



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**NÁVRH UPRAVENÉ TECHNOLOGIE NAVÍJENÍ
KOMPOZITNÍCH TRUBEK**

DRAFT MODIFIED WINDING TECHNOLOGY OF COMPOSITE PIPES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Peter Bednár

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Bohumil Kandus

BRNO 2016

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Peter Bednár**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Bohumil Kandus**
Akademický rok: 2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrh upravené technologie navíjení kompozitních trubek

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Na základě stávající technologie vypracovat řešerši na navíjení kompozitních trubek, provést návrh technologického postupu a konstrukce zařízení pro upravenou technologii navíjení trubek z kompozitního materiálu s dodatečným plněním funkčním materiálem třetího typu.

Cíle diplomové práce:

Cílem práce je komplexní návrh technologie výroby na úrovni technologického postupu a konstrukční výkresové dokumentace výrobního zařízení pro navíjení kompozitních trubek s dodatečným plněním magnetickým materiálem, doplněný porovnáním výsledků mechanických zkoušek kompozitních trubek původního a navrhovaného materiálového složení.

Seznam literatury:

Míšek, B. (2003): Kompozity. Technický dozorčí spolek Brno - Sekce materiálů a svařování, Brno.

Mallick, P.K. and Newman, S. (1990): Composite Materials Technology. Carl Hanser Verlag, München.

Saechtling, H. (1995): International plastics handbook. Carl Hanser Verlag, München.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

BEDNÁR Peter: Návrh upravené technologie navíjení kompozitních trubek

Tato diplomová práce je zaměřena na výrobu kompozitních trubek navíjením uhlíkových vláken prosycených v pryskyřičném pojivu a současným plněním přídatným materiálem třetího typu. Také poskytuje popis výrobního zařízení FWMS180 a rovněž všech přídatných zařízení nezbytných k výrobě kompozitů navíjením. V práci je podrobně popsán technologický postup výroby kompozitních trubek na výrobním zařízení FWMS180 a rozebrán způsob plnění přídatným materiálem. Dále jsou uvedeny postupy technologických zkoušek na ohyb a vibrace provedené na trubkách různého materiálového složení, jejich výsledky a porovnání. Práce dokazuje, že přítomnost materiálu třetího typu ve struktuře kompozitních trubek má různý vliv v závislosti na sledované a vyhodnocované vlastnosti.

Klíčová slova: kompozity, kompozitní trubky, navíjení kompozitů, uhlíková vlákna

ABSTRACT

BEDNÁR Peter: Draft modified winding technology of composite pipes

This diploma thesis focuses on composite pipes production by winding of composite fibres soaked in resin binder and feeding with additional third type material simultaneously. It also describes the production machine FWMS180 and all of its additional devices necessary for the composites production by filament winding. The production process of composite pipes on the production machine FWMS180 is described in this paper as well as detailed description of the winding method. Furthermore, the technological bend and vibration tests procedures conducted on pipes of different material composition are discussed with related results and comparison. The thesis proves that presence of the third type material in composite pipes structure has different influence depending on observed and evaluated property.

Keywords: composites, composite pipes, winding of composites, carbon fibres

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BEDNÁŘ, P. *Návrh upravené technologie navíjení kompozitních trubek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 57 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Bohumil Kandus.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně dne 24. 05. 2016

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval panu Ing. Bohumilu Kandusovi za cenné rady a vedení při zpracování diplomové práce. Dále bych rád poděkoval kolektivu firmy Sobriety s.r.o. za spolupráci při vypracování. Velký dík rovněž patří celé mé rodině za neustálou podporu.

OBSAH

Zadání
Abstrakt
Bibliografická citace
Čestné prohlášení
Poděkování
Obsah

ÚVOD	9
1 ROZBOR ZADÁNÍ	10
1.1 Možnosti výroby vláknových kompozitů s organickou maticí	14
1.2 Navíjení kompozitních materiálů	18
2 ZÁKLADNÍ SPECIFIKACE VYRÁBĚNÝCH TRUBEK.....	20
2.1 Geometrické specifikace	20
2.2 Specifikace návinu	21
2.3 Specifikace mechanických charakteristik kompozitních materiálů	22
2.3.1 Příčný modul pružnosti	23
2.3.2 Podélný modul pružnosti.....	24
2.4 Výpočet modulů pružnosti vyráběných dvoufázových trubek	26
3 TECHNOLOGIE PLNĚNÍ KOMPOZITU MATERIÁLEM TŘETÍHO TYPU	29
4 KONCEPT NAVRŽENÉHO VÝROBNÍHO ZAŘÍZENÍ.....	31
4.1 FWMS180	31
4.1.1 Rychloupínací koník s otočným hrotem.....	34
4.2 Prosyčovací zařízení a stojan cívek s vlákny	35
4.3 Vytvrzovací pec	35
4.4 Vytahovací zařízení	36
5 TECHNOLOGIE VÝROBY TRUBEK PRO TESTOVÁNÍ	37
6 TESTOVÁNÍ A ANALÝZA VYROBENÝCH DÍLŮ	48
6.1 Zkouška na vibrace	49
6.1.1 Vyhodnocení zkoušky vibrací kompozitních trubek.....	50
6.2 Zkouška na ohyb	52
6.2.1 Vyhodnocení zkoušky ohybu kompozitních trubek	54
6.3 Srovnání a rozbor výsledků provedených zkoušek	55
6.3.1 Srovnání a rozbor výsledků zkoušky vibrací	55
6.3.2 Srovnání a rozbor výsledků ohybové zkoušky.....	56
7 ZÁVĚRY	57

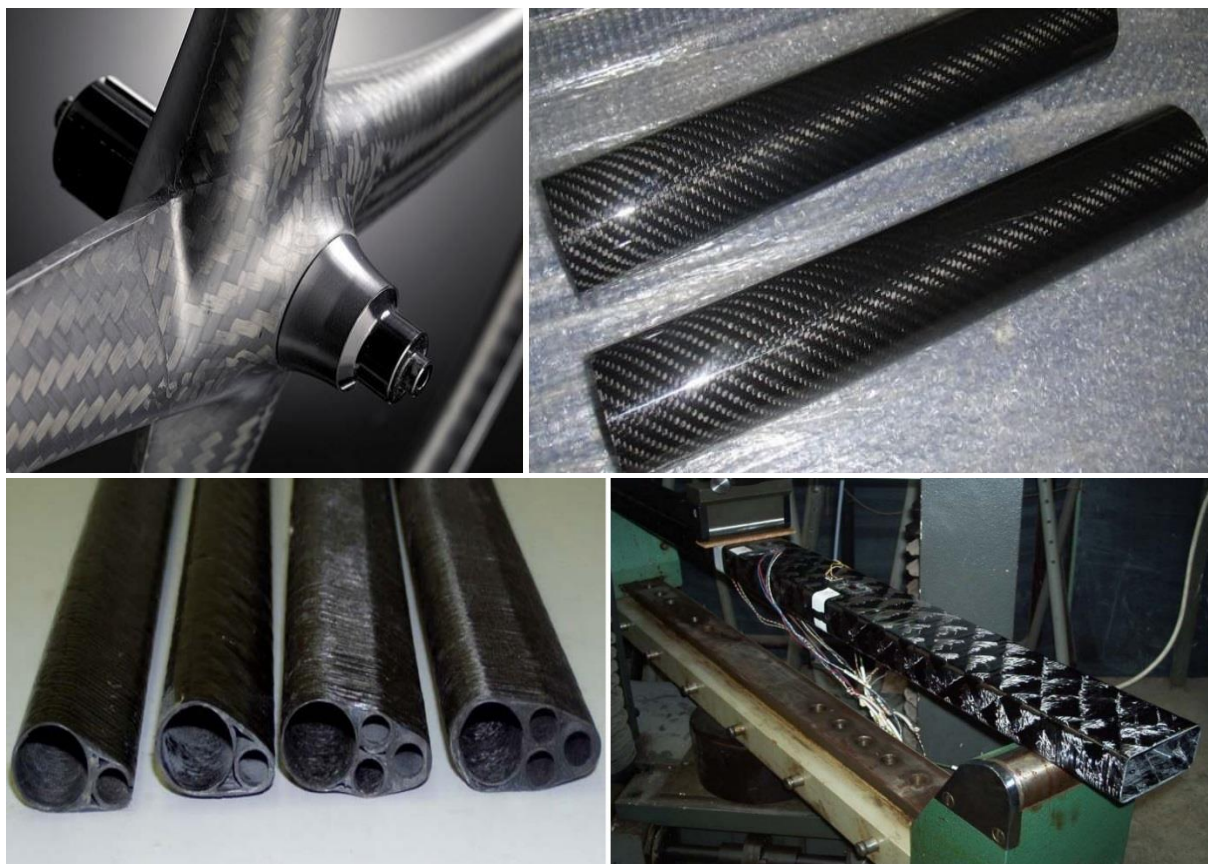
Seznam použitých zdrojů
Seznam použitých symbolů a zkratk
Seznam obrázků
Seznam tabulek
Seznam příloh
Seznam výkresů

ÚVOD [5], [6], [17], [22]

Kompozitní materiály jsou obecně charakterizovány jako materiály složené ze dvou, nebo více substancí, které mají rozdílné vlastnosti, přičemž alespoň jedna z nich je tuhá. Tyto složky dohromady umožňují kompozitu, který je z nich složený, nabývat unikátní vlastnosti, které nemá ani jedna z jeho fází sama o sobě. Tyto fáze musí být v objemu rozděleny rovnoměrně, přičemž se ve výsledném výrobku potlačí jejich nedostatky a uplatní se přednosti. Ve své podstatě jsou tedy kompozitní materiály nehomogenní, bereme-li je však jako technický materiál, musí se považovat za homogenní. V dnešní době jsou stále nejčastější variantou dvoufázové kompozity, kde jedna fáze dodává výslednému výrobku pevnost, přičemž druhá slouží jako pojivo.

Jednou z největších výhod kompozitních materiálů, v porovnání s tradičními ocelovými součástmi, je jejich podstatně nižší hmotnost i při větším objemu, přičemž se vyznačují velice dobrými mechanickými vlastnostmi i pevnostními charakteristikami. Jejich mez kluzu přibližně odpovídá mezi pevnosti, což znamená, že se výrazně nedeformují. Mez únavy kompozitů je velmi vysoká a stárnou v závislosti na teplotě a vlhkosti, kterým jsou vystaveny. Mezi další velice výhodné vlastnosti patří jejich tepelně-izolační charakteristiky a odolnost vůči korozi i v agresivním prostředí.

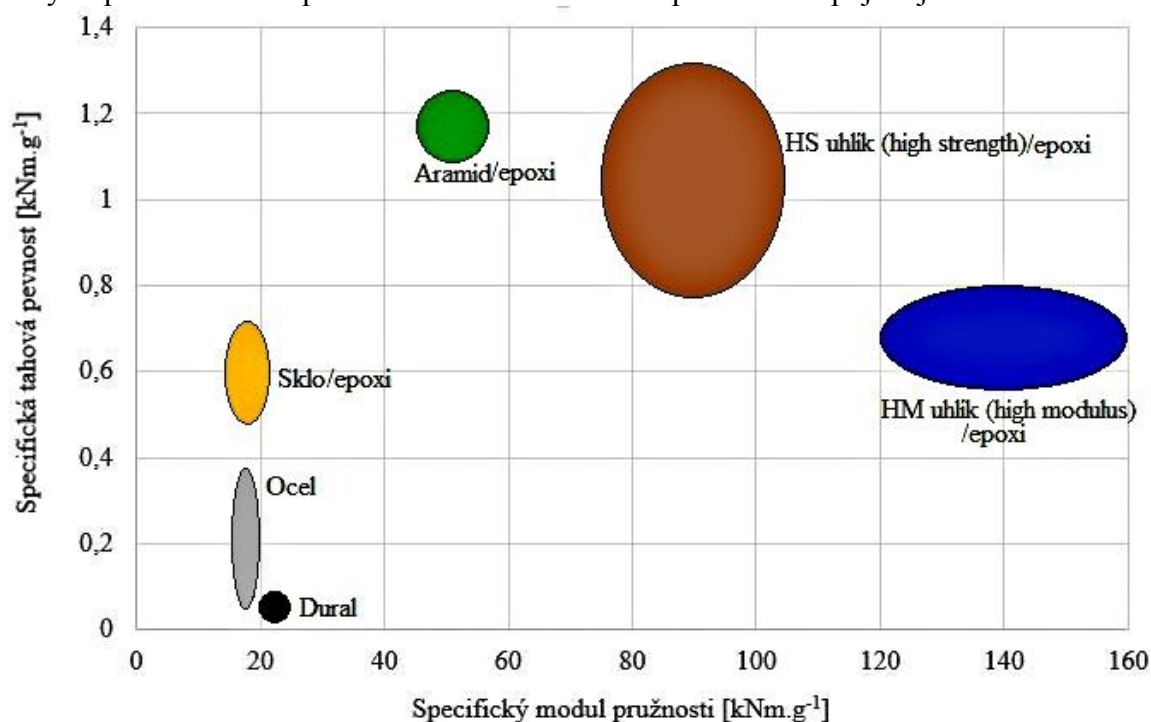
Uplatnění nacházejí kompozitní materiály v dnešní době téměř v každé sféře průmyslu, největší však v automobilovém, kde se z nich kromě jiných vyrábí přístrojové desky, nápravy, nárazníky i hnací hřídele a v leteckém či kosmickém pro vrtule, křídla či trupy. Zajímavou vlastností kompozitů je, že z části dokáží pohltit radarové vlny, což nachází uplatnění ve vojenském průmyslu.



Obr. 1 Příklady kompozitních součástí [6], [17]

1 ROZBOR ZADÁNÍ [2], [3], [5], [8], [9], [10], [11], [12], [16], [18], [19], [20], [23]

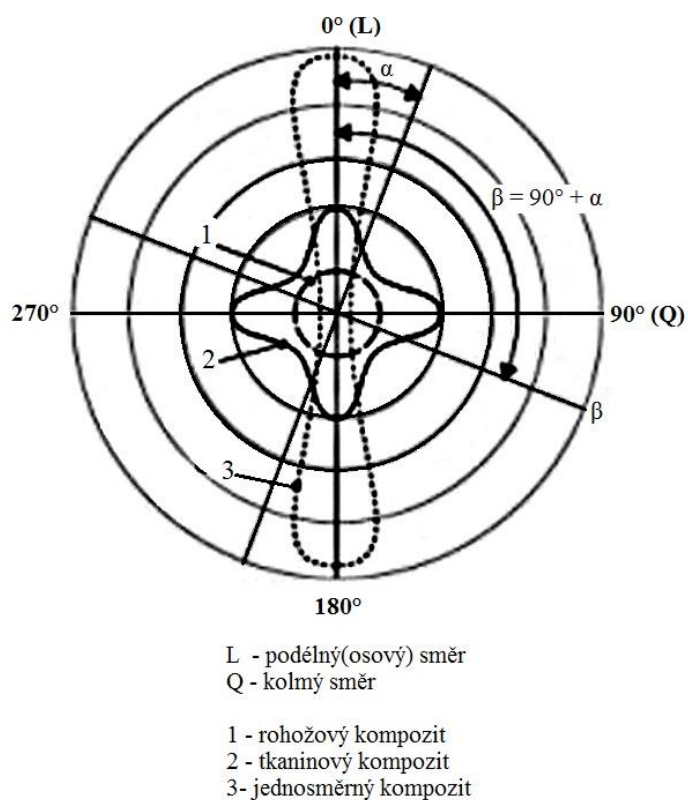
Navíjené kompozitní trubky jsou kombinací dvou a tří materiálů, které mají v makroměřítku stejný tvar, liší se však složením. V případě dvousložkových trubek jsou složkami uhlíková vlákna jako vyztužovací elementy a epoxidová pryskyřice sloužící jako pojivo. U trubek tříložkových je navíc použit materiál třetího typu ve formě magnetického prachu, který bude dodávat výrobkům požadované magnetické vlastnosti. Druhou variantou třetí složky je korkový prach, který by měl mít pozitivní vliv na tlumení vibrací. Jednotlivé složky ve výsledném výrobku působí v součinnosti jako celek, ačkoliv si zachovávají svou identitu, nebudou se tedy vzájemně úplně rozpouštět. Vyrobené součásti budou podrobeny testům, podle kterých bude posouzena vhodnost, resp. nevhodnost pro uvažované aplikace. Primární aplikace pro navíjené třífázové kompozitní trubky je jejich využití jako součást rotoru kompresoru firmy Sobriety s.r.o. Důvodem zakomponování těchto dílů jsou hlavně prospěšné předpokládané mechanické vlastnosti, a to vysoká mez kluzu i pevnosti a tuhost materiálu, na kterých je závislá odolnost proti porušení a hodnoty pružných deformací při přenosu zatížení, dále nízká měrná hmotnost, vysoká mez únavy (schopnost materiálu odolávat cyklickým zatížením) a schopnost akumulace a uvolnění energie, což je vhodné pro struktury s dynamickým chováním. Porovnání specifických hodnot tahových pevností klasických konstrukčních materiálů, jako je ocel a dural, s tahovými pevnostmi kompozitních materiálů na bázi epoxidového pojiva je na obrázku 2.



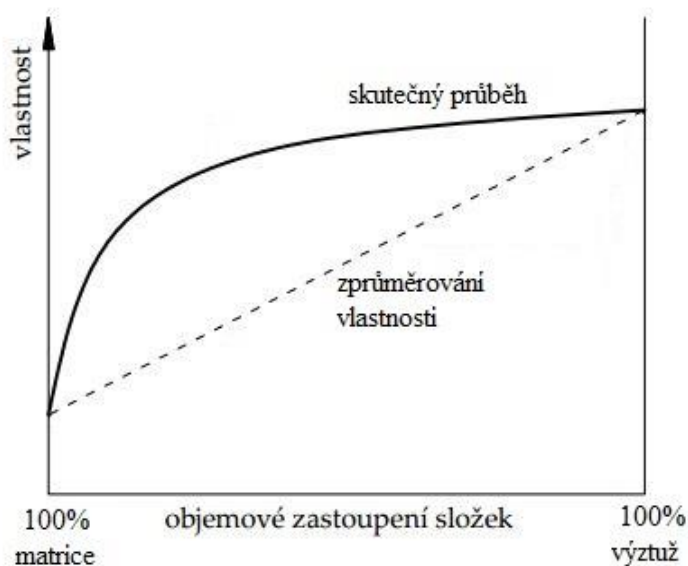
Obr. 2 Srovnání specifických hodnot tahových pevností běžných konstrukčních materiálů s kompozitními materiály [16]

Firma Sobriety s.r.o. byla založena v roce 2001 a svoje projekty realizuje v různých oblastech českého i světového průmyslu. Hlavní činnost firmy spočívá ve vývoji produktů a inženýrsko-poradenská činnost v široké oblasti techniky a také SW/HW vývoje. Jako nejznámější produkty společnosti možno uvést optický měřicí systém Mercury RT®, speciální aerodynamické ložisko a těsnění pro rozsah rychlostí od 100 do 750 000 min⁻¹, návrhový software pro ložiska a dynamiku rotorů DYNROT, či softwarové vývojové nástroje pro aerodynamiku AEROFLOW.

Materiálové vlastnosti všech kompozitů jsou závislé na charakteristikách jednotlivých složek a jejich podílu ve výsledné součásti, kvalitě rozhraní mezi nimi a významnou roli má taky geometrické uspořádání vyztužující fáze ve fázi spojovací. Pevnostní charakteristiky jsou z praktického hlediska značně ovlivňovány i technologickým výrobním procesem. Konečné mechanické charakteristiky výsledného kompozitního dílu se stanovují na základě známých vlastností složek, přičemž se vychází z ideálního výpočtového modelu (materiál bez poruch). Tvrdá a nespojitá fáze bývá označována jako inkluze a má charakter výztuže, nejčastěji ve formě vláken nebo tkaniny, které dodávají kompozitům vysokou pevnost v tahu. Poddajnější a spojitá fáze se nazývá matrice a má funkci pojiva výztuže. V závislosti na orientaci a uspořádání fází vykazují kompozitní materiály anizotropii, což znamená, že v různých směrech mají odlišné vlastnosti, jak je pro různé typy kompozitů znázorněno na obrázku 3. Tato vlastnost se může záměrně využívat v aplikacích jako luk či lopatky rotorů. Pokud je určitá vlastnost naopak nežádoucí, může být vhodným uspořádáním jednotlivých složek potlačena. Vlastnosti kompozitů určují charakteristiky fází, z nichž je složený. Pomocí pravidel směšování lze však určit jen některé základní parametry, jako např. objemová hmotnost. Vlastnosti jako je tuhost, tvrdost či pevnost není jednoduché předem přesně zjistit, protože je výrazně ovlivňuje tzv. synergický efekt. Podstata synergického efektu spočívá ve spolupůsobení složek kompozitní součásti tak, že ve výsledku jsou jeho vlastnosti lepší, než jaké je možno zjistit zprůměrováním vlastností jednotlivých fází (obr. 4).



Obr. 3 Pevnost v tahu znázorněna v polárním diagramu [12]



Obr. 4 Synergický efekt [20]

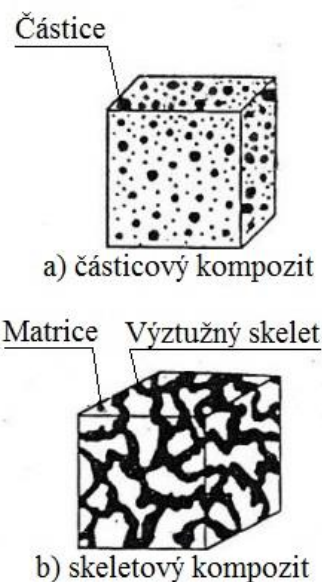
Podle druhu matrice a výztuže se kompozitní materiály dají rozdělit do několika skupin:

❖ Rozdělení podle druhu matrice:

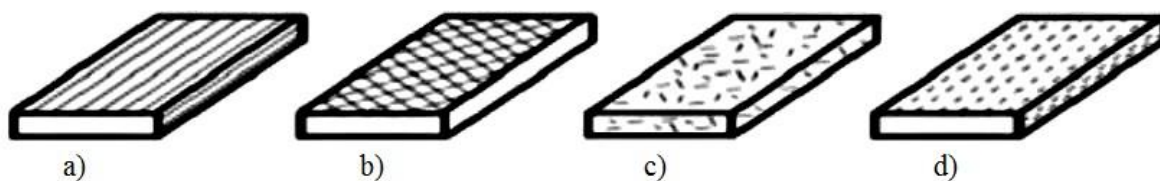
- s kovovou matricí – nejčastěji lehké slitiny hliníku, příp. hořčíku a titanu, vyznačují se dobrou elektrickou a tepelnou vodivostí, smykovou pevností, tvárností, nehořlavostí, odolností proti obrusu, erozi, povrchovému poškození a vysokou tepelnou odolností
- s keramickou matricí – jsou křehké, ale lehké a tvrdé, mají vysokou pevnost i při vyšších teplotách, a jsou odolné proti oxidaci, kvůli nesoudržnosti mezi matricí a vlákny jsou pro ně použitelná jen některé druhy vláken
- se silikátovou matricí – na bázi sádry a cementové pasty, používají se zejména v kombinaci se skelnými vlákny, kterým by samotným tato alkalická matrice způsobovala korozi, proto jsou vlákna buď chráněna polyvinylacetátovým povlakem nebo se použijí speciální alkalicko-odolná skla
- s polymerní matricí – jejich vlastnosti i postup výroby se liší podle druhu použitého polymeru (termoplast nebo reaktoplast)
 - termoplastové matrice – nylon, polyethylen, polypropylen nebo polycarbonát, jejich výhodou je nízká cena, malý obrus, vysoká pevnost, modul pružnosti a houževnatost
 - reaktoplastové matrice (termosety) – polyesterové, melaminové, siloxylové nebo epoxidové pryskyřice, dosahují vysoké tuhosti a pevnosti, jejich vlastnosti jsou značně ovlivněny uspořádáním vyztužující fáze

❖ Rozdělení podle druhu výztuže:

- dělení dle materiálu výztuže:
 - kovové výztuže – nejčastěji železo, chrom, titan, wolfram, nikl a jejich slitiny
 - nekovové výztuže – anorganické nebo organické
 - anorganické – keramické materiály, uhlík, bor, skla
 - organické – polymery, aramidová vlákna (kevlar), polyamidová vlákna (nylon)
- dělení dle geometrie výztuže:
 - částicové – částice se rozkládají v matrici a zabraňují šíření plastických deformací, zvyšují tak tvrdost a mez kluzu i pevnosti (obr. 5a)
 - skeletové – materiál s tímto typem výztuže je tvořen pórovitou strukturou matrice, kterou prostupuje souvislý nosný skelet (obr. 5b)
 - vláknové – s dlouhými nebo krátkými vlákny (obr. 6)
 - krátkovláknové – délka vláken je ve srovnání s velikostí součásti podstatně menší, lze je považovat za izotropní pouze tehdy, když jsou vlákna v matrici rozmístěna náhodně
 - dlouhovláknové – délka vláken je delší, příp. srovnatelná s velikostí součásti, vlákna mohou mít různé uspořádání (v jednom nebo více směrech, příp. vláknové spletenice, tj. rohože, kde matrice zastává jen funkci pojiva a vlastnosti výsledného výrobku ovlivňuje jen minimálně), vždy vykazují anizotropní chování



Obr. 5 Struktura částicového a skeletového kompozitu [23]



a) dlouhovláknové - jednosměrné, b) dlouhovláknové - vícesměrné,
c) krátkovláknové - náhodná orientace, d) krátkovláknové - usměrněná orientace

Obr. 6 Typy vláknových kompozitů [14]

Tab. 1 Mechanické vlastnosti vybraných vláken [23]

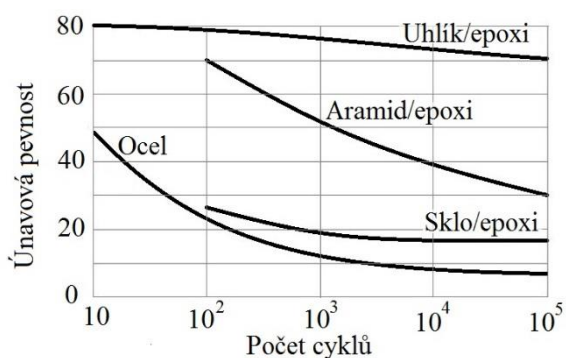
	Modul pružnosti v tahu	Pevnost v tahu	Hustota	Měrná pevnost	Tažnost
	E_t [GPa]	σ_{Pt} [MPa]	ρ [10 ³ kg.m ⁻³]	σ_{Pt} / ρ [MPa / kg.m ⁻³]	A [%]
Grafit HM	390	2100	1,9	1,9	0,7
Grafit HS	240	2500	1,9	1,3	0,7
Bor	385	2800	2,63	1,1	0,8
Wolfram	414	4200	19,3	0,22	-
Kevlar	130	2800	1,5	1,87	2,5
Ocel	210	340-2500	7,8	0,044-0,321	-

Z tabulky 1 jsou zřejmé mechanické vlastnosti některých používaných vláken. Pro aplikaci firmy Sobriety s.r.o. budou použita vysokopevnostní uhlíková vlákna (grafit High Strength), jelikož mají lepší pevnost v tahu než uhlíková vlákna vysokomodulová (grafit High Modulus) a v součinnosti s epoxidovou pryskyřicí vykazují nejpříznivější únavové chování, jak je vidět na obrázku 7, což je pro součást rotoru kompresoru velice vhodné. Pevnostní vlastnosti materiálu se determinují přítomností nadkritických poruch, kde dochází k nukleaci trhliny a k jejímu šíření, což nakonec vede k lomu. Absolutní počet materiálových poruch je závislý na rozměrech materiálu, u vlákna teda na jeho průměru a délce. Negativní vliv na mez pevnosti má u tenkých vláken jejich délka, z důvodu větší pravděpodobnosti výskytu poruch. Vlákná jsou však při výrobě kompozitů aplikována ve svazcích s náhodným rozdělením poruch, jež lokálně způsobují koncentraci napětí, což je důvodem, že uvažovaná pevnost svazku vláken je menší, než pevnost samotného vlákna. Tento fakt popisuje Griffitův vztah:

$$\sigma_{Pt} = A + \frac{B}{d}, \quad (1.1)$$

kde σ_{Pt} je pevnost v tahu [MPa]
A; B jsou materiálové konstanty
d je průměr vlákna [mm]

Z Griffitova vztahu (1.1) je tedy zřejmá skutečnost, že pevnost v tahu je menší pro svazek vláken, kterého průměr je větší, než průměr samotného vlákna. Tato skutečnost by mohla výrazně ovlivnit charakteristiky trubek, které se budou vyrábět pro rotor kompresoru, jelikož se budou používat svazky dlouhovláknové výztuže. Pro zamezení možného snížení pevnosti



Obr. 7 Únavové chování kompozitů [16]

vláken se použije epoxidová pryskyřice, u které v průběhu vytvrzování vzniká prostorová tuhá polymerní síť. Při vyšších teplotách se však snižuje jejich modul pružnosti, mez pevnosti a zvyšuje se tažnost. I z toho důvodu se do pryskyřiční lázně přidává tvrdidlo, které zamezí degradaci vlastností. Takto vytvrzené matrice zůstávají v tuhé fázi i při zahřívání, mají tedy vyšší odolnost proti vysokým teplotám a creepu. Mechanické vlastnosti reaktoplastů, které je možno použít jako matrice jsou uvedeny v tabulce 2.

Tab. 2 Mechanické vlastnosti vybraných reaktoplastů [23]

	Hustota	Modul pružnosti v tahu	Pevnost v tahu	Tažnost
	ρ [10 ³ kg.m ⁻³]	E_t [GPa]	σ_{Pt} [MPa]	A [%]
Polyester	1,1-1,5	1,3-4,5	45-85	1-5
Polyimid	1,2-1,9	3-3,1	80-190	2-40
Fenolická pryskyřice	1,3	4,4	50-60	1-3
Epoxidová pryskyřice	1,1-1,4	2,1-6	35-90	1-10

1.1 Možnosti výroby vláknových kompozitů s organickou maticí

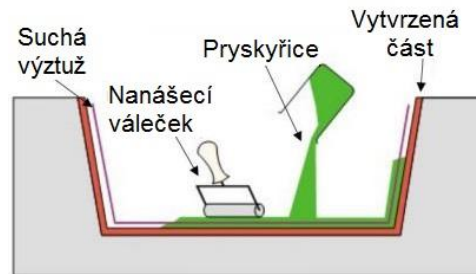
V dnešní době je více možností výroby kompozitů, které umožňují vyrábět nejrůznější tvary a velikosti součástí. Volba vhodné metody výroby závisí jak na znalosti geometrických specifikací vyráběného dílu, tak na ekonomickém posouzení výhodnosti výroby komponenty danou metodou a v neposlední řadě na druhu kompozitu a jeho fází, jejichž kombinací se dosáhne požadovaných vlastností výrobku. Jak již bylo dříve zmíněno, pro výrobu kompozitních trubek bude použita epoxidová pryskyřice jako matrice a vysokopevnostní dlouhá uhlíková vlákna jako inkluze. Možnosti technologických výrobních postupů pro výrobu kompozitních materiálů jsou uvedeny v následující tabulce, včetně uvedení vhodnosti použití podle typu kombinace vláken s maticí.

Tab. 3 Výrobní postupy kompozitních materiálů [23]

Výrobní technologie	Dlouhé vlákno, organická matrice	Dlouhé vlákno, kovová matrice	Krátké vlákno
Ruční kladení	✓		✓
Vakuové zpracování v autoklávu	✓		✓
Lisování v přípravku	✓	✓	✓
Válcování tlakem		✓	
Nastříkávání			✓
Přenos kapalné matrice	✓	✓	✓
Vytlačování		✓	✓
Tváření tahem	✓	✓	
Vstřikování			✓
Prášková metalurgie			✓
Navíjení	✓	✓	

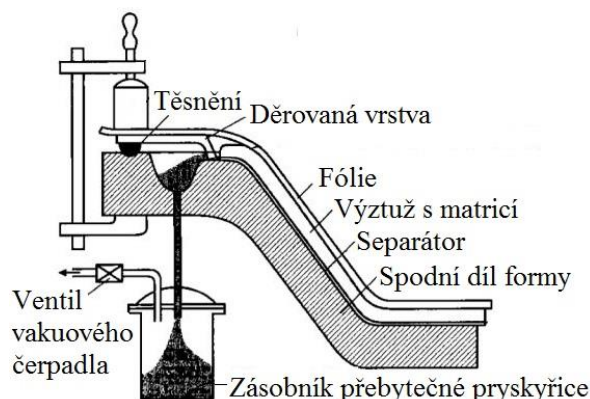
Z tabulky 3 je zřejmé, které z možných metod výroby kompozitů jsou vhodné pro součásti tvořené organickou maticí a dlouhovláknovou výztuží.

- ❖ Ruční kladení je nejstarší a nejjednodušší metoda formování kompozitů, vhodná především pro velké komponenty. Produktivita je při ručním kladení vláken nízká a vyžaduje intenzivní činnost pracovníků. Princip metody spočívá v kladení výztuže ve formě vláken, nebo rohože na otevřenou formu. Prosycování vyztužujících prvků v pryskyřici se provádí těsně před uložením na formu, ručně štětcem, sprejem nebo válečkem. Při procesu kladení může mezi vrstvami uvíznout vzduch, který vytváří bubliny. Uvzněný vzduch se po uložení vrstvy odstraňuje manuálně, tlakem stěrky nebo válečku po ploše, kde byla nanесena výztuž. Vytvrzování vyrobených dílů probíhá při pokojové teplotě, je-li nutno tvrdost zvýšit víc, dotvrdí se za zvýšené teploty (do 80 °C). Z hlediska použitých složek pro výrobu kompozitů by tato metoda byla použitelná, nevyhovuje však geometrickým specifikacím vyráběných součástí.

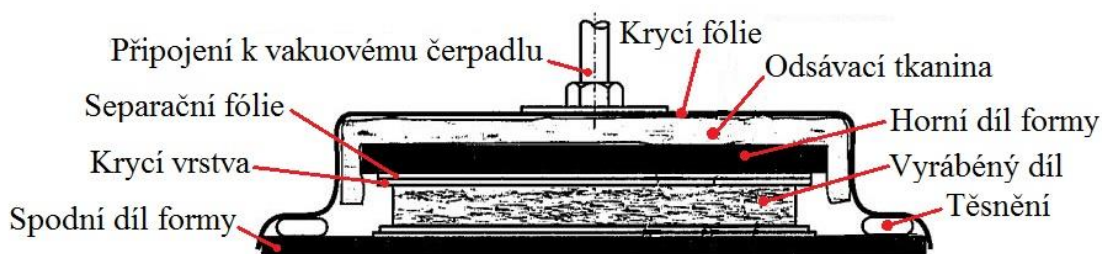


Obr. 8 Schéma ručního kladení [2]

- ❖ Vakuové zpracování v autoklávu je vylepšením metody ručního kladení. Využívá vakuum na eliminování uvíznutého vzduchu mezi vrstvami, a teda vzniku vzduchových bublin, a rovněž zamezuje aplikování přebytkového množství pryskyřice. Do formy, která je opatřena separátorem nebo fólií, je nanесena vrstva nepřilnavého polyvinyl alkoholu nebo nylonu. Tato vrstva slouží jako ochrana povrchu dílce před znečištěním. Do formy se nanесе potřebný počet vrstev výztuže s pryskyřicí a na poslední vrstvu je opět nanесena stejná nepřilnavá vrstva spolu s vrstvou děrované fólie nebo tkaniny, která umožňuje průchod pryskyřice. Celá forma je umístěna v autoklávu, což je tlaková nádoba, ve které se po nanесení všech vrstev provádí vakuování součásti. Tím se jednak odsává nadbytečná pryskyřice a zároveň se vytváří atmosférický tlak, jež přitlačuje jednotlivé vrstvy inkluze k sobě. Autokláv je následně ohříván, čímž se vytvrzuje matrice. Jelikož je tato metoda principiálně založena na ručním kladení, nevyhovuje pro řešenou aplikaci ze stejných důvodů.

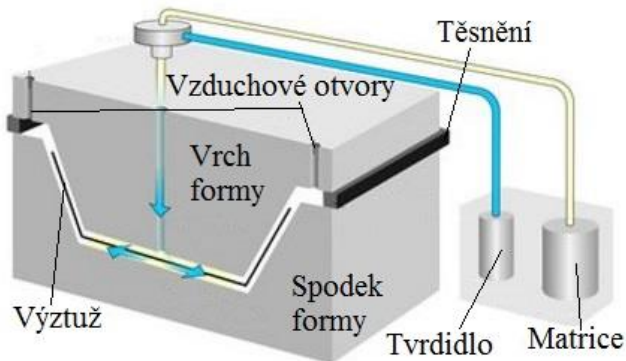


Obr. 9 Schéma vakuového zpracování [2]



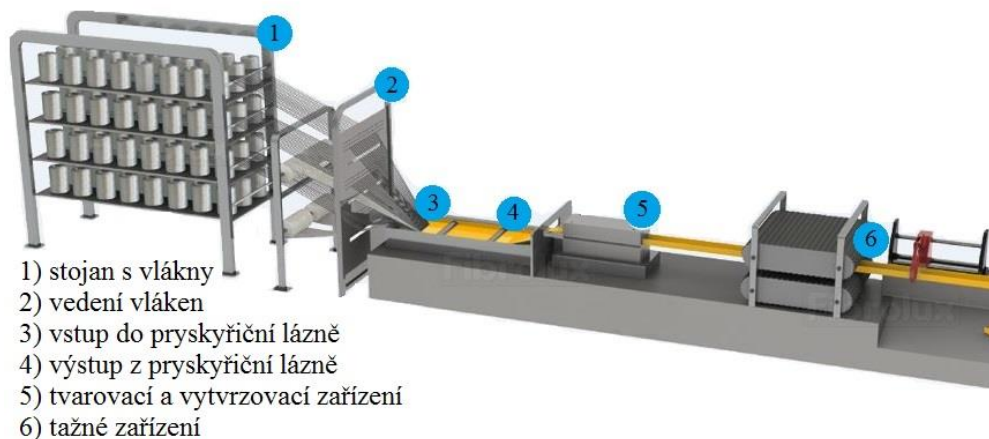
Obr. 10 Schéma autoklávu [2]

- ❖ Přenos kapalné matrice je metoda označována jako RTM (Resin transfer molding). Principem je stlačování suché vyztužující fáze malým tlakem v uzavřené formě, přičemž je do formy vstřikovaná pryskyřice o nízké viskozitě pod tlakem, která je postupně transferována do výztuže a po naplnění formy vytéká odtokovými otvory. Pryskyřice rovněž vytlačuje vzduch z volných míst mezi jednotlivými vrstvami výztuže. Tímto způsobem je možné vyrábět díly, u kterých je potřeba dosáhnout uniformní tloušťky stěny s velice kvalitní strukturou povrchu. Metoda je vhodná pro střední výrobní množství. Pro navíjení řešených dílů je vhodná z hlediska použitelnosti uhlíkových vláken a epoxidové pryskyřice. Není ale vhodná pro dané geometrické uspořádání vyztužující fáze v součástech, a taky z ekonomického hlediska, jelikož pořizovací náklady jsou velmi vysoké a narostly by s nutnou modifikací výrobního zařízení pro možnost výroby kompozitních trubek.



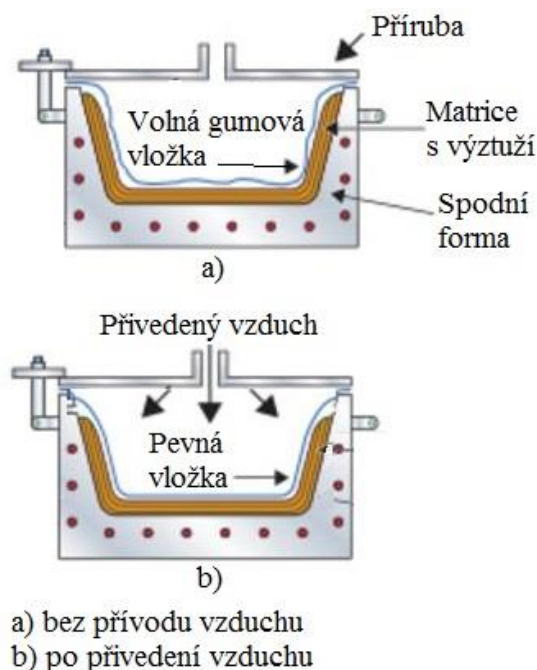
Obr. 11 Schéma metody RTM [13]

- ❖ Tváření tahem neboli pultruze je kontinuální způsob výroby velmi pevných kompozitů, které můžou nabývat nejrůznější tvary průřezu. Pro různé průřezy jsou zapotřebí přídavná zařízení odpovídajícího tvaru. Svazky vláken jsou při procesu pultruze taženy a vedeny pomocí vodících zařízení, aby se dosáhlo požadovaného tvaru. Vlákná nejprve prochází pryskyřiční lázní, kde jsou dostatečně prosycena. Poté už vstupují do zástupu vodících a tvarovacích prvků. Když se dosáhne požadovaného tvaru průřezu, následuje vytvrzování za zvýšené teploty. Formovací a vytvrzovací zařízení může být a v dnešní době ve většině případů je jedno komplexní zařízení. Po vytvrzení je materiál tažen k dělicímu zařízení, kde je uřezán na požadovanou délku. Proces výroby je plně automatický, pracovník je nutný pouze na doplnění spotřebovaných výztuží a pryskyřice a na uskladnění nebo další manipulaci s vyrobenými díly. Ačkoliv je tato metoda v ohledu produktivity a pevnostních charakteristik vyrobených dílů velice výhodná, pořizovací cena výrobního zařízení je, stejně jako provoz, velice vysoká. Největším důvodem proč tato metoda není optimální pro řešenou aplikaci je, že není možné kombinovat orientaci výztuže v rámci jedné součásti.



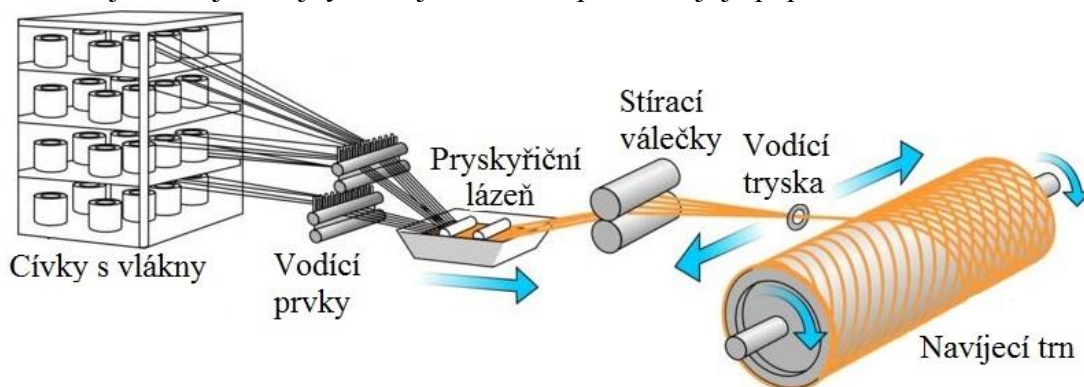
Obr. 12 Proces pultruze [13]

- ❖ Lisování v přípravku je podobný způsob výroby kompozitních materiálů jako vakuové zpracování v autoklávu s tím rozdílem, že tlak je vyvozen vzduchem, jež rozpíná gumovou vložku nebo tenký plech, které pak tlačí na vloženou výztuž prosycenou v matrici a vytlačí jak uvíznutý vzduch, tak nadbytečné množství pryskyřice. Jako zdroj tlaku se místo vzduchu může použít i stlačená horká pára, která navíc zahřívá součást a urychluje tak proces tvrdnutí. Pro formování výztuže s matricí je možné používat různé jádra nebo přídavné komponenty, které umožňují vytvářet nejrůznější tvary kompozitů. Tento způsob výroby je vyhovující téměř po všech technologických stránkách a ekonomicky je nepříliš náročný. Jediný nevyhovující aspekt je, že proces probíhá v uzavřené formě, což znamená, že vytvarování a prosycování výztuže se musí realizovat před vložením do formy, stejně tak jako případné plnění přídavným materiálem třetího typu.



Obr. 13 Metoda lisování v přípravku [13]

- ❖ Navíjení pozůstává z vinutí svazků vyztužujících vláken prosycených v pryskyřičném pojivu na rotující trn v předem přesně určené orientaci. Kromě geometrického uspořádání vláken je variabilní i geometrie samotného dílu, která je závislá na tvaru navíjecího trnu, který se na konci výroby může z kompozitu odstranit, nebo může zůstat jeho součástí. Tato metoda nabízí největší kontrolu nad umístěním a orientováním vláken. Vlákná se odvíjí z cívek, jsou vedena přes pryskyřičnou lázeň, kde jsou prosycována a následně mohou být vedeny buď přímo k navíjecímu trnu, nebo jsou k trnu vedeny přes řadu stěračů, které z nich odstraňují přebytečnou matrici. Počtem stěračů se dá efektivně optimalizovat množství matrice ve výsledném výrobku. Po navinutí požadovaného počtu vrstev se součást spolu s trnem musí vytvrdit. Vytvrzování může probíhat při pokojové teplotě, nebo je díl s trnem vložen do vytvrzovací pece, kde se výrazně zlepši jeho mechanické vlastnosti. Vytvrzování se dá také realizovat kombinací těchto dvou zmíněných způsobů. Náklady na pořízení výrobního zařízení jsou poměrně vysoké, no cena je vyvážena velice vysokou variabilitou možností výroby. Pro navíjení trubek je tato metoda nejvhodnější i nejvýhodnější volbou a podrobněji je popsána dále.



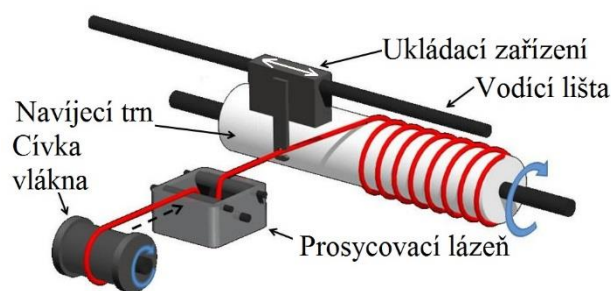
Obr. 14 Schématické zobrazení navíjení kompozitů [13]

1.2 Navíjení kompozitních materiálů

V dnešní době je technologie navíjení jednou z nejefektivnějších a nejprogresivnějších metod pro výrobu kompozitních materiálů ve tvaru dutého tělesa. Jako výztuž se při produkci touto metodou používají pramence skleněných, aramidových nebo uhlíkových vláken. Tyto pramence jsou impregnovány pojivem a následně ovíjeny na rotující jádro (trn), který tvarově odpovídá výrobku. Ukládací, neboli vodící část stroje se pohybuje podél osy rovnoběžné s osou trnu, přičemž navíjecí trn současně rotuje kolem své osy. Výztuži se uděluje určitá hodnota předpětí v impregnačním a naváděcím zařízení. Úhel návinu je možné regulovat poměrem otáčení trnu a posuvem ukládací trysky, a to v rozmezí 0° - 90° . Všechny tyto pohyby, a teda celý proces navíjení, jsou plně řízeny počítačem, což umožňuje optimalizování kinematiky přesně podle požadavků. Díky tomu je možné přesné kladení vláken v několika osách, což umožňuje výrobu i součástí relativně složitých tvarů. Investiční náročnost je dána zejména náklady na pořízení navíjecího zařízení a výrobní cenou navíjecích trnů.

Podle směru ukládání vyztužujících vláken na navíjecí trny lze metodu navíjení rozdělit do několika typů návinů:

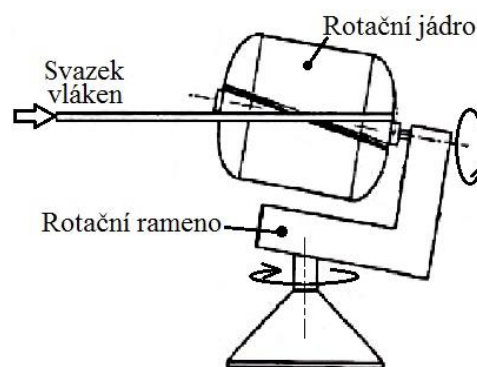
- ❖ Šroubovicový návin vláken smočených v pryskyřici se používá pro výrobu rotačních i nerotačních součástí s konvexními povrchy. Požadované orientace vláken ve stěně výrobku se dosahuje zvolením určité rychlosti posuvu ukládacího ústrojí při dané rychlosti rotace trnu. Svazky vláken jsou na trnu orientovány v úhlu blízkém 90° (od osy trnu), což znamená, že jsou kladeny hned vedle sebe, nebo s velmi malým rozstupem.



Obr. 15 Šroubovicový návin [3]

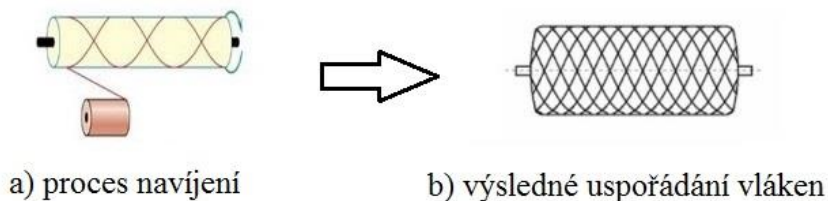
U součástí malých rozměrů se po navinutí a vytvrzení kompozitu trn vytlačí nebo vytáhne pomocí lisu, nebo jiného vytahovacího zařízení. V případě rozměrných součástí se používají zvláštní trny, které se po zhotovení součásti sklopí dovnitř dutiny. Při navíjení tlakových nádob zůstává jádro uvnitř výrobku a zaručuje těsnost, přičemž kompozit určuje mechanickou pevnost.

- ❖ Pólový návin je realizován nanášením vláken ramenem pohybujícím se okolo tenkostěnného otáčivého jádra. Výztuž je teda kladena i v oblasti pólů jádra. Úhel, který navinutá vlákna svírají s osou jádra, je podstatně menší, než u šroubovicového návinu, blíží se k 0° . Tímto způsobem je možné navíjet téměř jakoukoliv kombinaci průměru a délky dílu, omezením je pouze velikost stroje. U tohoto typu návinu zůstává jádro součástí výrobku a slouží jako těsnění. Součásti navíjené pólovým způsobem vykazují díky orientaci výztuže podstatně větší osovou tahovou pevnost. Pólovým návinem jsou v dnešní době zhotovovány všechny kompozitní tlakové nádoby.



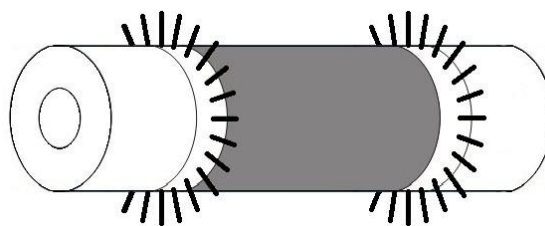
Obr. 16 Pólový návin [8]

- ❖ Spirálový návin je určitým přechodem mezi návinem šroubovice a pólovým návinem. Vláknena jsou orientována pod určitým úhlem tak, že se navíjí s rozestupem závislým na tomto úhlu. Postupně se navíjí vrstva na vrstvu, až se zakryjí všechny mezery a vznikne kompozit s uspořádáním vláken, jak názorně zobrazuje obrázek 17.



Obr. 17 Spirálový návin [13]

- ❖ Axiální návin, také známý jako technika PSW (pin supported winding), zaručuje vyrobenému kompozitu maximální možnou axiální pevnost. Tento typ návinu vyžaduje přídatné prvky jádra, které umožní uchycení vláken na jeho koncích a dosažení úhlu návinu 0° . Tyto prvky jsou v podstatě radiální kolíky, rozmístěny na obou koncích jádra po jeho obvodu. Vlákneno je vedeno podél osy a zachytáváno za jednotlivé kolíky. Množství a rozměry kolíků jsou dány velikostí samotného jádra. Běžně se tato metoda nepoužívá samostatně, nýbrž v kombinaci s jiným typem návinu.



Obr. 18 Trn pro axiální návin [8]

- ❖ Smíšený návin je výroba kompozitního dílu kombinací dvou, nebo výjimečně více z výše popsaných způsobů. Kombinací jednotlivých návinů lze ideálně optimalizovat požadované charakteristiky vyráběné součásti. Omezením je konstrukce výrobního zařízení, které jednotlivé návinu může, ale nemusí umožnit. Pro navíjení řešených kompozitních trubek se bude používat tento typ návinu, a sice kombinace šroubovicového a axiálního návinu.

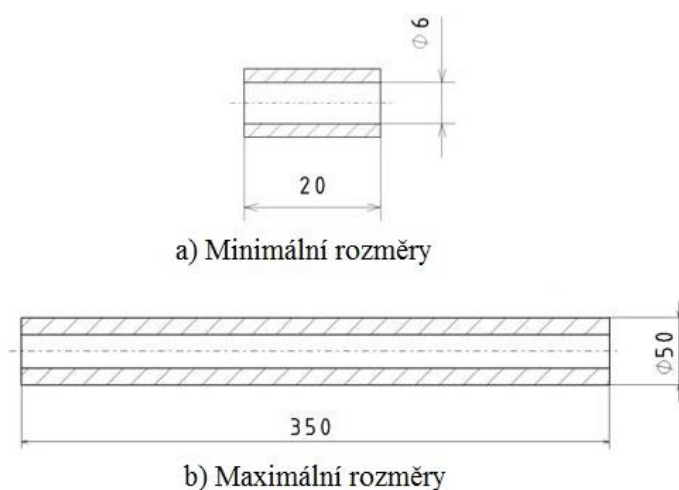
Pro shrnutí, řešené dvoufázové kompozitní trubky budou pozůstat z dlouhých vysokopevnostních uhlíkových vláken, prosycených v epoxidové pryskyřici s tvrdidlem. Pro trubky tříslůžkové bude navíc přidán materiál třetího typu ve formě magnetického, nebo korkového prachu, který bude do materiálu rovnoměrně přidáván současně s procesem výroby. Všechny trubky se budou vyrábět metodou navíjení, konkrétně smíšeným návinem, který bude kombinací šroubovicového a axiálního návinu. Po navinutí se budou díly vytvrzovat nejprve na vzduchu při pokojové teplotě a poté ve vytvrzovací peci, aby se dosáhlo lepších mechanických charakteristik. Navíjecí trny se po vytvrzení z kompozitu odstraní na vytahovacím zařízení, nebudou tedy součástí hotového výrobku. Vyrobené kompozitní trubky budou podrobeny testům na pevnost v ohybu a tlumení vibrací. Porovnávání budou zjištěné charakteristiky třífázových trubek vůči vlastnostem trubek dvoufázových.

2 ZÁKLADNÍ SPECIFIKACE VYRÁBĚNÝCH TRUBEK [23]

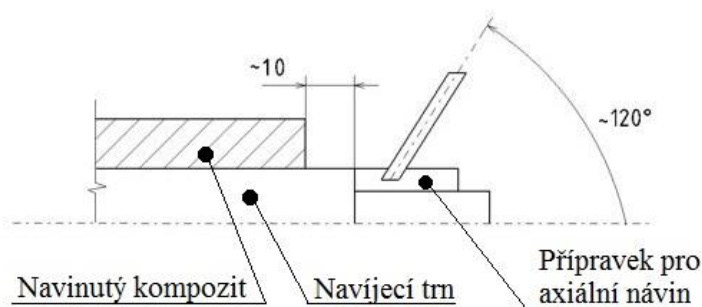
Variabilita vyráběných dílů je při produkci výrazně omezena jak kvalitou, tak velikostí samotného výrobního zařízení, na kterém se produkce realizuje. Výrobní zařízení pro navíjení kompozitních trubek FWMS 180 bylo navrženo a sestaveno dle geometrických specifikací, které jasně udávají minimální a maximální rozměry navíjených kompozitních trubek, ale i specifikací návinů, které budou při výrobě realizovány.

2.1 Geometrické specifikace

Specifikace uvedené na obrázku 19 platí pro navíjení trubek kruhového průřezu, který budou mít součásti pro uvažovanou aplikaci jako součást rotoru kompresoru. Trubky, které se vyrobí pro testování mechanických vlastností, budou rovněž kruhového průřezu, ovšem rozměrově se budou lišit z důvodu vhodnosti pro tyto testy. Jak bylo zmíněno v předešlé kapitole, tvar průřezu výrobků se může lišit v závislosti na tvaru trnu, na který se daný výrobek navíjí. Tyto průřezy můžou při výrobě na zařízení FWMS 180 nabývat téměř jakéhokoliv tvaru (kruh, čtverec, obdélník, trojúhelník, mnohoúhelník,...), není však možné navíjet profily, u kterých by při rotačním navíjení došlo ke vzniku prázdné dutiny, tzn., že vlákna by se navíjeli přes hrany profilu a do prázdných míst by je vést nebylo možné (profily L, U, T,...). Při výrobě se ale musí brát v potaz nejenom minimální a maximální rozměry, ale i technologické přídatky týkající se zejména délky návinu. Tyto přídatky jsou nezbytné pro uřezání navinutého vlákna ve stroji, aby bylo



Obr. 19 Geometrické specifikace vyráběných trubek

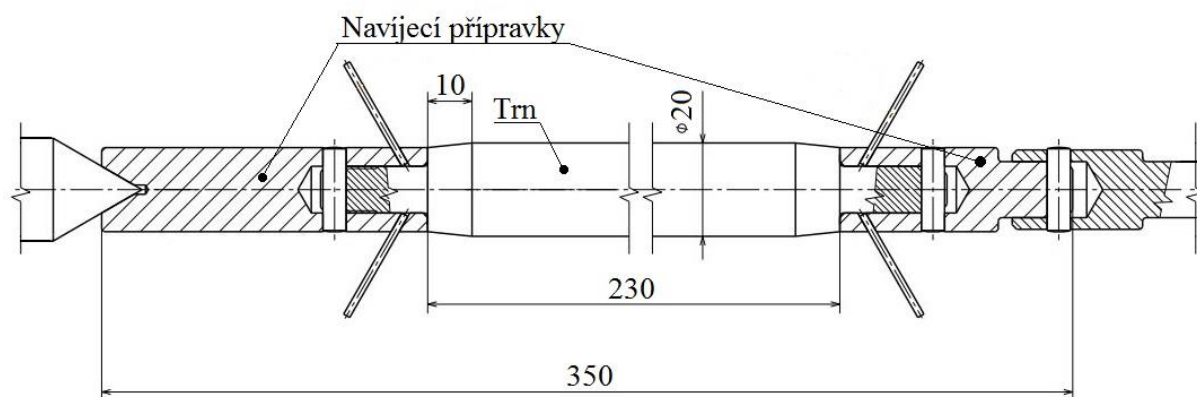


Obr. 20 Specifikace technologických přídavek

Tento sklon zaručuje po zaháknutí vlákna jeho sklouznutí do nejnižší možné polohy, čímž se zamezí tomu, aby vlákno tažené rovnoběžně s osou trnu viselo ve vzduchu. Po vytvrzení dílu dochází k dalšímu obrobení, a sice ořezání součásti na požadovaný délkový rozměr anebo v případě, že se na jeden trn navíjí více kratších kusů, k řezání jednotlivých dílců na požadované délky.

možné trn spolu s navinutým nevytvrzeným kompozitem vyndat z přípravků a vložit do vytvrzovací pece. Navíjecí přípravky se používají výhradně pro axiální návin a při navíjení jsou součástí trnu. Na obrázku 20 je navinutý kompozit znázorněn už po uříznutí, ve skutečnosti je ale vlákno vedeno tak, že zasahuje až do těchto přípravků, a v případě podélného návinu je zachycováno za jehličky svírající úhel 120°.

Za účelem testování mechanických vlastností se budou navíjet kompozitní trubky o vnitřním průměru 20 mm, vnějším průměru 25 mm a délce 130 mm. Použito bude celkem šestnáct kusů jehliček pro podélný návin, teda osm kusů na každé straně trnu. Navíjet se budou kompozity jak s přídatným materiálem třetího typu, tak i bez něj na trn dle schématu na obrázku 21.



Obr. 21 Schéma navíjecí sestavy pro testovací trny

2.2 Specifikace návinu

Jak již bylo zmíněno v první kapitole, ze všech možných typů návinů se pro návin testovacích trnů použije návin smíšený. Pozůstávat bude ze šroubovicového a axiálního návinu, tedy z kombinace, u které se předpokládá dosažení optimálních vlastností a zaručení možnosti použití materiálu třetího typu a jeho rovnoměrné rozmístění ve struktuře. Na trn se navine první vrstva šroubovice, aby pokryla celý jeho povrch. V případě návinu dvoufázového kompozitu se pak budou střídavě navíjet výztuže axiální a šroubovicové až po dosažení požadovaného vnějšího průměru. Ve výsledku bude teda struktura složena se střídavých, pryskyřicí prosycených, axiálních a radiálních vláken. U tříslůžkové kompozitní trubky je navíjení poněkud složitější. Po dokončení první šroubovicové vrstvy se navinou, stejně jako u dvousložkového výrobku, axiální vlákna. Poté se už ale bude spolu s každým navíjením šroubovice (s výjimkou posledního), jež se opět bude střídát s návinem axiálním, vnášet do struktury přídatný materiál. Výsledná struktura vláken bude teda téměř totožná se strukturou dvousložkových trubek (obr. 22) s tím rozdílem, že mezi vlákna bude vtačeno určité množství třetí fáze.

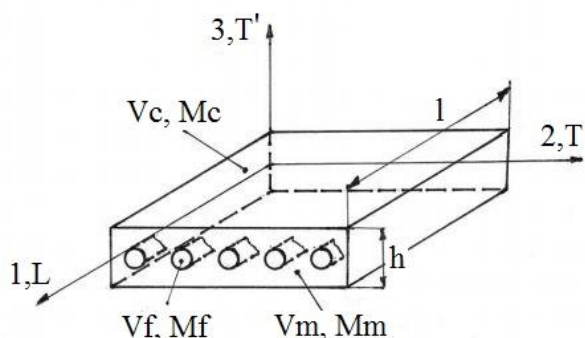


Obr. 22 Výsledná struktura vláken v trubkách po skončení navíjení

2.3 Specifikace mechanických charakteristik kompozitních materiálů

Materiálové vlastnosti kompozitních materiálů jsou přímo závislé na materiálových charakteristikách jednotlivých složek a jejich podílu, geometrickém uspořádání vyztužující fáze v matrici a kvalitě rozhraní mezi nimi. Úroveň technologického výrobního procesu má v praxi největší vliv na všechny charakteristiky kompozitních výrobků, a to v největší míře na pevnostní materiálové charakteristiky. Pro vyhodnocení kvality procesu výroby, a rovněž kvality samotného kompozitního výrobku, je tedy potřebné stanovit výsledné mechanické materiálové charakteristiky vyráběné součásti na základě známých vlastností materiálů složek a strukturního složení kompozitu. Při jejich určování se vychází z ideálního výpočtového modelu kompozitního materiálu bez přítomnosti poruch.

Základním principem zjišťování hustoty kompozitu je tzv. směšovací pravidlo, které vychází z předpokladu, že objem výsledného kompozitního materiálu je součtem objemů matrice a vyztuže. Pro další postup je vhodné sestavit geometrický model dlouhovláknového kompozitu.



Obr. 23 Geometrický model dlouhovláknového kompozitu [23]

Na obrázku geometrického modelu dlouhovláknového kompozitu hlavní materiálové osy L (longitudinální, neboli podélná), T (transversální, neboli příčná) a T' (druhá transversální) odpovídají hlavním ortotropickým osám 1, 2 a 3. V_f , V_m a V_c představují celkové objemy, přičemž index „f“ značí vlákna ve vzorku, index „m“ matrici ve vzorku a index „c“ značí celý vzorek. Pro další postup je nutno zavést objemové podíly vláken a matrice, stejně tak jako i hmotnostní podíly obou složek.

Objemový podíl vlákna a matrice:

$$v_f = \frac{V_f}{V_c} [-] \quad v_m = \frac{V_m}{V_c} [-] \quad (2.1)$$

Hmotnostní podíl vlákna a matrice:

$$m_f = \frac{M_f}{M_c} [-] \quad m_m = \frac{M_m}{M_c} [-] \quad (2.2)$$

kde M je hmotnost příslušné složky vzorku dle indexu [kg]

Z podmínky zachování objemu a hmoty se sestaví následující rovnice:

$$V_c = V_f + V_m = \sum V_i \text{ [m}^3\text{]} \quad 1 = \frac{V_f}{V_c} + \frac{V_m}{V_c} = v_f + v_m = \sum v_i \quad (2.3)$$

$$M_c = M_f + M_m = \sum M_i \text{ [kg]} \quad 1 = \frac{M_f}{M_c} + \frac{M_m}{M_c} = m_f + m_m = \sum m_i \quad (2.4)$$

S jistotou se dá říct, že mezi hmotnostními a objemovými podíly existuje jednoznačná relace, a sice prostřednictvím hustot ρ .

$$m_f = \frac{M_f}{M_c} = \frac{\rho_f \cdot V_f}{\rho_c \cdot V_c} = \frac{\rho_f}{\rho_c} \cdot v_f \quad (2.5)$$

$$m_m = \frac{M_m}{M_c} = \frac{\rho_m \cdot V_m}{\rho_c \cdot V_c} = \frac{\rho_m}{\rho_c} \cdot v_m \quad (2.6)$$

Vztah pro hustotu kompozitu se pomocí předešlých rovnic odvodí ze vztahu pro celkovou hmotnost kompozitu, který se nazývá směšovací pravidlem pro určení hustoty kompozitu ρ_c .

$$\begin{aligned} M_c &= M_f + M_m \\ \rho_c \cdot V_c &= \rho_f \cdot V_f + \rho_m \cdot V_m \\ \rho_c &= \rho_f \cdot v_f + \rho_m \cdot v_m = \sum \rho_i \cdot v_i \end{aligned} \quad (2.7)$$

Hustota kompozitu se dá rovněž vyjádřit pomocí hmotnostních podílů.

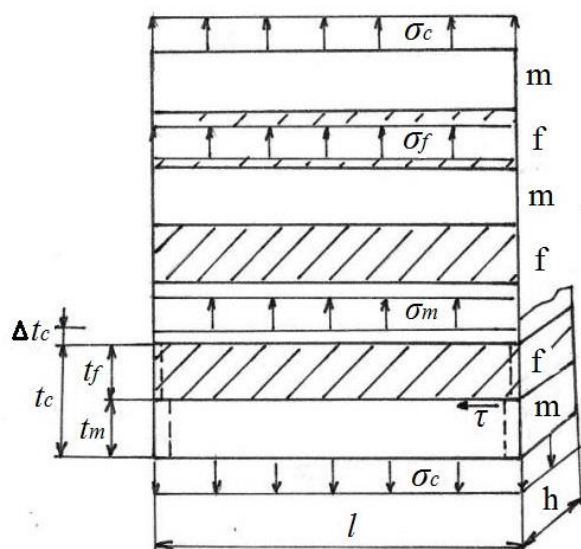
$$\begin{aligned} 1 &= v_f + v_m = \frac{\rho_c}{\rho_f} \cdot m_f + \frac{\rho_c}{\rho_m} \cdot m_m \\ \rho_c &= \frac{1}{\frac{m_f}{\rho_f} + \frac{m_m}{\rho_m}} = \frac{1}{\sum \frac{m_i}{\rho_i}} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}] \end{aligned} \quad (2.8)$$

Všechny odvozené vztahy jsou platné za předpokladu, že kompozitní materiál je ideální, tzn. bez dutin, způsobených nedokonalou impregnací vláken v matrici.

Při modifikovaném namáhání testovaných kompozitních trubek, stejně jako při jejich namáhání v reálné aplikaci kompresoru, jsou nejdůležitějšími parametry příčný a podélný modul pružnosti v tahu, přičemž příčný je vždy několikanásobně menší než modul pružnosti v podélném směru.

2.3.1 Příčný modul pružnosti

Při určování vztahů se opět vychází z geometrického modelu, tentokrát však z rovinného geometrického modelu kompozitního materiálu. Aby bylo při sestavování rovnic možné



Obr. 24 Rovinný geometrický model kompozitu

[23]

$$\sigma_c = \sigma_f + \sigma_m \quad [\text{MPa}] \quad (2.9)$$

Další postup je zaměřen na přetvoření kompozitu v příčném směru. Protažení v tomto směru se spočte podle následujícího vztahu:

$$\begin{aligned} \Delta t_c &= \Delta t_f + \Delta t_m, \\ \text{kde } \Delta t_f &\text{ je protažení vlákna v příčném směru [mm]} \\ \Delta t_m &\text{ je protažení matrice v příčném směru [mm]} \end{aligned} \quad (2.10)$$

Jednotlivá protažení je taky možné vyjádřit pomocí poměrných přetvoření

$$\begin{aligned} \Delta t_c &= \epsilon_c \cdot t_c; \quad \Delta t_f = \epsilon_f \cdot t_f; \quad \Delta t_m = \epsilon_m \cdot t_m, \\ \text{kde } \epsilon &\text{ je poměrné přetvoření složky dle indexu [-]} \end{aligned} \quad (2.11)$$

Po dosazení rovnic (2.11) do rovnice protažení v příčném směru (2.10) vzniká vztah pro celkové poměrné přetvoření kompozitu.

$$\varepsilon_c \cdot t_c = \varepsilon_f \cdot t_f + \varepsilon_m \cdot t_m \quad / \cdot \frac{l \cdot h}{t_c \cdot l \cdot h}$$

$$\varepsilon_c = \varepsilon_f \cdot \frac{t_f \cdot l \cdot h}{t_c \cdot l \cdot h} + \varepsilon_m \cdot \frac{t_m \cdot l \cdot h}{t_c \cdot l \cdot h} = \varepsilon_f \cdot \frac{V_f}{V_c} + \varepsilon_m \cdot \frac{V_m}{V_c}$$

Zavedením poměrných objemů vláken a matrice se dosáhne výsledný vztah pro poměrné přetvoření kompozitu v příčném směru.

$$\varepsilon_T = \varepsilon_c = \varepsilon_f \cdot v_f + \varepsilon_m \cdot v_m = \sum \varepsilon_i \cdot v_i, \quad (2.12)$$

kde ε_T je označení celkového poměrného přetvoření v transfersálním směru [-]

Předchozí vztah (2.12) se rovněž nazývá směšovací pravidlo pro stanovení poměrného přetvoření kompozitu v příčném směru ε_c .

Cílem při specifikaci materiálových charakteristik je stanovení modulu pružnosti kompozitu v příčném směru E_{cT} , za předpokladu, že komponenty i celkový kompozit vykazují lineární pružné chování. Vychází se tedy z Hookova zákona.

$$\sigma_f = E_f \cdot \varepsilon_f; \quad \sigma_m = E_m \cdot \varepsilon_m; \quad \sigma_c = E_{cT} \cdot \varepsilon_c \quad (2.13)$$

Dosazením jednotlivých rovnic (2.13) do rovnice pro poměrné přetvoření kompozitu v příčném směru (2.12) obdržíme následující vztah

$$\frac{\sigma_c}{E_{cT}} = \frac{\sigma_f}{E_f} \cdot v_f + \frac{\sigma_m}{E_m} \cdot v_m \quad (2.14)$$

a po zohlednění vztahu pro celkové napětí v kompozitu (2.9) dostáváme

$$\frac{1}{E_{cT}} = \frac{v_f}{E_f} + \frac{v_m}{E_m} = \sum \frac{v_i}{E_i} \quad (2.15)$$

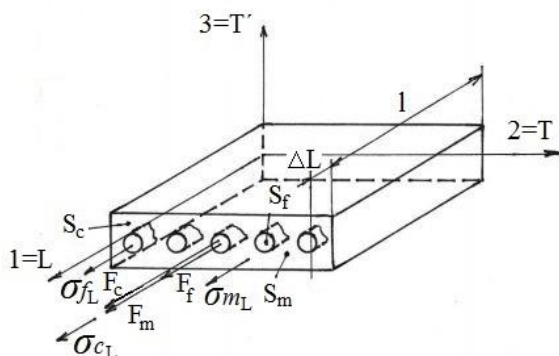
Směšovací pravidlo platí v příčném směru pro převrácené hodnoty modulu pružnosti, tedy pro poddajnost. Pro získání hodnoty modulu pružnosti se provede jednoduchá úprava, která odstraní převrácenou hodnotu.

$$E_{cT} = \frac{1}{\frac{v_f}{E_f} + \frac{v_m}{E_m}} = \frac{1}{\sum \frac{v_i}{E_i}} \quad [\text{GPa}] \quad (2.16)$$

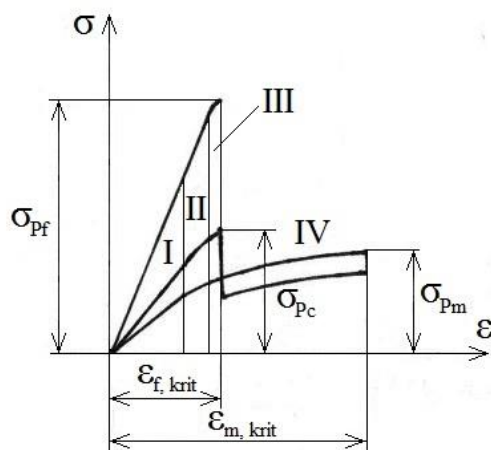
Získáním tohoto modulu pružnosti známe jednu z nejdůležitějších materiálových charakteristik kompozitu.

2.3.2 Podélný modul pružnosti

Pro zjišťování modulu pružnosti v podélném směru je základním krokem sestavení geometrického výpočtového modelu pro silové poměry v příčném řezu. Vztah pro odvození průměrného napětí v kompozitu v podélném směru σ_{cL} se odvodí pomocí směšovacího pravidla pro napětí. Z obrázku je zřejmé, že síly působící v podélném směru na plochách matrice S_m , vláken S_f i celkového kompozitu S_c vyvolají příslušná napětí, a sice napětí v matrici σ_{mL} , napětí ve vlákně σ_{fL} , ale i průměrné longitudinální napětí v kompozitním materiálu σ_{cL} .



Obr. 25 Geometrický model v příčném řezu
[23]



Obr. 26 Typický průběh tahového diagramu kompozitního materiálu [23]

Pro stanovení tahového diagramu výsledného kompozitního materiálu je tedy výchozím krokem stanovení podmínky silové ekvivalence.

$$F_c = F_f + F_m, \quad (2.17)$$

kde F_c je síla působící na celý kompozit [N]

F_f je síla působící na vlákno [N]

F_m síla působící na matrici [N]

Jednotlivé síly se nahradí napětím po odpovídajících plochách, vynásobí délkou pro získání objemů odpovídajících složek a následně se vyjádří celkové napětí v kompozitu.

$$\sigma_{cL} \cdot S_c = \sigma_{fL} \cdot S_f + \sigma_{mL} \cdot S_m \quad / \cdot l$$

$$\sigma_{cL} \cdot V_c = \sigma_{fL} \cdot V_f + \sigma_{mL} \cdot V_m \quad / \cdot \frac{1}{V_c}$$

$$\sigma_{cL} = \sigma_{fL} \cdot v_f + \sigma_{mL} \cdot v_m = \sum \sigma_{iL} \cdot v_i \quad (2.18)$$

Protože směšovací pravidlo pro určení celkového napětí v kompozitu (2.18) bylo odvozeno pomocí podmínky statické silové ekvivalence, platí tedy bez ohledu na to, zda se daný materiál nachází ve stavu pružném nebo plastickém. Aby však bylo možné určit tahový diagram výsledného materiálu, je navíc nutno znát tahové diagramy jednotlivých složek, z nichž tento materiál pozůstává.

Celkové napětí v kompozitním materiálu se ze směšovacího pravidla určí z jednotlivých napětí složek a jejich objemových podílů, z čehož vyplývá, že chování výsledného materiálu je určeno právě chováním těchto složek. To je zřejmé i z obrázku 26, kde je v tahovém diagramu jednoznačně vidět, že pokud se obě komponenty chovají během zatěžování lineárně, je i diagram výsledného materiálu lineární. V případě, kdy už alespoň jedna ze složek vykazuje chování nelineární, bude mít i tahový diagram kompozitu nelineární charakter.

Tahový diagram pro kompozity obvykle pozůstává ze čtyř oblastí, které jsou znázorněny na obrázku 25.

I – oblast, kde se matrice i vlákna chovají lineárně pružně

II – oblast, kde vlákno se chová lineárně pružně a matrice pružně plasticky

III – oblast pružně plastického chování vláken i matrice (v případě vláken se jedná o poměrně krátkou část těsně před prasknutím)

IV – oblast, kdy vlákno již prasklo a matrice se chová elasticko-plasticky

Modul pružnosti v podélném směru E_{cL} je možno stanovit v lineárně pružném úseku I tahového diagramu. Napětí-ově-deformační charakteristiky obou složek i kompozitního materiálu, stejně jako při určování modulu pružnosti v příčném směru, vycházejí z Hookova zákona příslušné komponenty.

$$\sigma_{fL} = E_f \cdot \varepsilon_{fL}; \quad \sigma_{mL} = E_m \cdot \varepsilon_{mL}; \quad \sigma_{cL} = E_{cL} \cdot \varepsilon_{cL} \quad (2.19)$$

Za předpokladu dokonalé adheze mezi složkami a stejné deformace ε v podélném směru platí

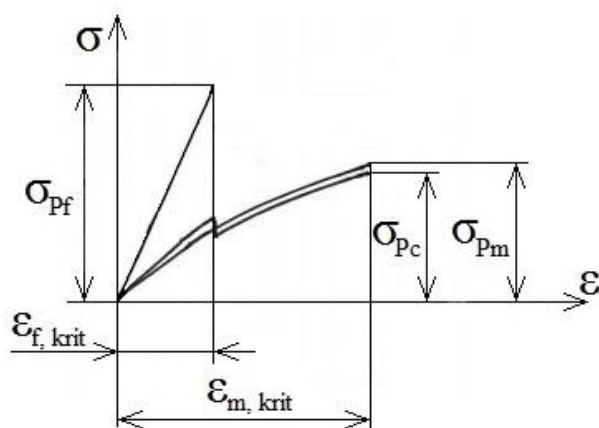
$$\varepsilon_{fL} = \varepsilon_{mL} = \varepsilon_{cL} \quad (2.20)$$

Dosazením (2.19) do vztahu pro celkové podélné napětí (2.18) a následným uvažováním předpokladu (2.20) dostáváme výsledný vztah pro modul pružnosti kompozitu v podélném směru.

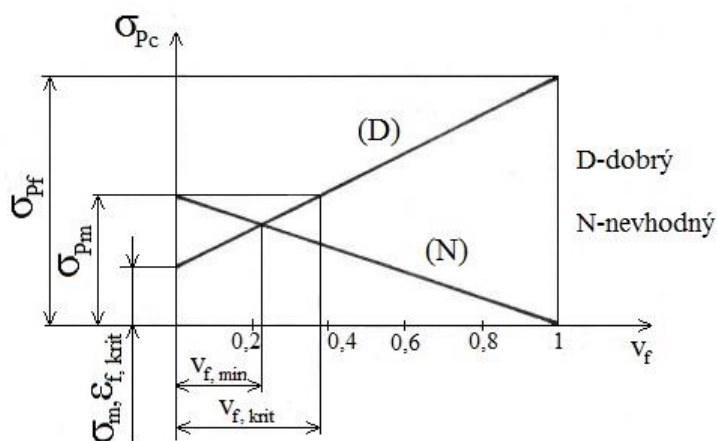
$$E_{cL} = E_f \cdot v_f + E_m \cdot v_m = \sum E_i \cdot v_i \quad [\text{GPa}] \quad (2.21)$$

Výsledný vztah (2.21) bývá také označován jako směšovací pravidlo pro určení modulu pružnosti kompozitu v tahu.

Tahový diagram na obrázku 26 má uvedený průběh právě za předpokladu, že kompozitní materiál je navržen správně, tzn., že výsledná pevnost je dána stavem, kdy začnou praskat vlákna a množství vláken k matrici je optimální, tedy tahová křivka kompozitu je přibližně uprostřed mezi tahovou křivkou vlákna a tahovou křivkou matrice. V případě nevhodně navrženého kompozitu je výsledná pevnost určena stavem, kdy praská matrice. Tento stav nastává, když je matrice velmi tažná a objemový podíl vláken je poměrně malý. Výsledná pevnost takového kompozitu je velice blízká pevnosti matrice, a jak je zřejmé z tahového diagramu na obrázku 27, jsou i jejich tahové křivky velice blízké. Množství vláken tedy výrazně ovlivňuje pevnost kompozitu a její závislost na objemovém podílu vláken je



Obr. 27 Tahový diagram nevhodně navrženého kompozitu [23]



Obr. 28 Závislost pevnosti kompozitu na objemovém podílu vláken [23]

lineární, což je zobrazeno na následujícím obrázku jak pro dobře, tak i nevhodně navržený kompozit. Kritický podíl vláken $v_{f, krit}$ je podíl, kdy pevnost matrice odpovídá pevnosti dobrého kompozitu. V případě, že pevnosti dobrého a nevhodného kompozitu jsou stejné, v kompozitu je obsažen minimální podíl vláken $v_{f, min}$.

2.4 Výpočet modulů pružnosti vyráběných dvoufázových trubek

Při určování modulu pružnosti v příčném i podélném směru se vychází z výpočtových modelů uvedených v podkapitole 2.3, kde byly vztahy pro moduly pružnosti v obou těchto směrech podrobně odvozeny. Za účelem testování bylo vyrobených šest dvoufázových trubek, ze kterých bylo nutno zjistit objemový podíl vláken ve výsledné struktuře.

Trubky byly navíjeny na trn, kterého průměr odpovídá jejich vnitřnímu průměru 20mm na hodnotu vnějšího průměru 25mm. Vyrobené díly pak byly nařezány na délku 130mm. Skutečné naměřené hodnoty použity pro výpočet jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 4 Naměřené hodnoty vyrobených trubek

Číslo vzorku	Vnitřní průměr	Vnější průměr	Délka l [mm]	Hmotnost m [kg]
	d_{in} [mm]	D_{out} [mm]		
1	20	25,0	129,6	0,037
2	20	25,2	130,4	0,037
3	20	25,1	129,8	0,036
4	20	25,0	129,7	0,037
5	20	25,1	130,1	0,036
6	20	25,1	129,8	0,037

Výpočet objemových podílů vláken ve struktuře byl proveden pro každou trubku zvlášť a nakonec byla spočtena průměrná hodnota. Vzorový výpočet bude proveden pro trubku číslo 1. Podle dále uvedeného způsobu výpočtu se postupovalo u všech trubek.

Z již známých hodnot geometrických rozměrů byl jako první spočten objem celkového dílu. Hodnoty z tabulky uvedené v milimetrech byly převedeny na hodnoty v metrech z důvodu dalšího počtu s hustotami, se kterými se počítalo v jednotkách kilogram na metr kubický.

$$V_c = \left(\frac{\pi \cdot D_{out}^2}{4} - \frac{\pi \cdot d_{in}^2}{4} \right) \cdot l = (D_{out}^2 - d_{in}^2) \cdot \frac{\pi \cdot l}{4} = (0,025^2 - 0,02^2) \cdot \frac{\pi \cdot 0,1296}{4} = 2,290 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

Dalším krokem bylo určení hustoty celkové kompozitní trubky ρ_c , která je potřebná pro výpočet objemového podílu vláken pomocí vyjádření tohoto objemového podílu ze směšovacího pravidla pro určení hustoty kompozitu.

$$\rho_c = \frac{m}{V_c} = \frac{0,037}{2,290 \cdot 10^{-5}} = 1615,56 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Po spočtení hustoty celkového kompozitního dílu můžeme tedy z rovnice směšovacího pravidla pro určení hustoty kompozitu vyjádřit objemový podíl vyztužujících vláken v celkové struktuře. Rovněž při této úpravě využijeme i vyjádření objemového podílu matrice z podmínky zachování objemu.

$$1 = v_f + v_m \rightarrow v_m = 1 - v_f$$

$$\rho_c = \rho_f \cdot v_f + \rho_m \cdot v_m = \rho_f \cdot v_f + \rho_m \cdot (1 - v_f) \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}]$$

Hustota matrice i vláken je známá z technických listů příslušných složek.

Hustota matrice: $\rho_m = 1185 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Hustota vlákna: $\rho_f = 1790 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Po roznásobení a vyjádření dostáváme výsledný vztah pro objemový podíl vlákna.

$$v_f = \frac{\rho_c - \rho_m}{\rho_f - \rho_m} = \frac{1615,56 - 1185}{1790 - 1185} = 0,7117$$

Jak již bylo dříve zmíněno, tento postup zjištění objemového podílu vláken byl aplikován pro každou vyrobenou trubku individuálně. Vypočtené hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 5 Vypočtené hodnoty nutné k určení modulů pružnosti

Číslo vzorku	Celkový objem	Celková hustota	Objemový podíl vláken
	$V_c \text{ [m}^3\text{]}$	$\rho_c \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{]}$	$v_f \text{ [-]}$
1	$2,290 \cdot 10^{-5}$	1615,56	0,7117
2	$2,304 \cdot 10^{-5}$	1605,65	0,6953
3	$2,294 \cdot 10^{-5}$	1569,48	0,6355
4	$2,292 \cdot 10^{-5}$	1614,32	0,7096
5	$2,297 \cdot 10^{-5}$	1567,06	0,6315
6	$2,294 \cdot 10^{-5}$	1613,08	0,7076

Z vypočtených objemových podílů vláken bylo pro stanovení zmiňovaných modulů pružnosti kompozitu nutné určit průměrnou hodnotu těchto podílů aritmetickým zprůměrováním.

$$\bar{v}_f = \frac{\sum v_{fi}}{n} = \frac{0,7117 + 0,6953 + 0,6355 + 0,7096 + 0,6315 + 0,7076}{6} = 0,6819$$

kde n je celkový počet vzorků [-]

Aby bylo možné určit podélný a příčný modul pružnosti kompozitu, je ještě nutné znát moduly pružnosti obou jeho složek. Tyto se opět vyčtou z technických listů.

Modul pružnosti matrice: $E_m = 3,3 \text{ GPa}$

Modul pružnosti vlákna: $E_f = 240 \text{ GPa}$

Hodnoty příčného i podélného modulu pružnosti kompozitu se nakonec stanoví pomocí směšovacích pravidel pro určení modulu pružnosti kompozitu v tahu pro oba směry.

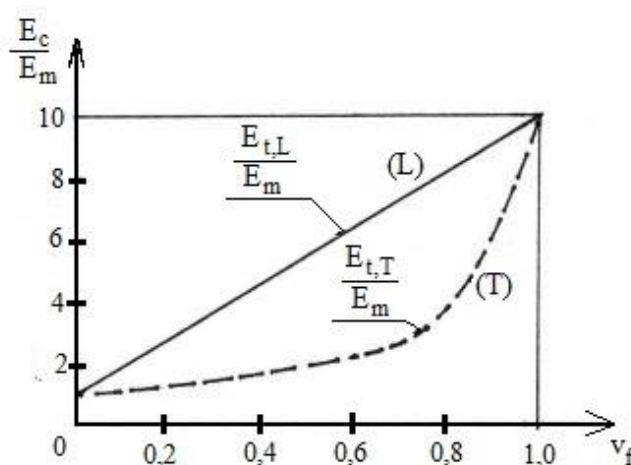
Modul pružnosti kompozitu v příčném směru:

$$E_{cT} = \frac{1}{\frac{\bar{v}_f}{E_f} + \frac{v_m}{E_m}} = \frac{1}{\frac{\bar{v}_f}{E_f} + \frac{1-\bar{v}_f}{E_m}} = \frac{1}{\frac{0,6819}{240} + \frac{1-0,6819}{3,3}} = 10,1 \text{ GPa}$$

Modul pružnosti kompozitu v podélném směru:

$$E_{cL} = E_f \cdot \bar{v}_f + E_m \cdot v_m = E_f \cdot \bar{v}_f + E_m \cdot (1 - \bar{v}_f) = 240 \cdot 0,6819 + 3,3 \cdot (1 - 0,6819) = 164,7 \text{ GPa}$$

Předešlý postup pro výpočet modulů pružnosti kompozitního materiálu v příčném i podélném směru dokazuje, že objemový podíl vláken je skutečně jednou z nejdůležitějších a určujících hodnot při zjišťování mechanických vlastností kompozitních součástí. Je zřejmé, že oba moduly pružnosti jsou na něm přímo závislé, přičemž, na rozdíl od modulu v příčném směru (na obrázku 29 křivka (T)), je modul pružnosti v podélném směru (na obrázku 29 křivka (L)) lineární funkcí tohoto objemového podílu.

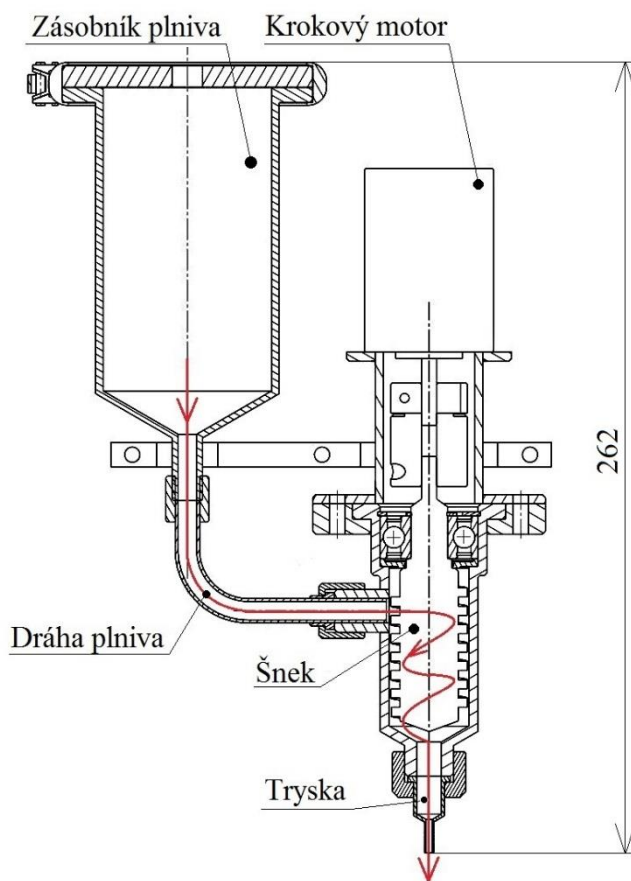


Obr. 29 Závislost modulu pružnosti na objemovém podílu vláken [23]

3 TECHNOLOGIE PLNĚNÍ KOMPOZITU MATERIÁLEM TŘETÍHO TYPU [1]

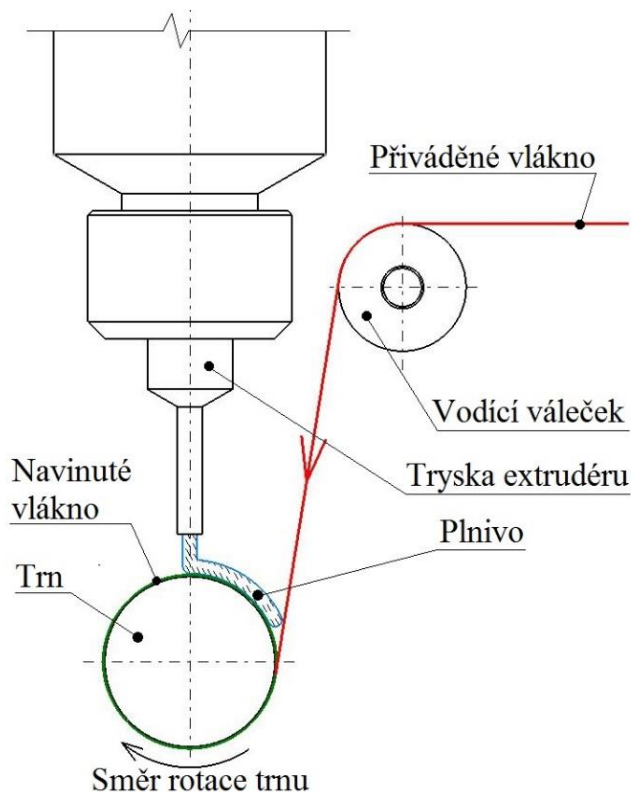
Výroba třífázových kompozitů není v dnešní době výrazně rozšířená. Takovéto materiály jsou vyráběny za účelem, který je přesně daný a kdy je jasné, k čemu má daný materiál sloužit a jaké vlastnosti jsou u něj požadovány. Tyto specifické vlastnosti, které samotný dvoufázový kompozit nemá, jsou zaručeny právě přidavnou třetí fází, často označovanou jako plnivo. Tato třetí složka může být buď anorganická ve formě skla, křemene, či slídy, anebo organická, jako například dřevěná moučka. Volba způsobu plnění je ovlivněna hlavně možnostmi výrobního zařízení, na kterém má být výroba realizována. Právě proto není vždy možné provádět samotné plnění současně s procesem výroby, nýbrž musí být provedeno předem. Plnivo je v převážné většině způsobu výroby předem smícháváno v určitém poměru s pojivem, a takto vytvořená směs je poté přidávána mezi jednotlivé vrstvy vyztužující fáze, nebo je v ní výztuž prosycována. Tato směs po skončení výroby může dodávat kompozitnímu výrobku speciální vlastnosti okamžitě, v opačném případě musí být tyto vlastnosti následně vyvolány určitým druhem další úpravy vyrobeného dílce.

Pro výrobu testovacích kompozitních trubek složených ze tří složek bude plnivo ve formě magnetického, resp. korkového prášku. Tento prášek bude před započítím samotného navíjecího procesu smíchán s pojivem ve formě epoxidové pryskyřice v poměru 1:1. Následně se takto vzniklou směsí naplní šnekový extrudér, což je přídatné zařízení umístěno na vodící části stroje a schopné dávkovat plnivo v požadovaném množství. Umístění extrudéru na pohyblivé vodící části stroje přímo nad navíjecím trnem umožní dávkovat plnivo do struktury kompozitu současně s procesem navíjení. Ze zásobníku bude směs vytékat samotíží přes hadičku ke šneku, který je poháněn krokovým motorem a bude ji vytlačovat přes trysku ven. V případě viskóznější směsi, která by netekla jenom působením vlastní váhy, je možné k zásobníku přivést a připevnit další hadičku, přes kterou bude přiváděn vzduch a plnivo tak bude efektivněji vytlačováno. Výhodou plniva tekoucího ze zásobníku samotíží je, že v případě potřeby je možné doplnit tuto směs do zásobníku v průběhu procesu navíjení. Maximální možné množství plniva v zásobníku je dostačující na vyplnění kompozitní trubky o maximálních přípustných rozměrech dle geometrických specifikací. Třetí fáze bude do struktury plněna pouze s návinem šroubovice (s výjimkou prvního a posledního návinu) nad trnem ve stejném místě, kde právě bude na trn přiváděno i vlákno. Při rotaci navíjecího trnu se tak zamezí tomu, aby z něj spadalo dávkované plnivo, protože bude téměř ihned vtlačováno navíjeným vláknem přiváděným k trnu do



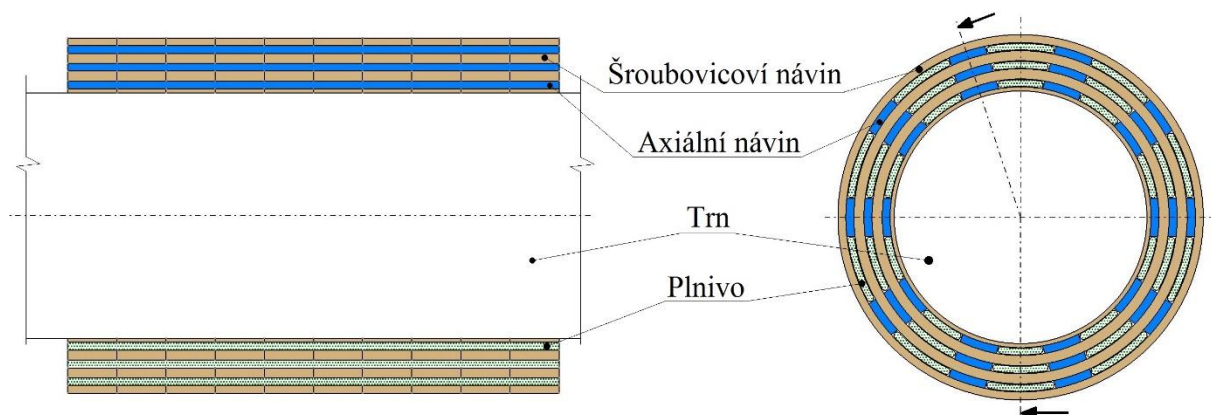
Obr. 30 Schéma šnekového extrudéru

struktury, která je již na trnu navinutá, viz obrázek 31. Poloha trysky extrudéru tedy po celou dobu šroubovicového návinu kopíruje polohu vlákna v místě, kde začíná jeho navíjení. Dávkovací množství je při návinu konstantní, aby se zaručilo rovnoměrné rozmístění třetí fáze v kompozitním výrobku. Jak bylo zmíněno dříve, plnění přídavným materiálem probíhá pouze se šroubovicovým navíjením, což znamená, že z předešlého axiálního návinu budou na trnu umístěna vlákna rovnoběžná s osou, které neleží hned vedle sebe, tedy jsou na trnu umístěny s určitým rozestupem. Mezi těmito



Obr. 31 Schéma plnění kompozitu třetí fází

axiálními vlákny budou teda v závislosti na průměru a počtu jehliček pro axiální návin určitá, stejně velká nevyplněná místa, do kterých se při plnění bude dostávat největší množství plniva. Vtlačování přídavného materiálu mezi jednotlivé vlákna předešlé šroubovice bude podstatně menší, jelikož tyto vlákna jsou umístěny jedno vedle druhého bez rozestupů. Zjednodušeně se tedy dá předpokládat, že výsledná struktura kompozitních trubek s přídavným materiálem třetího typu bude pozůstat ze střídajících se těsných radiálních vrstev šroubovicových vláken a vrstev axiálních vláken s rozestupy, jež jsou vyplněny směsí plniva, jak ukazuje obrázek 32. Ve skutečnosti se směs plniva samozřejmě dostane i do míst mezi axiální a šroubovicové vlákna v radiálním směru, případně minimální množství pronikne mezi jednotlivé přilehlé vrstvy šroubovice. Tato metoda plnění přídavným materiálem třetího typu není vázána jenom na tuto kombinaci návinů, nýbrž se dá aplikovat i pro jiné náviny a jejich kombinace.



Obr. 32 Zjednodušená výsledná struktura tříložkové kompozitní trubky

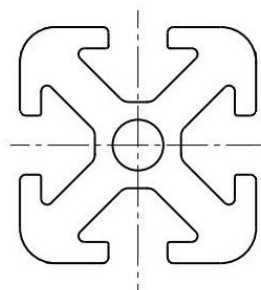
4 KONCEPT NAVRŽENÉHO VÝROBNÍHO ZAŘÍZENÍ [7]

Výrobní zařízení pro navíjení kompozitních trubek FWMS180 (Filament Winding Machine Sobriety 180) bylo navrženo a vyrobeno s ohledem na specifikace kompozitních výrobků, které se na něm budou vyrábět. Celý proces navíjení je na tomto zařízení automatizován s výjimkou vkládání a upínání trnu a jeho vyjmutí po skončení procesu. Pro zadávání parametrů do stroje byl vyvinut ovladač FWC (Filament Winding Controller), který je schopen akceptovat zadané vstupní parametry a ovládat podle nich jednotlivé hnací prvky, které zajišťují všechny pohyby stroje. Kromě samotného výrobního zařízení musela být navržena a vyrobená i další přídavná zařízení, bez kterých by technologický proces výroby kompozitních trubek nebylo možné realizovat. Tato přídavná zařízení jsou buď součástí samotného stroje, umístěna a připevněna na jeho rámu, nebo samostatné prvky, umístěny mimo výrobní zařízení. Všechny tyto prvky vyrobené vzhledem k parametrům vyráběných trubek dohromady tvoří komplexní výrobní prostředí, ve kterém je možné vyrábět kompozitní výrobky různých velikostí, tvarů a požadovaného složení.

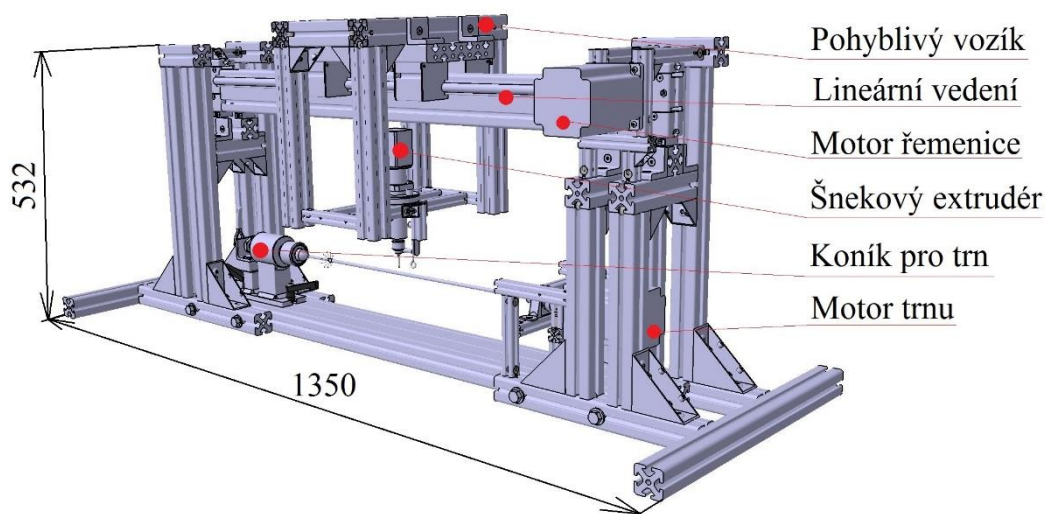
4.1 FWMS180

Výrobní zařízení FWMS180 je z převážné části složeno ze systému hliníkových profilů item společnosti Haberkorn. Jako základ tohoto systému jsou přesné eloxované hliníkové profily s podélnými drážkami, které slouží pro upevnění různých spojovacích prvků a příslušenství. Variabilita tvarů i rozměrů umožnila sestavit toto zařízení přesně na míru, plně funkční a s vyhovující tuhostí i bezpečností. Před schválením finální varianty prošel proces navrhování mnoha změnami, nakonec se však docílilo konceptu, který vyhovoval všem požadavkům, aby stroj splňoval svoji funkci a bylo na něm možné realizovat uvažovanou výrobu, přičemž se snažilo dosáhnout minimálních možných výrobních nákladů. Vycházelo se z geometrických specifikací navíjených trubek.

Musel se brát v úvahu proměnlivý průměr i délka trnu, přičemž musela být zajištěna možnost navíjení různých typů návinů (šroubovice, axiální, spirálový i smíšený). Z tohoto důvodu bylo nutno zajistit jak rotaci trnu, tak lineární pohyb vedení, které bude vést navíjející se vlákno. Toto lineární vedení je realizováno ve formě řemenového pohonu, kde je rotační pohyb hnané řemenice převáděn v translační pomocí ozubeného řemenu. Jako hnací prvky pro oba tyto pohyby byly použity krokové motory s integrovanými enkodéry, které umožní přesné pozicování dle potřeby. Celkový navrhnutý koncept, který byl následně vyroben a testován, je na obrázku 34.



Obr. 33 Základní tvar profilů item

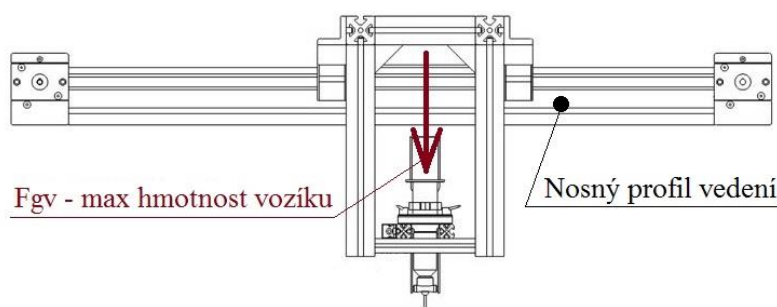


Obr. 34 Koncept výrobního zařízení FWMS180

Z obrázku konceptu výrobního zařízení je zřejmé, že trny se upínají pomocí rychloupínacího koníku s otočným hrotem a k motoru jsou uchyceny pomocí spojovacího hřídele, ložiska a pružné spojky. Vedení vlákna do požadovaných pozic zajišťuje pohyblivý vozík, který se pohybuje přes řemenový pohon po lineárním vedení. Na tomto vozíku jsou uchyceny jak trysky, kterými vlákno prochází a je přiváděno k trnu, tak i extrudér, dávající plnivo při navíjení.

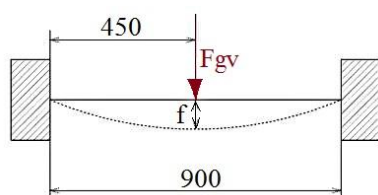
Před samotnou konstrukcí navrženého konceptu stroje bylo nutno ověřit bezpečnost v nebezpečných místech hliníkových profilů, kde by mohlo dojít k jejich problematickému průhybu nebo zkroucení. Jedná se o průhyb profilu lineárního vedení vozíku v momentě, kdy se vozík nachází přesně v polovině tohoto vedení, průhyb nosných profilů extrudéru a zkroucení nosných profilů krokových motorů.

- ❖ Průhyb profilu lineárního vedení bude největší právě tehdy, když se vozík bude nacházet v jeho polovině a jeho hmotnost bude největší, tedy hmotnost konstrukce vozíku včetně hmotnosti extrudéru s plným zásobníkem plniva. Jako nosné profily vozíku jsou rovněž použity profily item, ale tyto jsou navíc odlehčené, aby se docílilo co nejmenší hmotnosti vodícího vozíku. Pro určení maximálního průhybu není zohledňována vlastní hmotnost nosného profilu lineárního vedení, no na průhyb má v tomto konkrétním případě minimální vliv. Tato hmotnost vedení je však zohledňována v nomogramu profilů pro určení



maximálních průhybů (příloha 3). Výpočet průhybu vychází ze zjednodušeného schématu, ze kterého je zřejmé, že se uvažuje celková tíhová síla působící v jednom bodě. Ve skutečnosti je tato síla rozložena na plochy ložiskových jednotek, po kterých vedení jezdí, a proto bude průhyb ještě menší.

Obr. 35 Zobrazení působení maximální tíhové síly od vozíku



Tíhová síla vozíku tedy vychází z maximální hmotnosti vozíku:

$$F_{gv} = m_{vmax} \cdot g = 50 \cdot 10 = 500 \text{ N}, \quad (4.1)$$

kde m_{vmax} je maximální hmotnost vozíku [kg]
 g je gravitační zrychlení [m.s^{-2}]

Obr. 36 Schéma průhybu

Hliníkový profil použitý pro vedení je profil item řady 8: 40x80 – 900.

Maximální průhyb se spočítá z působícího zatížení a rozměrových i materiálových charakteristik použitého profilu.

$$f = \frac{F_{gv} \cdot l^3}{192 \cdot E_{Al} \cdot I_{40x80} \cdot 10^4} = \frac{500 \cdot 900^3}{192 \cdot 70000 \cdot 100 \cdot 10^4} = 0,03 \text{ mm}, \quad (4.2)$$

kde l je délka profilu [mm]

E_{Al} je modul pružnosti hliníku [N.mm^2]

I_{40x80} je plošný moment setrvačnosti profilu 40x80 [cm^4]

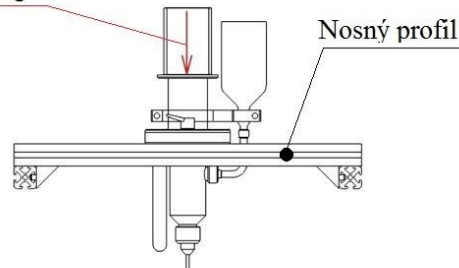
Z nomogramu pro určení maximálních průhybů profilů item řady 8, který je uvedený v příloze, byla odečtena hodnota maximálního průhybu 0,035 mm, což odpovídá spočtené hodnotě s tím, že je o málo vyšší vlivem započtení vlastní hmotnosti profilu vedení. Určený průhyb na délce vedení 900mm je minimální, koncept této části stroje je tedy vyhovující.

- ❖ Průhyb nosných profilů extrudéru nabývá největších hodnot v případě, kdy bude extrudér naplněn maximálním množstvím plnicí směsi. Zatížení tedy představuje jako v předešlém případě pouze tíhová síla, tentokrát jenom od váhy naplněného extrudéru. Jako nosné prvky jsou použity profily item řady 5: 20x20 – 290. V tomto případě se rovněž vychází ze zjednodušeného schématu bodového zatížení, bez uvažování vlastní tíhy nosných profilů. Stejně jako rovnice pro tíhovou sílu vodícího vozíku (4.1) se sestaví rovnice pro určení tíhové síly extrudéru:

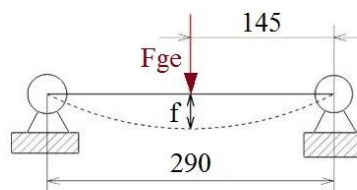
$$F_{ge} = m_{emax} \cdot g = 15 \cdot 10 = 150 \text{ N} , \quad (4.3)$$

kde m_{emax} je maximální hmotnost extrudéru [kg]

F_{ge} - max hmotnost extrudéru



a) Zobrazení působící tíhové síly extrudéru



b) Schéma průhybu

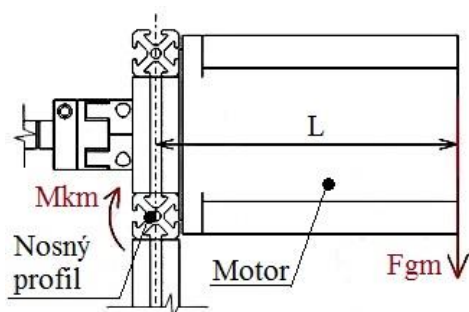
Obr. 37 Průhyb nosných profilů extrudéru

Extrudér je umístěn a upevněn ke dvěma stejným nosným profilům. Výpočet maximálního průhybu nosných profilů je analogický k rovnici (4.2) s tím, že je navíc podělen dvěma z důvodu použití dvou nosných profilů.

$$f = \frac{F_{ge} \cdot l^3}{2 \cdot 48 \cdot E_{Al} \cdot I_{20 \times 20} \cdot 10^4} = \frac{150 \cdot 290^3}{2 \cdot 48 \cdot 70000 \cdot 0,72 \cdot 10^4} = 0,075 \text{ mm} , \quad (4.4)$$

kde $I_{20 \times 20}$ je plošný moment setrvačnosti profilu 20x20 [cm⁴]

Hodnota maximálního průhybu odečtená z nomogramu pro určení maximálních průhybů profilů item řady 5 (příloha 1) odpovídá spočítané hodnotě. Průhyb na délce nosných profilů extrudéru je rovněž zanedbatelný.



Obr. 38 Zobrazení momentu a tíhové síly motoru

- ❖ V případě možného zkroucení nosného profilu motoru řemenice i nosného profilu motoru trnu je příčinou hmotnost motoru, který je uchycen pouze z čelní strany na vertikálních podporách. Takto uchycené motory vyvolávají kroutící moment působící na nosné profily. Rameno, na kterém působí tíhová síla, je z důvodu zvýšení bezpečnosti výpočtu na opačném konci motoru, než je jeho uchycený konec. Tíhová síla motoru F_{gm} je spočtena analogicky jako v předešlých případech, poté je spočten kroutící moment M_{km} , který tato síla vyvolává.

$$F_{gm} = m_m \cdot g = 4 \cdot 10 = 40 \text{ N} , \quad (4.5)$$

kde m_m je hmotnost motoru [kg]

$$M_{km} = F_{gm} \cdot L = 40 \cdot 0,08 = 3,2 \text{ N.m} , \quad (4.6)$$

kde L je rameno, na kterém působí síla [m]

Ze spočteného momentu a geometrických a materiálových charakteristik se spočítá hodnota zkroucení nosného profilu item řady 5: 20x20 – 70.

$$\vartheta = \frac{180^\circ \cdot M_{km} \cdot l}{\pi \cdot 4 \cdot G_{Al} \cdot I_t \cdot 10} = \frac{180^\circ \cdot 3,2 \cdot 70}{\pi \cdot 4 \cdot 25000 \cdot 0,13 \cdot 10} = 0,1^\circ, \quad (4.7)$$

kde l je délka nosného profilu [mm]

G_{Al} je modul pružnosti ve smyku hliníku [$N \cdot mm^{-2}$]

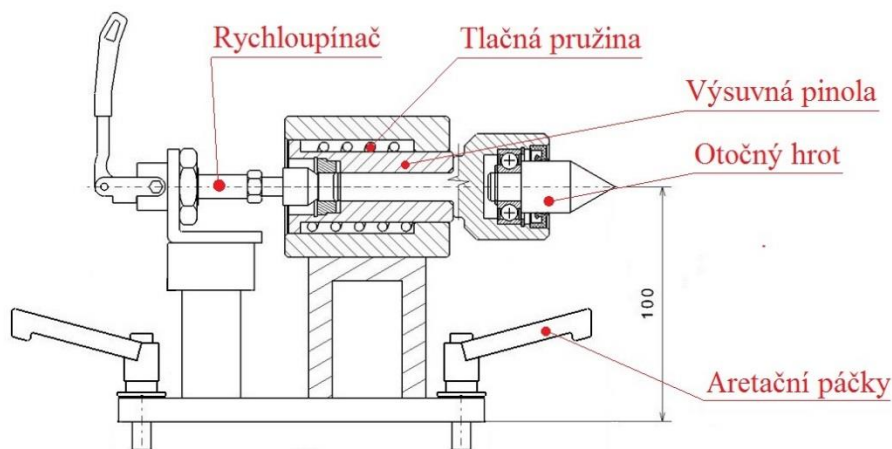
I_t je moment tuhosti v krutu profilu 20x20 [cm^4]

Hodnota zkroucení zjištěná z nomogramu (příloha 2) je $0,11^\circ$, což odpovídá výpočtu. Motory i nosné profily obou motorů jsou naprosto stejné, takže zjištěná hodnota zkroucení platí pro oba případy. Nosné profily jsou ve skutečnosti navíc připevněné k rámu, čímž je zaručena naprostá bezpečnost a zamezení zkroucení.

Všechny výše zmiňované nomogramy pro určení průhybů i zkroucení profilů item jsou uvedeny v označených přílohách. Po dokončení konstrukce výrobního zařízení bylo zřejmé, že ve statickém stavu nedochází k žádným nežádoucím deformacím, tedy po zatížení rámu všemi ostatními konstrukčními prvky nedocházelo u žádného z nosných profilů k průhybům ani zkroucením. Dále bylo nutné chování tohoto zařízení testovat v dynamických podmínkách, kdy bylo vystaveno postupnému zvyšování jednotlivých pohybů, jak lineárnímu pohybu vozíku při maximální rychlosti posuvu, tak i rotaci trnu při maximálních možných otáčkách. Ukázalo se, že stroj se vyznačuje dobrou přesností, co se týče polohování, a taky vysokou mírou stability při pohybu maximálními možnými rychlostmi posuvů i otáček.

4.1.1 Rychloupínací koník s otočným hrotem

Navíjecí trn je z jedné strany přes mezikus hřídele v radiálně-axiálním ložisku a pružnou spojku připevněn ke krokovému motoru, který zajišťuje jeho rotaci. Nicméně, poloha trnu musí být zajištěna i z jeho druhé strany. K tomuto účelu byl navrhnut a na míru vyroben rychloupínací koník s otočným hrotem. Tento je připevněn k podstavě stroje pomocí aretačních páček a je rychle polohovatelný na jakoukoliv délku v rámci délky podstavy. Výška osy koníku odpovídá výšce osy hřídele krokového motoru, aby se zajistila horizontálnost trnu. Otočný hrot koníku je nutný z důvodu rotace trnu. Špička při navíjení tlačí na trn, a kdyby nebyla otočná, vznikalo by poměrně velké tření, čímž by se vyvíjeli nepříznivé vysoké teploty třených materiálů. Pro zajištění rychlého uchycení trnu, a stejně tak pro jeho rychlé uvolnění slouží rychloupínáč, který vytlačí pinolu z vnějšího rámu směrem k trnu. Naopak při jeho povolení je pinola vrácena do původní polohy pomocí tlačné pružiny. Tato konstrukce koníku teda splňuje základní požadavky, a sice rychlé a jednoduché zajištění trnu ve správné poloze, jako i jeho uvolnění.

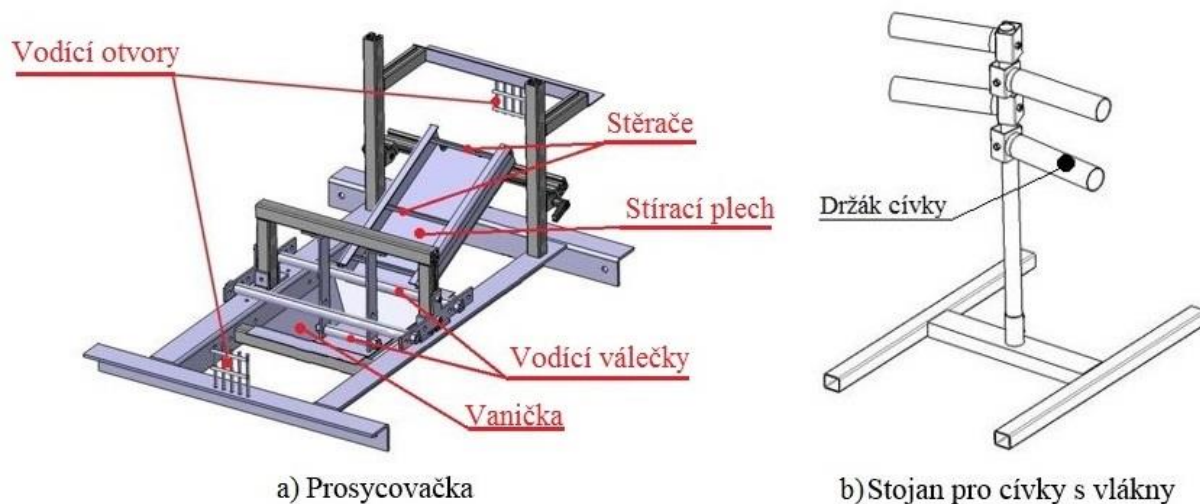


Obr. 39 Rychloupínací koník

4.2 Prosyncovací zařízení a stojan cívek s vlákny

Před samotným navíjením uhlíkových vláken na navíjecí trn je nutné tyto vlákna prosycovat v pryskyřičném pojivu, které zajistí tuhnutí kompozitního výrobku. Vlákna jsou navinuta na dutých válcích, označovaných také cívkami. Z těchto cívek se pak odvíjí, jsou vedena po potřebné dráze a nakonec navinuta na trn do určitého tvaru. Aby bylo možné odvíjení vláken vhodným způsobem, cívkami jsou umístěny ve stojanu, kde je zajištěna jejich horizontální poloha a taky možnost rotace při odvíjení. Tím je rovněž dána orientace vláken, ve které je vedeno po celé dráze až do navinutí, tedy zamezí se jeho zkroucení. Ze stojanu jsou už vlákna vedena k prosycovacímu zařízení.

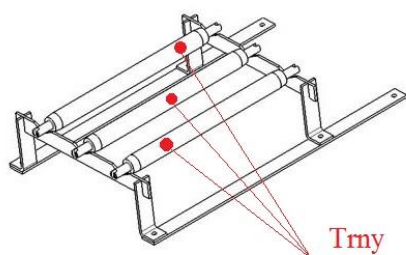
V prosycovacím zařízení jsou vlákna vedena po dané dráze řadou vodících otvorů, válečků a stíracích prvků. Matrice je nalita do vaničky, ve které je do určité hloubky ponořený jeden, nebo více vodících válečků, které vedou vlákno přes tuto pryskyřičnou lázeň, kde se dostatečně naimpregnuje pojivem. Poté je vyvedeno z lázně ven a pokračuje k řadě stíracích prvků, tzv. stěračů, o které se otírá a je z něj odstraňováno nadbytečné množství matrice. Stěrače jsou zachyceny ve stíracím plechu, který je skloněn pod dostatečně velkým úhlem tak, aby nadbytečné pojivo odstraněno z vláken spadalo na tento plech a stékalo zpátky do vaničky. Po očištění vlákna o stěrače je už vyvedeno z prosycovačky přes vodící otvory a přivedeno k navíjecímu trnu umístěnému ve výrobním zařízení. Množství a pozice válečků i stěračů zajišťují brzdění vlákna, což v něm vyvolává příslušné předpětí a taky ovlivní množství pojiva, které zůstane ve vlákně.



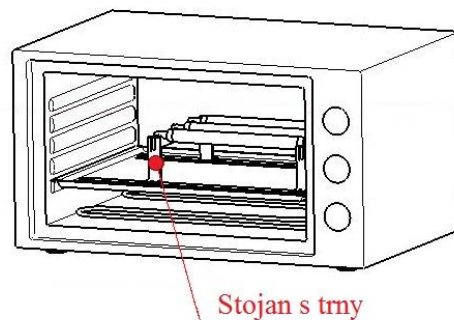
Obr. 40 Model prosycovacího zařízení a stojanu pro cívky

4.3 Vytvrzovací pec

Po navinutí vlákna na požadovaný průměr a délku je nutno vytáhnout navinutý kompozit spolu s trnem ze stroje a nechat ho určitou dobu vytvrzovat, teda ztuhnout a ustálit strukturu fází. Vytvrzování může probíhat buď na vzduchu při pokojové teplotě, pro zlepšení vlastností výsledného materiálu jej nechat vytvrzovat ve vytvrzovací peci za zvýšených teplot, nebo kombinací obou způsobů. Před vytvrzováním v peci se nastaví teploty, při kterých se má kompozit vytvrzovat a časy, jak dlouho má být prodleva na příslušné teplotě. Do pece se trny vkládají ve stojanu zapřené o nefunkční plochy, aby byl kompozitní návin volně ve vzduchu. Po dokončení vytvrzování má už výrobek jednoznačné a neměnné mechanické charakteristiky. Takto vytvrzená součást může zůstat na trnu a být tak hotovým výrobkem, nebo může být z trnu vytažena a navíc ještě dále opracovávána.



a) Stojan pro trny

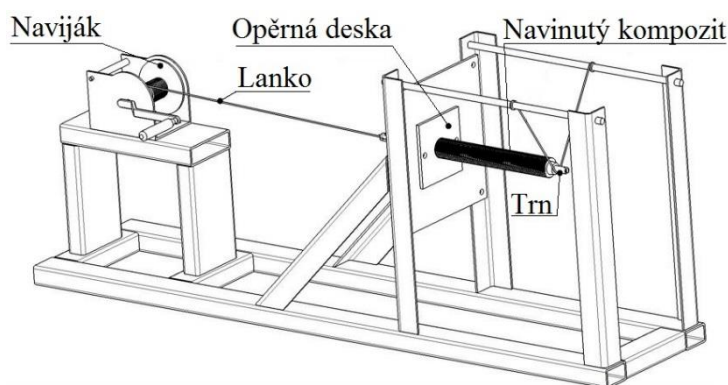


b) Vytvrzovací pec

Obr. 41 Stojan pro trny vkládaný do pece a vytvrzovací pec

4.4 Vytahovací zařízení

Po vytvrzení součásti se tato spolu s trnem vytáhne z pece, a pokud trn nezůstává v kompozitní trubce jako část hotového výrobku, je jej nutno od této navinuté a vytvrzené trubky oddělit. V případě, kdy se trubka od trnu bude oddělovat, je na trn před samotným návínem nanесena vrstva separátoru, která zjednoduší proces jeho oddělování od kompozitu. Oddělování je prováděno tažením trnu přes otvor v opěrné desce, který odpovídá jeho vnějšímu průměru (resp. je o něco málo větší), takže kompozitní výrobek bude na čelní ploše při vytahování opřený o plochu desky kolem otvoru. Tažení je prováděno pomocí ručního lanového navijáku a ocelového lanka, které je k trnu připevněno. Při vytahování by měla být zajištěna souosost tažného lanka a trnu, aby byl proces vytahování co nejjednodušší. Při procesu



Obr. 42 Vytahovací zařízení

vytahování je kritický počáteční moment, kdy se za trn začne tahat, protože je nutno vyvinout největší sílu, aby se překonala třecí síla způsobena statickým koeficientem tření mezi trnem a kompozitem, kterého hodnotu výrazně snižuje právě vrstva separátoru na jejich rozhraní. Po oddělení kompozitní trubky od trnu je možnost nařezání dlouhého dílce na větší počet menších kusů.

5 TECHNOLOGIE VÝROBY TRUBEK PRO TESTOVÁNÍ

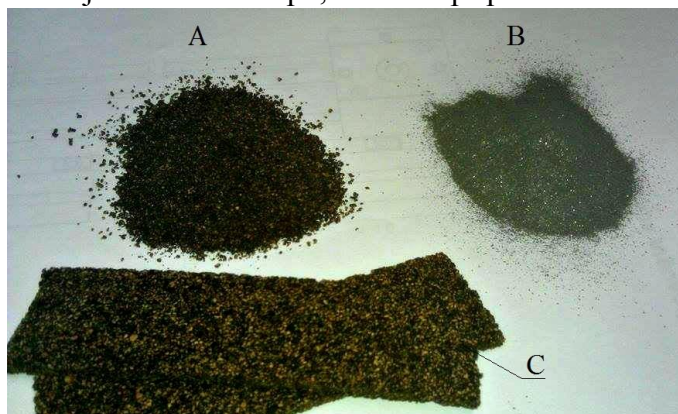
Technologie výroby dvoufázových kompozitních trubek je poměrně složitý a komplexní proces, který však umožňuje vyrábět součásti s výbornými mechanickými vlastnostmi a navíc v unikátním poměru pevnosti k hmotnosti. Další vlastnosti, které kompozity složené pouze ze dvou složek nenabývají, jim můžou být dodány přidáním třetí fáze. Proces výroby takovýchto tříložkových kompozitů dále nabírá na složitosti ve smyslu způsobu přidávání specifické třetí fáze do struktury výsledného dílu. Způsob plnění kompozitních trubek přidavným materiálem třetího typu na výrobním zařízení FWMS180 byl popsán, stejně jako jeho základní části a přidavná zařízení nutná pro úspěšné dokončení výroby, v předešlých kapitolách. Jednotlivé body postupu technologie výroby jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 6 Postup technologie výroby tříložkových kompozitních trubek

Č.	Popis činnosti	Č.	Popis činnosti
1.	Příprava stojanu cívky a prosycovačky	13.	Nanesení stahovací pásky
2.	Příprava dráhy vlákna	14.	Uřezání konců návínu
3.	Odmaštění trnů	15.	Vyjmutí trnu ze stroje, odstranění odpadu
4.	Upnutí trnu a jemné vybroušení	16.	Vložení trnu s návínem do rotačního zařízení pro vytvrzení na vzduchu
5.	Namíchání pojiva	17.	Očištění přípravků s jehlami
6.	Namíchání směsi s plnivem	18.	Další návín, opakování bodů 2. – 17. (pro navíjení na více trnů)
7.	Naplnění vaničky prosycovačky pojivem	19.	Odstranění zbytků vlákna, plniva a pojiva
8.	Naplnění extrudéru plnivem	20.	Očištění všech dílů od pojiva a plniva
9.	Nanesení separátoru na trn	21.	Sundání stahovací pásky z návínů (po 24 hodinovém vytvrzení na vzduchu)
10.	Uchycení vlákna k trnu	22.	Vložení návínů do vytvrzovací pece
11.	Spuštění stroje – průběh navíjecího cyklu	23.	Stažení trubek z trnů (po vytvrzovacím cyklu)
12.	Uříznutí a uchycení konce vlákna k trnu po skončení navíjecího cyklu	24.	Oříznutí trubek na požadovanou délku

Postup bude dále podrobně rozebrán a popsány budou všechny jednotlivé kroky a činnosti při výrobě kompozitních trubek složených ze tří složek.

Před samotným procesem výroby je samozřejmostí se ujistit, zda jsou všechny potřebné materiály dostupné. Komerčně dostupné zboží je otázkou nákupu, ovšem v případě korkového prachu, který je použit jako plnivo pro jeden typ třífázových trubek, bylo nutno tento prach vyrobit z korkových plátů. Pláty byly nejprve nařezány na malé kousky a poté rozdrceny. Tím se dosáhlo korku ve formě částec vhodných pro použití jako plnivo pro kompozitní materiál. Rozdíl ve velikosti částic korkového a magnetického prachu se dá pozorovat na obrázku 43, stejně jako rozdíl korku v celku a korku jako prášku.



Obr. 43 Korkové pláty (C), korkový prach (A) a magnetický prach (B)

Po tom, co máme dostupné a nachystané všechny materiály pro použití, je nutno začít s přípravou cívky s vláknem. Tato cívka musí být uchycena do stojanu v potřebné orientaci a výšce tak, aby při odvíjení vlákna z ní při výrobním procesu nedocházelo k zbytečnému nežádoucímu zadrhávání vlákna, vytahování cívky z držáku stojanu do strany silou taženého vlákna nebo jiným komplikacím. Dalším důležitým faktorem pro zachování plynulého průběhu výrobního procesu, ale i kvality samotného výrobku, je kvalita navinuté cívky. Správně a kvalitně navinutá cívka by měla být s pravidelným stoupáním a uspořádáním vrstev. Rovněž vlákno na ní by nemělo být různě přetočené, nebo v nejhorším případě zamotané tak, že při procesu výroby dojde k znemožnění dalšího odvíjení a následnému možnému přetržení vlákna. Jak již bylo dříve zmíněno, kvalita vlákna je jedním z nejdůležitějších faktorů ovlivňujících kvalitu kompozitu, a to tedy nejen jeho vlastnosti, ale i stav v jakém je na cívce, ze které se odvíjí.



Obr. 44 Stojan cívek



a) Nekvalitně navinutá cívka

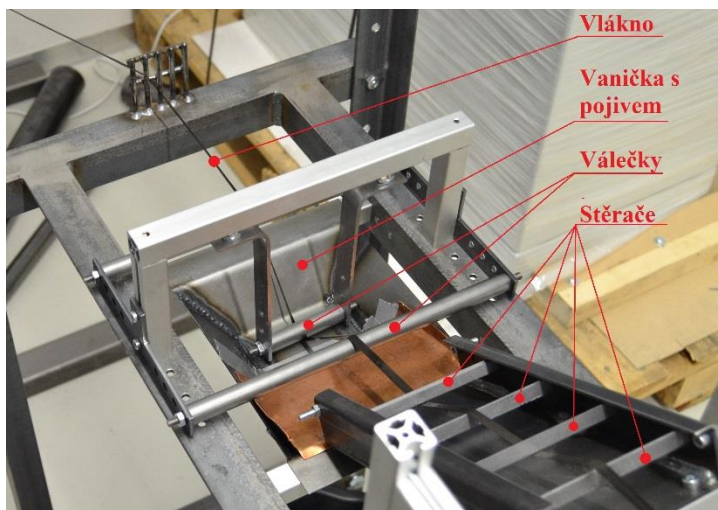


b) Kvalitně navinutá cívka

Obr. 45 Srovnání kvalitní a nekvalitní cívky

Kromě stojanu na cívky je rovněž důležité připravit prosycovací zařízení, do kterého se nalévá pryskyřičné pojivo, a vlákna se v něm prosycují. Toto seřízení je rozhodující v ohledu množství pryskyřice, která zůstane impregnována ve vlákně před tím, než je navinuto na trn. Výsledné množství pojiva impregnovaného ve vlákně se dá v rámci prosycovacího zařízení redukovat dvěma způsoby, a sice počtem a polohou vodících válečků a počtem, polohou a charakterem stíracích plíšků.

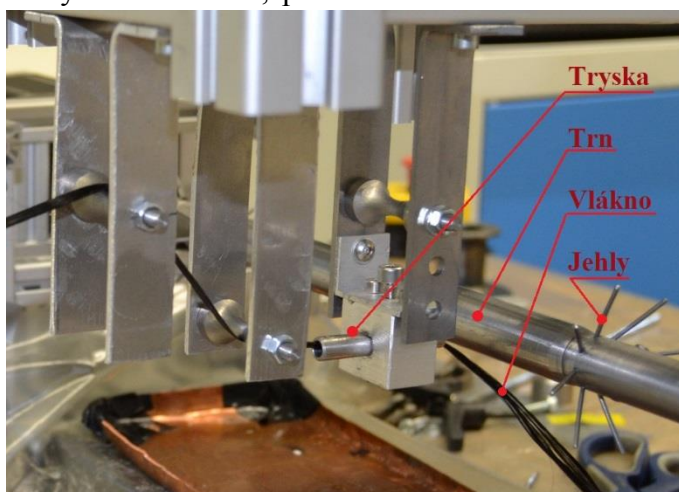
- ❖ Vodící válečky mohou být v prosycovacím zařízení v libovolném počtu, který je v podstatě ovlivněn pouze konstrukcí. Co se týká jejich konfigurace, neboli uspořádání, omezujícím faktorem je rovněž konstrukce prosycovacího zařízení. Záleží na tom, jak velkým množstvím je potřeba vlákno prosytit a podle toho přizpůsobit pozice válečků, přičemž je možno mít nad hladinou i pod hladinou libovolný počet. Pro výrobu trubek byly použity tři vodící válečky, kde jeden z nich vlákno přivádí do pozice nad prosycovací lázní, druhý je umístěn tak, aby bylo vlákno vedeno pod hladinou pojiva, a poslední váleček vede vlákno ven z lázně směrem ke stíracím plíškům.
- ❖ Stírací plíšky neboli stěrače jsou při výrobě umístěny ve větším stíracím plechu, který je nakloněn pod určitým úhlem tak, aby po něm přebytečné pojivo odstraněné z vlákna stékalo zpátky do vaničky. Počet stěračů je opět libovolný dle konstrukce a stejně tak i jejich pozice. Stěrače mohou být v řadě přímo za sebou, nebo v jiné výšce, což ovlivňuje úhel, který svírá vlákno před a po očištění. Tento úhel se dá rovněž ovlivňovat vzdáleností mezi jednotlivými stěrači. Obecně platí, že čím větší zlom nastane ve vlákně, tím víc pojiva se z něho odstraní. Poslední věc, která má vliv na prosycení ale i samotný výrobní proces a kvalitu výrobku, je charakter stěračů, což znamená, jestli je jejich stírací hrana



Obr. 46 Vláknové vedené prosycovacím zařízením

zkosená nebo zaoblená. V případě hrany zkosené je sice stírací efekt lepší, no pokud je nekvalitní navíjené vlákno, tak hrozí jeho natrhávání. To způsobuje, že se na vlákne tvoří jakési otřepy, ve kterých se zachytává největší množství pryskyřice a je problematické ji z nich odstranit, protože nejsou napnuté jako samotné vlákno, a tedy se o zbytek stěračů neotírají. Určitým řešením je použít stěrače se zaoblenou hranou, u které sice není stírání tak efektivní jako u zkosené, nicméně se výrazně omezí až zabrání vytváření otřepů na vlákne.

Pokud je prosycovací zařízení nastaveno dle potřeby a cívka ve stojanu je připravena pro výrobní proces, je dalším krokem navedení vlákna z cívky ve stojanu přes válečky a stěrače zamýšlenou dráhou, po které bude taženo trnem ke stroji. Aby vyztužující vlákno dosáhlo



Obr. 47 Přivedení vlákna k trnu

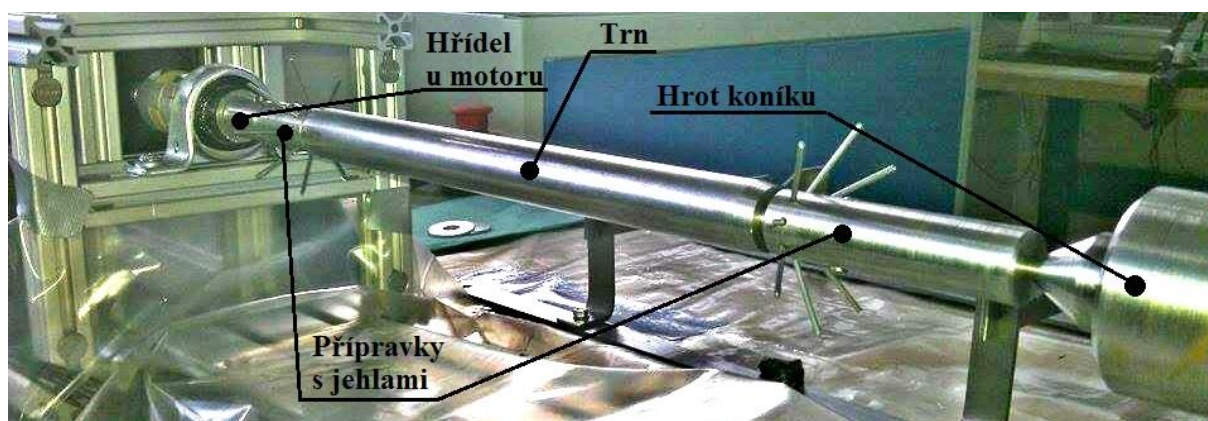
správnou pozici vůči trnu, musí být ještě vedeno přes trysku, která je nastavena do polohy, ze které je potřeba vlákno přivádět těsně před stykem s trnem. Tato tryska rovněž zajíždí při podélném návinu přesně mezi jehly na krajích trnu, kde umožňuje zaháknutí vlákna hned, jak se trn pootočí o zadanou hodnotu. Mezi prosycovacím zařízením a tryskou je možné vlákno vést po libovolné dráze. Při navíjení trubek pro testování byly navíc těsně před trysku přidány další dva válečky z důvodu dodatečného setření pojiva z vlákna.

Navíjecí trny, na které se vlákno navíjí a poté na nich kompozit tvrdne, by měly mít co možná nejčistší a nejhladší povrch, aby z nich po vytvrzení šlo navinutou trubku co nejjednodušeji stáhnout. Z tohoto důvodu je před upnutím do stroje nutno trny odmastit od nečistot, jak z předchozího navíjení, tak od usazeného prachu, aj.

Trny jsou dále upnuty do stroje, a to tak, že se na oba konce nasadí přípravky s jehlami. Rotace je pak mezi jednotlivými kusy přenášena pomocí kolíků a drážek. Jeden přípravek s jehlami je zasunut do hřídele při motoru, přičemž je pozice opět zajištěna dosednutím drážky na kolík, a druhý je přitlačen otočným hrotem koníku. Takto upnutý trn je připraven k rotaci. Než však začne samotné navíjení, povrch trnu je za rotace vybroušen jemným smirkovým papírem pro dosažení optimální kvality povrchu. Upnutí trnu je zobrazeno na obrázku 49.

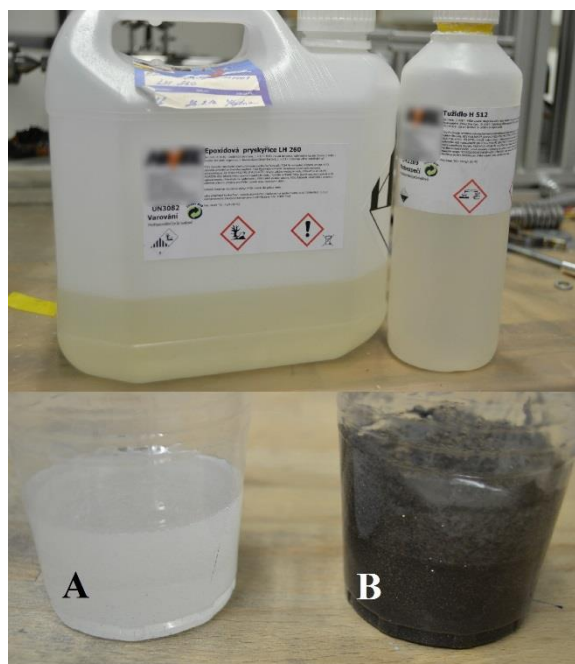


Obr. 48 Přípravky s jehlami



Obr. 49 Upnutí trnu do stroje

Bylo již několikrát zmíněno, že pro výrobu třífázových kompozitních trubek je potřeba tří složek, a to vyztužující uhlíková vlákna, pryskyřičné pojivo a třetí přídatná fáze, tedy plnivo. Uhlíková vlákna jsou použita tak, jak jsou navinuta na cívce. Pojivo a plnivo však musí být ve formě určitých směsí, které je třeba předem namíchat.



A - pojivo B - plnivo

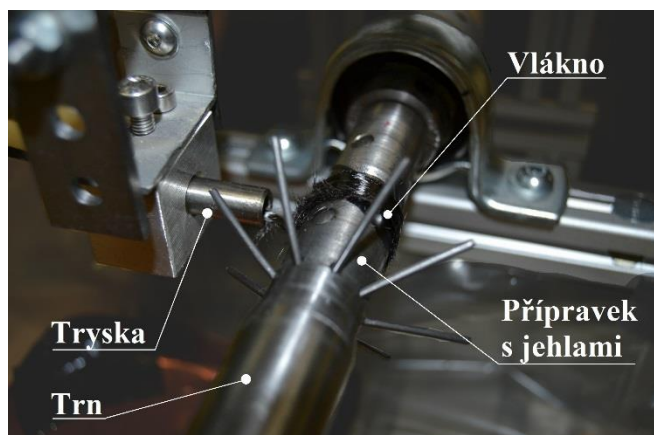
Obr. 50 Srovnání směsi plniva a pojiva

❖ Pryskyřičné pojivo je směs dvou složek, a sice samotné epoxidové pryskyřice a tužidla. Tužidlo se musí přidávat z důvodu, že samotná pryskyřice na vzduchu netuhne. S přidáním tužidla však celá kapalná směs po určité době (cca tři hodiny) ztuhne tak, že se s ní dále nedá při výrobě kompozitů pracovat. Proto je vhodné po namíchání této pojivové směsi pracovat bez zbytečných časových prodlev. Pro navíjení všech typů trubek byl použit stejný poměr pryskyřice k tužidlu, a to 4:1.

❖ Plnivo je použito za účelem přidání materiálu třetího typu, čili magnetického nebo korkového prachu, do struktury kompozitních trubek. Plnicí směs se připraví smícháním samotného pojiva (tužidlo a pryskyřice) s jedním z prášků v poměru 1:1. Tato směs je podstatně hustější a stejně jako v případě pojiva po určité době tuhne a další práce s ní je znemožněna.

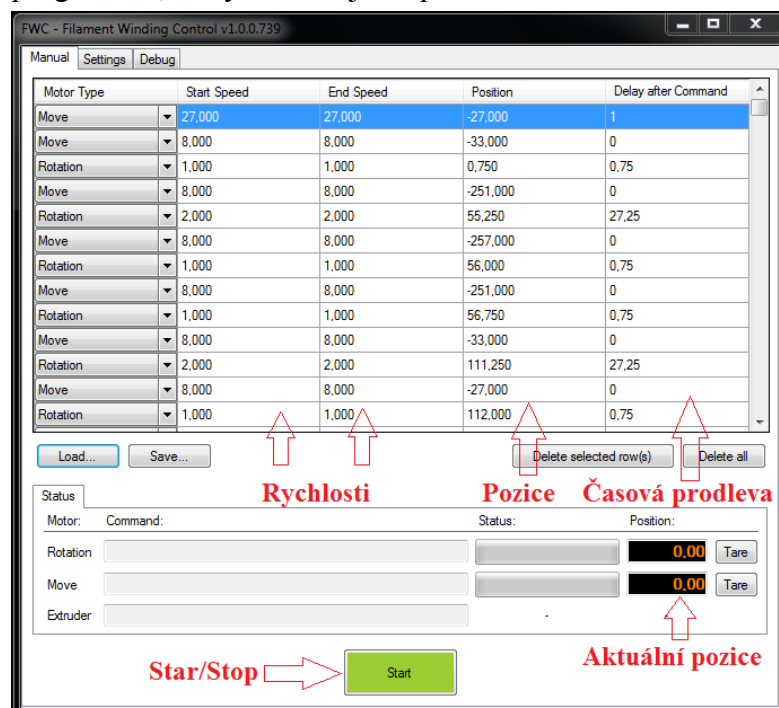
Po připravení pojiva i plniva je nutno těmito směsí naplnit příslušná zařízení. Směs s plnivem se nalije do zásobníku extrudéru, ze kterého bude vytlačováno šnekem, a tedy dávkováno v průběhu procesu navíjení. Pryskyřičné pojivo se nalije do vaničky umístěné v prosycovacím zařízení, odkud bude odebíráno vláknem, které se jím dostatečně prosytí. Je nutné se ujistit, že máme dostatečné množství obou směsí, protože vlákno procházející vaničkou musí být neustále pod hladinou pojiva, které odebírá, aby byla zaručená dokonalá impregnace, a extrudér musí být zásoben plnivem, aby byl schopen dávkovat ho do struktury kompozitu. V případě nedostatku kterékoliv složky se nedosáhne požadovaného výsledku, teda nedostatek matrice nebo pojiva ve struktuře kompozitu.

Posledním nezbytným krokem před spuštěním navíjecího programu je uchytení volného konce vlákna k trnu, aby bylo možné jeho počáteční potažení při zahájení procesu. Pro ujištění se, že vlákno nebude prokluzovat, se prvních pár rotací provede na jednom místě na přípravku s jehlami mimo navíjecí oblast. Vlákno se tím utáhne a zabrání se prokluzu. K trnu je možno vlákno přichytit lepicí páskou, což však při uchyťávání již prosyceného vlhkého vlákna nemusí být efektivní řešení. Proto je další možností zachytit vlákno tak, že se párkrát ručně omotá kolem přípravku s jehlami přes sebe, čímž už se k trnu přichytí dostatečně na to, aby bylo schopno vydržet tažení zbytku vlákna. Tato možnost je zobrazena na obrázku 51.



Obr. 51 Uchycení vlákna k trnu

Po provedení všech předešlých kroků, a teda připravení všeho příslušenství pro navíjení, je spuštěn proces navíjení. Tento proces je plně automatický a je ovládán předem vytvořeným programem, který se nahraje do příslušného softwaru. Pro řízení výrobního zařízení FWMS180



byl vyvinut software FWC (Filament winding controller), který provádí jednotlivé nahrané příkazy po sobě případně s příslušnou časovou prodlevou. Tento program řídí v podstatě činnost tří krokových motorů, které zabezpečují pohyb lineárního vedení, rotaci trnu a rotaci šneku extrudéru. Z programu je kdykoliv možné vyčíst aktuální polohu motorů a je taky vidět, která fáze procesu je aktuální, tzn. který příkaz je právě prováděn. V případě potřeby je možné program v průběhu navíjení kdykoliv manuálně pozastavit a pak pokračovat tam, kde byl proces přerušen. Náhled do softwaru FWC je zobrazen na obrázku 52. Protože program řídí proces

Obr. 52 Náhled do softwaru FWC

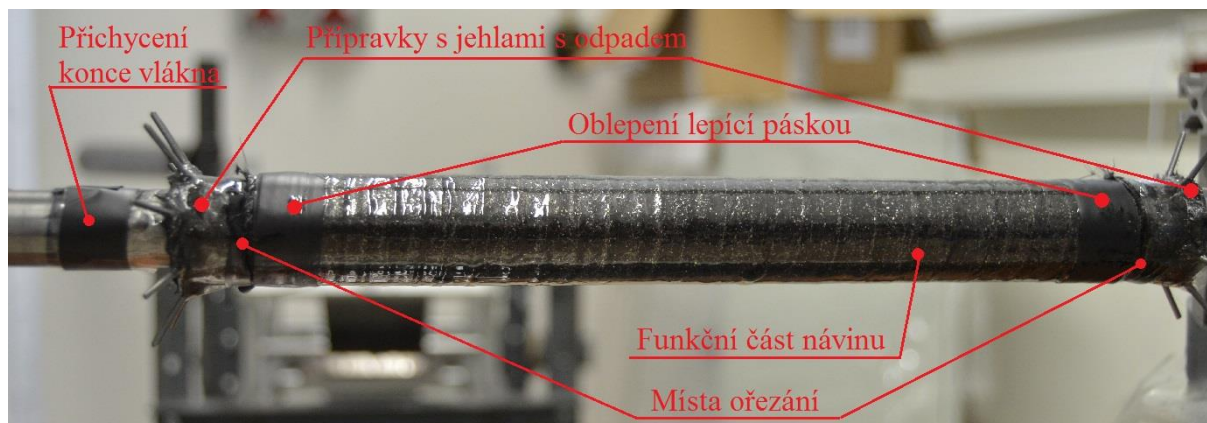
navíjení pouze zadanými rychlostmi, pozicemi a časy, je nutné rozlišovat typy návinů (šroubovicový, axiální,...) právě podle těchto zadaných veličin. Proto je vždy před realizováním samotné výroby proces spuštěn a sledován naprázdno bez vláken či pojiva a plniva, aby se předešlo možným konfliktům a odhalily se případné chyby v předpřipraveném programu. Pokud se ověří a potvrdí správnost řídicího programu, může se spustit výrobní proces. Počátek navíjení je názorně zobrazen na následujícím obrázku, přičemž se jedná o návin šroubovicový.



Obr. 53 Počátek navíjecího procesu (šroubovicový návin)

V průběhu navíjecího cyklu není potřebná žádná manuální aktivita kromě dohledu nad procesem, kdy je v případě komplikace nutno stroj buď pozastavit v programu, nebo úplně ukončit nouzovým stop tlačítkem. Po dokončení cyklu se stroj zastaví a program uživatele informuje o úspěšném dokončení procesu.

Po skončení navíjení zůstane vlákno nataženo přes celou dráhu a je tedy potřeba ho odříznout, aby byla možná další neomezená manipulace. Vlákno se uřízne tak, aby jeho konec od trnu měl potřebnou délku k uchycení. Volný konec návinu se tedy opět buď hned zalepí páskou, nebo párkrát omotá a zalepí až poté. Dokončený návin má tedy funkční délku v rámci trnu, ale kvůli axiálně vedenému vláknu vede až za jehličky. Výsledkem skončeného procesu je tedy vlákno navinuté přes celou délku trnu a navíc o určitou délku přes přípravky s jehlami. Tyto tři komponenty jsou tedy pevně spojeny a v tomto stavu se od sebe nedají oddělit. Je ovšem potřebné přípravky s jehlami sundat z trnu, aby mohly být použity pro výrobní proces další trubky, a taky aby bylo možné trn nechat vytvrdit a poté vytvrzenou trubku z trnu stáhnout. Z tohoto důvodu se musí návin oříznout v rámci délky trnu.



Obr. 54 Oříznutý návin se strhací páskou

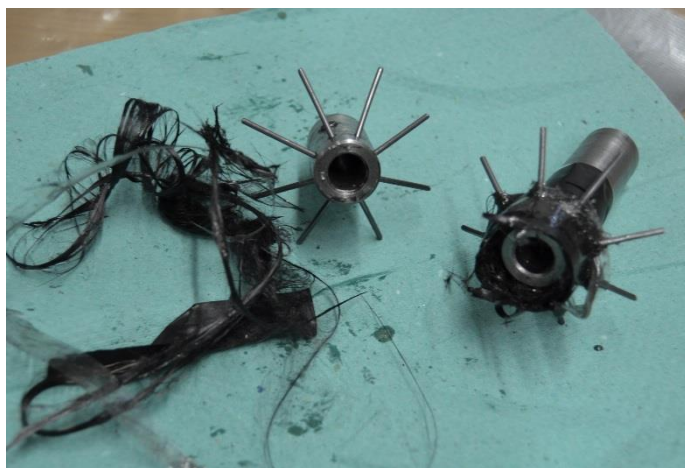
Před samotným ořezáním je však nezbytné obalit právě navinutý kus strhávací páskou, která slouží jak na dotažení kompozitu v průběhu vytvrzování na vzduchu, tak na vyždímání přebytečného pryskyřičného pojiva ze struktury. Tato páska se jednoduše přichytí k jednomu konci návinu a za neustálé rotace trnu je rovnoměrně nanášena přes jeho celou délku, kde se ustříhne a opět přichytí k návinu. V případě, že by se takto nanesená páska na kompozit přerázla, došlo by k jejímu rozmotání. Proto je teda navíc nutné oblepit lepící páskou návin v místech, kde bude strhávací páska spolu s návinem ořezána. Takovéto oblepení neumožní strhávací pásce povolít se, nýbrž zůstane pevně dotažená.

Takto upravený návin je už možno oříznout na potřebnou délku, aby bylo možné jednoduše sundat přípravky s jehlami a po vytvrzení trn vytáhnout z kompozitní trubky. Pro ořezání je opět potřebné, aby trn rotoval a řezání proběhlo jednodušeji a přesněji. Čerstvě navinutý rotující díl jde tedy jednoduše oříznout nožem, pouhým přiložením na povrch a zatlačením, dokud nedosáhneme povrchu trnu. Oříznutý návin je zobrazen na obrázku 54.

Ořezání návinu způsobí, že je nyní možné oddělení trnu od obou přípravků s jehlami. Umožní tedy i odstranění odpadu, což je vlákno navíjené za jehličky a část šroubovicového návinu zasahující do těchto přípravků. Na trnu pak zůstává jenom funkční část kompozitu, jak je zobrazeno na obrázku 55.



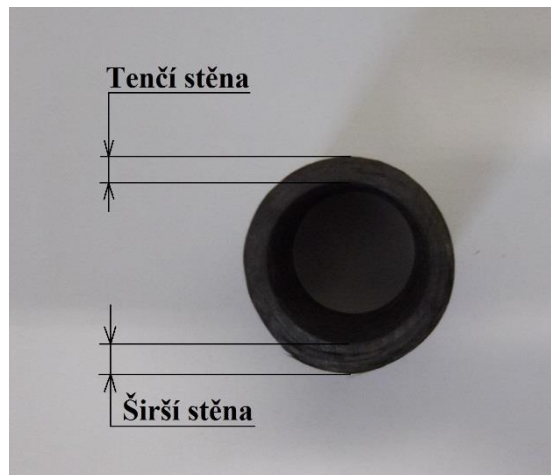
Obr. 55 Funkční část kompozitu na trnu



Obr. 56 Odpad z navíjení

Odpad, čili přebytekové vlákno omotané za jehličkami, se musí z přípravků sundat spolu s oříznutým zbytkem strhávací pásky, aby mohli být jehličky použity pro případné další navíjení. Před dalším použitím se však musí očistit od zbylé pryskyřice i jemných částí vlákna. Odstraněné zbytky vláken nelze dál použít k žádnému účelu, proto jsou vyhozeny. Na obrázku 56 je vidět jak odpad na jehličkách, tak i odpad odstraněný z nich.

Trn spolu s funkční částí návinu je nutno nechat v průběhu 24 hodin ztuhnout na vzduchu při pokojové teplotě. Pryskyřičné pojivo má však před ztuhnutím tekutý charakter, což způsobuje, že i když je tato směs velmi viskózní, je pořád tekutá. Z tohoto důvodu by při statickém tuhnutí pojivo teklo do spodní části vlivem gravitační síly a po ztuhnutí by byla trubka nekvalitní, a sice se stěnou tenčí na jedné straně a podstatně širší na straně opačné. Je tedy nezbytné, aby navinuté díly tuhly za neustálé rotace, čímž se zabrání tečení pojiva pouze do jednoho směru. Z tohoto důvodu byla postavena jednoduchá konstrukce, ve které je upevněn krokový motor, který zaručuje neustálou rotaci dvou tuhoucích návinů uspořádaných souose za sebou. Tato konstrukce je patrná z obrázku 58.



Obr. 57 Vzorek ztuhnutý staticky bez rotace

Po očištění přípravků a jehliček je teda možné použít je pro navíjení kompozitů na další trny. Při čištění je však potřeba použít technického benzínu pro co nejdokonalejší odstranění pojiva z těchto dílů hlavně v částech, kde dochází ke spojení s jinými díly, jako např. trn či spojovací hřídel s krokovým motorem. V případě špatného očištění by se mohlo pojivo dostat do těžce přístupných míst, ze kterých by se velice obtížně odstraňovalo, zvláště pak po ztuhnutí. Pro každý další návin pak platí stejný postup, jako ten co byl popsán výše. V tabulce 6, kde je technologický postup zestručněn, to odpovídá bodům 2. až 17.

Dříve bylo zmíněno, že návinu musí na vzduchu tuhnout za neustálé rotace, a že přídatná konstrukce pro rotaci trnů dokáže rotovat maximálně dva tyto trny. Protože výroba kompozitních trubek ale probíhala po třech trnech, bylo pro ztuhnutí na vzduchu potřeba rotovat i třetí trn. Tento byl po ořezání a očištění upnut zpátky do výrobního zařízení, kde potřebnou dobu rotoval mezi motorem a koníkem jako při samotném navíjení. Na obrázku 58 je zobrazeno kromě tuhnutí v přídatné konstrukci pro rotaci trnů i tuhnutí za rotace ve výrobním zařízení FWMS180.



a) v přídatné konstrukci



b) ve výrobním zařízení

Obr. 58 Tuhnutí návinů na vzduchu

Po tom, co jsou všechny návinu dokončené a rotující trny jsou ponechány k tuhnutí při pokojové teplotě, je potřeba odstranit přebytečné pojivo z vaničky a přebytek plniva z extrudéru, aby nedošlo k jejich ztuhnutí v těchto dílech nebo zařízeních. To bylo provedeno jednoduchým přelitím všech zbytků do jednoho kelímku, či jiné nepotřebné nádoby, kde už se tyto směsi nechali bezpečně ztuhnout. Všechny části zařízení, které přišly s těmito směsi do styku, musí být důkladně očištěny. Jako první se nejdříve vytřely pro odstranění největšího množství odpadu a poté bylo čištění prováděno technickým benzínem, který odstraní zbytky pryskyřice i mastnotu. V případě extrudéru je čištění složitější, jelikož se musí nejdříve rozebrat, aby byly k očištění přístupné všechny jeho části, které byly ve styku s pojivem. Problematické

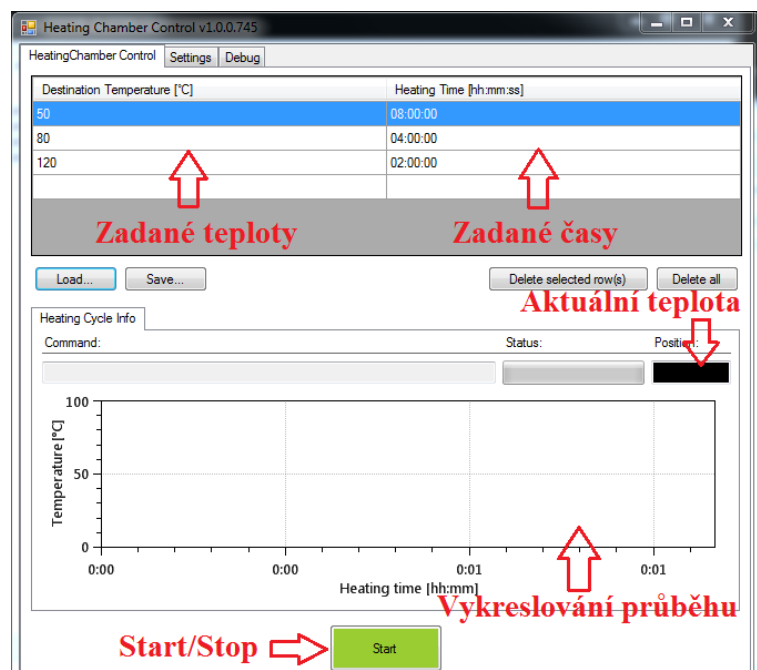
jsou hlavně malé části zařízení, jako třeba navíjecí tryska či tryska extrudéru, a také zásobník pojiva, ze kterého je nemožné dokonale vytříit všechnu směs. Proto se nechají neodstraněné zbytky zaschnout uvnitř a poté je nutno zásobník z vnitřní části vybrousit.

Po uplynutí 24 hodinového cyklu vytvrzování kompozitů na vzduchu při pokojové teplotě je potřeba sundat z nich strhávací pásku, která nyní už není potřebná. Musí se tedy jako první odlepit lepicí páska z konců návinu a poté se dá jednoduše strhnout po celé délce páska strhávací. Trny se samotným návinem musí být dále vloženy do pece, kde dojde k 14 hodinovému cyklu vypékání.



Obr. 59 Kompozity vytvrzené na vzduchu

Vypékání kompozitů se používá z důvodu zvýšení neboli zoptimalizování jejich mechanických materiálových charakteristik. Toto tepelné zpracování probíhá ve vytvrzovací peci, do které se vkládají všechny vyrobené kusy najednou. Tam jsou kompozity ovlivňovány



Obr. 60 Náhled do softwaru HCC

různými teplotami po různé doby. Pro vyrábění kompozitní trubky dvou i třífázového složení byl zvolen cyklus vypékání na teplotě 50 °C po dobu 8 hodin, poté teplota naroste na 80 °C, na které se udrží po dobu 4 hodiny, a poslední nárůst teploty je na 120 °C, při které se kompozit vypékal poslední 2 hodiny. Tento 14 hodinový cyklus bylo potřeba zadat a kontrolovat. Pro tento účel byl vyvinut program HCC (Heating chamber control), který pracuje podobně jako program pro navíjecí proces FWC. Je možné přímo do programu zadávat teploty a časy, po které má být tato teplota v peci udržována, nebo si

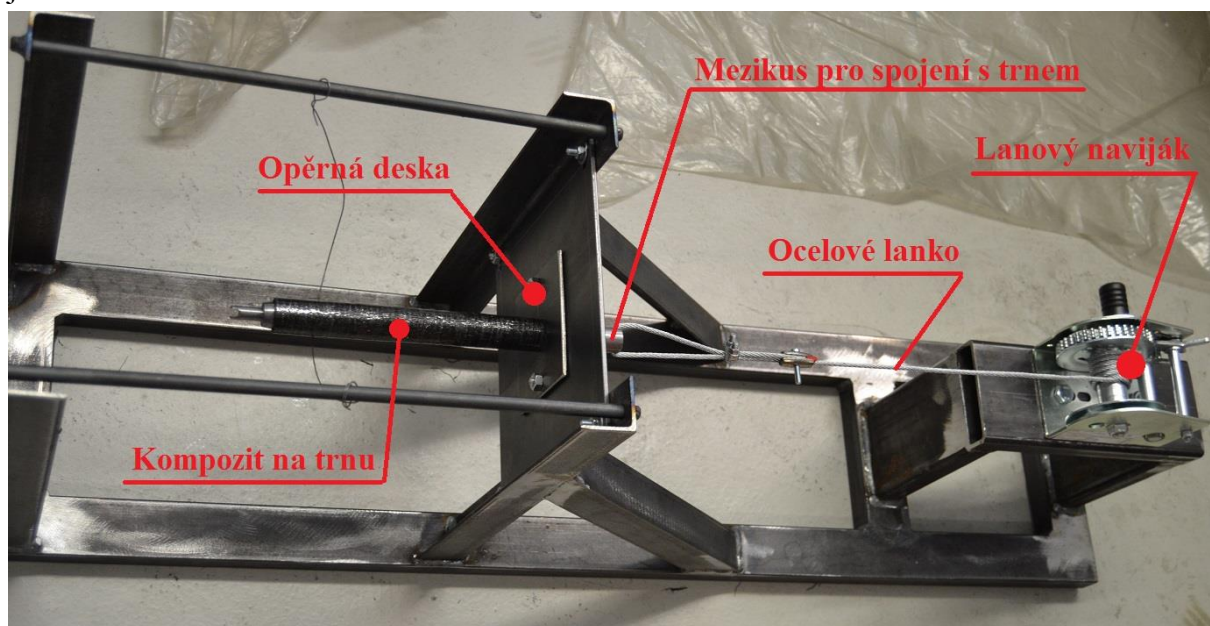
program připravit předem a jenom ho do HCC načíst. Software dále umožňuje sledování aktuální teploty v peci a čas, který uplynul od začátku procesu vypékání. Dále vykresluje průběh závislosti teploty na čase po časových krocích, které se dají nastavit libovolně dle potřeby. Stejně jako u programu FWC je možnost pozastavit proces vypékání a poté opět pokračovat.



Obr. 61 Vytvrzovací pec s vloženými kompozity

Problémem však je, že když je program pozastaven na delší dobu, klesá teplota v peci. Po dokončení cyklu je uživatel ihned informován o úspěšném dokončení vypékacího procesu. Do pece se trny spolu s návinem vkládají ve stojanu na plošinku tak, aby byla jejich výšková poloha zhruba v polovině vytvrzovací pece, jak ukazuje obrázek 61, protože topné tělesa jsou v peci umístěny na vrchní a spodní stěně.

Tepelně vytvrzené kompozity navinuty na trnech se spolu se stojanem po skončení vypékání vytáhnou z pece, a pokud trn nezůstává součástí kompozitu, musí se z něj vytáhnout. Pro vytahování trnů z vytvrzených kompozitních trubek slouží vytahovací zařízení, zobrazeno na obrázku 62. Každý trn má na jedné straně vyřezán závit, který slouží jako spoj k protikus, který je součástí vytahovacího zařízení. Tento protikus bude tažen a spojení s trnem způsobí, že se bude táhnout spolu s ním. Aby se dosáhlo vytažení samotného trnu z trubky, bude se táhnout přes desku s otvorem, kterého průměr je o něco málo větší než průměr trnu. Tím pádem se čelní stěna kompozitní trubky opře o plochu desky kolem otvoru, což této trubce průchod přes otvor znemožní. Tažení je prováděno pomocí lanového navijáku a ocelové lanka, které je pevně spojeno se zmiňovaným mezikusem, spojeným s trnem. Nejobtížnější fází tažení trnu je počáteční okamžik, kdy trubka stále pevně drží na trnu. Po překonání statického koeficientu tření a stejně tak oddělení zaschlé pryskyřice od trnu jde už trn táhnout z trubky poměrně jednoduše.



Obr. 62 Vytahovací zařízení

Kompozitní trubky oddělené od trnu je ještě potřeba buď nařezat na požadované délky, nebo alespoň oříznout konce, protože čelní plochy jsou bez oříznutí roztřepené. Ořezání se provádělo na pásové pile, nebo ve většině případů ručně kotoučovou bruskou s řezným kotoučem. Povrch čelní plochy je po ořezání hladký a znatelně kvalitnější. Navíc, na oříznuté ploše je viditelně poznat strukturu a uspořádání jednotlivých návinů, tedy je vidět střídání podélných a šroubovicových vláken. Takto vyrobené a opracované dvoufázové i třífázové kompozitní trubky jsou už připraveny k použití pro aplikaci, pro kterou byly vyráběny. V tomto případě bylo vyrobeno 6 kusů dvoufázových trubek, 6 kusů třífázových trubek s magnetickým prachem a 6 kusů třífázových trubek s korkovým prachem určených k testování.



Obr. 63 Stažené trubky



a) Před ořezáním

b) Po ořezání

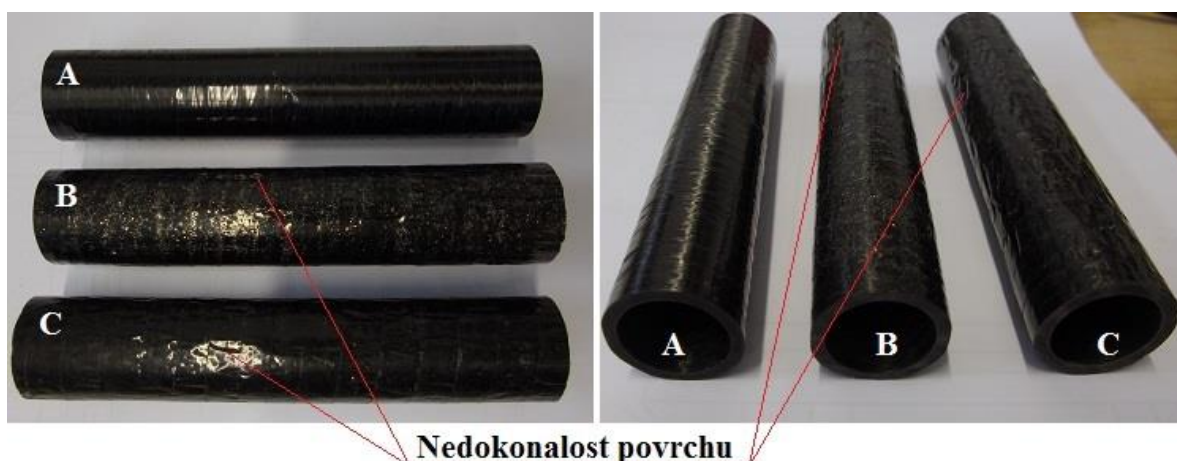
Obr. 64 Porovnání kvality čelní plochy

6 TESTOVÁNÍ A ANALÝZA VYROBENÝCH DÍLŮ [15], [21]

Kompozitní trubky dvoufázového i třífázového složení byly vyrobeny dle technologického postupu popsáno v předešlé kapitole a s ohledem na geometrické specifikace uvedené v kapitole 2. Následně bylo nutné na těchto dílech provést zkoušky na ohyb a vibrace a srovnat chování trubek dvoufázových s chováním trubek s magnetickým a korkovým prachem. Rozhodující bylo zjistit, zda a jak přítomnost a charakter přídatného materiálu třetího typu ovlivní chování kompozitu při podrobení uvedenými zkouškami.

Před samotným provedením zkoušek byly už určité rozdíly mezi jednotlivými typy trubek patrné na pohled, jak je možno pozorovat na obrázku 65.

- ❖ Zatímco trubky dvoufázové měly jednoznačně černou barvu, kterou určila pouze vlákna, u obou typů trubek třífázových byla vizuálně patrná přítomnost přísady na povrchu. Plnivo bylo při navíjení přidáváno do struktury pouze se šroubovicovým návinem uvnitř struktury, vnější náviny už se navíjely bez něj. I tak se však tato fáze dostala na povrch z důvodu utahování vlákna, které tím vytlačovalo nadbytečné pojivo i s plnivem směrem k povrchu. Pokud by tento fakt představoval pro určitou aplikaci problém, dalo by se tomu zamezit použitím většího počtu vnějších návínů, přes které by už směs plniva neprostoupila.
- ❖ Dalším zřejmým rozdílem byla kvalita povrchu, která byla u dvousložkových trubek nejkvalitnější, bez výrazných závad. Problémem u trubek složených ze tří složek byla nepravidelnost struktury povrchu. Zatímco u dílů s magnetickým prachem byla převažující část povrchu bez závad a v určitých místech došlo při tuhnutí k mírným prohloubením, u trubek s korkovým prachem bylo těchto prohloubení podstatně víc. Z různých příčin a možných řešení se vyvodilo, že by tomuto defektu povrchu mohlo být zabráněno slabším dotažením strhávací pásky po skončení navíjení (dotažení větší silou potvrdilo opačný efekt na kvalitu povrchu), nebo použitím kvalitnějšího vlákna, které by do struktury vcházelo méně impregnováno pryskyřičným pojivem, což by výrazně snížilo množství pojiva vytlačeného ze struktury na povrch, na které se nanáší strhávací páska.



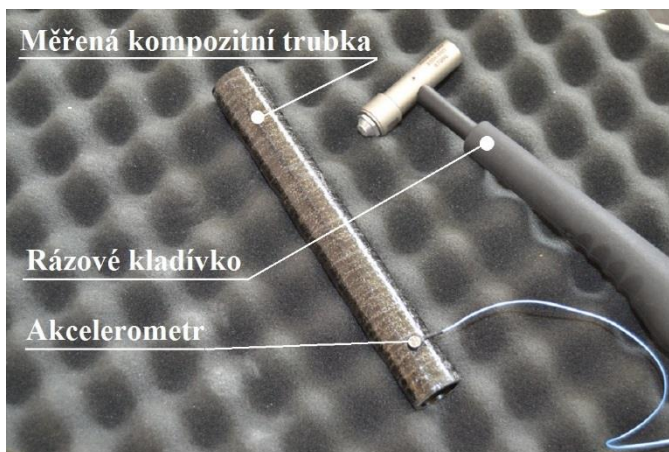
- A - dvoufázová trubka
- B - trubka s magnetickým prachem
- C - trubka s korkovým prachem

Obr. 65 Vizualní rozdíly mezi jednotlivými typy trubek

6.1 Zkouška na vibrace

První ze zkoušek byla realizována zkouška na vibrace, jelikož u této zkoušky nedochází k deformaci vyrobených součástí a dají se použít pro následující ohybovou zkoušku. Měření vibrací u jednotlivých dílů bylo provedeno pomocí piezoelektrického akcelerometru, přičemž se využilo rázového buzení rázovým kladívkem.

- ❖ Použití piezoelektrického akcelerometru bylo pro měření zvoleno z důvodu jejich širokého fázového i dynamického rozsahu a vysoké míry spolehlivosti a stability. Výhodou také bylo, že z výstupního signálu ve formě zrychlení mechanického chvění se integrací dosáhne odpovídající hodnoty rychlosti či výchylky chvění. Tato výchylka pak byla rozhodující při vyhodnocování a porovnávání.
- ❖ Rázové kladívko sloužilo jako budící prvek pro vyvolání chvění v kompozitních součástech. V tomto případě byly vibrace buzeny v různých bodech a různou silou, zatímco odezva se měřila v jednom bodě, tzv. referenčním bodě. Velikost této síly není pro vyhodnocování v tomto případě relevantní, jelikož byl určován poměrný útlum, který je funkcí pouze výchylky a času potřebnému k utlumení.



Obr. 66 Příslušenství k měření vibrací

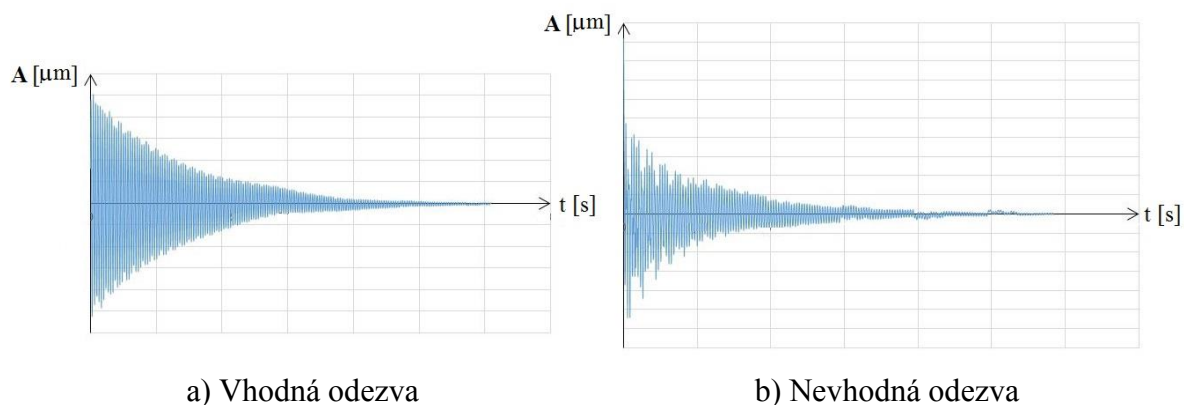
Měření proběhlo pro každou trubku individuálně s tím, že se stejný kus měřil vždy dvakrát. Po naměření všech kusů se musela změřená data vyhodnotit a sestavit grafy odezev. Pro zpracování dat z jednotlivých měření byl použit software PULSE LabShop, ve kterém probíhalo veškeré vyhodnocování. Důležitými body této zkoušky bylo zjištění jak poměrného útlumu u každé z trubek, tak provedení částečné modální analýzy pro zjištění první vlastní frekvence pro každý díl.

Zkouška probíhala způsobem, že kompozitní trubka byla nejprve volně položena na pěnovou podložku, která je vidět na obrázku 66. Poté se na její jeden konec umístil piezoelektrický akcelerometr a pro zajištění jeho polohy byl použit vosk. Tím měl pevně danou polohu v průběhu měření jednoho kusu. Následně bylo rázovým kladívkem vyvoláno chvění v trubce tak, že hrotem kladívka se klepalo na opačném konci trubky, než byl umístěn akcelerometr. Po skončení prvního měření na jednom dílu se data uložila a zahájilo se druhé měření, které probíhalo stejně. Po uložení dat z druhého měření byl z trubky odejmut akcelerometr a stejným způsobem připevněn na další, na které pak stejným způsobem probíhalo stejné měření. Tímto způsobem byly testovány všechny kusy.

Měření a vyhodnocení proběhlo celkem na 18 kusech kompozitních trubek, tzn. 6 kusů pro každé materiálové složení. Dvě opakování měření pro každou trubku bylo prováděno z důvodu možné chyby, kdy by změřená odezva byla buď nevýrazná, v případě nedostatečného buzení, nebo by byla výrazně nepravidelná, což by znamenalo, že buzení bylo vyvoláno dvakrát hned po sobě, teda hrot kladívka by udeřil do trubky dvakrát, protože byl úder příliš silný a trubka ihned po rozkmitání vrazila do kladívka při návratu. Z těchto dvou výsledků měření se pro každou trubku vybrala odezva, která nebyla negativně ovlivněna chybou a je tedy vhodná pro vyhodnocování.

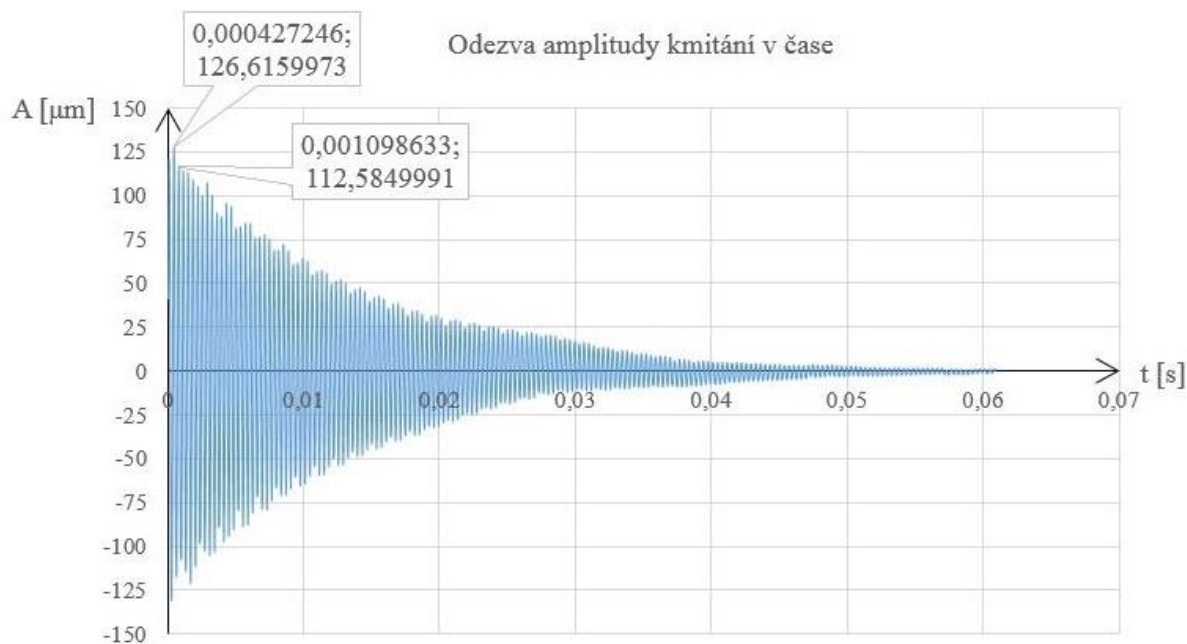
6.1.1 Vyhodnocení zkoušky vibrací kompozitních trubek

Postup vyhodnocování poměrného útlumu i první vlastní frekvence je pro každou trubku stejný, a z toho důvodu bude provedeno pouze vzorové vyhodnocení pro jednu trubku. Dříve bylo zmíněno, že ze dvou provedených odezev na jedné trubce byla vybrána odezva vhodná pro vyhodnocování. Na obrázku 67 je uveden příklad jak vhodné, tak nevhodné odezvy pro měření.



Obr. 67 Porovnání odezvy vhodné a nevhodné pro vyhodnocení

Ze zvolené vhodné odezvy se následně musí určit poměrný útlum b_t , který je charakteristický pro každý individuální díl, tzn., není to charakteristika materiálu, nýbrž i u kusů ze stejného materiálu se může lišit, protože má na něho vliv i geometrie součástí. Určuje se tak, že se zjistí logaritmický dekrement útlumu δ , což je rozdíl logaritmů dvou přilehlých amplitud A a ten se podělí periodou T mezi nimi. První dvě zvolené přilehlé amplitudy jsou zobrazeny na obrázku 68. Tímto způsobem byly zvoleny přilehlé amplitudy pro každý výpočet s tím, že se vybíraly po celém časovém rozsahu odezvy. Pro určení poměrného útlumu bylo z jedné odezvy provedeno 6 výpočtů dekrementu v různých časech. Pro získání poměrného útlumu pro danou trubku byly spočtené hodnoty zprůměrovány.



Obr. 68 Zobrazení amplitud pro jeden výpočet

Logaritmický dekrement útlumu se spočítá z následující rovnice.

$$\delta = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)} = \ln \frac{126,616}{112,585} = 0,117 \quad (6.1)$$

Dalším krokem je určení periody mezi přilehlými amplitudami. To se provede jednoduchým odečtením časů uvažovaných amplitud.

$$T = t_2 - t_1 = 0,00109863 - 0,00042724 = 1,038 \cdot 10^{-3} \text{ s} \quad (6.2)$$

kde t_1 je čas dosažení první uvažované amplitudy

t_2 je čas dosažení následující amplitudy

Pro získání hodnoty poměrného útlumu je posledním krokem podělení logaritmického dekrementu periodou, jak ukazuje rovnice (6.3). Hodnota dekrementu se kvůli odezvě v mikrometrech vynásobí hodnotou 10^{-3} .

$$b_{t1} = \frac{\delta}{T} = \frac{0,117 \cdot 10^{-3}}{1,038 \cdot 10^{-3}} = 0,112 \quad (6.3)$$

Tímto se zjistil poměrný útlum podle prvních dvou zvolených amplitud. Hodnoty zjištěné pro ostatní přilehlé amplitudy v rozdílných časech jsou uvedeny v tabulce 7.

Tab. 7 Vypočtené hodnoty poměrných útlumů první trubky

b_{t1}	0,112	b_{t3}	0,119	b_{t5}	0,138
b_{t2}	0,124	b_{t4}	0,122	b_{t6}	0,131

Výsledný poměrný útlum jedné konkrétní trubky se nakonec zjistí zprůměrováním.

$$b_t = \frac{\sum b_{ti}}{n} = \frac{0,112 + 0,124 + 0,119 + 0,122 + 0,138 + 0,131}{6} = 0,124 \quad (6.4)$$

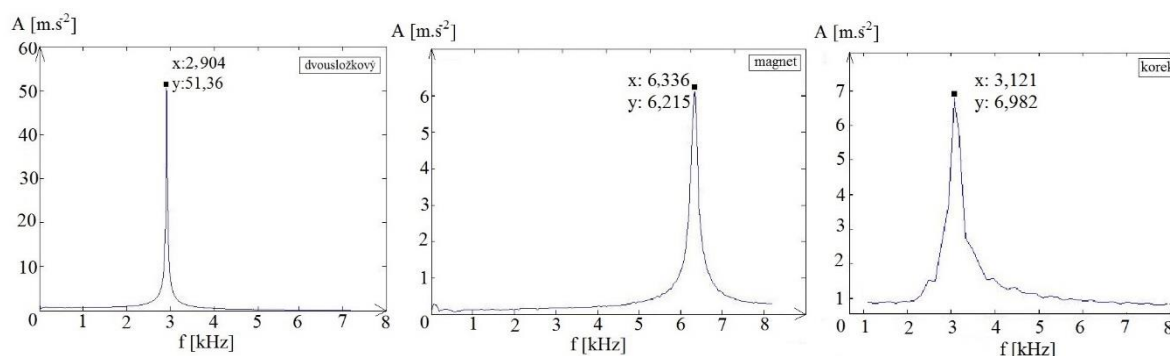
Tímto způsobem byla zjištěna hodnota poměrného útlumu pro všechny trubky, jak dvoufázové, tak i trubky s magnetickým a korkovým prachem. Tabulka 8 ukazuje hodnoty poměrných útlumů pro každou individuální trubku každého typu materiálového složení kompozitů.

Tab. 8 Vypočtené hodnoty poměrných útlumů pro všechny trubky všech typů

Trubka	Dvoufázové		Třífázové (magnet)		Třífázové (korek)	
1	b_t	0,124	b_t	0,271	b_t	0,255
2	b_t	0,121	b_t	0,256	b_t	0,285
3	b_t	0,130	b_t	0,317	b_t	0,274
4	b_t	0,119	b_t	0,264	b_t	0,245
5	b_t	0,127	b_t	0,259	b_t	0,252
6	b_t	0,125	b_t	0,268	b_t	0,261

Po stanovení poměrných útlumů byla pomocí softwaru provedena částečná modální analýza signálu pro zjištění první hlavní frekvence pro každou trubku. Vlastní frekvence může být v případě jejího dosažení v jakémkoliv mechanismu velice nebezpečná, jelikož na této frekvenci dochází k několikanásobně většímu rozkmitání, a teda k dosahování největších hodnot amplitud, než vykazují kmitý na frekvencích jiných než vlastních. Důležité je, což platí obecně pro všechny díly i sestavy, aby u každé trubky byla první vlastní frekvence co nejvyšší a nedocházelo tak v reálné aplikaci ke vzniku vlastních kmitů relativně brzo, čímž by se výrazně snížila stabilita soustavy, které budou tyto trubky součástí, a sice rotoru kompresoru rotujícího při vysokých otáčkách.

Výstupem této analýzy byly závislosti frekvence na amplitudě, ze kterých je okamžitě zřejmé vlastní frekvence každého kusu. Na následujícím obrázku jsou uvedeny tyto závislosti pro každé materiálové složení, kde výraznější rozdíly v hodnotách amplitud byly způsobeny pouze silou budícího rázu. V hodnotách vlastních frekvencí individuálních trubek v rámci jednoho materiálového složení byly pouze minimální rozdíly, což je vidět v tabulce 9.



Obr. 69 První vlastní frekvence jednotlivých materiálových složení

Tab. 9 Zjištěné hodnoty vlastních frekvencí kompozitních trubek

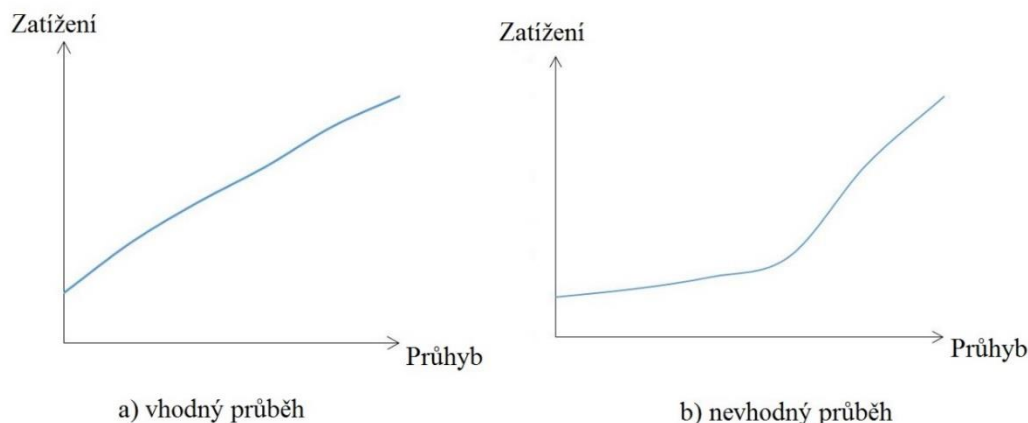
Trubka	Dvofázové		Třífázové (magnet)		Třífázové (korek)	
	f_v [Hz]		f_v [Hz]		f_v [Hz]	
1	f_v [Hz]	2904	f_v [Hz]	6336	f_v [Hz]	3121
2	f_v [Hz]	2912	f_v [Hz]	6332	f_v [Hz]	3069
3	f_v [Hz]	2848	f_v [Hz]	6464	f_v [Hz]	3050
4	f_v [Hz]	2934	f_v [Hz]	6408	f_v [Hz]	3107
5	f_v [Hz]	2889	f_v [Hz]	6391	f_v [Hz]	3086
6	f_v [Hz]	2927	f_v [Hz]	6377	f_v [Hz]	3113

6.2 Zkouška na ohyb

Po změření všech 18 kusů kompozitních trubek na vibrace byla na těchto trubkách provedena zkouška na ohyb. Toto testování probíhalo na univerzálním testovacím zařízení DOLI UTM 05, které bylo schopné vyvinout maximální zatížení o velikosti 5000 N. Testovací zařízení je primárně konstruováno na vyvíjení zatížení tahem pro realizování tahových zkoušek na plochých vzorcích, ovšem rovněž dokáže vzorky zatěžovat tlakem. Pro ohýbání trubek musely být do čelistí přidány přípravky pro provedení ohybové zkoušky tříbodovým ohybem. Ve spodní čelisti byly trubky opřené ve dvou krajních bodech, zatímco vrchní čelist sloužila jako zatěžující. Pro realizaci ohybu byl do ní upnut ohybník, který působil na vzorek silou v jednom bodě uprostřed. Maximální možné zatížení tohoto zařízení nebylo dostatečné na zatěžování trubek až do lomu, to však pro uvažovanou aplikaci v kompresoru firmy Sobriety s.r.o. nebylo potřeba. Primárním cílem testování bylo při zatížení 3000 N sledovat rozdíly v průhybech střednice a zatěžovaného bodu. Rovněž bylo důležité zjistit charakter průběhu počáteční fáze deformace při postupném zatěžování. To znamená, že nutné bylo vyhodnotit, zda nedochází k prudkému nárůstu průhybu v počáteční fázi zatěžování a až poté k jeho ustálení. Tento průběh je názorně ukázán na obrázku 71.

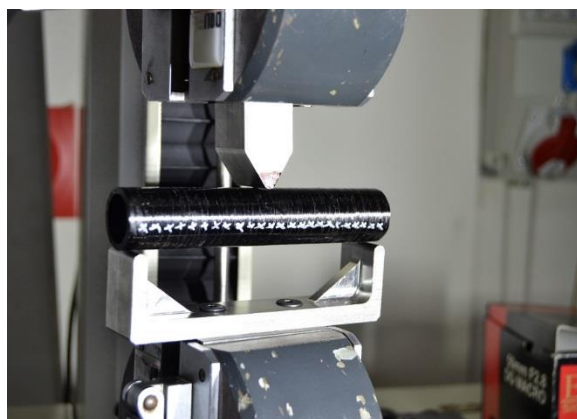


Obr. 70 DOLI UTM 05



Obr. 71 Ukázka vhodného a nevhodného průběhu deformace v počátku zatěžování

Průhyby v průběhu testu byly vyhodnocovány optickou metodou za použití vysokorychlostních kamer, zatěžující síla byla snímána testovacím zařízením. Prvním krokem při uskutečňování zkoušky bylo upnutí přídatných ohybových čelistí pro tříbodový ohyb. Poté proběhlo nastavování a seřizování systému pro optické zaznamenávání deformace, což zahrnuje osvětlovací příslušenství a vysokorychlostní kameru, jež jsou jeho součástí. Mercury Real-time Tracking System byl použit nejenom na zaznamenávání průběhu deformace pomocí systémového prvku BFLY125-S, ale i pro vyhodnocování závislostí průhybů trubek na velikostech zátěžné síly v rozhraní softwaru Mercury. Kameru, která měla snímat průběh testování, bylo potřeba kalibrovat pomocí kalibrační mřížky, která definuje přesné hodnoty délkových rozměrů ve snímané rovině. Na vzorek byly naznačeny body pro detekci průhybu optickým měřením, které pomáhají zachytávat přesný pohyb snímaného prvku. Takto označený vzorek byl vložen mezi ohybové čelisti a zatížen předpětím. Vzorek se pak začal zatěžovat až do doby, kdy dosažená hodnota zátěžné síly dosáhla 3000 N. Zaznamenaný průběh testu byl uložen a následně vyhodnocován.



a) Detailní pohled na upnutý vzorek



b) Vybavení ke zkoušce ohybem

A – BFLY125-S

B – DOLI UTM 05

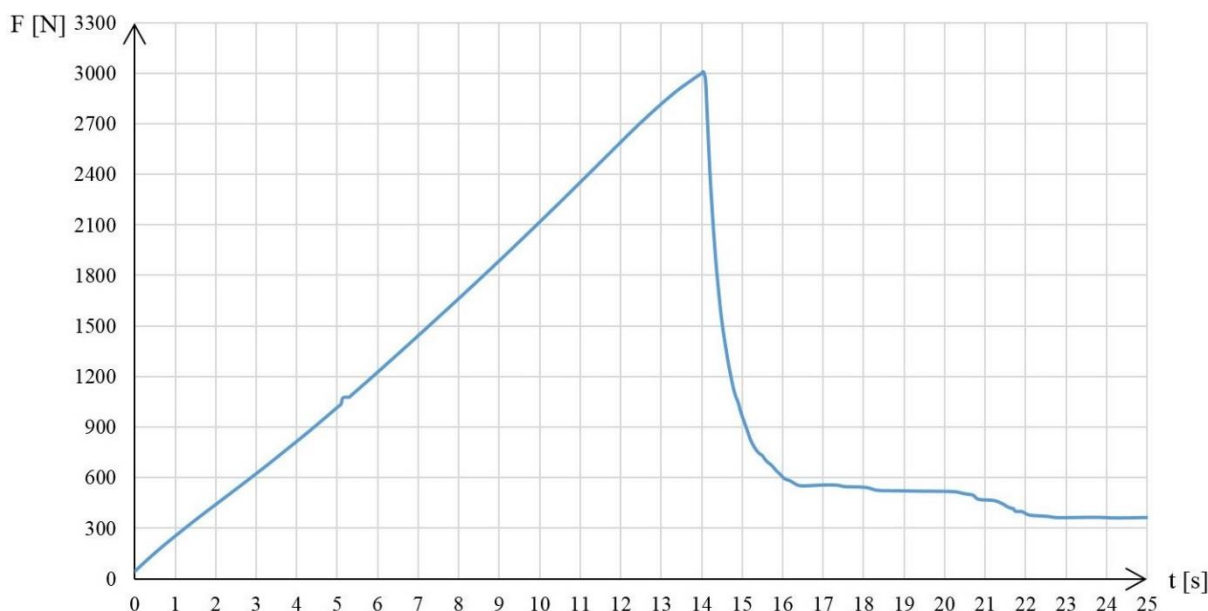
C – Vzorek upnutý v čelistech

Obr. 72 Ukázka seřízeného vybavení připraveného pro ohybovou zkoušku

Zkouška byla provedena pro všechny kompozitní trubky a následně se sestavily závislosti zatěžující síly na deformaci a určily maximální průhyby střednice i vrchního bodu trubky (bod v dotyku trubky a ohybníku).

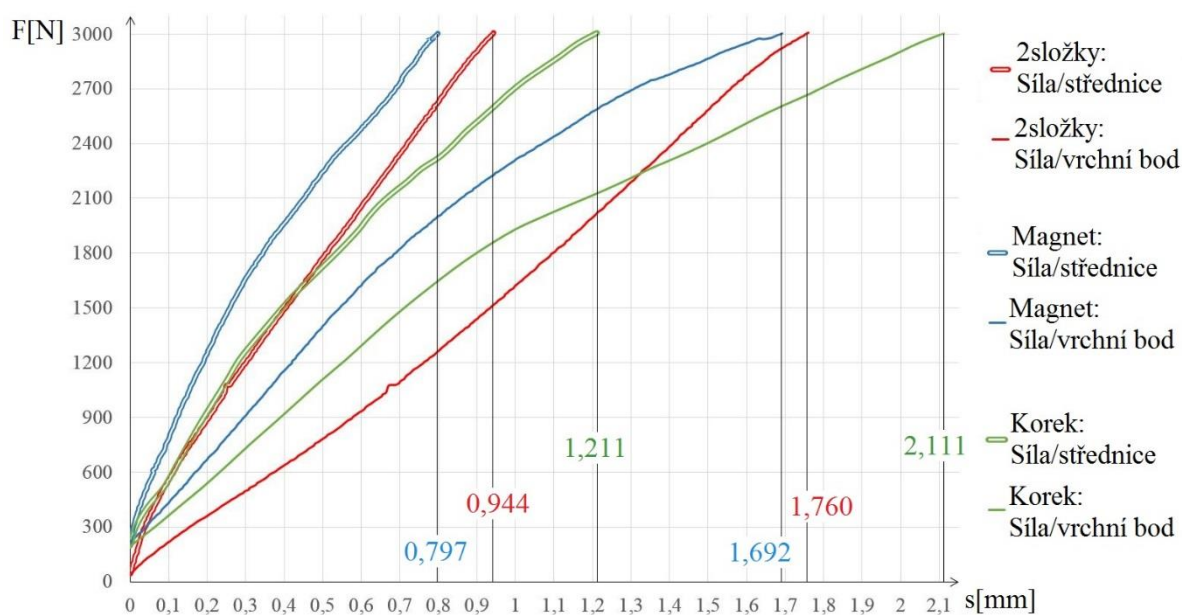
6.2.1 Vyhodnocení zkoušky ohybu kompozitních trubek

Ze získaných závislostí průhybů na zátěžné síle byly určeny průhyby střednice i vrchního bodu styku trubky s ohybníkem při zatížení o hodnotě 3000 N. Tato hodnota maximálního zatížení byla zvolena z důvodu, že hodnotu 5000 N je zkoušecí zařízení schopno dosáhnout pro tah, na což je primárně zaměřené. Při zatížení tlakem se však dosahovalo maximálních hodnot o málo vyšších než 3000 N a poté stroj začal vzorek odtěžovat. Tento fakt je zřejmý z následujícího obrázku, který ukazuje průběh zatěžující síly v čase.



Obr. 73 Graf průběhu zatěžující síly v čase

Pro hodnotu 3 kN se tedy provedlo porovnání průhybů jednotlivých trubek každého složení. Při každém vyhodnocování se kromě hodnot deformace střednice a vrchního bodu při dané hodnotě síly sledoval rovněž charakter nárůstu tohoto přetvoření v počátečním stádiu ohýbání. Vyhodnocování probíhalo pro každou trubku zvlášť, no stejným způsobem. Na následujícím grafu jsou ukázány a porovnány průběhy i charakteru nárůstu deformace pro jednu trubku od každého materiálového složení.

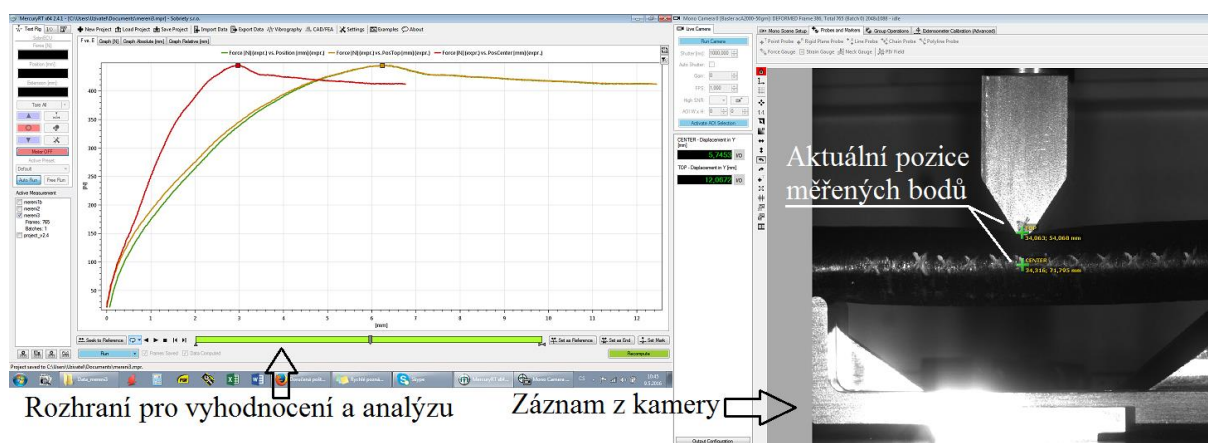


Obr. 74 Graf závislosti průhybů trubek v závislosti na rostoucí zátěžné síle

Tab. 10 Změřené hodnoty průhybů kompozitních trubek

Trubka	Průhyb	Dvoufázové		Třífázové (magnet)		Třífázové (korek)	
		střednice	vrchní bod	střednice	vrchní bod	střednice	vrchní bod
1	s [mm]	0,944	1,760	0,797	1,692	1,211	2,111
2	s [mm]	1,175	2,250	0,885	1,889	1,330	2,061
3	s [mm]	0,761	2,477	1,010	1,840	0,955	2,414
4	s [mm]	0,823	1,927	0,897	2,105	0,835	2,012
5	s [mm]	1,012	2,137	0,934	1,764	0,966	1,983
6	s [mm]	0,901	1,896	1,034	1,909	0,912	1,893

Každá ze závislostí průhybů na síle byla vytvořena v softwaru Mercury, kde se kromě tvaru finálního grafu dá sledovat záznam z kamery v kterémkoliv měřeném bodě po celý průběh procesu testování. To umožnilo v případě náhlé změny tvaru křivek v některém z okamžiků měření analyzovat záznam a vyhodnotit důvod této nepřesnosti. Jako příklad lze uvést pootočení trubky při zvyšování zatížení, nebo pozdní ustálení polohy na čelistech z důvodu nedokonalosti povrchu hlavně u korkových trubek. Náhled do rozhraní Mercury je možné vidět na obrázku 75.



Obr. 75 Náhled do rozhraní Mercury

6.3 Srovnání a rozbor výsledků provedených zkoušek

Zkoušky prováděné na kompozitních trubkách různého materiálového složení byly prováděny z důvodu posouzení vlivu přítomnosti přídatného materiálu třetího typu ve struktuře na chování při zatěžování a rovněž na tlumení vibrací a amplitudo-frekvenční charakteristiky. Primární zaměření bylo na trubky s magnetickým práškem, jelikož právě tyto budou součástí sestavy vysokootáčkového mikrokompresoru firmy Sobriety s.r.o. S ohledem na malé geometrické rozdíly jednotlivých trubek, stejně tak jako rozdíly ve struktuře v rámci jednoho materiálového složení, protože není možné zaručit úplně přesné poměry jednotlivých složek, nebylo možné vyhodnotit pouze jednu průměrnou hodnotu sledované vlastnosti. Místo toho byly porovnávány intervaly, kterým hodnoty sledované charakteristiky náležely.

6.3.1 Srovnání a rozbor výsledků zkoušky vibrací

Provedená zkouška pro zjištění tlumení vibrací kompozitních trubek umožnila vyhodnotit hodnoty poměrných útlumů jednotlivých trubek od každého složení. Z určených hodnot útlumů, jež jsou uvedeny v tabulce 8, se dá jednoznačně říct, že na schopnost kompozitu tlumit vibrace má přítomnost třetí fáze výrazný vliv. Zatímco pro dvousložkové trubky se hodnoty poměrných útlumů pohybují v rozmezí 0,119-0,130, pro trubky s třetí složkou jsou tyto hodnoty víc než dvounásobné. Znamená to, že kompozitní trubky s magnetickým i korkovým práškem mají

schopnost utlumit chvění způsobené buzením stejného charakteru i velikosti za poloviční dobu. Vliv třetí složky kompozitu je tedy v tomto ohledu velice příznivý. Předpoklad, že by kompozity s korkovým práškem měly mít nejlepší schopnost tlumit vibrace, se však nepotvrdil, jelikož hodnoty poměrných útlumů těchto trubek jsou téměř odpovídající hodnotám útlumů trubek s magnetickým práškem. Dá se tedy říct, že pro použité typy plniva není rozhodující charakter této složky, nýbrž pouze její přítomnost ve struktuře.

Dalším sledovaným parametrem byly první vlastní frekvence vyrobených dílů. Jak obrázek 69, tak i tabulka 9, kde jsou uvedeny hodnoty prvních vlastních frekvencí jednotlivých součástí, dokazuje, že trubky klasického složení z vláken a pojiva mají první vlastní frekvenci v nejnižším frekvenčním rozsahu. Trubky s korkem se ukázaly být v tomto ohledu o málo vhodnější. Velice pozitivní vliv na hodnoty první vlastní frekvence byl však dokázán pouze u magnetického prášku. Pro tyto kusy nabývaly první vlastní frekvence víc jak 6300 Hz. Jak pro dvoufázové, tak i pro trubky s korkem se tyto hodnoty pohybovaly v rozmezí hodnot přibližně dvojnásobně menších. Tento fakt je rozhodující pro reálnou aplikaci, kde se otáčky kompresoru budou pohybovat až do 300000 ot/min. První vlastní frekvence je bezpečně za touto hodnotou otáček, jelikož hodnota 6000 Hz by byla dosažena při 360000 ot/min. Jednoznačně se teda dá říct, že z hlediska vlastních frekvencí jsou trubky s magnetickým prachem ideální k aplikaci.

6.3.2 Srovnání a rozbor výsledků ohybové zkoušky

Z grafu závislosti průhybů kompozitních trubek na zatěžující síle na obrázku 74 je zřejmé, že charakter nárůstu deformace není v žádném z případů nevhodný, tzn., že v počáteční fázi zatěžování nedochází k náhlému nárůstu průhybu. Z tohoto hlediska jsou kompozitní trubky všech materiálových složení vyhovující. Především bylo důležité sledovat trubky tříslóžkové s magnetickým prachem, jelikož právě ty budou použity jako součást rotoru kompresoru.

S ohledem na hodnoty průhybů, jež jsou uvedeny v tabulce 10, se dá říct, že se průhyby žádného z typů kompozitních trubek výrazně neliší od ostatních. Průhyby střednice u dvoufázových trubek dosahovaly hodnot v rozmezí 0,901-1,761 mm, u trubek s magnetickým práškem se tyto hodnoty pohybovaly v rozmezí 0,797-1,034 a pro trubky s korkovým prachem byly tyto změřené hodnoty v intervalu 0,835-1,330. Co se týká průhybu vrchního bodu trubky, který byl v dotyku s ohybníkem, pohybují se intervaly pro dvoufázové trubky v rozmezí 1,760-2,477, pro magnetické trubky je rozmezí 1,692-2,105 a průhyby korkových trubek náleží intervalu 1,893-2,414. Se zaměřením na trubky magnetické se dá říct, že interval jejich změřených průhybů střednice i vrchního měřeného bodu leží v nejnižších hodnotách. Provedení a vyhodnocení testu ukázalo, že přídatný materiál třetího typu nemá výrazný vliv na velikost deformace při zatěžování ohybem.

7 ZÁVĚRY

Na základě specifikací kompozitních trubek pro výrobu technologií navíjení bylo navrženo a sestaveno výrobní zařízení FWMS180 včetně dalších přídavných zařízení potřebných pro úspěšnou výrobu kompozitních trubek dvoufázového i třífázového složení. Technologie plnění kompozitních trubek přídavným materiálem třetího typu na tomto zařízení byla podrobně popsána a aplikována při výrobě kompozitů s plnivý charakteru magnetického a korkového prášku. Rovněž byl detailně popsán a rozebrán komplexní technologický postup výroby kompozitních trubek včetně použitých nástrojů a zařízení, dle kterého byly vyrobeny díly trojího materiálového složení určené pro testování.

Na vyrobených kompozitních součástech byly provedeny zkoušky pro zjištění chování při zatížení tříbodovým ohybem stejně tak jako pro určení schopnosti těchto materiálů tlumit vibrace a stanovení hodnot prvních vlastních frekvencí. Z analýzy a porovnání zjištěných charakteristik jednotlivých typů součástí různých materiálových složení byl posouzen vliv přídavného materiálu na vlastnosti kompozitních trubek. Dále byla posouzena vhodnost trubek s magnetickým práškem pro aplikaci v mikrokompresoru.

Z hlediska pevnosti materiálu při namáhání tříbodovým ohybem se hodnoty průhybů pro každý typ trubek pohybovaly v přibližně stejném intervalu hodnot. Charaktery nárůstů průhybů byly pro jednotlivé typy materiálů rovněž stejné a navíc vyhovující, jelikož v počáteční fázi zatěžování nedocházelo k jejich prudkému nárůstu. Z vyhodnocení zkoušky tříbodovým ohybem také vyplývá, že kompozitní trubky s magnetickým práškem jsou pro uvažovanou aplikaci vhodné.

Pro zjištění schopnosti trubek tlumit vibrace a určení jejich prvních vlastních frekvencí byla provedena zkouška pomocí rázového kladívka a piezoelektrického akcelerometru. Určením hodnot poměrných útlumů bylo zjištěno, že trubky s přídavným materiálem obojího charakteru jsou schopny vzniklé chvění tlumit dvakrát lépe než trubky dvoufázové. Částečná modální analýza prokázala podobnost hodnot prvních vlastních frekvencí u dvousložkových trubek a trubek s korkovým prachem. Navíc ze stanovených vlastních frekvencí magnetických trubek plyne, že leží v rozmezí hodnot dvakrát vyšších. Tento fakt prokazuje vhodnost a zaručuje bezpečnost použití tohoto typu trubek v mikrokompresoru.

Prokázalo se, že přítomnost přídavného materiálu v kompozitních trubkách nemá vliv na ohybovou pevnost, výrazně však zlepšuje schopnost těchto materiálů tlumit vibrace bez ohledu na druh plniva. Charakter přídavného materiálu má však výrazný vliv na posun hodnot vlastních frekvencí kompozitních trubek. Zatímco korkový prach posunul vlastní frekvence trubek minimálně, magnetický prášek zapříčinil nárůst těchto hodnot dvounásobně. Je tedy zřejmé, že přídavný materiál třetího typu kompozity ovlivňuje, záleží však na jeho charakteru a sledované vlastnosti.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [6]

1. BAUMAN, Milan. Kompozity s bioplňivý - Úspěšné řešení z České republiky. In: *TACR* [online]. [cit. 2016-05-19]. Dostupné z: <https://www.tacr.cz/index.php/cz/zajimave-projekty/384-kompozity-s-bioplňivý-uspesne-reseni-cr.html>
2. BOUCHAL, Petr. *Technologie výroby a zpracování uhlíkových kompozitů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 41s. Vedoucí bakalářská práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
3. CANTWELL, Wesley. *Composite Materials* [online]. Liverpool: University of Liverpool, 2011 [cit. 2016-03-06]. Dostupné z: <https://www.flickr.com/photos/core-materials/5904500223>
4. *Citace pro* [online]. 2012 [cit. 2016-02-22]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/>
5. DAĐOUREK, Karel. *Kompozitní materiály, definice a rozdělení* [online]. Liberec, 2008 [cit. 2016-02-22]. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/KM/Kompozity%20Dad/02defroz.pdf
6. Graco products for composites. *Composites* [online]. 2009 [cit. 2016-02-22]. Dostupné z: <http://www.graco.com/content/dam/graco/corporate/images/Industries/composite.tif.png>
7. Item Industrietechnik. *Item Building Kit Systems for industrial Applications* [online]. Mokrý Lazec: Haberkorn Ulmer s.r.o., 2012 [cit. 2016-05-19]. Dostupné z: <http://www.item24.com/>
8. KOŘÍNEK, Zdeněk. *Kompozity: Technologie* [online]. 2008 [cit. 2016-03-06]. Dostupné z: <http://mujweb.cz/zkorinek/technologie.pdf>
9. MACHÁŇ, L. *Využití elektrických vlastností kompozitních materiálů s modifikovanou cementovou maticí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 144 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.
10. MALLICK, P.K. a S. NEWMAN. *Composite Materials Technology*. 3rd ed. München: Hanser publishers, 1990. ISBN 3-446-15684-4.
11. MÍŠEK, Bohumil. *Kompozity*. 2. vyd. Brno: Tesydo, 2013. ISBN 80-903386-0-7.
12. MORAVEC, Richard. Všeobecný a základní popis materiálů používaných při výrobě kompozitů. *Havel Composites* [online]. Práslavice, 1989 [cit. 2016-02-29]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/74-Vseobecny-a-zakladni-popis-materialu-pouzivanych-pri-vyrobe-kompozitu.html>
13. NUPLEX INDUSTRIES LTD. *Composites: Processes* [online]. Coomera, 2014 [cit. 2016-03-06]. Dostupné z: <http://www.nuplex.com/composites/processes>
14. OTIEPKOVÁ, Hana. *Kompozitné materiály plnené skelným prachom*. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav fyziky a mater. inženýrství. Vedoucí práce Juříčka, Martin.
15. PACÁK, Aleš, Klára MATOUŠKOVÁ, Ladislav TAJČ, Jiří LINHART a . Poměrný útlum jednoduchého tělesa v proudu vzduchu. *Colloquium Fluid Dynamics* [online]. 2007, , 1-9 [cit. 2016-05-19]. Dostupné z: <http://www.it.cas.cz/files/fluid-dynamics-2007/069-Pacak-PT.pdf>
16. ROSICKÝ, Jiří a Josef KLEMENT. ING CORPORATION, SPOL. S R.O. Úvod do problematiky kompozitních materiálů [online]. Praha, 1999 [cit. 2016-02-29]. Dostupné z: <http://www.ortotikaprotetika.cz/oldweb/Wc4a791405f74c.htm#top>
17. RŮŽIČKA, Milan. *Návrh a analýza kompozitních konstrukcí: Úvod do kompozitních konstrukcí a inteligentních konstrukčních struktur* [online]. 2007 [cit. 2016-02-22]. Dostupné z: http://www.kompozity.info/seminar/2_seminar/smart_uvod.pdf
18. SAECHTLING, H. *International plastics handbook*. 3rd ed. München: Hanser Publishers, 1995. ISBN 34-461817-2-5.
19. *Sobriety s.r.o.* [online]. Brno, 2001 [cit. 2016-02-29]. Dostupné z: <http://sobriety.cz/>

20. STRÁDAL, Milan. *Porovnání dvou přístupů k určení celkové odezvy kompozitů s viskoelastickou maticí*. Praha, 2011. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Vedoucí práce Doc. Ing. Jan Zeman, Ph.D.
21. VÍTEK, Michal. *Metody měření a vyhodnocování vibrací pohonných jednotek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2013.
22. VNOUČEK, Milan. *Kompozitní materiály* [online]. 2008 [cit. 2016-02-22]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/download/kompozity09_10.pdf
23. VRBKA, Jan. *Mechanika kompozitů* [online]. Brno, 2008 [cit. 2016-03-06]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=83340

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
A	Tažnost	[%]
b_t	Poměrný útlum	[-]
D_{out}	Vnější průměr trubky	[mm]
d	Průměr vlákna	[mm]
d_{in}	Vnitřní průměr trubky	[mm]
E_{Al}	Modul pružnosti hliníku	[N.mm ²]
E_{cL}	Podélný modul pružnosti kompozitu	[GPa]
E_{cT}	Příčný modul pružnosti kompozitu	[GPa]
E_f	Modul pružnosti vlákna	[GPa]
E_m	Modul pružnosti matrice	[GPa]
F_c	Síla působící na kompozit	[N]
F_f	Síla působící na vlákna	[N]
F_{ge}	Tíhová síla extrudéru	[N]
F_{gm}	Tíhová síla motoru	[N]
F_{gv}	Tíhová síla vozíku	[N]
F_m	Síla působící na matrici	[N]
f	Průhyb nosného profilu	[mm]
f_v	Vlastní frekvence	[Hz]
G_{Al}	Modul pružnosti ve smyku hliníku	[N.mm ⁻²]
g	Gravitační zrychlení	[m.s ⁻²]
HW	Hardware	
$I_{20 \times 20}$	Plošný moment setrvačnosti profilu 20x20	[cm ⁴]
$I_{40 \times 80}$	Plošný moment setrvačnosti profilu 40x80	[cm ⁴]
I_t	Moment tuhosti v krutu profilu 20x20	[cm ⁴]
L	Rameno působící síly	[mm]
l	Délka trubky	[mm]
M_c	Celková hmotnost kompozitu	[kg]
M_f	Hmotnost vláken	[kg]
M_{km}	Krouticí moment motoru	[N.m]
M_m	Hmotnost matrice	[kg]
m	Hmotnost trubky	[kg]
m_{emax}	Maximální hmotnost extrudéru	[kg]
m_f	Hmotnostní podíl vláken	[-]
m_m	Hmotnostní podíl matrice	[-]
m_{vmax}	Maximální hmotnost vozíku	[kg]
n	Počet vzorků	[-]
PSW	Pin Supported Winding	
RTM	Resin Transfer Molding	
SW	Software	
s	Průhyb kompozitní trubky	[mm]
T	Perioda kmitání	[s]
t	Čas průběhu	[s]
t_c	Tloušťka vrstvy vlákna s matricí	[mm]
t_f	Tloušťka vlákna	[mm]
t_m	Tloušťka matrice	[mm]
V_c	Celkový objem kompozitu	[m ³]
V_f	Objem vláken	[m ³]
V_m	Objem matrice	[m ³]

V_f	Objemový podíl vláken	[-]
V_m	Objemový podíl matrice	[-]
δ	Logaritmický dekrement útlumu	[-]
Δt_c	Protažení kompozitu	[mm]
Δt_f	Protažení vlákna	[mm]
Δt_m	Protažení matrice	[mm]
ε_c	Poměrné přetvoření vrstvy vlákna s matricí	[-]
ε_{cL}	Poměrné podélné přetvoření vrstvy vlákna s matricí	[-]
ε_f	Poměrné přetvoření vlákna	[-]
ε_{fL}	Poměrné podélné přetvoření vlákna	[-]
ε_m	Poměrné přetvoření matrice	[-]
ε_{mL}	Poměrné podélné přetvoření matrice	[-]
ε_T	Poměrné příčné přetvoření kompozitu	[-]
ϑ	Zkroucení nosného profilu	[°]
ρ	Hustota	[kg.m ⁻³]
ρ_c	Hustota kompozitu	[kg.m ⁻³]
ρ_f	Hustota vláken	[kg.m ⁻³]
ρ_m	Hustota matrice	[kg.m ⁻³]
σ_c	Napětí v kompozitu	[MPa]
σ_{cL}	Podélné napětí v kompozitu	[MPa]
σ_f	Napětí ve vláknech	[MPa]
σ_{fL}	Podélné napětí ve vláknech	[MPa]
σ_m	Napětí v matrici	[MPa]
σ_{mL}	Podélné napětí v matrici	[MPa]
σ_{Pt}	Pevnost v tahu	[MPa]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 3 Příklady kompozitních součástí	9
Obr. 4 Srovnání specifických hodnot tahových pevností běžných konstrukčních materiálů s kompozitními materiály	10
Obr. 3 Pevnost v tahu znázorněna v polárním diagramu	11
Obr. 4 Synergický efekt	11
Obr. 5 Struktura částicového a skeletového kompozitu	12
Obr. 6 Typy vláknových kompozitů	13
Obr. 7 Únavové chování kompozitů	13
Obr. 8 Schéma ručního kladení	15
Obr. 9 Schéma vakuového zpracování	15
Obr. 10 Schéma autoklávu	15
Obr. 11 Schéma metody RTM	16
Obr. 12 Proces pultruze	16
Obr. 13 Metoda lisování v přípravku	17
Obr. 14 Schématické zobrazení navíjení kompozitů	17
Obr. 15 Šroubovicový návin	18
Obr. 16 Pólový návin	18
Obr. 17 Spirálový návin	19
Obr. 18 Trn pro axiální návin	19
Obr. 19 Geometrické specifikace vyráběných trubek	20
Obr. 20 Specifikace technologických přísad	20
Obr. 21 Schéma navíjecí sestavy pro testovací trny	21
Obr. 22 Výsledná struktura vláken v trubkách po skončení navíjení	21
Obr. 23 Geometrický model dlouhovláknového kompozitu	22
Obr. 24 Rovinný geometrický model kompozitu	23
Obr. 25 Geometrický model v příčném řezu	24
Obr. 26 Typický průběh tahového diagramu kompozitního materiálu	25
Obr. 27 Tahový diagram nevhodně navrženého kompozitu	26
Obr. 28 Závislost pevnosti kompozitu na objemovém podílu vláken	26
Obr. 29 Závislost modulu pružnosti na objemovém podílu vláken	28
Obr. 30 Schéma šnekového extrudéru	29
Obr. 31 Schéma plnění kompozitu třetí fází	30
Obr. 32 Zjednodušená výsledná struktura tříslůžkové kompozitní trubky	30
Obr. 33 Základní tvar profilů ítem	31
Obr. 34 Koncept výrobního zařízení FWMS180	31
Obr. 35 Zobrazení působení maximální tíhové síly od vozíku	32
Obr. 36 Schéma průhybu	32
Obr. 37 Průhyb nosných profilů extrudéru	33
Obr. 38 Zobrazení momentu a tíhové síly motoru	33
Obr. 39 Rychloupínací koník	34
Obr. 40 Model prosycovacího zařízení a stojanu pro cívky	35
Obr. 41 Stojan pro trny vkládaný do pece a vytvrzovací pec	36
Obr. 42 Vytahovací zařízení	36
Obr. 43 Korkové pláty (C), korkový prach (A) a magnetický prach (B)	37
Obr. 44 Stojan cívek	38
Obr. 45 Srovnání kvalitní a nekvalitní cívky	38
Obr. 46 Vláknové vedené prosycovací zařízení	39
Obr. 47 Přivedení vlákna k trnu	39
Obr. 48 Přípravky s jehlami	39

Obr. 49 Upnutí trnu do stroje	40
Obr. 50 Srovnání směsi plniva a pojiva	40
Obr. 51 Uchycení vlákna k trnu	41
Obr. 52 Náhled do softwaru FWC	41
Obr. 53 Počátek navíjecího procesu (šroubovicový návín)	42
Obr. 54 Oříznutý návín se strhávací páskou	42
Obr. 55 Funkční část kompozitu na trnu	43
Obr. 56 Odpad z navíjení	43
Obr. 57 Vzorek ztuhnutý staticky bez rotace	44
Obr. 58 Tuhnutí návínů na vzduchu	44
Obr. 59 Kompozity vytvrzené na vzduchu	45
Obr. 60 Náhled do softwaru HCC	45
Obr. 61 Vytvrzovací pec s vloženými kompozity	46
Obr. 62 Vytahovací zařízení	46
Obr. 63 Stažené trubky	47
Obr. 64 Porovnání kvality čelní plochy	47
Obr. 65 Vizuální rozdíly mezi jednotlivými typy trubek	48
Obr. 66 Příslušenství k měření vibrací	49
Obr. 67 Porovnání odezvy vhodné a nevhodné pro vyhodnocení	50
Obr. 68 Zobrazení amplitud pro jeden výpočet	50
Obr. 69 První vlastní frekvence jednotlivých materiálových složení	52
Obr. 70 DOLI UTM 05	52
Obr. 71 Ukázka vhodného a nevhodného průběhu deformace v počátku zatěžování	53
Obr. 72 Ukázka seřazeného vybavení připraveného pro ohybovou zkoušku	53
Obr. 73 Graf průběhu zatěžující síly v čase	54
Obr. 74 Graf závislosti průhybů trubek v závislosti na rostoucí zátěžné síle	54
Obr. 75 Náhled do rozhraní Mercury	55

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Mechanické vlastnosti vybraných vláken	13
Tab. 2 Mechanické vlastnosti vybraných reaktoplastů	14
Tab. 3 Výrobní postupy kompozitních materiálů	14
Tab. 4 Naměřené hodnoty vyrobených trubek	26
Tab. 5 Vypočtené hodnoty nutné k určení modulů pružnosti	27
Tab. 6 Postup technologie výroby tříslžkových kompozitních trubek.....	37
Tab. 7 Vypočtené hodnoty poměrných útlumů první trubky	51
Tab. 8 Vypočtené hodnoty poměrných útlumů pro všechny trubky všech typů.....	51
Tab. 9 Zjištěné hodnoty vlastních frekvencí kompozitních trubek	52
Tab. 10 Změřené hodnoty průhybů kompozitních trubek	55

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Nomogram pro stanovení průhybu profilů item konstrukční řady 5
Příloha 2 Nomogram pro stanovení zkroucení profilů item konstrukční řady 5
Příloha 3 Nomogram pro stanovení průhybu profilů item konstrukční řady 8

SEZNAM VÝKRESŮ

- | | |
|---|-----------------|
| Výkres sestavy výrobního zařízení FWMS180 | DP-01-133392-16 |
| Výkres sestavy extrudéru | DP-02-133392-16 |
| Výkres sestavy koníku s otočným hrotem | DP-03-133392-16 |
| Výkres sestavy prosycovacího zařízení | DP-04-133392-16 |