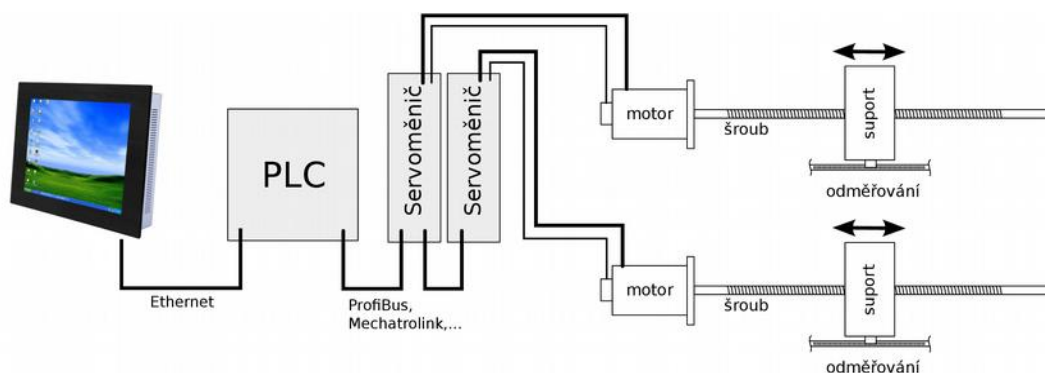
Servopohony se při hodnocení jejich schopnosti posuzují v rámci několika disciplin:

- propustné pásmo,
- rovnoměrnost malých rychlostí,
- dosažitelné polohové zesílení,
- dynamická tuhost.

2.1. Servoměniče

Servoměnič je elektronické zařízení, schopné budit servopohon tak, aby udržoval uživatelsky nastavenou polohu (při polohovém řízení), nebo rychlost (při rychlostním řízení). Obsahuje prvky číslicové regulace, realizující zpětnovazební smyčky proudu, rychlosti i polohy. Krom udržování parametrů je díky softwarového základu možné vybavit zařízení určitou inteligencí. Dle [34] nabízejí například:

- Automatické seřízení pohonu na stroji na základě vyhodnocení přechodových dějů. Prakticky to znamená, že při uvádění do chodu je třeba pouze několikrát popojet pohonem a tím je seřízení dokončeno.
- Automatické přizpůsobení regulátoru při změně setrvačnosti zátěže.
- Identifikace závad v systému, přetížení a dosažení koncových poloh.



Obr. 11: Schéma pohonu posuvu dvouosého manipulátoru

Na obrázku 11 je vidět, že servoměnič a motor jsou funkčně nedělitelným prvkem a souhrnně je lze nazvat servopohonem.

Činnost smyček se upravuje laděním zesílení jejich regulátoru. Takové ladění je třeba pro každou aplikaci individuálně. Zvýšení zesílení vede k vyšším výkonům, ale přibližuje systém k nestabilnímu stavu. Často je využíváno frekvenčních filtrů pro řešení problémů stability ve vysokých frekvencích [35].

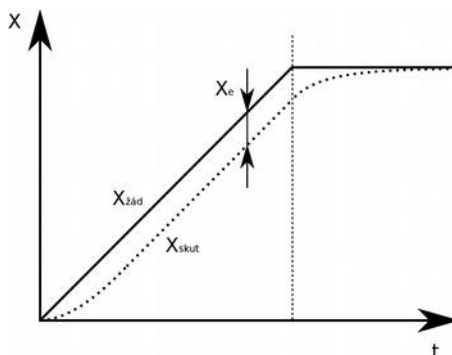
Nejrychlejší smyčka (proudová) bere jako svůj vstup signál z nadřazené (rychlostní), porovná s aktuální hodnotou a dodávku proudu do motoru upraví tak, aby vyhovovala požadavku na výstupní chování. V zásadě se stará pouze o nastavení momentu. Proudová smyčka funguje na podobném principu jako rychlostní, nicméně s mnohem vyšší frekvencí.

U stejnosměrných motorů je funkce smyčky velmi jednoduchá. Zvyšuje motoru napětí buzení do té míry, než motor dosáhne požadovaný moment [35].

Rychlostní smyčka a regulátor jsou v základu typu PI. Znamená to, že pokud se v klidu žádaná a skutečná poloha liší jen o jediný inkrement, regulátor zvyšuje moment motoru až do té doby, než je odchylka vyrovnána. Při pohybu je tohoto využíváno existencí takzvané sledovací odchylky. Z obrázku 12 je zřejmé, že právě sledovací odchylka je původcem pohybu, neboť vyvolává „potřebu“ pohonu hýbat se a sledovat navrženou trajektorii. Ta je vytvářena polohovou smyčkou a jejím regulátorem. Velikost sledovací odchylky x_e a tím i agresivitu, s jakou se systém snaží dosáhnout žádané hodnoty je dán zesílením polohové smyčky. Z toho plyne:

$$v = K_v \cdot x_e \quad (11)$$

Existence sledovací odchylky dovoluje, aby se systém rozjel a zastavil bez překmitu. Moderní systémy jsou samozřejmě vybaveny regulátory vyšších řádů a sledovací odchylka je při pohybu udržována $x_e \rightarrow 0$. Tam je však důležité řízení rozběhu a zastavení rampovou nebo S funkcí.



Obr. 12: Sledovací odchylka při rozběhu a zastavení

Pro řízení je nutná i zpětná vazba, popisující skutečnou polohu kurzoru. Pro nejpřesnější polohování je vhodné použít přímé odměřování polohy suportu, ale lze i využít nepřímého odměřování na ose motoru. U přímé varianty lze využít například laserového dálkoměru, nebo induktozsynu. Nepřímé odměřování vlastně využívá informace natočení hřídele motoru a je pro ně nezbytné znát mechanickou konfiguraci řetězce, navěšeného na motor. V takovém případě se totiž nativní jednotka snímače natočení (inkrement) musí převést na výslednou vykonanou vzdálenost. Pro typické uspořádání (obrázek 24) je pak přepočít dle vztahu:

$$x_1 = \frac{s}{R_r} \cdot \frac{d_{vst}}{d_{vyst}}, \quad (12)$$

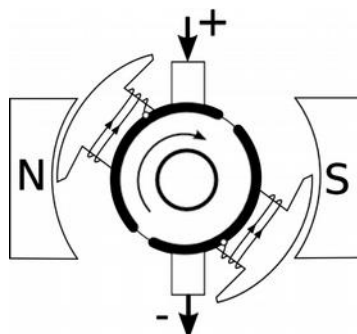
kde x_1 je vykonaná vzdálenost při natočení jednoho inkrementu, s je stoupání posuvového šroubu, R_r počet inkrementů enkodéru (snímače natočení) na jednu otáčku, d_{vst} průměr pastorku, d_{vyst} průměr kola. Hodnota natočení je přenášena číslicově a je tedy kvantována.

Z hlediska dynamických schopností i pořizovacích nákladů osy je lepší odměřování nepřímé, nicméně pro dosažení nejvyšší opakovatelné přesnosti polohování je vhodnější volit přímé.

2.2. Stejnosměrné motory (DC)

DC motory ke své funkci využívají mechanického sběracího ústrojí (komutátoru). Nepotřebuje tedy složitou elektroniku a snadno se řídí pouhou změnou budicího napětí. Komutátor je mechanické zařízení a podléhá opotřebování, přímo úměrnému zatěžování motoru. Při vyšších otáčkách (nad 1000 min⁻¹ [34]) dochází při zatížení k jiskření ve sběracím mechanismu a tím je omezen vyvinutelný rozsah točivého momentu. Jsou zde také omezeny maximální otáčky. Opotřebování sběrače prakticky znamená nutnou pravidelnou údržbu a tím i řešení snadného přístupu k pohonu. Při tom je třeba vyměnit opotřebené uhlíkové kontakty, vyčistit prostor motoru od uhlíkového prachu a občas i srovnání nebo výměnu komutátoru, což vyžaduje rozebrání. Výhodou DC motorů je plynulost malých rychlostí a přes složitější konstrukci i nižší pořizovací cena.

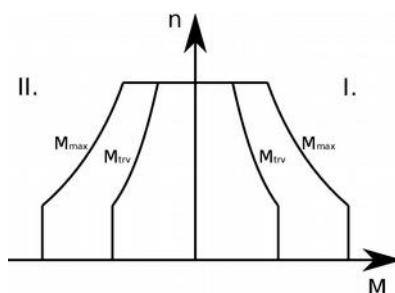
Na obrázku 13 je schématicky znázorněn princip stejnosměrného kartáčově komutovaného elektromotoru. Jednoduchost principu DC motorů je využitelná pro snadné měření stavových veličin, jako jsou otáčky a moment. Díky tomu je možné motor i ochránit v řídicí části pohonu tak, aby nedocházelo k překračování limitních hodnot. Problematickými aspekty jsou například omezení proudu v komutátoru a odmagnetizování.



Obr. 13: Schéma DC motoru s permanentními magnety

Omezení hodnot M - n charakteristiky ohraničují tzv. pracovní oblast. DC motory mají tuto oblast charakteristicky omezenou právě činností komutátoru. Jelikož je proudový odběr přímo úměrný momentu, lze elektronikou snadno omezit buzení tak, aby nedocházelo k nadměrnému opotřebování nebo v extrémním případě i zničení pohonu. Limitní moment je u tuzemských motorů dán tzv. stupněm komutace. Při něm nedochází k jiskření, pouze k „perlení“ pod maximálně polovinou plochy kartáčů/uhlíků. Krátkodobé nevelké překročení této hranice nezpůsobí poruchu. Někteří výrobci však tuto hranici udávají při úplném přejiskření a dosažení tohoto stavu má většinou za následek okamžité poškození pohonu [34]. Kromě maximálních hodnot pracovní diagram uvádí i oblast trvalé zátěže, ve které je bezpečný pohyb po libovolně dlouhou dobu. Příklad pracovní oblasti DC motoru lze vidět na obrázku 14. Je z něj i patrná rekuperační schopnost motoru při generátorickém režimu. Rekuperace musí být samozřejmě umožněna řídicí elektronikou.

Problémem u stejnosměrných motorů bývá i odmagnetování, přičemž se netýká pouze těch s aktivním buzením, ale i s permanentními magnety. U sériově zapojených vinutích může nastat při prudké změně polarity ke ztrátě vzájemného působení magnetických polí a tím dosažení mrtvé polohy a zastavení otáčení. Proti tomu se dá vytvořit řada opatření. U permanentních magnetů je možné jejich magnetickou energii ovlivňovat a při nevhodném působení okolního pole mohou změnit nebo i ztratit tuto schopnost. Ztráta může být vratná i nevratná. Moderní řídicí systémy obsahují protiopatření, zamezující prudkému obrácení otáčení při plném buzení: [36], [37].



Obr. 14: Pracovní oblast DC motoru

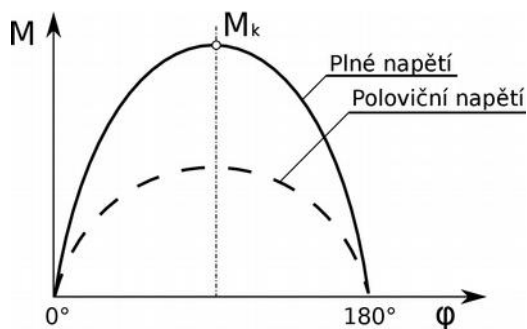
2.3. Střídavé motory (AC)

Princip AC motorů je velmi podobný DC. Komutace je zde přirozeně zrealizována spojením tří fází, působících svými cívkami elektromagnetů statoru na rotor. Ten je buď osazen permanentním magnetem, nebo má klecovou kotvu (asynchronní motory).

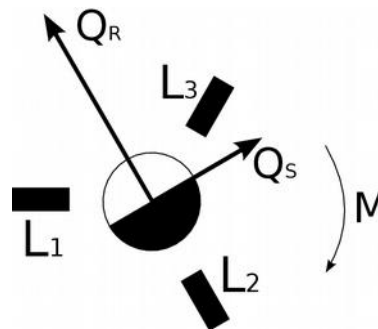
Konstrukce motoru zajišťuje plně synchronní provoz. Nevyskytuje se skluz. Po zatížení se zvětší vzdálenost mezi póly a točivým polem. Při konstantním zatížení se vzdálenost ustálí. Synchronní motory pracují s konstantními otáčkami bez ohledu na zatížení. Pokud zátěž překročí určitou mez, vypadne rotor ze synchronizace a přestane se točit.

Klasický (tedy bez zpětné vazby) AC motor se sám od sebe po připojení do sítě neroztočí. Je nutné mu udat počáteční kinetický impuls. Synchronizace s budicí frekvencí je schopen již od 0,7 Hz. Při dosažení pracovních otáček je synchronní s frekvencí napájení, otáčí se tedy přesně 1500 min^{-1} při buzení 50 Hz a čtyřmi póly.

U servopohonu je situace mírně odlišná v tom, co umožňuje řídicí elektronika (servoměnič). Ta se v zásadě stará o to, aby byla dosažena žádaná poloha co nejrychleji a tak se motor pohybuje na hranicích svých možností, aby svých úkolů dostal co nejefektivněji. Pokud tedy představuji výstup do jiné polohy, očekávám provedení v co nejkratší reakční době. Proto se úhel mezi pólem rotoru a vektorem točivých proudů elektronicky udržuje v 90° (jak je vidět na obrázku 15 a 16), při čemž je možné vyvinout maximální moment, tedy i výkon.

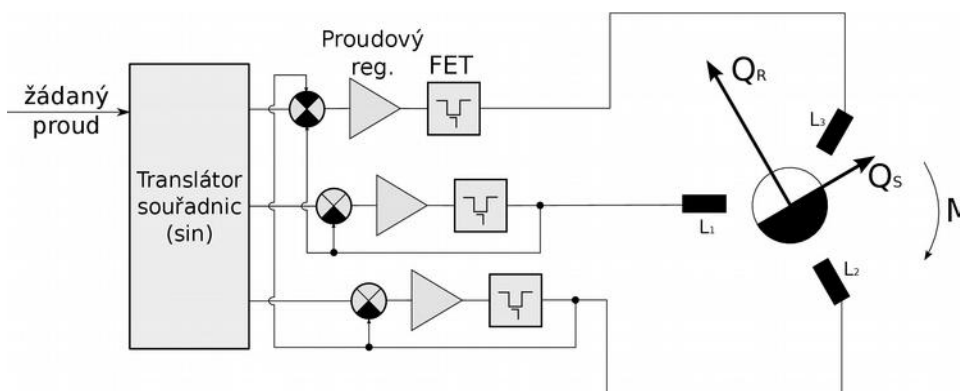


Obr. 15: Moment jako funkce úhlu rotoru



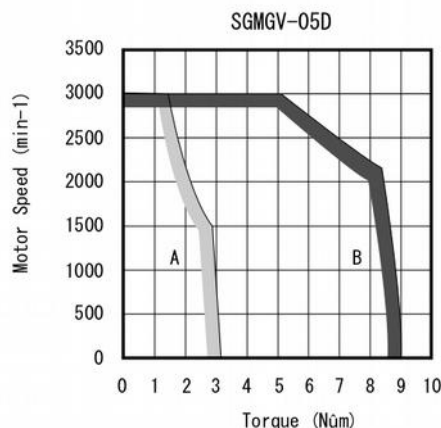
Obr. 16: Schéma AC motoru

Na obrázku 17 je možné vidět princip elektronické komutace střídavě buzeného elektromotoru. Pro AC servopohony je typický translátor souřadnic, plnící roli frekvenčního měniče. Ten rozkládá signál žádaného proudu mezi tři fáze tak, aby bylo dosaženo otáčení se správnou rychlostí a udržován pravý úhel mezi výsledným vektorem točivých proudů a magnetickým polem rotoru. Točivé pole tedy „táhne“ rotor za sebou s maximální efektivitou. Příklad zapojení je možné vidět na obrázku 17. U DC motorů se potřebný proud přivádí postupně na jednotlivé fáze vinutí, takže je možné pracovat s jediným regulátorem proudu. Synchronní motor ale obsahuje 3 cívky s různými průběhy proudu, takže každá cívka musí mít svůj vlastní regulátor [38].



Obr. 17: Řešení proudové zpětné vazby u AC pohonů

AC servopohony mají, podobně jako DC definovanou pracovní oblast. Její hranice jsou však dány jinými limity. Obvykle není možný generátorický režim chodu proto, že elektronika pro řízení AC motorů je složitější a rekuperace energie by vyžadovala podobně složitý systém pro samotné vrácení do sítě. Je totiž nutné sladit frekvence, neboť servomotor se po velkou většinu času svého chodu otáčí s jinou, než frekvencí sítě. Příklad pracovní oblasti lze vidět na obrázku 18, kde oblast A značí možnou trvalou zátěž a B občasnou přetížitelnost.



Obr. 18: Pracovní oblast servomotoru SGMGV-05D

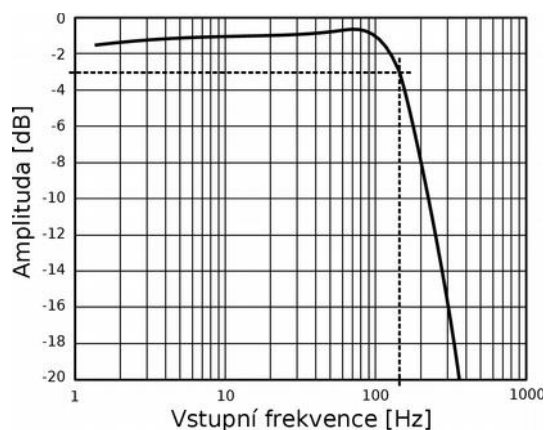
2.4. Dimenzování pohonů

Jak již bylo zmíněno výše, servopohony se při hodnocení jejich schopnosti posuzují v rámci několika disciplín: propustné pásmo, rovnoměrnost malých rychlostí, dosažitelné polohové zesílení a dynamická tuhost. Hodnoty, vyplývající z takových hodnocení jsou nezbytnou pomocí při výběru výrobce i konkrétních typů zařízení.

2.4.1. Propustné pásmo

Propustné pásmo je parametr vlastního pohonu, to znamená pohonu pouze v rychlostní smyčce, bez polohové regulace a bez zátěže – s volným čepem. Teorie regulace definuje propustné pásmo jako největší frekvenci sinusového vstupního signálu, při kterém amplituda výstupního signálu neklesne více než o 3 dB (70,8% amplitudy) a při které fázový posuv neklesne pod -90° .

Zjednodušeně je propustné pásmo určeno jako nejvyšší frekvence vstupního signálu, kterou pohon ještě dokáže sledovat. Velikost propustného pásma také určuje rychlost, s jakou je pohon schopen reagovat na změny vstupních (tedy i poruchových) signálů. Příklad frekvenční charakteristiky je na obrázku 19 [34].



Obr. 19: Frekvenční charakteristika a určení propustného pásma

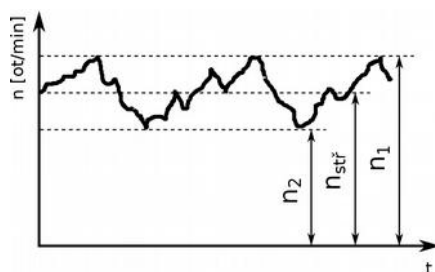
2.4.2. Nerovnoměrnost malých rychlostí

Nerovnoměrnost malých rychlostí je parametr vlastního pohonu (v rychlostní smyčce) bez zátěže a je definována jako poměr kolísání okamžité rychlosti ku střední rychlosti pohonu [34]. Dloužení nanovláken není spojeno s většími než malými odporovými silami a proto se ho tato problematika úzce dotýká. Vyhodnocuje se ze záznamu okamžité rychlosti pohonu (obrázek 20):

$$\delta = \frac{\Delta n}{n_{stř}} \approx 2 \cdot \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \quad (13)$$

Při velké nerovnoměrnosti pak při rychlostech, kdy frekvence kolísání rychlosti odpovídá minimu dynamické tuhosti, dochází ke značným periodickým odchylkám od žádané polohy.

Nerovnoměrnost má být u servomechanismů menší než $\delta = 0,1$. Kvalitní pohony mají při 1 min^{-1} nerovnoměrnost menší než $\delta = 0,03$. Převzato z literatury [34].



Obr. 20: Nerovnoměrnost malých rychlostí – záznam

2.4.3. Dosažitelné polohové zesílení

Dosažitelné zesílení polohové smyčky je parametr pohonu v polohové vazbě bez zátěže – s volným čepem. Definujeme jej jako největší hodnotu koeficientu K_v , při kterém v celém rozsahu pracovních postupů při zadání skokové změny žádané polohy:

- nedochází k překmitu
- obsah kmitavých složek v přechodovém ději nepřesáhne 20%

Dosažitelné zesílení ověřujeme záznamem přechodového děje polohové odchylky x_e . Obsah kmitavých složek odhadujeme, což je do jisté míry subjektivní, a proto dosažitelné zesílení udáváme jako rozpětí hodnot. Kvalitní pohony dosahují $K_v = 40$ až 50 s^{-1} .

Vlivem navěšených hmot mechanické části pohonu lze na reálném stroji nastavit K_v jen v rozmezí 15 až 25. Protože zesílení určuje zrychlení při rozběhu a zastavení, nedoporučuje se nastavovat více než 30 s^{-1} [34].

2.4.4. Dynamická tuhost

Statická poddajnost servomechanismů je nulová. Znamená to, že hřídel se po odeznění přechodového děje, vyvolaného změnou zatížení, vrátí na původní žádané polohy. Uvnitř polohové zpětnovazební smyčky tedy mohou nastat pouze dynamické odchylky od žádané hodnoty, které regulátor po určitém čase vyrovná. Reakce na změnu vnějších sil a/nebo změnu rychlosti a zrychlení pak můžeme hodnotit jako dynamickou tuhost. Inverzní je k ní dynamická poddajnost [39].

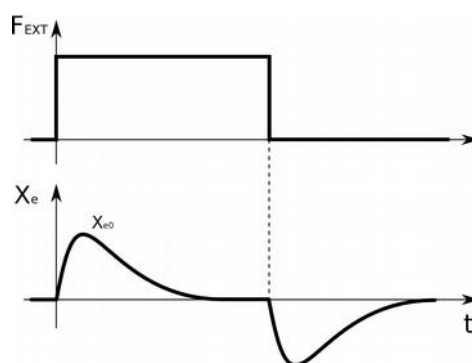
Tuhost se hodnotí dvěma způsoby: rázově a frekvenčně. Rázová dynamická tuhost v podstatě odpovídá ději, popsanému v úvodu – například najetí nástroje do řezu. Číselně ji definujeme jako

$$k_R = \frac{F_{EXT}}{x_{e0}} = \frac{J \cdot K_r}{K_C^2 \lambda^{\frac{\lambda}{1-\lambda}}} \left[\frac{\text{N}}{\text{m}} \right] \quad \text{kde} \quad K_C = \frac{x}{\varphi} = \frac{v}{\omega} \quad \text{a} \quad \lambda = T_N \cdot K_v, \quad (14)$$

kde x_{e0} je špičková hodnota výchylky, způsobené změnou zatížení ve formě F_{EXT} . Výpočet je velmi zjednodušený a uvažuje servomechanismus jako jednohmotový systém. Vztahy pro zesílení polohové smyčky K_v a zesílení rychlostní smyčky K_r vyplývají ze schématu na obrázku 22:

$$K_V = K_X \cdot K_C \quad \text{a} \quad K_r = \frac{K_r \cdot K_m}{T_N \cdot J} \quad (15)$$

Časová konstanta přechodu T_N je často charakterizována frekvencí zlomu frekvenční charakteristiky regulátoru f_N . Příklad průběhu přechodového děje je na obrázku 21.

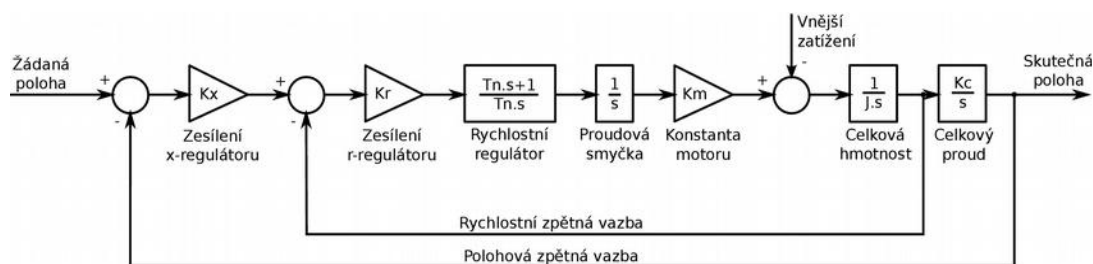


Obr. 21: Rázová dynamická tuhost

Frekvenční dynamická tuhost se stanoví z odezvy systému na harmonicky proměnnou zatěžující sílu. Tuhost pak definujeme jako poměr amplitud proměnné zatěžující síly F_{EXT0} a polohové odchylky x_{e0} :

$$k_F = \frac{F_{EXT0}}{x_{e0}} = \frac{J \cdot K_r (\lambda + 1)}{K_C^2} \quad \left[\frac{\text{N}}{\text{m}} \right] \quad (16)$$

Frekvenční dynamická tuhost je funkcí frekvence budící síly a obvykle ji zobrazujeme v logaritmických souřadnicích. Pohon při zatěžování F_{EXT} (průběh je sinusový) reaguje tak, že polohová odchylka x_e kmitá taktéž prakticky sinusově. Průběhy jsou vůči sobě fázově posunuty. Při nízkých frekvencích budící síly jsou odchylky velmi malé a tuhost pohonu tedy velmi vysoká (statická je nulová). Se zvyšující se frekvencí síly klesá schopnost regulátoru vyrovnávat vznikající odchylky polohy a úměrně tomu klesá tuhost pohonu. Minimum dynamické tuhosti se zpravidla nalézá v rozmezí frekvencí 3 až 30 Hz. Při vyšších frekvencích dynamická tuhost opět stoupá, neboť se začínají uplatňovat vlivy setrvačných sil hmot rotoru a dále zavěšených, které nedovolí pohonu sledovat vysoké frekvence sil.

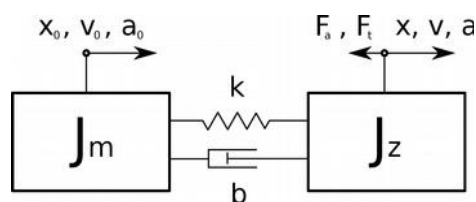


Obr. 22: Schéma pro odvození dynamické tuhosti (model 0)

Článek [39] problematiku uzavírá s tím, že efektivně může být dynamická tuhost zvýšena zvětšením propustného pásma servopohonu. Použil k tomu schéma na obrázku 22, představující „model 0“, tedy maximálně zjednodušený výpočtový model. Z charakteristiky zatěžování mechanismu však vyplývá, že ač je údaj o dynamické tuhosti jeden z nejdůležitějších v obecné praxi pohonů, pro náš účel tažení vláken nebude tolik významný.

2.4.5. Dvouhmotový systém

V rámci hodnocení servopohonů se obvykle uvažuje jednohmotový systém. Motor je tedy ve volném stavu s volným čepem. Reálné použití je však poněkud složitější a je nutné počítat s negativními dopady ve formě zvýšeného momentu setrvačnosti (redukovaného na rotor), pružností a tlumení. Schematické znázornění dvouhmotového systému je na obrázku 23.



Obr. 23: Dvouhmotový systém

Typicky se jedná o převody ozubeným řemenem a kuličkové šrouby. U angulárních robotů je výhodně využíváno harmonických převodovek, které pro svůj chod vyžadují pružného členu (generátor vln) a tím vnášejí mírné komplikace do výpočtu [38].

Dvouhmotový systém je popsán rovnicemi:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = (x_0 - x)k + \left(\frac{dx_0}{dt} - \frac{dx}{dt} \right) b \quad (17)$$

$$a = \frac{F}{m} \quad (18)$$

Pro výpočty platí analogie mezi lineárním a rotačním pohybem. Rovnice lze tedy aplikovat stejně při záměně veličin $a \leftrightarrow \varepsilon$, $v \leftrightarrow \omega$, $x \leftrightarrow \varphi$, $F \leftrightarrow M$, $m \leftrightarrow J$.

2.4.6. Ideální převod

Výpočet optimálního převodu je nedílnou součástí návrhu servomechanismu polohovacího stroje. Při výpočtu podle realistického modelu a s uvažováním vlivu vnějšího zatížení je brána v úvahu i setrvačnost a pružnost mechanické části polohovadla, připojeného na hřídel motoru. [40]

Pro výpočet zatěžujících sil a momentů motorů jednotlivých členů kinematického řetězce musíme provádět přepočet neboli redukci zatížení na příslušný člen. Definice převodového čísla obecně platí:

$$Z_{2red} = Z_1 \cdot i_{12} \quad , \quad (19)$$

kde Z_{2red} je zatížení členu 2, vzniklé zatížením členu 1; Z_1 je dané zatížení členu 1; i je převodové číslo mezi členy 1 a 2.

Vedle redukce zatížení při návrhu pohonů běžně používáme redukci setrvačných hmot. Jde o výpočet, při kterém nahrazujeme skutečné setrvačné hmoty náhradním setrvačným zatížením na zvoleném členu mechanismu. Pro redukci setrvačných hmot platí vzorec:

$$J_{2red} = J_1 \cdot i_{12}^2 \quad , \quad (20)$$

kde J_{2red} je setrvačné zatížení členu 2, vzniklé hmotami členu 1; J_1 je skutečná setrvačná zátěž členu 1; i je převodové číslo mezi členy 1 a 2. Vztah lze odvodit ze zákona o zachování energie [34].

Při návrhu mechanismu je obvykle počítáno se zjednodušeným modelem, kdy je veškerá zátěž redukována na hřídel motoru. Výpočet ideálního převodu se zakládá na prvotním cíli převodu – co nejefektivněji přenést výkon z motoru na koncový člen. [40] Lze tedy říci, že hledáme maximum ε_z :

$$\varepsilon_z = i \cdot \varepsilon_m = i \frac{M_m}{J_m + J_{zred}} = \frac{i M_m}{J_m + J_z i^2} \quad , \quad (21)$$

kde J_{zred} je moment setrvačnosti zátěže, redukováný na hřídel motoru. Optimální převodové číslo i_{opt} nalezneme pomocí hledání lokálního extrému funkce s výsledným vztahem:

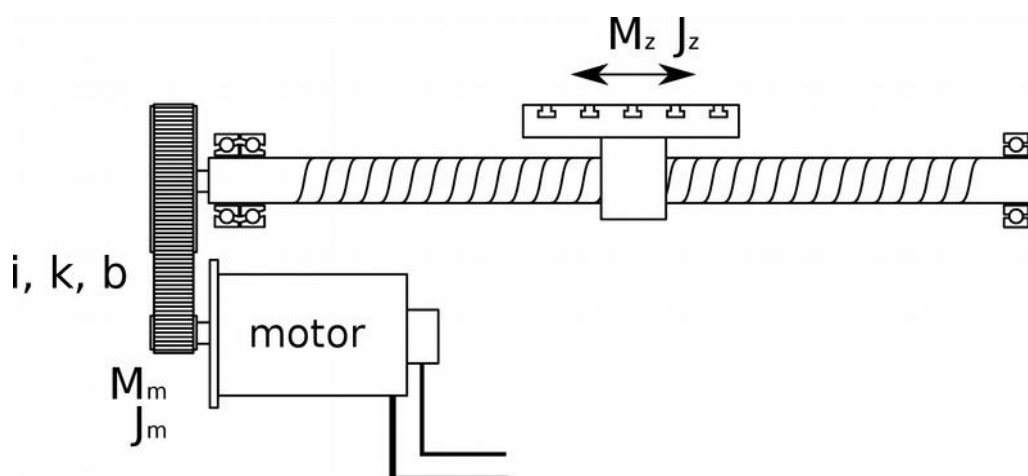
$$i_{opt} = \sqrt{\frac{J_m}{J_z}} \quad (22)$$

Toto však platí při uvažování zátěžného momentu $M_z = 0$. Jestliže uvažujeme nenulový zátěžný moment, pak vede řešení extrémů funkce na vztah:

$$i_{opt} = -\frac{M_z J_m}{M_m J_z} + \sqrt{\left(\frac{M_z J_m}{M_m J_z}\right)^2 + \frac{J_m}{J_z}} \quad (23)$$

Více vztahů a empirických doporučení je možné nalézt v literatuře [34][38][40][41][42].

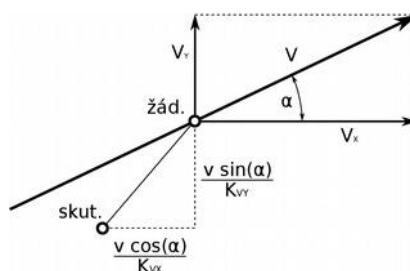
Typický a při konstrukci první generace mikromanipulátoru byla zvolena koncepce na obrázku 24.



Obr. 24: Schéma servomotoru a mechanické části mikromanipulátoru

2.5. Chyby interpolace

Nejvyužívanější druh pohybu při tažení ojednocených nanovláken je pohyb po kruhové trajektorii. Z praxe je známa celá řada potenciálně problematických aspektů, které mohou a nemusí ovlivnit tvar a rychlostní profil výsledné trajektorie. Kromě níže diskutovaných jsou to: necitlivost, hystereze, vůle, cyklické chyby v převodech, chyby odměřování, vibrace při měření, nepřímost vedení, rovinnost stolu, atd. Níže popsané vztahy popisuje literatura [38].



Obr. 25: Paralelní odlehlost při lineární interpolaci

Při lineární interpolaci (obrázek 25) dvou os je výsledná rychlost

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} . \quad (24)$$

Pro sledovací odchylky platí vztahy:

$$\Delta_x = \frac{v_x}{K_{vx}} , \quad \Delta_y = \frac{v_y}{K_{vy}} . \quad (25)$$

Paralelní odlehlost je dána vztahem:

$$\Delta_{xy} = \frac{v}{2} \sin(2\alpha) \left| \frac{K_{vx} - K_{vy}}{K_{vx} K_{vy}} \right| . \quad (26)$$

Ze vztahu vyplývá, že $\Delta_{xy} = 0$, když $K_{vx} = K_{vy}$. V takovém případě se obě sledovací odchylky složí právě do směru α a k odchylce trajektorie nedojde. To však platí pouze při kontinuálním pohybu, ne tak ve spojnicích s různými úhly. Tam dojde k přechodovému ději, vyjádřitelnou přenosovou funkcí:

$$F_{POL}(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{1}{\tau_v s + 1} = \frac{K_v}{s + K_v} , \quad 1/\tau_v = K_v \quad [1/s] . \quad (27)$$

Při rovnoměrném pohybu rovnoměrnou rychlostí v po obvodu kružnice o poloměru R_0 se opět projeví účinek sledovací odchylky, tentokrát v komplikovanější formě. Budicí funkce obou os jsou v tom případě harmonické kmity s amplitudou R_0 se stejným kmitočtem ω a vzájemným fázovým posuvem $\pi/2$. Přenos pohonu pro analytické účely je zjednodušen na přenos 1. řádu a působí jako filtr s propustným pásmem $\omega_v = 2\pi f_v = K_v$. Pomocí Taylorova rozvoje se zanedbání vyšších integrálů vychází:

$$\Delta R = R - R_0 \approx -\frac{R_0 \omega^2}{2 K_v^2} = \frac{-a_0}{2 K_v^2} = \frac{-v^2}{2 R_0 K_v^2} , \quad (28)$$

přičemž by mělo platit $\omega < K_V$, aby nedošlo k porušení pásma propustnosti polohové regulační smyčky [38].

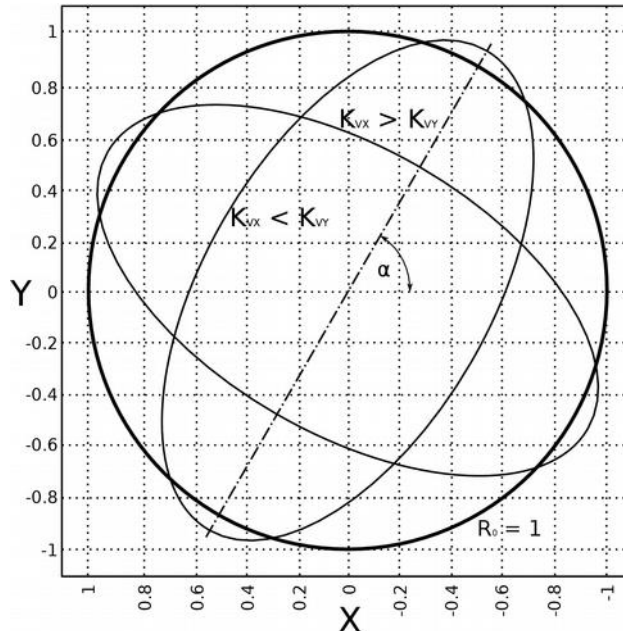
Jak je vidět, díky stejným zesílením v obou osách je daná kružnice kopírována s jistou malou nepřesností, ale jde stále o kružnici. Jiná situace nastává, pokud zesílení os není stejné, viz. obrázek 26. V takovém případě je sledovací odchylka jedné z os větší a z kružnice se stává nakloněná elipsa s následujícími rovnicemi:

$$X = A^2 \cos(\omega t) + A \sqrt{1 - A^2} \sin(\omega t) = \frac{K_{VX}^2}{K_{VX}^2 + \omega^2} \left(\cos(\omega t) + \frac{\omega}{K_{VX}} \sin(\omega t) \right) , \quad (29)$$

$$Y = \text{sign}(s) \left(B^2 \sin(\omega t) - B \sqrt{1 - B^2} \cos(\omega t) \right) \\ Y = \text{sign}(s) \frac{K_{VY}^2}{K_{VY}^2 + \omega^2} \left(\sin(\omega t) - \frac{\omega}{K_{VY}} \cos(\omega t) \right) . \quad (30)$$

Elipsa je skloněná pod úhlem α , který se při menších rychlostech blíží k 45° . Pro natočení elipsy platí:

$$\alpha = \frac{\pi}{4} + \text{sign}(s) \frac{1}{2} \arctg \left(\frac{\omega (K_{VX} + K_{VY})}{2 K_{VX} K_{VY}} \right) . \quad (31)$$



Obr. 26: Elipsový průběh skutečné trajektorie při rozdílném zesílení os

IV. Praktická část

Praktická část disertační práce pojednává o samotném vývoji laboratorního vybavení a postupů umožňujících reálnou výrobu ojednocených nanovláken. Popisovaná perioda času zabrala čtyři roky práce, jednání a publikování výsledků; při tom sestává z výsledků majoritní činnosti mé, podpořené množstvím kolegů z překrývajících se oborů, jež jsem ve vhodných oblastech požádal o konzultace a pomoc.

Na základě požadavků Katedry netkaných textilií byl sestaven stroj, zvaný Mikromanipulátor, umožňující pokračování ve výzkumné činnosti týmu, který do té doby připravil recepturu pro materiál (PVA), umožňující tvorbu nanovláken při ručním tažení. Při množství parametrů a jevů ovlivňujících výsledek, bylo dalším logickým krokem stavba stroje, který by zpočátku plnil funkci zajištění opakovatelné přesnosti tažení. Realizace tohoto základu byla po roce úspěšně dokončena.

V dalším roce se stroj zdokonaloval, zejména v programové a bezpečnostní části. Byl doladěn program pro výrobu PVA vlákna, doplněny koncové spínače a stop tlačítko. Ladění vyvrcholilo na Mezinárodním strojírenském veletrhu v Brně, kde se Mikromanipulátor stal předním exponátem Fakulty strojní. Byl také vyvinut postup, jak detekovat přetržení vlákna během výroby a tak zvýšit spolehlivost.

Následně byl vysoutěžen grant SGS 28001 s rozpočtem 330 tis. Kč, mající za cíl doplnění stroje o automatizovaný zákrutný modul schopný výroby multikomponentních nanopřízí s precizně definovanou strukturou. Projekt byl naplněn a zároveň se technologie předvedla na několika mezinárodních konferencích (Německo, Polsko, Japonsko, ČR) a před četnými delegacemi přímo v laboratoři. V rámci grantu se navíc stroj zakrytoval a zvýšila se tak bezpečnost obsluhy. O technologii se začala zajímat ruská vládní organizace RUSNANO, australská obchodní komora a řada pracovišť experimentální medicíny. V rámci diplomových prací studentů byla provedená analýza tvorby PVA vláken a otestována proveditelnost výroby nanovláknenných nosičů pro tkáňové inženýrství.

Nejbouřlivější rozvoj technologie přinesl rok čtvrtý, kdy se tažení ojednocených nanovláken začlenilo do projektu Fakulty textilní – Pre-Seed. V rámci projektu byly provedeny úspěšné in-vitro testy pěstování umělých tkání, následované úspěšnými testy in-vivo na živých hostitelích, kde se hodnotí použití nanovláknenných sítěk při léčbě následků operace kýly ve spolupráci s Ústavem experimentální medicíny. Dále bylo provedeno ošetření duševního vlastnictví podáním patentové přihlášky pro provádění způsobu (PV 2014-920). Největší přínos však osobně vidím v dofinancování realizace druhé generace Mikromanipulátoru,

který je řešením mnoha nedostatků první generace a rapidně zvyšuje produktivitu výroby. Projekt měl objem 4,5 mil. Kč, určených především pro rozvoj a komercializaci této technologie.

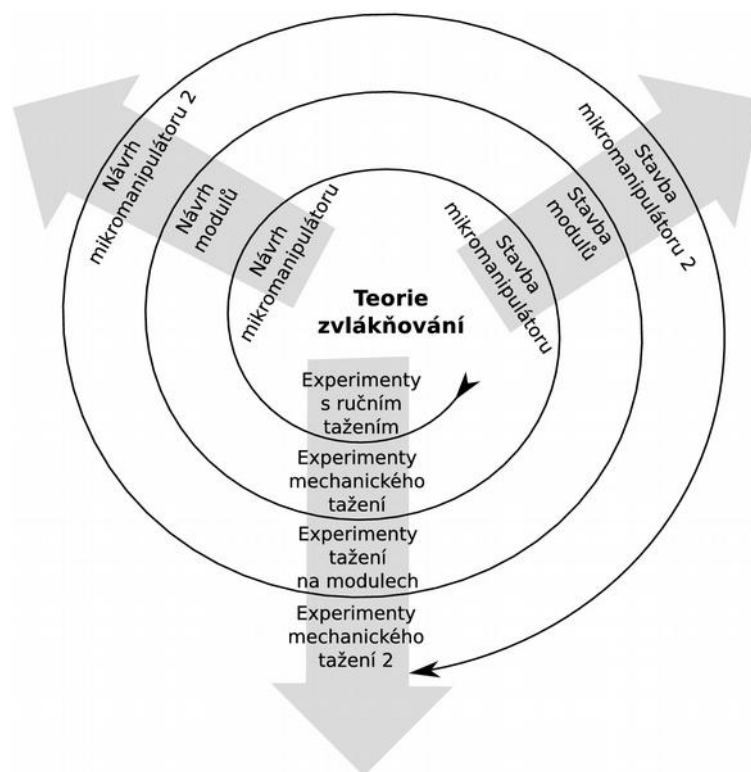
Realizace prvního prototypu byla započata s požadavkem na dostatečný stupeň univerzálnosti a přesnosti, což definuje úkoly při jeho vývoji. Konstrukce musí být dostatečně variabilní a schopná přidružení podpůrných modulů pro samotné zvlákňování. Zpracovávané metody nebyly dříve dostatečně probádány vědeckou veřejností a podbízí k vývoji velmi netradičních řešení. Proto nelze na začátku s jistotou určit veškeré nároky, jež bude stroj nucen splnit. Přesto je možné rámcově určit vlastnosti, které lze předpokládat jako nezbytné.

- Velká opakovatelná přesnost pohybu jak v polohové, tak rychlostní smyčce.
- Jedna osa pracovní, druhá podpůrná pro nejružnější technologické pomocné pohyby.
- Odolnost konstrukce proti chemickému působení rozpouštědel.
- Dá se předpokládat použití vysokonapěťových elektrod pro stimulaci tvorby vláken.
- Celá konstrukce by neměla být závislá na své orientaci v gravitačním poli.
- Dostatečná nabídka vstupně-výstupních portů řídicí jednotky (PLC)

Součástí zařízení musí být také softwarové rozhraní pro definici průběhu tažení, a to takové, aby jej mohla používat i poučená obsluha.

Dalšími kroky bude vývoj zařízení, detekující přetřhy a nesrovnalosti v technologickém procesu a zařízení.

Práce lze graficky znázornit způsobem Hegelovy spirály (obrázek 27), kdy začínáme teoretickým základem a završíme ji realizací druhé generace produkce pomocí mikromanipulátoru 2. [43]



Obr. 27: Spirála vývoje technologie

1. POUŽITÝ PRINCIP DLOUŽENÍ

Cílem je výroba polymerních vláken o průměru 100 nm až 10 μm . Provedení spočívá v tom, že na povrchu podkladu se vytvoří kapka roztoku nebo taveniny polymeru o objemu alespoň 0,001 μl , přičemž během jejího vytváření nebo po něm se do ní ponoří konec alespoň jednoho podlouhlého zvlákňovacího elementu, například mikropipety. Přitom se na jeho povrchu a/nebo v jeho dutině zachytí část roztoku nebo taveniny polymeru, načež se tento zvlákňovací element pohybem manipulátoru, na kterém je uložený, a/nebo pohybem podkladu přesune k jinému místu stejného nebo jiného podkladu, přičemž roztok nebo tavenina polymeru na jeho povrchu a/nebo v jeho dutině zůstává během tohoto pohybu díky své viskozitě a povrchovému napětí propojený/propojená vláknem, jehož průměr se při pohybu zvlákňovacího elementu a/nebo podkladu zmenšuje, s kapkou roztoku nebo taveniny na povrchu podkladu. Při následném kontaktu konce zvlákňovacího elementu s povrchem podkladu se toto vlákno ukotví. Tímto způsobem se vytvoří a na povrchu uloží polymerní vlákno o průměru 100 nm až 10 μm s požadovanou délkou a orientací.

Kapka roztoku nebo taveniny polymeru se přitom na povrchu podkladu může vytvořit např. nanesením roztoku nebo taveniny polymeru prostřednictvím dávkovacího zařízení nebo manuálně, nanesením roztoku nebo taveniny polymeru na povrchu a/nebo v dutině zvlákňovacího elementu, nebo vytlačením roztoku nebo taveniny polymeru ze zásobníku roztoku nebo taveniny polymeru přes dutinu dutého zvlákňovacího elementu. Výhodně je přitom dutý zvlákňovací element uložen na kartuši a jeho dutina je propojená s vnitřním prostorem této kartuše s uloženým roztokem nebo taveninou polymeru.

Vhodným dutým zvlákňovacím elementem je dutá kónická jehla, jejíž výstupní otvor má průměr 0,1 až 1,2 mm, nebo trubička s vnějším průměrem 0,1 až 1,5 mm. Lze však použít i tyčinku tohoto průměru.

Standardně zůstává podklad statický a pohybuje se pouze zvlákňovací element, a to s výhodou po obloukové trajektorii, přičemž dosahuje maximální rychlosti 1 až 20 m/min. V případě potřeby však může být jeho rychlost i vyšší.

Při zvlákňování některých polymerů, např. polykaprolaktonu, apod. je výhodné, pokud se přesun zvlákňovacího elementu po přerušení kontaktu s povrchem podkladu zastaví, a pokračuje po alespoň částečném ztuhnutí vlákna. Tím se dosáhne menšího průměru vytvářeného vlákna, neboť do něj již není dodáván další materiál z výchozí kapky a dojde ke stabilizaci jeho průměru.

Pro ukotvení konce vlákna na povrchu podkladu se s výhodou použije koncová kapka roztoku nebo taveniny polymeru, neboť v takovém případě je jeho ukotvení jistější, a materiál koncové kapky se navíc může použít pro vytvoření dalších vláken. Koncová kapka přitom může být uložena na stejném nebo odlišeném podkladu než výchozí kapka roztoku nebo taveniny polymeru.

Při použití dutého zvlákňovacího elementu se koncová kapka vytvoří vytlačením alespoň 0,001 μl roztoku nebo taveniny polymeru z vnitřního prostoru tohoto zvlákňovacího elementu.

Pro vytvoření vhodné materiálové struktury vlákna je výhodné, pokud se vytvářené vlákno stimuluje elektrickým proudem, kdy se na zvlákňovací element a na elektricky vodivý podklad přivádí vysoké stejnosměrné napětí libovolné polarity. Přitom dochází k ovlivnění konformace makromolekul polymeru, a vytvářené vlákno díky tomu dosahuje výrazně lepších geometrických i mechanických vlastností.

Vhodným polymerem pro vytváření vláken o průměru 100 nm až 10 μm je pak zejména polyvinyl alkohol (PVA), polyvinyl butyral (PVB), polystyren (PS), poly(metyl metakrylát) (PMMA), polykaprolakton (PCL), polyuretan (PU), modifikovaná varianta některého z nich, nebo libovolná směs nebo kopolymer alespoň dvou z nich.

Je možná též výroba lineárního nebo plošného útvaru obsahujícího polymerní vlákna, jehož podstata spočívá v tom, že polymerní vlákna vytvářená popsáním způsobem se na povrchu jednoho nebo více podkladů ukládají vedle sebe a/nebo na sebe v požadované vzájemné orientaci, čímž se vytváří lineární útvar nebo plošný útvar.

Pro případné další zpracování takto vytvořených útvarů nebo jejich sejmutí z podkladu je výhodné, pokud se jednotlivá polymerní vlákna svým koncem ukotvují na jiném podkladu, než na kterém je uložena výchozí kapka roztoku nebo taveniny polymeru, ze které se tato vlákna vytváří. Při výrobě prostorového útvaru je možné vlákna ukládat na prostorově tvarovaný podklad, přičemž tato vlákna a jimi tvořená struktura kopírují/kopíruje alespoň částečně jeho tvar.

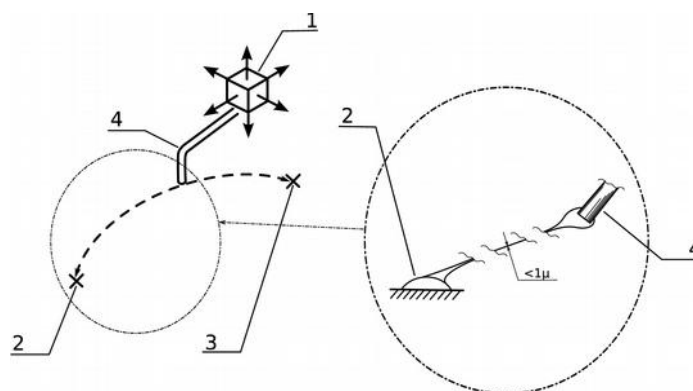
2. NÁVRH A REALIZACE MIKROMANIPULÁTORU I

2.1. Koncepce

Výzkumný tým KNT byl doposud schopný vytvořit krátké a nedokonalé nanovlákně provizorními způsoby, jako je například přichycení injekční jehly k pohyblivé části dávkovacího zařízení pro injekční stříkačky, jehož šroub poskytoval pomalý plynulý pohyb. K těmto metodám (které potvrdily proveditelnost technologie) se však tým uchýlil z důvodu absence vhodnějšího zařízení. Vyvíjený manipulátor má poskytnout extrémně plynulý a dostatečně pomalý pohyb pracovního nástroje, zcela zásadní pro vydloužení kvalitního vlákna, a to s opakovatelnou přesností a kvalitou. Opakovatelná přesnost a kvalita je přitom to nejdůležitější pro plánovaný výzkum a výrobu komplexnějších struktur, což předurčuje i implementované pohonné prvky.

Z výše uvedených požadavků a představ budoucích uživatelů byla navržena základní koncepce manipulátoru. Základní princip je zobrazen na obrázku 28: 1 – manipulátor, 2 – kotevní bod A s kapkou, 3 – kotevní bod B s kapkou, 4 – dlužicí element (mikropipeta). S vláknem se kromě dlužení také manipuluje v prostoru a stroj musí být schopný výsledek své práce ukotvit do předem daných míst, čímž se zajistí uložení vlákna do ochranného

přepravního obalu nebo přímo do systému, kde bude působit ve své funkci. Vláknem není vidět pouhým okem, a proto je takováto manipulace z hlediska automatizace výhodná, z hlediska technologické náročnosti nutná.



Obr. 28: Princip dlužení ojednocených nanovláken

Koncepce stroje je tak definována jako dvouosý CNC manipulátor, uspořádaný do X-Z. Osa X slouží primárně k vlastnímu dlužení a je dimenzována na 1000 mm, což je přibližný dvojnásobek doposud dosahovaných výsledků této metody tvorby vláken při ručním tažení. Osa Z je pak určena zejména pro potřeby manipulace s jak již dokončeným vláknem, tak i pro jakékoliv technologické pojizdy v průběhu dlužení, a je navržena jakožto pomocná krátká, 200 mm.

Protože jsou obě osy proporčně nevyvážené a jejich jednoduché uspořádání do kříže by přinášelo velké riziko přičení, je jedna z os zdvojená. Z hospodářských důvodů je ke zdvojení zvolena kratší osa (Z).

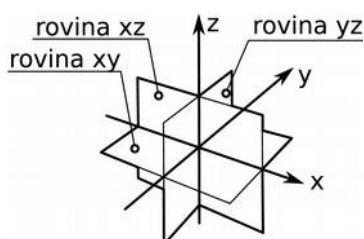
Manipulátor by měl mít co nejuniverzálnější možnou konstrukci, umožňující rozšíření a doplnění rámu o potřebné stabilizační a krycí prvky nebo čidla. Na začátku vývoje nelze počítat se všemi možnostmi, které mohou nastat a se všemi požadavky, které mohou být v průběhu uloženy. Z těchto důvodů je rám tvořen velmi přesným stavebnicovým systémem vytlačovaných profilů z hliníkové slitiny. Prostor pro nástroje a pracovní deska je tvořena upínacím dílem, schopným nést variabilní řadu objektů či nástrojů.

V průběhu návrhu z diskuse vyplynulo ještě další přání a to možnost záměny os, tedy činnost ve vertikálním namísto horizontálním směru. I toho je univerzální rám schopen s pouhým překlopením celého systému a záměny servomotorů. Důvodem je to, že jeden z pohonů je vybaven brzdou pro případ přerušení dodávky elektrického proudu. V takovém případě osa,

exponovaná gravitačnímu působení, zůstane aretována na místě. V případě, že by toto nebylo ošetřeno, hrozí poranění obsluhy či poškození laboratorního vybavení. [44]

2.2. Konvence v orientaci strojových souřadnic

Osa je v problematice CNC definovatelná jako „referenční přímka, symetricky dělená jednotkami kolem pevného, tzv. referenčního bodu“ [45]. Vyvíjený manipulátor disponuje dvěma osami a je proto „dvoudimenzionální“. Pokud hlavní (horizontální) pracovní osu určíme jako osu X, potom musí být vedlejší (vertikální) osa deklarována osou Z. Orientace obou os a rotací kolem nich se tedy řídí konvencí na obrázku 29. [45]



Obr. 29: Konvence v orientaci os

Jednotky na osách jsou dány resolversy pohonů a mechanickým převodem jejich rotačního pohybu na výsledný posuvný. Typicky je to nejmenší možný krok pohonu, tedy rozlišení resolveru. Pokud tedy zvolený servopohon dosahuje přesnosti 2^{20} dílků na otáčku (jedná se o dvacetibitový resolver) a mechanický převod je pevně dán, je minimální pohyb, jakého je stroj teoreticky schopný bez ohledu na vůle, pasivní odpory a hysterezi:

$$i = \frac{d_1}{d_2} \cdot \frac{s}{2^{res}} = \frac{1}{3} \cdot \frac{5}{2^{20}} = 0,0000163 \text{ mm} \quad . \quad (32)$$

V terminologii je takový rozměr označován jako inkrement a tvoří tzv. interní strojovou jednotku. Pro programovací interface je tak nutné hodnoty přepočítávat. Použitý řídicí systém od firmy Yaskawa umožňuje nastavit převodní koeficient tak, aby interface pracovalo v jednotkách libovolných. V mém případě byl za referenční jednotku zvolen mikrometr.

2.3. Vedení

Přesné polohování a opakovatelnost pohyblivé části (*kurzoru*, *suportu*) stroje jsou esenciální parametry stroje a vedení má na ně velký vliv. Zajišťuje vymezení stupně volnosti na právě

jeden mezi dvěma částmi stroje a přenáší pracovní i samonosné síly. Z literatury [34] vyplývají požadavky na dobré vedení:

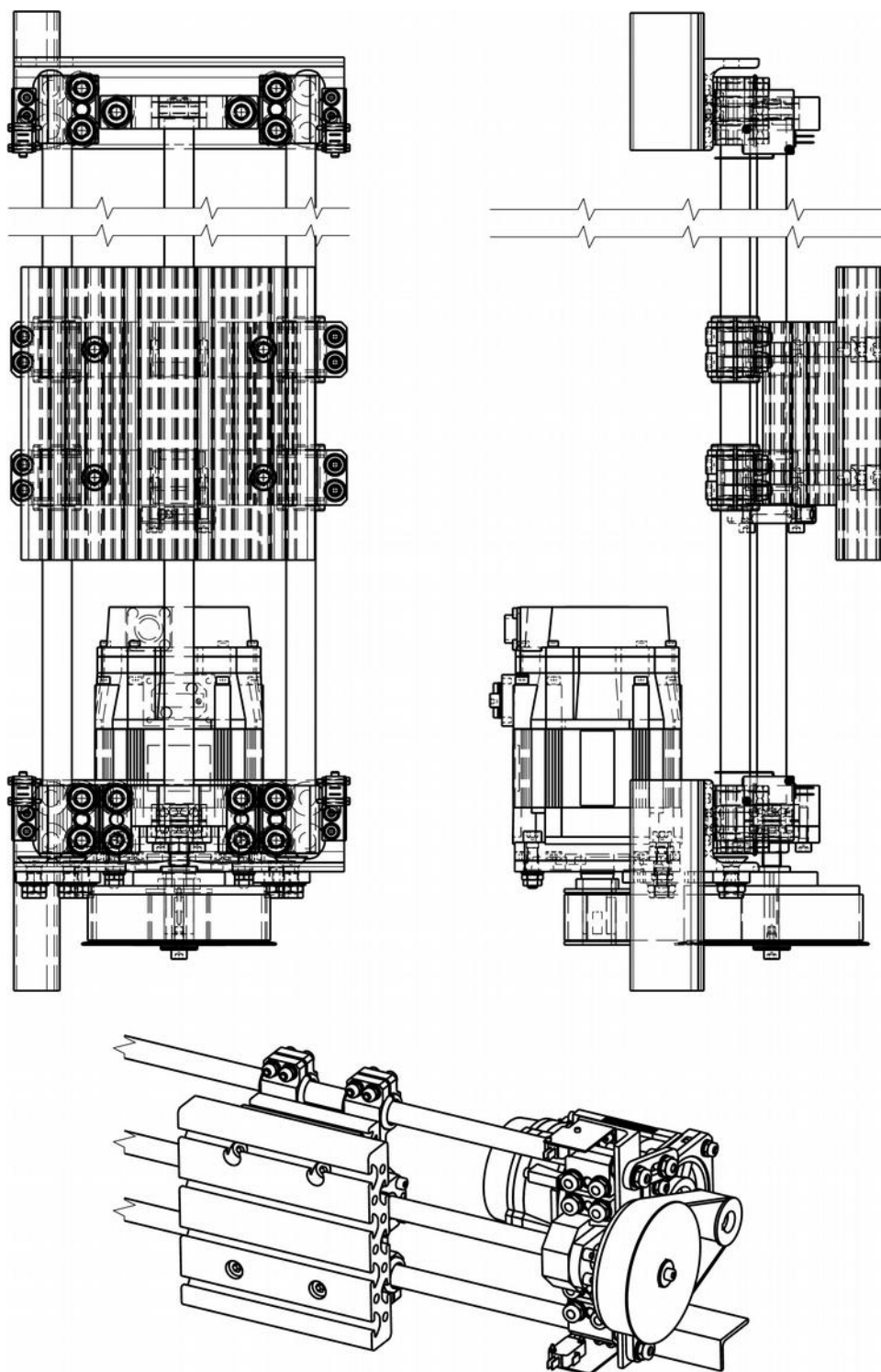
- vysoká geometrická přesnost,
- vysoký stupeň opracování pro minimalizaci pasivních odporů,
- vysokou přesnost polohování kurzoru,
- vysoká tuhost v řetězci rám-nástroj,
- minimální rozdíl statických a dynamických odporů,
- dobré tlumení kmitů,
- nízký moment setrvačnosti pohyblivých částí.

Jako pohyblivá část pojezdů byl zvolen převodový kuličkový šroub s precizním servomotorem. V porovnání s lineárními motory to byl v té době způsob ekonomicky přijatelnější a byl zvolen na úkor nepatrně horšího řízení výsledného pohybu z důvodu snížené dynamické tuhosti (mikrovůle a pružnost soustavy motor-řemen-šroub-matice). Pohon ozubeným řemenem je z důvodu velmi přesného chodu méně výhodný.

Pro první realizaci pojezdů byly z důvodu dodržení vysoké kvality použity součásti, nakoupené nezávisle od jednotlivých specialistů. Po návštěvě Mezinárodního strojírenského veletrhu v Brně a internetové rešerše byly jako dodavatelé zvoleni:

- firma HIWIN pro vodicí tyče, valivá pouzdra, kuličkové šrouby a příslušenství,
- firma Gates pro ozubené řemeny,
- firma Haberkorn-Ulmer pro řemenice a spojovací materiál.

Nakoupené díly byly spojeny do montážní sestavy s využitím tuhých elementů, na míru obrobených na numerických strojích pro dodržení přesnosti. Vznikly tak nezávislé osy z velmi kvalitních dílů, splňující přísné požadavky zadání. Sestávají z dvou vodicích tyčí, paralelního kuličkového šroubu v ose a řemenice. Šroub je uložen v oblasti řemenice ve dvou kuličkových ložiscích s kosoúhlým stykem a na jeho druhé straně volně v radiálním kuličkovém ložisku s axiální vůlí pro přirozenou kompenzaci prodloužení vlivem vzniknuvšího provozního tepla. Schéma sestavy je na obrázku 30.



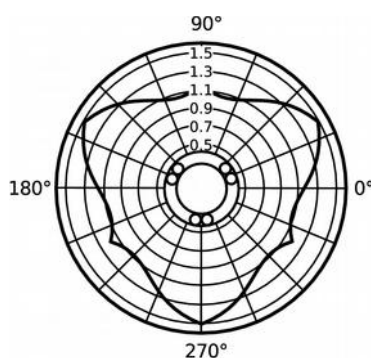
Obr. 30: Schéma sestavy jedné osy

Vodící tyče byly zvoleny plné, indukčně kalené, tvrdě chromované, vrstva 5-10 μm , HV 900-1100, broušené, materiál Cf53 Cr (1.1213). Byl zvolen průměr 16 mm a zkontrolován na průhyb [46]:

$$y_{\max} = \frac{F_g l^3}{48 E I_y} = \frac{F_g l^3}{48 E \frac{\pi d^4}{32}} = 1,05 \text{ mm} \quad (33)$$

Vedení bylo doplněno lineárními kuličkovými pouzdry od stejného výrobce. Pouzdra mají odolný plášť z ložiskové oceli a klece z teplotně odolného plastu, působícího jako akustický tlumič mechanismu. Pro mazání se používá mazací tuk K2K dle DIN 51825. Stroj není vybaven centrálním mazacím rozvodem.

Ložisková pouzdra byla namontována tak, aby nesnižovala životnost mechanismu a kvalitu pohybu. Dvě pouzdra, sdílející jednu vodící tyč (osa X) jsou vůči sobě axiálně natočená o 60° , což vyplývá z obrázku 31, platný pro zvolené ložiskové pouzdro UBM-16AJWW (16x26x36). Dále je pouzdro podélně naříznuto a je tak umožněno seřízení jeho předepnutí a tím i ladění pasivních odporů a bezvúlového chodu. Celé je uloženo v domečku s funkcí kleštiny se svěrným šroubem.



Obr. 31: Faktor směru zatížení ložiskového pouzdra UBM-16AJ

Kuličkové šrouby byly zvoleny se stoupáním 5 mm a o shodném průměru, jako vodící tyče. Podílí se totiž na nesení suportu a lze tak minimalizovat celkovou hmotu osy. Šrouby byly dodavatelem obrobené na specifikované zakončení a vybavené předepnutými maticemi. Povrch drážek je broušen s přesností IT5 (23 μm na 300 mm) pro minimalizaci nerovnoměrnosti pomalého pohybu, na který jsou vlákna náchylná.

Uložení šroubu bylo realizováno ložisky ZKLFA 10.50 a 6200.

Řemenice pro ozubený řemen pohonu šroubu byly slícovány s dříkem šroubů a vybaveny perem.

Po dvou letech běhu na laboratorních aplikacích byla na jedné z nejexponovanějších os (pravá osa Z, nesoucí i hmotnost servomotoru osy X) zaznamenána havárie v místě uložení řemenice. Dřík šroubu byl porušen v místě vrubu. Lom vykázal únavové příčiny, spojené s vlivem vrubu a předchozích deformací v inkriminovaném místě, pravděpodobně způsobených při přepravě stroje. Porucha byla napravena provizorně navrtáním a nastavením šroubu, prodloužením dříku a podepřením konce dalším ložiskem. Systém je tak přeurčený, ale uvážením pružnosti opravené části, která neprošla tepelným zpracováním jsou vlivy přeurčení zanedbatelné.

2.4. Pohon

Pohonný aparát byl zajištěn pomocí servopohonů Yaskawa (systém Sigma V), které disponují vysokými frekvencemi řídicích obvodů (1,6 kHz) i velmi kvalitními motory, vhodnými pro pomalé rychlosti i velmi přesné polohování (2^{20} inkrementů/ot). Systém obsahuje pokročilé algoritmy pro vyrušení vibrací při akceleraci a samoladicí algoritmy.

Servomotory byly předběžně doporučeny dodavatelem s ohledem na požadovanou přesnost, dynamiku a momenty setrvačnosti poháněné soustavy. Následně byly provedeny kontrolní výpočty, ověřující dosahované hodnoty. Zejména poměr momentů setrvačnosti rotoru ku redukované soustavě. Výsledkem hledání jsou dva motory: SGMGV-05DDA6F a SGMGV-05DDA6H (s brzdou).

Motory jsou to shodné, s jediným rozdílem – jeden z nich má magnetickou brzdu pro případ výpadku elektrického napájení a s ním spojeným samovolným pohybem stroje v gravitačně exponovaném směru. V případě potřeby, při změně orientace stroje (postavení na bok), se motory mezi sebou prohodí tak, aby motor s brzdou obsluhoval vertikálně orientovanou osu. Tím bude dále dodržena požadovaná variabilita. Odměřování polohy je nepřímé, zpětnovazebná smyčka tak neobsahuje signifikantní kapacity. Servomotory jsou buzeny dvojicí servoměničů SGD V-05D@1A-OY. Zbylé parametry jsou uvedeny v tabulce 1.

Parametr	SGMGV-05DDA6F	SGMGV-05DDA6H
Výkon	450 W	
Pracovní napětí	400 V	
Nominální krouticí moment	2,86 Nm	
Špičkový krouticí moment	8,92 Nm	
Nominální otáčky	1 500 min ⁻¹	
Maximální otáčky	3 000 min ⁻¹	
Nominální proud	1,9 A (RMS)	
Maximální proud	5,5 A (RMS)	
Moment setrvačnosti	0,000333 kg/m ²	0,000354 kg/m ²
Nominální úhlové zrychlení	8590 rad/s ²	8080 rad/s ²
Hmotnost	3,2 Kg	5 Kg
Pracovní teplota	0 – 40°C	
Pracovní vlhkost	20 – 80 RH	
Třída vibrací	15 µm a méně	
Stupeň krytí	IP 67	

Tab. 1: Parametry servopohonů

Pro návrh pohonu je dále nutné znát následující veličiny:

Veličina	Hodnota	Význam
F_r	~ 0 N	Maximální řezná/technologická síla
F_t	2,543 N	Třecí síla ve vedení. Velikost je většinou nutno odhadnout.
F_n	0 N	Maximální síla, způsobená nevyvážením suportu, které se nepohybují vodorovně (nevývažek)
α	0°, 90°	Sklon suportu
m_z	2,543 kg	Hmotnost suportu
$x_{\max}$	0,8 m	Největší zdvih suportu
v_r	0,1 m/s	Návrhová rychloposuvová rychlost
v_p	0,1 m/s	Maximální pracovní rychlost (největší rychlost při zatížení F_r)
a	2,143 m/s ²	Maximální zrychlení při rozběhu a zastavení

Tab. 2: Známé veličiny pro návrh pohonu

Z tabulky je zřejmé, že je určena zejména pro obráběcí stroje a doporučené výpočty jsou orientovány ve stejném duchu. Pro tuto specifickou úlohu, kde například není nutné počítat s jinak velmi důležitou F_r , bude nutné výpočty mírně upravit. Deklarace rychloposuvné rychlosti tak postrádá svůj smysl, neboť původně je to dosažitelná rychlost suportu,

osvobozeného od řezných a jiných technologických sil. Dále proto bude označována jako maximální rychlost.

2.4.1. Maximální rychlost

Volba maximální rychlosti posuvu je přímo vázána na dimenzování délky a zrychlení pojezdu. Zcela jasně nemá smysl navrhovat maximální rychlost takovou, která s dosažitelným zrychlením a polovinou délky pojezdu, která je k dispozici, nebude moci být ani dosažena. Například pro rampovou rozběhovou křivku platí:

$$v_{mez} = \sqrt{a \cdot x_{max}} = 1,31 \text{ m/s} \quad . \quad (34)$$

Pro úlohu mikromanipulátoru je nejkritičtější plynulost pohybu a proto je nutné pro daný pohon a konstrukci najít experimentálně ideální rozběhovou křivku a maximální zrychlení při minimálních vibracích. To vše v této fázi (kdy se navrhuje pohon) není možné a proto je pro orientační výpočet použita rampová křivka.

2.4.2. Kontrola maximálních otáček

Kuličkové šrouby nesmějí pracovat v oblastech kritických otáček. Kritické otáčky závisí na délce a průměru hřídele, a uložení konců. Maximální pracovní otáčky n_{max} by neměly přesáhnout 80% kritických otáček n_k : [47]

$$n_k = \frac{k_d \cdot d_k}{l_d^2} \cdot 10^8 = 3000 \text{ min}^{-1} \quad , \quad (35)$$

$$n_{max} = n_k \cdot 0,8 = 2400 \text{ min}^{-1} \quad . \quad (36)$$

Kde n_k jsou kritické otáčky [min^{-1}], n_{max} jsou max. přípustné otáčky [min^{-1}], k_d je koeficient uložení dle literatury, d_k je průměr hřídele [mm] a l_d je vzdálenost mezi ložisky [mm].

2.4.3. Kontrola vzpěrné tuhosti šroubu

Kuličkový šroub může být zatěžován axiální silou pouze do té míry, aby nedošlo k jeho deformaci. Přípustné axiální zatížení závisí na délce, průměru a uložení kuličkového šroubu. Maximální axiální zatížení šroubu F_{kmax} v pracovních podmínkách může být nejvýš 50% přípustného teoretického zatížení F_k . [47]

$$F_{kmax} = F_k \cdot 0,5 = 750 \text{ N} \quad (37)$$

2.4.4. Volba řemenového převodu

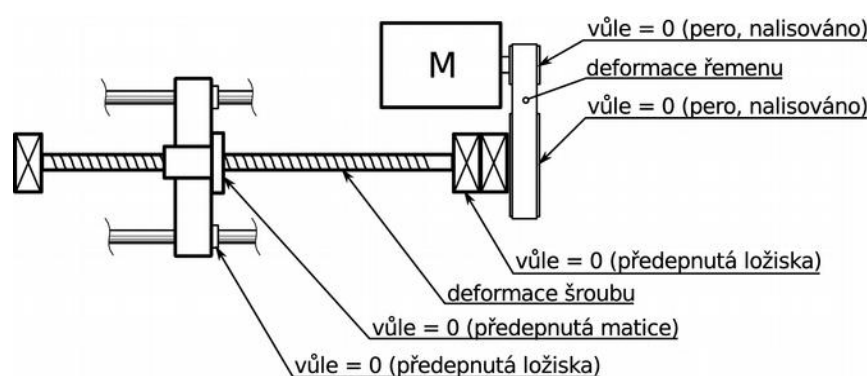
Z literatury [34] vyplývá má volba optimálního převodového čísla z hlediska přenosu dynamických účinků na setrvačné momenty dvouhmotového systému:

$$i_{opt} = \sqrt{\frac{J_m}{J_s}} = \sqrt{\frac{J_m}{J_s + m_s \cdot K_{sz}}} = \sqrt{\frac{3,33}{0,4911}} = 2,58 \simeq 3 \quad (38)$$

Řemenový převod volím stejný pro osu X i Z. Z toho vyplývá, že při maximálním úhlovém zrychlení $\varepsilon = 8080$ je maximální vyvinutelné zrychlení $2,143 \text{ m/s}^2$ pro obě osy.

2.4.5. Analýza vůlí

Odměřování servopohonů je nepřímé a vůle ani tření tedy nemají přímý vliv na regulaci. Nepřímý vliv není předmětem obav, neboť poháněné hmoty jsou zanedbatelné z podstaty věci – výroba nanovláken je dynamicky zatížená jen pohybem nástrojů a samotného kinematického řetězce. Je však nutné tyto možné kmity vyšetřit a ověřit, zda nebudou zdrojem rezonancí, které by choulostivý proces narušily.



Obr. 32: Schéma vznikajících vůlí v mechanismu osy

Ze schématu 32 je zřejmé, že možné vůle vzniknou pružností celého rámu (zanedbáme z důvodu jeho předimenzování), pružností řemenu a pružností šroubu. Z literatury [34] vychází empirický vztah pro kontrolu:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{J}} > 50 [\text{Hz}] \quad . \quad (39)$$

Pro oba řemeny platí pružnost, daná výrobcem $k = 7449 \text{ N/mm}$. Pro kratší převod osy X s pružnou délkou 89,5 mm tedy platí:

$$f = 808 > 50 \text{ Hz} \quad , \quad (40)$$

a pro delší převod, pro paralelizovanou osu Y, platí:

$$f_1 = 6137, f_2 = 3631 > 50 \text{ Hz} \quad . \quad (41)$$

2.4.6. Minimální krok

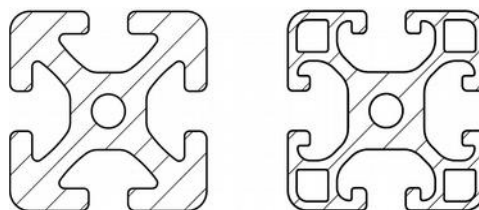
Řemenovým převodem (1:3) ze servomotoru a dále přenosem z kuličkového šroubu (stoupání 5 mm) na suport je při 2^{20} inkrementech na otáčku právě jeden inkrement projektován jako translace na teoretickou vzdálenost 16 nm.

2.5. Rám

Při konstrukci průmyslových kartézských CNC strojů jsou v praxi používána odlévaná, svařovaná nebo montovaná řešení. V případě tohoto manipulátoru nejsou kladeny požadavky na extrémní tuhosti a tlumení rázů jako je tomu například u obráběcích strojů, odlévaná konstrukce tedy zde své přednosti nevyužije. Rámy, svařované z normalizovaných dílů, mívají problémy s geometrickou přesností, způsobenými reziduálním napětím z tepelného namáhání při výrobě [48]. Tomu je nutné se při konstrukci mikromanipulátoru vyhnout, a proto je montovaný rám pro vyvíjený stroj nejvhodnější. Jeho konkrétní výhody:

- rychlá a snadná montáž a přestavitelnost,
- dodatečné úpravy a doplnění,
- vysoká pevnost,
- bez nutnosti opracování.

Pro montované rámy je nabízeno mnoho ucelených řešení. Dá se říci, že všechny nejpoužívanější systémy jsou tvořeny za studena vytlačovanými hliníkovými profily s jednotným rastrem upínacích drážek a děr. Profily jsou velmi přesné a jejich základní tvar sám implikuje vysokou tuhost. Jsou odolné díky technologiím umělého stárnutí hliníkových slitin.



Obr. 33: Hliníkový profil Item

Z rešerše trhu s hliníkovými konstrukčními systémy vyplynula následující nabídka dodavatelů.

Systém	Použitelný profil (šířka x výška x drážka)	Tolerance	
		Přímost	Tvar profilu
ALTRATEC [49]	50x50x10	neznámá	neznámá
mk system [50]	40x40x	0,7 mm/1000 mm	±0,2 mm
Rexroth [51]	30x30x8	0,3 mm/300 mm	±0,15 mm
ITEM [52]	40x40x8	0,3 mm/300 mm	±0,1 mm

Tab. 3: Výrobci hliníkových systémů pro rámy

Firma ALTRATEC má nabídku i dokumentaci velmi omezenou, zatímco systémy Rexroth a ITEM nabízejí velmi široké portfolio se zajištěním jak dokumentace, podpory, tak i dodávky již smontované konstrukce na základě dodaných 3D modelů. Firma mk Automation, Inc. se co do šíře portfolia nemůže rovnat, nemá zastoupení v ČR ani dostatečně zavedená.

Z vlastní kladné zkušenosti se systémem ITEM a zároveň poněkud zápornou zkušeností kolegů s Rexroth byl nakonec zvolen systém ITEM.

Profily ITEM distribuuje v ČR firma Haberkorn Ulmer s.r.o., která zároveň nabízí i převody ozubenými řemeny, kterými je stroj osazen pro synchronní přenos momentu [53].

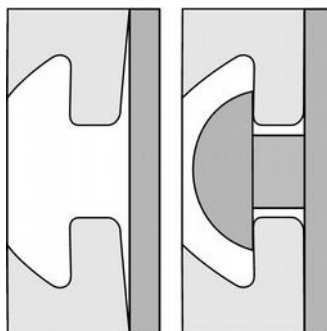
Z hlediska ceny, velikosti stroje a doporučení zástupce dodavatele byl zvolen profil 40x40x8 jako hlavní stavební prvek rámu.

Veškeré hliníkové díly jsou zhotovené z materiálu Al Mg Si 0,5 F 25 dle DIN 3.3206.72 opatřené přírodním eloxem o minimální tloušťce 10 µm a tvrdosti 250 – 350 HV. Povrch je anodizován a je tak permanentně odolný proti poškrábání a další oxidaci. Při obrábění tak díky tvrdé vrstvě nedochází k tvorbě ořepů a nevyžaduje čisté doobrobení. Detaily k mechanickým vlastnostem lze vidět v tabulce.

Parametr	Hodnota
Pevnost v tahu	min. 245 N/mm ²
Hustota	2.7 kg/dm ³
Tvárnost A ₅	min. 10 %
Tvárnost A ₁₀	min. 8 %
Lineární tepelná roztažnost	23.6x10 ⁻⁶ K ⁻¹
Modul elasticity	~ 70,000 N/mm ²
Modul tuhosti	~ 25,000 N/mm ²
Tvrdość HB	~ 75 HB-2.5/187.5

Tab. 4: Mechanické vlastnosti materiálu rámu

Všechny spoje profilů se vyznačují předepnutím a vytvářejí tak stabilní ukotvení a spojení všech komponent. Tato kontrolovaná deformace při utažení také zajišťuje šroub proti povolení a ochraňuje spoj proti působení vibrací.



Obr. 34: Předurčená deformace ve spoji

2.6. Elektronika a software

Pohonný systém má řídicí jednotku zpracovanou ve formě PLC od stejného výrobce (Yaskawa, JEPMC-MP2310-E), specializovaného na řízení servopohonů. Použitá jednotka je vybavená kromě proprietární sběrnice Mechatrolink II i sloty pro rozšíření funkcionalit elektronickými kartami, z čehož tato aplikace těží formou modulu s I/O porty (JAPMC-IO2301).

Samotná řídicí jednotka nedisponuje interface a proto bylo sestavu nutné doplnit o osobní počítač s klasickým operačním systémem a prostředím pro obsluhu stroje. Zařízení v této koncové vazbě komunikují přes standardní protokol Ethernet.

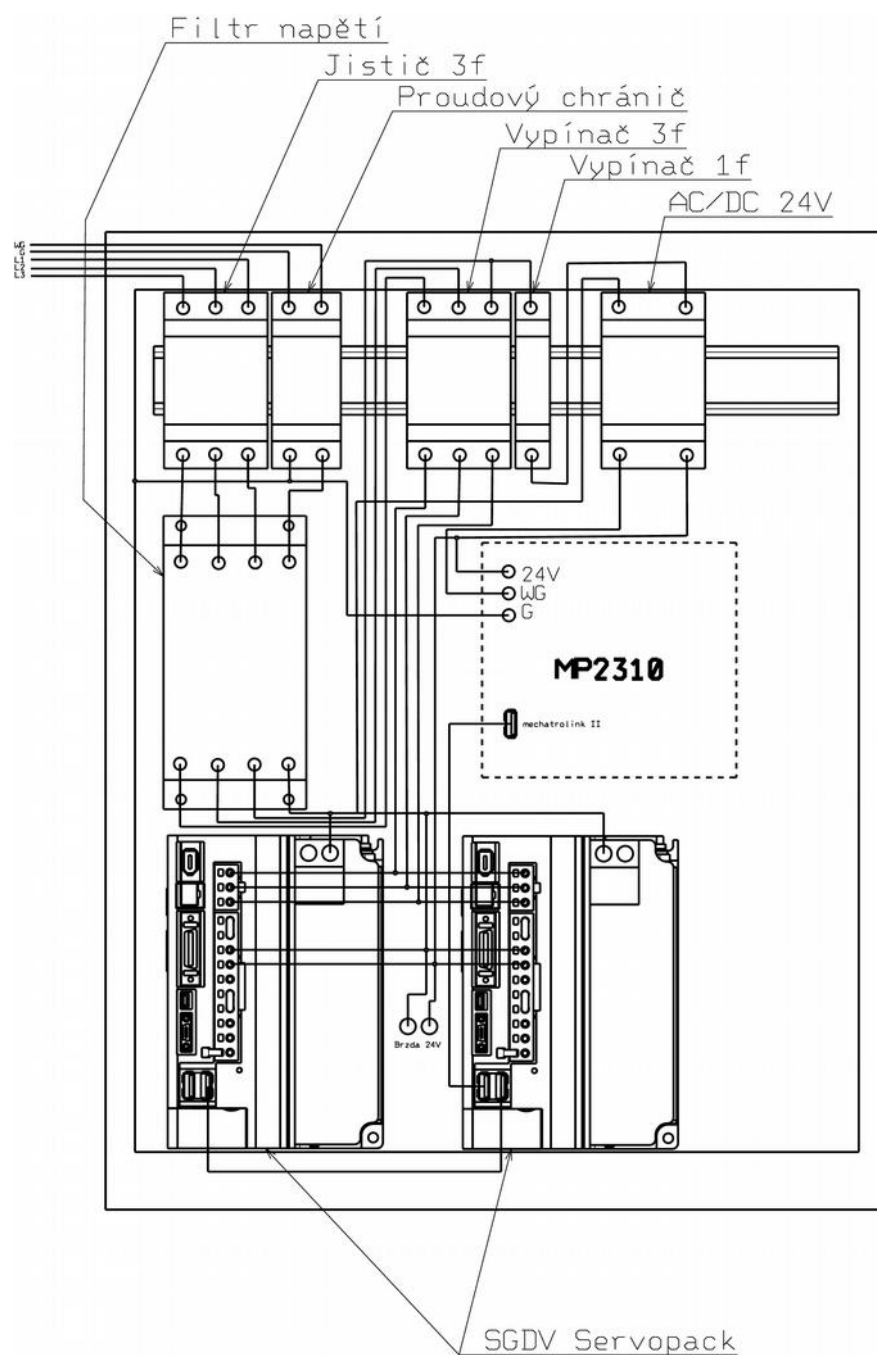
Výše zmíněná vstupně výstupní rozšiřující karta je vybavena šestnácti digitálními vstupy, stejným počtem digitálních výstupů a jedním pulzním vstupem pro IRC snímač. Touto cestou lze stroj propojovat s podpůrnými prvky, jako jsou koncové spínače, senzory (teplota, tlak, koncentrace výparů rozpouštědla chemickým čidlem, apod.); umožňuje zasílání povelů pro pomocné osy a například dávkovací zařízení, popsané v kapitolách níže.

Z důvodu bezpečnosti je stroj vybaven centrálním STOP tlačítkem, připojeném na dostatečně dimenzovaném kabelu tak, aby jej šlo přemísťovat blíže prostoru, kde dochází interakci obsluhy a pohybujícího se stroje. Tlačítko je technicky řešené tak, že je při jeho stisknutí přerušen přívod elektrické energie do řídicích obvodů a tím je jakýkoliv pohyb zastaven. V praxi se dokonce tlačítko osvědčilo jako hlavní vypínač a stroj se tak zapíná jeho odjištěním.

Elektronických prvků, nutných k chodu stroje, je větší počet, a proto bylo nutné zracionalizovat zapojení a umístit jej do rozvodové skříně. Systém sestává z:

- **3f jistič,**
- **3f proudový chránič,**
- **3f vypínač** pro napájení silové elektroniky,
- **1f vypínač** pro napájení logických členů,
- **AC/DC 24V převodník** pro napájení logických členů,
- **zpětný filtr 3f napětí L0063U22** pro budicí moduly servopohonu,
- **PLC MP2310,**
- **servopacky SGD.V.**

Zapojení bylo navrženo po stránce elektrotechnické, tak i organizační. Jeho schéma je uvedené na obrázku 35. Po zjištění prostorové náročnosti byla nakoupena ocelová skříň od firmy SCHRACK 500x400x260 s montážní deskou a krytím IP66. Celek byl realizován svépomocí.



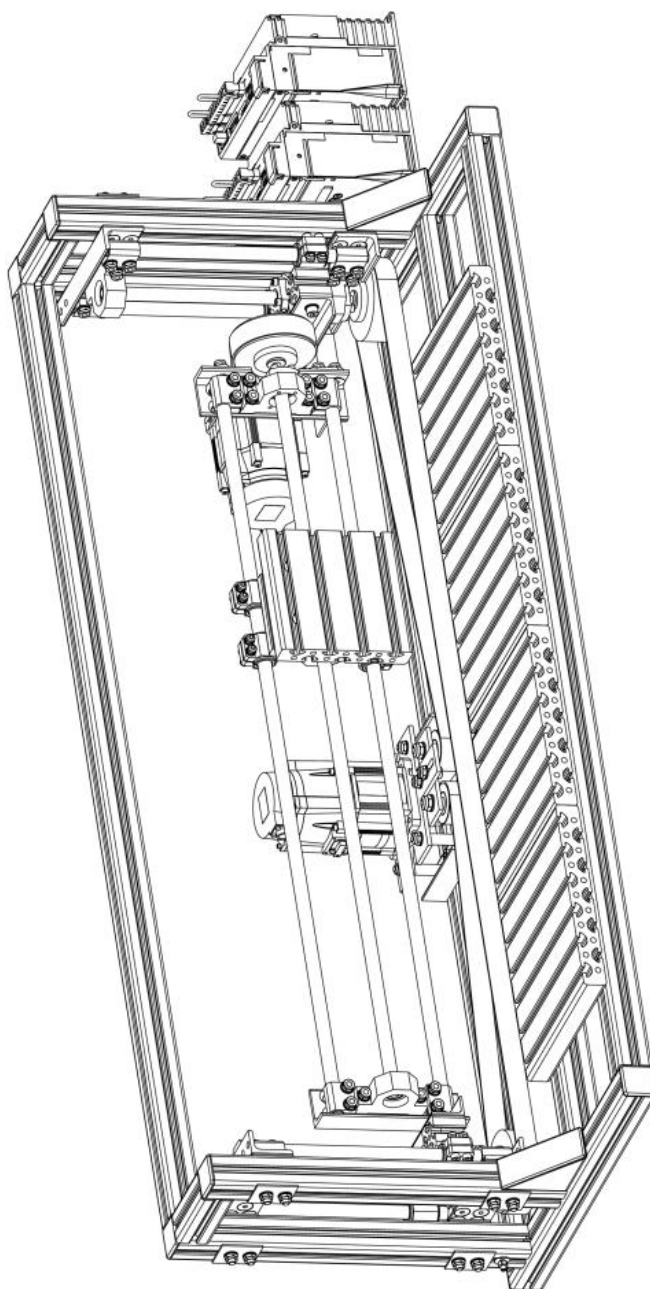
Obr. 35: Zapojení rozvodné skříně mikromanipulátoru

2.7. Vyhodnocení konstrukce

Veškeré součástky a spoje byly voleny v souladu se zásadami návrhu a dimenzování servopohonů a poháněných soustav. Tj. minimalizovat pasivní odpory, maximalizovat dynamickou i statickou tuhost a volit přiměřený redukovaný moment setrvačnosti

poháněných součástek. To se podařilo několikanásobně lépe vůči kritickým hodnotám a správně se předpokládalo, že stroj bude dosahovat špičkových vlastností pohybu, dle požadavků jaké jsou na něj kladeny. Návrhu byl zpracován v systému CATIA v5.

Na obrázku 36 je náhled výsledné konstrukce.



Obr. 36: Výsledná konstrukce Manipulátoru 1

3. PODPŮRNÉ MODULY

3.1. Kryt stroje

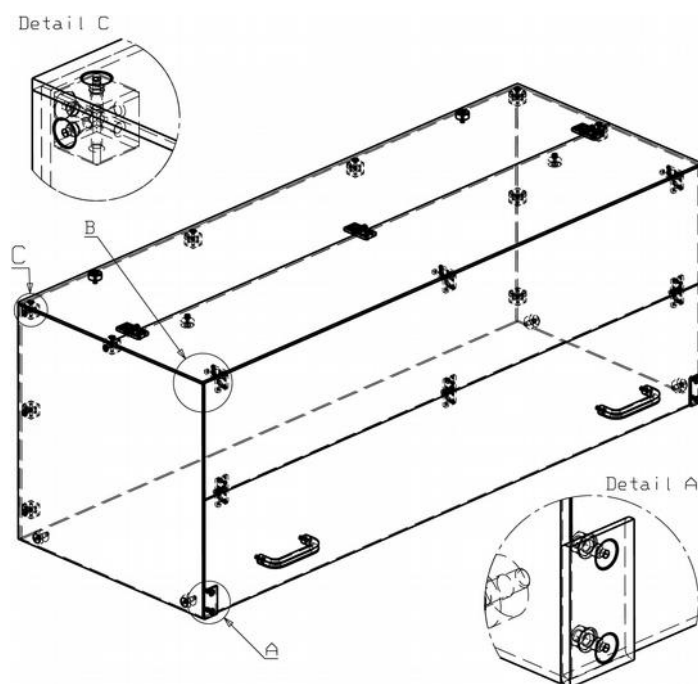
Během Mezinárodního strojírenského veletrhu v Brně, na kterém byl stroj součástí živé expozice a nepřetržitě zvlákňoval, byl zjištěn negativní vliv stavu okolního prostředí ve formě otřesů, ale zejména vzdušných proudů a fluktuací. Předváděný polymer 40% PVA s molekulovou hmotností 67 000 je na výkyvy procesních parametrů velmi odolný, ale rušení bylo tak markantní, že i jejich vliv byl znatelný.

Z těchto důvodů bylo třeba stroj vybavit zakrytváním pro ochranu procesu. Dalšími výhodami takového řešení je ochrana obsluhy a okolí před pohybujícími se díly a jeho poměrně malá technická náročnost.

Technické řešení bylo vedeno cestou průhledných desek o tloušťce 6 mm z polyesteru, montovaných pomocí silonových úhelníků do samonosného celku. V případě potřeby lze kryt odebrat, nebo jen položit na pracovní stůl tak, že obklopuje celý stroj. Desky byly dodány s montážními otvory, obrobených na souřadnicové vyvrtávače.

Kryt je vybaven segmentovanými „dveřmi“ navrženými tak, aby při jejich manipulaci nedocházelo ke zbytečnému rozvíření vnitřní atmosféry a ovlivnění vyráběného vzorku, fyzicky nezatěžovaly obsluhu a neobsahovaly finančně náročné prvky.

Výsledný návrh lze vidět na obrázku 37. Po realizaci se kryt projevil jako přínosný, zejména pro jeho ochranu procesu před vzdušnými proudy. Výroba se tak stabilizovala a mírně se omezily občasné poruchy, kdy se tažené vlákno neznatelným poryvem narušilo a svými zbytky znehodnotilo již hotovou a položenou strukturu.



Obr. 37: Návrh krytu pro mikromanipulátor

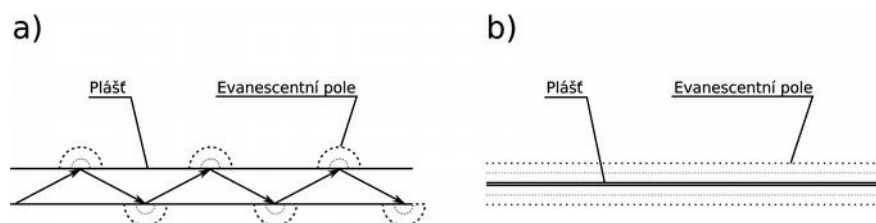
3.2. Detektor přetrhu vláken

Při dloužení se často stává, že se nedokončené vlákno naruší a tím znehodnotí. Při takovém přetrhu nemusí být poškozeno pouze samotné vlákno, ale případně i již položená struktura. Při výrobě vysoce precizních výrobků je bez detektoru taková situace identifikovatelná až při použití elektronového mikroskopu, což není možné pro kontrolu 100% vyrobených vzorků, neboť taková metoda je destruktivní a nedokonalá z důvodu lidského faktoru. Je zde však problém, jak takovou událost detekovat. Vláknem není pouhým okem vidět a pro automatizovanou a spolehlivou činnost je strojová detekce nezbytností. Byly prozkoumány následující metody:

- Optická vodivost vlákna – přenese/nepřenese signál
- Elektrická vodivost – přenese/nepřenese signál
- Akustická rezonance
- Optické snímání objemnějších konců vlákna mikrokamerou a obrazová analýza

3.2.1. Optická vodivost

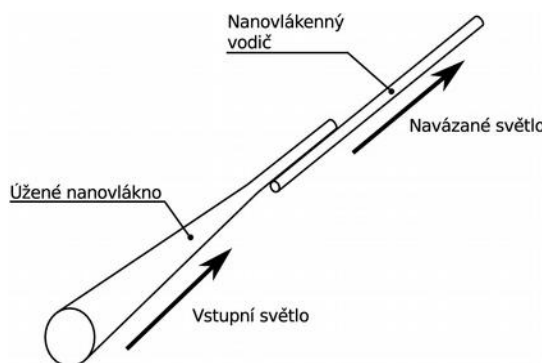
Aby bylo možné využití optické vodivosti pro detekci přetrhu, je nutné světelný signál navést do vlákna jako vodiče. Na rozdíl od klasických optických vodičů zde přichází v potaz průměr vlákna, který dosahuje menších hodnot, než je samotná vlnová délka světla. Signál je pak přenášen ve formě povrchových vln a vytváří kontinuální tzv. ohniskové body a obálky (obrázek 38), tedy jakési singularity v intenzitě pole, vyvrcholené radiační ztrátou. To za prvé dovoluje pozorovat průběh signálu i mimo vlákno, neboť to díky ztrátě září. Za druhé je tím umožněno tzv. evanescentní vázání, což je v podstatě přestup signálu z jednoho vlákna s průměrem menším, než je vlnová délka signálu, na druhé pouhým přiložením povrchů. To je způsob, který obchází nemožné použití klasické fokusace signálu do vlákna čočkami.



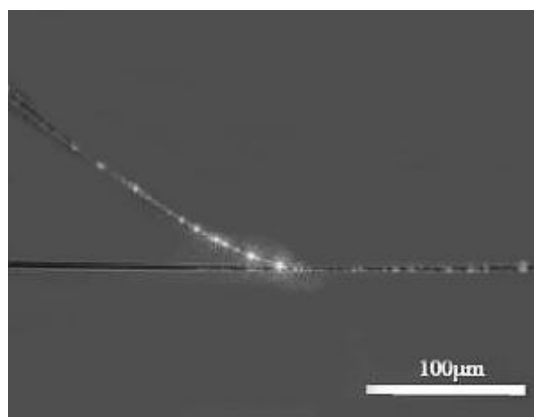
Obr. 38: Vznik evanescentního pole u optického vodiče: a) klasický optický vodič, b) vodič s průměrem menším než je vlnová délka signálu

Fokusace se provádí do vlákna o velkém průměru, které se zužuje až na podkritickou hodnotu, kde se již signál rozděluje do emisních komponent a je vedeno po povrchu. Pozdější překřížení s nanovláknem zajistí přestup do něj (obrázky 39 a 40). O problematice podrobně pojednává bakalářská práce [54].

Podmínkou pro použití takového principu pro detekci přetrhu jsou přes nedocenitelné výhody značně omezující. Je nutné zvláknovat pouze z opticky vodivých materiálů a nutno připomenout fakt, že takto komfortní nanášení signálu funguje pouze u malých průměrů, které v počátku procesu tažení vlákna nenajdeme, natož pak pevný povrch pro přiložení úžehého vlákna. Taková metoda je tedy prakticky nevyužitelná.



Obr. 39: Schéma přestupu signálu



Obr. 40: Snímek přestupu signálu

3.2.2. Elektrická vodivost

Jak je známo, i izolanty jsou za určitých podmínek schopné vedení elektrického proudu. Měření vodivosti polymerů (což je nejvyužívanější skupina materiálů pro výrobu tažením v naší laboratoři) po teoretické stránce popisuje [55] a prakticky pro vybrané speciální druhy vodivých polymerů diplomová práce [56].

Vodivost výchozího materiálu je kromě detekce přetrhu také velmi důležitá pro možné aplikace výrobků. Jedním z prosazovaných aplikací je například i senzorka a miniaturní vodiče na úrovni mikročipů.

Předpokládejme, že vnější elektrické pole udržuje na koncích vlákna o délce l_0 a ploše průřezu S_0 konstantní rozdíl potenciálu U . Způsobuje při tom tok náboje (I). Jednotkou náboje Q je coulomb [C], neboli ampersekunda. Obvykle se chování látky řídí Ohmovým zákonem, kdy při zvýšení napětí U se úměrně zvýší i proud I .

Poměr proudu a napětí se nazývá vodivost, neboli konduktance (G). Je tedy převrácenou hodnotou odporu R .

Poměr plošné hustoty proudu a intenzity elektrického pole se nazývá konduktivita látky σ [$\text{Sm}^{-1} = \text{AV}^{-1}\text{m}^{-1}$]. Hodnoty konduktivity polymerů při 20°C leží ve velmi širokém pásmu. Některé polymery, jako třeba polytetrafluorethylen má hodnoty extrémně nízké v řádu $10^{-19} - 10^{-20} \text{ Sm}^{-1}$ a jsou na hranici měřitelnosti. Naopak vysoké konduktivity dosahují kovy, především měď s $5 \cdot 10^7 \text{ Sm}^{-1}$. Vodivost polovodičů a izolátorů s teplotou stoupá. K popisu se používá rovnice Arrheniova typu:

$$\sigma = \sigma_0 e^{E_0/RT}, \quad (42)$$

kde σ_0 je faktor, mající význam konduktivity při velmi vysoké teplotě, E_σ tzv. aktivační energie vodivosti. Tato rovnice však u polymerů platí pouze v omezeném rozsahu teploty a je ovlivněná tzv. skelným přechodem. Konduktivita některých polymerů je uvedena v tabulce 5.

Polymer	σ [Sm ⁻¹]
polytetrafluorethylen	10^{-19}
polyethylen, polystyren	$10^{-13} - 10^{-16}$
polyisopren	10^{-14}
polykaprolakton	$10^{-12} - 10^{-10}$
polyvinylalkohol	10^{-8}
polychinony	10^{-2}
pyrolyzované polymery	$10^2 - 10^4$
přírodní pryž s obsahem 50 dsd acetylenových sazí	$10^{1,6}$

Tab. 5: Konduktivita některých polymerů

Konduktivita je určena součinem koncentrace nositelů náboje, jejich náboje a jejich pohyblivosti. V kovech jsou nositeli náboje volné elektrony, kterým brání v pohyblivosti vady mřížky. Jejich vliv s rostoucí teplotou vzrůstá a tak se vodivost snižuje, zpravidla lineárně. Mechanismus elektrické vodivosti polymerů není zcela objasněn a jednotný mechanismus tu pravděpodobně neexistuje, ale lze ji zvýšit vodivými přísadami, jako například vodivé saze, kovové prášky a uhlíkové trubice. [55]

Úprava elektrických vlastností byla testována s využitím uhlíkových nanotrubic (CNT), které byly ve formě prášku (Nanocyl Thin multiwalled carbon nanotubes, 95% C čistota) přidávány do roztoku 33% PVA o molekulové hmotnosti 67 000. Směs musela být ultrazvukově homogenizována při teplotě 70°C. Takový postup se však projevil jako velmi negativně působící na její zvláknitelnost a po pokusech o zvláknění připravené řady roztoků byla maximální zvláknitelná koncentrace CNT s hodnotou 2,5%. Při takové koncentraci jsme nebyli schopni vodivost změřit. Experiment byl publikován na konferenci AUTEX 2013 [57].

3.2.3. Akustická rezonance

Idea vychází z faktu, že natažené tuhé vlákno v podstatě představuje strunu, tedy mechanickou soustavu, teoreticky schopnou kmitání od vlastní frekvence. Vlastní frekvence je zejména ovlivněna hmotností a pružností vlákna:

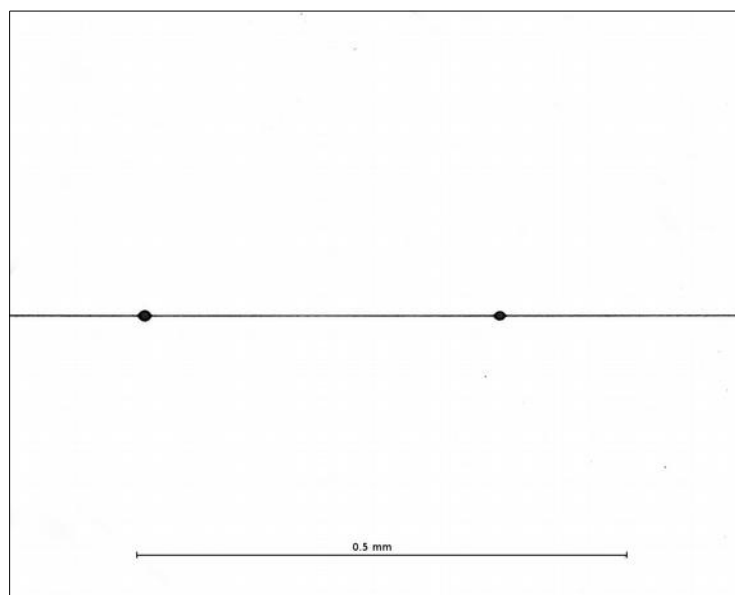
$$f_n = \frac{n}{2 \cdot l} \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad (43)$$

Kde n je celé číslo, udávající řád kmitání, l je délka vlákna, F síla napínající vlákno, μ hmotnost délkové jednotky vlákna. Například pro PVA vlákno o délce 100 mm, napnuté silou 0.1 N, průměru 800 nm vychází vlastní frekvence 0,00223 Hz. [58]

U mechanické soustavy je detekovatelná rezonance dána hmotností a pružností. Hmotnost je zde nesmírně malá a pružnost díky relaxačnímu času velmi omezená. Z konzultace s Ing. Zdeňkem Otčenáškem, Ph. D., vedoucího výzkumného centra hudební akustiky vyplývá, že pro udělení takového kmitání nanovláknem, aby jej bylo možné detekovat není prakticky možné.

3.2.4. Obrazová analýza

Doposud prakticky nejvyužitelnější metodou pro detekci přetrhu vlákna při tažení je technika, při níž se optickým mikroskopem snímá konec vlákna a počítačovým zpracováním obrazu se detekuje jeho přerušení. Doposud jsme vlákna snímali výhradně na elektronovém mikroskopu, neboť jejich malá tloušťka nedovoluje zkoumání jejich průměru a kvalit povrchu mikroskopem optickým. Pro elementární informaci, zda vlákno je nebo není na scéně bohatě postačí optická cesta, což je přínosné zejména z hlediska mnohem jednoduššího technického provedení. Ukázka odbarveného snímku se zvýšeným kontrastem je na obrázku 41.



Obr. 41: Snímek vlákna z optického mikroskopu, černobílý, ekvalizován

Pro účely testování byl sestaven program pro analýzu obrazu, který na základě vhodného preprocessingu a upravené vážené lineární regrese určí, zda se na sejmuté obrazové matici nachází, nebo nenachází vlákno. Předpoklady pro detekci jsou:

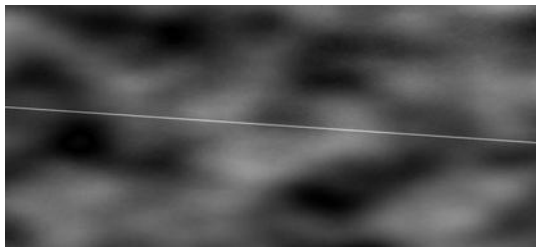
- vlákno je orientováno víceméně horizontálně (sklon do 45°),
- vlákno je přímočaré,
- vlákno je kontrastní s podkladem.

Pro rychlý a jednoduchý vývoj byl využit jazyk PHP, který obsahuje snadno použitelné knihovny pro práci s obrázky. Po odladění se plánuje nasazení v monolitickém mikrokontroleru s využitím jazyka C, který bude zpracovávat informace, načtené z SPI kamery.

Obrázek byl odbarven a převeden do matice osmibitových hodnot jasu. Pro výpočet je vhodné, aby bylo vlákno v datech světlejší, než okolí – pro tento účel můžeme využít inverze, pokud jsou světelné podmínky v tomto směru nepříznivé.

Dále je obraz ekvalizován a pomocí prahové hodnoty 75% rozdělen na binární hodnoty. Vertikálním váženým středem byl nalezen předpokládaný průběh vlákna o průměru 1 px. Pomocí lineární regrese a jejího korelačního koeficientu je pak určena jistota, se kterou je

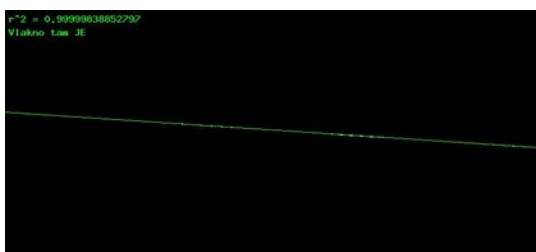
vlákno přítomné. Na obrázcích 42, 43, 44 a 45 vidíme zpracování obrazu s vláknem a bez vlákna.



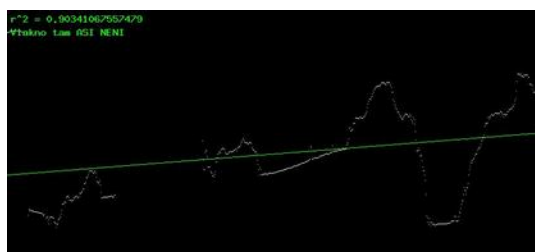
Obr. 42: Výchozí snímek s vláknem



Obr. 43: Výchozí snímek bez vlákna



Obr. 44: Pozitivní výsledek analýzy



Obr. 45: Negativní výsledek analýzy

3.3. Dávkování polymeru

Uzavření procesu do komory implikuje použití automatizovaného dávkovací zařízení. V podstatě je idea velmi podobná lékařské injekční pumpě, určené pro kontinuální dávkování léčiva z upnuté standardní injekční stříkačky. Potřebný dávkovač je však k tomu navíc zastavitelný do přístroje, dávkuje jen po nastavených dávkách a to na základě řídicího impulsu z ručního ovladače nebo PLC.

Z důvodu citlivosti pohyblivého členu manipulátoru na připojené setrvačné hmoty bylo vhodné dávkovací mechanismus koncipovat tak, aby zbytečně nezatěžoval pracovní kurzor. Toho bylo docíleno použitím tlakového převodníku a stlačeného vzduchu jako média pro přenos síly. Polymer je tak umístěn v zásobníku – kartuši, která chrání proti přístupu vzduchu a těkání rozpouštědla. Díky tomu je možné zvláknovat ze širší nabídky materiálů, zejména z polykaprolaktonu (PLC), který je na zpracování náročnější a přitom nabízí rozsáhlé možnosti pro medicínské aplikace pro svou biokompatibilitu, říditelnou biodegradabilitu a schválením jeho použití pro medicínské účely. Takový polymer je totiž rozpustný v chloroformu, který je kvůli své těkavosti náročný na skladování a manipulaci – velmi rychle na vzduchu solidifikuje a mění se tak jeho zvláknitelnost. Prakticky to znamená, že po aplikaci výchozí kapky roztoku se dají vytáhnout maximálně jednotky vláken, při čemž jejich nesourodost brání ve spolehlivé deterministické produkci.

S dávkovacím zařízením je roztok uchován v kartuši a v okolním prostředí je exponován jen po velmi krátkých okamžicích, kdy je z něj třeba vytáhnout vlákno.

Dalším přínosem umístění zásobníku materiálu na pohyblivou část manipulátoru je bezesporu i lepší přilnavost v systému kapka-plocha, nežli kapka-jehla. Dosedací plošku tak lze upravit pro lepší přilnavost. To se zpravidla docílí pokrytím jejího povrchu shodným polymerem. Při kontaktu tak dojde díky přítomnému obsahu rozpouštědla k naleptání povrchů a tím i jejich slepení.

Předpokládá se navíc použití regulovaného topného tělíska v ústí jehly, umožňující použití dalších materiálů. Toto zařízení je zatím ve fázi plánování a sumarizace požadavků.

Díky integraci dávkovacího zařízení, poháněného elektronickým vzduchovým ventilem bylo docíleno zvýšení přesnosti výroby a jen díky němu byl umožněn výzkum a výroba unikátních scaffoldů pro tkáňové inženýrství. Na dávkovači lze nastavovat tlak redukčního ventilu a elektronicky délka impulsu, po který bude tlak působit na píst. Čas lze nastavovat s přesností 0,05 s. Dávkovací zařízení umožňuje i snížení výchozího tlaku do záporných hodnot a tak materiál mimo působení impulsu nasávat zpět do kartuše. Po odladění je toto vhodné zejména pro méně vazké roztoky, které by jinak samovolně vytékaly.

Použití dávkovače u vazkých polymerů je podmíněno použitím kónické jehly s přírubou se závitem. Tlakový impuls tak nemusí překonávat tření mezní vrstvy po celé délce jehly a ve výsledku je možné použít i jehlu s menším výstupním odporem, než by to bylo u cylindrické. Konkrétní parametry jsou uvedeny v patentové přihlášce, která je přiložena.

3.4. Ukládání vláken pro přepravu a lepení

Z hlediska automatizace a čistoty výsledku je vhodné vyrobené nanovlákno ukládat přímo do místa jeho konečného určení. Pokud toto není technicky možné (například medicínské aplikace), je nutné strukturu či samotné vlákno vybavit samonosným prvkem – nosičem. Nosičem zde může být například elektrostaticky vyrobená nanovláknenná vrstva, kovový nebo plastový rámeček. Pro fyzikální měření se osvědčila vhodně vyleptaná a obrobená cuprexitová destička.

Výsledkem výroby jsou v podstatě libovolné lineární, plošné nebo prostorové útvary s libovolným přesně definovaným vzájemným uspořádáním jednotlivých polymerních vláken o průměru 100 nm až 10 μ m. Tyto útvary se po sejmutí z povrchu podkladu v případě potřeby tvarově nebo velikostně upraví, např. vystřížením, nebo se dále zpracují např.

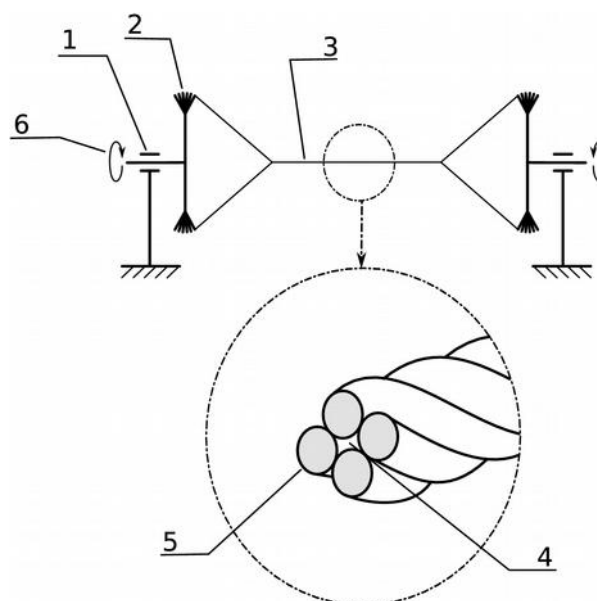
svinutím, přeložením, apod., přičemž před jejich sejmutím z podkladu je možné jednotlivá vlákna nebo skupiny nanovláken útvaru navzájem spojovat např. jejich (částečným) natavením nebo naleptáním (např. parami vhodného rozpouštědla, nebo nanesením lepidla, tvořeného stejným polymerem s nižší molekulovou hmotností – např. 10 000). Využití nižší molekulové hmotnosti jako lepidla je zde velmi důležité z toho důvodu, že je pro jeho rozpuštění do vhodně vazkého stavu potřeba mnohem menší množství rozpouštědel. Takové lepidlo pak na nanovlákna nepůsobí destruktivně, ale spojuje je jemným naleptáním povrchu.

Lepidlo je na strukturu vhodné nanášet speciálním způsobem, neboť nanovláknenné struktury bývají hydrofobní a je obtížné je spojit s útvarem lepidla jinak, než mechanicky. K nanášení linie lepidla používáme laboratorní sklíčko, určené pod mikroskop. Na jeho hranu nanese lepidlo, které posléze sklíčkem přitiskneme na místo určení. Roztok zaplní prostory kolem vláken a spojí se s nimi bez toho, aby je rozpustil.

3.5. Zákrutové zařízení

Mikromanipulátor je schopný vytváření struktur z paralelně ložených individuálních vláken. To po dokončení umožňuje díky udělení zákrutu vytvoření mikro- nebo nanopříze. Takové příze mají opět právě takové složení, strukturu a velikost, jaké jsou na počátku požadovány. Je také možné vytváření přízí z vláken z různých materiálů a průměrů. Vlákna a příze, vyrobené touto technologií mohou být použity ve špičkových aplikacích, jako je analýza obsahu biologické buňky. Díky multikomponentnímu složení lze využívat výhody jednotlivých složek, jako jsou například elektrická či optická vodivost.

Mikromanipulátor umísťuje vlákna na předurčené místo, které je společné pro veškeré komponenty v přízi na jejich začátku a konci. Protože se s vlákny špatně manipuluje, je vhodné jejich svazek zkroutit přímo, bez manipulace v mezikroku. Počet otáček byl experimentálně stanoven na řádově stovky až tisíce. Na obrázku 46 je schématicky zobrazen princip jednoduchého zákrutového mechanismu: 1 – rám; 2 – zkrutný element; 3 – výsledná příze; 4 – mezivláknový prostor; 5 – vláknový komponent; 6 – směr rotace.



Obr. 46: Princip zákrutového mechanismu

Bylo navrženo a realizováno mechatronické zařízení, obsahující rám, krokové motory, kontrolér a uživatelský interface pro ovládání rychlosti zakrucování a počtu otáček.

Je také možné napojit elektroniku k nadřazenému systému (například řídicí PLC mikromanipulátoru), a tím spřažení do většího automatizovaného výrobního celku. To je realizováno jednoduchou paralelní sběrnicí, jelikož není třeba složitější komunikace.

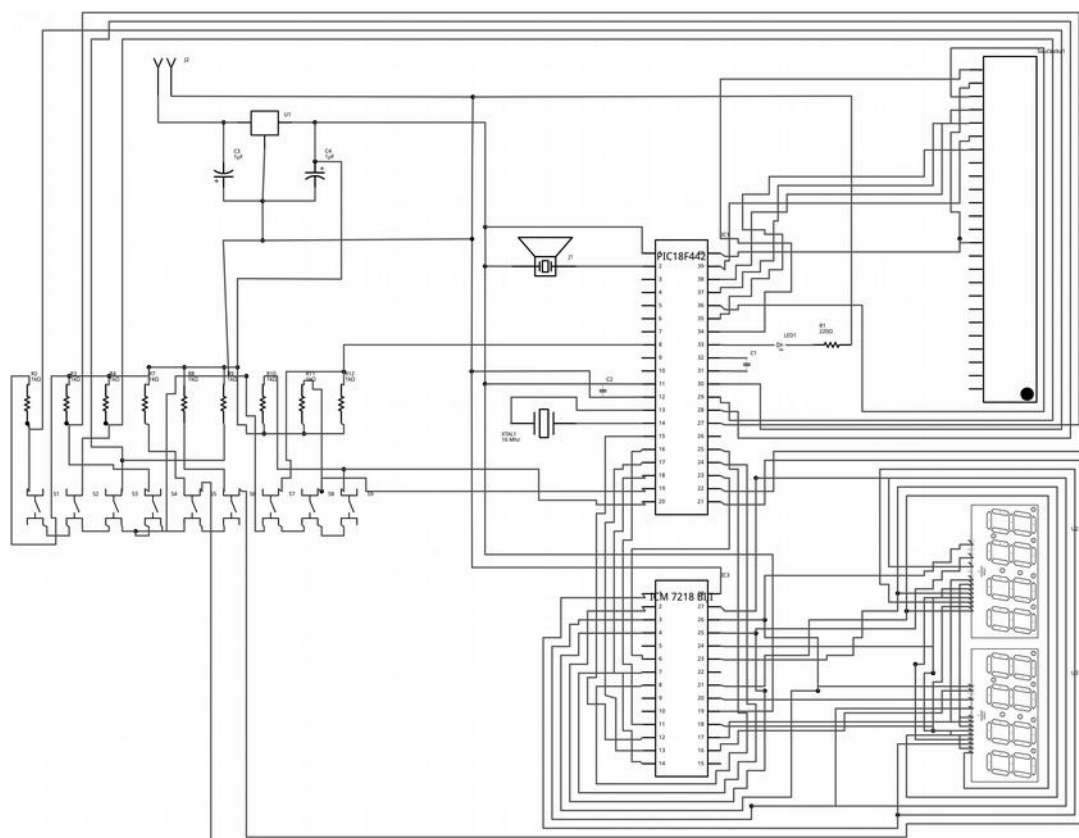
Z hlediska geometrické správnosti je třeba vybavit stroj osově pohyblivým kotevním bodem. Zakrucovaný svazek se zákonitě zkracuje a to je třeba řízeně kompenzovat. Vlákna nelze mechanicky zatěžovat a tím mechanismus opatřit zpětnou vazbou pro kompenzaci kontrakce, proto je nutné vycházet z teorie přízí a kompenzovat deterministicky dle závislosti (44):

$$\Delta L = L_0 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi r z)^2}} \right) . \quad (44)$$

Po odpovídajícím povelu od pracovníka nebo nadřazeného systému začíná zařízení stáčení nastavenou rychlostí až na cílový počet otáček. Proces trvá delší dobu a tak je k dispozici akustické ohlášení konce.

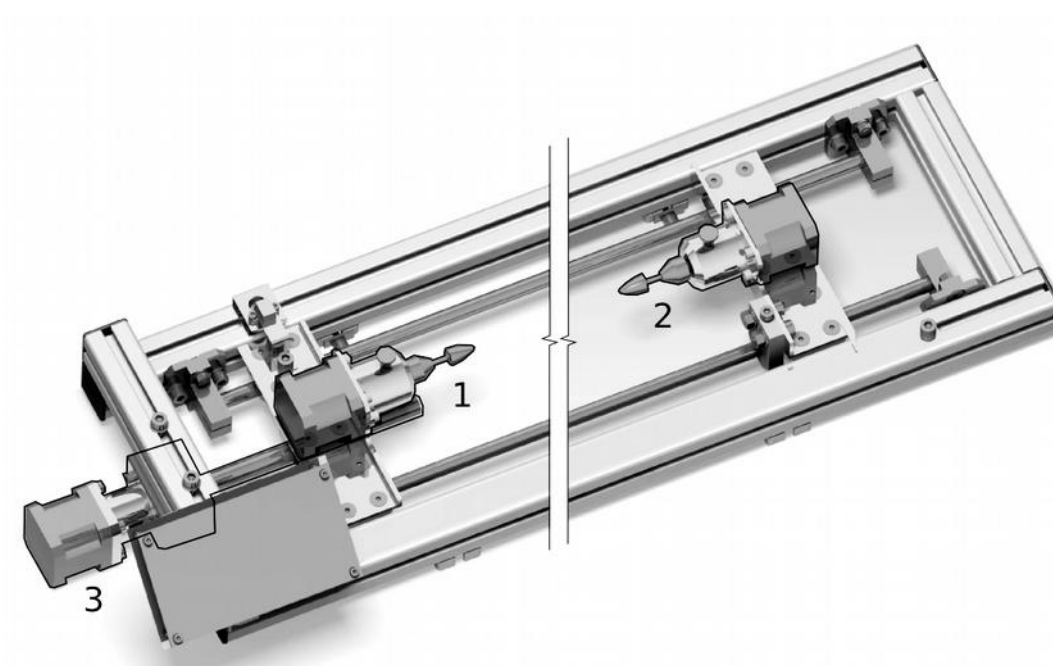
Na obrázku 47 je schéma zapojení řídicí elektroniky. Systém je založený na osvědčeném mikrokontroléru PIC18F442. Obvod je vybaven standardním napájením 5 V, dále vstupy ve formě tlačítek s možností přijímání logických stavů z nadřazeného systému (PLC

mikromanipulátoru) a také řadu výstupů. Kromě signalizace stavu LED diodou je k dispozici i akustický měnič, dva čtyřčíselné sedmisegmentové LED displeje a spojení s driverem krokových motorů prostřednictvím paralelního portu. Buzení krokových motorů a jejich napájení zajišťuje kombinace řídicí desky na bázi obvodu TOSHIBA THB-6600 a AC/DC převodníku 12 V – 120 W.



Obr. 47: Schéma zapojení řídicí elektroniky zákrutového zařízení

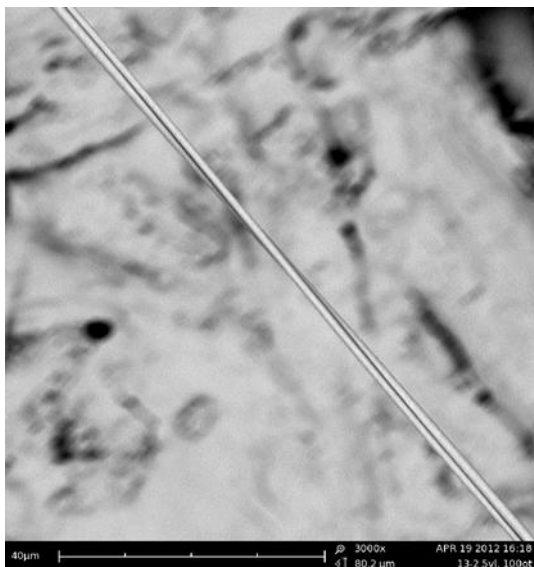
Přístroj byl financován ze studentské grantové soutěže SGS28001. Byl postaven na základě shodného systému hliníkových profilů jako mikromanipulátor a je tak jednoduše integrovatelný. Obsahuje dva kotevní elementy, které se po dokončení výroby lineárního svazku vláken začnou osově otáčet díky krokovým motorům, k jejichž hřídeli jsou prostřednictvím spojky a sklíčidla vetknuty. Výsledek návrhu je na obrázku 48.



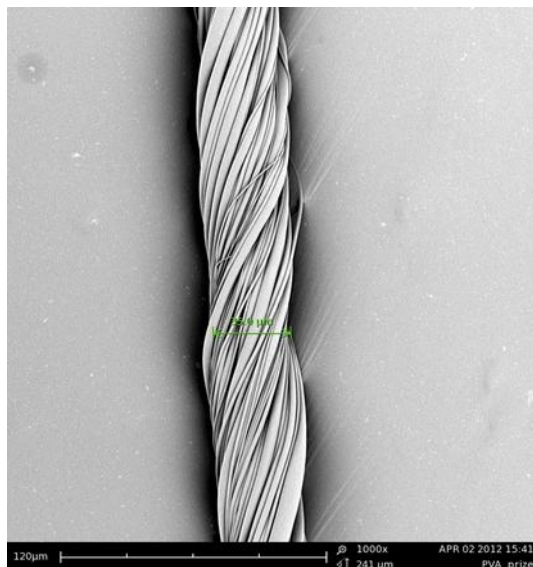
Obr. 48: Zákrutové zařízení s vyznačenými řízenými osami

Jde o velmi experimentální způsob výroby nanopřízí a kontrolér je schopen široce měnit procesní parametry. Výchozí vzdálenost kotvicích elementů je ručně nastavitelná a aretována brzdou. Jejich řízené přibližování během procesu je programovatelné a je závislé na tloušťce příze. Zákrutové elementy jsou zaměnitelné za jinak tvarované a povrchově upravené díky sklíčidlu. Rychlost a počet otáček je nastavitelná uživatelsky pomocí displeje. Sběrnice pro externí elektronické ovládání by měla být schopná interpretace dříve neznámých signálů z nadřazeného stroje přeprogramováním mikrokontroléru (PIC18F46K20).

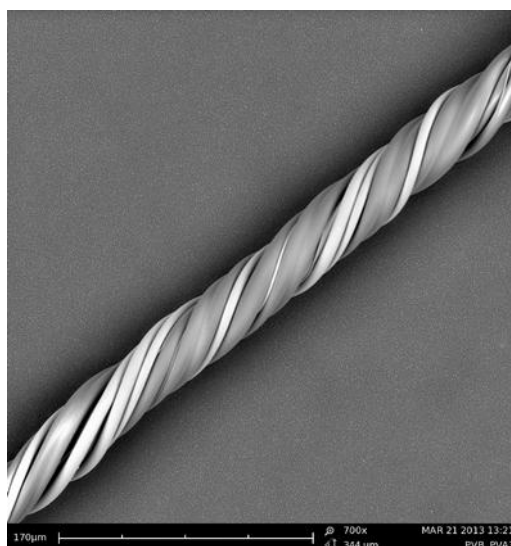
Výsledné mikro/nanopříze jsou uvedeny na obrázcích 49, 50 a 51.



Obr. 49: Snímek příze ze dvou 1µm vláken



Obr. 50: Nanopříze z různých vláken s celkovým průměrem 35 µm



Obr. 51: Dvoukomponentní mikropříze (PVA+PVB)

4. NÁVRH A REALIZACE MIKROMANIPULÁTORU II

Po úspěšném uzavření evolučního cyklu, což lze prohlásit po praktickém nasazení prvního stroje a jeho doplňkových modulů, nastal čas pro cyklus další. Zkušenosti a naměřené hodnoty z experimentů ukázaly směr dalšího vývoje a naznačily požadavky na dimenzování pohybových prvků, které se od prvního stroje liší. Dá se říci, že velmi.

Rozebírat existující a funkční stroj, na kterém zároveň probíhají další experimenty a laboratorní výroba základních produktů pro hledání a zkoumání jejich aplikací, je zcestné. Proto se druhá, mírně odlišná, koncepce realizovala samostatně, ač by bylo technicky možné stavět i na torzu původního.

Nejdůležitější změnou proti původnímu stroji je operační rychlost. Oproti původním požadavkům, kde byla žádaná schopnost velmi malých a plynulých pohybů, se zde žádá opak – vysoké rychlosti na delší vzdálenost. Ukázalo se, že není tolik důležitá vysoká přesnost dosahování polohy, ani plynulost pohybu. Díky vysoké vnitřní viskozitě a vysoké rychlosti tažení není proces ohrožen Reillyho nestabilitou a sám se při správném poměru parametrů stabilizuje. Vyšší rychlosti by bylo možné docílit použitím kuličkového šroubu o velkém stoupání, nicméně v kombinaci se sníženými požadavky na přesnost polohování lze s výhodou použít pojezd s ozubeným řemenem s následujícími parametry.

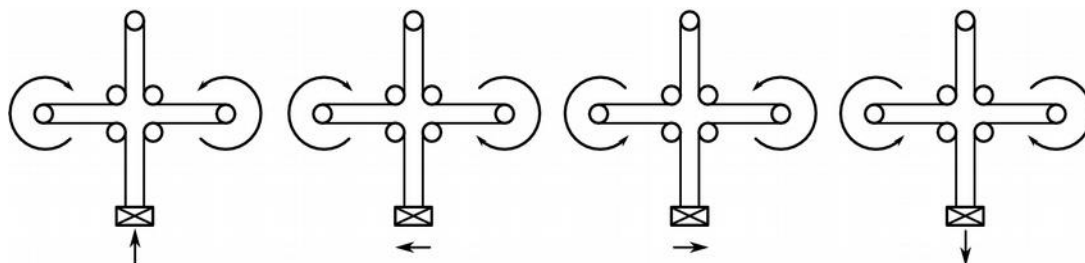
Parametr	Hodnota
Přesnost polohování	nízká (0,5 mm)
Rychlost	vysoká (20 m/min)
Dynamika pohybu	vysoká
Plynulost pohybu	nízká

Tab. 6: Požadavky na pohyb Mikromanipulátoru II

Změn bylo nutno i v případě samotné koncepce stroje. Dvouosý stroj nelze považovat za dostatečný pro praktické aplikace, kdy už není na prvním místě strojově přesné opakování pohybu za účelem analyzování vlivu vstupních parametrů. Pro samostatnou výrobu nano/mikrovláknenných struktur je třeba minimálně 3-osé zařízení, schopné kladení vláken vedle sebe. Ať už pro výrobu přízí, nebo různě orientovaných mříží.

Požadavky na vysokou dynamiku a více os s sebou nesou problematiku parazitních vlivů hmot samotných pohonů. Pokud existuje kinematický řetězec, který není redundantní, je konvenčně třeba vazbit osy jednu na druhou tak, že pro dodržení bezvůlového provozu z důvodu říditelnosti, je nutné bez zbytečných převodových elementů integrovat do os jejich vlastní pohony. Takový kinematický řetězec je tím méně tuhý, čím je delší. Každým svým stupněm zvyšuje svůj moment setrvačnosti a zhoršuje říditelnost. Díky použití řemenového pojezdu tu však existuje možnost spojit dvě hlavní pracovní osy jedním řemenem tak, že tato dvojice bude tvořit diferenciálním způsobem poháněný celek s pohony, umístěnými na nepohyblivém místě. Tedy nepohyblivém v rámci prostoru této dvojosy. Řízení takového

diferenciálního pohybu vyžaduje specifické vybavení, schopné pomocí virtuálních os přepočítávat požadovaný pohyb na otáčení servopohonů. Vše je vidět na obrázku 52. [59]



Obr. 52: Diferenciální řízení

Celý stroj je koncipován jako samostatný, s integrovaným pracovním stolem. Je vybaven pevným krytem, umožňujícím provoz v režimu digestoře. Desky jsou vyrobeny z polyesteru „Griphen“ o síle 6 mm.

V přední části bylo nutné technicky vyřešit uzavření prostoru tak, aby byla obsluha chráněna před účinky zpracovávaných látek. Takové uzavření by mělo být fyzicky nenáročné na použití, neboť se bude používat frekventovaně. Dále by nemělo zbytečně ovlivňovat proces tvorbou vzdušných proudů. Výsledkem hledání se staly „padací“ dveře s protizávažím, pro jejichž sestavení je v katalogu dodavatele hliníkového stavebního systému celá řada vhodných součástí.

4.1. Vedení a pohon

Ve věci vedení byly v případě mikromanipulátoru II použity integrované osy do nerozebíratelných celků s řemeny. Hlavní (nejvyužívanější) diferenciální osa X-Y (BAHR Modultechnik ELZI 3000003101290) byla pomocí na míru obrobených masivních úhelníků ze slitiny hliníku spojena s paralelní dvojicí lineárních řemenových os (BAHR Modultechnik ELZ401000031 425), synchronizovaných tyčí. Vznikla tak kartézská soustava o rozměrech 200x200x900 mm s vysokou dynamikou.

O pohon se stará systém isiMotion, sestavený z trojice servomotorů a řídicí jednotky isiModul 53-CAN2 s integrovanými silovými členy. Křížové osy jsou poháněny dvěma servomotory ISH2-0050-45-560-S1-R-B (0,45 Nm, 4500 ot/min), zatímco dvojí osa Y je poháněna servomotorem ISH3-0080-45-560-S1-R (0,76 Nm, 4500 ot/min).

Pohony jsou s osami propojeny prostřednictvím planetových převodovek Planetroll PD065-DAH005-1AA1 s převodovým poměrem $i=5$ a vůlí v ozubení 12 arcmin.

Systém je vybaven referenčními snímači na bázi vířivých proudů od firmy BAHR.

4.2. Elektronika a software

V případě realizace mikromanipulátoru byl z důvodu vyžadované budoucí komercializace přizván odborník na elektrovýzbroj strojů, se kterým byla navázána spolupráce. Díky tomu je k dispozici i revize elektrického systému a stroj je tak vhodný i pro použití elektrotechnicky neškolenou obsluhou.

Pro snadnou obsluhu byl původní klasický osobní počítač nahrazen panelovým PC, který nabízí i dotykovou obrazovku a díky jednoúčelovému použití i dedikované prostředí. Na počítači byl nainstalován Linux, distribuce Ubuntu. Obsluha tak má dokonce přístup k internetu a při práci si i přehraje hudbu.

Samotný stroj se ovládá pomocí na míru postaveného prostředí, kde je možné graficky programovat trajektorii stroje a volit parametry pohybu. Program pak lze spustit, pozastavit, zastavit a vrátit se do výchozí polohy. Počítač s řídicím systémem komunikuje pomocí protokolu Ethernet a původních komunikačních DLL knihoven od výrobce isiMotion GmbH.

Obsluha má k dispozici STOP tlačítko, centrální vypínač (vyvedený mimo rozvodovou skříň pro lepší přístupnost) a pomocný ovládací panel s hardware tlačítky pro ovládání programu. Stroj je dále vybaven majáčkem pro signalizaci stavu aktuálně spuštěného programu, zástrčkami pro napájení pomocných zařízení a zářivkovým světlem pro dostatečné osvětlení pracovní plochy, což je při manipulaci s nanovláknými strukturami nezbytné.

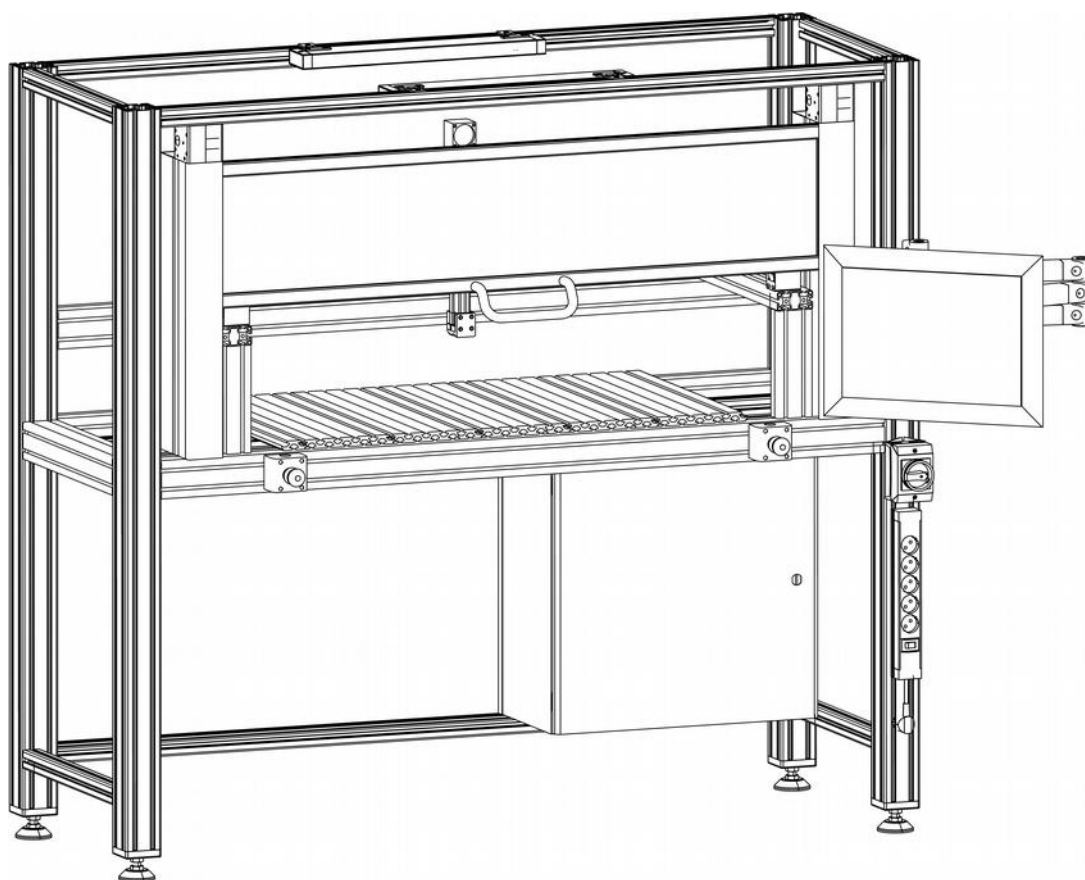
4.3. Vyhodnocení konstrukce

Navržené uspořádání (obrázky 53 a 54) odpovídá poznatkům z vývojového cyklu prvního stroje. Dispozičně je koncipován jako samonosný, tuhostně předimenzovaný, s důrazem na ergonomiku obsluhy, neboť je pracovník u choulostivějších postupů nucen dohlížet na činnost řádově hodiny. Jeho rychlá odezva na náhlé potřeby je garantována použitým dotykovým panelem.

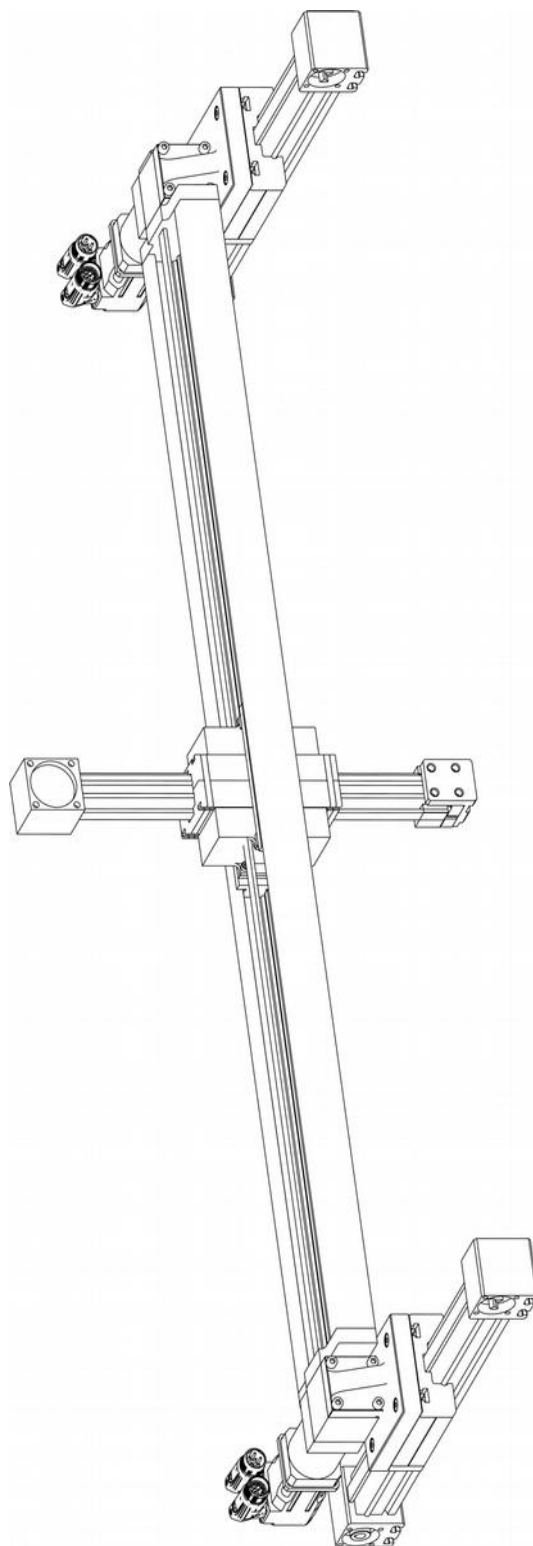
Použitý diferenciální pohon hlavní dvojice os X-Y v kombinaci s tuhým rámem má za výsledek velmi vysoké rychlosti, které na jednu stranu mění požadavky na již odladěné polymery, ale nabízejí až trojnásobnou produktivitu. Nová pomocná osa Y velmi rozšiřuje výrobní možnosti stroje. Zároveň zvyšuje přesnost a spolehlivost, zatímco minimalizuje nutnost aktivní interakce obsluhy s procesem během rozsáhlejších výrobních sestav.

Prostor je nativně zakrytován a poskytuje tak stabilní prostředí pro zvláknění, bez zbytečných vzdušných fluktuací. Padací dveře navíc dovolují uzavření a díky tomu práci v režimu digestoře (s použitím externího odtahu).

Celý stroj byl realizován s využitím grantových financí s dostatečným rozpočtem na profesionální zpracování a jeho poruchy tak vyžadují řemeslný zásah jen výjimečně a dají se tak řešit rychle výměnou komponent. To vše bez nutnosti celý stroj demontovat a porušit kalibraci os.



Obr. 53: Mikromanipulátor II



Obr. 54: Sestava os mikromanipulátoru II

V. Experimenty a aplikace

Tato kapitola pojednává o praktickém využití techniky a strojního vybavení k produkci nanovláken a jejich použití v praxi. Stroj je třeba správně nastavit a používat v zájmu úspěšné produkce takových vláken, jaká očekáváme. O tom pojednává první část. Dále odstoupíme od problematiky tvorby ojednoceného vlákna a následuje popis výroby různých struktur pomocí postprocessingu. Nakonec dojde ke studii praktického nasazení výrobku pro medicínské účely, ověřené přímo na živých hostitelích ve formě kýlní síťky.

1. VÝROBNÍ PARAMETRY

Rozpuštěním polykaprolaktonu (PCL) se střední relativní molekulovou hmotností 90000 v rozpouštědlovém systému chloroform-ethanol (poměr 7:3) se vytvořil roztok s obsahem 24 % hm polykaprolaktonu. Tento roztok se uložil do vnitřního prostoru kartuše, který byl rozdělen pístem na dvě části, z nichž jedna byla propojená s dutinou duté kónické jehly s výstupním otvorem o průměru 0,62 mm, a druhá propojená se zdrojem tlakového vzduchu. Tlakovým impulzem 0,6 bar o délce 0,15 s se na přilnavý podklad tvořený černým papírem (černá barva byla volena jako kontrastní pro vytvářená vlákna) vytlačila kapka tohoto roztoku o objemu 0,065 μ l. Prostřednictvím manipulátoru se potom kartuše s dutou kónickou jehlou přesunula po obloukové trajektorii do koncového bodu na povrchu podkladu ve vzdálenosti 80 mm od výchozí kapky, přičemž maximální výška hrotu duté kónické jehly nad povrchem podkladu byla 16 mm. V koncovém bodu trajektorie se na povrchu podkladu stejným způsobem, jako výchozí kapka, vytvořila koncová kapka roztoku polymeru, a vlákna stejného polymeru se vytvářela v obou fázích vratného pohybu duté kónické jehly. Po vytvoření každých 100 vláken se pak dutá kónická jehla prostřednictvím manipulátoru posunula o 0,5 mm ve směru kolmém na rovinu trajektorie, kde se vytvořila nová výchozí kapka i nová koncová kapka. Manipulátor se přitom při svém pohybu pohyboval prvních 500 ms se zrychlením, přičemž ihned po dosažení rychlosti 8 m/min se začal pohybovat se zpomalením a pohyboval se tak dalších 1500 ms.

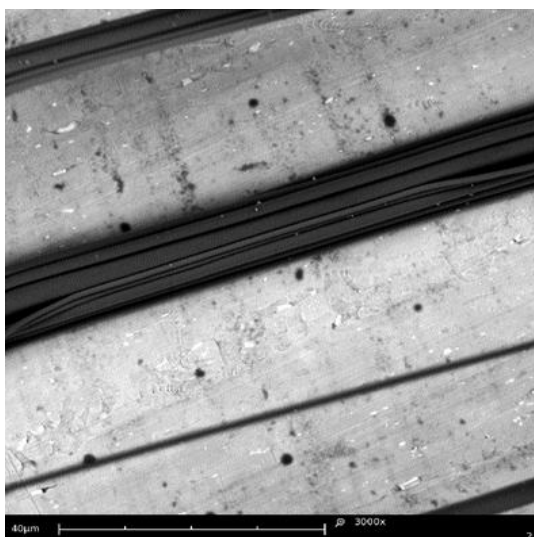
Tímto způsobem se vytvořil lineární útvar tvořený nanovlákný polykaprolaktonu, jehož snímky z řádkového elektronového mikroskopu (SEM) při zvětšení 480x, 1000x, 3000x a 5000x jsou na obr. 55 až 58.



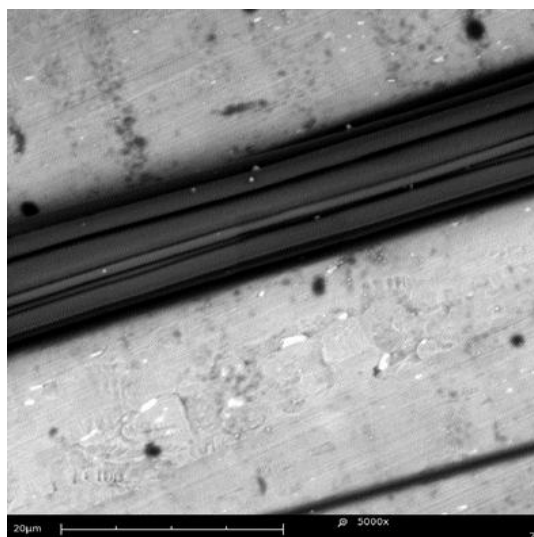
Obr. 55: PCL nanovláknna při 480x zvětšení, SEM



Obr. 56: PCL nanovláknna při 1000x zvětšení, SEM



Obr. 57: PCL nanovláknna při 3000x zvětšení, SEM

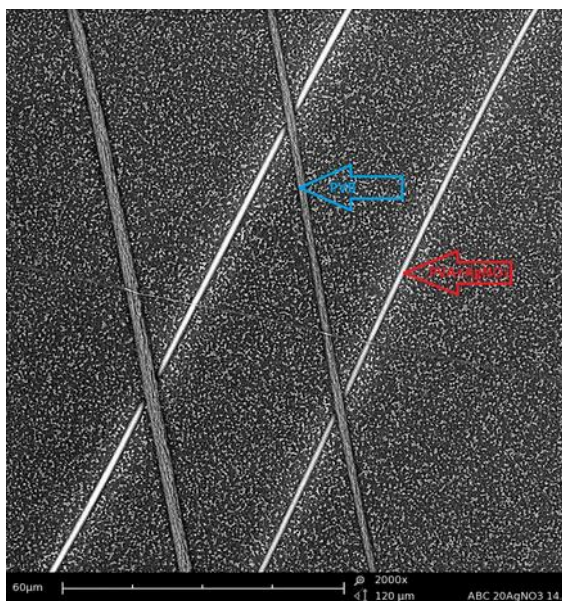


Obr. 58: PCL nanovláknna při 5000x zvětšení, SEM

Rozpuštěním polyvinylalkoholu (PVA) se střední relativní molekulovou hmotností 67000 v demineralizované vodě se vytvořil roztok s obsahem 40 % hm polyvinylalkoholu. Poté se na povrchu podkladu (papír) vytvořily dvě kapky tohoto roztoku vzdálené od sebe 100 mm. Prostřednictvím manipulátoru se do výchozí kapky ponořil podlouhlý zvlákňovací prvek tvořený kovovou trubičkou o vnějším průměru 0,4 mm, který se poté přesunul po obloukové trajektorii a ponořil se do koncové kapky roztoku. Maximální výška konce podlouhlého zvlákňovacího prvku nad povrchem podkladu přitom byla 20 mm. Tímto

způsobem se mezi výchozí kapkou roztoku a koncovou kapkou roztoku vytvořilo polymerní nanovláknko. Opakováním tohoto postupu se postupně v každé fázi pohybu zvlákňovacího prvku vytvářela další polymerní nanovláknka. Manipulátor se přitom při svém pohybu pohyboval prvních 500 ms se zrychlením, přičemž po dosažení rychlosti 9 m/min se začal pohybovat se zpomalením a pohyboval se tak dalších 1500 ms.

Po vytvoření požadovaného počtu nanovláken polyvinylalkoholu se rozpuštěním polyvinylbutyralu (PVB) o relativní molekulové hmotnosti 60000 v etanolu vytvořil roztok s obsahem 15 % hm polyvinylbutyralu. Tento roztok se zvlákňoval stejně jako roztok polyvinylalkoholu a vytvářená nanovláknka se ukládala přes nanovláknka polyvinylalkoholu, čímž se vytvořila plošná mřížka – viz obr. 59, kde světlejší vlákna jsou vlákna polyvinylalkoholu (světlého zbarvení je pro účely pozorování na SEM mikrosnímku dosaženo přidavkem tzv. kontrastní látky AgNO_3) a tmavší nanovláknka polyvinylbutyralu.



Obr. 59: Struktura nanovláken PVA a PVB s kontrastní látkou

2. STRUKTURY

Přínosem popisované technologie je tvorba ojednocených, přesně definovaných a umístěných vláken. Tyto aspekty mají logicky vyústění v tvorbě komplikovaných struktur, navržených konkrétně pro specifické aplikace. Tato část práce se zabývá popisem ověřených

útvary, které se v některých příkladech setkaly i s využitím či testováním v aplikační sféře. Popisované struktury tedy pravděpodobně nepředstavují kompletní výčet možností technologie.

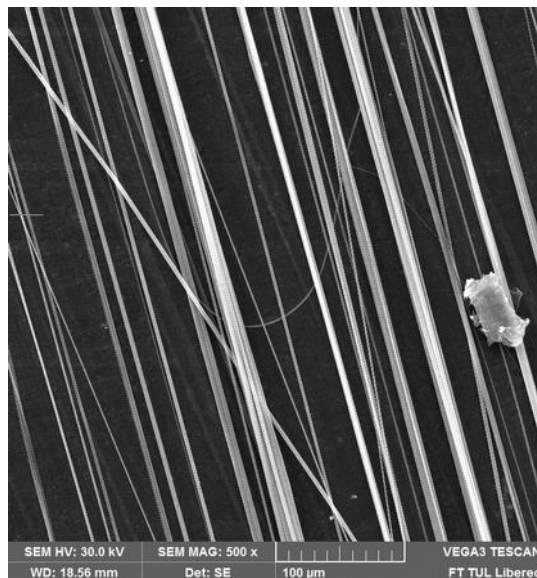
Pro další pojednání je vhodné si zopakovat, že tažení vlákna probíhá planárně v rovině X-Z, mezi dvěma kotevními body, jak je vidět na obrázku 28. Manipulátor pohybuje zvlákňovacím elementem mezi krajními kotevními body a tahá při každém pohybu vlákno.

2.1. Paralelní struktura

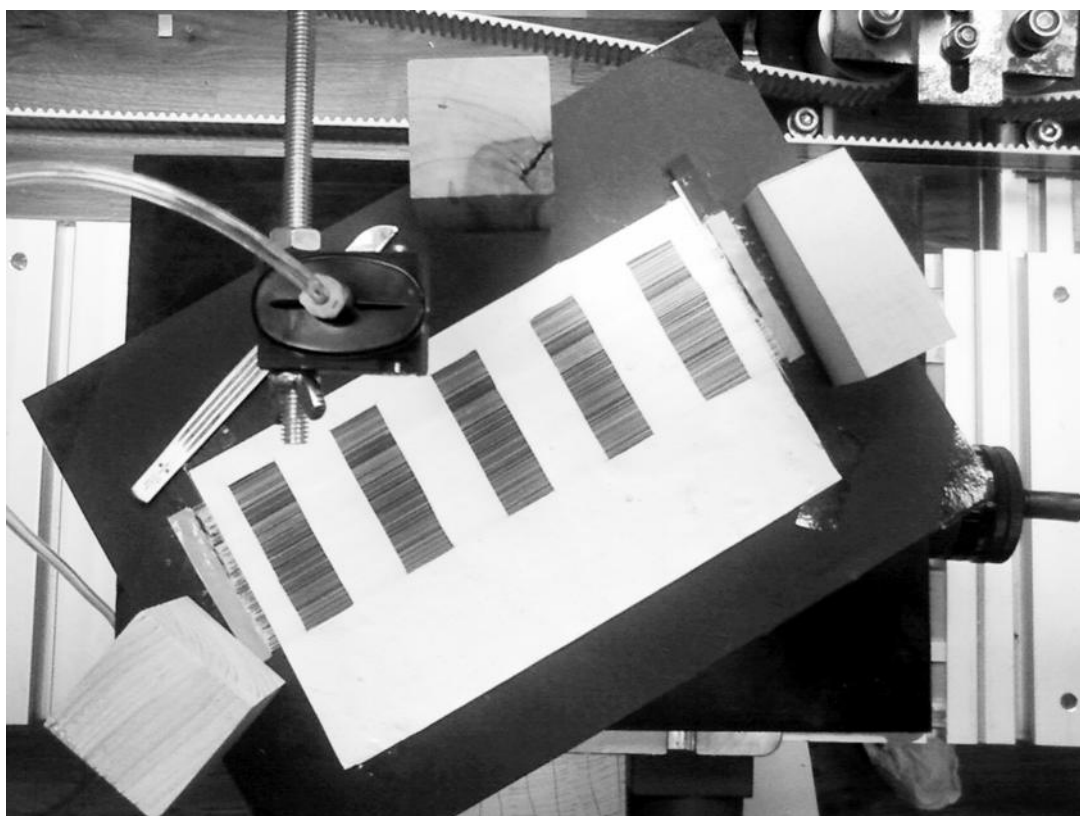
Poklad vláken vedle sebe spolu nese jistá omezení, mírně omezující návrh struktury. Předně je to materiál, tedy přesněji řečeno těkavost jeho rozpouštědla. V případě, kdy zvlákňujeme z materiálu bez problému rychlé solidifikace, je možné obě kotevní místa z roztoku nanést přímo na podložku ve formě čáry-housenky, v jejímž směru se poté posouváme. V případě nutnosti použití dávkovacího zařízení se stavební roztok uchovává bez přístupu vzduchu v kartuši a v místech úvratě pohybu je dávkován. Režim dávkování podléhá empirickým zjištěním, závislým na konkrétním stavu polymeru i podmínkách okolí. Pro rychle solidifikované polymery se doporučuje dávkování v každé úvratě, při solidifikaci menší se perioda prodlužuje. Posun se přitom provádí buď kontinuálně (pokud je stroj vybaven strojově poháněnou osou Y), nebo kvantovaně (pokud je osa Y ovládána ručně a pak je posun vykonán např. každých 50 vláken). Příklady vyrobených paralelních struktur jsou na obrázcích 60, 61 a 62.



Obr. 60: Paralelní struktura PCL vláken (600x)



Obr. 61: Paralelní struktura PCL vláken (500x)



Obr. 62: Paralelní struktura PCL vláken při výrobě scaffoldů pro in-vivo studii

V případě dávkování z pohybující se kartuše dochází k situaci, kdy se kapky v okrajových bodech překrývají. Bylo změřeno, že typické dávkované množství je kolem $0,065 \mu\text{l}$ a to při důkladném kontaktu na podkladové ploše představuje exponovaný prostor přibližně

o průměru 1 mm. Při kvantovaném posouvání v ose Y po 50 vlákních to pro případ scaffoldů (s hustotou vláken 1000 mm^{-1}) znamená třetinový překryv se sousedící kapkou. Zde velmi záleží na individuálním chování polymeru, kdy hrozí nebezpečí unesení částečně ztuhlé kotvy se zvlákňovacím elementem a tím znehodnocení celé struktury. Pokud hrozí taková situace, je vhodné v programu implementovat diagonální posun skupin vláken v rovině X-Y tak, aby se kotevní body nesetkávaly.

Produktivitu lze v případě potřeby zvýšit zvětšením počtu zvlákňovacích elementů. V případě použití dávkovacího zařízení alespoň některé mohou mít společný manipulátor, resp. pohonné ústrojí, a případně i kartuši. Pokud mají různé kartuše nebo jsou propojené s různými oddíly jedné kartuše, a/nebo pokud mají různé rozměry a/nebo tvar svého hrotu a/nebo výstupního otvoru, je možné souběžně vytvářet vlákna různých polymerů a/nebo parametrů, např. průměrů.

2.2. Křížená paralelní struktura

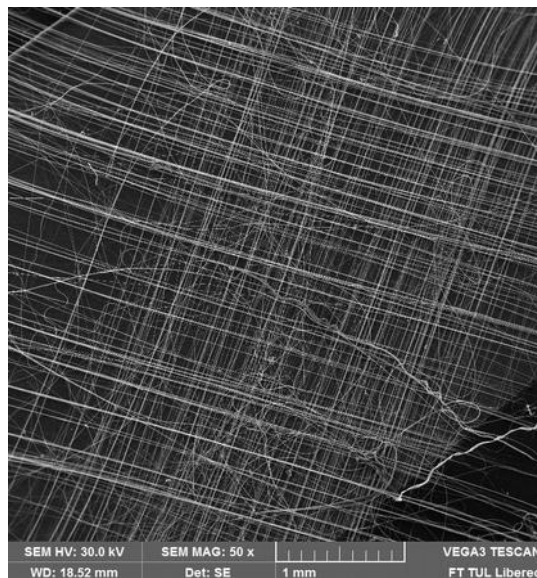
Jednoduchým natočením pracovního podkladu, kde již byla vytvořena paralelní struktura vláken, je možné vytvořit kříženou strukturu. To je možné opakovat a tak získat více směrů. Úhel je přitom libovolný a limitující je zde pouze rozsah pracovní oblasti stroje a umístění kotevních bodů, které mohou a nemusí být brány v potaz.

Křížení lze provádět i častěji a získat tak semi-propletenou strukturu, která však nepředstavuje variantu, podobnou tkané. Takové se zatím nepodařilo zrealizovat, ale v rámci rozvoje pravděpodobně budou předmětem další práce.

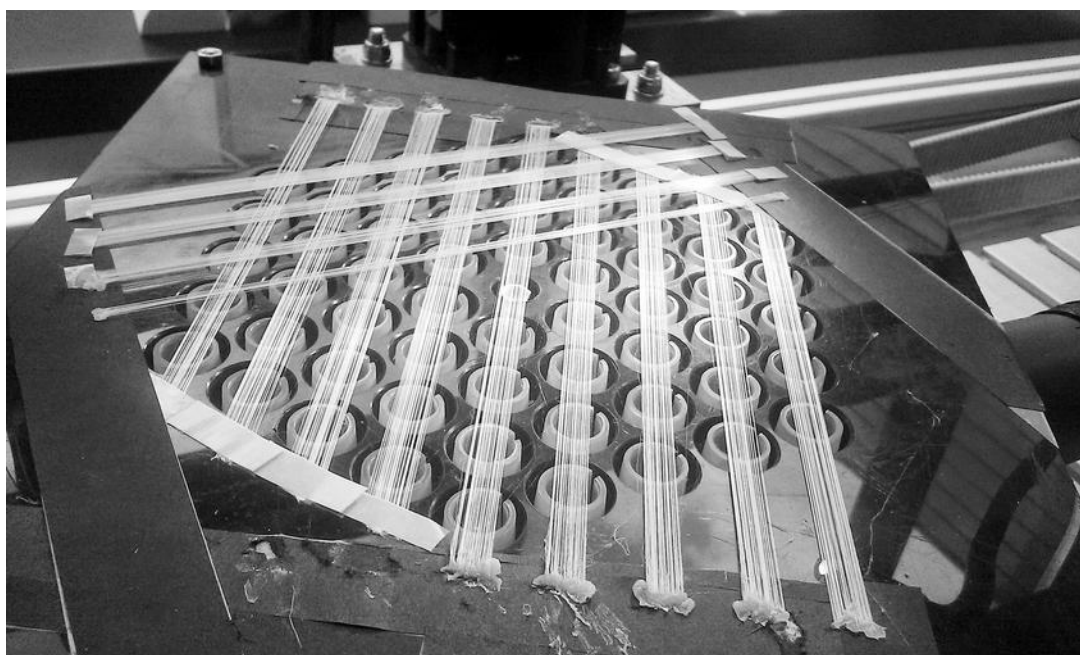
Příklady vyrobených křížených paralelních struktur jsou na obrázcích 63, 64 a 65.



Obr. 63: Třísměrná struktura PCL vláken (500x)



Obr. 64: Dvousměrná struktura PCL vláken (50x)

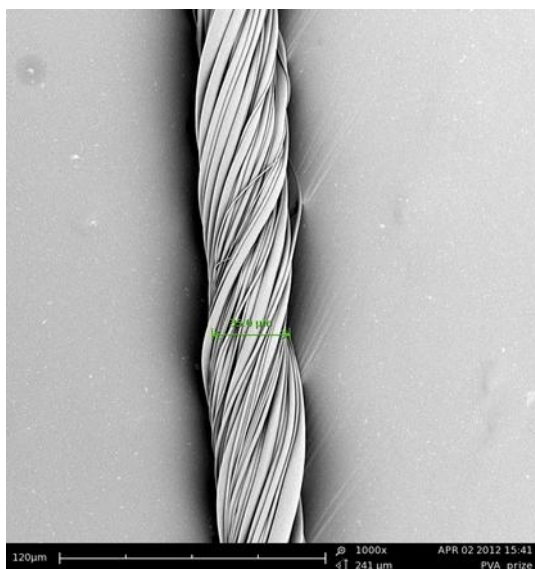


Obr. 65: Výroba vzorků třísměrně křížených vláken pro in-vitro studii. Minimálně 60 ks vzorků na jedno upnutí.

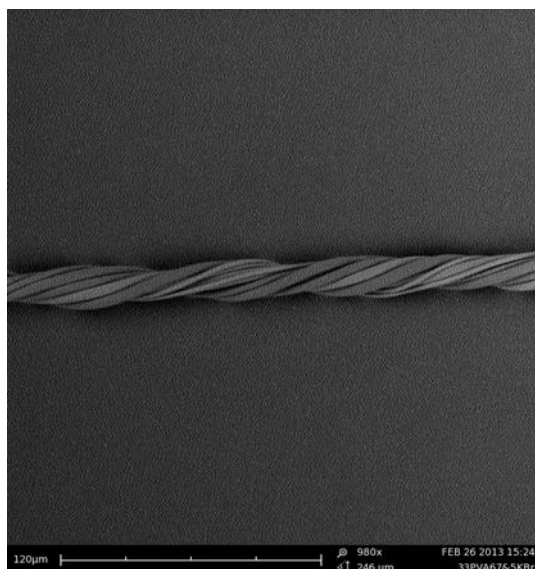
2.3. Příze

Pomocí zákrutového zařízení, popsaného v praktické části, lze vytvářet zakroucené struktury, tedy příze. Ty se připravují zakroucením již vyrobeného paralelního svazku vláken, při čemž se požadovaný úhel stoupání šroubovice vypočítá z výchozí délky svazku a počtu otáček. Příklady vyrobených přízí jsou na obrázcích 66 a 67.

Příze lze vytvářet i na paralelní jádro, či dokonce vytvářet křížené struktury přízí postupným nanášením dalších vrstev. Takový postup je vhodný zejména pro výrobu scaffoldů pro rekonstrukce nervových a šlachových tkání, které takové uspořádání typicky mají. V tom případě je však nutné řešit problematiku dodávky živin i samotných buněk to mezivlákněného prostoru.



Obr. 66: PVA nanopříze (1000x)

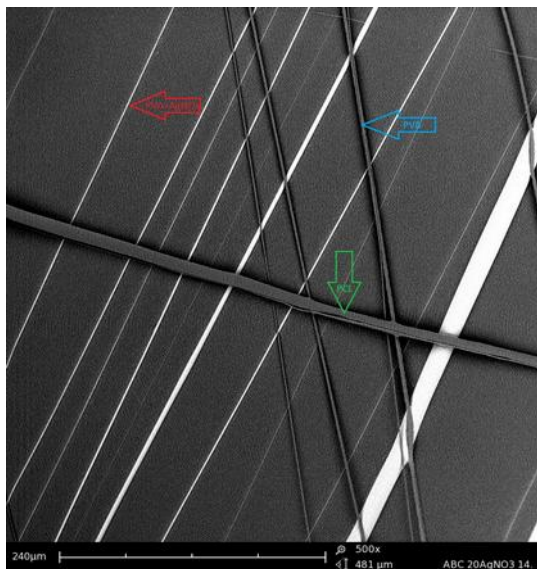


Obr. 67: PVB nanopříze (980x)

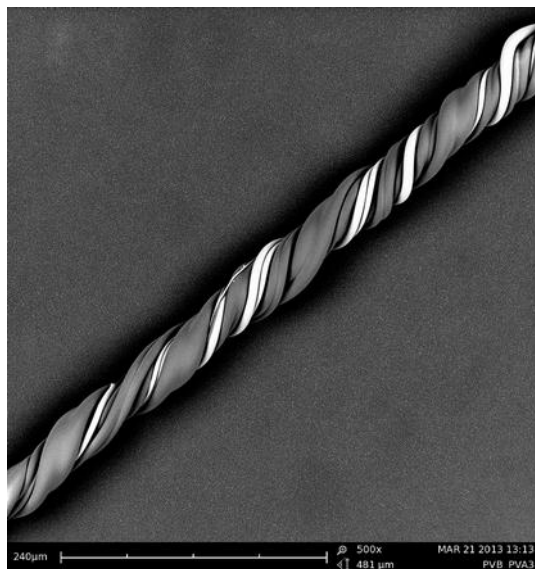
2.4. Vícekomponentní složení struktur

Ať již vytváříme jakékoliv struktury, je možné díky charakteru výroby – po jednotlivých vláknech – kombinovat různé materiály a tloušťky vláken. Zatímco rozdílné geometrické proporce vlákna jsou ovládány rychlostí pohybu a režimem dávkování polymeru, materiál již vyžaduje zcela oddělenou tvorbu. Ta je možná s pomocí další kartuše buď v součinnosti, nebo tažením překrývající se kompletních struktur jednu po druhé.

Důkaz vyrobení vícekomponentních struktur nebyl nějakou dobu možný z důvodu principu činnosti elektronového mikroskopu, kde není vidět rozdíl mezi podobnými a přesto rozdílnými materiály (používáme téměř výhradně polymery). Pro účely důkazu tedy bylo do jedné komponenty namícháno aditivum – kontrastní látka (AgNO_3), ovlivňující průchodnost elektronů při snímání na elektronovém mikroskopu. Příklady vícekomponentních struktur jsou na obrázcích 59, 68 a 69.



Obr. 68: Paralelní vícekomponentní struktura (PVA+AgNO₃, PVB, PCL), 500x



Obr. 69: Vícekomponentní mikropříze (PVA+AgNO₃, PVB), 500x

2.5. Spojování struktur

Spojování jednotlivých komponent se provádí buď chemickým lepením (s přidaným materiálem nebo naleptáním povrchu lepených komponent), nebo tepelně. Při lepení s přidaným materiálem (lepidlem) je nutné použití stejného materiálu, jako lepené komponenty. Protože je koncentrace rozpouštědel v naprosto stejném materiálu dostatečná, aby nenávratně poškodila lepené komponenty, využívá se pro lepení nižších molekulových hmotností, které pro dosažení gelové konzistence vyžadují mnohem menší množství rozpouštědla.

Lepit lze i tím, že dvě suché přiložené komponenty vystavíme působení par rozpouštědla, které naleptá povrchy a tím je spojí. Jedná se tedy spíše o chemické svařování bez přidání dalšího materiálu. Prakticky se provádí například obrácenou pipetou, ve které je umístěno malé množství rozpouštědla, jehož páry jemně dávkujeme do oblasti natažené suché struktury.

U tepelného spojování platí analogická pravidla jako u chemického.

3. SCAFFOLDY PRO TKÁŇOVÉ INŽENÝRSTVÍ

Aby byla použitelnost technologie dokázána a přitom byla nasměrována určitým směrem, využila se naskytnuvší příležitost připojení této technologie do činností v rámci grantu Pre-seed, v jehož rámci se má podporovat převádění laboratorní technologie na trh. Grant byl zaměřený na medicínské aplikace, kde postup při zavádění do praxe nezbytně vede přes určité ověřovací kroky. Je to zejména testování in-vitro („ve zkumavce“) a dále in-vivo („v živém“). Při testech se hodnotí proveditelnost, biokompatibilita a hlavně přínosnost pro řešení nějakého problému.

V medicíně mají nanovlákná své nezaměnitelné místo ve formě scaffoldů, tedy vláknových nosičů, schopných předepsat orientaci růstu stavebních buněk těla tak, aby výsledná tkáň odpovídala místu a účelu určení. Těla nejen lidská se skládají z nejrozličnějších druhů tkání, lišících se kromě v biochemické rovině také ve svém složení a mechanické struktuře. Zatímco první problematika je dobře zvládnutá, ta druhá nezbytně potřebuje mezioborové pojetí s využitím nanovláken. Na rozdíl od klasické metody elektrosvlákňování je metoda tažení schopná přesně definovat nanovláknennou strukturu a tak i přesně diktovat výslednou strukturu tkáně. Cílem této biologické studie je ověřit takovou techniku. Zatímco in-vivo studie se na připravených vzorcích provedla přímo v biologických laboratořích Katedry netkaných textilií s cílem ověření orientace a možnosti kultivace na nanovlákněch; in-vivo studie se z důvodu nutné certifikace prováděla externě v CB Bio s.r.o., Národních hrdinů 279, 190 12 Praha 9 – Dolní Počernice a již konkrétně zhodnotila výsledek v praxi. Zahrnuje i makroskopický pohled na věc ve formě mechanického hodnocení vzorků svalů použitím trhačí zkoušky.

3.1. In-vitro studie

Na sadu připravených držáků (obr. 70) byly vyrobeny tři druhy struktur (jednosměrná – str I, dvousměrná – str II, třisměrná – str III), 50 kusů od každé. Ty se pak osadily buňkami, jejichž proliferace se v pravidelných intervalech hodnotila.

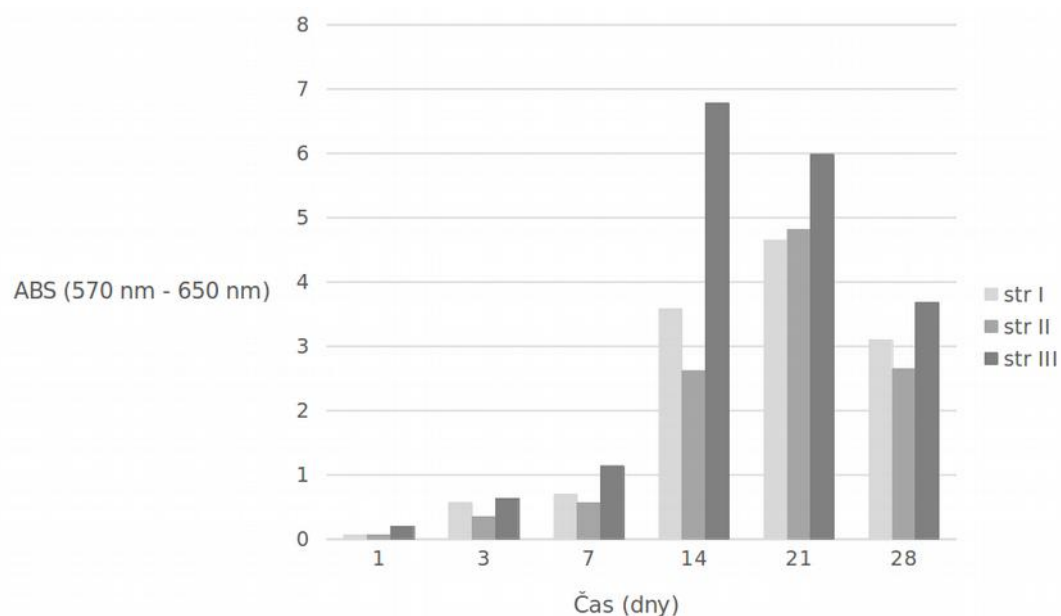


Obr. 70: Připravený vzorek pro in-vitro studii

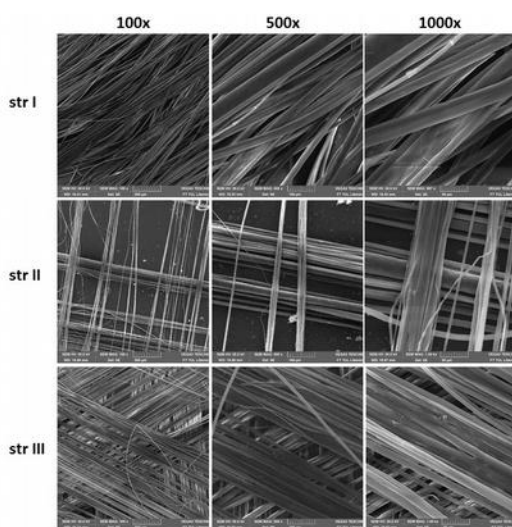
Pro výrobu scaffoldu byl použit roztok 12% hm PCL (M_w 70.000 – 90.000, Sigma-Aldrich) v chloroformu. Struktury byly hodnoceny na elektronovém mikroskopu Tescan, VEGA3 SB easyprobe s využitím programu NIS Elements. Vlákná dosahovala průměrů jednotek μm a méně. Velikost vzorků byla volena tak, aby odpovídala 24-jamkové testovací podložce a byly vyrobeny obráběním z PMMA (dodáno z Titan Multiplast). Sterilizace proběhla v 70% ethanolu po dobu 30 minut a poté byly důkladně omyty v PBS s pH 7,4.

Vzorky byly osazeny druhou pasáží 3T3 myších fibroplastů (3T3 Swiss Albino, ATCC), a dále kultivovány v roztoku DMEM s 10% obj FBS a 1% obj penicilinem / streptomycin / amphotericin B v inkubátoru (37°C, 5% CO₂). Médium bylo měněno 3x týdně.

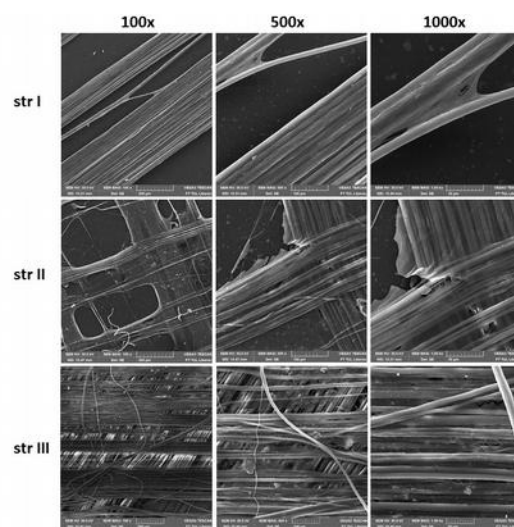
Koncentrace buněk v jednotlivých buněk byla 10^5 . Každý testovací den (1., 3., 7., 14., 21. a 28. po osazení) byla provedena mikroskopová analýza (obrázek 72 a 73), fluorescenční snímání a MTT test pro posouzení životaschopnosti a proliferace (obrázek 71).



Obr. 71: MTT test tří struktur (str I, str II, str III) chronologicky



Obr. 72: SEM snímky struktur v 1. den osazení buňkami



Obr. 73: SEM snímky struktur v 28. den osazení buňkami

3.1.1. Závěrem

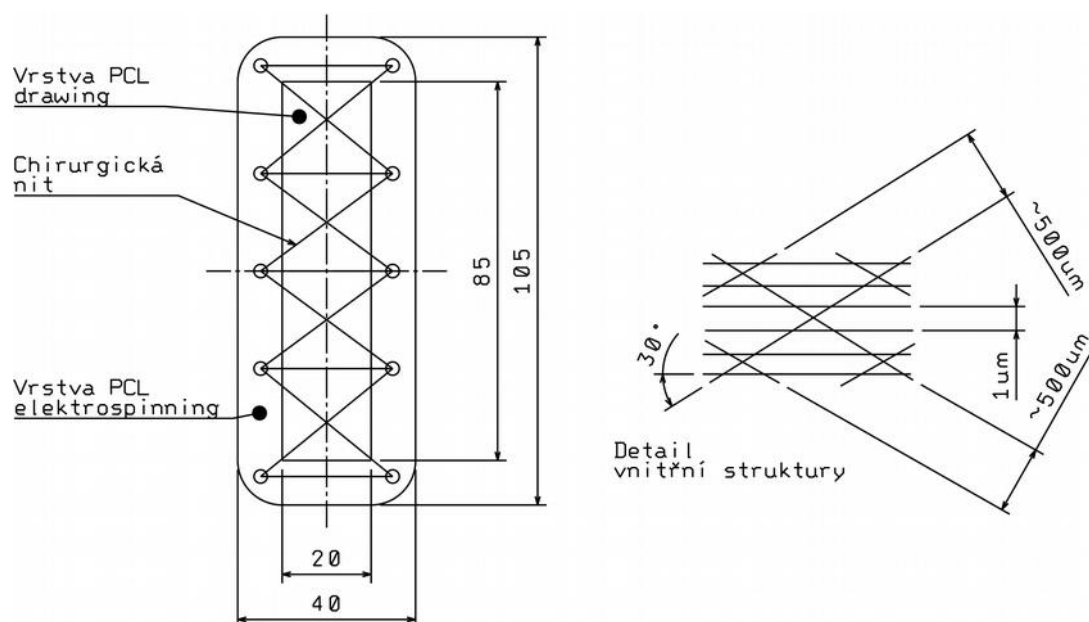
Všechny tři struktury se projevily jako schopné mechanického podporování růstu buněk. Dále analýza z elektronového a fluorescenčního mikroskopu ukázala, že se vlákna drží směru prvotní orientace, převzaté z vláken, a že se jim daří, což je zřejmé z podlouhlého vnějšího tvaru buněk. Třísměrná struktura vykazuje největší možnosti podpory růstu, což vyplývá z MTT testu. Studii provedla Mgr. Kateřina Pilařová z Katedry netkaných textilií.

3.2. In-vivo studie

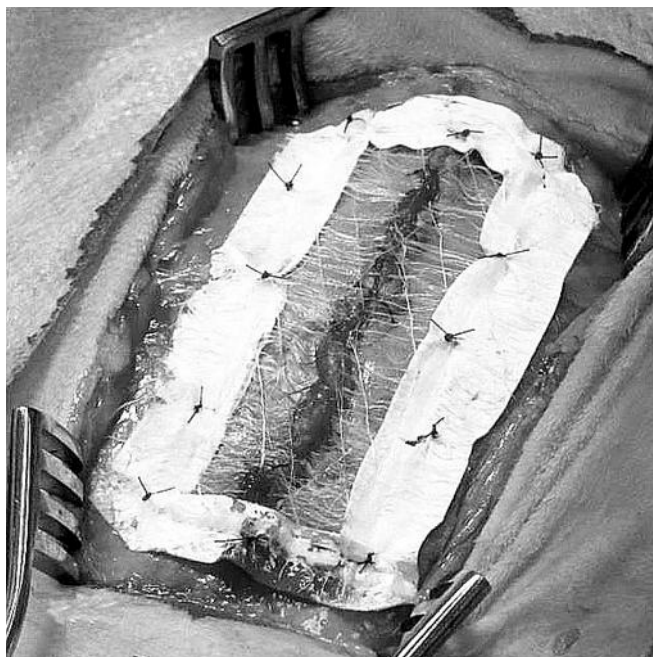
Cílem in-vivo studie bylo posoudit účinnost nové metody léčby abdominálních incizí, uplaňující kýlní síťky, tvořené jednotlivými taženými vlákny z polykaprolaktonu (PCL) a vyhodnotit případné nežádoucí účinky. Celá zpráva je přiložena k této práci.

3.2.1. Podmínky studie

Studie byla provedena na 16 králících obojího pohlaví, získaných z Velaz, s.r.o.. Ve studii byla použita jedna testovaná položka. Zvířata byla rozdělena do dvou skupin: skupina I – defekt zůstal neošetřen, skupina II – defekt byl ošetřen modifikovanou kýlní sítí. Model sítě je na obrázku 74 a stejná síťka po její aplikaci na obrázku 75. Skupiny I a II byly vyhodnoceny 42 dní po zákroku.



Obr. 74: Výkres použité kýlní sítě



Obr. 75: Kýlní síťka aplikovaná na ránu

Všechna zvířata přežila do termínu plánované euthanasie, která byla provedena 40 dní po operaci. Zvířata všech skupin byla v průběhu studie v dobrém zdravotním stavu. U všech byl pooperační stav dobrý, hojení proběhlo bez sekundárních komplikací a bez vlivu na jejich denní aktivity (pohyb, příjem vody a potravy, vylučování).

Studie byla navržena a provedena podle základních postupů a metodik ISO 10993-6:1994, Biologické hodnocení zdravotnických zařízení – Část 6: Zkoušky lokálních účinků po implantaci. Péče o zvířata byla v souladu se SOP CB Bio, s.r.o., Evropskými konvencemi o ochraně obratlovců používaných pro pokusné a jiné vědecké účely (ETS 123), zákonem ČR č. 246/1992 Sb. na ochranu zvířat proti týrání, ve znění pozdějších předpisů a vyhlášky č. 419/2012 Ministerstva zemědělství České republiky o ochraně, chovu a využití pokusných zvířat. Ústav experimentální medicíny AV ČR, v.v.i. je držitelem Oprávnění k používání pokusných zvířat podle § 15a odst. 2 zákona č. 246/1992 Sb., na ochranu zvířat proti týrání, ve znění pozdějších předpisů. Studie byla zpracována pro tento typ experimentu a schválena rezortní komisí Akademie věd, v. v. i. České republiky. Počet zvířat vybraných k použití v této studii byl považován za minimální počet, nezbytný k ověření vědecké hypotézy.

3.2.2. Hodnocení vzorků

Žádné klinické změny související s léčbou nebyly zaznamenány. Tělesná hmotnost se během doby studie postupně zvyšovala u obou skupin, tento postupný nárůst odpovídal věku zvířat.

Mezi skupinami nebyly sledovány výrazné rozdíly v přírůstku hmotností. Nebyl zjištěn žádný negativní vliv kýlní sítě tvořené jednotlivými taženými vlákny z polykaprolaktonu (PCL) na hodnoty tělesné hmotnosti těchto zvířat (viz. tabulka 7).

Č. zvířete	Operace [kg]	Odběr vzorků [kg]
Kontrolní defekt		
1	3,1	3,7
2	3	3,7
4	3	4,1
5	2,5	3,5
7	2,9	3,8
9	2,9	3,7
15	3,5	3,6
18	2,8	4
Kýlní síťka		
6	3,1	3,9
8	2,4	3,8
10	2,4	3,6
11	3,5	4,5
12	2,9	4
13	3,1	4,2
14	2,5	4,1
16	3,1	3,8
17	2,5	3,9

Tab. 7: Tělesná hmotnost hostitelů (kg)

Následně byla v místě implantace opatrně odpreparována kůže. U kontrolní skupiny byly vzorky odebrány s odstupem cca 3 – 4 cm od jizvy, včetně zdravé tkáně (obr. 3 A). U experimentální skupiny byly vzorky odebrány s odstupem cca 2 – 3 cm od kraje implantované sítě, včetně zdravé tkáně (obr. 3 B). Část odebraného vzorku byla umístěna do vychlazeného 0,9 % NaCl pro biomechanické měření.

Druhá část byla vložena do plastových nádob s 10 % roztokem pufovaného formalínu. Poměr formalínu k odebrané tkáni byl minimálně 10:1. Vzorky pro histologické zpracování byly odeslány do Ústavu histologie a embryologie Lékařské fakulty v Plzni, Karlovarská 48,

301 66 Plzeň. Vzorky pro biomechaniku byly odeslány na Katedru anatomie a biomechaniky Fakulty tělesné výchovy a sportu Univerzity Karlovy, José Martího 31, 162 52 Praha 6 – Veleslavín. Nádoby pro vzorky byly označeny názvem nebo kódem testované látky, číslem zvířete a datem odběru.

Operace laboratorních králíků, s vytvořením abdominální incise a následnou implantací kýlní sítě tvořené jednotlivými taženými vlákny z polykaprolaktonu (PCL) byla velmi dobře tolerována, bez jakýchkoliv komplikací během období hojení.

Makroskopické hodnocení ošetřených a kontrolních defektů neprokázalo negativní vliv použitých implantátů kýlní sítě tvořené jednotlivými taženými vlákny z polykaprolaktonu (PCL) na okolní tkáň. Průběh hojení abdominálních incisí ošetřených kýlní sítí tvořenou jednotlivými taženými vlákny z polykaprolaktonu (PCL) byl srovnatelný s průběhem hojení kontrolní skupiny (defekt ponechaný bez léčby).

Pro detailní zkoumání mikroskopických změn je doporučeno provést histologické vyšetření odebraných vzorků.

3.2.3. Biomechanické hodnocení odebraných vzorků

Naměřená data byla zpracována a postupně byly vypočítány hodnoty σ_k , σ_{MAX} a E . Jako doplňkové parametry byly stanoveny i hodnoty poměrného prodloužení příslušející sledovaným napětím.

Ze sad naměřených dat byla odstraněna data, která byla ovlivněna klouzáním vzorku v čelistech apod. U první skupiny byla vyňata data vzorků 1 a 2. U druhé skupiny pak byla vyňata data vzorků 12, 14 a 16. Následně byla vypočtena průměrná hodnota sledovaných parametrů, a stejně tak i směrodatná odchylka. V tabulce 8 jsou pak vypsány hodnoty těchto parametrů.

Skupina	Kontrolní defekt	Kýlní síťka
σ_k [MPa]	0,673385545	0,600937063
σ_{MAX} [MPa]	0,662425241	0,859413129
E [MPa]	1,441662068	2,539048456

Tab. 8: Hodnoty naměřených biomechanických parametrů

Z biomechanického pohledu se ukazuje, že experimentální skupina (s implantovanou kýlní sítí) vykazuje vyšší hodnoty všech parametrů vzhledem ke kontrolní skupině.

Nejvýznamnější je tento rozdíl u parametru modulu pružnosti v tahu E , kde dochází k dvoutřetinovému nárůstu hodnoty tohoto parametru. Hodnota tohoto parametru určuje tuhost tkáně. Ukazuje se tedy, že skupina, u níž se použilo kýlních sítěk k léčbě kýly, je tužší a odolává lépe zatížení v tahu oproti kontrolní skupině.

U ostatních parametrů (meze kluzu a maximálního napětí v tahu) lze sledovat také jistý nárůst, nicméně není (vzhledem k směrodatné odchylce) tak výrazný.

Vzhledem k zjištěným rozdílům by bylo vhodné navýšit počet vzorků v jednotlivých skupinách, což by napomohlo k detailnější statistické analýze. V neposlední řadě by pak bylo vhodné zařadit další kontrolní skupinu, která by se skládala ze zdravých zvířat, bez jakéhokoliv zásahu. Finálně by bylo vhodné se zaměřit i na průzkum změny viskózního chování jednotlivých skupin vzhledem ke kontrolní skupině.

VI. Příprava komercializace

V době, kdy byla technologie prakticky odzkoušena a její koncept tak ověřený, započala příprava komercializace, která byla umožněna díky projektu Pre-seed operačního programu VaVpl s názvem Nanovláknenné materiály pro tkáňové inženýrství. Projekt byl určen pro komercializaci výsledků výzkumných organizací a ochrana jejich duševního vlastnictví.

Tým odborníků Katedry netkaných textilií a nanovláknenných materiálů na vývoji materiálů pro tkáňové inženýrství pracuje již od roku 2005. Intenzivní spolupráci v této oblasti katedra navázala s Ústavem experimentální medicíny a s 2. lékařskou fakultou UK. Významných výsledků dosáhl vědecký tým např. při vývoji umělé chrupavek, kde se využívá biodegradabilních nosičů na bázi netkaných nanovláken v kombinaci s liposomy a jejich následného osídlení buňkami chrupavek. Projekt je orientovaný do oblasti molekulární biologie a biotechnologie, a sleduje možnosti zavádění nadějných technologií a vynálezů s vysokým aplikačním potenciálem, které jsou v současné době na TUL k dispozici.

Přínosem projektu je nejen finanční podpora výzkumné práce, ale i vytvoření kapacit pro transfer technologií do průmyslu a využití příjmů z komerční činnosti pro další rozvoj aktivit. Disponoval pracovníky s funkcí „scout“, jejichž poslání bylo aktivně obchodně zastupovat projektový tým a jeho výsledky před zástupci průmyslu, a zajistit spolupráci, či přímo prodej licencí.

Vlastní projekt byl tvořen šesti dílčími aktivitami, které byly řešeny v relativní autonomii, přičemž se předpokládá, že vytvořený projektový realizační tým bude v součinnosti se strukturami TUL napomáhat v koncipování soustředěných komercializačních aktivit a prvků transferu technologií. Jedna z dílčích aktivit je určena pro rozvoj metody mechanického tažení s názvem „Technologie tažení individuálních nano/mikrovláken pro tvorbu tkáňových nosičů s předem definovanou strukturou“.

V rámci činnosti na aktivitě byly naplánovány následující body:

- Optimalizace mikromanipulátoru
- Vytvoření technické dokumentace stroje
- Technologické postupy pro přípravu různých zvláknovacích roztoků
- Výroba vláknových nosičů (scaffoldů) a jejich in-vitro a in-vivo testy
- Dokončená patentová přihláška

- Příprava licenčních smluv na využití pro výrobu biomedicínských materiálů a sond
- Účast na veletrzích a výstavách, prezentace výsledků v odborných časopisech
- Prezentace v komerčně dostupných médiích

Po skončení roční práce byla činnost úspěšně evaluována a uzavřena. Během roku se s pomocí pracovního týmu podařilo otestovat pěstování buněk na nanovláknenných nosičích v laboratorních podmínkách „in-vitro“. Dále proběhly úspěšné testy in-vivo se spoluprací s Ústavem experimentální medicíny a s 2. lékařskou fakultou UK, kdy se upravené nanovláknenné nosiče ve formě kýlních sítěk aplikovaly na čerstvé rány. Výsledky „in-vivo“ testů byly úspěšné a bez negativních druhotných efektů na vzorky. Nyní se čeká na histologii, která je pro plnohodnotné objektivní posouzení experimentu nutná, avšak ještě nedošlo k uvolnění finančních prostředků.

Projekt byl úspěšný ve smyslu realizace druhé generace mikromanipulátoru, která byla zhotovena na dostatečně vysoké úrovni pro reprezentaci technologie na trhu, tedy mimo laboratoř. Stroj je provázen technickým listem svým i roztoků, včetně bezpečnostních předpisů dle nařízení EU. Technické listy jsou součástí přílohy této práce.

1. PATENTOVÉ ŘÍZENÍ

V rámci prací na technologii mechanického zvlákňování vyvstala potřeba chránit duševní vlastnictví vyzkoumaných skutečností a metod. V rámci projektu Pre-seed byla patentová přihláška naplánována a díky tomu na ní byly uvolněny finanční prostředky a ve spolupráci s patentovou kanceláří Ing. Musil Dobroslav realizována pod názvem „Způsob výroby polymerních vláken o průměru 100 nm až 10 μ m, a způsob výroby lineárního, plošného nebo prostorového útvaru obsahujícího tato polymerní vlákna“ (PV 2014-920).

Byla provedena rešerše současných světových patentových nároků bez teritoriálních a časových omezení, a to na databázi Esp@cenet k datu 19.2.2013. Rešerši provedla patentová kancelář. Výsledkem patentové rešerše byly čtyři potenciálně kolidující patenty, pro které byly provedeny následující rozklady.

US 2012043300

Popisuje způsob a zařízení pro výrobu nanodrátků galia, přičemž do vrstvy galia se máčí skupina trnů, které poté tyto nanodrátky „vytahují“. Popsána je i konstrukce zařízení.

US2012/0043300 sleduje vzhledem k projednávané přihlášce jiný cíl a řeší jej jinými prostředky. Od předkládaného vynálezu se odlišuje především tím, že se týká pouze nanovláken ze slitin kovů (Ag_2Ga), které vytváří metodou samo-organizace.

Dlouhíci element je v namítaném spisu stříbrný a je vyroben pomocí standardní optické litografie na křemíkové podložce a má tvar kuželu. Jiný dlouhíci element by patrně pro technologii tvorby Ag_2Ga drátku metodou samo-organizace podle namítaného spisu nemohl být použit.

Zařízení podle namítaného spisu umožňuje růst kovových nanostruktur pomocí samoorganizace, tedy na základě mezimolekulárních sil, které preferují růst (nikoliv tažení) drátku ze slitiny GA a Ag ve směru osy drátku. Náš vynález je založen na mechanickém dloužení polymerních nanovláken z polymerních roztoků nebo tavenin.

US 2010047568

Popisuje způsob vytváření nanodrátků obsahujících uhlíkové nanotrubic (CNT). Do roztoku obsahujícího CNT se ponořuje kovový hrot a „vytahuje“ vlákno, které obsahuje zakomponované CNT. Popsána je i jednoduchá konstrukce zařízení.

US2010/047568 se odlišuje od projednávané přihlášky tím, že se soustředí pouze na výrobu vláken (nikoliv nanovláken), obsahujících vysokou koncentraci CNT (karbonových nanotubic) v polymerní matici. Namítaný spis se svými nároky soustředí pouze na karbonové nanotrubic, potažené polymerem. Dlouhíci rychlost jejich zařízení dosahuje řádově jenom jednotek mm/min.

Typicky dosahované průměry vláken jsou značně větší, než polymerní nanovláknata vytvořená dle našeho vynálezu. V namítaném spise jsou uváděny průměry jimi vyrobených mikrovláken řádově v jednotkách až desítkách mikrometrů.

Popsaná metoda v namítaném spise neumožňuje umístit vyrobenou strukturu na předepsané místo v trojrozměrném prostoru, protože se dlouhíci element pohybuje pouze po vertikální přímce a musí se vracet do kádinky/zásobníku disperze uhlíkových nanotubic v polymerním roztoku.

JP 2011084841

dostupný pouze anglický abstrakt – popisuje zvlákňování prostřednictvím elektricky nabitě trysky, která se pohybuje vratně. Výsledkem má být vrstva nanovláken.

JP2011/084841 se odlišuje od našeho vynálezu tím, že výsledkem procesu je nanovláknenný film, který neumožňuje dále manipulovat s ojednocenými nanovláknny. Namítaný spis pojednává o variantě typického elektrostatického zvlákňování.

JP 2004223693

dostupný pouze anglický abstrakt – popisuje „tažení“ kovového nanodrátku, při kterém se využívá elektricky nabitý hrot.

JP2004/223693 se odlišuje od našeho vynálezu stejně jako je tomu u US2012/0043300, protože se jedná o jiný mechanismus tvorby nanonodrátku. I zde je aplikována metoda samoorganizace kovového materiálu. Navíc zařízení v namítaném spise vyžaduje pro tvorbu kovových nanovláken aplikaci externího elektrického pole.

VII. Závěr

Byla provedena rešerše hlavních metod a principů (problematika servopohonů a zvlákňování), jež provázají téma práce. Teoretický podklad pomohl při řešení jednotlivých problémů, jako jsou chyby v interpolaci os či úprava materiálových receptur.

Praktická část disertační práce pojednává o samotném vývoji laboratorního vybavení a postupů umožňující reálnou výrobu ojednocených nanovláken. Na základě požadavků Katedry netkaných textilií byl sestaven stroj, zvaný Mikromanipulátor, umožňující pokračování ve výzkumné činnosti týmu, který do té doby připravil recepturu pro materiál (PVA), schopný tvorby nanovláken při ručním tažení. Při množství parametrů a jevů ovlivňujících výsledek, bylo dalším logickým krokem stavba stroje, který by zpočátku plnil funkci zajištění opakovatelné přesnosti tažení.

Realizace prvního prototypu bylo započato s požadavkem na dostatečný stupeň univerzálnosti a přesnosti, což definuje úkoly při jeho vývoji. Konstrukce musela být dostatečně variabilní a schopná přidružení podpůrných modulů pro samotné zvlákňování. Zpracovávané metody nebyly dříve dostatečně probádány vědeckou veřejností a podbízí k vývoji velmi netradičních řešení. Proto nebylo na začátku možné s jistotou určit veškeré nároky, jež bude stroj nucen splnit. Součástí zařízení bylo také univerzální softwarové rozhraní pro definici průběhu tažení, a to takové, aby jej mohla používat i poučená obsluha. Realizace tohoto základu byla po roce úspěšně dokončena.

V dalším roce se stroj zdokonaloval, zejména v programové a bezpečnostní části. Byl doladěn program pro výrobu PVA vlákna, doplněny koncové spínače a stop tlačítko. Ladění vyvrcholilo na Mezinárodním strojírenském veletrhu v Brně, kde se Mikromanipulátor stal předním exponátem Fakulty strojní. Byl také vyvinut postup, jak detekovat přetržení vlákna během výroby a tak zvýšit spolehlivost. Dalšími kroky byl vývoj zařízení, detekující přetrhy a nesrovnalosti v technologickém procesu a zařízení, schopné poskytnout řídicímu systému dostatečné informace o stavu vzorku. Takový detektor byl dokončen jen v návrhové části a jeho software jádro s algoritmy pro obrazovou analýzu.

Následně byl vysoutěžen grant SGS 28001 s rozpočtem 330 tis. Kč, mající za cíl doplnění stroje o automatizovaný zákrutový modul schopný výroby multikomponentních nanopřízí s precizně definovanou strukturou. Projekt byl naplněn a zároveň se technologie předvedla na několika mezinárodních konferencích (Německo, Polsko, Japonsko, ČR) a před četnými delegacemi přímo v laboratoři. V rámci grantu se navíc stroj zakrytoval a zvýšila se tak bezpečnost obsluhy. O technologii se začala zajímat ruská vládní organizace RUSNANO,

australská obchodní komora a řada pracovišť experimentální medicíny. V rámci diplomových prací studentů byla provedená analýza tvorby PVA vláken a otestována proveditelnost výroby nanovláknenných nosičů pro tkáňové inženýrství.

Nejbouřlivější rozvoj technologie přinesl rok čtvrtý, kdy se tažení ojednocených nanovláken začlenilo do projektu Fakulty textilní – Pre-Seed s rozpočtem 4,5 mil. Kč, určených především pro rozvoj a komercializaci této technologie. V rámci projektu byly provedeny úspěšné in-vitro testy pěstování umělých tkání na nanovláknenných nosičích, následované úspěšným i testy in-vivo na živých hostitelích, kde se hodnotí použití nanovláknenných sítěk při léčbě následků operace kýly ve spolupráci s Ústavem experimentální medicíny. Tato studie byla prakticky završením celého vývoje této metody výroby nanovláken, neboť nejen ukázala možné využití jejích unikátních produktů v aplikační sféře, ale také přínos objektivně posoudila a kvantifikovala. Použití takto vyrobené nanovláknenné kýlní sítěky zdvojnásobilo pevnost svalu po jeho pooperačním léčení než při léčbě klasickým způsobem. Předpoklady se tak projeví jako správné.

Dále bylo provedeno ošetření duševního vlastnictví podáním patentové přihlášky pro provádění způsobu (PV 2014-920). Největším přínos však z mého zainteresovaného pohledu vidím v dofinancování realizace druhé generace Mikromanipulátoru, který je řešením mnoha nedostatků první generace a rapidně zvyšuje produktivitu výroby.

Téma práce je po prostudování dostupných odborných článků natolik unikátní, že na realizační tým klade nemalou zodpovědnost. De facto nastiňuje zatím zcela nevyužitou cestu k produkci nanovláken a tím i definuje nový podobor rodiny nanotechnologií.

1. DOPORUČENÍ DALŠÍHO POSTUPU

V průběhu prací na metodě se naskytlo několik situací, které by se daly řešit využitím technologické komory. Ta by uzavírala proces tažení, oddělovala jej od mechanismu stroje a dovolovala by díky jejím omezeným rozměrům udržování a řízení složení vnitřní atmosféry. Teplotou, vzdušnou vlhkostí a zejména koncentrací par rouzpouštědla regulovat proces tuhnutí vlákna a tím i jeho kvality. Model tvorby vláken by se tím rozšířil o další parametry. Na realizaci takového zařízení bohužel nebyl prostor. Problémy, jejichž řešením by byla taková komora se řešily jinou cestou (například dávkovací kartuší a úpravou složení stavebního polymeru).

Dalším problémem při tvorbě složitých vláknenných nosičů pro tkáňové inženýrství je jejich nutná následná sterilizace a povrchové osazení buňkami. Takto osazené buňky mají přitom problém s prorostením do mezivláknenných prostor a jejich populace je pak nehomogenní. To by vyřešila výroba ve sterilních podmínkách s tvořením struktury již s buňkami. V takovém případě již téměř lze mluvit o 3D tisku tkáňových polotovarů.

Pro další zvyšování produktivity doporučuji využít přeurčených kinematických řetězců, umožňující mnohonásobně zrychlit pohyb zvlákňovacího elementu. Podobné řešení nabízí ve formě průmyslových manipulátorů například firma FANUC.

Pro vytvoření vhodné materiálové struktury vlákna je výhodné, pokud se vytvářené vlákno stimuluje elektrickým proudem, kdy se na zvlákňovací prvek a na elektricky vodivý podklad přivádí vysoké stejnosměrné napětí libovolné polarity. Přitom dochází k ovlivnění konformace makromelukul polymeru, a vytvářené vlákno díky tomu dosahuje výrazně lepší geometrické i mechanické vlastnosti. Tento jev je obecně znám, avšak nebyl v rámci této práce podrobněji zkoumán. Jeho potenciál je vysoký, stejně jako náročnost technické realizace. Proto doporučuji jeho prozkoumání v oddělené práci.

Posledním, zato revolučním, postupem by mohlo být zvlákňování tryskové, s použitím kinetiky projektilu ať již tuhého, nebo kapalného. Takový projektil by byl uveden do pohybu tlakem vzduchu, mechanicky nebo elektrickým, či elektromagnetickým polem. Taková metoda však představuje velký prostor pro bádání a jistě by byla dostatečná pro další disertační práci.

Použitá literatura a zdroje

- [1] FEYNMANN, R. P. *There's plenty of room at the bottom*. In: Eng. Sci. 23, 1960.
- [2] BHUSHAN, B., aj. Springer Handbook of Nanotechnology. In: *Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York*, 2003. ISBN: 3-540-01218-4.
- [3] NAFIGATE nanobres gateway [online]
<http://www.nafigate.com/cs/section/portal/app/portal-article/detail/69818-o-nanovlakn>
ech
- [4] COOLEY, F. J., aj. *Apparatus for electrically dispersing fluids* [patent]. US692631, 1902.
- [5] HORAISOVÁ, J. Nanovlákná vytvořená metodou tažení pomocí zařízení mikromanipulátor [Diplomová práce]. In: TUL, 2013.
- [6] RŮŽIČKOVÁ, J. Elektrostatické zvlákňování nanovláken. In: *TUL*, 2004. ISBN: 80-7083-867-1.
- [7] ONDARÇUHU, T., JOACHIM, C. *Drawing a single nanofibre over hundreds of microns*. In: European Physical Society, 1998.
- [8] NAIN, A. S., AMON, C., SITTI, M. *Polymer Micro/Nanofiber Fabrication using Micro/Nanopipettes*. In: 5th IEEE Conference on Nanotechnology, 2005.
- [9] MCALPINE, M. C., FRIEDMAN, R. S., JIN, S., LIN, K., WANG, W. U., LIEBER, C. M. *High- Performance Nanowire Electronics and Photonics on Glass and Plastic Substrates*. In: NanoLetters, 2003.
- [10] WANG, X., DREW, C., SOO-HYOUNG, L., SENEAL, K. J., KUMAR, J., SAMUELSON, L. A. *Electrospun Nanofibrous Membranes for Highly Sensitive Optical Sensors*. In: Nano Letters, 2002.
- [11] FUXING, G, LEI, Z., XUEFENG, Y., LIMIN, T. *Polymer Single Nano-wire Optical Sensors*. In: Nano Letters, 2008.
- [12] QING, Y., XIAOSHUN, J., FUXING, G., ZHE, M., JIANGYANG, Z., LIMIN, T. *Polymer Micro or Nanofibers for Optical Device Applications*. In: Journal of Applied Polymer Science, 2008.
- [13] NAIN, A. S., AMON, C., SITTI, M. *Proximal Probes based Nanorobotic Drawing of Polymer Micro/Nanofibers*. In: IEEE Transactions on Nanotechnology, 2006.

- [14] MATTA, E., TYTUS, R. P. *Liquid stretching using a falling cylinder*. In: Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics Vol. 35, 1990.
- [15] ANNA, S. L., MCKINLEY, G. H. *Elasto-capillary thinning and breakup of model elastic liquids*. In: Journal of Rheology, 2001.
- [16] LUKAS, D., PAN, N., SARKAR, A., WENG, M., CHALOUPEK, J., KOSTAKOVA, E., OCHERETNA, L., MIKES, P., POCIUTE, M., AMLER, E. *Auto-model based computer simulation of Plateau-Rayleigh instability of mixtures of immiscible liquids*. In: Physica A, 2010.
- [17] BAJÁKOVÁ, J., CHALOUPEK, J., LUKÁŠ, D., LACARIN, M. *The production of yarns from individual PVA nanofibers*. In: 18th International Conference Strutex, 2011.
- [18] HARNETT, C. *Nanotechnology in environmental sensors*. In: Instrumentation & Measurement Magazine, IEEE, Vol. 13, 2010.
- [19] LIN-XIANG, H., SIE-CHIN, T. *Electrical conductivity of polyvinylidene fluoride nanocomposites filled with carbon nanotubes and nanofibers*. In: Nanoelectronics Conference (INEC), 2010.
- [20] ZIABICKY, A. Fundamentals of Fibre Formation. In: *Wiley-Interscience Publication*, 1976. ISBN: 0471982202.
- [21] DANIELS, C. A. Polymers: Structure and Properties. In: *CRC Press*, 1989. ISBN: 0877625522, 9780877625520.
- [22] RÖDIGER, W. *Prüfung des Fadenziehvermögens als technische Untersuchungsmethode in der Bitumenindustrie*. In: Colloid & polymer science: official journal of the Kolloid-Gesellschaft Vol. 65, 1933.
- [23] GOTOH, R., AIDA, H. *Brittle fracture and spinnability of viscous materials*. In: Rheologica Acta, 1961.
- [24] PLATEAU, J. Experimental and Theoretical Statics of Liquids Subject to Molecular Forces Only. In: *GAUTHIER-VILLARS, TRÜBNER and Co.*, 1873.
- [25] RAYLEIGH, L. *On the Instability of Jets*. In: Proc. London Math. Soc., 1878.
- [26] BRESLOUER, O. *Rayleigh-Plateau Instability: Falling Jet*. In: Princeton University, 2010.
- [27] WEBER, C. *Zum Zerfall eines Flüssigkeitsstrahles*. In: Z. angew. Math. Mech., 1931.
- [28] TOMOTIKA, S. *On the Instability of a Cylindrical Thread of a Viscous Liquid Surrounded by Another Viscous Fluid*. In: Proceedings of the Royal Society (London), 1935.

- [29] MCKINLEY, G. H., SRIDHAR, T. *Filament-stretching rheometry of complex fluids*. In: Annual Review of Fluid Mechanics Vol. 34.
- [30] YAO, M., SPIEGELBERG, S. H., MCKINLEY, G. H. *Fluid dynamics of weakly strain-hardening fluids in filament stretching devices*. In: Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics Vol. 89, 2000.
- [31] KASSE, S. *Studies on melt spinning. On the stability of melt spinning*. In: Journal of Applied Polymer Science, Vol. 18, 1974.
- [32] PEARSON, J. R. A., Shah, Y. T. *On the Stability of Isothermal and Nonisothermal Fiber Spinning of Power-Law Fluids*. In: Ind. Eng. Chem. Fundamen., 1974.
- [33] TAN, K. K., PUTRA, A. S. Drives and Control for Industrial Automation. In: *Springer Science & Business Media*, 2010. ISBN: 1848824254.
- [34] SKALLA, J. *Návrh a dimensování polohových servomechanismů obráběcích strojů* [habilitační práce]. In: Technická Univerzita v Liberci, 1995.
- [35] ZHANG, P. Advanced Industrial Control Technology. In: *William Andrew*, 2010. ISBN: 1437778089.
- [36] KELJIK, J. Electricity 4: AC/DC Motors, Controls, and Maintenance. In: *Cengage Learning*, 2012. ISBN: 1111646759.
- [37] *NASA Conference Publication, Vol. 2423*. In: National Aeronautics and Space Administration, 1986.
- [38] SOUČEK, P. Servomechanismy ve výrobních strojích. In: *ČVUT*, 2004. ISBN: 80-01-02902-6.
- [39] SKALLA, J. Dynamika pohonů posuvů a její vztah k přesnosti servomechanismů. In: *ČVUT*, 2004. 80-90342-1-6.
- [40] SKALLA, J. *Optimální převod – podrobnější pohled na výpočet*. In: Technická univerzita v Košiciach, 2006. 80-8073-560-3.
- [41] BUBÁK, A. *Zvyšování dynamiky a přesnosti posuvových os obráběcích strojů* [disertační práce]. In: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2004.
- [42] LACHMAN, M. *Regulace přesných polohových servopohonů při vysokých rychlostech* [disertační práce]. In: TUL, 2005.
- [43] HEGEL, G. W. F. The Science of Logic. In: *Cambridge University Press*, 2010. ISBN: 1139491350.
- [44] ELANCHEZHIAN, C., SHANMUGA SUNDAR, G. Computer Aided Manufacturing. In: *Firewall Media*, 2007. ISBN: 8131800725.

- [45] SMID, P. CNC programming handbook: a comprehensive guide to practical CNC programming. In: *Industrial Press Inc.*, 2003. ISBN: 0831131586.
- [46] HIWIN. *Kuličková pouzdra a vodící tyče*, 2009.
- [47] HIWIN. *Kuličkové šrouby & příslušenství*, 2010.
- [48] BLONDEAU, R. Metallurgy and Mechanics of Welding. In: *John Wiley & Sons*, 2013. ISBN: 1118623746.
- [49] ALTRATEC. *Profilbaukasten ALTRAPROFIL*, 2012, <<http://www.altratec.de>>.
- [50] mk TECHNOLOGY GROUP. 2012, <<http://www.mk-group.com>>.
- [51] Bosch Rexroth. 2012, <<http://www.boschrexroth.cz>>.
- [52] ITEM24. 2012, <<http://www.item24.com>>.
- [53] Haberkorn Ulmer s.r.o., 2012, <<http://www.haberkorn.cz>>.
- [54] ULRICH, T. *Optická nanovlákná* [bakalářská práce]. In: Technická Univerzita v Liberci, 2012.
- [55] MEISSNER, B., ZILVAR, V. Fyzika polymerů: struktura a vlastnosti polymerních materiálů. In: *SNTL*, 1987.
- [56] DOUSEK, L. *Vodivé polymery pro elektronické aplikace* [diplomová práce]. In: ZČU, 2012.
- [57] BAJÁKOVÁ, J., KOŠŤÁKOVÁ, E., STANISLAV, L., HARASOVÁ, M., LUKÁŠ, D. *Pva microfibers containing carbon nanotubes produced by drawing*. In: AUTEX 2013, 2013. ISBN: 978-3-86780-343-4.
- [58] POKLUDA, J., ČERNÝ, M., ŠANDERA, P., ŠOB, M. *Calculations of Theoretical Strength: State of the Art and History*. In: *Journal of Computer-Aided Materials Design*, 2004.
- [59] Bahr Modultechnik GmbH, BAHR Modultechnik Produktkatalog, 2013

Vlastní publikační činnost

Příspěvky ve sbornících

- [1] STANISLAV, L. Návrh a realizace mikromanipulátoru pro dloužení nanovláken z kapky polymeru. In: *Světlanka 2011*, Rokytnice nad Jizerou. ISBN 978-80-7372-765-9.
- [2] STANISLAV, L. Dloužení nanovláken z kapky polymeru na mikromanipulátoru. In: *Světlanka 2011*, Rokytnice nad Jizerou. ISBN 978-80-7372-891-5.
- [3] BAJÁKOVÁ, J., STANISLAV, L., VAVRIK, M., LUKÁŠ, D. Production of Individual PS and PMMA Micro/Nano Fibers. In: 19th international conference STRUTEX, Technická univerzita v Liberci 2012, s. 115-116. ISBN 978-80-7372-913-4.
- [4] VOLESKY, L., ANDRSOVA, Z., STANISLAV, L., KEJZLAR, P., KROISOVA, D. The exploration of functional natural structures. In: *Nanocon 2012*, Brno, s. 629-634. ISBN 978-80-87294-35-2.
- [5] STANISLAV, L., BAJÁKOVÁ, J., KOVAČIČIN, J., LUKÁŠ, D. Multicomponent nano-yarns production – development of twisting device. In: *13th AUTEX World Textile Conference 2013*, Dresden. ISBN 978-3-86780-343-4.
- [6] BAJÁKOVÁ, J., STANISLAV, L., KOŠŤÁKOVÁ, E., SOUKUPOVÁ, J., LUKÁŠ, D. PVA Microfibers Containing Carbon Nanotubes Produces by Drawing. In: *13th AUTEX World Textile Conference 2013*, Dresden. ISBN 978-3-86780-343-4.
- [7] STANISLAV, L., BAJÁKOVÁ, J. Vícekomponentní nanopříze – vývoj a výroba zákrutového zařízení. In: *Světlanka 2013*, Rokytnice nad Jizerou, s. 192-197. ISBN 978-80-7372-987-5.
- [8] STANISLAV, L., BAJÁKOVÁ, J. Multicomponent nano-yarns production device. In: *Nanocon 2013*, Brno. ISBN 978-80-87294-44-4.
- [9] STANISLAV, L. Fundamentals and inovations of machine based nanofiber production. In: *The international conference of Academic coordination centre and technology*

transfer in euroregion neisse-nisa-nysa, Karkonosze College in Jelenia Gora, 2013, s. 82-88. ISBN 978-83-61955-32-0.

- [10] STANISLAV, L. ERP System for small company production management. In: *Manufacturing Systems Today and Tomorrow 2013*, Technical university in Liberec 2013. ISBN 978-80-7494-023-1.
- [11] KAŠPÁREK, M., STANISLAV, L. Rozšíření předmětu Počítačová grafika o práci s moderním hardwarově akcelerovaným grafickým enginem Unreal. In: *MMK 2013*, Hradec Králové. ISBN 978-80-87952-00-9, ETTN 042-13-13025-12-6.
- [12] STANISLAV, L., BAJÁKOVÁ, J., HAVLÍČKOVÁ, V., LUKÁŠ, D., JENČOVÁ, V. Drawing nanofibers scaffolds with precise structure. In: *The Fiber Society Spring 2014, Fibers for Progress*. Liberec 2014.
- [13] STANISLAV, L., BAJÁKOVÁ, J., HAVLÍČKOVÁ, V., LUKÁŠ, D., JENČOVÁ, V. Drawing of nanofibrous scaffolds for tissue engineering. In: *Světlanka 2014*, Rokytnice nad Jizerou. ISBN: 978-80-7494-100-9.
- [14] PILAŘOVÁ, K., JENČOVÁ, V., STANISLAV, L., HORÁKOVÁ, J., MIKEŠ, P., LUKÁŠ, D. Drawing fibrous scaffolds with precise structure for tissue engineering. In: *NANOCON 2014*, Brno. ISBN: 978-80-87294-55-0.

Kvalifikační práce

- [15] STANISLAV, L. *Prostorový scanner prostředí pro robotické aplikace (diplomová práce)*. In: TUL, 2010.

Seznam obrázků a tabulek

OBRÁZKY

Obr. 1:	Relaxace napětí viskoelastické kapaliny.....	21
Obr. 2:	Kritická délka dle pevnostního přetrhu proti deformačnímu gradientu. Označen násobek rychlosti a relaxačního času.....	22
Obr. 3:	Kritická délka dle pevnostního přetrhu proti násobku rychlosti a relaxačního času. Označen deformační gradient.....	22
Obr. 4:	Přetržení v důsledku kapilárních vln.....	24
Obr. 5:	Dosažitelná délka vlákna před přetržením vlivem kapilárních vln proti povrchovému napětí; vyznačena viskozita.....	25
Obr. 6:	Dosažitelná délka vlákna před přetržením vlivem kapilárních vln proti viskozitě; vyznačeno povrchové napětí.....	25
Obr. 7:	Progresivní rozlišování v hierarchii mikrostrukturního modelu roztoku polymeru.....	27
Obr. 8:	Náčrtek předpokládané situace obecného dloužení.....	27
Obr. 9:	Délka vlákna proti $\log(\text{rychlosti} \cdot \text{viskozity})$ jako výsledek vlivu dvou mechanismů přetrhu; křivka 1: pevnostní mez; křivka 2: kapilární narušení; křivka 3: reálná kombinace obou.....	29
Obr. 10:	Stabilizace kapilárních vln solidifikací povrchu.....	30
Obr. 11:	Schéma pohonu posuvu dvouosého manipulátoru.....	33
Obr. 12:	Sledovací odchylka při rozběhu a zastavení.....	34
Obr. 13:	Schéma DC motoru s permanentními magnety.....	36
Obr. 14:	Pracovní oblast DC motoru.....	37
Obr. 15:	Moment jako funkce úhlu rotoru.....	38
Obr. 16:	Schéma AC motoru.....	38
Obr. 17:	Řešení proudové zpětné vazby u AC pohonů.....	38
Obr. 18:	Pracovní oblast servomotoru SGMGV-05D.....	39
Obr. 19:	Frekvenční charakteristika a určení propustného pásma.....	40
Obr. 20:	Nerovnoměrnost malých rychlostí – záznam.....	41
Obr. 21:	Rázová dynamická tuhost.....	42
Obr. 22:	Schéma pro odvození dynamické tuhosti (model 0).....	43

Obr. 23:	Dvouhmotový systém.....	44
Obr. 24:	Schéma servomotoru a mechanické části mikromanipulátoru.....	46
Obr. 25:	Paralelní odlehlost při lineární interpolaci.....	46
Obr. 26:	Elipsový průběh skutečné trajektorie při rozdílném zesílení os.....	48
Obr. 27:	Spirála vývoje technologie.....	52
Obr. 28:	Princip dloužení ojednocených nanovláken.....	55
Obr. 29:	Konvence v orientaci os.....	57
Obr. 30:	Schéma sestavy jedné osy.....	59
Obr. 31:	Faktor směru zatížení ložiskového pouzdra UBM-16AJ.....	60
Obr. 32:	Schéma vznikajících vůlí v mechanismu osy.....	65
Obr. 33:	Hliníkový profil Item.....	66
Obr. 34:	Předurčená deformace ve spoji.....	68
Obr. 35:	Zapojení rozvodné skříně mikromanipulátoru.....	70
Obr. 36:	Výsledná konstrukce Manipulátoru 1.....	71
Obr. 37:	Návrh krytu pro mikromanipulátor.....	73
Obr. 38:	Vznik evanescentního pole u optického vodiče: a) klasický optický vodič, b) vodič s průměrem menším než je vlnová délka signálu.....	74
Obr. 39:	Schéma přestupu signálu.....	75
Obr. 40:	Snímek přestupu signálu.....	75
Obr. 41:	Snímek vlákna z optického mikroskopu, černobílý, ekvalizován.....	78
Obr. 42:	Výchozí snímek s vláknem.....	79
Obr. 43:	Výchozí snímek bez vlákna.....	79
Obr. 44:	Pozitivní výsledek analýzy.....	79
Obr. 45:	Negativní výsledek analýzy.....	79
Obr. 46:	Princip zákrutového mechanismu.....	82
Obr. 47:	Schéma zapojení řídicí elektroniky zákrutového zařízení.....	84
Obr. 48:	Zákrutové zařízení s vyznačenými řízenými osami.....	85
Obr. 49:	Snímek příze ze dvou 1um vláken.....	86
Obr. 50:	Nanopříze z různých vláken s celkovým průměrem 35 um.....	86
Obr. 51:	Dvoukomponentní mikropříze (PVA+PVB).....	86
Obr. 52:	Diferenciální řízení.....	88
Obr. 53:	Mikromanipulátor II.....	91
Obr. 54:	Sestava os mikromanipulátoru II.....	91
Obr. 55:	PCL nanovlákná při 480x zvětšení, SEM.....	94

Obr. 56:	PCL nanovlákná při 1000x zvětšení, SEM.....	94
Obr. 57:	PCL nanovlákná při 3000x zvětšení, SEM.....	94
Obr. 58:	PCL nanovlákná při 5000x zvětšení, SEM.....	94
Obr. 59:	Struktura nanovláken PVA a PVB s kontrastní látkou.....	96
Obr. 60:	Paralelní struktura PCL vláken (600x).....	97
Obr. 61:	Paralelní struktura PCL vláken (500x).....	97
Obr. 62:	Paralelní struktura PCL vláken při výrobě scaffoldů pro in-vivo studii.....	98
Obr. 63:	Třísměrná struktura PCL vláken (500x).....	99
Obr. 64:	Dvousměrná struktura PCL vláken (50x).....	99
Obr. 65:	Výroba vzorků třísměrně křížených vláken pro in-vitro studii. Minimálně 60 ks vzorků na jedno upnutí.....	100
Obr. 66:	PVA nanopříže (1000x).....	101
Obr. 67:	PVB nanopříže (980x).....	101
Obr. 68:	Paralelní vícekomponentní struktura (PVA+AgNO ₃ , PVB, PCL).....	102
Obr. 69:	Vícekomponentní mikropříže (PVA+AgNO ₃ , PVB).....	102
Obr. 70:	Připravený vzorek pro in-vitro studii.....	104
Obr. 71:	MTT test tří struktur (str I, str II, str III) chronologicky.....	105
Obr. 72:	SEM snímky struktur v 1. den osazení buňkami.....	105
Obr. 73:	SEM snímky struktur v 28. den osazení buňkami.....	105
Obr. 74:	Výkres použité kýlní sítě.....	106
Obr. 75:	Kýlní síťka aplikovaná na ránu.....	107

TABULKY

Tab. 1:	Parametry servopohonů.....	62
Tab. 2:	Znamé veličiny pro návrh pohonu.....	63
Tab. 3:	Výrobci hliníkových systémů pro rámy.....	67
Tab. 4:	Mechanické vlastnosti materiálu rámu.....	68
Tab. 5:	Konduktivita některých polymerů.....	76
Tab. 6:	Požadavky na pohyb Mikromanipulátoru II.....	87
Tab. 7:	Tělesná hmotnost hostitelů (kg).....	108
Tab. 8:	Hodnoty naměřených biomechanických parametrů.....	110

Seznam příloh

- Příloha A: Výkresová dokumentace mikromanipulátoru I
- Příloha B: Výkresová dokumentace krytu mikromanipulátoru I
- Příloha C: Výkresová dokumentace mikromanipulátoru II
- Příloha D: Výkresová dokumentace zákrutového zařízení
- Příloha E: Technický list mikromanipulátoru II
- Příloha F: Technický list roztoku PVA
- Příloha G: Technický list roztoku PCL
- Příloha H: Závěrečná zpráva in-vivo studie
- Příloha I: Odborný životopis autora

Příloha A

Výkresová dokumentace mikromanipulátoru I

Příloha B

Výkresová dokumentace krytu mikromanipulátoru I

Příloha C

Výkresová dokumentace mikromanipulátoru II

Příloha D

Výkresová dokumentace zákrutového zařízení

Příloha E

Technický list mikromanipulátoru I

Příloha F

Technický list roztoku PVA

Příloha G

Technický list roztoku PCL

Příloha H

Závěrečná zpráva in-vivo studie

Příloha I

Odborný životopis autora

Osobní údaje

Jméno: **Ing. Lukáš Stanislav**
Datum narození: 24. července 1986
Adresa: Humpolecká 507/11, Liberec
Národnost: česká

Vzdělání

2010 – trvá: **Technická Univerzita v Liberci (TUL) – Liberec**
Doktorský studijní program (PhD.) – Aplikovaná kybernetika
Vývoj zařízení pro dloužení nanovláken z kapky polymeru
Pedagogická činnost
Zkušenost s vedením katedrového projektu (SGS) a projektu
MŠMT (Pre-seed)
Patentové řízení

2005 – 2010: **Technická Univerzita v Liberci (TUL) - Liberec**
Magisterský studijní program (Ing.) – Strojní inženýrství
Automatizované systémy řízení ve strojírenství
Cena děkana za nejlepší diplomovou práci v oboru ASŘ

2008: **Högskolan Kristianstad (HKr) - Kristianstad, Švédsko**
Fakulta strojní
Erasmus program, studia v angličtině

2001 – 2005: **Střední průmyslová škola (SPŠMB) - Mladá Boleslav**
Studijní program: strojírenství
Maturita s vyznamenáním
Shell Eco-marathon projekt (vnitřní konstrukce, aerodynamický plášť)

Praxe

Programování

2012 – trvá: Architekt systému řízení výroby a TPV v **DKL-tech s.r.o.**

2006 – trvá: Systémový architekt v **CLIQUO** – www.cliquo.cz
vývoj frameworku, rozsáhlé intranetové informační systémy,

obchody, prezentace
rozdělování práce externím spolupracovníkům, školení
marketing produktů, jednání se zákazníky

2007 – 2011: Senior programátor pro **UVM interactive s.r.o.**
vývoj frameworku a jednoúčelových aplikací
vedení projektů, výchova junior vývojářů

Strojní inženýrství a výzkum

2014 – trvá: Reverse engineering, konstrukce a stavba repliky letounu Me-108
pro **Ing. Petra Nejedlého**

2014 – 2015: vedoucí individuální výzkumné aktivity Pre-seed při **Technické univerzitě v Liberci**

2013 – trvá: zakázková konstrukční činnost (CATIA v5) pro **ELPRO - Ing. Pavel Hájek**

2012 – trvá: zakázková konstrukční činnost v **Recticel Automobilsysteme GmbH** (CATIA v5)

2011 – 2015: disertační práce – **Produkce nanovláken metodou tažení**

2012: školicí činnost – CATIA v5 pro **TEMPO TRAINING & CONSULTING a.s.**

2010: diplomová práce – **Návrh a realizace laserového prostorového scanneru prostředí pro robotické aplikace**

2006: konstrukční činnost pro **Arvin Meritor** (CATIA v5)

2004 – 2006: letní praxe ve vývojovém centru **Škoda Auto** – konstrukce okované karoserie

2004: 2 měsíce praxe v **AUFEER DESIGN**

2002 – 2005: vývoj vozítka do ekologické soutěže „Shell Eco-marathon“ na **SPŠ v Mladé Boleslavi** (dojet co nejdál s použitím co nejmenšího množství paliva)

Další schopnosti

Počítače

<i>Administrátor:</i>	Linux (správa vlastních serverů), Windows, Apache, MySQL
<i>Uživatel:</i>	CATIA v5, NX5, SolidWorks, EdgeCAM, Photoshop, MS Office/OpenOffice, Matlab a Simulink, SVN, ...
<i>Programování:</i>	PHP, XHTML a HTML5, CSS2/3, C/C++/C#/Java, Assembler, OpenGL, Bash, Visual Basic, ASP.NET, Pascal

Licence, certifikáty

- Certifikát z kurzu angličtiny
(**Advanced level – C1**, Dublin International house)
- Certifikát ze školení **NX5**
- Certifikát ze školení **Advanced MySQL**
- Certifikát ze školení **B&R Automation**
- Základní certifikace o odborné způsobilosti v elektrotechnice
(vyhl. 50/1978 Sb.)
- Řidičské oprávnění skupiny **B**

Jazyky

- *Angličtina:* **C1**
- *Ruština:* **A2**
- *Němčina:* pasivně/začátečník

Zájmy

Četba, návrh a stavba funkčních modelů plachetnic, vedení modelářského kroužku, sportovní ISSF střelba, programování pro zábavu, cestování.