

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



# Bakalářská práce

Návrh zařízení pro úpravu parametrů svazku uhlíkových vláken navíjecího  
stroje

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Lamač** Jméno: **Oskar** Osobní číslo: **465391**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav výrobních strojů a zařízení**  
Studijní program: **Teoretický základ strojího inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Návrh zařízení pro úpravu parametrů svazku uhlíkových vláken navíjecího stroje**

Název bakalářské práce anglicky:

**Design of device for treatment parameters of carbon fibre roving for filament winding machine**

Pokyny pro vypracování:

Popis tématu: Cílem práce je návrh zařízení pro úpravu parametrů svazku uhlíkových vláken navíjecího stroje. Upravovaný svazek je ze standardních vysoko-pevnostních uhlíkových vláken (např. T700S 12K). Maximální rychlost pohybu svazku v zařízení je 60 m.min-1. Požadovaná šířka upraveného svazku je až 2,5násobek původní šířky. Maximální rozměry zařízení jsou: šířka 500 mm, výška 1000 mm a délka 1500 mm. Při návrhu bude kladen důraz na vysokou modularitu zařízení.; Práce bude obsahovat tyto hlavní části: 1. Provedení analýzy současného stavu problematiky v ČR i ve světě. 2. Navržení minimálně 3 koncepčních variant řešení a jejich zhodnocení, včetně ekonomického. 3. Konstrukční zpracování vybrané varianty a provedení návrhových a kontrolních výpočtů. 4. Vytvoření detailního 3D modelu zařízení, sestavného výkresu s kusovníkem a výrobního výkresu vybrané součásti. Rozsah grafické části: 3D model zařízení, sestavný výkres, výrobní výkres vybrané součásti; Rozsah textové části práce: 40 – 60 stran.

Seznam doporučené literatury:

SHIGLEY, J. E., MISCHKE, CH. R. BUDYNAS, R. D. Konstruování strojních součástí. 1. vyd. v Brně: VUTIUUM, 2010, 1159 s. ISBN 978-80-214-2629-0.; EHRENSTEIN, G. W. Polymerní kompozitní materiály. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.; MRÁZ, P. TALÁCKO, J. Konstrukce strojů s kompozitními materiály. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03540-9.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Pavel Vrba, Ph.D., ústav výrobních strojů a zařízení FS**

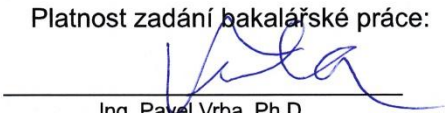
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:


**Ing. Viktor Kulíšek, ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky FS**

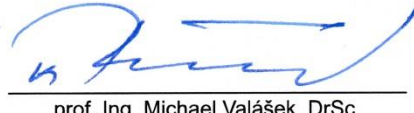
Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2019**

  
Ing. Pavel Vrba, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

  
Ing. Matěj Sulitka, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

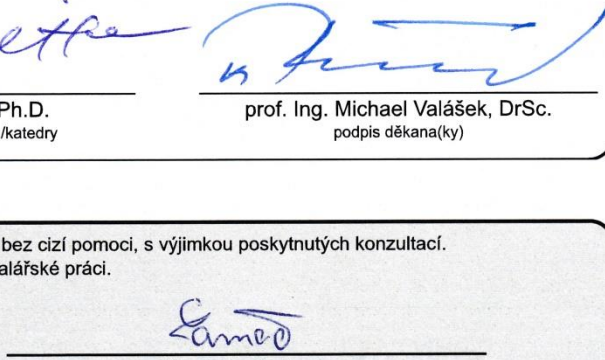
  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

29.4.2019

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

# Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl v příloženém seznamu veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 25.5.2019

.....

podpis

## **Poděkování**

Rád bych tímto poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Pavlu Vrbovi, Ph.D. za odborné vedení v průběhu celé bakalářské práce, cenné rady, věcné připomínky a velmi vstřícné jednání. Zároveň bych poděkoval panu Ing. Viktoru Kulíškovi za věcné připomínky přímo z odvětví. Dále chci vyjádřit dík panu Ing. Janu Skočilasovi, Ph.D. za odborné a cenné rady.

Nakonec děkuji i svým rodičům za jejich vytrvalou podporu a trpělivost v průběhu celého studia.

# Anotace

Autor:	Oskar Lamač
Název BP:	Návrh zařízení pro úpravu parametrů svazku uhlíkových vláken navíjecího stroje
Rozsah práce:	70 stran, 9 tabulek, 50 obrázků
Školní rok vyhotovení:	2018/2019
Škola:	České vysoké učení v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	Ú12135 – Ústav výrobních strojů a zařízení
Vedoucí BP:	Ing. Pavel Vrba, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Viktor Kulíšek
Zadavatel:	Compo Tech PLUS, spol. s r.o.
Využití:	Možná realizace navrženého zařízení a jeho začlenění do výroby
Klíčová slova:	spread, uhlíková vlákna, roving, přesné navíjení, kompozit
Anotace:	Bakalářská práce se zabývá návrhem zařízení na úpravu parametrů svazku uhlíkových vláken navíjecího stroje. Tyto parametry bude zařízení upravovat za normálního provozu navíjecího stroje tak, aby se nemusela snižovat produktivita výroby. Zařízení je navrhováno primárně pro vysokopevnostní uhlíková vlákna (např. T700S 12K). Součástí práce je porovnání několika koncepčních variant řešení, včetně ekonomického. Následuje konstrukční zpracování, které klade důraz na vysokou modularitu, podpořené návrhovými a kontrolními výpočty. Hlavním výstupem bakalářské práce je 3D model navrženého zařízení.

# Abstract

Author:	Oskar Lamač
Title of the bachelor thesis:	Design of device for treatment parameters of carbon fibre roving for filament winding machine
Extent:	70 pages, 9 tables, 50 figures
Academic year:	2018/2019
University:	The Czech Technical University in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Ú12135 – Department of Production Machines and Equipment
Supervisor:	Ing. Pavel Vrba, Ph.D.
Consultant:	Ing. Viktor Kulíšek
Submitter of the Theme:	Compo Tech PLUS, spol. s r.o.
Application:	Possible implementation of the designed device and its incorporation into manufacturing process
Key words:	spread, carbon fibre, roving, filament winding, composite
Abstract:	Bachelor thesis deals with the design of device for treatment parameters of carbon fibre roving for filament winding machine. These parameters will be treated during normal operation of the filament winding machine so the manufacturing productivity does not have to be decreased. The device is primarily designed for the use of high strength carbon fibre (i.e. T700S 12K). The thesis consists of evaluation of numerous concept solutions, including economical study. Followed by construction with emphasis on high modularity backed by design and control calculations. 3D representation of the device is the main output of the thesis.



## Obsah

1	Úvod.....	11
2	Cíle práce .....	12
3	Úvod do problematiky .....	13
3.1	Kompozitní materiály .....	13
3.2	Vláknové kompozity s polymerní matricí .....	15
3.2.1	Vyztužující vlákna .....	16
3.2.2	Vláknové polotovary .....	18
3.2.3	Polymerní matrice .....	19
3.2.4	Sizing (finiš).....	21
3.3	Způsoby výroby vláknových kompozitů s polymerní matricí .....	21
3.3.1	Způsoby výroby vláknových kompozitů s matricí z termosetické pryskyřice.....	21
3.3.2	Způsoby výroby vláknových kompozitů s matricí z termoplastické pryskyřice.....	26
3.4	Technologie přesného navíjení (Filament Winding) .....	27
4	Současný stav problematiky .....	30
4.1	Rozbor řešeného problému .....	30
4.2	Mechanické spreadování.....	31
4.2.1	Parametry ovlivňující mechanický spread rovingu.....	32
4.2.2	Vlastnosti a možnosti mechanického spreadu.....	34
4.3	Další principy spreadování rovingu .....	35
4.3.1	Pneumatické spreadování.....	35
4.3.2	Spread za pomoci vibrací .....	36
4.4	Analýza existujících zařízení na spread vlákna ve světě .....	38
4.5	Shrnutí existujících zařízení.....	41
5	Vlastní řešení .....	42
5.1	Návrhové skici .....	42
5.1.1	Mechanický spread.....	42
5.1.2	Spread za pomoci vibrací .....	42
5.1.3	Pneumatický spread .....	43
5.1.4	Spread pomocí zvukových vln .....	44
5.2	Experimenty .....	45
5.2.1	Ostrá hrana .....	45



5.2.2	Teplota.....	45
5.2.3	Nerotující válečky .....	46
5.2.4	Rotující válečky .....	46
5.2.5	Proud vzduchu.....	47
5.3	Zhodnocení variant a výběr nejlepší varianty.....	47
5.3.1	Shrnutí výběru varianty.....	49
5.4	Zpracování vybrané varianty .....	49
5.4.1	Vstupní sekce .....	50
5.4.2	Sekce ohřevu .....	51
5.4.3	Mezi-sekce vodících válečků .....	53
5.4.4	Spreadovací sekce .....	53
5.4.5	Sekce chlazení .....	54
5.4.6	Výstupní sekce .....	55
5.5	Začlenění zařízení do provozu.....	56
5.6	Výpočtová část.....	57
5.6.1	Ložiskové jednotky SYK 30 TR.....	57
5.6.2	Infračervené nahřívací panely .....	58
5.6.3	Lineární voice coil aktuátor .....	59
5.6.4	Chladicí sekce .....	60
6	Závěr.....	63
7	Seznamy.....	65
7.1	Seznam použité literatury .....	65
7.2	Seznam tabulek .....	68
7.3	Seznam obrázků.....	69
7.4	Seznam použitých programů .....	70
7.5	Seznam příloh .....	70





## Přehled použitých jednotek a veličin

$a$	zrychlení	[m/s <sup>2</sup> ]
$A$	plocha průřezu	[mm <sup>2</sup> ]
$c_p$	měrná tepelná kapacita	[J/kgK]
$C$	základní dynamická únosnost	[kN]
$C_0$	základní statická únosnost	[kN]
$d$	průměr	[mm]
$E$	modul pružnosti v tahu	[N/mm <sup>2</sup> ]
$f$	frekvence	[Hz]
$f_n$	normálová síla na jednotku délky	[N/mm]
$F$	síla	[N]
$h$	vertikální vzdálenost válečků	[mm]
$H_s$	tloušťka svazku uhlíkových vláken	[mm]
$L$	délka napínaného svazku uhlíkových vláken	[mm]
$L_{ch}$	charakteristický rozměr	[m]
$L_o, L_o'$	potřebná nahřívací délka	[m]
$m$	hmotnost	[kg]
$\dot{m}$	hmotnostní tok	[kg/s]
$Nu$	Nusseltovo číslo	[-]
$P$	tlak	[Pa]
$Pr$	Prandtlovo číslo	[-]
$P_u$	mezní únavové zatížení	[kN]
$\dot{q}$	hustota tepelného toku	[W/m <sup>2</sup> ]
$\dot{Q}$	teplo	[W]
$R$	poloměr	[mm]
$Re$	Reynoldsovo číslo	[-]
$R_m$	mez pevnosti v tahu	[N/mm <sup>2</sup> ]
$S$	povrch	[m <sup>2</sup> ]
$t$	čas	[s]
$t_l$	teoretická tloušťka spreadu	[mm]
$T_i$	síla napínající monovláknem $i$	[N]
$\Delta T$	rozdíl teplot	[°C]
$\Delta T_{ztr}$	teplotní ztráta svazku do okolí	[°C]
$\Delta T_{uch}$	teplota uchlazená ventilátory	[°C]
$\bar{u}$	střední rychlost proudění	[m/s]
$\dot{V}$	objemový tok	[m <sup>3</sup> /s]
$W_l$	teoretická šířka spreadu	[mm]
$W_s$	šířka svazku uhlíkových vláken	[mm]



$y$	poloha	[mm]
$y_{max}$	amplituda	[mm]
$z_c$	horizontální vzdálenost válečků	[mm]
$\alpha$	součinitel přestupu tepla	[W/m <sup>2</sup> K]
$\beta$	vedlejší úhel návinu	[°]
$\gamma$	úhel návinu	[°]
$\lambda$	tepelná vodivost	[W/mK]
$\nu$	kinematická viskozita	[m <sup>2</sup> /s]
$\rho$	měrná hmotnost	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\omega$	úhlová rychlost	[rad/s]



# 1 Úvod

Při výrobě uhlíkových kompozitů způsobem přesného navíjení na navíjecí trn se postupuje pokládáním svazků uhlíkových vláken vedle sebe (pod příslušným úhlem), a pak v dalších vrstvách přes sebe. V případě použití rozprostřeného svazku vláken – širší a tenčí než původní svazek (dále jen spreadovaný svazek) – je možné vyrobit výrobek se stejnými vlastnostmi, avšak menšími rozměry, nebo naopak výrobek se stejnými rozměry, ale lepšími vlastnostmi ve specifických směrech. Tím nedochází ke zbytečným ztrátám materiálu a výrobního času. Navíc bylo dokázáno, že samotným použitím tenčích pásek nekroucených pramenců vláken (dále jen rovingu) dochází k menším defektům a svazky vláken se také lépe smáčejí v pryskyřici. Ve skutečnosti jsou ale běžně zakoupené rovingy, používané k výrobě navíjením, namotané na cívkách nerovnoměrně. Pak jsou méně předvídatelné rozměry rovingu při pokládání na navíjecí trn. Při navíjení nám tedy jde o možnost kontrolovat parametry svazku. Vše pro dosažení co nejvyšší přesnosti výroby, podstatného zlepšení vlastností navíjeného výrobku v požadovaných směrech při zatěžování a s tím spojeného snížení finančních nákladů.

## 2 Cíle práce

Hlavním cílem této práce je návrh zařízení pro úpravu parametrů svazku standartních vysoko-pevnostních uhlíkových vláken (např. T700S 12K). Svazek po úpravě by měl dosahovat až 2,5násobku původní šířky. Zařízení nesmí přesáhnou rozměry 1500 x 1000 x 500 mm (délka x výška x šířka). Maximální rychlost putování svazků vláken v zařízení je 60 m/min. Při návrhu bude kladen důraz na vysokou modularitu zařízení. Toto téma vzniklo jako podnět od firmy Compo Tech PLUS, spol. s r.o. (dále jen Compotech), předního českého výrobce navíjených kompozitů.

Dílčími cíli práce jsou:

- Provedení analýzy současného stavu problematiky v ČR i ve světě.
- Navržení minimálně 3 koncepčních variant řešení a jejich zhodnocení, včetně ekonomického.
- Konstrukční zpracování vybrané varianty a provedení návrhových a kontrolních výpočtů.
- Vytvoření detailního 3D modelu zařízení, sestavného výkresu s kusovníkem a výrobního výkresu vybrané součásti.

## 3 Úvod do problematiky

### 3.1 Kompozitní materiály

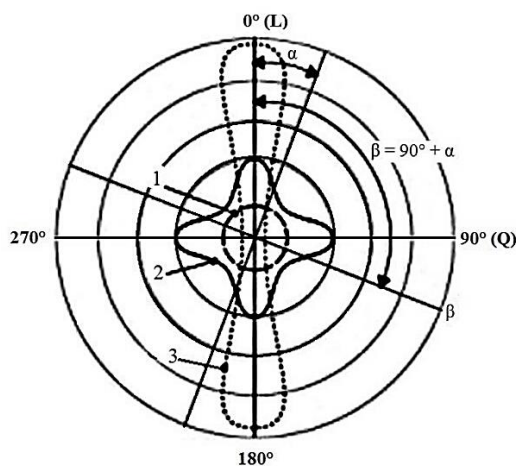
Slovo kompozit pochází z latinského *compositus*, v českém překladu jako složenina/směs/sloučenina. První zmínky se datují okolo roku 1400. Kompozitní materiály (kompozity) jsou obecně popsány jako materiály složené ze dvou nebo více chemicky odlišných složek, z nichž alespoň jedna je tuhá. Tyto složky se dělí na tzv. matrice a výztuže. Matrice má za úkol držet vše po hromadě (tvarová stálost), chránit samotnou výztuž před okolními vlivy, případně přenášet tlak nebo síly v kolmém směru. Je spojitá a obvykle poddajnější než nespojitá, tužší, tvrdší a pevnější výztuž. Výztuž, která má na starost především přenášení tahových sil, může být tvořena uhlíkem, sklem, kevlarom, keramikou nebo kovem.

Podle tvaru výztuže jsou kompozity děleny na:

- částicové (sférické, destičkové),
- skeletové (souvislý nosný skelet s pórovitou matricí),
- vláknové (s kontinuálními vlákny, s krátkými vlákny).

Podle materiálu jsou matrice děleny na:

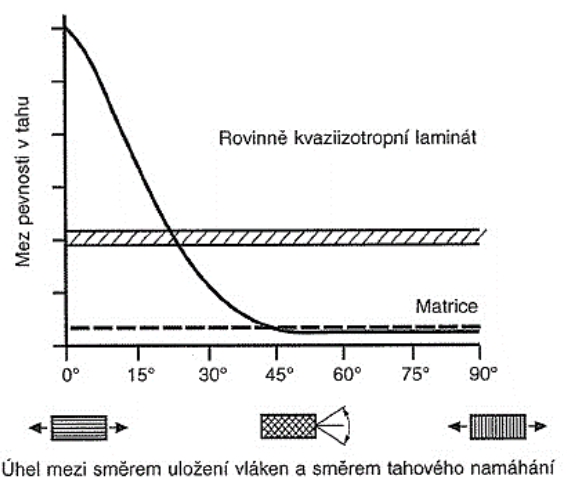
- polymerní (termoplasty, termosety),
- kovové (např. ve formě pěny),
- keramické,
- uhlíkové.



L - podélný (osový) směr  
Q - kolmý směr

1 - rohožový kompozit  
2 - tkaninový kompozit  
3 - jednosměrný kompozit

Obr. 1 – Znárodnění pevnosti v tahu v polárním diagramu pro vybrané typy kompozitů [1]

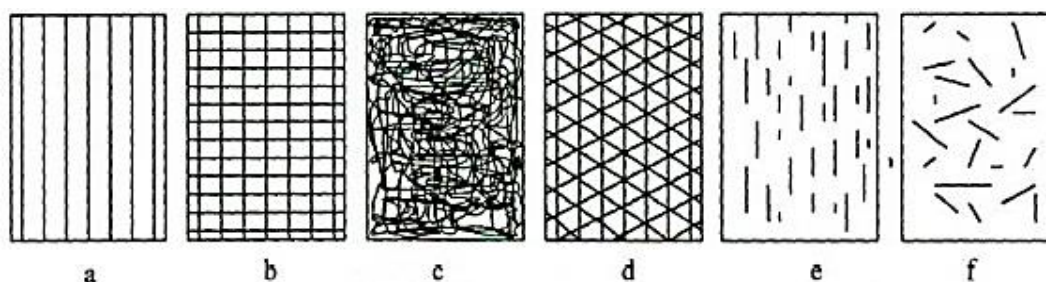


Obr. 2 – Závislost meze pevnosti v tahu jednosměrně vyztuženého kompozitu na úhlu orientace vyztužujících vláken [2]

Různým uspořádáním orientace výztuže a matrice lze dosáhnout rozdílných mechanických vlastností. Tomuto jevu se říká **anizotropie** – na rozdíl od homogenních materiálů (např. kovů), které jsou izotropní (tj. mají ve všech zatěžovaných směrech stejné mechanické vlastnosti). Na Obr. 1 se nachází porovnání mezi pevností vybraných typů kompozitů v polárním diagramu. Pro jednosměrně vyztužené kompozity lze vidět na Obr. 2 průběh meze pevnosti v závislosti na směru zatěžování příslušného kompozitu. Na Obr. 3 jsou uvedeny příklady uspořádání vláknové výztuže pro dosažení různých vlastností kompozitu. Kombinací těchto uspořádání v jednotlivých vrstvách na sobě je vytvořen tzv. **laminát**. Lze tak navrhnout laminát, který přesně vyhovuje našim požadavkům na namáhání. Výhodou je, že lze vlastnosti takového laminátu poměrně dobře testovat.

Pro představu je uveden výčet **výhod (+)** a **nevýhod (-)** laminátů oproti kovům:

- + vysoká měrná pevnost a tuhost (měrná ~ vztažená k hmotnosti),
- + velmi dobrá korozní odolnost,
- + lepší dynamické vlastnosti,
- + dobré tlumicí vlastnosti,
- + vysoká tvarová stálost,
- + možnost oprav (matrice z termosetu),
- + složení materiálu na míru,
- neobvyklé chování materiálu (vlastnosti nelze jednoduše odvodit součtem vlastností jeho složek),
- specifické způsoby zpracování,
- nízká odolnost proti působení vlhkosti za tepla,
- místní poškození se hůře poznávají,
- komplikovaná nebo neúplná recyklace.



Obr. 3 – Příklady uspořádání vláknové výztuže: a) jednosměrné, b) tkanina, c) rohož, d) víceosá výztuž z kontinuálních vláken, e) krátká vlákna (jednosměrně orientovaná), f) krátká vlákna (nahodilá orientace) [3]

Vhodnou kombinací matrice a výztuže lze dosáhnout požadovaných specifických vlastností, které se liší od vlastností samotných materiálů výztuže a matrice. I proto byla v posledních desetiletích věnována velká pozornost vývoji těchto perspektivních materiálů [2], [4], [5], [6].

## 3.2 Vláknové kompozity s polymerní maticí

Vláknové kompozity z uhlíkových vláken patří v náročných technických aplikacích k těm nejrozšířenějším. Důvod použití vláken jako takových vychází z následujících čtyř paradoxů:

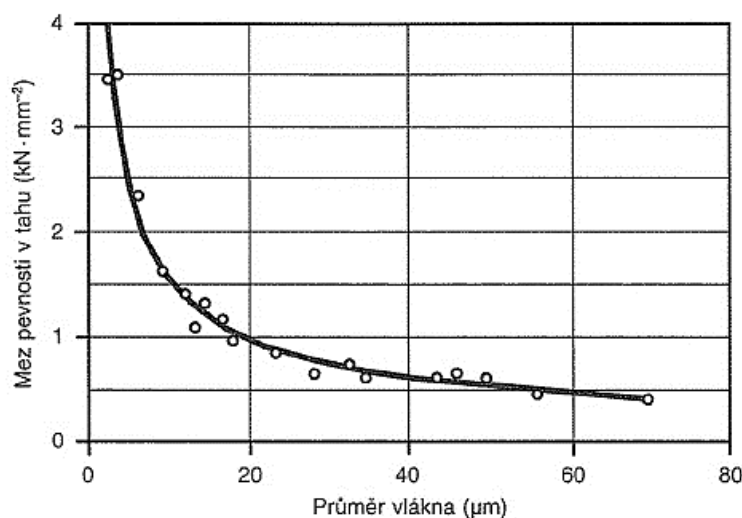
- 1) **Paradox pevného materiálu** – „Skutečná pevnost materiálu je podstatně nižší než pevnost vypočítaná teoreticky.“ (F. Zwicky) [2]

Tab. 1 – Materiálové srovnání vlastností polymerů s tradičními konstrukčními materiály [7]

Materiál	Mez pevnosti $R_m$ [MPa]		Měrná hmotnost $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Měrná pevnost [kN·m/kg]	
	Teoretická	Naměřená			
		Vlákno			Kompaktní hmota
<b>Ocel</b>	21 000	4 000	1 400	7 850	510 (178 <sup>1</sup> )
<b>Hliník</b>	7 600	800	600	2 700	296
<b>Polypropylen</b>	16 000	1 300	38	950	1 368
<b>Polyamid</b>	27 000	1 700	50	1 150	1478
<b>Polyetylen</b>	27 000	1 500	30	900	1 667

Z Tab. 1 je patrné, že opravdu skutečná hodnota meze pevnosti v tahu hraje ve prospěch oceli a hliníku u kompaktní (nevláknové) hmoty, a to ve vskutku vysokém poměru. Avšak v případě vláken už polymery na ocel nemají takovou ztrátu a v případě hliníku se dokonce nacházejí před ní. Ale v čem polymery předčí ocel je takzvaná měrná pevnost (vztažená na hmotnost). Tato hodnota je velmi důležitým faktorem v odvětvích jako letecký průmysl, motorsport a další sportovní odvětví nebo i výrobní stroje.

- 2) **Paradox vláknité struktury** – „Materiál ve formě vlákna má mnohonásobně vyšší pevnost než stejný materiál v kompaktní formě. Čím je vlákno tenčí, tím je jeho pevnost vyšší.“ (A. A. Griffith) viz Obr. 4 [2]



Obr. 4 – Vliv průměru skelného vlákna na jeho pevnost [2]

<sup>1</sup> Pro kompaktní formu

- 3) **Paradox délky zatížení** – „Čím kratší je zatěžovaná část jednotlivého vlákna, tím vyšší je jeho naměřená pevnost“ [2]

Toho se využívá při uložení vláken do polymeru, kde se zatížená část vlákna blíží nule, a tím pádem je lépe využita jeho pevnost.

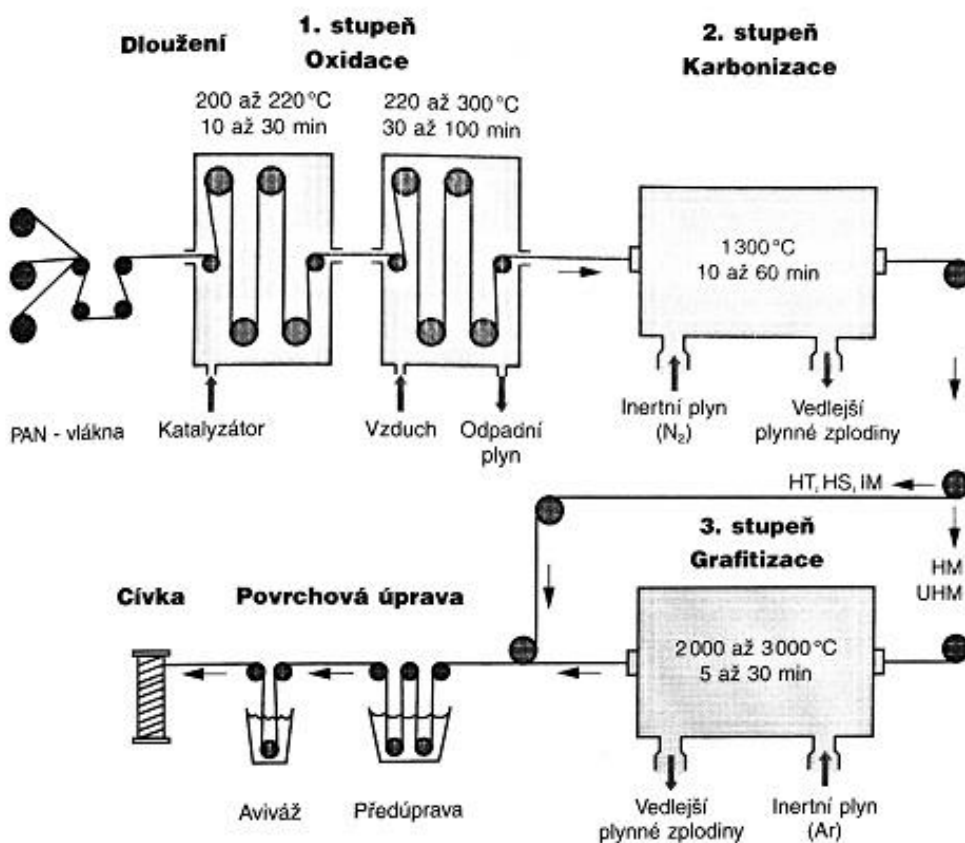
- 4) **Paradox kompozitního materiálu** – „Kompozitní materiál jako celek může převzít napětí, které by jeho slabší složku porušilo. Od pevnější složky kompozitu může převzít vyšší podíl její teoretické pevnosti, než kdyby byla namáhána samostatně“ (G. Slayter) [2]

Tah dokáže přenést jednotlivé složky i celý kompozit. Tlak, ohyb nebo smyk jednotlivé složky často přenést nedokáže. Celý kompozit však do jisté míry ano.

### 3.2.1 Vyztužující vlákna

#### Uhlíková vlákna

Princip výroby uhlíkových vláken spočívá v karbonizaci výchozích organických surovin, při níž se odštěpí téměř všechny prvky až na uhlík. Navyšováním teploty se postupně zlepšují mechanické vlastnosti vláken. Překročením teploty 1800 °C je ukončen proces tvorby grafitické struktury. V dnešní době se uhlíková vlákna vyrábí nejčastěji dvěma způsoby. Prvním způsobem výroby je dvou až třístupňový proces (oxidace, karbonizace, grafitizace) z polyakrylonitrilu (PAN), jak je znázorněno na Obr. 5. Druhý



Obr. 5 – Schéma výroby uhlíkových PAN-vláken [2]



způsob výroby vychází ze surovin bohatých na uhlík jako jsou smoly (pitch) na bázi dehtu – s výtěžností až 80 %. Dříve se jako zdroj používala i celulózová vlákna, ale kvůli její malé výtěžnosti (25 %) se od tohoto způsobu výroby upustilo. Za uplynulý rok 2018 byly ve světě největšími producenty uhlíkových vláken USA (30 %), Japonsko (18 %) a Čína (12 %) [2], [5], [8], [9], [10].

Uhlíková vlákna se dělí na dvě hlavní kategorie:

#### ***Vysokopevnostní (HS)***

- vlákna s vysokou mezí pevnosti, ale standardním nebo středním modulem pružnosti,
- získávají se při teplotách 900 °C až 1500 °C,
- nelámou se při ohybu (na svazku je možné udělat uzel),
- jsou levnější.

#### ***Vysokomodulová (HM)***

- menší tahová pevnost než HS vlákna, ale vysoký modul pružnosti,
- získávají se další karbonizací HS vláken při 2000 °C až 2800 °C,
- jsou náchylné k lámání při ohybu.

Vlastnosti uhlíkových vláken:

- vysoká pevnost a tuhost ale nízká tažnost,
- vhodnou kombinací vrstev lze dosáhnout nulové délkové teplotní roztažnosti,
- dobrá elektrická a tepelná vodivost,
- vysoká korozní odolnost,
- silně anizotropní,
- dobrý průchod záření,
- vysoká odolnost proti dlouhodobému dynamickému zatěžování.

Cena ~ HS 20 až 80 €/kg, HM 100 až 500 €/kg.

### **Skleněná vlákna**

Skleněná vlákna jsou nejčastěji používanou výztuží. Vyrábějí se tažením z trysek ze sklářských pecí (dříve dvoustupňově). Skládají se z tzv. skloviny [2], [5], [10].

Skloviny se dělí podle složení na několik typů:

- E-skloviny – dobrý elektrický izolant, propouští záření,
- S-skloviny (USA)/R-skloviny (Evropa)/T-skloviny (Japonsko) – vyšší pevnost,
- C-skloviny – odolnost proti kyselinám a chemicky agresivním látkám.

Vlastnosti skelných vláken:

- levné,
- vysoká pevnost, ale nízká tuhost,

- izotropní (mechanické vlastnosti nezávislé na směru),
- nízká elektrická vodivost,
- dobrá korozivzdornost,
- nízká teplotní odolnost, ale nehořlavá (ohnivzdorná).

Cena ~ 2 až 3 €/kg.

### **Aramidová vlákna**

Také známá pod komerční značkou Kevlar. Jedná se o vlákna vyráběná z aromatických polyamidů. Výroba spřádáním přímo z taveniny není možná kvůli nižší teplotě rozkladu, než je teplota tavení. Musejí se tedy spřádat složitěji z viskózního roztoku. Opět se vyrábějí v několika variantách lišících se modulem pružnosti v tahu a tažností [2], [5].

#### Vlastnosti aramidových vláken:

- vysoká pevnost v tahu, ale nízká pevnost v tlaku,
- anizotropní,
- hydrofilní (absorbuje vlhkost) – negativně ovlivňuje pevnost,
- nízká teplotní odolnost, ale nehořlavá,
- v nízkomodulovém provedení výborně tlumí vibrace (neprůstřelné vesty).

Cena ~ 20 až 30 €/kg.

## **3.2.2 Vláknové polotovary**

Základním polotovarem jsou prameny monovláken z výroby navinuté na bubnech/cívkách. Monovlákna se samostatně jako výztuž používají jen výjimečně. Základní polotovary se pak dále upravují do následujících forem:

### **Příze**

Vyrobená spředěním z vláken. Může být nekroucená nebo kroucená.

### **Nitě (skaná příze)**

Skládají se z jedné nebo více přízí, které jsou spředeny dohromady. Mohou být jednostupňové nebo víceúrovňové.

### **Roving (pramenec)**

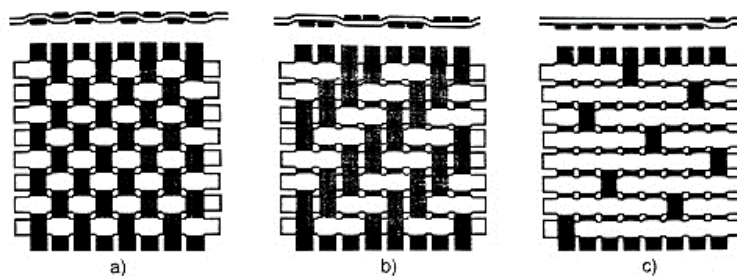
Několik spojených pramenů dohromady ve formě nekonečných nekroucených vláken (nebo jen s malým počtem zákrutů), tvořící tzv. pramenec. Tento pramenec je navinutý na cívku. Počet monovláken dosahuje až 12000 (12K), pro méně náročné aplikace až 48000 (48K). Pramenec s nižším počtem, tzv. „low tow“ (< 24K), se snadněji tkají a propojují maticí. Naopak pramenec s vyšším počtem, tzv. „heavy tow“ (> 24K), umožňují položit větší množství vláken současně a jsou vhodné pro jednodušší

průmyslové aplikace. Roving se dále zpracovává sekáním/tkaním, navíjením nebo tažením nekonečného pramence.

### Tkaniny (Woven Fabrics)

Tkaniny tkané z rovingu nebo příze s následujícími vazbami (Obr. 6):

- *Plátňová vazba* – jednoduchá základní vazba, jednoduché zpracování díky malému otřepu při řezání a rozměrové stálosti,
- *Keprová vazba* – vyšší pevnost a tuhost výsledného laminátu díky menšímu zvlnění vláken, tkanina je více ohebná,
- *Atlasová (saténová) vazba* – menší vychýlení vláken než keprová, lze dosáhnout velmi hladkého povrchu, vhodná pro prostorově složité prvky.



Obr. 6 – Druhy vazeb tkanin: a) plátňová vazba, b) keprová vazba, c) atlasová (saténová) vazba [2]

### Rohože (Mats)

Netkaná rouna z nahodile uspořádaných vláken spojených polymerními pojivy (rozpustitelnými v pryskyřici):

- ze sekaných pramenců (25 až 50 mm dlouhá vlákna, nižší tuhosti a pevnosti),
- z kontinuálních vláken (tvarují se lépe než rohože ze sekaných pramenců),
- povrchové rohože (zvyšují odolnost proti obrusu, mají jemnou strukturu).

### Prepregy

V tomto případě jsou již vlákna spojena s matricí z termoplastu nebo termosetu (před-impregnována). Tyto matrice jsou vytvrzeny do stavu rezitolu (stav B). V tomto stavu má lepkavý povrch a dá se s ním dobře pracovat. Další vytvrzování lze zpomalit skladováním při nízkých teplotách (mrazáky). Po vytvoření výrobku se prepregy vytvrzují v autoklávech za zvýšené teploty a tlaku [2], [5], [10].

### 3.2.3 Polymerní matrice

Polymerní matrice se dělí na dvě hlavní kategorie, matrice z reaktoplastů (termosetů) a matrice z termoplastů. Nejdelsí tradici mají reaktoplastové matrice z pryskyřic na bázi nenasyčených polyesterů (UP-R) a epoxidů (EP-R). Především proto, že se s nimi snadněji pracuje a snadněji smáčejí a prosycují vlákna. To je dáno jejich nižší viskozitou a tekutostí ve výchozím stavu při normální teplotě. Teprve až po přidání katalyzátorů

a urychlovače se pryskyřice začnou vytvrzovat a kompozit tak nabude svých konečných vlastností [2], [5].

### Reaktivní pryskyřice

Za normální teploty jsou nízkoviskozní, takže dobře smáčejí a prosycují vlákna výztuže. I proto se jedná se o nejčastěji používané reaktoplastové matrice. Znamé také pod jmény *licí*, *laminační*, *impregnační*, *prosycovací* nebo *zalévací*. Tyto kapalné nebo tavitelné pryskyřice se vytvrzují samostatně nebo pomocí tvrdidel (iniciátorů, katalyzátorů, urychlovačů, aldehydů apod.). Vytvrzování, během kterého prochází pryskyřice různými stavy, je spojeno s exotermní reakcí, zvýšením viskozity a smrštěním. Pro dosažení dobrých vlastností materiálu je většinou nezbytné úplné vytvrzení.

Mezi nejdůležitější typy patří:

- **Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP-R)** – levné, spolehlivé, variabilita při zpracování, velké smrštění při zpracování (6 až 9%), náročnost na životní prostředí (ŽP),
- **Vinylesterové (VE-R) nebo fenakrylátové (PFA-R) pryskyřice** – ve srovnání s UP-R jsou houževnatější a dražší, odolávají korozi, variabilita, náročné na ŽP,
- **Epoxidové pryskyřice (EP-R)** – 3x až 4x dražší než UP-R, vhodná pro vysokopevnostní (uhlíková) vlákna, dobrá adheze (lepidlo), delší vytvrzovací doba, vyšší rozsah tepelné odolnosti,
- **Fenolytické pryskyřice** – nehořlavost, nízký podíl na celkové výrobě, ztížené zpracování, vysoce tepelně a chemicky odolné a tvarově stálé,
- **Metakrylátové pryskyřice (MA-R)**,
- **Izokyanátové pryskyřice.**

### Termoplasty

Za normální teploty jsou to pevné látky a musí se tedy nejprve zahřát na teplotu (většinou) nad 200 °C, aby se staly dostatečně tekuté. Na rozdíl od reaktivních pryskyřic se špatně spojují lepením, což zhoršuje možnost oprav. Jsou málo až středně odolné proti stárnutí.

Podle vyztužení se rozlišují na termoplasty:

- **vyztužené krátkými vlákny** – používají se jen pokud nelze dosáhnout lepších vlastností jiným způsobem,
- **vyztužené dlouhými vlákny** – výhody při zpracování, nižší surovinové náklady, houževnatější materiál a odolnost proti poškození, ale např. špatná kvalita povrchu, nízká tvrdost nebo špatná přilnavost nátěrů,
- **vyztužené nekonečně dlouhými vlákny** – rohože, tkaniny nebo jednosměrné pásy.

### 3.2.4 Sizing (finiš)

Základním předpokladem optimálního přenosu všech působících sil na vlákna je dobré spojení mezi vláknem a matricí. A jelikož se polymerní matrice liší svým chemickým složením od většiny výztuží, je žádoucí opatřit výztuž předúpravou apreturou pro optimální spojení těchto dvou složek.

U uhlíkových vláken používáme sizing, podobně jako u skleněných vláken, ze dvou hlavních důvodů. Prvním je ochrana vláken před poškozením a zlepšení manipulace s těmito velmi jemnými vlákny (většinou 5 až 7  $\mu\text{m}$ ) tím, že budou lépe držet pospolu v pramenci. Druhým důvodem je zajištění kompatibility vytvrzovacího procesu vláken opatřených sizingem s pryskyřicí použité matrice. Sizingem se vlákna opatřují hned při výrobě, aby byla při následném transportu a manipulaci vlákna lépe ochráněná.

Oproti sizingu u skleněných vláken, kde je zapotřebí organosilanů k vytvoření spojení mezi sklovinou a polymerem, je sestavování sizingu pro uhlíková vlákna podstatně jednodušší. Léta se ve spojení uhlíkových vláken a epoxidových pryskyřic dokonce nepoužíval sizing vůbec. Epoxidová pryskyřice je zákonitě „lepivá“, a proto smáčí organická uhlíková vlákna docela dobře. To ale neplatí pro všechny termosety ani termoplasty. V současnosti se pro epoxidové pryskyřice používá sizing obsahující epoxid a pro termoplasty sizing z polyuretanu. Adhezi vláken zlepšuje také oxidace [2], [11].

## 3.3 Způsoby výroby vláknových kompozitů s polymerní matricí

Způsoby výroby vláknových kompozitů, které jsou uvedeny v této kapitole, přímo nesouvisí s tématem práce, ale jsou zde uvedeny pro ucelený přehled čtenáře.

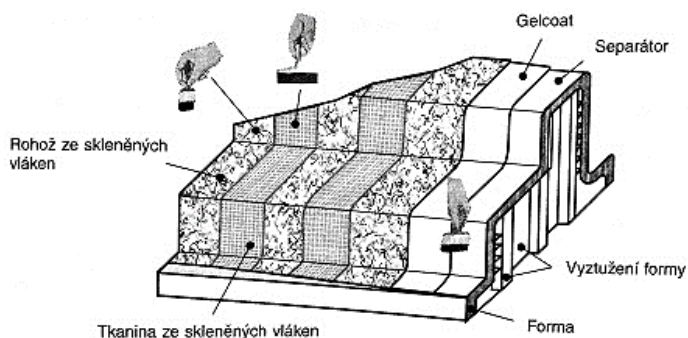
### 3.3.1 Způsoby výroby vláknových kompozitů s matricí z termosetické pryskyřice

Tato podkapitola byla vytvořena pomocí následujících bibliografických zdrojů: [1], [2], [5], [10]

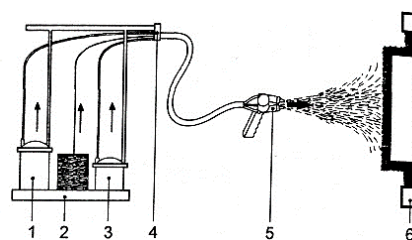
Tyto způsoby lze rozdělit podle stupně automatizace. Výroba zahrnuje přípravu pryskyřic, prosycení vláken pryskyřicí, tvarování polotovaru a následné vytvrzení s případným dodatečným opracováním.

#### Ruční kladení

Proces někdy nazýván i kontaktním lisováním. Tento nejstarší a nejjednodušší výrobní postup se sestává z postupného nanášení pryskyřice a výztuže na povrch formy (ta může být pozitivní i negativní). Je vhodný především pro malé série a velkoplošné díly a neocenitelný pro prototypovou výrobu. Kvalita výsledného povrchu se odvíjí od kvality povrchu formy a od zkušeností zpracovatele. Nevšedností této metody je, že pouze jedna strana výrobku může dosáhnout kvalitního povrchu.



Obr. 7 – Postup ručního kladení [2]

Obr. 8 – Schéma stříkacího  
zařízení: 1-pryskyřice s  
urychlovačem, 2-roving, 3-tvrdidlo,  
4-zdvihadlo, 5-stříkací pistole s  
řezačkou a dvěma tryskami, 6-forma  
[5]

Postup výroby je zobrazen na Obr. 7. Na příslušnou formu se položí separátor (např. separační fólie) a nanese první vrstva pryskyřice. Dále se postupně přidávají vlákna výztuže (nejčastěji ve formě tkanin nebo rohoží) a další nánosy pryskyřice pro dosažení požadované tloušťky výrobku. Pryskyřice se do výztuže zapracovává pomocí válečků, aby se vlákna co nejlépe smočila a nasákla pryskyřicí. Zároveň se válečkem vytlačují vzniklé vzduchové bubliny, které by jinak mohly po vytvrzení působit jako vruby iniciující vznik trhlin.

#### Výčet výhod (+) a nevýhod (-) tohoto způsobu výroby:

- + jednoduché a levné výrobní pomůcky,
- + teoreticky neomezené tvarové a rozměrové možnosti výrobků,
- + jednoduché dokončovací operace,
- náročné na mzdové prostředky (ruční práce),
- nízká produktivita.

#### **Strojní stříkání**

Jedná se o částečně mechanizovaný způsob výroby ručním kladením. Sestává se z ručního nebo strojního nanášení směsi pryskyřice a nasekaných vláken výztuže pomocí tlakového vzduchu na naseparovanou formu (Obr. 8). Je vhodný pro malé série, velkoplošné díly nebo nanášení povlaků. Po nanesení jedné vrstvy se pro odstranění přebytečné vrstvy pryskyřice provádí válečkování.

#### Výčet výhod (+) a nevýhod (-) tohoto způsobu výroby:

- + automatizací řízení stříkací hlavy lze dosáhnout rovnoměrného rozložení a tím i tloušťky výrobku,
- + nízká cena zařízení,
- + při automatizaci je poměrně dobrá produktivita,

- horší vlastnosti materiálu,
- bez automatizace jsou poměrně velké náklady na kvalitní obsluhu.

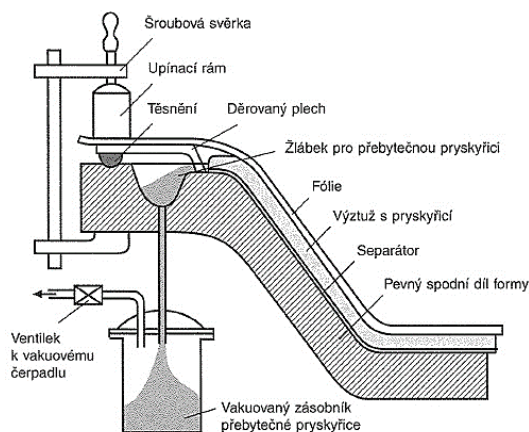
### Nízkotlaké lisování – vakuovaný vak, tlakový vak, autokláv

**Metoda** lisování pomocí **vakuovaného vaku** (Obr. 9) je prakticky jen zlepšení poslední fáze ruční výroby – vytvrzování. Na ručně nakladený kompozit se položí separační fólie a hrubá odsávací tkanina. Nakonec se forma utěsní pomocí fólie a vývěvou se začne odsávat vzduch. Atmosférický tlak způsobí vytlačení bublin a přebytečné pryskyřice. Touto metodou už lze dosáhnout hladkého povrchu z obou stran.

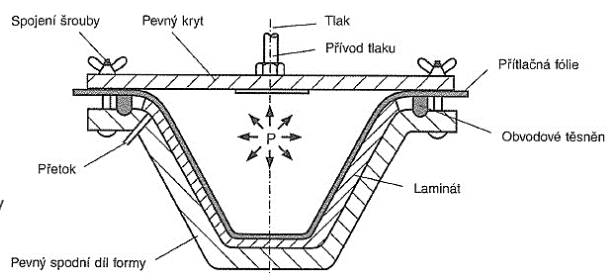
Výčet výhod (+) a nevýhod (-) tohoto způsobu výroby:

- + výsledný kompozit s minimem bublin,
- + dosažení vyššího obsahu výztuží,
- + zachovány výhody ručního kladení,
- pomalý proces,
- okraje mohou být zarovnané až po vytvrzení, což zdražuje proces.

**Metoda** lisování pomocí **tlakového vaku** (Obr. 10) je v podstatě obrácená varianta předchozí technologie. Forma musí být zakrytována tak, aby bylo možné dosáhnout rovnoměrného přetlaku. **Výhody a nevýhody** viz předchozí. Navíc je zapotřebí stabilnější formy a tlakový pytel je dražší. Lze dosáhnout ale ještě lepšího zhuštění materiálu.

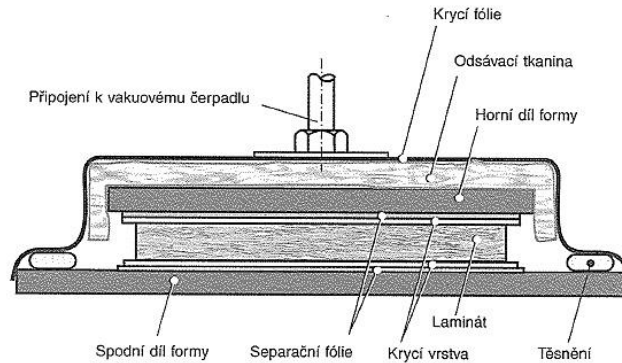


Obr. 9 – Vakuová technologie za použití jednodílné formy [2]



Obr. 10 – Lisování tlakovým vakem v jednodílné formě [2]

**Metoda** lisování v **autoklávu** (Obr. 11) je de facto (z *lat.* v *praxi/ve skutečnosti*) spojení předchozích dvou metod. Autokláv je vyhřívaná tlaková nádoba s přesnou regulací teploty. Použití v letectví, kosmonautice a vrcholových disciplínách motorsportu.



Obr. 11 – Lisování v autoklávu [2]

**Výčet výhod (+) a nevýhod (-) tohoto způsobu výroby:**

- + další zvýšení obsahu výztuží a z toho plynoucí vysoká kvalita,
- + více součástí najednou v jednom autoklávu,
- vysoká cena autoklávu,
- dražší formy,
- velikostní omezení výrobků velikostí autoklávu.

**Technologie RTM/RIM**

Jedná se o výrobu injekčním vstřikováním, při které se díl vyrobí v jednom kroku. Nejprve je vláknový polotovar umístěn ve dvoudílné uzavřené formě do požadovaného tvaru a pak je pod tlakem prosycen nízkoviskózní pryskyřicí. Dále následuje vytvrzení za zvýšené teploty. U technologie RTM je navíc přítomno lisování a složky se před vstřikováním mezi sebou mísí. Zato u technologie RIM se složky skládají odděleně a mísí se až ve formě a tím je možno dosáhnout výrazného zkrácení výrobního cyklu. Vhodná technologie pro středně velké série.

**Výčet výhod (+) a nevýhod (-) tohoto způsobu výroby:**

- + díly mají dobrý povrch po obou stranách,
- + nástroje mohou být z plastů,
- nutnost drahých a těžkých kovových forem.

**Lisování SMC**

SMC díly se zpracovávají převážně na hydraulických lisech za zvýšené teploty. Díky použití ocelových forem s vyleštěným pochromovaným povrchem lze dosáhnout velmi dobré výsledné kvality povrchu. SMC polotovar obsahuje, stejně jako např. prepregy, dlouhá vlákna, a proto je tato technologie vhodná pro výrobu velkoplošných dílů z dobrými mechanickými vlastnostmi.

**Výčet výhod (+) a nevýhod (-) tohoto způsobu výroby:**

- + příznivá cena,
- + dobré mechanické vlastnosti (vysoké pevnosti v tahu a ohybu, elektrická pevnost),



- + korozivzdornost,
- + tvrdost a snadná úprava povrchu (oproti termoplastům),
- relativně křehké lomové chování.

### Pultruze

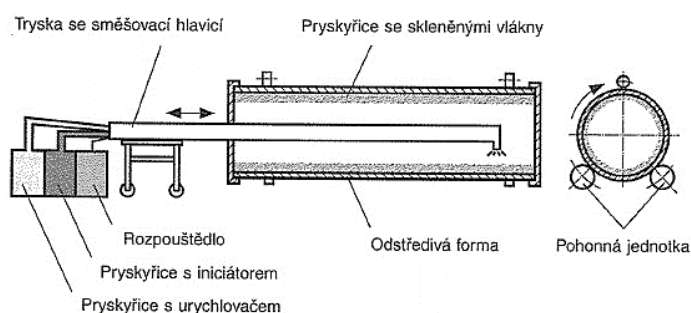
Patří mezi nejstarší technologie výroby vláknových kompozitů. Jedná se o relativně dlouhou linku, na které se svazek vláken nejprve namočí do pryskyřičné lázně. Dále putuje do tvarového průvzlaku, kde zároveň s tvarováním probíhá i vytvrzování. Proto je nutné použití reaktivních pryskyřic, aby byl za průvzlakem výrobek tvarově stálý.

#### Výčet výhod (+) a nevýhod (-) tohoto způsobu výroby:

- + velmi dobré vlastnosti,
- + prakticky neomezené možnosti průřezů, nekonečně dlouhé profily,
- + vysoká produktivita při současně nízkých nárocích na lidskou práci,
- + vysoká automatizace,
- velké pořizovací náklady,
- drahý provoz.

### Odstředivé lití

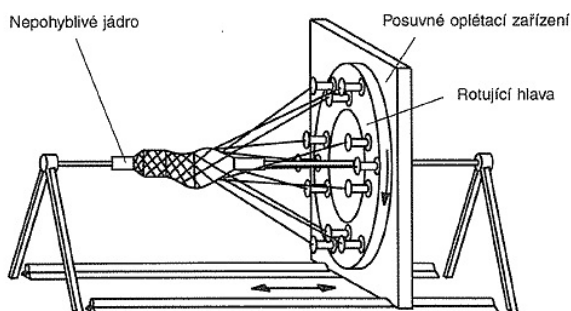
Metoda tentokrát převzatá ze slévárenského průmyslu. Výztuž se do formy vkládá předem nebo společně s pryskyřicí tryskou (Obr. 12). Celá forma pak rotuje a tím vzniká odstředivá síla. Vhodná technologie pro střední a velkosériovou výrobu rotačně symetrických těles s hladkým vnějším povrchem.



Obr. 12 – Metoda odstředivého lití [2]

### Technologie ovíjení a pletení

Jedná se o technologii převzatou z textilního průmyslu, jejíž princip spočívá v pokládání výztuže z posuvného oplétacího zařízení rotující hlavou na statické jádro (Obr. 13). Na jádru se tak vytvoří struktura podobná tkanině. Jde ale o technicky velmi náročný způsob výroby. Odrazujícím faktorem může být také vysoká pořizovací cena zařízení.



Obr. 13 – Technologie oplétání [2]

### 3.3.2 Způsoby výroby vláknových kompozitů s matricí z termoplastické pryskyřice

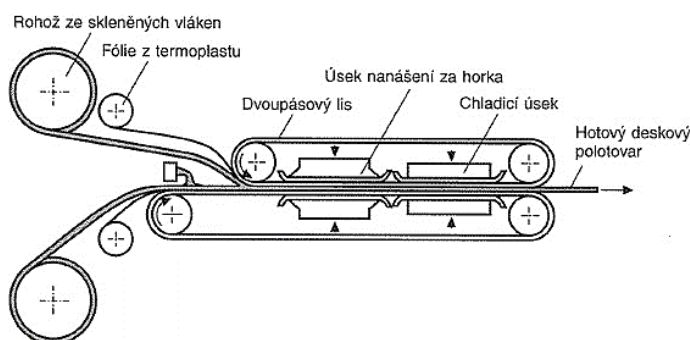
Termoplastická matrice se začíná stále více a více využívat.

Následují její **výhody (+)** a **nevýhody (-)** oproti termosetům:

- + vykazují vyšší houževnatost,
- + zlepšení hygienických podmínek,
- + lepší recyklace,
- + prakticky neomezená doba skladování bez chlazení,
- + krátká doba zpracování (bez chemického vytvrzování),
- nižší modul pevnosti v tlaku,
- vyšší sklon k tečení,
- obtížné prosycování kvůli vyšší viskozitě,
- vyšší teploty a tlaky při zpracování.

#### Lisování GMT

Desky z GMT se zhotovují spojováním skelných rohoží s krátkými vlákny a termoplastických fólií. Postup výroby je následující: nejdříve přichází ohřev na teplotu tavení termoplastu, následuje lisování (ve formách nebo s přetlačováním) a nakonec ochlazení (Obr. 14). Lze dobře automatizovat [2], [5].



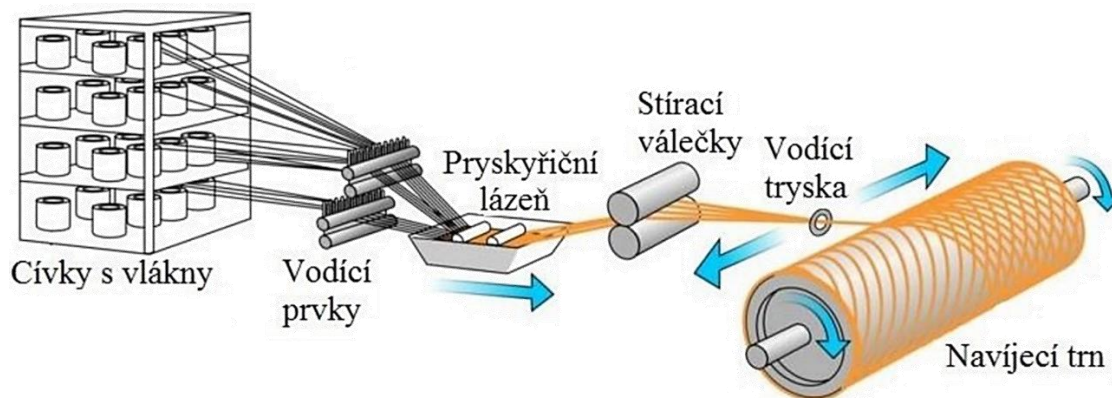
Obr. 14 – Výroba na dvoupásovém lisu [2]

## LFT

Jedná se o termoplasty vyztužené dlouhými vlákny. LFT se zpracovávají technologií vstřikování, při kterém se nejprve vyrobí granulát LFT (pultruzí nebo extruzí) a následně jde výlisek na lisovstřikování. Používají se hlavně v automobilovém průmyslu, kde v porovnání s nevyztuženými plasty dosahují vysokého poměru tuhosti k hmotnosti (měrná tuhost) a dobré odolnosti proti nárazu [2], [5].

### 3.4 Technologie přesného navíjení (Filament Winding)

Jedná se o velmi přesnou metodu výroby kompozitů s reaktivní pryskyřicí. Sestává se z odvíjení rovingu z cívky, jeho následném namáčení do pryskyřice a návínu na navíjecí trn pod příslušným úhlem (Obr. 15). Navíjení je docíleno rotační navíjecího trnu a lineárního posunu suportu, který zajišťuje dosažení příslušného úhlu navíjení. Po samotném navíjení následuje vytvrzování v peci za zvýšené teploty. Po vytvrzování se z výrobku odejme vnitřní forma, většinou pomocí speciálních vytahovacích zařízení. Vhodné pro velkosériovou výrobu osově symetrických dutých těles (trubky, hřídele, tlakové nádoby, nádrže) [2], [5], [10].



Obr. 15 – Schéma metody přesného navíjení [1]

#### Výčet výhod (+) a nevýhod (-) tohoto způsobu výroby:

- + použití nejlevnější formy výztuže – rovingu,
- + relativně vysoká produktivita a automatizace,
- + přesnost, vynikající mechanické vlastnosti,
- vysoká pořizovací cena stroje,
- nesnadné odstraňování vnitřních forem.

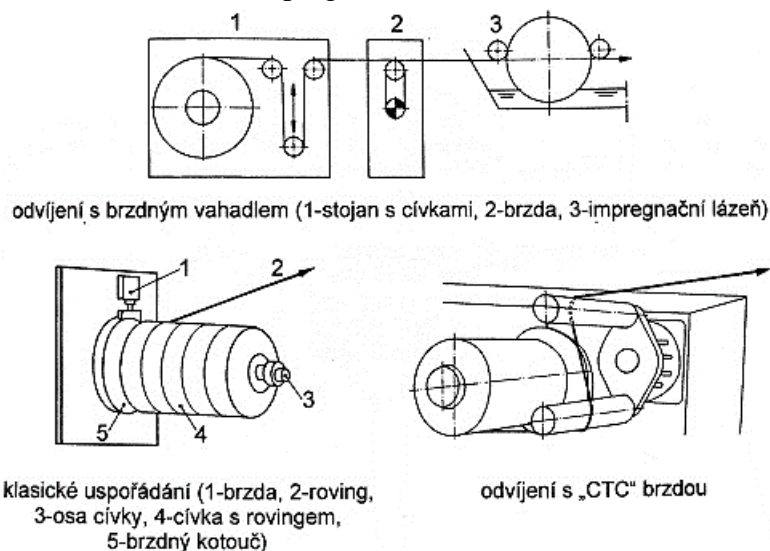
Tato zařízení lze rozdělit na systém přísunu a napínání vláken, systém smáčení vlákna, systém řízení úhlu návínu a vlastní navíjecí stroje a trny. Jednotlivé části jsou dále podrobněji popsány.

## System přísluvu na napínání vláken

Vlákna jsou odvíjena z cívek zakoupeného rovingu, které jsou vhodné pro tři způsoby odvíjení: vnější svislé, vnější vodorovné a vnitřní. Dále se při odvíjení nastavuje příslušné předpětí rovingu dle typu navíjené součásti.

U **vnějšího odvíjení** vzniká rotací cívky tření, a to způsobuje změny momentu a tím i napnutí vlákna. Pro lepší vypořádání se s těmito změnami, se cívky přibrzdňují. Na trhu existuje několik řešení, např.: odvíjení s CTC brzdou (Obr. 16 vpravo dole), odvíjení přes brzdové vahadlo (Obr. 16 nahoře), odvíjení motorem s plynulou regulací otáček, odvíjení napínací jednotkou (Obr. 16 vlevo dole). Při odvíjení s CTC brzdou je cívka nasazená na hřídeli s brzdícím kotoučem a roving je protáhnutý přes zabudované vahadlo s nastavitelnou pružinou. Síla pružiny napíná vlákno a uvolňuje brzdou systému. Při odvíjení přes brzdové vahadlo lze libovolně měnit délku ramena vahadla a podstatně jemněji tím regulovat napětí vlákna.

U **vnitřního odvíjení** se roving při vytahování z cívky sám kroučí (cca 3x až 5x na metr), což umožňuje rychlé navíjení. Zároveň ale nejsou všechna vlákna rovnoměrně namáhána a také dochází k horší impregnaci.



Obr. 16 – Principy napínání rovingu [5]

## System smáčení vlákna

Toto zařízení musí být koncipované tak, aby optimálně prosytilo všechna procházející vlákna a zároveň zvládalo stírat přebytečnou pryskyřici. V praxi se používají tři způsoby: nálevka, lázeň a válečky. V případě lázně je vana navíc zahřívána pro zvýšení viskozity pryskyřice.

## System řízení úhlu návinnu

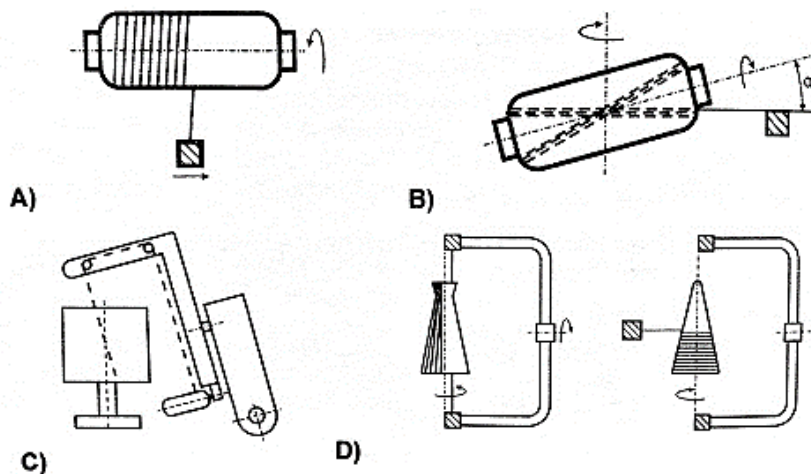
Pro optimální návinnu se forma ovíjí po tzv. geodetických křivkách. Jsou jimi nejkratší spojnice dvou bodů na zakřivené ploše, na kterou je možno bez tření položit vlákno, takže je roving poté namáhán pouze tahem (bez smyku). Lze navíjet i negeodetickými křivkami (např. pomocí drážek na trnu, lepivého trnu, kolíku, svěrek apod.).

V profesionálních navíjecích strojích je návin řízen softwarem přes počítač. Příslušného návinu je dosaženo změnami obvodové rychlosti navíjecího trnu (proměnná v čase) a rychlosti posuvu suportu s vodícím okem.

### Navíjecí stroje

Podle základních pohybů lze tyto stroje rozdělit na (Obr. 17):

- 1) **Stroje soustruhového typu** – nejrozšířenější a nejuniverzálnější, dokáží využít celý interval úhlu navíjení ( $0^\circ$  až  $90^\circ$ )
- 2) **Planetové stroje** – nižší úhel návinu ( $0^\circ$  až  $15^\circ$ ), vhodné pro součásti namáhané na krut (např. kardanové hřídele)
  - stroje s rotujícím ramenem,
  - stroje se šikmo uloženým trnem.
- 3) **Stroje systému „Strickland B“** - používá se jen velmi zřídka, a to pro navíjení kuželů podélným a obvodovým návinem zároveň



Obr. 17 – Typy navíjecích strojů: A) soustruhový, B) planetový se šikmo uloženým trnem, C) planetový s rotujícím ramenem, D) navíjecí stroj „Strickland B“ [5]

Stroje mohou konat ještě další pomocné pohyby zlepšující obsluhu. Produktivitu lze zvýšit přidáním dalších navíjecích trnů (jen pro krátké díly).

### Navíjecí trny

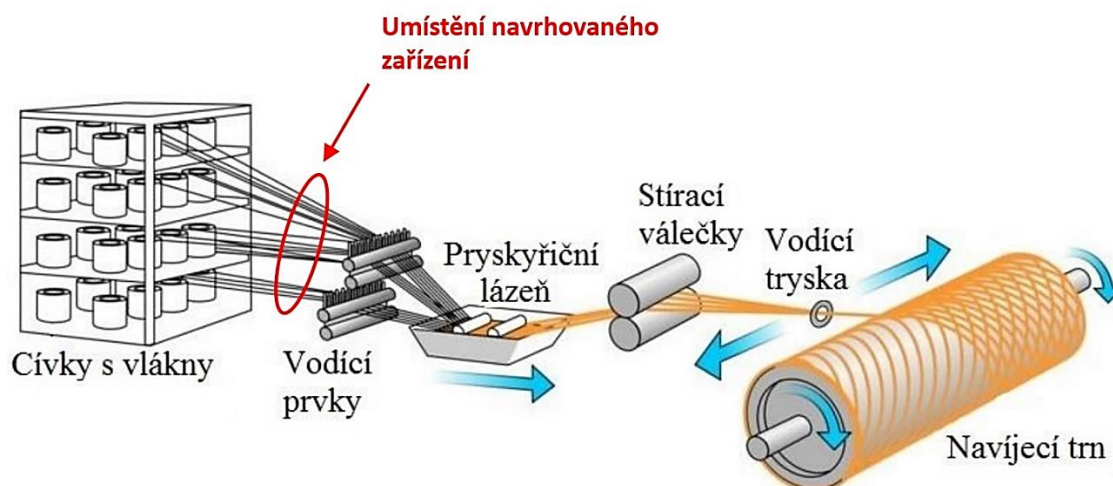
Navíjecími trny je převážně určen tvar navíjeného výrobku. Pro opakovaná použití se používají trny z hliníku nebo oceli. Pro složitější tvary se používají jednorázová tzv. ztracená jádra, převzatá z technologií slévání, nejčastěji tvořená z rozpustných solí, sádry, pěny, vosku, písku s rozpustným pojivem nebo nízkotajících kovových slitin. Trn může být složen i z více částí. Po vytvrzování se trny vytahují speciálními přípravky nebo lisami, proto je u výrobků bez požadavku na vnitřní válcovitost výhodné použít trn kuželový. Každopádně by všechny trny měly být broušené a leštěné s drsností povrchu maximálně  $0,4 \mu\text{m}$ . Další ulehčení stahování trnů spočívá v jejich nahřátí před nebo i při navíjení, protože jejich následným ochlazením po vytvrzení se smrští.

## 4 Současný stav problematiky

### 4.1 Rozbor řešeného problému

Výrobní technologie přesného navíjení, popsaná v předchozí kapitole, patří k velmi přesným metodám výroby kompozitů. Je při ní dosahováno vysoké kvality výrobků. Jedním ze způsobů ještě dalšího zlepšení už takto přesné metody výroby kompozitů, je možnost mít větší kontrolu nad vstupními parametry navíjeného svazku uhlíkových vláken, tedy **rovingu**. Od parametrů navíjeného rovingu se totiž odvíjí i parametry vyráběného dílu. Roving se zakupuje namotaný na cívkách v nerovnoměrném svazku (viz kap. 3.2.2).

Změnám parametrů (konkrétně snížení tloušťky a zvětšení šířky) se říká **spread rovingu** neboli rozprostření svazku vláken. Obecně je obtížné svazek vláken nějakým způsobem „zafixovat“, aby po spreadování přesně držel požadovaný tvar. Udržení tvaru do určité míry napomáhá sizing (viz kap. 3.2.4), ale i přesto se vlákna ve svazku mohou různě přeskupit nebo při následné manipulaci před navíjením zakroutit. Ve vlastním řešení bude třeba se zamyslet nad případnou fixací již upraveného svazku na výstupu ze zařízení. Zařízení zároveň bude z technologických důvodů umístěno ještě před jednotku pro smáčení vláken v pryskyřici, viz Obr. 18.



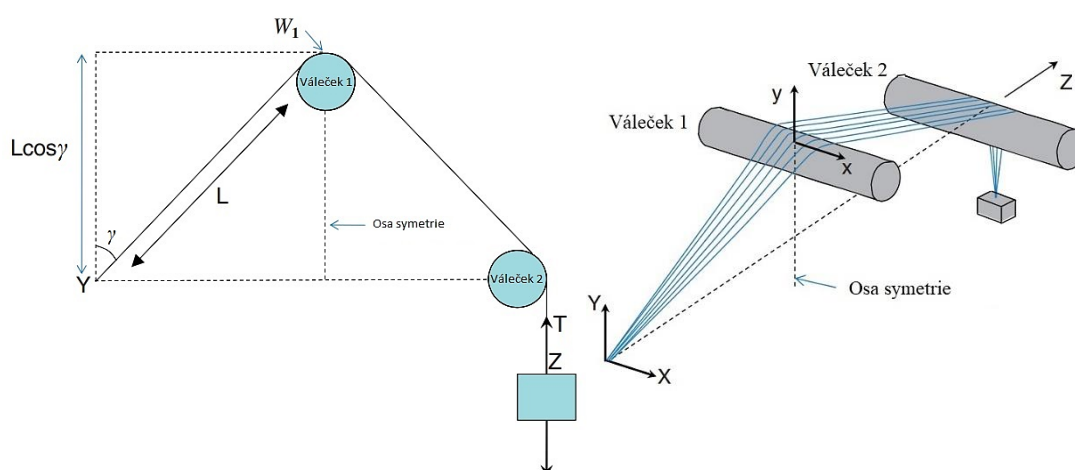
Obr. 18 – Schéma přesného navíjení s umístěním navrhovaného zařízení [1]

Spread současně napomáhá smáčení svazku v pryskyřici, protože svazek je tenčí a pryskyřice ho může lépe prosytit. Kompozity vyrobeny z tenčích svazků vláken mají zároveň lepší mechanické vlastnosti (statisticky mají kompozity z tlustších svazků v sobě více defektů) [14].

Současná řešení spreadovacích zařízení od různých výrobců budou dále uvedena v kap. 4.4. Při spreadování totiž hraje roli několik faktorů, které jsou detailněji popsány v následujících podkapitolách.

## 4.2 Mechanické spreadování

Jedním ze základních způsobů spreadu je spread svazku vláken prostým napínáním mezi válečky. Válečky jsou umístěny v příslušné geometrické konfiguraci, tj. jsou od sebe rozmístěny o danou horizontální a vertikální vzdálenost. Provlékutím rovingu mezi válečky se roving začne napínat pod různými úhly návinu a vzniká spread. Mechaniku tohoto jevu blíže popisuje tzv. Wilsonův model [15], pomocí kterého S. D. R. Wilson dokázal vyjádřit teoretickou šířku spreadu svazku. Wilsonův model vychází z experimentu, který lze znázornit schématem (Obr. 19):



Obr. 19 – Schéma Wilsonova experimentu; vlevo boční pohled, vpravo prostorový pohled [16]

Wilson vyjádřil teoretickou šířku spreadu svazku následující rovnicí:

$$W_1 = (12 \cdot A \cdot L \cdot \cos\gamma)^{\frac{1}{3}}, \quad (1)$$

kde  $W_1$  je teoretická šířka spreadu,  $A$  je plocha průřezu svazku,  $L$  je délka napínaného svazku a  $\gamma$  je úhel návinu.

Z rovnice (1) vychází, že pokud by byl konstantní součin  $L \cdot \cos\gamma$ , který můžeme označit jako vertikální vzdálenost válečků  $h$ , zůstane konstantní i spread. Nicméně, mezi jeho teoretickým předpokladem a experimentem byl 15 % rozdíl. Tento rozdíl byl připisován zanedbání tření a propletení vláken mezi sebou. Jeho model se však povedlo dále rozšířit výzkumníkům v čele s M. S. Irfanem [16]. Dokázali vyjádřit i teoretickou tloušťku svazku  $t_1$  pomocí následující rovnice:

$$t_1 = \left( \frac{9 \cdot A^2}{32 \cdot L \cdot \cos\gamma} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

Nicméně jak v případě Wilsona, tak v případě výzkumníků v čele s Irfanem, neprobíhaly experimenty na vláknech z uhlíku. V prvním případě se jednalo o vlákna z polyamidu a o bavlněnou přízi. V druhém případě testovali vlákna skleněná. Proto se dále bude vycházet převážně z experimentů pořízených A. A. B. Davijanim [12], které byly provedeny na rovingu z uhlíkových vláken značky TORAYCA, označené T300J. Tato vlákna se vlastnostmi velmi podobají vláknům T700S, na které bude zařízení

primárně navrhováno. Pro spread je hlavně důležité, že obě vlákna jsou vysokopevnostní (viz kap. 3.2.1), s totožným modulem pružnosti a průměrem. Pro srovnání jsou v Tab. 2 uvedeny vlastnosti obou typů vláken.

Tab. 2 – Srovnání vlastností vláken TORAYCA T300J a T700S [8], [12]

	<b>T300J</b>	<b>T700S</b>
<b>Průměr vlákna <math>d</math> [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	7	7
<b>Modul pružnosti v tahu <math>E</math> [MPa]</b>	230000	230000
<b>Mez pevnosti v tahu <math>R_m</math> [MPa]</b>	4210	4900
<b>Měrná hmotnost <math>\rho</math> [<math>\text{kg}/\text{m}^3</math>]</b>	1780	1800
<b>Prodloužení [%]</b>	1,8	2,1
<b>Počet vláken [-]</b>	3000	12000/24000
<b>Plocha průřezu <math>A</math> [<math>\text{mm}^2</math>]</b>	0,11	0,44/0,92

### 4.2.1 Parametry ovlivňující mechanický spread rovingu

V této podkapitole následuje shrnutí výsledků experimentů a matematických modelací z [12], ze kterých se bude mimo jiné vycházet při vlastním řešení. Experimentálně byly otestovány vlivy kroucení svazku, tření, sizingu, napnutí svazku a geometrie uspořádání válečků.

#### Zkroucení svazku

Nezkroucený svazek (výchozí roving), dosahoval nejvyšších hodnot spreadu. S narůstajícími zkrouceními svazku se spread zmenšuje. Tady nutno podotknout, že v případě vlastního řešení je žádoucí, aby byl roving nekroucený, jednak kvůli smáčení v pryskyřici, ale také z důvodů přesného navíjení.

#### Tření

Použity byly válečky s plošnou drsností  $Sa$  (aritmetický průměr posuzovaného topografického povrchu) mezi 0,231 až 0,493  $\mu\text{m}$  [12]. Plošná drsnost  $Sa$  je vyhodnocována z parametrů ve 3D prostoru, na rozdíl od známější profilové drsnosti  $Ra$ , která je vyhodnocována z parametrů pouze ve 2D prostoru [13]. Testoval se čistý povrch, povrch opatřený grafitovým práškem a nakonec povrch opatřený PTFE sprejem. Mezi těmito třemi stavy nebyl pozorován znatelný rozdíl v šířce spreadu.

#### Sizing

Porovnával se roving bez a se sizingem. Spread byl větší u rovingu bez sizingu. Zařízení bude navrženo pro roving se sizingem, protože se zakoupený roving dodává se sizingem (blíže v kap. 3.2.4). Zároveň je žádoucí ho ponechat pro další zpracování metodou přesného navíjení.

#### Napnutí svazku

Byly testovány konfigurace s 200 g, 400 g a 600 g závaží, přičemž mezi nimi nebyly pozorovány zásadní rozdíly ve spreadu ani trendy s přibývajícím zátěží. Tato závaží budou považována za postačující i pro vlastní řešení, neboť u metody přesného navíjení



nepůsobí na roving žádné vysoké tahové napětí. Jednak by to ovlivňovalo vlastnosti vyráběného dílu, který by tak byl po vyrobení v nezátženém stavu již pod počátečním předpětím. Také by to zbytečně zvyšovalo tření a tím pádem výkon nutný k navíjení, což zase navyšuje náklady.

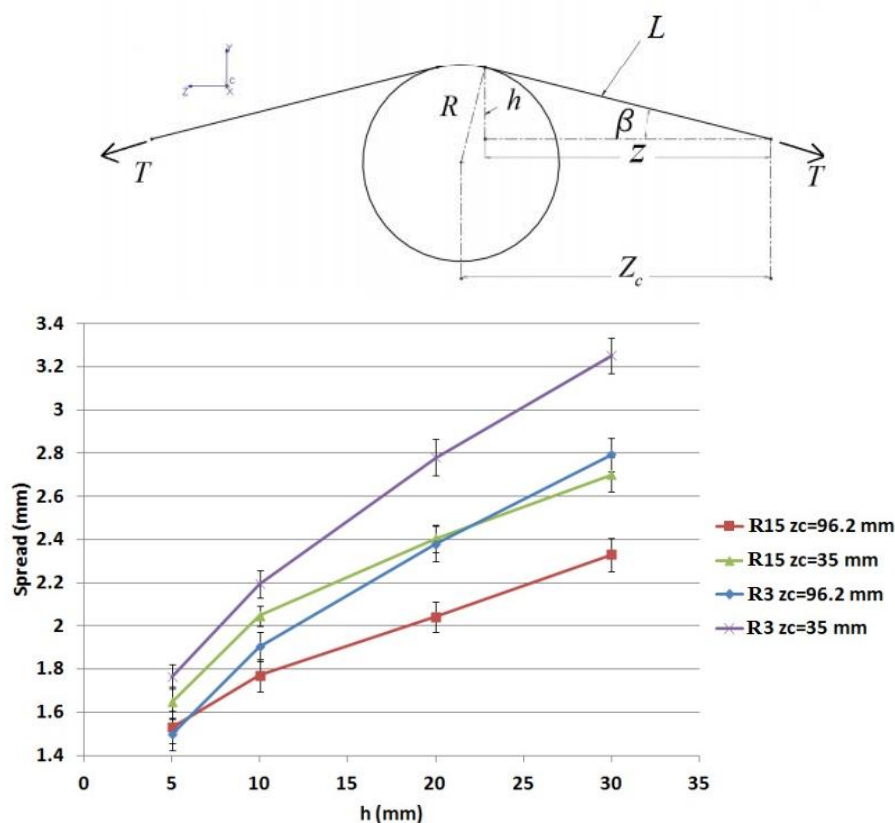
## Geometrie

Geometrie uspořádání válečků byla asi nejdůležitějším faktorem spreadu. Byly testovány válečky z hliníku s poloměry  $R=15$  mm a  $R=3$  mm. Geometrie je znázorněna na Obr. 20, kde platí:

$$\beta = 90 - \gamma \quad (3)$$

$$h = L \cdot \sin\beta = L \cdot \cos\gamma \quad (4)$$

$$z_c = \frac{L}{\cos\beta} \quad (5)$$

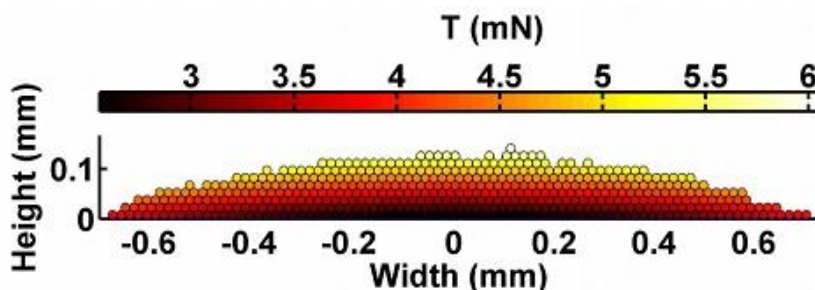


Obr. 20 – Schéma geometrie testované sestavy (nahore), naměřené hodnoty (dole) [12]

Naměřené hodnoty byly poté vyneseny do grafu (Obr. 20). Důležitým poznatkem je, že se zvyšujícím se  $h$ , se zvětšuje i spread, což je v souladu s Wilsonovým modelem.

Dále, že pouhou změnou  $z_c$  se nezmění charakter křivky (můžeme jednoduše předpokládat spread v závislosti na  $z_c$ ). Současně lze pozorovat, že zkrácením  $z_c$  se spread zvětší. Platí totiž, že zkrácením  $z_c$  se zvýší jak normálová složka, tak boční složka (působící v rovině spreadu) napínací síly. Čím vyšší boční složka, tím víc jsou vlákna ve svazku držena pohromadě a tím je těžší dosáhnou spreadu. Jelikož se obě složky zvětší stejně, měl by tedy spread zůstat konstantní. Avšak zkrácením  $z_c$  se zároveň zvětší

úhel  $\beta$ . To má za následek menší napnutí monovláken ve spodních vrstvách svazku dotýkajících se válečku oproti těm položeným v horních vrstvách na nich. Vlákna z horních vrstev jsou více napnutá, a proto mají tendenci se „tlačit dolů“, a tím způsobují spreadování rovingu. Gradient napětí je dobře vizualizován na Obr. 21, který vznikl pomocí metody diskretních prvků (DEM).



Obr. 21 – Vizualizace napětí jednotlivých monovláken spreadu pomocí DEM [12]

A nakonec je velice zajímavý vliv změny průměru válečku, kde u válečku  $R=3$  mm, tedy s menším průměrem, lze pozorovat rychlejší nárůst spreadu v závislosti na  $h$ , než u stejně umístěného válečku s větším poloměrem  $R=15$  mm. Tento jev je příkládán vlivu normálové síly na jednotku délky  $f_n$  (přitlačující svazek na váleček), která byla vyjádřena do rovnice (6)

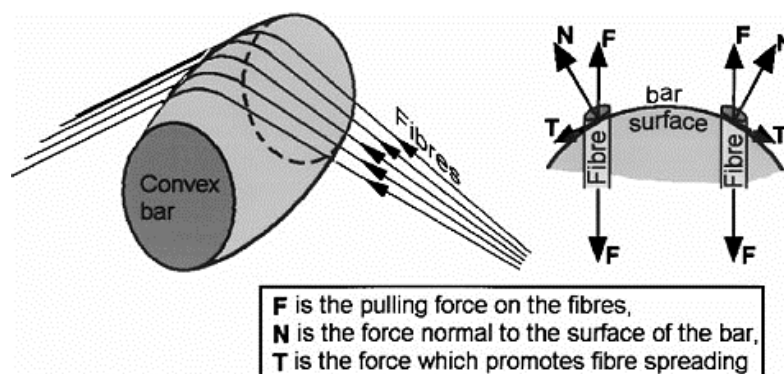
$$f_n = \frac{T_i}{R}, \quad (6)$$

kde  $T_i$  je síla napínající monovláknem  $i$ . Z toho lze jasně vidět, že při konstantní  $T_i$  a vyšším  $R$ , se  $f_n$  bude snižovat. V podstatě bude normálová síla působit na větší délku. Zároveň rovnice dokazuje, že tato normálová síla na jednotku délky monovláknem je nezávislá na úhlu návinu a závisí pouze na průměru válečku  $R$  a napínací síle  $T$  (na nekonečně malé kontaktní ploše). Ovšem v experimentech pro relativně malé napínací síly (cca 2 až 6 N) nebyly pozorovány znatelné změny velikosti spreadu, protože zvýšením napínací síly se stejně zvětší jak její normálová složka (podporující spread), tak boční složka (působící proti spreadu), což nevyústí ve spread (viz předchozí odstavec).

#### 4.2.2 Vlastnosti a možnosti mechanického spreadu

Metoda mechanického spreadu je charakteristická svojí technickou jednoduchostí, avšak nedosahuje vysokých rychlostí produkce. Putující roving dosahuje rychlostí maximálně do 25 m/min [17], jinak by se jednotlivá vlákna vysokým třením o nerotující válečky poškodila. Další limitací je maximální dosažitelná šířka spreadu, která je v nejlepším případě 3x šířky původního svazku. Je možno přidat zařízení pro zvýšení teploty, aby zahřál sizing a roving šel snadněji spreadovat.

Pro impregnaci vláken termoplastickou pryskyřicí, bylo zkonstruováno zařízení obsahující, místo válečků s válcovou plochou, válečky s plochou konvexní (Obr. 22). Profil konvexní plochy má dále napomáhat spreadu. Na obrázku je znázorněna síla napínající svazek  $F$ , normálová síla na plochu válečku  $N$  a síla podporující spreadování  $T$  [18].



Obr. 22 – Spread na konvexním válečku [18]

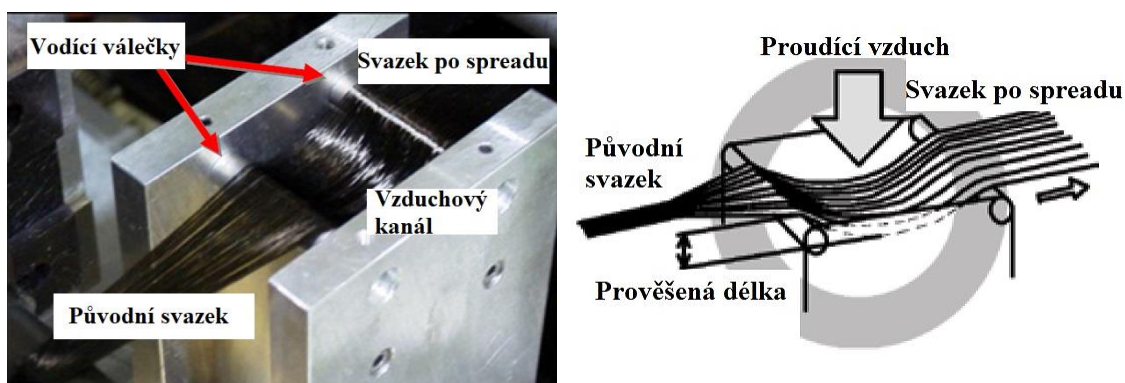
### 4.3 Další principy spreadování rovingu

Kromě mechanického spreadování pomocí napínání mezi válečky, existuje ještě několik dalších principů spreadování. Bude uvedeno spreadování pneumtické (pomocí proudícího vzduchu) a spreadování pomocí vibrací.

#### 4.3.1 Pneumatické spreadování

Teto způsob je charakteristický velkou maximální šířkou spreadu dosahující 6x až 7x původní šířky svazku [17]. Zároveň dochází k o mnoho menšímu poškození vláken díky velmi malému tření než v případně mechanického spreadu. Problémem může být sizing, který svou podstatou drží vlákna při sobě, a tak může být těžší je touto metodou od sebe spreadovat. To ale neplatí u termoplastických sizingů, které nejsou „lepivé“, a prakticky pak mezi sebou vlákna nemají žádnou adhezi.

Byly provedeny experimenty [19] na zařízení vyvinutém v Japonsku v Industrial Technology Center of Fukui Prefecture, kde bylo dosaženo spreadu jen něco málo přes 3x původní šířky svazku. Přesto toto zařízení bude využito k popisu principu pneumtického spreadování.



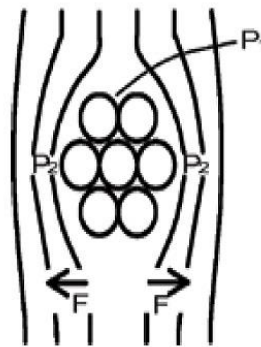
Obr. 23 – Zařízení na pneumtický spread [20]

Jak je z Obr. 23 patrné, vlákno putuje přes válečky, mezi kterými je umístěn vzduchový kanál, kterým je odsáván vzduch. Roving musí být co nejméně napnutý, aby

došlo prouděním vzduchu k prověšení, a vlákna se tak dostala do krátkého mezistavu bez jakéhokoliv napnutí. V tomto stavu je možné vlákna proudícím vzduchem velmi jemně a rovnoměrně spreadovat. Tento jev lze popsat Bernoulliho rovnicí z mechaniky tekutin:

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \bar{u}^2 + P = konst. , \quad (7)$$

kde,  $\rho$  je hustota kapaliny,  $u$  je střední rychlost proudění vzduchu,  $P$  je tlak a potenciální energie je zanedbána. Čím je vyšší rozdíl tlaků  $P_1$  (tlak uvnitř svazku) a  $P_2$  (tlak po stranách svazku), tím vyšší bude síla  $F$ , napomáhající spreadu (Obr. 24). Spread je poté možno regulovat buď rychlostí proudícího vzduchu nebo prověšením svazku, tedy jeho napnutím [20].



Obr. 24 – Znárodnění svazku vláken v proudu vzduchu [20]

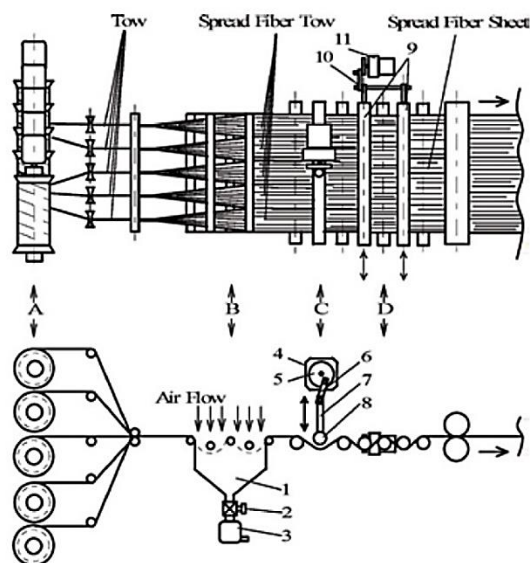
### 4.3.2 Spread za pomoci vibrací

Vibrací lze dosáhnout několika způsoby, vibrovat mohou samotné válečky nebo vlákno putuje tzv. ultrazvukovou lázní.

#### Vibrující válečky

Soustava je podobná soustavě s čistě mechanickým spreadem, tedy bez aktivních členů. Rozdíl je v tom, že jeden nebo více válečků kmitají regulovatelnou frekvencí. Výhodou je, že se tím sníží celkový počet válečků a případné nastavování šířky spreadu lze lépe automatizovat. Jelikož buzení vibrací probíhá ve směru spreadu, je dosaženo velmi dobré rovnoměrnosti.

Pro představu je přiloženo schéma zařízení, které navíc s vibracemi spojuje pneumatický spread a zpracovává velký počet cívek. V [20] je uvedeno, že takto spojené rovingy do tenkého plátna, jsou bez mezer mezi vlákny produkovány rychlostí 10 m/min nebo vyšší. Vibrační zařízení (*D*) na Obr. 25 se skládá z rotačních válečků (*9*) a klikového mechanismu (*10*), který je poháněn motorem s excentrickým čepem (*11*) [17], [20].

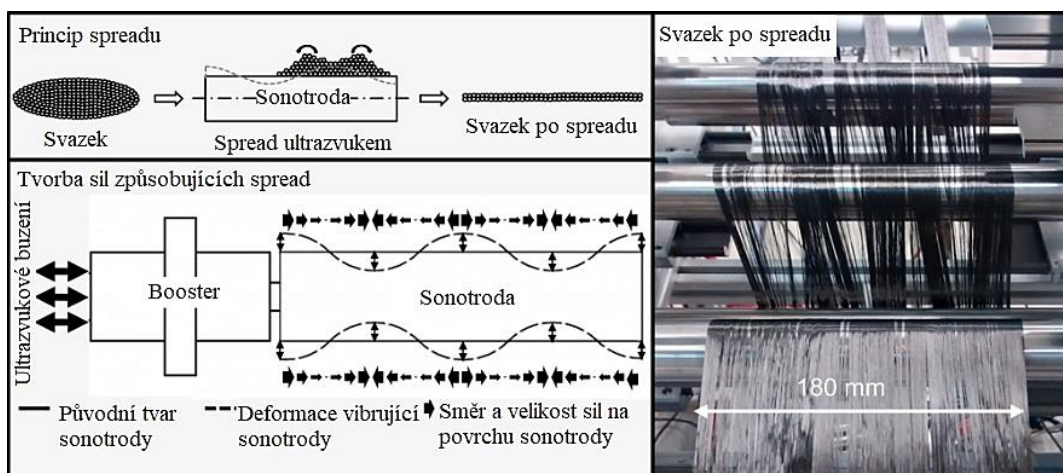


Obr. 25 – Schéma zařízení na spreadování několika cívek rovingu najednou [20]

### Ultrazvuková lázeň

Charakteristikou je stabilní šířka spreadu, vysoká rychlost proudícího vlákna (80 až 100 m/min) a z toho plynoucí vysoká produktivita. Nevhodná metoda pro skleněná nebo jiná vlákna citlivá na ultrazvukové frekvence, protože jsou moc křehká a mohla by se rozlámat. Je možné přidat ohřivací zařízení pro zvláčení sizingu a ulehčení spreadování. Z dostupných fotek (Obr. 26) je možné vypožorovat, že se mezi jednotlivými vlákny mohou vyskytovat mezery a svazek tak netvoří jedna souvislá vrstva, což není vhodné pro způsob výroby metodou přesného navíjení.

Na Obr. 26 je zobrazeno zařízení vzniklé ve spolupráci *EM-Systeme GmbH, Oberhausen* s *Institut für Textiltechnik (ITA) of RWTH Aachen University*, které pro spread využívá ultrazvukové sonotrody ve tvaru půlválce. Sonotroda je podélně buzena ultrazvukovými kmity, které v různých místech na jejím povrchu vytvoří síly s různou intenzitou působící v různých směrech. Působením těchto sil na roving vzniká kýžený spread [17], [21].



Obr. 26 – Spread ultrazvukovým buzením [21]

## 4.4 Analýza existujících zařízení na spread vlákna ve světě

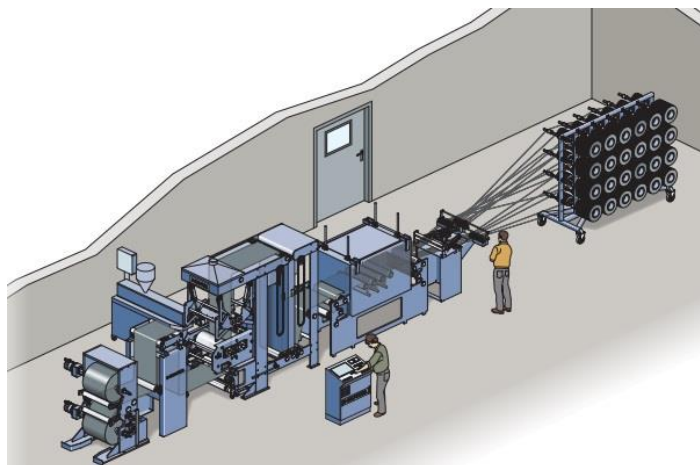
Zařízení na spread svazků vláken se začala objevovat počátkem toho tisíciletí. Zprvu nebyla konstruována za účelem prodeje kompletního zařízení, ale spíše jako vylepšení vlastního portfolia firem zpracovávajících uhlíková vlákna. To jim pomohlo k značné konkurenční výhodě.

Převážně se jedná o zařízení, které z několika cívek rovingu dokáže udělat velmi tenké plátno z uhlíkových vláken, bez mezer mezi monovláknky. Tato plátna se pak namotávají na cívky a prodávají, nebo se z nich vyrábí prepregy (viz kap. 3.2.2). Vyskytují se i zařízení, která rovnou takto spreadované svazky splétají (weaving) do tkanin s různými vzory, podle požadovaných vlastností tkaniny. Zjistit detailní informace o těchto zařízeních je velmi obtížné, protože výrobci si know-how velmi pečlivě střeží, aby si v tomto stále více konkurenčním prostředí udrželi nějakou výhodu.

Níže jsou uvedeni výrobci, kteří používají technologii spreadování pro výrobu výše zmíněných tkanin, pláten apod., ale nenabízejí takovýto stroj přímo k zakoupení. Patří k nim *Hexcel Corporation*, původem z USA. Tato firma třeba vyrobila i podložky pod nohy přistávacího modulu Apollo 11. Podnik pro velkovýrobu uhlíkových tkanin otevřela roku 2003. Další firmou je švýcarská *North Thin Ply Technology*, založená r. 2001 (r. 2016 otevřela i pobočku v Polsku). Následuje firma se základnou v USA, *Zoltek*, věnující se uhlíkovým vláknům (ze začátku skrze kosmické aplikace) již od roku 1988. Posledním z výčtu je švédská firma *Oxeon*, založena r. 2003, která produkuje uhlíkové kompozity pod značkou *TeXtreme*<sup>®</sup>. Ve zbytku této podkapitoly budou představeni výrobci nabízející zařízení na spread přímo k zakoupení [22], [23], [24], [25], [26].

### Lindauer DORNIER GmbH

Tato společnost založená r. 1950 v Německu nabízí systém pro výrobu pásek z vyztužujících vláken vysoké kvality (viz Obr. 27). Tyto pásky mohou být rovnou impregnovány v termoplastické pryskyřici nebo potaženy sizingem. Nabízí přesné nastavení šířky i tloušťky vyráběné pásky, spolehlivost, vysoký poměr spreadu, kvality a vysokou produktivitu. Systém je použitelný pro uhlíková (12K až 100K), aramidová,

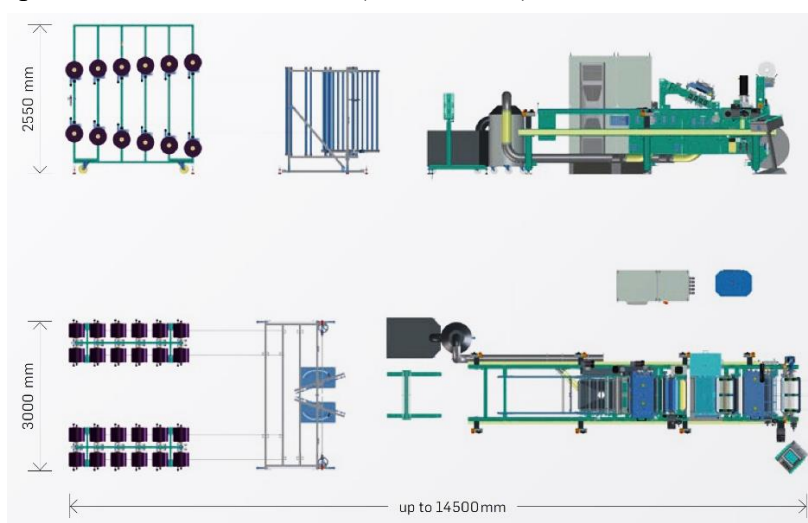


Obr. 27 – Schéma systému Lindauer DORNIER z katalogu [27]

skleněná, polymerová i přírodní vlákna. Pracovní šířka pásky je do 600 mm a rychlost proudících rovingů až 50 m/min. Dle této poslední informace je pravděpodobné, že se nejedná o pouhý mechanický spread a nejspíš jde o kombinaci vibrací a proudu vzduchu. Tyto informace výrobce ale neposkytuje. Zařízení dosahuje spreadu 2x původní šířky rovingu a výsledné pásky opatřeny sizingem mají tloušťku 0,04mm [27].

### Karl Mayer

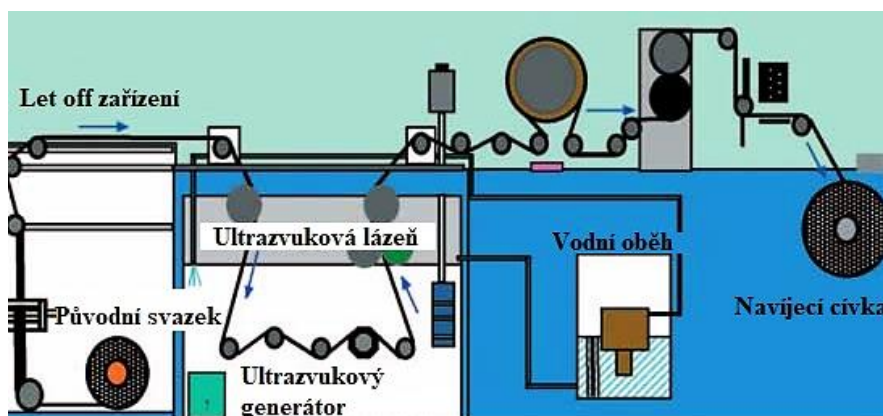
Další německá firma, založená r. 1937. V nabídce má dvě zařízení s názvy *UD500* a *UD700*, lišící se hlavně velikostí a maximální pracovní šířkou. Dále bude popsáno zařízení *UD500* (Obr. 28). Dosahuje vysoké kvality pásek, je modulární a spojuje více spreadovacích principů. Pracovní šířka (podle názvu) je 500 mm a zařízení je koncipováno pouze na uhlíková vlákna (12K až 60K) [28].



Obr. 28 – Schéma systému Karl Mayer z katalogu i s rozměry linky [28]

### Technomax Corp.

Tato japonská společnost, začala od r. 1995 prozkoumávat možnosti spreadování. Pustili se do vývoje spreadování ultrazvukem a po letech testování představili zařízení na principu ultrazvukové lázně (Obr. 29). Udávají spread 4x původní šířky svazku, pro 12K maximálně 30 mm, a pro 24K maximálně 45 mm. Dosahuje se velmi vysoké rychlosti



Obr. 29 – Schéma zařízení Technomax [29]

putujících vláken, až 100 m/min, šířka spreadu je stabilní v toleranci  $\pm 1$  mm. Vše je možno řídit softwarem na počítači [29].

### Harmoni Industry Co.,Ltd.

Další japonská firma, založena r. 1973. Zařízení na spread začala vyvíjet roku 1998, stroj byl patentován r. 2002. Zařízení s názvem *Single-tow Spreading Machine FK-2* pracuje na principu pneumatického spreadu (Obr. 30). Udávají spread 4x až 5x původní šířky svazku, konkrétně u 12K až na 100 mm, s přesností  $\pm 10$  % a rychlostí putujících vláken 20 m/min. Zařízení je použitelné pro uhlíková, skleněná, aramidová, keramická i kovová vlákna [30].



Obr. 30 – Spreadovací zařízení Harmoni Industry (vlevo), a) původní svazek, b) svazek po spreadu (vpravo) [30]

### T4L, Textile for Life Co.,Ltd.

Jihokorejská společnost založena r. 1999, má na výběr ze dvou spreadovacích zařízení, pro jednu cívku rovingu a pro několik cívek rovingu. Popsáno bude zařízení pro jednu cívku nazvané jako *Single Tow Spreading Machine* (Obr. 31). Udávají dosahovaný spread 4x až 5x původní šířky svazku (pro 12K maximálně 20 až 25 mm). Vhodné pro uhlíková,



Obr. 31 – Spreadovací zařízení T4L [31]



skleněná, aramidová a další vlákna. Rychlost proudícího svazku je 5 m/min a v principu jde o kombinaci teploty, zakřivení válečků a napínací síly. Rozměry zařízení jsou 730 x 1600 x 1500 mm (šířka x délka x výška) [31].

### **Izumi International, Inc.**

Jedná se o společnost založenou r. 1977 v USA, specializující se na uhlíková vlákna. Nabízejí stavbu nízkonákladového zařízení na míru, které je založené na principu mechanického spreadu s nerotujícími válečky opatřenými tvrdým chromováním (Obr. 32). Počet spreadovaných cívek je tedy na zákazníkově, stejně tak jako doplnění o zahřívací zařízení na zvládnění sizingu nebo různá monitorovací zařízení [32].



*Obr. 32 – Spreadovací zařízení Izumi International [32]*

## **4.5 Shrnutí existujících zařízení**

Všichni výše uvedení výrobci maximálně uvádějí princip, jakým dosahují spreadování, někdy ani to ne. Většinou se jedná o velká zařízení, až celé linky, dlouhé několik metrů. Až na výjimky jde o poměrně komplexní zařízení s náročností na znalost obsluhy. Nikdo neuvádí přesné popisy zařízení nebo detailní schémata. Proto bude v návrhových skicích použita pouze myšlenka principu spreadu a zbytek zařízení bude koncipován dle uvážení, s vyhověním zadání práce.

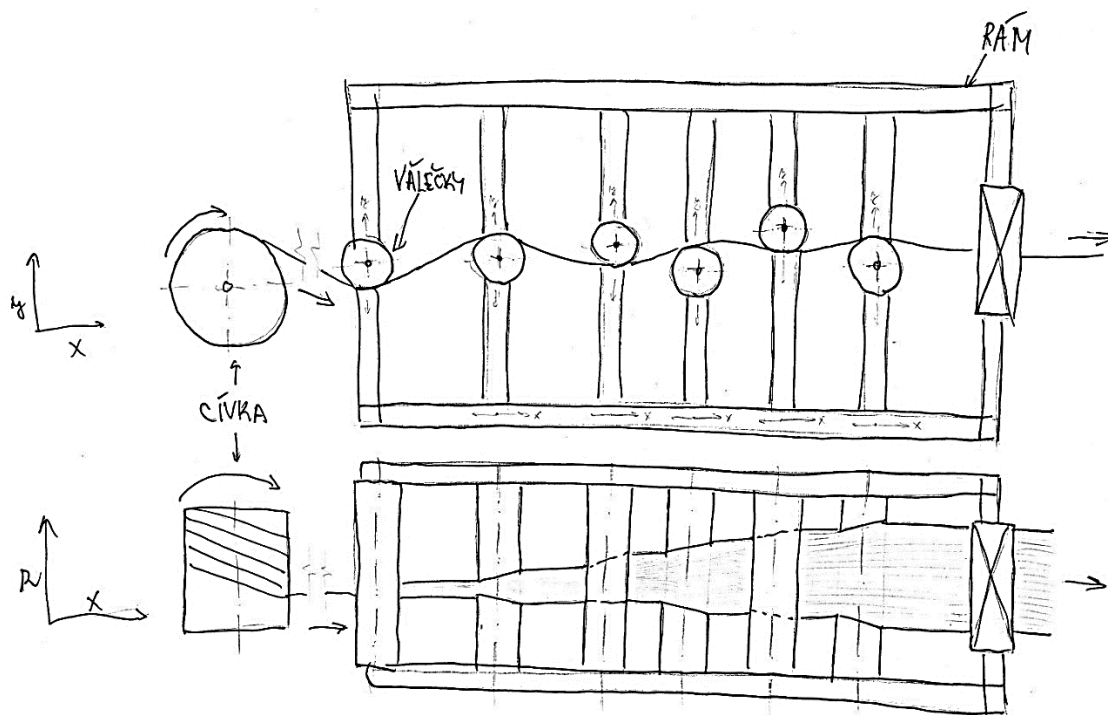
## 5 Vlastní řešení

### 5.1 Návrhové skici

Dle poznatků z rešerše a po konzultacích s odborníky z Compotechu bylo formou skic navrženo několik variant zařízení na úpravu parametrů svazku uhlíkových vláken. Všechna uvažovaná zařízení jsou oproti nalezeným existujícím zařízením kompaktní, mnohem jednodušší, velmi modulární a snadno nastavitelná. I když nejsou známy ceny nalezených zařízení, troufám si tvrdit, že navrhované zařízení bude i o mnoho levnější.

#### 5.1.1 Mechanický spread

V principu jde pouze o napnutí vlákna mezi nerotující válečky (pasivní – bez aktivních členů). Napnutí vlákna je zajištěno návínem na navíjecí trn na výstupu. Zařízení se sestává ze soustavy válečků umístěných na hliníkovém rámu (Obr. 33). Mezi válečky se odmotává svazek vláken z cívky. Polohu válečků je možno manuálně nastavovat jak vertikálně, tak horizontálně. Je možná úprava průměru válečku i výměna za válečky konvexní.

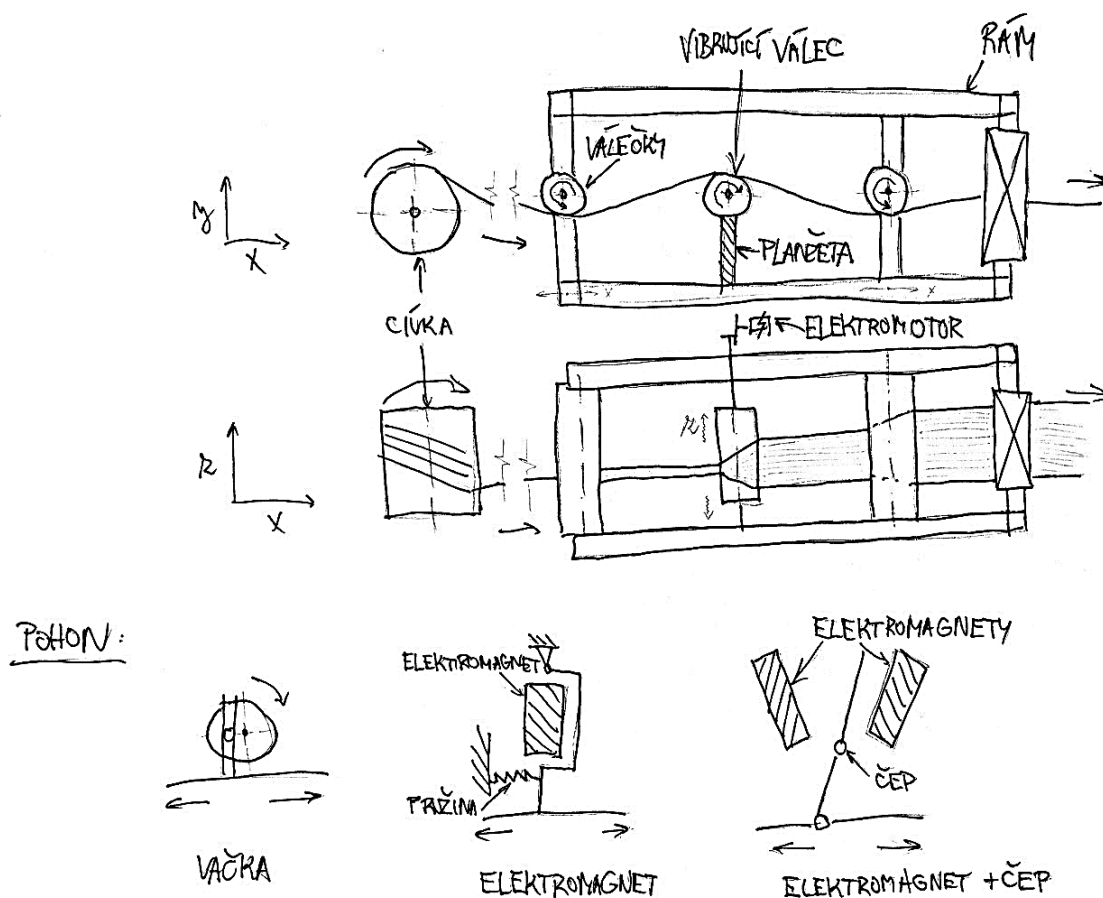


Obr. 33 – Návrhová skica zařízení na mechanický spread

#### 5.1.2 Spread za pomoci vibrací

Princip spreadu spočívá ve vibraci rotujícího válečku na planžetě. Napnutí vlákna je zajištěno návínem na navíjecí trn na výstupu. Zařízení se sestává ze soustavy rotujících válečků umístěných na hliníkovém rámu, z nichž jeden vibruje říditelnou frekvencí kmitů. Vibrace zajišťuje elektromotor s vačkou. Vibrace lze zajistit případně také

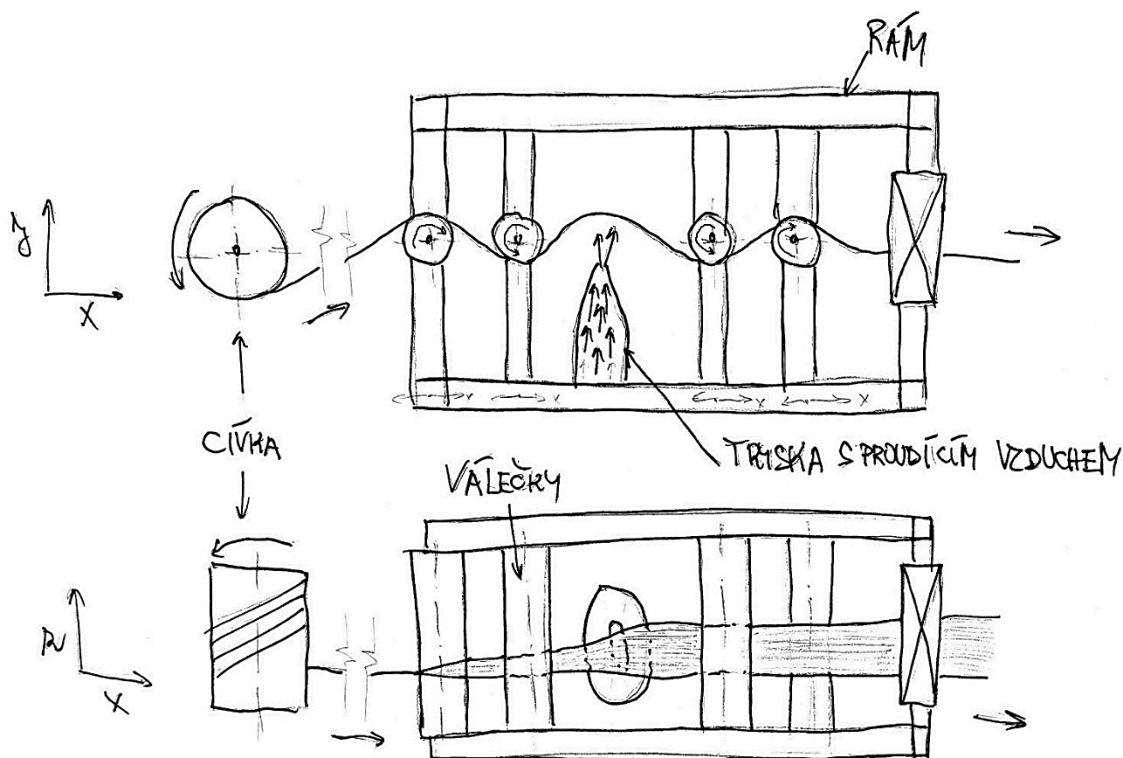
elektromagnetem (viz Obr. 34). Mezi válečky se odmotává svazek vláken z cívky. Polohu válečků je možno manuálně nastavovat jak vertikálně, tak horizontálně. Je možná úprava průměru válečku i výměna za válečky konvexní.



Obr. 34 – Návrhová skica zařízení na spread pomocí vibrací

### 5.1.3 Pneumatický spread

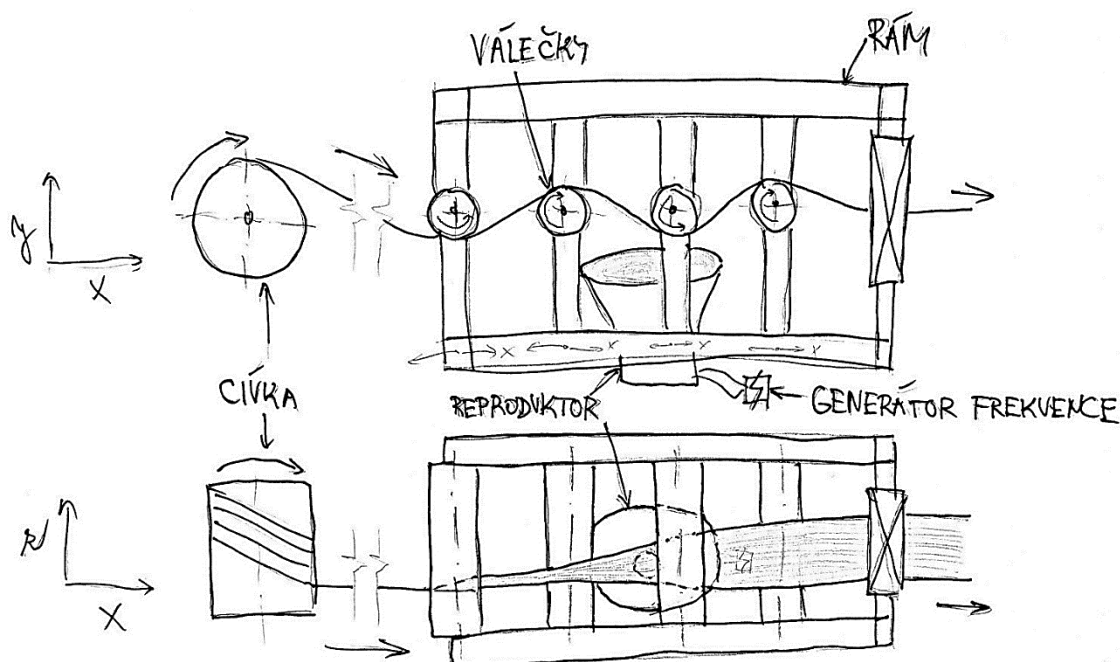
Principem je vhánění urychleného proudu vzduchu na proudící svazek vláken. Napnutí vlákna je zajištěno návinem na navíjecí trn na výstupu. Zařízení se sestává ze soustavy rotujících válečků umístěných na hliníkovém rámu, přičemž je mezi jeden pár válečků vložena tryska s proudícím vzduchem (nastavitelné), viz Obr. 35. Namísto trysky a stlačeného vzduchu je možné použít odsávání/vývěvu, pro případnou lepší montáž. Trysky lze umístit i dvě (proti sobě) pro změnu charakteristiky spreadu – bylo by nutné vyzkoušet. Mezi válečky se odmotává svazek vláken z cívky. Polohu válečků je možno manuálně nastavovat jak vertikálně, tak horizontálně. Je možná úprava průměru válečku i výměna za válečky konvexní.



Obr. 35 – Návrhová skica zařízení na pneumatický spread

#### 5.1.4 Spread pomocí zvukových vln

Ke spreadu dochází za pomoci zvukových vln vycházejících z reproduktoru. Napnutí vlákna je zajištěno návínem na navíjecí trn na výstupu. Zařízení se sestává ze soustavy rotujících válečků umístěných na hliníkovém rámu, pod kterými je umístěn reproduktor (Obr. 36). Do reproduktoru je posílán signál o regulovatelné frekvenci. Bylo by třeba odstínit reproduktor od okolí. Mezi válečky se odmotává svazek vláken z cívky. Polohu válečků je možno manuálně nastavovat jak vertikálně, tak horizontálně. Je možná úprava průměru válečku i výměna za válečky konvexní.



Obr. 36 – Návrhová skica zařízení na spread pomocí zvukových vln

## 5.2 Experimenty

Pro ověření funkčnosti a bližších vlastností jednotlivých způsobů spreadování použitých v návrhových skicích bylo provedeno několik jednoduchých experimentů s vysokopevnostními vlákny. Bylo třeba hlavně porovnat putování vlákna mezi nerotujícími válečky, rotujícími válečky a proudícím vzduchem. Zároveň bylo testováno i zahřátí svazku vysokou teplotou nebo spread na ostré hraně.

### 5.2.1 Ostrá hrana

Putováním svazku přes ostrou hranu kartonu bylo možné dosáhnout několikanásobného spreadu, ovšem při výměně kartonu za reálnější konstrukční materiál, železnou příčku, se svazek na hraně místo spreadu začal okamžitě třepit. To vše navíc při malých rychlostech putování vlákna.

### 5.2.2 Teplota

Co se týká teploty, ta měla pozitivní vliv na zvláčnění celého svazku, takže posléze ho bylo možno snadněji spreadovat. Bylo zjištěno, že teplota nemá zásadní vliv na absolutní možnou šířku spreadu, především je možné dosáhnout spreadu rychleji, tj. na kratší vzdálenosti. Při těchto testech byla použita horkovzdušná pistole *Steinel HL 2010 E*, kterou bylo nepohyblivé vlákno nahříváno v malé délce několik sekund, než se svazek zvláčnil (Obr. 37). To by při přesném navíjení, kde vlákno putuje vysokou rychlostí (až 60 m/min) znamenalo nutnost nahřívání svazek v poměrně dlouhé délce, aby bylo

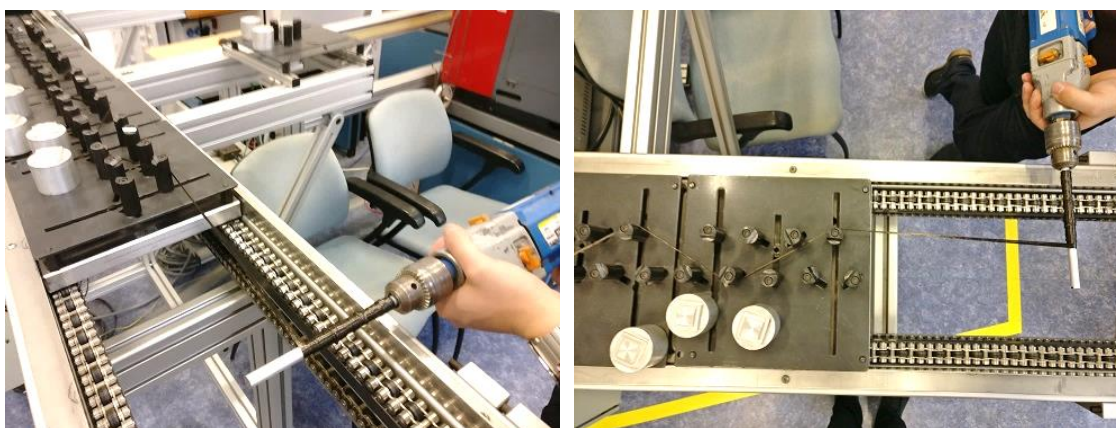
dosaženo požadovaného efektu nebo by působící teplota musela být podstatně vyšší než testovaná (250 °C).



Obr. 37 – Nahřívání svazku horkovzdušnou pistolí (vlevo), spread po nahřátí (vpravo)

### 5.2.3 Nerotující válečky

Svazek byl navíjen skrze soustavu nerotujících válečků na hliníkový váleček upevněný ve vrtačce (Obr. 38). Nerotujících válečků bylo osm, s průměry  $d=20$  mm. Bylo dosaženo spreadu 3x původní šířky, ale po bližším prozkoumání vyšlo najevo, že se svazek spreadoval hlavně na prvních 4-5 válečcích, poté už spread nebyl o mnoho větší – všechny tyto poznatky se shodují se znalostmi z rešerše. Navíc napnuté vlákno způsobilo velké tření, a proto by to nebylo vhodné řešení pro výrobu přesným navíjením (vlákna by se vysokým třením poškozovala).

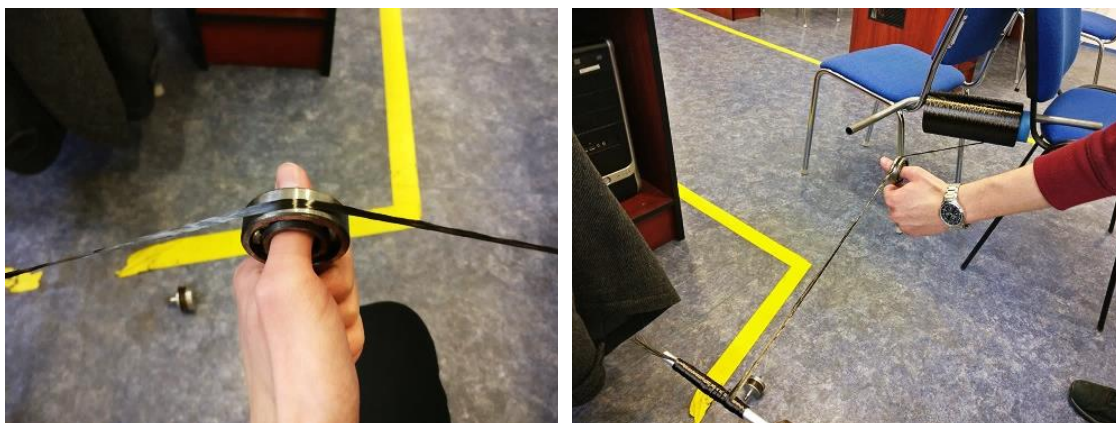


Obr. 38 – Navíjení rovingu na tyčku pomocí vrtačky mezi nerotujícími válečky

### 5.2.4 Rotující válečky

Svazek byl opět navíjen na hliníkový váleček upevněný ve vrtačce, tentokrát už jen přes jeden rotující váleček, o průměru  $d=50$  mm (Obr. 39). Nicméně i přes to, že byl váleček pouze jeden, bylo dosaženo spreadu cca 1,5x až 2x původní šířky. Lze tedy předpokládat, že navýšením počtu válečků by bylo možné dosáhnout požadované šířky spreadu. Zároveň se touto metodou výrazně sníží tření vláken, což je žádoucí pro metodu přesného navíjení. Spread tedy tímto způsobem vzniká hlavně působením napínacích sil,

kteří „tlačí dolů“ horní vlákna svazku mezi ty spodní (v dotyku s válečkem). Blíže je tato problematika popsána v kap. 4.2.1.



Obr. 39 – Navíjení rovingu na tyčku pomocí vrtačky přes rotující váleček

### 5.2.5 Proud vzduchu

Nakonec bylo otestováno působení proudu stlačeného vzduchu. Tlak byl regulován pouze ručně a jeho optimum bylo možné nalézt někde v jednotkách barů. Problém byl v nasměrování proudění vzduchu skrze malou kruhovou trysku na konci hadice k dosažení kýženého efektu (Obr. 40). Při realizaci by to šlo vyřešit změnou tvaru trysky z kruhové na podélnou (dlouhá štěrбина). Výhodou tohoto řešení je možnost použití vyšších rychlostí putování svazku. Ale zároveň při testování nastalo omezení v nutnosti mít svazek téměř bez napětí, aby se prověsil, a proud vzduchu ho mohl spreadovat, což odpovídá kap. 4.3.1. To by ztížilo návrh konstrukce, protože při přesném navíjení je vlákno neustále pod napětím (jednotky kilogramů), a tak by bylo nutné vymyslet systém na uvolnění napětí svazku za plného provozu navíjení linky. Dalším faktorem hovořícím proti realizaci pneumatického spreadu je vysoká cena provozu stlačeného vzduchu, který by se v tomto případě používal.



Obr. 40 – Roving před nasměrováním proudu vzduchu (vlevo), roving po nasměrování proudu vzduchu (vpravo)

## 5.3 Zhodnocení variant a výběr nejlepší varianty

Pomocí vícekritériální analýzy byla vybrána nejvhodnější varianta určená k detailnímu zpracování ve 3D modelu. Nyní bude uvedeno, jak se při výběru postupovalo.

Z návrhových skic vzešlo několik variant spreadování (mechanicky, vibracemi, proudícím vzduchem, zvukovými vlnami), které je třeba mezi sebou porovnat. Porovnávání proběhlo na základě několika kritérií (složitost konstrukce, rychlost pohybu vláken, cena, šířka spreadu, zástavbové rozměry, potřeba energií/médií, množství nakupovaných dílů).

Kritériím je třeba nejprve přiřadit váhy, což bylo provedeno pomocí metody pořadí – důležitější ~ vyšší číslo, viz Tab. 3:

Tab. 3 – Určení vah jednotlivých kritérií

Kritérium	Pořadí	Váhy
Rychlost pohybu vláken	7	0,25
Šířka spreadu	6	0,21
Cena	5	0,18
Zástavbové rozměry	4	0,14
Potřeba energií/médií	3	0,11
Složitost konstrukce	2	0,07
Množství nakupovaných dílů	1	0,04
	$\sum_7^i \text{pořadí}_i = 28$	$\frac{\text{pořadí}_i}{\sum_7^i \text{pořadí}_i} = \frac{\text{pořadí}_7}{28} = \frac{7}{28} = 0,25$

Poté byly pomocí bodovací metody s váhami přiřazeny příslušným variantám body u každého kritéria, dle bodovací škály, kde 1 ~ nejhorší, 10 ~ nejlepší. Přičemž větší rychlost pohybu vláken ~ lepší; větší šířka spreadu ~ lepší; nižší cena ~ lepší; menší zástavbové rozměry ~ lepší; menší spotřeba energií ~ lepší; méně složitá konstrukce ~ lepší; větší množství nakupovaných dílů ~ lepší. Celá Tab. 4 byla nakonec vyhodnocena skalárním součinem, z čehož vzešla nejlepší varianta (větší číslo ~ lepší varianta).

Tab. 4 – Výběr nejlepší varianty

KRITÉRIA	Rychlost pohybu vláken	Šířka spreadu	Cena	Zástavbové rozměry	Potřeba energií/médií	Složitost konstrukce	Množství nakupovaných dílů	Skalární součin
VARIANTY								
<b>Mechanicky</b>	1	2	10	9	10	10	9	<b>5,86</b>
<b>Vibracemi</b>	8	7	6	8	9	8	8	<b>7,54</b>
<b>Proudící vzduch</b>	9	8	3	6	2	6	5	<b>6,18</b>
<b>Zvukové vlny</b>	10	10	1	2	8	2	3	<b>6,21</b>
Váhy kritérií	0,25	0,21	0,18	0,14	0,11	0,07	0,04	

$$\text{skalární součin} = \sum_7^i \text{bodové ohodnocení varianty}_i \cdot \text{váha kritéria}_i = 10 \cdot 0,07 + 1 \cdot 0,25 + 10 \cdot 0,18 + 2 \cdot 0,21 + 9 \cdot 0,14 + 10 \cdot 0,11 + 9 \cdot 0,04 = \mathbf{5,86}$$

Určení pořadí kritérií i bodování příslušných variant bylo provedeno na základě znalostí získaných z rešerše, testování a po konzultaci s odborníky z Compotechu.

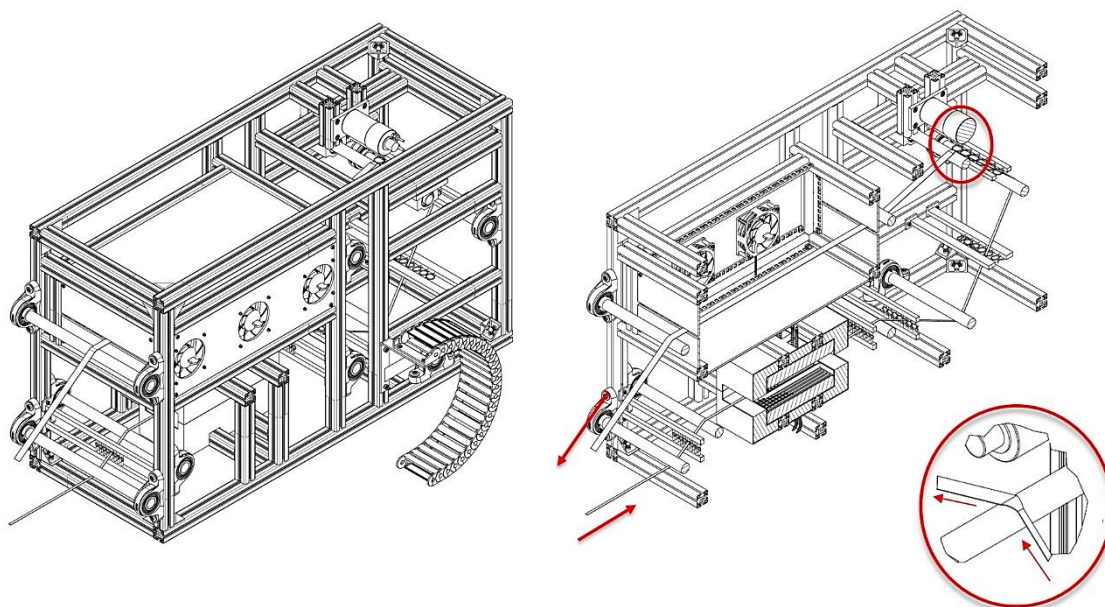


### 5.3.1 Shrnutí výběru varianty

Pro spreadování za provozu linky na technologii přesného navíjení vychází nejlépe varianta s napínáním svazku mezi rotujícími válečky, opatřená jedním nebo více vibrujícími rotujícími válečky, případně ohřevem (pokud by požadovaných parametrů nebylo možné dosáhnout pouze samotnými rotujícími válečky, viz kap. 5.2.2). Řešení pomocí rotujících válečků by mělo být dostatečně šetrné k vláknům a nemělo by je poškozovat. Z důvodů komplexnosti konstrukce (a tím vyšších nákladů na zařízení) a vyšší ceny stlačeného vzduchu, který by musel cirkulovat neustále během provozu, nevychází dobře spread pomocí proudícího vzduchu. Ze hry kvůli vysokému tření vypadávají také nerotující válečky. Ke spreadování by nebylo jednodušší použít ani zvukové vlny, protože zařízení by bylo velmi obtížné odstínit od pracoviště a personálu. Ultrazvuk nebo infrazvuk, který by se hodilo v tomto případě ke spreadu použít, totiž může mít, v některých případech, nežádoucí vliv na lidský organismus. Vlivy a jejich příčiny jsou zatím obtížně prokazatelné, proto by zařízení v tomto případě muselo být kompletně odstíněné.

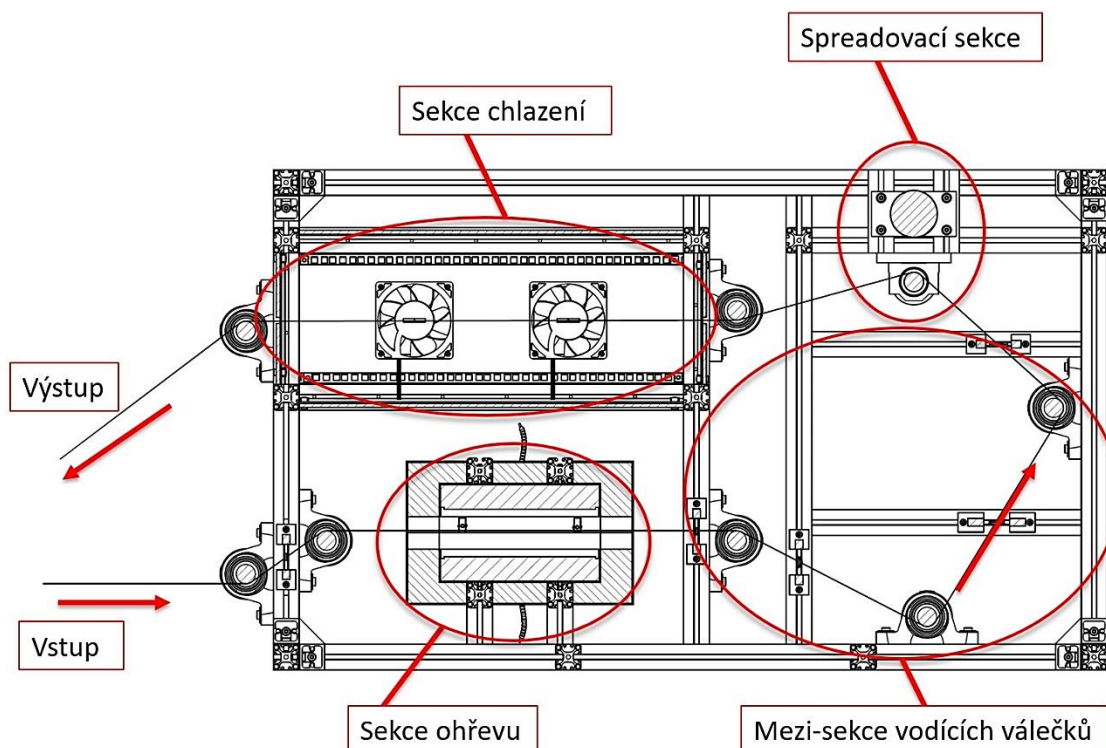
### 5.4 Zpracování vybrané varianty

Na Obr. 41 je detailně zpracované zařízení pro úpravu parametrů **až osmi svazků uhlíkových vláken**. Rám zařízení tvoří hliníkové profily značky ITEM (*Profile 8* o rozměrech 40x40mm), zajišťující mimo vysoké robustnosti konstrukce vzhledem k hmotnosti a ceně i **vysokou modularitu** zařízení. Celá konstrukce je v každém rohu zpevněna pravoúhlými podpěrami, téže značky. Profily jsou mezi sebou spojeny spojkami také přímo od ITEMu, čímž je zajištěna bezproblémová kompatibilita.



Obr. 41 – Prostorový pohled a pohled v řezu zařízení s detailem spreadu

Zařízení lze rozdělit na sekce, kudy postupně putuje svazek rovingu. Konkrétně na sekce: vstupní, ohřevu, vodící, spreadovací, chladící a výstupní (viz Obr. 42), které budou dále detailně popsány.

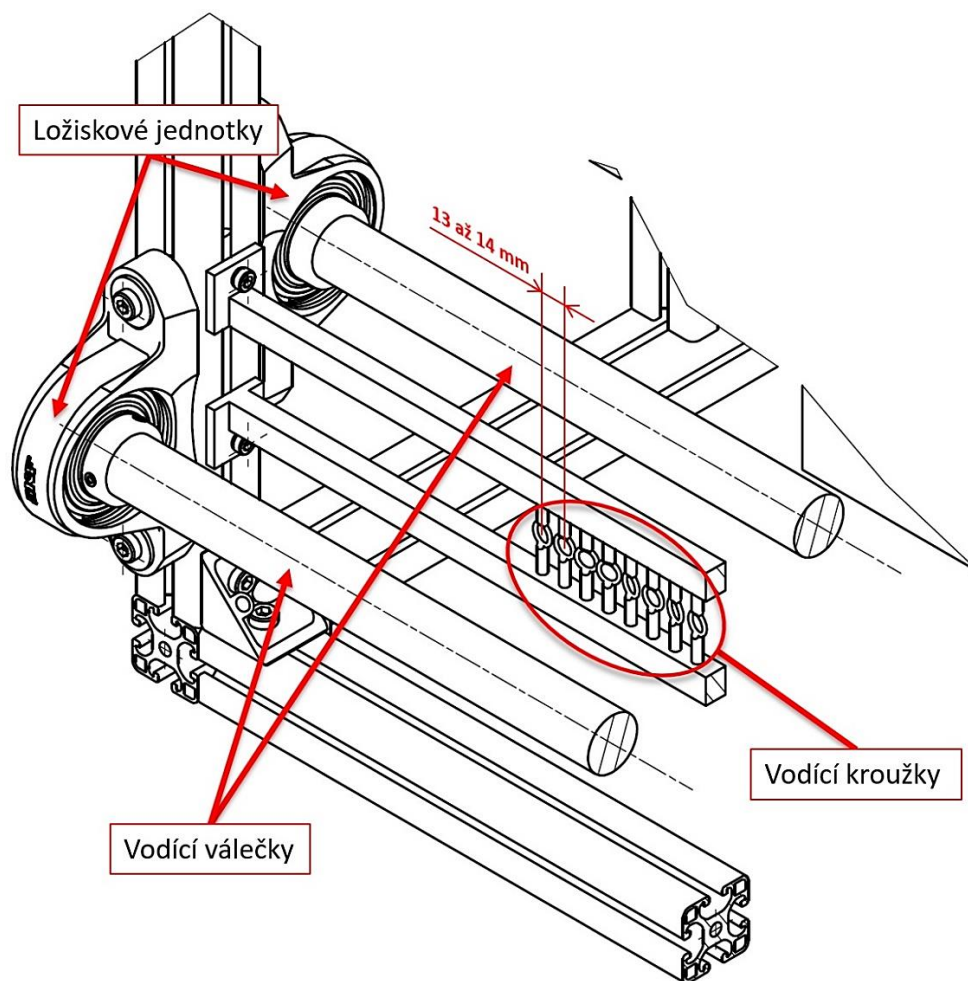


Obr. 42 – Boční řez zařízením s rozdělením na sekce

### 5.4.1 Vstupní sekce

Vstupní sekce zahrnuje dva válečky, které mají za úkol fixovat svazky putující ze zásobníku cívek s rovingem před vstupem do ohřivací sekce. Zároveň se mezi válečky nachází vodící kroužky, zajišťující příslušnou rozteč mezi svazky.

Válečky o průměru  $d=30$  mm jsou uloženy ve stojatých ložiskových jednotkách SYK 30 TR značky SKF (Obr. 43) a zajištěny stavěcími šrouby. Zvolen byl ložiskový domek z kompozitu, jelikož je cenově srovnatelný s domkem z litiny, avšak o polovinu lehčí, bez jiných nevýhod. Celá jednotka je utěsněná, dle SFK se jedná o variantu několikera těsnění. Ložiskové domky jsou opatřeny standardním plastickým mazivem VT307 a nemohou být domazávány, nicméně životnost maziva v tomto případě přesahuje životnost samotného ložiska. Ložiska (YAR 206-2RF) jsou opatřena dvěma otvory po  $120^\circ$  pro domazávání. Jelikož je zatížení těchto ložisek pouze od napnutého vlákna, a to jen v jednotkách kilogramů, nebylo potřeba ložiska kontrolovat na radiální zatížení. Pouze na maximální přípustné otáčky, viz kap. 5.6.1. Sestava válečku a dvou ložiskových jednotek je v navrhovaném zařízení dále použita ještě několikrát. Ložiskový domek má stejnou šířku jako je šířka použitého profilu ITEM (40 mm), takže navíc ideálně splývá s okrajem [33].



Obr. 43 – Vstupní sekce

### 5.4.2 Sekce ohřevu

Účelem této sekce (viz Obr. 44) je nahřát probíhající svazky vláken, konkrétně jejich krycí vrstvu (sizing), na danou teplotu 100 °C, aby se sizing zvláčnil a se svazkem bylo možné snadněji pracovat, potažmo ho snadněji spreadovat.

Po výpočtech, které budou později podrobně popsány (5.6.2), byly zvoleny infračervené nahřívací panely švýcarské značky KRELUS (dále jen IR panely), specializující se na průmyslové ohřevy již od roku 1975. Nabízejí dva modulární typy, z nichž byl zvolen panel G5-25-SM5 s rozměry 248x61x50 mm. Panely jsou v sekci celkem čtyři, vždy dva vedle sebe (podél delší strany). Tyto páry jsou umístěny naproti sobě; dva směřující vzhůru a dva dolů. Toto uspořádání bylo zvoleno proto, aby se dosáhlo maximálního přenosu záření do putujících vláken a tato sekce měla co nejmenší rozměry. Výrobce dále slibuje snadnou elektronickou regulaci IR panelů.

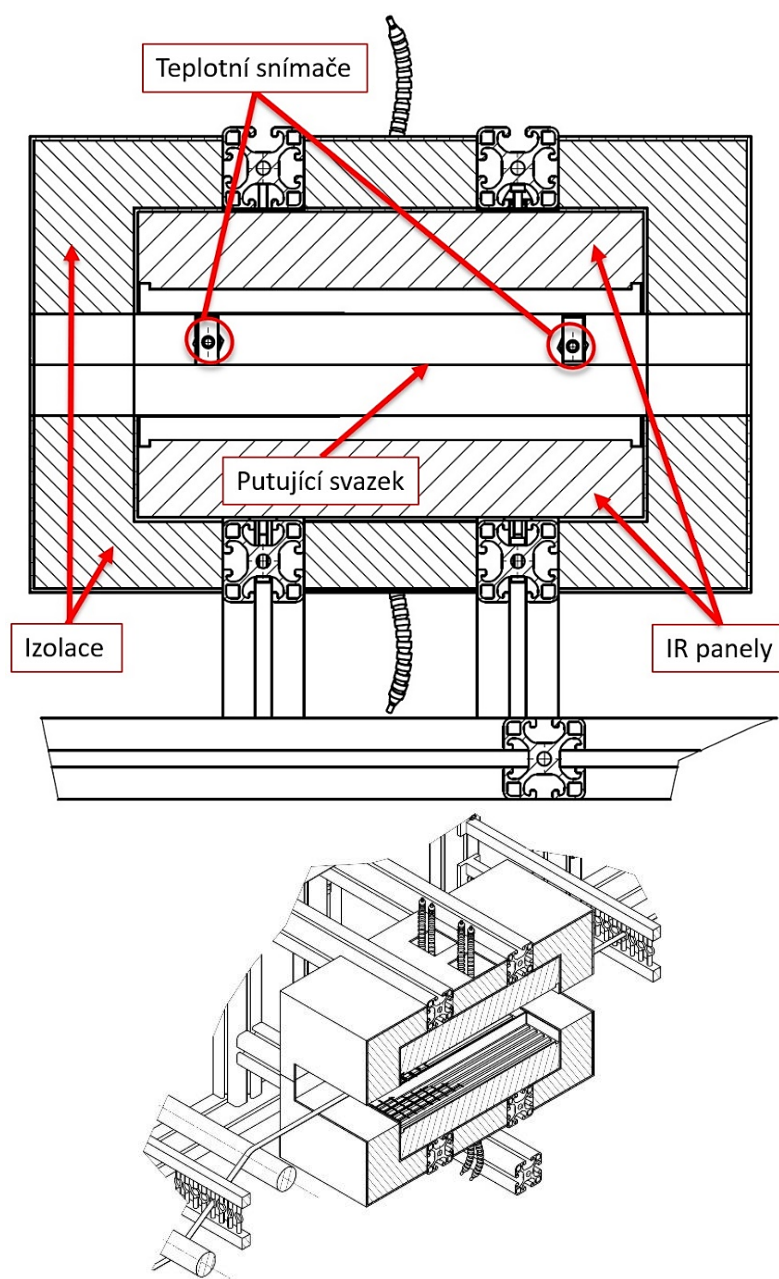
Vodící kroužky v sekci před a za ohřevem, mají za úkol držet rozteč mezi putujícími vlákny na hodnotě mezi 13 až 14 mm, což ponechá skromnou, 6 až 7 mm širokou, mezeru mezi svazky při průchodu mezi IR panely. Důraz byl kladen na co nejmenší rozteč, aby IR panely byly využity efektivně a nevyhřívaly jenom samy sebe, což by zbytečně

prodražilo provoz. Efektivitu využití IR panelů, plynoucí z kompaktnosti celé sekce, se podařilo velmi dobře docílit (mimo jiné díky příhodným rozměrům IR panelů) [34].

Sekci dále doplňují dva teplotní snímače TR 129 značky SENSIT, pro vstup a výstup z ohřivací sekce, které udávají měřící teplotní rozsah až do 250 °C, což by mělo být postačující. Upevněny jsou přes závit M10x1,5, aby v případě potřeby bylo možné použít snímače TR 068C, které mají rozsah až do 400 °C a totožný závit k upevnění [35].

Nakonec je celá sekce obalena vrstvou izolace, skládající se ze dvou 2 mm plechů, mezi kterými je vhodný izolační materiál. Volba konkrétního izolačního materiálu není součástí této práce.

Celá sekce je samozřejmě připevněna na hliníkové profily zmíněné v úvodu této kapitoly.



Obr. 44 – Sekce ohřevu v bočním řezu

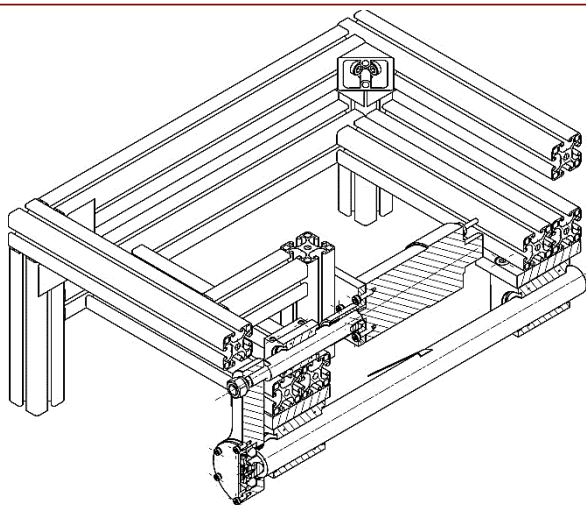
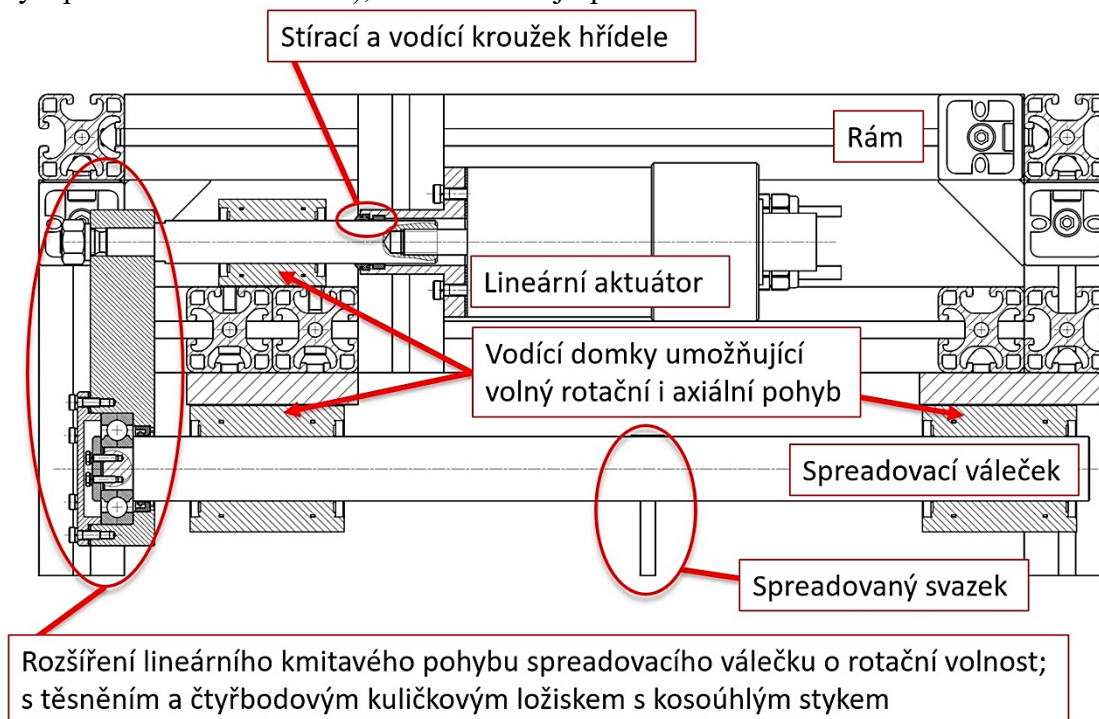
### 5.4.3 Mezi-sekce vodících válečků

Sekce mezi ohřevem a spreadováním se skládá pouze z vodících válečků o průměru  $d=30$  mm umístěných v ložiskových jednotkách SYK 30 TR a vodících kroužků. Sekce má za úkol upravit směr pohybu vláken o téměř  $180^\circ$ , směrem k výstupu, a rozšířit rozteč mezi svazky na přibližně 30 mm, aby byly připravené pro spreadování ve spreadovací sekci.

### 5.4.4 Spreadovací sekce

Tato sekce je hlavním členem celého zařízení. Má totiž na starost samotný spread putujících rovingů (Obr. 45).

Spreadu je docíleno příčnými vibracemi (kolmo na směr putujících vláken, ve směru osy spreadovacího válečku), které vznikají pomocí lineárního voice coil aktuátoru



Obr. 45 – Spreadovací sekce v čelním řezu

LAS28-53-000A-P01-12E značky BEI Kimco. *Voice coil* ~ cívka v blízkosti permanentních magnetů, do které se pouští elektrický proud. Tento typ pohonu zajišťuje kompletní kontrolu nad všemi výstupními parametry (rychlost, pozice, zrychlení, oscilace) a také se pyšní vysokou spolehlivostí, velmi vysokou přesností a vysokým výkonem [36].

Tento lineární aktuátor pak přenáší lineární kmity přes hřídelku do pouzdra, ve kterém je uložené čtyřbodové kuličkové ložisko s kosoúhlým stykem QJ 304 MA značky SKF. Toto ložisko, kromě přenášení kmitů lineárního aktuátoru, také umožňuje volnou rotaci spreadovacího válečku, který je v něm upevněn pojistnou deskou. Ta zajišťuje možnost správného předpětí ložiska [37].

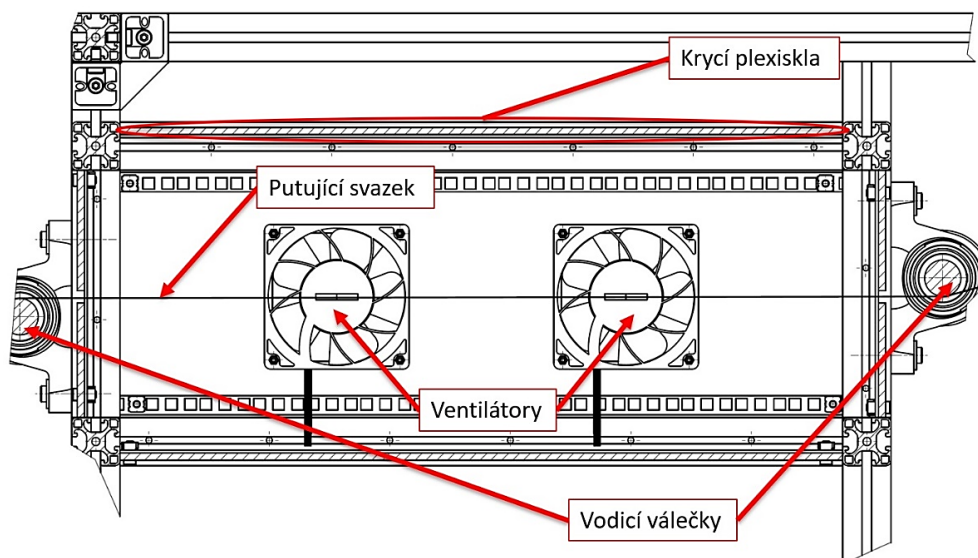
Spreadovací váleček i hřídelka, která spojuje lineární aktuátor a pouzdro, prochází lineárním vedením (uzavřený linearset SMA30 a SMA20). To zajišťuje jejich volný lineární i rotační pohyb a správné vedení kmitavých pohybů lineárního aktuátoru.

Součásti náchylné na velice jemný uhlíkový prach jsou utěsněny. Hřídelka vedoucí od lineárního aktuátoru je opatřena stíracím kroužkem (317 Series Mill-Duty, Double-Acting Wiper) a vodícím kroužkem (845 Series Guide Band), oba značky System Seals. Čtyřbodové kuličkové ložisko s kosoúhlým stykem je ze strany od spreadovacího válečku utěsněno hřídelovým těsnícím kroužkem pro všeobecné průmyslové aplikace 30x40x7 HMSA10 RG značky SKF, vyrobeným z nitrilkaučuku. Příslušné nepohyblivé spoje jsou opatřeny 1 mm vysokým gumovým těsněním.

Všechny kmitající komponenty jsou z důvodu vyšší životnosti a tuhosti vyrobeny z oceli.

### 5.4.5 Sekce chlazení

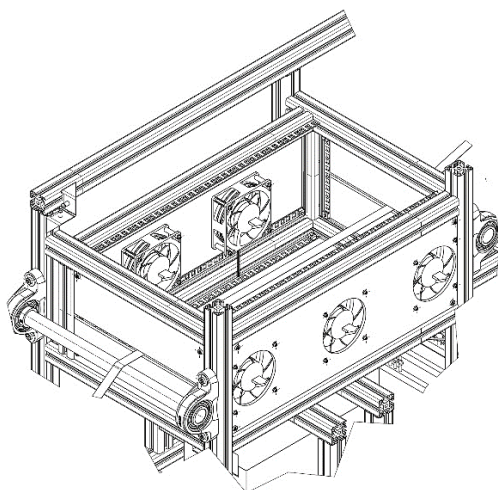
Sekce chlazení má za úkol dochladiť sizing putujících svazků a tím zafixovat tvar svazků po spreadování (Obr. 46). Rozměry sekce byly převážně určeny výpočty na chlazení a následnou volbou optimálních ventilátorů (viz kap. 5.6.4).



Obr. 46 – Sekce chlazení v bočním řezu

Ventilátory byly zvoleny podle udávaného objemového průtoku vzduchu a průměru ventilátoru. Jedná se o model MDV1238-24S americké značky Oriental Motor. Ventilátory jsou vybaveny pulzně šířkovou modulací (PWM), takže jim lze skrze software jednoduše nastavit požadované otáčky nebo v případě automatizace ovládat jejich otáčky v závislosti na teplotě vstupujících vláken.

Na vstupu a výstupu chladicí sekce jsou opět vodící válečky v ložiskových domcích SYK 30 TR pro stabilizaci putujících vláken. Celá sekce je zakrytována plexisklem a vstupní i výstupní ventilátory jsou opatřeny prachovými filtry, aby se uhlíkový prach nevířil do pracoviště. Plexiskla jsou upevněna na hliníkové lišty, vložené do spáry hliníkových profilů, pomocí speciálních matic. Jak matice, tak upevňovací lišty jsou opět značky ITEM, což zajišťuje bezproblémovou kompatibilitu. Na vstupu a výstupu je ponechána jen úzká, nezbytně velká, mezera pro průchod vláken. Navíc je konfigurací ventilátorů – 2x vstupní, 3x výstupní – docíleno, že uvnitř sekce vzniká tlakový deficit, který se bude vyrovnávat skrze mezírky na vstupu a výstupu sekce (Obr. 47). Tím pádem by ani těmito mezírkami neměl unikat prach do okolí zařízení, ba naopak by měl být vzduch „nasáván“ z okolí dovnitř sekce.



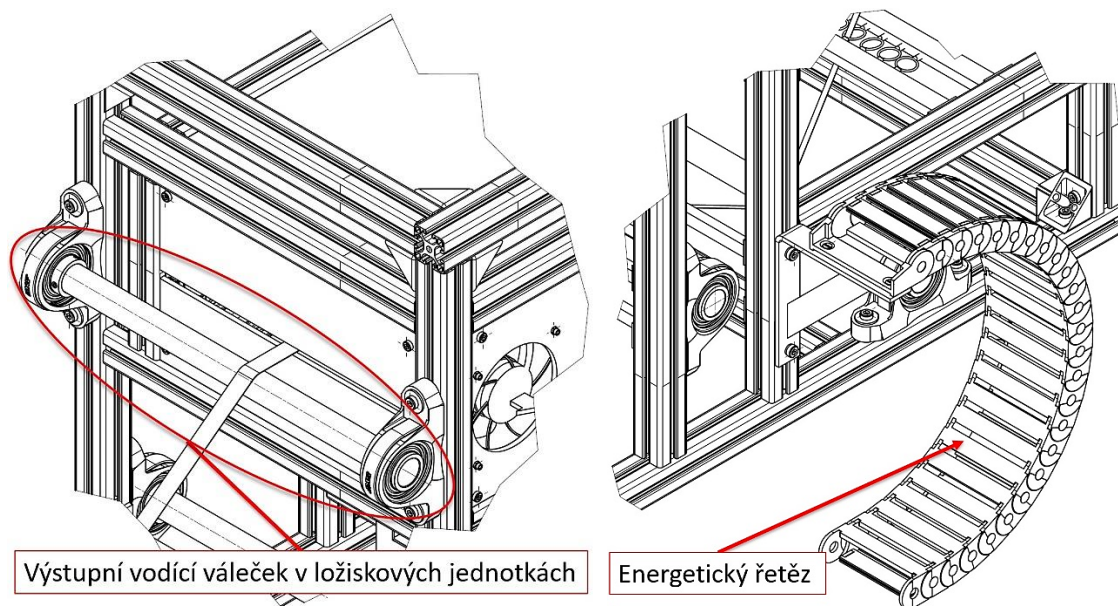
Obr. 47 – Odkrytá sekce chlazení bez horního krycího plexiskla

#### 5.4.6 Výstupní sekce

Výstupní sekce svazků vláken se skládá z vodícího válečku a dvojice ložiskových jednotek SYK 30 TR, které zároveň slouží ke stabilizaci rovingu v chladicí sekci, jak bylo uvedeno v kap. 5.4.5. Již spreadovaný svazek pak dále putuje do suportu navíjecího stroje, kde je usměrněn dalšími vodícími prvky a smáčen do pryskyřice předtím, než je navíjen na navíjecí trn.

Do této sekce je zařazeno i vyvedení veškeré kabeláže zařízení pomocí energetického řetězu na boku zařízení (Obr. 48). Jedná se o energetický řetěz řady 255 s vnitřní šířkou 103 mm a poloměrem ohybu 200 mm značky igus®. Tyto díly nejsou k funkčnosti zařízení nutné. Do práce ale zahrnuty byly, protože v budoucnu při umístění zařízení do provozu (viz kap 5.5) se počítá s vyvedením kabeláže takto bokem zařízení, pomocí

energetického řetězu. Řetěz bude poté uložen do vodícího žlabu vedle linky, to už ale není součástí této práce.

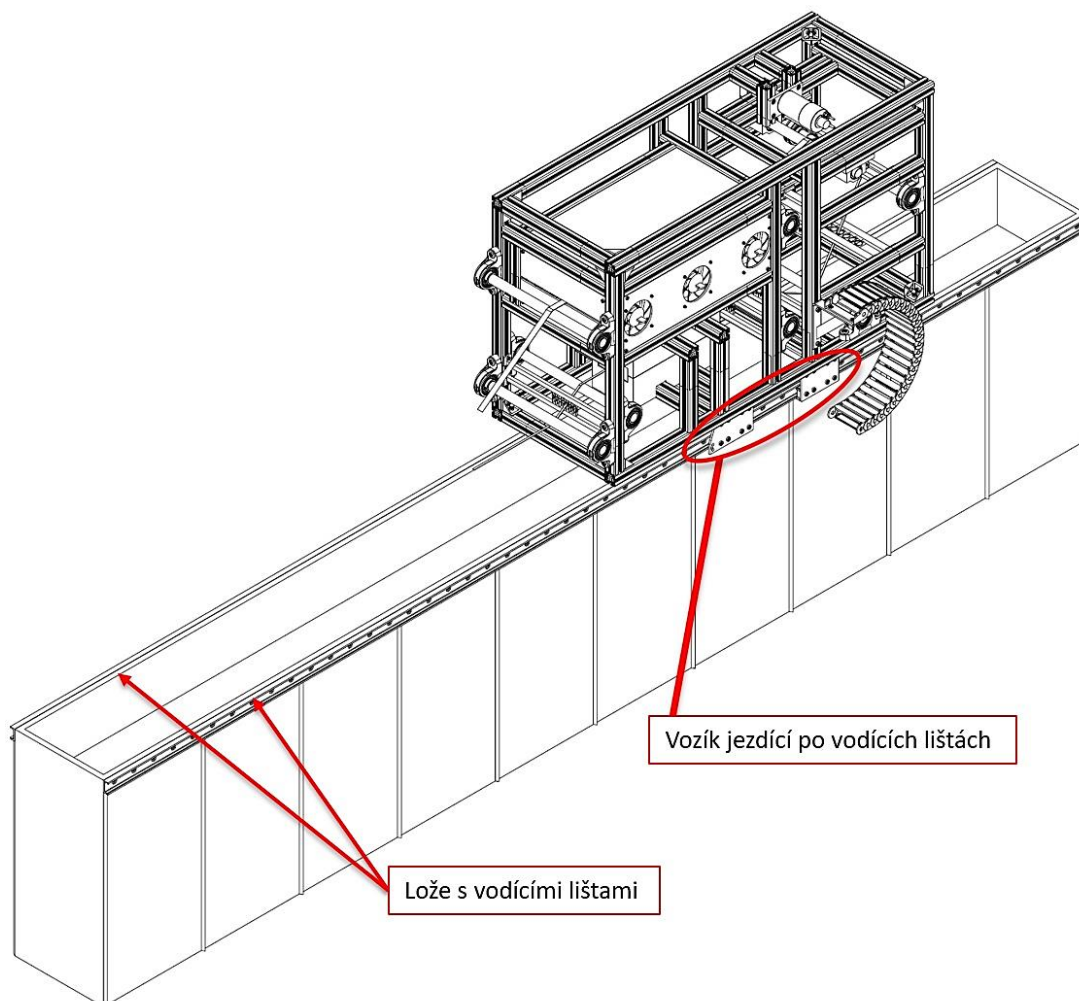


Obr. 48 – Výstupní sekce; vodící váleček (vlevo), energetický řetěz (vpravo)

## 5.5 Začlenění zařízení do provozu

Zařízení bylo konstruováno i s ohledem na jeho umístění na již existující pomocný vozík na loži (Obr. 49). Na loži jsou umístěné vodící lišty, pomocí kterých vozík vykonává lineární pohyb. Tyto vodící lišty mají nosnost kolem 700 kg a navržené zařízení dle odhadu 3D CAD softwaru váží přibližně 70 kg, takže bezpečnost nosnosti se pohybuje v blízkosti hodnoty 10. Zařízení se na vozík připevní z obou stran deskami o tloušťce 5 mm a několika šrouby M8 s vnitřním šestihranem DIN 6912, které jsou na dalších prvcích zařízení i na již existujícím vozíku použity.





Obr. 49 – Zařízení umístěné v provozu

## 5.6 Výpočtová část

V této kapitole budou shrnuty všechny potřebné návrhové a kontrolní výpočty. Navržené zařízení je téměř bez silového zatížení (max. 10 N) a dynamické síly, které by na něj působily při pohybu po vodících lištách, nemají na jeho provoz vliv. Ložiskové jednotky tak budou kontrolovány pouze na mezní otáčky (více v následující kapitole). Při výpočtech byla věnována největší pozornost přestupu tepla. Výpočty půjdou chronologicky po jednotlivých sekcích, obdobně jako v kap. 5.4.

### 5.6.1 Ložiskové jednotky SYK 30 TR

Volba vhodné ložiskové jednotky proběhla podle průměru válečků  $d=30$  mm. Výrobce udává následující parametry (Tab. 5):

Tab. 5 – Parametry SYK 30 TR [33]

<b>Základní dynamická únosnost</b>	$C$ [kN]	19,5
<b>Základní statická únosnost</b>	$C_0$ [kN]	11,2
<b>Mezní únavové zatížení</b>	$P_u$ [kN]	0,475
<b>Mezní otáčky</b>	[r/min]	3800

Zbývá kontrola mezních otáček. Skutečné otáčky rotujících válečků, a potažmo ložisek, byly vypočítány z rychlosti proudění svazků vláken podle následující rovnice

$$\text{maximální otáčky ložiska} = \frac{\text{rychlost vláken}}{\pi \cdot \text{průměr válečku}} = \frac{60}{\pi \cdot 0,03} = 637 \text{ r/min} \quad (8)$$

Z vypočtených maximálních otáček vyplývá, že bude **ložisková jednotka vytížena pouze z 16,8 %** mezních otáček.

Na ložiska působí jen velmi malé radiální síly, vznikající od tahové síly napínající svazek, axiální síly jsou zanedbatelné. Ložiska jsou tak téměř nezatížená. Tahové síly jsou v jednotkách kilogramů, takže trvanlivost při dynamickém zatížení by vycházela v milionech hodin. I pokud by se jednalo o nejhorší formu zatížení, únavou, tak 475 N je pořád výraznou rezervou oproti několika kilogramům radiální zátěže, kterou na ložiska vyvinou putující vlákna. Zatížení se však pohybuje mezi statickým a dynamickým, takže **trvanlivost ložiskové jednotky je plně dostačující**.

## 5.6.2 Infračervené nahřívací panely

Při výpočtu infračervených nahřívacích panelů vstupuje do hry hned několik proměnných. To, co je potřeba výpočtem zjistit, je délka nahřívacího panelu/panelů. Ta se odvíjí od rychlosti proudění rovingu (de facto čas, který stráví nad panelem), vlastností rovingu (jako hustota, měrná tepelná kapacita atd.) udávaných výrobcem, výkon (v tomto případě hustota tepelného toku) IR panelu udávaný výrobcem a poté rozdíl teplot, o který je požadováno rovingy ohřát. Šířka IR panelu je dána počtem rovingů vedle sebe, potažmo jejich šířkou a roztečí.

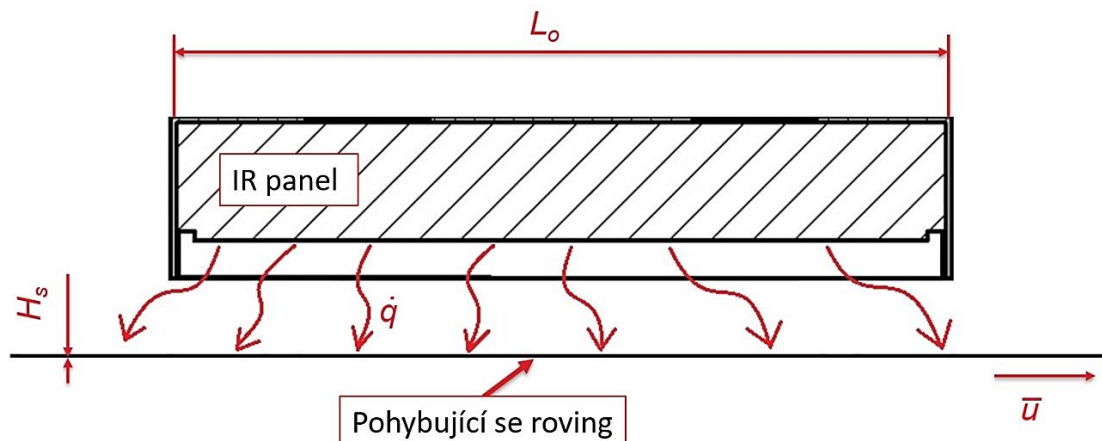
Délka panelu  $L_o$  byla vypočítána z přenosu tepla radiací/sáláním mezi dvěma rovnoběžnými deskami. Nejprve jsou v Tab. 6 uvedeny všechny vstupní hodnoty a na Obr. 50 je znázorněno schéma přestupu tepla do rovingu. Následují rovnice, ze kterých byla určena délka nahřívacího panelu.

Tab. 6 – Vstupní hodnoty pro výpočet ohřevu [8], [34]

Parametry svazku T700S 24K		
Měrná hmotnost	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1800
Měrná tepelná kapacita	$c_p$ [J/kgK]	752
Plocha průřezu	$A$ [mm <sup>2</sup> ]	0,92
Tloušťka rovingu	$H_s$ [mm]	0,13
Parametry IR panelu KRELUS		
Hustota tepelného toku	$\dot{q}$ [W/m <sup>2</sup> ]	32000
Ostatní parametry		
Střední rychlost proudění	$\bar{u}$ [m/s]	1
Rozdíl teplot	$\Delta T$ [°C]	80

Jelikož je nahřívána vrstva sizingu velmi tenká (řeč je o  $\mu\text{m}$ ), lze v této vrstvě zanedbat přenos tepla vedením. Sizing se bude nahřívát z cca 20 °C na 100 °C. Zároveň byla zvolena prostřední hodnota hustoty tepelného toku, kterou je IR panel schopný emitovat, protože se počítá s tím, že všechno teplo, které IR panel vyprodukuje, se absorbuje do vláken. V případě potřeby lze tedy IR panel nastavit na nižší nebo vyšší výkon. Také

proto je možné zanedbat vzdálenost putujících vláken od IR panelu, která je seshora i zespoda kolem 25 mm, a tudíž pro způsob přenosu tepla radiací velmi malá.



Obr. 50 – Schéma přestupu tepla do rovingu

Jako první je dáno do rovnosti teplo, které vlákna potřebují, aby zvýšily svoji teplotu o  $\Delta T$ , a teplo, které emituje IR panel

$$\rho \cdot c_p \cdot V \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \dot{q} \cdot S \quad (9)$$

Po separaci proměnných a integraci je získán následující tvar

$$\rho \cdot c_p \cdot V \cdot \Delta T = \dot{q} \cdot S \cdot t \quad (10)$$

Dalšími úpravami je možné vyjádřit hledanou délku IR panelu  $L_o'$

$$\dot{q} = \rho \cdot c_p \cdot \frac{\dot{V}}{S} \cdot \Delta T = \rho \cdot c_p \cdot \frac{W_s \cdot H_s \cdot \bar{u}}{W_s \cdot L_o'} \cdot \Delta T \quad (11)$$

$$L_o' = \rho \cdot c_p \cdot \frac{H_s \cdot \bar{u}}{\dot{q}} \cdot \Delta T \quad (12)$$

A po dosazení je získána kýžená hodnota  $L_o'$

$$L_o' = 1800 \cdot 752 \cdot \frac{0,00013 \cdot 1}{32000} \cdot 80 = 0,445 \text{ m} , \quad (13)$$

kteřou je ještě možné snížit tím, že místo ohřevu pouze z jedné strany rovingu bude roving ohříván z obou stran a tím se efektivně zkrátí nutná vzdálenost  $L_o$  na polovinu

$$L_o = \frac{0,445}{2} \doteq 0,223 \text{ m} = \mathbf{223 \text{ mm}} \quad (14)$$

Z výpočtu vyplývá, že pro hustotu tepelného toku  $\dot{q} = 32000 \text{ W/m}^2$  je zapotřebí IR panel dlouhý alespoň 223 mm. **Zvolený panel** je ve skutečnosti **dlouhý 248 mm**, takže **podmínku splňuje i s rezervou**. Délka je vypočtena pro prostřední hodnotu  $\dot{q}$ , kterou IR panel dokáže emitovat, takže **je zde navíc rezerva v nastavení tepelného výkonu**.

### 5.6.3 Lineární voice coil aktuátor

U zvoleného aktuátoru bude vypočtena maximální frekvence, se kterou může kmitat, aniž by překročil maximální sílu při nepřetržitém provozu. Pro přehlednost jsou v Tab. 7, jeho udávané parametry.

Tab. 7 – Parametry LAS28-53-000A-P01-12E [36]

Krátkodobá síla [N]	Celkový zdvih [mm]	Síla při nepřetržitém provozu [N]	Vnější průměr [mm]	Délka uprostřed zdvihu [mm]
266,9	25	60,1	70	132,7

Frekvence je vyjádřena ze síly, která je potřeba k překonání při každém zpomalení a zrychlení v krajních bodech zdvihu. Tato síla je rovna

$$F = m \cdot a, \quad (15)$$

přičemž hmotnost všech komponent  $m$ , kterými je potřeba kmitat, je rovna necelým 4,5 kg. A zrychlení lze zjistit snadno, protože kmitavý pohyb je možné popsat sinusoidou

$$y(t) = y_{max} \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (16)$$

a po dvojí derivaci podle času je získáno maximální zrychlení ( $\sin = 1$ )

$$a_{max} = y_{max} \cdot \omega^2 = y_{max} \cdot (2 \cdot \pi \cdot f)^2 \quad (17)$$

kde je za  $y_{max}$  dosazena polovina zdvihu (maximální amplituda). Po dosazení do (15), je možné vyjádřit **frekvenci v závislosti na zdvihu**. Přičemž za sílu  $F$  je dosazena maximální síla při nepřetržitém provozu aktuátoru udávaná výrobcem

$$F = m \cdot y_{max} \cdot (2 \cdot \pi \cdot f)^2 \quad (18)$$

$$f = \sqrt{\frac{F}{m \cdot y_{max}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{60,1}{4,5 \cdot y_{max}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi}} \quad (19)$$

a po dosazení pro zdvih např. 10 mm, 5 mm a 3 mm jsou získány příslušné frekvence

$$f_{10mm} = \sqrt{\frac{60,1}{4,5 \cdot 0,005} \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi}} \doteq 8 \text{ Hz} \quad (20)$$

$$f_{5mm} = \sqrt{\frac{60,1}{4,5 \cdot 0,0025} \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi}} \doteq 11,5 \text{ Hz} \quad (21)$$

$$f_{3mm} = \sqrt{\frac{60,1}{4,5 \cdot 0,0015} \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi}} \doteq 15 \text{ Hz} \quad (22)$$

Z výpočtů je patrné, že při **nastavování optimálního spreadování rovingů**, je možné měnit mimo jiné frekvenci a zdvih lineárního aktuátoru. Přičemž dle (19) platí, že **se snižujícím se zdvihem, lze zvyšovat frekvenci, dokud nebude překročena maximální povolená síla při nepřetržitém běhu aktuátoru**.

#### 5.6.4 Chladicí sekce

Před napočítáním samotné aktivní chladicí sekce bude do této kapitoly zahrnut i výpočet pasivního ochlazení rovingů putováním skrze válečky od ohřevu až k chlazení. Tato trasa má v současné konfiguraci délku necelých 1,5 m. Vstupní veličiny jsou uvedeny v Tab. 8. Výpočet této ztráty do okolí bude proveden podle nucené konvekce se zanedbáním přestupu tepla kondukcí mezi vlákny a vodicími válečky.

Tab. 8 – Vstupní hodnoty pro výpočet ztráty do okolí [8]

Parametry svazku T700S 24K		
Měrná hmotnost	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1800
Měrná tepelná kapacita	$c_p$ [J/kgK]	752
Plocha průřezu	$A$ [mm <sup>2</sup> ]	0,92
Šířka rovingu	$W_s$ [mm]	7
Tloušťka rovingu	$H_s$ [mm]	0,13
Parametry vzduchu při 20 °C		
Kinematická viskozita	$\nu$ [m <sup>2</sup> /s]	$1,53 \cdot 10^{-5}$
Tepelná vodivost	$\lambda$ [W/mK]	0,0256
Prandtlovo číslo	$Pr$ [-]	0,71
Ostatní parametry		
Střední rychlost proudění	$\bar{u}$ [m/s]	1
Rozdíl teplot	$\Delta T$ [°C]	80
Charakteristický rozměr	$L_{ch}$ [m]	1,5

Nejprve je vypočteno Reynoldsovo číslo

$$Re = \frac{\bar{u} \cdot L_{ch}}{\nu} = \frac{1 \cdot 1,5}{1,53 \cdot 10^{-5}} = 98039 , \quad (23)$$

ze kterého je poté určeno číslo Nusseltovo

$$Nu = 0,664 \cdot Re^{\frac{1}{2}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} = 0,664 \cdot 98039^{\frac{1}{2}} \cdot 0,71^{\frac{1}{3}} = 186 \quad (24)$$

a poté je již možné určit tepelnou ztrátu

$$\dot{Q} = \alpha \cdot S \cdot \Delta T = \frac{Nu \cdot \lambda}{L_{ch}} \cdot 2 \cdot (W_s + H_s) \cdot L_{ch} \cdot \Delta T = 186 \cdot 0,0256 \cdot 2 \cdot (0,007 + 0,00013) \cdot 80 = 5,43 \text{ W} , \quad (25)$$

ze které je nakonec zjištěno (kalorimetrickou rovnicí) ochlazení svazku  $\Delta T_{ztr}$

$$\Delta T_{ztr} = \frac{\dot{Q}}{\dot{m} \cdot c_p} = \frac{\dot{Q}}{\dot{V} \cdot \rho \cdot c_p} = \frac{5,43}{0,92 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 1800 \cdot 752} = 4,4 \text{ °C} \quad (26)$$

Následuje samotné aktivní chlazení svazků před výstupem ze zařízení. Výpočet bude vypadat obdobně, s trochu jinými vstupními hodnotami (Tab. 9), opět půjde o nucenou konvekci. Vstupní teplota vláken bude teplota po ohřevu, snižená o ochlazení vypočítané ve (26), čili cca 95 °C (0,5 °C zde nehraje roli). Výpočet bude proveden pro šířku svazku 7 mm, i přesto, že by se při spreadování měl z této původní šířky o něco rozšířit, ideálně na 20 mm. Nicméně širší svazek se pomocí bočního proudění chladí (odvádí teplo) rychleji, proto výpočtem pro pouhých 7 mm bude získána komfortní rezerva (lehké předdimenzování). Zvoleno bylo 5 ventilátorů o průměru 120 mm umístěných na přeskáčku naproti sobě (viz kap 5.4.5), na celkové délce 600 mm.

Tab. 9 – Vstupní hodnoty pro výpočet chlazení rovingů [8], [39]

Parametry svazku T700S 24K		
Měrná hmotnost	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1800
Měrná tepelná kapacita	$c_p$ [J/kgK]	752
Plocha průřezu	$A$ [mm <sup>2</sup> ]	0,92
Šířka rovingu	$W_s$ [mm]	7
Tloušťka rovingu	$H_s$ [mm]	0,13
Parametry vzduchu při 20 °C		
Kinematická viskozita	$\nu$ [m <sup>2</sup> /s]	$1,53 \cdot 10^{-5}$
Tepelná vodivost	$\lambda$ [W/mK]	0,0256
Prandtlovo číslo	$Pr$ [-]	0,71
Parametry ventilátorů		
Objemový tok	$\dot{V}$ [m <sup>3</sup> /s]	0,105
Průměr ventilátoru	$d$ [m]	0,12
Charakteristický rozměr	$L_{ch}$ [m]	0,6
Rozdíl teplot	$\Delta T$ [°C]	75

Jako první je vypočtena střední rychlost proudění vzduchu z parametrů ventilátorů

$$\bar{u} = \frac{\dot{V}}{\pi \cdot \frac{d^2}{4}} = \frac{0,105}{\pi \cdot \frac{0,12^2}{4}} = 9,3 \text{ m/s} \quad (27)$$

a poté se hodnoty dosadí podobně jako v předchozím případě pro výpočet ztrát pomocí nucené konvekce

$$Re = \frac{\bar{u} \cdot W_s}{\nu} = \frac{9,3 \cdot 0,007}{1,53 \cdot 10^{-5}} = 4248 \quad (28)$$

$$Nu = 0,664 \cdot Re^{\frac{1}{2}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} = 0,664 \cdot 4248^{\frac{1}{2}} \cdot 0,71^{\frac{1}{3}} = 39 \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= \alpha \cdot S \cdot \Delta T = \frac{Nu \cdot \lambda}{W_s} \cdot 2 \cdot (W_s + H_s) \cdot L_{ch} \cdot \Delta T \\ &= \frac{39 \cdot 0,0256}{0,007} \cdot 2 \cdot (0,007 + 0,00013) \cdot 0,6 \cdot 75 = 90,8 \text{ W} \end{aligned} \quad (30)$$

$$\Delta T_{uchl} = \frac{\dot{Q}}{\dot{m} \cdot c_p} = \frac{\dot{Q}}{\dot{V} \cdot \rho \cdot c_p} = \frac{90,8}{0,92 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 1800 \cdot 752} = 72,9 \text{ °C} \quad (31)$$

Z výpočtu vyplývá, že **zvolenými ventilátory** je možné teoreticky **uchládit 73 °C**, takže by vlákna na výstupu ze zařízení měla mít teplotu okolo 22 °C. To je velmi přijatelná teplota, která by měla **zajistit opětovné ztuhnutí sizingu a tím i fixaci spreadovaného rovingu**.

## 6 Závěr

Tato práce se zabývala návrhem zařízení pro úpravu parametrů svazku uhlíkových vláken navíjecího stroje. Za provozu navíjecího stroje putující rovingy dosahují rychlostí až 60 m/min, při maximální produktivitě linky.

V rešeršní části práce byl čtenář nejprve seznámen s úvodem do dané problematiky kompozitů, jejich výroby, dělení, vlastností atd. Následoval současný stav problematiky, kde byly uvedeny různé způsoby spreadování svazků uhlíkových vláken, jejich mechanismy, vlastnosti, případně výhody a nevýhody. Práce pokračovala analýzou již existujících zařízení na spread svazků vláken ve světě, převážně tedy z Německa a Asie, ale také Spojených států amerických nebo dalších zemí Evropy.

Z rešeršní části práce vyplynulo, že existující zařízení často nejsou k dispozici přímo k zakoupení. Výrobci je spíše mají vyvinuté tzv. „in-house“ (sami pro sebe) a používají je k výrobě svých výrobků z uhlíkových vláken. Proto je mají upravené podle svých potřeb a neposkytují bližší informace k tomu, jak jejich zařízení docílí spreadu rovingů, aby si zachovali alespoň nějakou výhodu oproti čím dál větší konkurenci. Několik zařízení určených k prodeji bylo nalezeno, ale ani jedno z nich nebylo vhodné pro způsob výroby přesným navíjením. Navíc se převážně jednalo o velké linky daleko přesahující poměrně kompaktní rozměrová omezení ze zadání této práce. Ani tito výrobci přesně neuvádí, jak zařízení fungují, maximálně uvádí princip, jakým dochází ke spreadu. Mnohdy jsou výstupy z těchto velkých zařízení rozměrná nespřádaná plátna nebo splétané tkaniny s různými vzory, což také nebylo cílem navrhovaného zařízení.

V části vlastního řešení bylo vytvořeno několik návrhových skic, kde každý návrh spreadoval rovingy jiným způsobem. Poté bylo provedeno několik testů na vysokopevnostních vláknech, pro prověření návrhů a poznatků z rešerše. Dále byly návrhy mezi sebou porovnány a pomocí vícekritériální analýzy vybrána nejlepší varianta pro detailní zpracování ve 3D modelu. Jako nejlepší varianta vzešel způsob spreadu pomocí příčné kmitajícího válečku. Příčné kmity zajišťuje lineární voice coil aktuátor značky BEI Kimco. V zařízení roving putuje přes rotačně uložené válečky, aby se snížilo tření rovingu na minimum a nedocházelo k jeho poškození. Celá rámová konstrukce, tvořená hliníkovými profily, včetně potřebných spojovacích dílů, je od značky ITEM. Spreadovacímu členu předchází sekce ohřevu, kde se zvláční jinak tuhá krycí vrstva sizingu a vlákna pak lze snadněji spreadovat. Ohřev probíhá za pomoci infračervených nahřívacích panelů značky KRELUS. Za spreadovacím členem se nachází sekce chlazení rovingu, kde se čerstvě spreadovaný roving ochladí putováním v proudu vzduchu s cílem následného ztuhnutí sizingu a tím fixace vzniklého spreadu. Jediným médiem, které zařízení potřebuje k plnému provozu, je elektrická energie. Veškerá elektrická kabeláž může být vyvedena na boku zařízení pomocí energetického řetězu (např. značky igus®).

Zároveň byly provedeny příslušné návrhové a kontrolní výpočty, zajišťující optimální bezproblémový chod zařízení. Jednalo se o volbu ložisek, vhodného nahřívacího panelu, chladících ventilátorů, lineárního voice coil aktuátoru a výpočet tepelných ztrát do okolí.

Navržené zařízení je velmi modulární, také díky použití konstrukce z hliníkových profilů; oproti existujícím řešením je kompaktní – 1383 x 780 x 500 mm (délka x výška x šířka); snadno nastavitelné a cenově dostupné, s většinou nakupovaných dílů.

Díky rotačně uloženým válečkům, mohou rovingy bez poškození putovat rychlostí 60 m/min. Rozměrově se zařízení také vešlo do zadaných 1500 x 1000 x 500 mm (délka x výška x šířka). A volbou spreadu pomocí příčně kmitajícího válečku a již zmíněné modularity zařízení lze dosáhnout spreadu 2,5násobku původní šířky rovingu. Tímto byl splněn hlavní cíl i všechny dílčí cíle práce.



## 7 Seznamy

### 7.1 Seznam použité literatury

- [1] BEDNÁŘ, Peter. *Návrh upravené technologie navíjení kompozitních trubek*. Brno, 2016, 57 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [2] EHRENSTEIN, G. W. *Polymerní kompozitní materiály*. Praha: Nakladatelství Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [3] MACEK, Karel, Petr ZUNA a kolektiv. *Strojírenské materiály*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-01-02798-8.
- [4] Composite. *Dictionary.com* [online]. [cit. 2019-01-29]. Dostupné z: <https://www.dictionary.com/browse/composite>
- [5] MRÁZ, Petr a Jaroslav TALÁCKO. *Konstrukce strojů s kompozitními materiály*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03540-9.
- [6] VRBKA, Jan. *Mechanika kompozitů* [online]. Brno, 2008 [cit. 2019-02-04]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/priloha.php?dpid=83340](https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=83340)
- [7] ŽDÁRSKÝ, Marek. *Návrh a analýza kombinovaně namáhané kompozitní trubky*. Praha, 2016, 52 s. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní.
- [8] Types of Carbon Fiber. *Toray Composite Materials America* [online]. [cit. 2019-01-31]. Dostupné z: <https://www.toraycma.com/page.php?id=661>
- [9] Distribution of global carbon fiber production capacity in 2018, by country. *Statista* [online]. November 2018 [cit. 2019-02-02]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/380553/distribution-of-carbon-fiber-production-capacity-worldwide-by-country/>
- [10] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003. ISBN 80-214-2443-5.
- [11] DAWSON, Donna. Sizing for carbon fiber. In: *CompositesWorld* [online]. 7/29/2016 [cit. 2019-02-04]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/sizing-for-carbon-fiber>
- [12] DAVIJANI, A. A. B. *Experiments and prediction of the spreading behavior of fibrous tows by means of the Discrete Element Method*. Enschede, 2012. Diplomová práce. University of Twente, Faculty of Engineering Technology, Department of Mechanical Engineering, Chair of Production Technology.

- [13] NOVÁK, Jiří. *Funkční plochy a struktura povrchu*. Brno, 2008, 84 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [14] RODINI, B. T. a J. R. EISENMANN. An Analytical and Experimental Investigation of Edge Delamination in Composite Laminates. *Fibrous Composites in Structural Design*. Boston, MA: Springer US, 1980, 1980, , 441-457. DOI: 10.1007/978-1-4684-1033-4\_25. ISBN 978-1-4684-1035-8. Dostupné také z: [http://link.springer.com/10.1007/978-1-4684-1033-4\\_25](http://link.springer.com/10.1007/978-1-4684-1033-4_25)
- [15] WILSON, S.D.R. Lateral spreading of fibre tows. *Journal of Engineering Mathematics*. 1997, **32**(1), 19-26. DOI: 10.1023/A:1004253531061. ISSN 00220833. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1023/A:1004253531061>
- [16] IRFAN, M. S., V. R. MACHAVARAM, R. S. MAHENDRAN, N. SHOTTON-GALE, C. F. WAIT, M. A. PAGET, M. HUDSON a G. F. FERNANDO. Lateral spreading of a fiber bundle via mechanical means. *Journal of Composite Materials*. 2011, **46**(3), 311-330. DOI: 10.1177/0021998311424624. ISSN 0021-9983. Dostupné také z: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0021998311424624>
- [17] GARDINER, Ginger. How is tow spread?. *CompositesWorld* [online]. 6/4/2018 [cit. 2019-02-09]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/how-is-tow-spread>
- [18] MARISSSEN, R, L TH. VAN DER DRIFT a J STERK. Technology for rapid impregnation of fibre bundles with a molten thermoplastic polymer. *Composites Science and Technology*. 2000, **60**(10), 2029-2034. DOI: 10.1016/S0266-3538(00)00122-6. ISSN 02663538. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0266353800001226>
- [19] SIHN, S, R KIM, K KAWABE a S TSAI. Experimental studies of thin-ply laminated composites. *Composites Science and Technology*. 2007, **67**(6), 996-1008. DOI: 10.1016/j.compscitech.2006.06.008. ISSN 02663538. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0266353806002168>
- [20] KAWABE, KAZUMASA. New Spreading Technology for Carbon Fiber Tow and Its Application to Composite Materials. *FIBER*. 2008, **64**(8), P.262-P.267. DOI: 10.2115/fiber.64.P\_262. ISSN 0037-9875. Dostupné také z: [http://joi.jlc.jst.go.jp/JST.JSTAGE/fiber/64.P\\_262?from=CrossRef](http://joi.jlc.jst.go.jp/JST.JSTAGE/fiber/64.P_262?from=CrossRef)
- [21] APPEL, Lars. New ultrasonic spreading process for processing reinforcement tows. In: *AZL Aachen GmbH: NEWSLIGHT #7 | Institute for Textile Technology (ITA)* [online]. [cit. 2019-02-10]. Dostupné z: <https://azl-aachen-gmbh.de/newslight-7-ita-2/>

- [22] GARDINER, Ginger. The spread of spread tow. *CompositesWorld* [online]. 4/26/2018 [cit. 2019-02-10]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/the-spread-of-spread-tow>
- [23] PrimeTex®. *Hexcel* [online]. [cit. 2019-02-10]. Dostupné z: <https://www.hexcel.com/Products/Fabrics-Reinforcements/PrimeTex>
- [24] Spread Tow Technology. *North Thin Ply Technology*[online]. [cit. 2019-02-10]. Dostupné z: <https://www.thinplytechnology.com/technology/spread-tow-technology>
- [25] ZOLTEK Uni-Directional Fabric. *Zoltek* [online]. [cit. 2019-02-10]. Dostupné z: <http://zoltek.com/products/px35/uni-directional-fabric/>
- [26] The Spread Tow Technology. *TeXtreme®* [online]. [cit. 2019-02-10]. Dostupné z: <http://www.textreme.com/technology/what-is-spread-tow-technology/>
- [27] KRUPKA, Mario. Innovative Production Technologies for Lightweight Automotive Composites - Tape Production, Tape Weaving and 3D Weaving: DORNIER Composite Systems® , Lindauer DORNIER GmbH. In: *German American Chambers of Trade* [online]. September 26th, 2017 [cit. 2019-02-10]. Dostupné z: [http://www.gaccmidwest.org/fileadmin/ahk\\_chicago/2017\\_EVENTS/2017\\_GAB\\_Auto-Leichtbau/PPTs\\_Conference\\_Troy/03\\_-\\_DORNIER.pdf](http://www.gaccmidwest.org/fileadmin/ahk_chicago/2017_EVENTS/2017_GAB_Auto-Leichtbau/PPTs_Conference_Troy/03_-_DORNIER.pdf)
- [28] Fibre-spreading assembly unit for the production of unidirectional fibre tapes. *Karl Mayer* [online]. [cit. 2019-02-10]. Dostupné z: <https://www.karlmayer.com/en/products/technical-textiles/composite-machines/fibre-spreading-lines-for-fibre-tapes/>
- [29] Innovative technology for carbon and aramid. *JEC Magazine* [online]. 2005, 6 AUG 2011, (#17) [cit. 2019-02-10]. Dostupné z: <http://www.jeccomposites.com/knowledge/international-composites-news/innovative-technology-carbon-and-aramid>
- [30] Single-tow spreading machine FK-2. *Harmoni Industry Co.,Ltd.* [online]. [cit. 2019-02-10]. Dostupné z: <http://www.harmoni.co.jp/02/products/single.html>
- [31] Composite Equipment: Single Tow Spreading Machine. *T4L: Textile for Life Co.,Ltd.* [online]. [cit. 2019-02-10]. Dostupné z: <http://www.t4l.co.kr/en/m2/view.php?cate1=1&cate3=6&no=12>
- [32] Mechanical Fiber Spreader. *Izumi International*[online]. [cit. 2019-02-10]. Dostupné z: <https://www.izumiinternational.com/composite-products/lab-pilot-line-equipment/mechanical-fiber-spreader>

- [33] Stojaté ložiskové jednotky Y. *SKF* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://www.skf.com/cz/products/bearings-units-housings/bearing-units/ball-bearing-units/y-bearing-plummer-block-units/Y-bearing-plummer-block-units/index.html?designation=SYK%2030%20TR&unit=metricUnit>
- [34] KRELUS INFRARED. *KRELUS* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: [http://www.krelus.ch/pdf/Prospekt\\_en.pdf](http://www.krelus.ch/pdf/Prospekt_en.pdf)
- [35] Snímače teploty se závitem a kovovým pouzdrem. *SENSIT* [online]. Školní 2610, 756 61 Rožnov pod Radhoštěm [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: [https://www.sensit.cz/cz/kategorie/snimace-teploty-se-zavitem-a-kovovym-pouzdem-20668\\_781/](https://www.sensit.cz/cz/kategorie/snimace-teploty-se-zavitem-a-kovovym-pouzdem-20668_781/)
- [36] Cylindrical Housed Linear VCA with an Integrated Sensor. *BEI Kimco* [online]. 1499 Poinsettia Avenue, Suite 160, Vista, CA 92081 USA [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <http://www.beikimco.com/motor-products/VCA-linear-voice-coil-actuator-all/actuator-with-integrated-feedback>
- [37] Angular contact ball bearings, four-point contact ball bearings. *SKF* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://www.skf.com/group/products/bearings-units-housings/ball-bearings/angular-contact-ball-bearings/four-point-contact-ball-bearings/four-point-contact-ball-bearings/index.html?designation=QJ%20304%20MA>
- [38] SMA uzavřený linearset. *CNCshop* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <http://www.cncshop.cz/sma-uzavreny-linearset>
- [39] MDV1238-24S. *Oriental Motor* [online]. [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: <https://catalog.orientalmotor.com/item/mdv-series-variable-flow-dc-axial-fans/mdv-series-120mm-dc-axial-fans/mdv1238-24s>

## 7.2 Seznam tabulek

Tab. 1 – Materiálové srovnání vlastností polymerů s tradičními konstrukčními materiály [7].....	15
Tab. 2 – Srovnání vlastností vláken TORAYCA T300J a T700S [8], [12].....	32
Tab. 3 – Určení vah jednotlivých kritérií.....	48
Tab. 4 – Výběr nejlepší varianty.....	48
Tab. 5 – Parametry SYK 30 TR [33].....	57
Tab. 6 – Vstupní hodnoty pro výpočet ohřevu [8], [34].....	58
Tab. 7 – Parametry LAS28-53-000A-P01-12E [36].....	60
Tab. 8 – Vstupní hodnoty pro výpočet ztráty do okolí [8].....	61
Tab. 9 – Vstupní hodnoty pro výpočet chlazení rovingů [8], [39].....	62

## 7.3 Seznam obrázků

Obr. 1 – Znázornění pevnosti v tahu v polárním diagramu pro vybrané typy kompozitů [1].....	13
Obr. 2 – Závislost meze pevnosti v tahu jednosměrně vyztuženého kompozitu na úhlu orientace vyztužujících vláken [2].....	13
Obr. 3 – Příklady uspořádání vláknové výztuže: a) jednosměrné, b) tkanina, c) rohož, d) víceosá výztuž z kontinuálních vláken, e) krátká vlákna (jednosměrně orientovaná), f) krátká vlákna (nahodilá orientace) [3].....	14
Obr. 4 – Vliv průměru skelného vlákna na jeho pevnost [2].....	15
Obr. 5 – Schéma výroby uhlíkových PAN-vláken [2].....	16
Obr. 6 – Druhy vazeb tkanin: a) plátová vazba, b) keprová vazba, c) atlasová (saténová) vazba [2].....	19
Obr. 7 – Postup ručního kladení [2].....	22
Obr. 8 – Schéma stříkacího zařízení: 1-pryskyřice s urychlovačem, 2-roving, 3-tvrdidlo, 4-zdvihadlo, 5-stříkací pistole s řezačkou a dvěma tryskami, 6-forma [5].....	22
Obr. 9 – Vakuová technologie za použití jednodílné formy [2].....	23
Obr. 10 – Lisování tlakovým vakem v jednodílné formě [2].....	23
Obr. 11 – Lisování v autoklávu [2].....	24
Obr. 12 – Metoda odstředivého lití [2].....	25
Obr. 13 – Technologie oplétání [2].....	26
Obr. 14 – Výroba na dvoupásovém lisu [2].....	26
Obr. 15 – Schéma metody přesného navíjení [1].....	27
Obr. 16 – Principy napínání rovingu [5].....	28
Obr. 17 – Typy navíjecích strojů: A) soustruhový, B) planetový se šikmo uloženým trnem, C) planetový s rotujícím ramenem, D) navíjecí stroj „Strickland B“ [5].....	29
Obr. 18 – Schéma přesného navíjení s umístěním navrhovaného zařízení [1].....	30
Obr. 19 – Schéma Wilsonova experimentu; vlevo boční pohled, vpravo prostorový pohled [16].....	31
Obr. 20 – Schéma geometrie testované sestavy (nahore), naměřené hodnoty (dole) [12].....	33
Obr. 21 – Vizualizace napětí jednotlivých monovláken spreadu pomocí DEM [12].....	34
Obr. 22 – Spread na konvexním válečku [18].....	35
Obr. 23 – Zařízení na pneumatický spread [20].....	35
Obr. 24 – Znázornění svazku vláken v proudu vzduchu [20].....	36
Obr. 25 – Schéma zařízení na spreadování několika cívek rovingu najednou [20].....	37
Obr. 26 – Spread ultrazvukovým buzením [21].....	37
Obr. 27 – Schéma systému Lindauer DORNIER z katalogu [27].....	38
Obr. 28 – Schéma systému Karl Mayer z katalogu i s rozměry linky [28].....	39
Obr. 29 – Schéma zařízení Technomax [29].....	39
Obr. 30 – Spreadovací zařízení Harmoni Industry (vlevo), a) původní svazek, b) svazek po spreadu (vpravo) [30].....	40
Obr. 31 – Spreadovací zařízení T4L [31].....	40
Obr. 32 – Spreadovací zařízení Izumi International [32].....	41
Obr. 33 – Návrhová skica zařízení na mechanický spread.....	42
Obr. 34 – Návrhová skica zařízení na spread pomocí vibrací.....	43

Obr. 35 – Návrhová skica zařízení na pneumatický spread.....	44
Obr. 36 – Návrhová skica zařízení na spread pomocí zvukových vln.....	45
Obr. 37 – Nahřívání svazku horkovzdušnou pistolí (vlevo), spread po nahřátí (vpravo) .....	46
Obr. 38 – Navíjení rovingu na tyčku pomocí vrtačky mezi nerotujícími válečky.....	46
Obr. 39 – Navíjení rovingu na tyčku pomocí vrtačky přes rotující váleček.....	47
Obr. 40 – Roving před nasměrováním proudu vzduchu (vlevo), roving po nasměrování proudu vzduchu (vpravo).....	47
Obr. 41 – Prostorový pohled a pohled v řezu zařízení s detailem spreadu.....	49
Obr. 42 – Boční řez zařízením s rozdělením na sekce.....	50
Obr. 43 – Vstupní sekce.....	51
Obr. 44 – Sekce ohřevu v bočním řezu.....	52
Obr. 45 – Spreadovací sekce v čelním řezu.....	53
Obr. 46 – Sekce chlazení v bočním řezu .....	54
Obr. 47 – Odkrytá sekce chlazení bez horního krycího plexiskla .....	55
Obr. 48 – Výstupní sekce; vodící váleček (vlevo), energetický řetěz (vpravo).....	56
Obr. 49 – Zařízení umístěné v provozu .....	57
Obr. 50 – Schéma přestupu tepla do rovingu.....	59

## 7.4 Seznam použitých programů

- Adobe Acrobat Reader DC
- Autodesk Inventor Professional 2017
- MS Word 2016
- MS Excel 2016

## 7.5 Seznam příloh

Výkresová dokumentace:

- I. BP-0239-OS-00, SESTAVA SPREADERU
- II. BP-0239-OS-01, HŘÍDELKA
- III. BP-0239-OS-02, POUZDRO

Elektronické (CD):

- IV. Sestava spreaderu\_OS.stp
- V. Sestava spreaderu\_OS.pdf
- VI. Hřídelka\_OS.pdf
- VII. Pouzdro\_OS.pdf
- VIII. BP0239\_OS.pdf