



Technologie navíjení uhlíkových kompozitů pro vůz Formula Student

Bakalářská práce

Studijní program: B2301 – Strojní inženýrství

Studijní obor: 2301R000 – Strojní inženýrství

Autor práce: **Martin Severýn**

Vedoucí práce: Ing. Luboš Běhálek, Ph.D.





Zadání bakalářské práce

Technologie navíjení uhlíkových kompozitů pro vůz Formula Student

Jméno a příjmení: **Martin Severýn**
Osobní číslo: S15000170
Studijní program: B2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojní inženýrství
Zadávací katedra: Katedra strojírenské technologie
Akademický rok: **2018/2019**

Zásady pro vypracování:

1. Zpracování literární rešerše na téma polymerní kompozity a technologie jejich výroby se zaměřením na navíjení kompozitních vláken.
2. Výběr vhodného dílu, návrh technologického procesu výroby.
3. Výroba kompozitních dílů, ověření funkčních vlastností a pevnostních charakteristik.
4. Zhodnocení dosažených výsledků, závěr.

Rozsah grafických prací: tabulky, grafy
Rozsah pracovní zprávy: cca 30 stran
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická



Seznam odborné literatury:

- [1] STRONG, A. Brent. *Fundamentals of Composites Manufacturing- Materials, Methods and Applications*. 2nd edition. Dearborn: Society of Manufacturing Engineers (SME), 2008, 640 pp. ISBN 978-0-87263-854-9.
- [2] ASTRÖM, B. Thomas. *Manufacturing of Polymer Composites*. Repr. Cheltenham: Nelson Thornes, 2002. ISBN 0-7487-7076-3.
- [3] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů: klasická a speciální*. 1. vyd. Brno: VUT v Brně, 2003, 194 s. ISBN 80-214-2443-5.
- [4] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-296.

Vedoucí práce: Ing. Luboš Běhálek, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání práce: 31. října 2018

Předpokládaný termín odevzdání: 30. dubna 2020

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

V Liberci 1. listopadu 2018



doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

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

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

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že texty tištěné verze práce a elektronické verze práce vložené do IS STAG se shodují.

19. 6. 2019

Martin Severýn



Anotace

Bakalářská práce se zabývá návrhem technologického procesu výroby kompozitní součásti pro vůz Formula Student. Kompozitní díl je vyroben technologií navíjení uhlíkových vláken. Teoretická část je zaměřena na kompozitní materiály a technologie jejich výroby, především ve vztahu k technologii navíjení. Dále je uvedena problematika některých parametrů, které jsou pro proces výroby navíjením důležité. V praktické části je uveden postup při návrhu součásti pomocí numerické simulace a její výrobě včetně ověření mechanických vlastností dílu. K diskusi ve zhodnocení technologie výroby a ověření vlastností kompozitního dílu bylo využito počítačové tomografie (CT) a elektronové mikroskopie. Ověření požadovaných mechanických vlastností bylo provedeno statickou zkouškou krutem. V závěru práce jsou uvedeny návrhy na zlepšení výrobního procesu.

Klíčová slova: uhlíková vlákna, epoxidová matrice, polymerní kompozity, technologie navíjení, kompozitní hřídel řízení vozu, Formula Student

Annotation

This bachelor thesis deals with the design of the technological process of manufacturing a composite component for the Formula Student car. The composite is made with carbon fiber winding technology. The theoretical part is focused on composite materials and technologies of their fabrication with focus on carbon fiber winding. Some of the parameters that are important for the winding process are presented below. Procedure for design by means FEM and fabrication of a composite part including verification of mechanical properties are described in the practical part of this thesis. Computed tomography (CT) and scanning electron microscope (SEM) were used to examine the technological process and properties of the composite. The required mechanical properties were verified by a static torsion test. At the end of the thesis are specified suggestions for improvement of this manufacturing process.

Keywords: carbon fiber, epoxy matrix, polymer composites, winding technology, composite steering shaft, Formula Student

Poděkování

Při této příležitosti bych rád poděkoval především vedoucímu mojí bakalářské práce Ing. Luboši Běhálkovi, Ph.D. za jeho trpělivost, velkou ochotu, cenné poznámky a odborné rady. Můj dík patří také doc. Ing. Pavlu Solfronkovi, Ph.D. za realizaci zkoušek mechanických vlastností, Ing. Aleši Lufínkovi, Ph.D. za pomoc při měření a také Ing. et Bc. Jiřímu Sobotkovi, Ph.D. za ochotu při zkoumání pomocí výpočetní tomografie.

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů.....	9
1 Úvod.....	11
1.1 Cíle bakalářské práce	12
2 Teoretická část	13
2.1 Polymerní kompozity	13
2.2 Vláknitá výztuž	15
2.2.1 Skelná vlákna.....	16
2.2.2 Aramidová vlákna.....	17
2.2.3 Uhlíková vlákna.....	17
2.2.4 Přírodní vlákna.....	20
Kovová vlákna	21
2.2.5 Whiskery	21
2.3 Polymerní matrice	22
2.4 Technologie výroby uhlíkových kompozitů	24
2.4.1 Ruční laminace	24
2.4.2 Lisování pomocí vakua.....	24
2.4.3 Injekční vstřikování	26
2.4.4 Infuze	26
2.4.5 Lisování v autoklávu.....	27
2.4.6 Navíjení.....	28
3 Experimentální část.....	31
3.1 Výběr vhodné součásti závodního vozu.....	31
3.2 Návrh technologie procesu výroby	32
3.3 Příprava výroby.....	32
3.3.1 Navíjecí zařízení	32
3.3.2 Navíjecí trn	34
3.3.3 Temperační pec.....	34
3.3.4 Vytlačovací přípravek.....	34
3.3.5 Měření a regulace předepínací síly	35
3.4 Výroba kompozitních vzorků a specifikace návinu	36
3.5 Analýza vnitřní struktury a homogenity kompozitních vzorků	38
3.6 Statická zkouška krutem	40

3.7	Finální návrh součásti	45
3.8	Výroba a zatěžování spojovací hřídele řízení	48
3.8.1	Navíjení.....	49
3.8.2	Statická zkouška krutem	49
3.8.3	Lepený spoj.....	49
4	Zhodnocení dosažených výsledků	52
5	Závěr	56
	Seznam použité literatury	57
	Seznam příloh	59

Seznam použitých zkratek a symbolů

<i>symbol / zkratka</i>	<i>jednotka</i>	<i>význam</i>
E	[GPa]	modul pružnosti v tahu
F	[N]	předepínací síla
G_{12}	[MPa]	modul pružnosti ve smyku laminátu
G	[MPa]	modul pružnosti ve smyku materiálu
J_P	[m ⁴]	polární kvadratický moment průřezu
M_k	[N.m]	krouticí moment
M_T	[N.m]	moment přenášený lepeným spojem
V_f	[cm ³]	objem vláken v kompozitu
V_C	[cm ³]	objem celého kompozitu
d	[mm]	průměr hřídele
k	[-]	součinitel bezpečnosti
l	[mm]	délka součásti
l_t	[mm]	délka lepeného spoje
r	[mm]	vnitřní poloměr kompozitní trubky
t	[s]	čas
t_L	[mm]	tloušťka vrstvy laminátu
t_s	[mm]	tloušťka stěny trubky
η	[Pa.s]	dynamická viskozita
ϑ_f	[%]	objemový podíl výztuže v kompozitu
τ_S	[MPa]	střední smykové napětí
τ_m	[MPa]	mezní hodnota smykového napětí lepidla
φ	[°]	relativní natočení krajních průřezů
φ_{MAX}	[°]	maximální relativní natočení krajních průřezů

*zkratka**význam*

ACP	ANSYS Composite PrepPost
AF	aramidová vlákna
CF	uhlíková vlákna
CT	počítačová tomografie
EP	epoxidová pryskyřice
FW	filament winding
GF	skelná vlákna
HM	vysokomodulová vlákna
HS	vysokopevnostní vlákna
IM	středněmodulová vlákna
MDF	dřevovláknité desky
MF	kovová vlákna
NF	přírodní vlákna
PA 66	polyamid 66
PAN	polyakrylonitril
PC	polykarbonát
PEEK	polyetheretherketon
PES	polyethersulfon
PP	polypropylen
RT	resin transfer moulding
SEM	rastrovací elektronový mikroskop
SMC	sheet moulding compound
UHM	ultravysokomodulová vlákna

1 Úvod

Kompozitní materiály jsou pro své mechanické vlastnosti a nízkou hmotnost stále častěji uplatňovány v moderním strojírenství. Jejich uplatnění však nabývá na významu napříč nejrůznějšími odvětvími průmyslu. Využití nachází v dopravě (především v letectví) a dále se uplatňují v kosmonautice, pozemní i lodní dopravě, při výrobě sportovního náčiní (hokejových holí, tenisových raket, lyží, apod.) a také pro náročné aplikace ve strojírenství (vřetena obráběcích strojů, vysoce namáhané konstrukce, apod.). Pro výrobu kompozitů se rozvíjí celá řada perspektivních technologií. Jedná se např. o SMC (sheet moulding compound), RTM (resin transfer moulding) a FW (filament winding) technologii [1, 2].

Z hlediska mechanických vlastností vystupují do popředí především kompozity na bázi uhlíkových vláken a polymerní matrice - epoxidové, případně nenasycené polyesterové pryskyřice. Uhlík je základní stavební kámen všech organických látek na Zemi. Vyskytuje se v různých formách a strukturách, které vynikají různými mechanickými a fyzikálními vlastnostmi [1, 2].

V této práci bude věnována pozornost kompozitům na bázi uhlíkových vláken a epoxidové matrice zhotovené technologií navíjení. Z tohoto důvodu budou dále v teoretické části práce rozebírány především kompozity s vláknitou výztuží.

Technologie výroby navíjených kompozitů je velmi úzce spjata s volbou vhodného navíjecího zařízení. Podle různých kritérií (metody navíjení, velikosti a tvaru výsledného výrobku apod.) je nutné posoudit vhodnost použití rozdílných typů strojů. Jedná se o jednoduchá zařízení soustruhového typu, která se hodí k navíjení jednoduchých tvarů (trubek a jiných profilů), až po roboty typu KUKA, používané pro složitější konstrukce a tlakové nádoby [3]. Technologie výroby navíjených kompozitů skýtá mnoho parametrů, kterým je třeba věnovat zvláštní pozornost. Tyto parametry mají dopad na konečné mechanické vlastnosti výsledného kompozitního dílu. Jedním z těchto parametrů je například předpětí navíjeného vlákna. Dle studie MERTYNI a EILLYIN bylo při větším předpětí vlákna dosaženo lepších mechanických vlastností. Při namáhání kompozitního dílu nese zatížení pouze 30 % vláknité výztuže. Zbytek se na přenosu zatížení nepodílí. Předpětí vlákna tak zvyšuje počet vláken podílejících se na přenosu zatížení [4].

1.1 Cíle bakalářské práce

Prvním cílem této bakalářské práce je výběr vhodné součásti závodního vozu týmu FS TUL Racing (viz obr. 1.1) pro výrobu kompozitu technologií navíjení uhlíkových vláken s cílem snížení její hmotnosti. Dalšími cíly je návrh vybrané součásti pomocí numerické simulace prostřednictvím softwaru ANSYS, návrh technologického procesu výroby a samotná výroba kompozitního dílu. Posledním cílem je ověření vlivu předpětí vláken na relevantní mechanické vlastnosti dílu a porovnání s výsledky numerické simulace.



Obr. 1.1: Závodní vůz Markéta týmu FS TUL Racing, který se účastní studentské soutěže Formula SAE [foto Dominika Čadková]

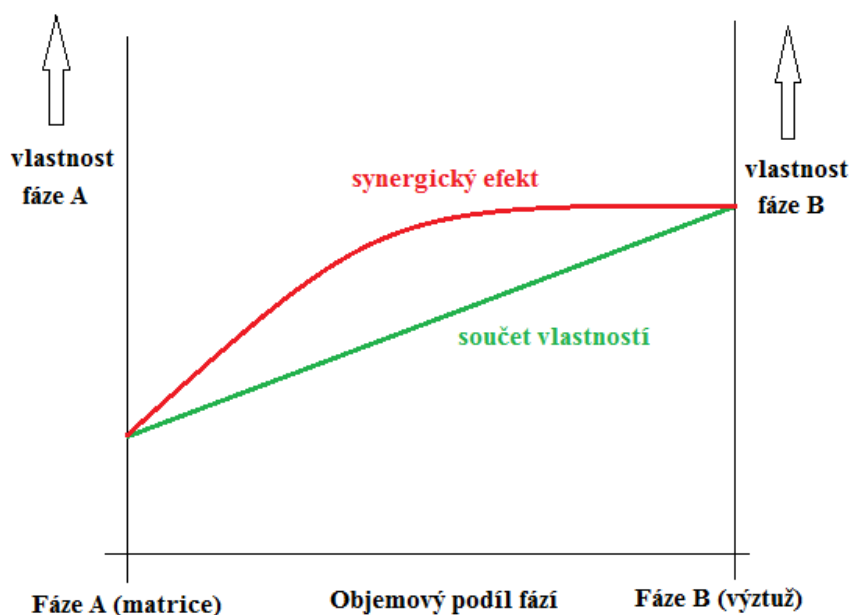
2 Teoretická část

2.1 Polymerní kompozity

Polymerem rozumíme převážně organickou látku, přírodního nebo syntetického původu, složenou z makromolekul. Základními jednotkami pro výrobu polymerů jsou monomery - organické sloučeniny, které se získávají převážně z ropných frakcí a zemního plynu (ethylen, propylen, styren, vinylchlorid apod.). Syntéza polymerů probíhá polyreakcemi (polymerací, polykondenzací nebo polyadící) za předpokladu, že výchozí monomer má reaktivní skupiny a má schopnost vytvářet chemické vazby s okolními skupinami [5].

Kompozitem se rozumí materiál, který se skládá ze dvou nebo více fází s odlišnými fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Výsledný kompozitní materiál má v porovnání s jednotlivými komponenty výrazně odlišné a unikátní vlastnosti, které nedosahuje žádná z jeho složek samostatně. Jedná se tedy o *synergický efekt*, viz obr. 2.1. Fáze se vzájemně úplně nerozpouštějí, ani neslučují, působí však v součinnosti. Každá fáze může být fyzikálně identifikována a nachází se mezi nimi rozhraní [6].

Fáze, ze kterých se kompozit skládá, jsou obecně rozděleny na *disperze* (výztuž) a *matrice*. Výztuž, nespojitá fáze, by měla být v kompozitu rozptýlena rovnoměrně. Výztuž přenáší zatížení a dodává kompozitu tuhost, viz kapitola 2. 2. Matrice je spojitá fáze, která drží kompozit pohromadě, viz kapitola 2.3 [6].



Obr. 2.1: Vizualizace synergického efektu [19]

Významnou odlišností kompozitů od běžných konstrukčních materiálů je symetrie jejich fyzikálních vlastností. Tato skutečnost má zásadní vliv na mechanické vlastnosti kompozitních systémů, především vláknových kompozitů. Na základě této symetrie struktury lze rozlišit několik druhů materiálů:

- izotropní,
- ortotropní,
- anizotropní,
- kvaziizotropní,
- příčně izotropní.

Izotropní materiál se vyznačuje nezávislostí materiálových vlastností na směru. *Ortotropní* materiál má tři vzájemně kolmé roviny symetrie materiálových vlastností, které jsou od sebe odlišné. *Anizotropním* materiálem je materiál, jehož vlastnosti neprojevují existenci rovin symetrie a v každém směru tak má zcela odlišné vlastnosti. *Kvaziizotropní* materiál má shodné vlastnosti ve směru tří rovin, které jsou tvořeny třemi kolmými osami. *Příčně izotropní* materiál má izotropní vlastnosti v určité rovině. Dále má symetrické vlastnosti podle této roviny a dvou rovin na ni i na sebe vzájemně kolmých [6]. O míře anizotropie nebo izotropie rozhoduje směrová orientace výztuže. Orientace výztuže tedy nepochybně ovlivňuje mechanické vlastnosti [7].

Pro mechaniku vláknových kompozitů je velice důležitým parametrem objemový podíl obsahu výztuže v kompozitu. Pro jeho výpočet platí vztah (2.1):

$$\vartheta_f = \frac{V_f}{V_c}, \quad (2.1)$$

kde ϑ_f je objemový podíl výztuže v kompozitu, V_f je objem vláken a V_c znamená objem celého kompozitu. Tento poměr je nezbytný pro zkoumání vlastností různých kompozitů. Zkoumanými vlastnostmi může být vliv směrové orientace výztuže, adheze, typ vláken apod. [7]

Mechanické vlastnosti kompozitů může výrazně poznamenat vznik vzduchových bublin a dutin. K tomu dochází v průběhu jejich výroby ve fázi sycení výztuže maticí. Obsah bublin výrazně ovlivňuje smykovou a tlakovou pevnost, únavu materiálu a další vlastnosti. Rovněž mezifázové rozhraní mezi povrhem výztuže a maticí i adheze je důležitým faktorem ovlivňující konečné vlastnosti kompozitu. Přičemž mezifáze může být

řízená, kdy výztuž je cíleně povrchově upravena tak, aby se zlepšilo její smáčení (apretací, plazmaticky apod.) nebo neřízená, kdy je pro kompozitní systém použita povrchově neupravená výztuž zpravidla s velmi špatnou adhezí [7].

2.2 Vláknitá výztuž

Materiál ve formě vlákna má mnohonásobně vyšší pevnost než stejný materiál v kompaktní formě. Čím je vlákno tenčí, tím je jeho pevnost vyšší. (A. A. Griffith) [8]

V praxi se nejčastěji setkáváme s vlákny o průměru cca 14 μm . Menší průměr vláken by měl nepříznivý dopad na lidský organismus, neboť tenčí vlákna snadno proniknou do plic, kde působí jako karcinogen. Vlákna o větším průměru mají vyšší tuhost ve vzpěru při zatížení tlakem [8].

Vláknitou výztuž lze rozdělit na:

- krátká vlákna,
- roving,
- rohože a tkaniny.

Krátká vlákna, která se svými rozměry pohybují v rozmezí (0,2 - 5) mm se nejčastěji používají jako plnivo do termoplastů.

Roving je pramenec nekonečných vláken, který je bez zkroucení navinut na cívku, viz obr. 2.2. Počet elementárních vláken se pohybuje od 1000 až 24 000. Využívá se na výrobu tkanin, popřípadě se seká nebo navíjí [8].



Obr. 2.2: Uhlíkový roving [zdroj vlastní]

Tkaniny a rohože jsou známy jako standardní vláknitá výztuž pro výrobu laminátů, tedy materiálu se střídáním vrstev kompozitu s různými vzájemnými orientacemi výztuže. Tkaniny mohou mít několik druhů vazeb. Nejčastěji je to vazba keprová a plátnová. Rohože se zhotovují ze sekaných pramenců nebo náhodně uspořádaných kontinuálních vláken [8]. Tkaniny a rohože zachycuje obr. 2.3.



Obr. 2.3: Keprová vazba uhlíkové tkaniny (vlevo), vazba plátno uhlíkové tkaniny (uprostřed), skelná rohož (vpravo) [zdroj vlastní]

Dalšími formami vláknité výztuže jsou *jednosměrné pásy*, *úplety* nebo *trojrozměrné tkaniny*, *pleteniny* [8].

Základní druhy vláknité výztuže lze podle materiálu charakterizovat následovně:

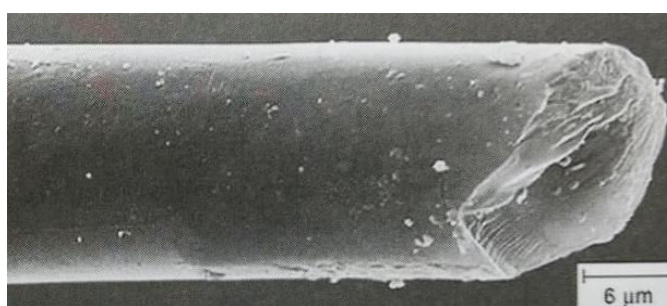
- skelné,
- aramidové,
- uhlíkové,
- přírodní,
- kovové,
- whiskery [6, 7].

2.2.1 Skelná vlákna

Skelná vlákna (GF - Glass Fiber) se jako vláknová výztuž používají nejčastěji. Jejich průměr se pohybuje v rozmezí (12-15) μm , viz obr. 2.4. Modul pružnosti v tahu skelných vláken (80-100) GPa je srovnatelný s hliníkem a svou pevností v tahu převyšuje většinu organických i anorganických vláken. Hustota skelných vláken se pohybuje kolem $2540 \frac{kg}{m^3}$. Další výhodou je nízká cena a především izotropie, která se u aramidových nebo uhlíkových vláken nenachází. Vyrábí se tažením (zvlákněním) ze skloviny. Podle druhu skloviny, z níž jsou vlákna vyrobena, je rozlišováno několik druhů skelných vláken, viz tab. 2.1. Nevýhodou skelných vláken je nízká odolnost vůči cyklické únavě a nízká smáčivost [6, 8].

Tab. 2.1 Nejběžnější druhy skloviny používané pro výrobu skelných vláken

Označení	Užití	Složení [%]	Mez pevnosti v tahu [GPa]
E	Elektrická izolace	55 SiO_2 , 18 CaO, 11 Al_2O_3 , 6 B_2O_5 , 5 MgO	3
S	Pevnostní kompozity	65 SiO_2 , 25 Al_2O_3 , 10 MgO	5
A	Tepelné izolace	72 SiO_2 , 10 CaO, 1 Al_2O_3 , 3 MgO, 14 K_2O	-
C (Pyrex)	Chemické aplikace	65 SiO_2 , 14 CaO, 9 K_2O , 4 Al_2O_3 , 6 B_2O_5 , 3 MgO	2



Obr. 2.4: Detailní snímek skelného vlákna z elektronového rastrovacího mikroskopu [8]

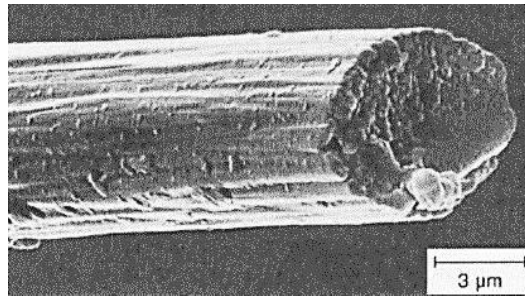
2.2.2 Aramidová vlákna

Aramidová vlákna (AF - Aramid Fiber) se skládají z organických polymerů (aromatických polyamidů), jejichž kovalentní vazby jsou uspořádány podle osy vlákna. Jejich amidové skupiny jsou spojeny vodíkovými můstky. Vynikají vysokou pevností v tahu a tuhostí, ale i silnou anizotropií. Jsou silně hydrofilní, ale mají nízkou adhezi k matrici. Průměr vlákna se pohybuje kolem $12 \mu m$. Jsou vhodné pro lehké konstrukce namáhané tahem. Mez pevnosti v tahu se pohybuje v rozmezí (3,4 - 3,8) GPa, modul pružnosti v tahu (80 - 185) GPa. Aramidová vlákna mají hustotu kolem $1450 \frac{kg}{m^3}$ [8]. Mezi nejznámější typy aramidových vláken patří vlákna obchodního označení Kevlar a Nomex.

2.2.3 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna (CF - Carbon Fiber) se vyznačují vysokou pevností, progresivním a vysokým modulem pružnosti, tepelnou odolností a nízkou hustotou. Uhlíková vlákna jsou také mimořádně korozně odolná. Mají dobrou tepelnou a elektrickou vodivost a nízkou tažnost. Snášenlivosti s tělesnými tkáněmi se využívá ve zdravotnictví pro nejrůznější implantáty. Jejich průměr se pohybuje od $5 \mu m$ do $10 \mu m$, viz obr. 2.5.

Kompozity vyrobené z uhlíkových vláken vynikají obecně výbornou odolností při statickém i dynamickém namáhání [7, 8].



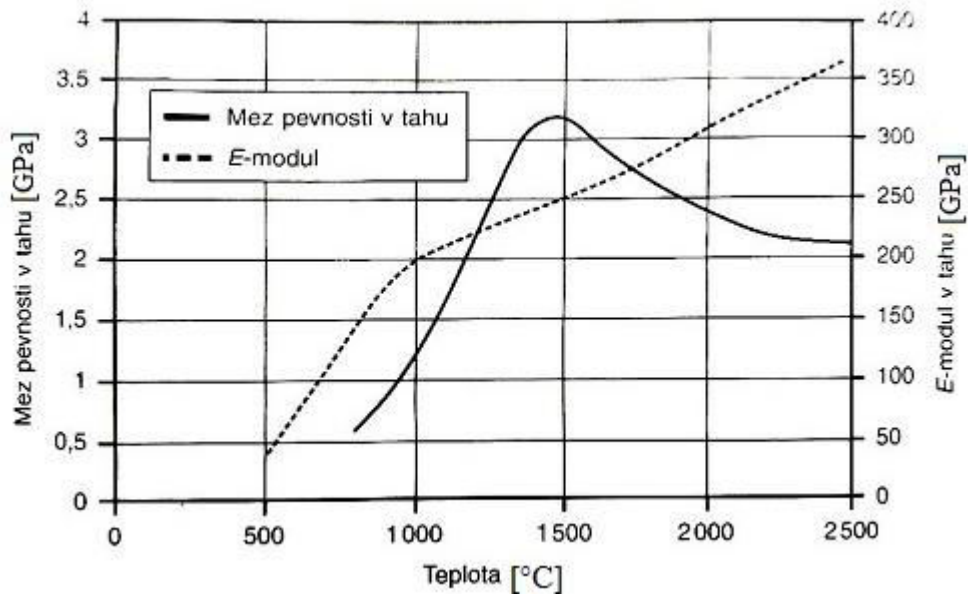
Obr. 2.5: Snímek uhlíkového vlákna [8]

Uhlíková vlákna se vyrábějí několika metodami. Obecně se jedná o složité a technicky náročné procesy:

- pyrolýzou polymerů z polyakrylonitrilu (PAN) nebo ze smoly,
- tepelným rozkladem uhlovodíků,
- odpařováním z obloukového výboje mezi uhlíkovými elektrodami.

Výroba uhlíkových vláken z PAN je nejčastější metodou, která se sestává z několika základních operací:

- přípravy prekursoru - PAN vlákna se táhnou (zvlákňují) z taveniny,
- stabilizace (vznik teplotně stabilní zesítěné struktury) - oxidace na vzduchu (po dobu 1 h - 2 h, při teplotě 200 °C - 300 °C), makromolekuly se zesítují kyslíkovými můstky, vlákno dostává černou barvu a je dále netavitelné,
- karbonizace (převod prekursoru na uhlíková vlákna) - odstranění vodíku a snížení obsahu kyslíku a dusíku ve vlákne (po dobu 30 s - 60 s, při teplotě 1200 °C - 1500 °C v dusíku), tento krok udává vláknu pevnost,
- grafitizace - roste obsah uhlíku, dochází k překrytalizaci na grafit (po dobu 15 s - 20 s při teplotě 2000 °C - 3000 °C v atmosféře dusíku s argonem), se zvětšováním krystalů grafitu však klesá pevnost, viz obr. 2.6,
- povrchové úpravy (oxidace) pro lepší adhezi k polymerní matici [6].

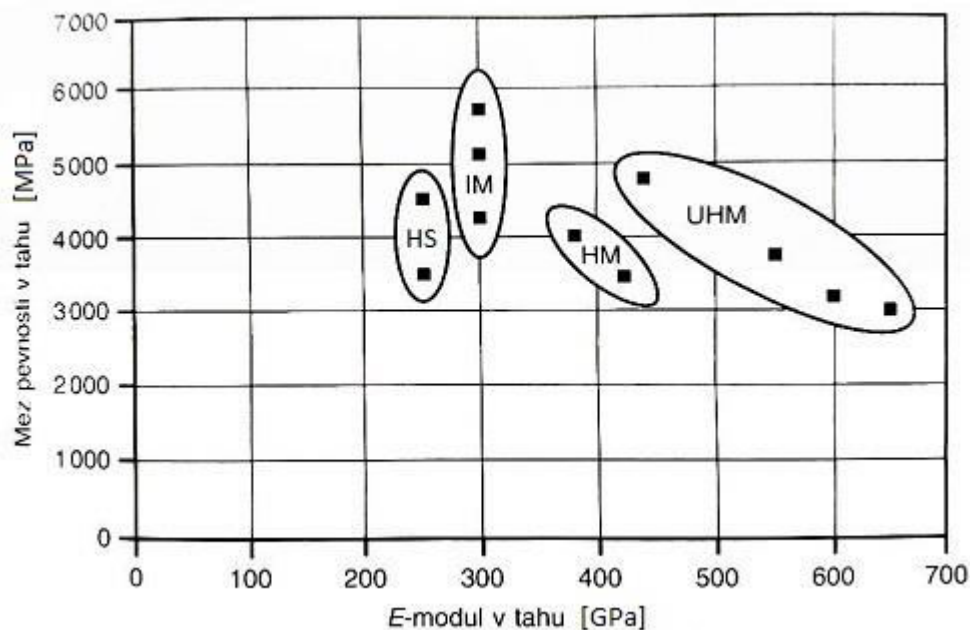


Obr. 2.6: Závislost mechanických vlastností uhlíkových vláken na teplotě zpracování při pyrolýze PAN [6]

Vlákná vyráběná z anizotropní smoly mají velmi vysoký modul pružnosti a nízkou pevnost v tlaku (speciální aplikace). Vzhledem ke skelným vláknům jsou uhlíková vlákna silně anizotropní. Mají vysokou odolnost proti cyklickému namáhání. Mez pevnosti v tahu se pohybuje v rozmezí (2 - 6,3) GPa, modul pružnosti (180 - 640) GPa a hustota (1600 - 2000) $\frac{kg}{m^3}$. Do teploty 1000 °C jsou uhlíková vlákna stabilní a chemicky inertní. Nepříznivou vlastností je jejich nízká adheze k matrici, což je eliminováno jejich povrchovou úpravou, například leptáním kyselinou dusičnou [6, 7, 9].

Dle mechanických vlastností lze uhlíková vlákna rozdělit následovně:

- HS (high strenght) - s vysokou pevností,
- IM (intermediate modulus) - středněmodulová,
- HM (high modulus) - vysokomodulová,
- UHM (ultra high modulus) - ultravysokomodulová, viz obr. 2.7 [8]



Obr. 2.7: Rozdělení uhlíkových vláken dle mechanických vlastností [8]

2.2.4 Přírodní vlákna

Přírodní vlákna (NF - Natural Fiber) se vyznačují často složitou fibrilární strukturou. Do této skupiny patří např. vlákna z konopí, bavlny, sisalu, ramie, juty a lnu. Převážně jsou to tedy vlákna z celulózy, která jsou jako jediná z přírodních vláken vhodná pro vyztužování plastů. Mechanické vlastnosti některých přírodních vláken jsou uvedeny v tab. 2.2. V současné době se přírodní vlákna získávají často rozvlákňováním dřeva a představují potenciál pro rozvojové země. Nevýhodou přírodních vláken je jejich citlivost na působení vlhkosti a také omezený výběr matrice pro přípravu kompozitních systémů, protože přírodní vlákna jsou teplotně odolná zhruba do 200 °C. Mezi přírodní vlákna patří také pavoučí vlákno (mez pevnosti 1140 MPa a tažnost 31 %) [6].

Tab. 2.2 Vlastnosti některých přírodních vláken [6]

Druh	Hustota [$\frac{kg}{m^3}$]	Mez pevnosti [MPa]	Modul pružnosti [GPa]	Tažnost [%]
Konopí	1500	460	70	1,7
Juta	1300	440	60	2
Len	1500	340	100	1,8
Bavlna	1500	300	27	10

Kovová vlákna

Mezi nejužívanější zástupce kovových vláken (MF - Metal Fiber) patří vlákna z boru, wolframu, beryllia a oceli. Jsou poměrně levná, ale také těžká. Výjimkou jsou vlákna borová. Ta jsou velmi tuhá, pevná a lehká. Jejich výroba je však složitá. Příkladem je tzv. Borsic vlákno - na wolframové vlákno se chemickou depozicí z par nanáší bor a jeho povrch se potahuje vrstvou karborunda. Mechanické vlastnosti některých kovových vláken jsou uvedeny v tab. 2.3. Ocelová vlákna se využívají pro zpevnění hliníkových slitin. Vlákna wolframu se používají ke zpevnění žáruvzdorných materiálů. [6]

Tab. 2.3 Vlastnosti některých kovových vláken [6]

Kovová vlákna	Mez pevnosti [GPa]	Modul pružnosti [GPa]	Hustota $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
Borová	2,8	385	2630
Wolframová	4,2	414	19300
Berylliová	1,4	240	1830
Ocelová	1,5	210	7800

2.2.5 Whiskery

Whiskery jsou tenké krystaly se šroubovou dislokací upevněnou uprostřed. Jejich průměr je kolem $1 \mu m$, délka (3 - 4) mm. Působí tedy jako dlouhá nespojitá vlákna. Získávají se kondenzací z par ve vakuu. Do meze pevnosti se deformují pružně, po jejím přesažení se objevují volné dislokace a dále se deformují jako běžné monokrystalické vlákno. Vlastnosti některých whiskerů je uvedena v tab. 2.4 [6].

Tab. 2.4 Vlastnosti některých whiskerů [6]

Whisker	Hustota $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	Mez pevnosti [GPa]	Modul pružnosti [GPa]
Korund	3960	15	470
SiC	3170	21	270
Si_3N_4	3180	14	380

2.3 Polymerní matrice

Matrice je materiál, kterým je prosycena výztuž. Po zpracování vzniká tvarově stálý produkt, kdy kompozit drží pohromadě. Kromě toho má však několik dalších významných úkolů:

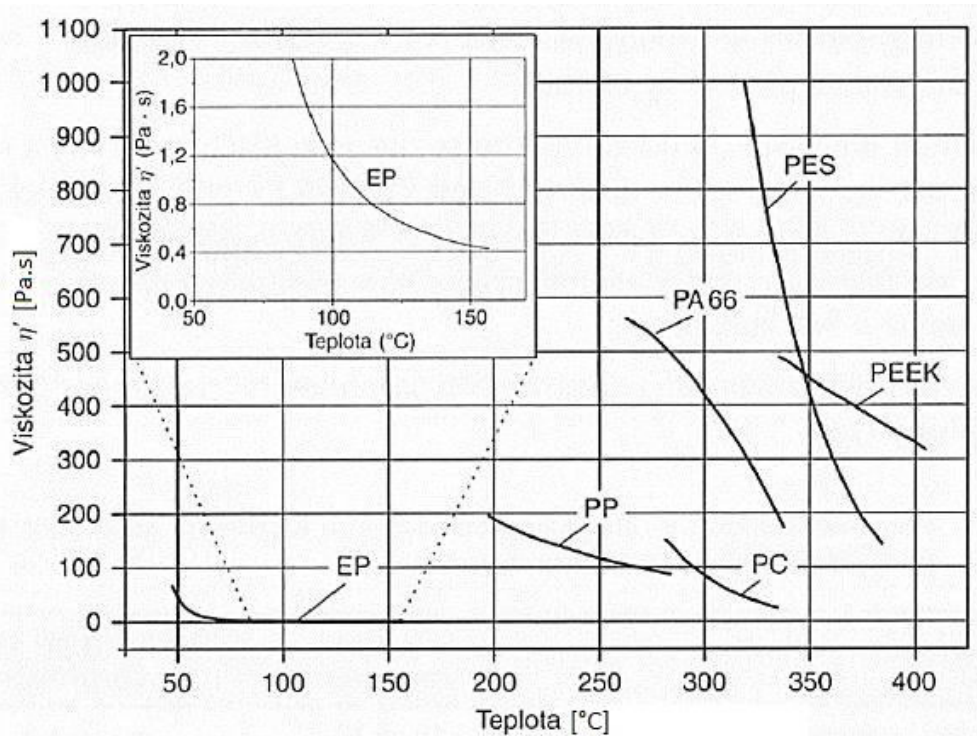
- přenos zatížení na vlákna,
- přenos zatížení z vlákna na vlákno,
- zajištění geometrické polohy vláken a tvarové stálosti,
- ochrana před korozivními vlivy okolí,
- ochrana výztuže před destruktivními reformacemi v místech tlakového zatížení

Základní druhy polymerních matric jsou:

- termoplasty,
- reaktoplasty. [6]

Termoplasty disponují několika výhodami. Patří mezi ně například houževnatost a také skutečnost, že při zpracování se pouze roztaví a ztuhnou, neprobíhá tedy chemický proces. Nutné je však dodat velké množství tepelné energie [6]. V technické praxi se používají nejčastěji: polypropylen, polyamidy a lineární polyestery.

Pro vláknové polymerní kompozity se však nejčastěji používají pryskyřice, tedy reaktoplasty. Důvodem je poměrně nízká viskozita i za nízkých teplot, viz obr. 2.8. Tím se dosahuje lepšího prosycení výztuže a snadnějšího zpracování při nižších energetických nárocích. Pryskyřice se následně vytvrzují (dochází k zesílení makromolekul), nejčastěji za pomoci tvrdidel (katalyzátorů, zpravidla s urychlovači reakcí) při pokojové nebo zvýšené teplotě. Tvrdidla iniciují polyadici, popřípadě polykondenzaci nebo polymeraci. Výsledný kompozit s vytvrzenými reaktoplasty dosahuje vysokých hodnot pevnosti a také modulu pružnosti. Vyznačují se však nízkou tažností a značnou křehkostí. Dále jsou vysoce chemicky a tepelně odolné [6, 9]. Vytvrzené kompozity nelze dále tvarovat, svařovat nebo znovu roztavit. Jedná se o amorfní polymery se zesíťovanou strukturou. [5]



Obr. 2.8: Viskozita reaktoplastů a termoplastů v závislosti na teplotě [8]

Mezi reaktivní pryskyřice, jež se odlišují nejen mechanickými vlastnostmi, ale také provozní teplotou, lze zařadit:

- nenasycené polyestery,
- vinylestery,
- fenakrylátové pryskyřice,
- epoxidy,
- fenoplasty,
- metakrylátové pryskyřice,
- izokyanátové pryskyřice [8].

S ohledem na řešenou problematiku bakalářské práce je v následujících odstavcích věnována pozornost epoxidovým pryskyřicím, které jsou kvůli jejich vynikajícím mechanickým vlastnostem a odolností při statickém i dynamickém namáhání nejčastěji aplikovány při výrobě uhlíkových kompozitů.

Epoxidové pryskyřice jsou bezbarvé kapaliny až tvrdé křehké látky. Vytvrzení epoxidových pryskyřic se nejčastěji uskutečňuje polyadící monomerních sloučenin s aktivním vodíkovým atomem na epoxidovou vazbu. Jako tvrdidla se často používají

polyaminy, které vytvrzují epoxidové pryskyřice již za běžných pokojových teplot a anhydridy polykarboxylových kyselin. Vytvrzení je závislé na teplotě a probíhá po dobu několika hodin. Vytvrzení proběhne obecně z hlavní části během několika hodin. Úplné vytvrzení trvá několik dnů. V praxi se tento proces urychluje zvýšením teploty, zpravidla při teplotě (100 - 200) °C.

Nespornými výhodami epoxidů vůči ostatním pryskyřicím jsou minimální smrštění při vytvrzování, dobrá adheze k povrchově neupravené výztuži, výborné mechanické a elektrické vlastnosti, vyšší tepelná a také chemická odolnost. Nevýhodou je jejich vyšší cena a poměrně vysoká viskozita [9].

2.4 Technologie výroby uhlíkových kompozitů

Způsobů výroby vláknových kompozitů je mnoho [7]. Volba technologie je velmi úzce spjata s výběrem vhodného materiálu a také s tvarem vyráběného kompozitu. V této části bakalářské práce budou proto uvedeny pouze hlavní a nejčastěji používané technologie. Pro výrobu plošných dílů se převážně jedná o laminaci do forem. Tyto formy musí být ošetřeny před spojením s pryskyřicí a to separačními činidly, vosky apod. Pro výrobu rotačních součástí se využívají např. metody navíjení, pultruze nebo oplétání [9].

2.4.1 Ruční laminace

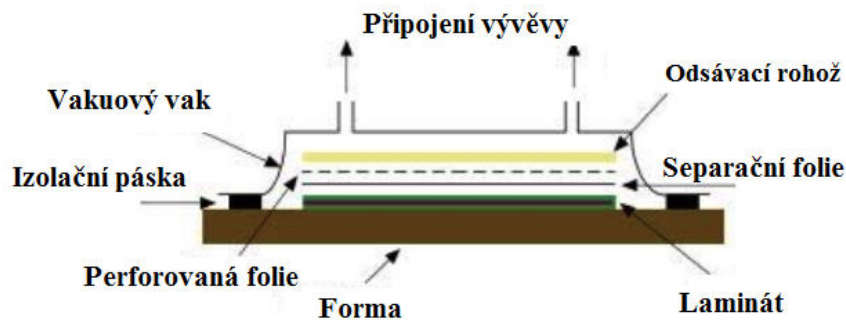
Ruční laminace je nejjednodušší technologií s minimálními náklady na nástroje a vybavení. Tato technologie je velice závislá na zručnosti a zkušenostech pracovníka. Vyznačuje se poměrně nízkou produktivitou a přebytečným vzduchem v materiálu. Tento způsob je vhodný pro tvarově členité díly, prototypovou nebo malosériovou výrobu.

Ruční laminace je proces, kdy je na připravenou negativní nebo pozitivní laminátovou, dřevěnou či kovovou formu nanesena výztuž. Ta je ručně válečky prosycována pryskyřicí a snahou je vytlačit z materiálu přebytečný vzduch. Tento proces se opakuje, dokud není dosažena požadovaná tloušťka stěny. Poté je kompozit ponechán volně k vytvrzení. Výsledný povrch kompozitu je kvalitní pouze z jedné strany [7].

2.4.2 Lisování pomocí vakua

Jedná se o metodu ruční laminace s využitím vakuového vaku. Základem je opět forma, do které se ručně navrství a prosytí výztuž. Na výztuž je postupně umístěna separační tkanina, která zaručuje oddělení následujících vrstev od kompozitu, perforovaná folie, umožňující protečení přebytečné pryskyřice a následně odsávací rohož, takzvaný

breather, umožňující odsátí vzduchu a následné absorbování přebytečné pryskyřice. Skladba vrstev je zřejmá z obr. 2.9. Následně je celá forma, popřípadě jen její funkční část s výztuží, překryta vakem a následně utěsněna. Pomocí vývěvy je vytvořeno vakuum. Dojde k vytlačení přebytečného vzduchu, stlačení vrstev výztuže a odsátí přebytečné pryskyřice. Touto metodou je možné vytvářet i sendvičové struktury, například vložením voštiny mezi dvě vrstvy vláknité výztuže. [7]



Obr. 2.9: Lisování pomocí vakua [10]

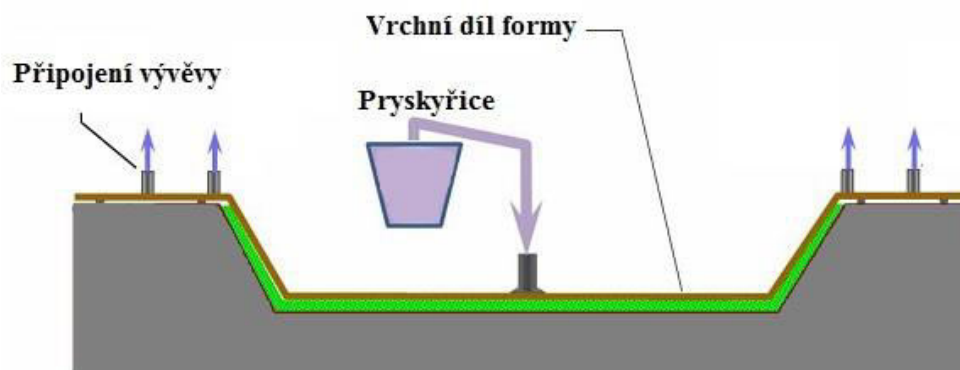
Metodou lisování pomocí vakua byla vyrobena také převážná část karoserie a aerodynamických prvků závodního vozu týmu FS TUL Racing, viz kap. 1. Na obr. 2.10. je zachycena forma pro boční díl karoserie, vyráběné touto metodou. Tato forma je vyrobena z několika dílů z materiálu MDF (dřevovláknité desky anglicky medium - density fiberboard) a následně napuštěna epoxidovou pryskyřicí, kvůli své pórovitosti. Dále byla smontována pomocí spojovacího materiálu a následně byly vyrovnány nerovnosti pomocí polyesterového kitu. Forma byla dále broušena až k velice hladkému povrchu. Experimentální výrobou bylo zjištěno, že pro dosažení kvalitního povrchu výrobku je zapotřebí zajistit kvalitnější a hladší povrch formy. Toho bylo dosaženo nanesením plniče a následným lakováním a leštěním povrchu formy.



Obr. 2. 10: Forma bočního dílu karoserie [zdroj vlastní]

2.4.3 Injekční vstřikování

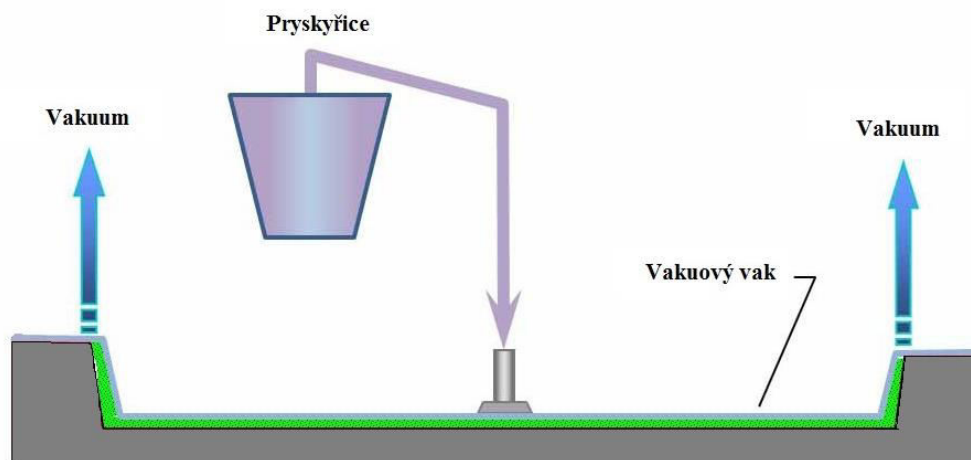
Proces injekčního vstřikování (LRTM, anglicky light resin transfer moulding) je technologií, která k prosycení výztuže využívá podtlakové injektáže. Forma pro tuto technologii se skládá ze dvou dílů (vrchního a spodního), viz obr. 2.11. Do připravené formy se umístí suchá výztuž a následně je uzavřena druhým dílem. Pomocí vakua je do výztuže nasávána pryskyřice. Výsledným produktem je velmi kvalitní díl bez nežádoucích vzduchových bublin. Výhodou je také kvalitní povrch z obou stran výrobku. [11]



Obr. 2.11: Metoda LRTM [11]

2.4.4 Infuze

Infuzní technologie vychází také z vakuového způsobu sycení výztuže. Do formy je položena suchá výztuž. Následně je překryta speciální rozváděcí sítkou. Rozváděcí síť zajišťuje prosycení výztuže navzdory členitému tvaru formy. Tento celek se umístí do vakuového vaku a utěsní. Podtlakem, který je tvořen vývěvou, je nasávána pryskyřice, viz obr. 2.12 čímž dojde k prosycení a stlačení výztuže. [11]



Obr. 2.12: Infuzní metoda [11]

Infuzní metodou byla zhotovena sedačka řidiče z uhlíkového kompozitního systému pro závodní vůz týmu FS TUL Racing, viz obr. 2.13.

2.4.5 Lisování v autoklávu

Lisování v autoklávu je moderní výrobní proces, kdy se využívá podtlaku vakuového vaku, přetlaku a působení teploty pomocí autoklávu. Pro tento způsob se využívá předimpregnovaná výztuž ve formě tkanin (prepreg). Prepreg se nařeže na přesné díly, navrství se do formy, překryje dalšími pomocnými foliemi a uloží do vakuového vaku. Tento celek se umístí do autoklávu a pomocí regulovaného programu se vytvrzuje za působení tepla a tlaku. Výsledkem je velice lehký a pevný produkt. Vysoké nároky se však kladou i na formu pro kompozitní díl. Forma bývá často frézována z hliníku. Této metody se využívá při výrobě vysoce namáhaných dílů, například pro letectví a kosmonautiku [8]. Metodou lisování v autoklávu byl vyroben například volant pro závodní vůz týmu FS TUL Racing, viz obr. 2.14.



Obr. 2.13: Sedačka řidiče závodního vozu vyrobené infuzní metodou [zdroj vlastní]



Obr. 2.14: Volant vyrobený pomocí lisování v autoklávu [zdroj vlastní]

2.4.6 Navíjení

Metoda navíjení je jediná z uvedených technologií, která využívá spojitých vláken, jedná se tedy o kontinuální proces. Nejčastěji je použita výztuž ve formě rovingu. Jiné formy výztuže však nejsou vyloučeny. Tato metoda je vhodná především pro duté a rotačně symetrické výrobky. Navíjet se dají tedy především tlakové nádoby, trubky a jiné duté profily libovolné délky, např. kardanový hřídel vozu BMW M3, viz obr. 2.15. Touto technologií se mohou vyrobit i listová pera. Často se navíjí i celá tělesa vagonů a také zásobníky paliv o velkém průměru i délce [8, 12].



Obr. 2.15: Kardanový hřídel vyrobený navíjením uhlíkových vláken [13]

Impregnované vlákno výztuže je navíjeno na jádro, čímž může být navíjecí trn, předloha tlakové nádoby, apod. Toto jádro se při navíjení otáčí, přičemž mechanismus výstupního otvoru (support) se pohybuje horizontálně, v souladu s osou rotujícího trnu, a pokládají se vrstvy vlákna. Jádro se po skončení procesu může stát součástí výrobku, jako je tomu u tlakové nádoby nebo může být vyjímatelné, tzv. *ztracené jádro*. Použitým materiálem pro ztracené jádro mohou být rozpustné soli, pěny nebo nízkotající kovové slitiny. *Vyjímatelné jádro* se odstraňuje několika způsoby. Jedním z nich je prosté vytažení, další možností může být rozpuštění jádra chemickou, popřípadě tepelnou cestou. Pro usnadnění vytažení jádra je třeba jej předem podrobit povrchové úpravě, nejčastěji nanesením vhodného separačního prostředku. Jinou možností je mírně kónický tvar jádra. Často se jedná o tvarové přizpůsobení a následné ošetření separačním prostředkem. V automatizovaném provozu jsou používány speciální vytahovací zařízení [7, 8].

Sycení vlákna matricí (impregnace) může probíhat několika způsoby. Vlákno může být před navinutím na jádro předsyceno namáčením v lázni matrice nebo je již dodáno ve formě prepregu, tzv. towpreg. Jinou, méně častou možností je sycení vlákna až po navinutí [7].

Požadovaných mechanických vlastností se u této technologie dociluje přesným uspořádáním a také vhodnou orientací vláken. Tato orientace se uvažuje vzhledem k ose rotace jádra a dosahuje se jí pomocí posuvu suportu a rotace vřetene a tedy i jádra. Poměrem otáčení trnu a posuvem suportu lze úhel návinu regulovat v rozmezí $0^\circ - 90^\circ$. Všechny tyto pohyby a tím i celý proces navíjení, je řízen počítačem. Podle směru ukládání vláken na navíjecí trn lze rozlišovat několik typů návinů: šroubovicový, pólový, spirálový, axiální a smíšený návin, který využívá kombinace dvou nebo výjimečně více z předchozích způsobů.

Úhel natočení vláken a jejich předpětí je řízeno příslušným ovládacím softwarem. Zařízení pro navíjení vláken mívají často vysoké pořizovací náklady. Jedná se o stroje soustruhového typu nebo víceosé roboty typu KUKA (viz obr. 2.16) pro složitější tvary výrobků [7].



Obr. 2.16: Navíjení pomocí robotu Kuka [14]

Po dokončení samotného navíjení je obvykle kompozit i s jádrem vložen do pece, kde se za neustálé rotace aktivuje vytvrzování působením tepla podle přesně regulovaného programu [7].

Mezi výhody technologie navíjení patří vysoká reprodukovatelnost výroby, možnost vysoké míry automatizace a v neposlední řadě také nejmenší náklady pro pořízení výztuže ve formě rovingu. Nevýhody této metody spočívají ve vysoké ceně navíjecích zařízení a poměrně složitém vyjímání jader [7].

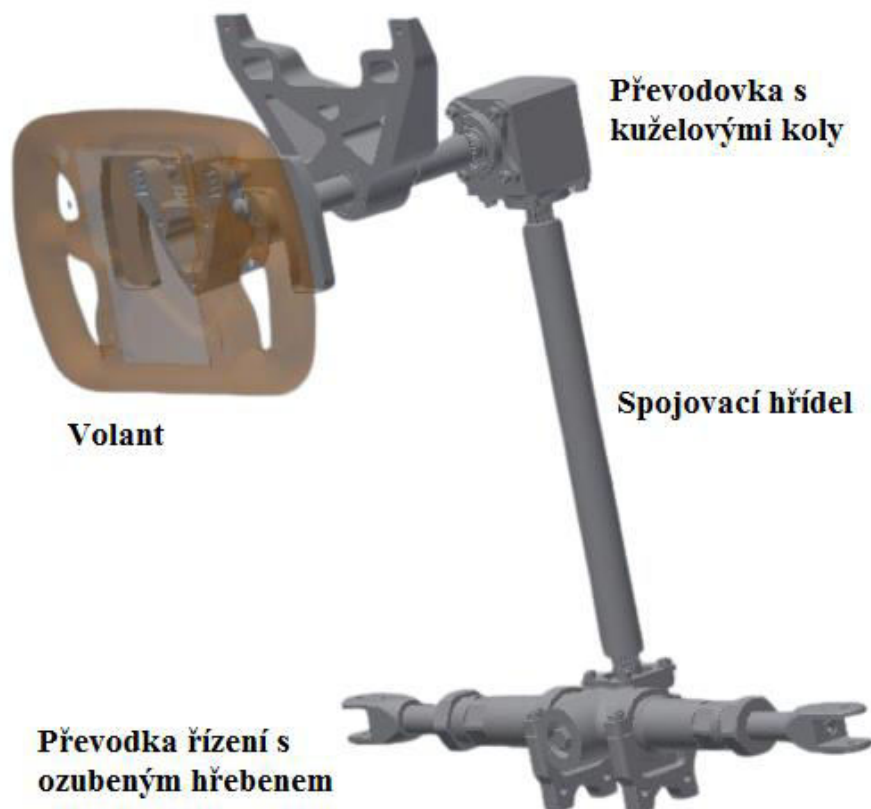
Další technologií výroby rotačních i složitěji tvarovaných součástí může být oplétání. Touto technologií se vyrábějí například kompozitní opletené tyče, které se používají jako náhrada ocelové výztuže do betonu. Jinou možností výroby kompozitních profilů nebo tyčí je tažení, tedy pultruze. Tato metoda je velice efektivní a charakterizuje ji vysoký obsah výztuže [15].

3 Experimentální část

Experimentální část práce se zabývá výběrem vhodné součásti závodního vozu pro výrobní technologii navíjení. Pro správné nastavení výrobního procesu (výběru vhodné varianty navíjení, resp. velikosti předepínací síly vlákna při navíjení) je vyrobeno nejprve několik variant vzorků, které mají z ekonomických důvodů menší rozměr než je tomu u skutečné součásti. Dle charakteru součásti jsou tyto následně vystaveny zatěžování, které odpovídá její aplikaci a na základě výsledků a zkušeností získaných výrobou těchto vzorků je navržena a vyrobena finální součást. Návrh součásti je proveden pomocí numerické simulace v programu ANSYS. Finální součást je pak opět podrobena zatěžování pro ověření mechanických vlastností.

3.1 Výběr vhodné součásti závodního vozu

Pro technologii výroby kompozitního dílu metodou navíjení byla vybrána *spojovací hřídel*, která je jednou z komponent řízení závodního vozu týmu FS TUL Racing. Spojovací hřídel zajišťuje přenos kroutícího momentu mezi 90° převodovkou s kuželovými koly a převodkou řízení s ozubeným hřebenem, viz obr. 3.1. Při současném provedení je hřídel vyrobena z oceli ČSN 14 220.



Obr. 3.1: Sestava řízení vozu studentské formule

Parametry potřebné k návrhu této hřídele uvádí v diplomové práci MALAD [16]. Jsou jimi např. krouticí moment $M_k = 82,6 \text{ Nm}$, kterým je součást v krajních případech zatěžována, rozměr evolventního drážkování (18 x 1 ČSN 01 4952), se kterým je nutno součást spojit a délka součásti $l = 280 \text{ mm}$. Další limitující parametry jsou uvedeny v pravidlech Formula SAE, je jím především maximální průměr hřídele $d = 50 \text{ mm}$ [17].

Protože do kompozitní trubky bude vlepena kovová vložka s uvedeným evolventním drážkováním, je rozhodujícím rozměrem pro výrobu kompozitní trubky bude tedy vnitřní průměr, který bude kopírovat tvar navíjecího trnu a bude tak mít poměrně kvalitní povrch. Pro vlepení kovové vložky je nutné dodržet vnitřní průměr kompozitní trubky 24 mm.

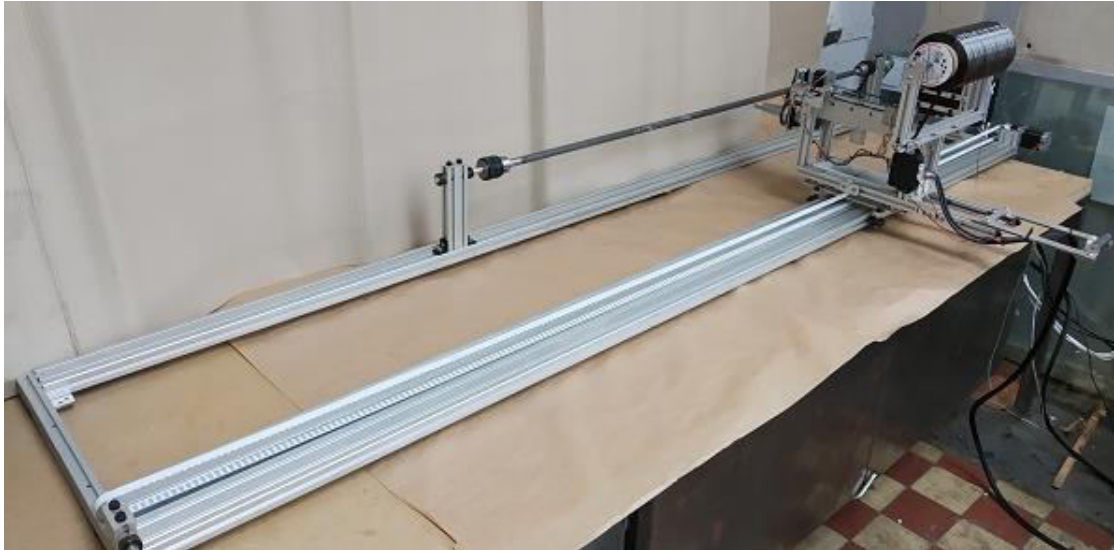
3.2 Návrh technologie procesu výroby

Součást bude vyrobena technologií navíjení uhlíkových vláken na vyjímatelné jádro v podobě ocelového trnu. Uhlíkové vlákno bude syceno průtahem lázní s epoxidovou pryskyřicí. Po dokončení navíjení bude trn umístěn do temperačního zařízení, kde bude výrobek za neustálé rotace tepelně vytvrzen. Po dokončení temperačního procesu bude ponechán ke zchladnutí a následně bude trn pomocí speciálního přípravku vytažen. Po vytažení trnu bude možné kompozitní trubku dělit na přesné rozměry, popřípadě brousit nedostatky povrchu. Po dělení materiálu bude následovat začištění konců trubky a následné vlepení kovové vložky s evolventním drážkováním.

3.3 Příprava výroby

3.3.1 Navíjecí zařízení

Pro výrobu součástí bylo použito navíjecí zařízení X-Winder, viz obr. 3.2. Hlavními částmi tohoto navíjecího zařízení je rám, složený z hliníkových profilů, včetně a dvě sklíčidla pro upnutí navíjecího trnu, ukládací zařízení (suport), které je vybaveno hřídelí pro umístění cívky s vlákny, vodícími válci, vanou pro naplnění pryskyřicí a stěrači pro regulaci množství pryskyřice. Ukládací část zařízení se pohybuje podél osy rovnoběžné s osou navíjecího trnu, přičemž navíjecí trn současně vykonává rotační pohyb kolem své osy. Toto zařízení bylo dodáno rozložené do jednotlivých dílů. Bylo nutné jej tedy sestavit dle dostupného manuálu.

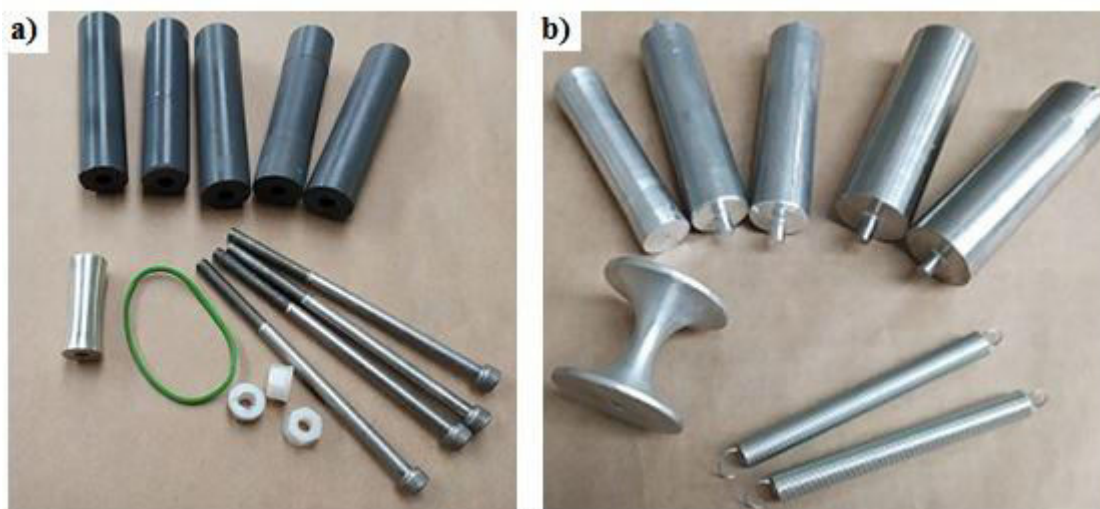


Obr. 3.2: Navíjecí zařízení X-Winder

Zařízení mělo řadu nedostatků, které bylo nutné nejprve odstranit. Vlivem vedení vlákna pomocí rozměrově nepřesných plastových válečků a nedostatečného zakřivení posledního z válečků v hlavě ukládací části zařízení (suportu) docházelo ke sklouznutí vlákna z vedení a následnému třepení nebo přetržení vlákna. Nevýhodou bylo také nesnadné rozebírání tohoto systému vedení, díky pojistným plastovým maticím. Snadné rozebírání je přitom velkou výhodou pro rychlé vyčištění stroje po každém výrobním cyklu. Při čištění válečků za použití acetonu docházelo k jejich naleptávání. Bylo tedy nutné zkonstruovat a vyrobit jiné řešení systému válečků pro bezchybné vedení vlákna a jejich snadnou údržbu.

Nedostatky trpěl i systém stírání přebytečné pryskyřice z vlákna pomocí hrany plíšku, který třepil vlákno svojí hranou. Přítlak tohoto stíracího plíšku byl zajištěn gumičkami. Vlákno zůstávalo velice přesycené a přebytečná pryskyřice odkapávala z navíjecího trnu. Tento stírací systém bylo tedy nutné modifikovat, aby nedocházelo k již zmíněným problémům. Gumička byla nahrazena válcovými tažnými šroubovitě vinutými pružinami. Na obr. 3.3 jsou zachyceny původní a modifikované válečky pro vedení vlákna. Díky těmto úpravám bylo dosaženo snadné montáže, přesného vedení vlákna bez jeho poškození a dostatečné stírání přebytečné epoxidové pryskyřice z vlákna.

Dále byl vyroben stůl pod navíjecí zařízení, který je úměrný jeho délce (3 m).



Obr. 3.3: Válečky zajišťující vedení vlákna

a) původní plastové válečky se šrouby, b) modifikované válečky z hliníku pro snadnou montáž a přesné vedení vlákna

3.3.2 Navíjecí trn

Navíjecí trn slouží jako tvarová předloha pro kompozitní výrobek. Navíjecí trn byl vyroben z přesné ocelové trubky o vnějším průměru 24 mm, resp. 20 mm a délce 1350 mm. Navíjecí trn o průměru 20 mm byl použit pro první fázi experimentu, jejímž cílem byl výběr vhodné varianty navíjení, průměr trnu 24 mm byl použit k výrobě finální součásti (čímž došlo ke značné úspoře uhlíkových vláken ve fázi předběžného testování). Na konce ocelové trubky byly navařeny čepy menšího průměru, které umožnily sevření trnu do sklíčidel navíjecího zařízení.

3.3.3 Temperační pec

Temperační pec umožňuje vytvrzení epoxidové pryskyřice za vyšších teplot a tím dosažení lepších mechanických vlastností kompozitu. Proces tepelné úpravy závisí na použité matrici, přičemž je vhodné se držet pokyny výrobce daného epoxidového systému. Pro dosažení kruhovitého průřezu trubky je nutné neustálé otáčení trnu během vytvrzovacího procesu. Pro tyto účely byla zkonstruována a vyrobena temperační pec, která zajišťuje rotaci trnu a také přesnou regulaci teploty pomocí řídicí elektroniky.

3.3.4 Vytlačovací přípravek

Vytlačovací přípravek (viz obr. 3.4) byl zkonstruován a vyroben za účelem vytlačení trnu z hotové kompozitní trubky.

Použití vytlačovacího přípravku je velmi snadné. Vytlačení navíjecího trnu zajišťuje trapézový šroub, kterým je otáčeno pomocí montážního klíče, popřípadě rázového utahováku. Tím je trn protlačen otvorem, který má menší průměr než kompozitní výrobek. Kompozitní výrobek pak zůstane v místě jeho vložení do přípravku. Protlačovací otvory jsou vypáleny do plechu, který je snadno vyměnitelný pomocí šroubového spoje. Velikost otvoru je tedy možné přizpůsobit navíjecímu trnu.

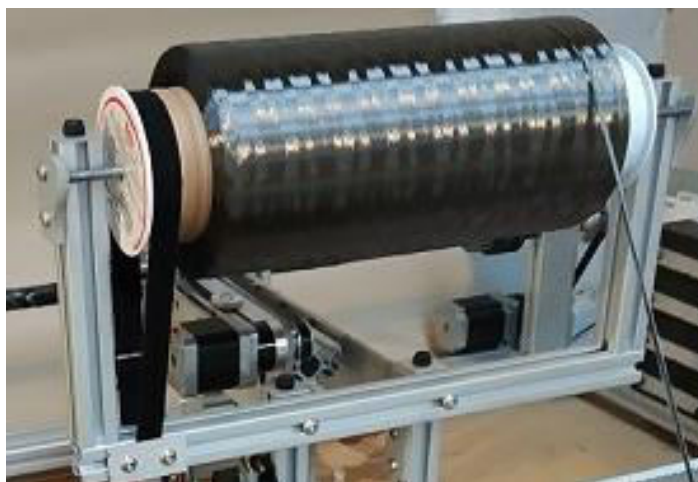
Největší krouticí moment je nutné vyvinout na začátku vytlačovacího procesu pro odtržení kompozitního dílu od separovaného povrchu trnu.



Obr. 3.4: Vytlačovací přípravek [zdroj vlastní]

3.3.5 Měření a regulace předepínací síly

Regulace předepínací síly, kterou je vlákno předepjato před navínutím na trn, se na navíjecím zařízení X-Winder uskutečňuje třením pomocí pružného řemínku (viz obr. 3.5), který brzdí odvíjející se cívku rovingu.



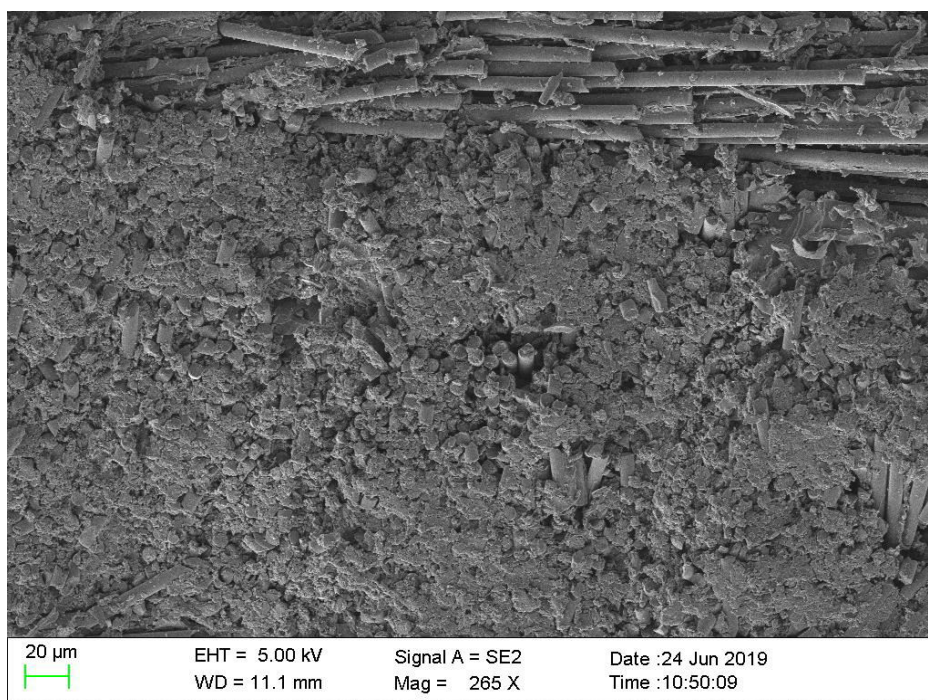
Obr. 3.5: Brzdění cívky rovingu pružným řemínkem v levé části obrázku

Rozmezí sil, které bylo možné vyvinout brzděním cívky pružným řemínkem při současném zajištění stabilního chodu navíjecího zařízení, bylo změřeno pomocí aparatury Dewetron DEWE - 5000 se snímačem síly GTM 500N.

Změřeno bylo rozmezí 2,6 N až 25,7 N, ve kterém je možné regulovat předepínací sílu. Přesnost regulace je značně omezená. Na pružném řemínku proto byly vytvořeny značky, u kterých se síla změřila. Při následném nastavení předpětí před navíjením byl pružný řemínek utážen ke zmíněným značkám a tím bylo známo jakou silou je vlákno napínáno.

3.4 Výroba kompozitních vzorků a specifikace návinu

Kompozitní vzorky spojovací hřídele byly zhotoveny z uhlíkových vláken TORAYCA T300 o nominální délkové hustotě 800 g na 1000 m (jemnost příze 800 tex). Jedná se o zcela základní vlákno, s modulem pružnosti v tahu 230 GPa, jehož fyzikální vlastnosti jsou uvedeny v příloze 1. Dále byl na základě konzultace s vývojovým oddělením společnosti CHEMEX s.r.o. zvolen speciální epoxidový systém POX L20C, uzpůsobený pro technologii navíjení ve vrstvách, složený z pryskyřice, anhydridového tvrdidla a akceleratoru v hmotnostním míšicím poměru 100:85:1. Jeho výhodou je vysoká viskozita a tuhnutí až při zvýšené teplotě, čímž může samotný proces navíjení trvat podstatně delší dobu než je tomu u standardních epoxidových systémů. Technický list epoxidového systému je uveden v příloze 2. Nízká viskozita epoxidového systému při navíjení zaručuje dostatečné prosycení vláknité výztuže, viz obr. 3.6, který byl získán pomocí rastrovací elektronové mikroskopie.

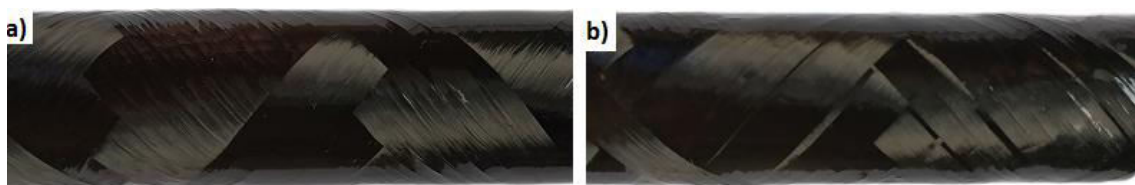


Obr. 3.6: Snímek prosycené výztuže polymerní matricí (SEM)

Pro nastavení softwaru umožňující spuštění navíjení bylo třeba zadat několik vstupních parametrů. Jsou jimi např. počet vrstev kompozitu, úhel vláken vzhledem k ose rotace trnu, šířka a tloušťka vlákna, délka a průměr navíjecího trnu a rychlosti posuvů a rotace vřetena.

V rámci experimentálního výzkumu bakalářské práce bylo zhotoveno pět variant zkušebních vzorků se spirálovým návinem, viz tab. 3.1. Každá z pěti variant (sérií) obsahovala 4 zkušební vzorky. Proměnnými parametry jednotlivých variant zkušebních vzorků bylo předpětí vlákna (v rozsahu od 2,6 N do 25,7 N) a rovnoměrnost návinu vlákna (s mezerami a bez mezer). Zkušební vzorky byly navinuty pěti vrstvami se směry vláken ± 45 na navíjecí trn o délce 1350 mm a průměru 20 mm. Následně byl trn s navinutým kompozitem vložen do temperačního zařízení, kde byl tepelně vytvrzován za neustálé rotace po dobu 10 hodin při teplotě 140 °C dle technického listu výrobce epoxidového systému. Poté byl vyjmut z pece, ponechán ke zchladnutí a následně byl pomocí vytlačovacího přípravku vytlačen navíjecí trn. Po vytlačení navíjecího trnu bylo z důvodu nahromadění přebytečného materiálu nutné odstranit konce navinuté trubky o délce cca 70 mm. Kompozitní výrobek byl pak dělen na čtyři vzorky o délce 300 mm.

Nedeformované vlákno odvinuté z cívky má tvar tenkého pásku. Každá z variant vzorků byla zhotovena s jiným předpětím vlákna, jak již bylo uvedeno výše. Napínání vlákna a vedení mezi válečky však způsobilo jeho deformaci, zejména podélné přeložení. Původně 7 mm široký pramenec po maximálním předpětí silou 25,7 N se zdeformoval tak, že jeho šířka v místě navíjení byla následně 4 mm. Pro zhotovení návinu bez mezer bylo nutné šířku a tloušťku navíjeného vlákna opravit v ovládacím softwaru. Pokud by nedošlo k opravě hodnoty šířky vlákna, vlákno by bylo navinuto na trn se značnými mezerami, viz obr. 3.7. Na výsledném výrobku se tato úprava projevila rozdílnou tloušťkou stěny u jednotlivých variant vzorků, viz tab. 3.1.



Obr. 3.7: Navinuté vlákno na trn: (a) bez mezer, (b) s mezerami

Pro zjištění objemového podílu vláken v kompozitu byla cívka s vláknem vážena před a po navíjení a následně dle hustoty vlákna spočítán objem. Objem celého kompozitu

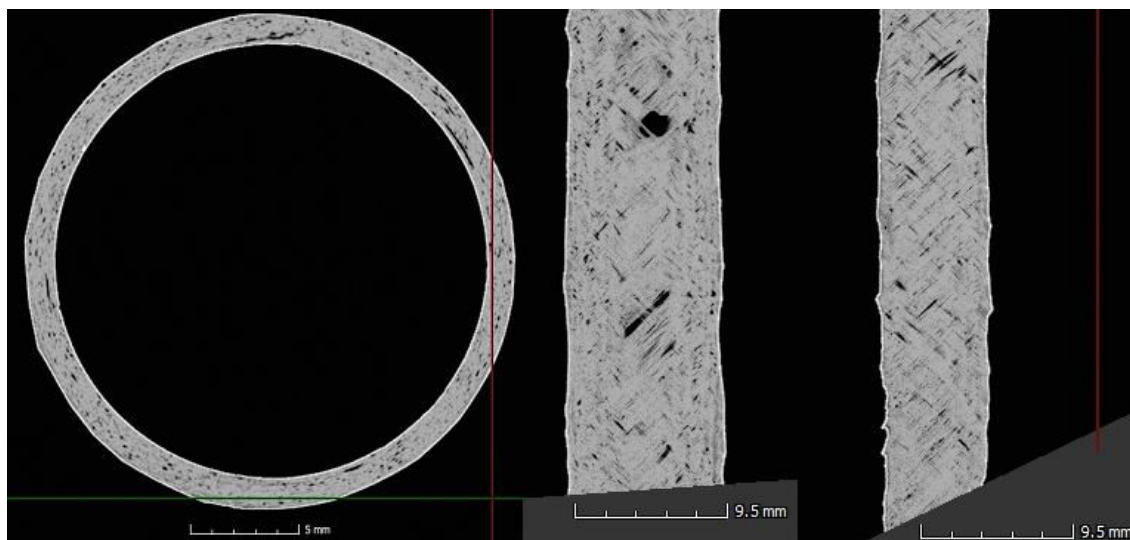
byl měřen pomocí odměrného válce. Dle vztahu (2.1) byl spočítán objemový podíl. Hodnoty objemového podílu jsou uvedeny v tab. 3.1.

Tab. 3.1: Podrobnosti o jednotlivých výrobních sériích

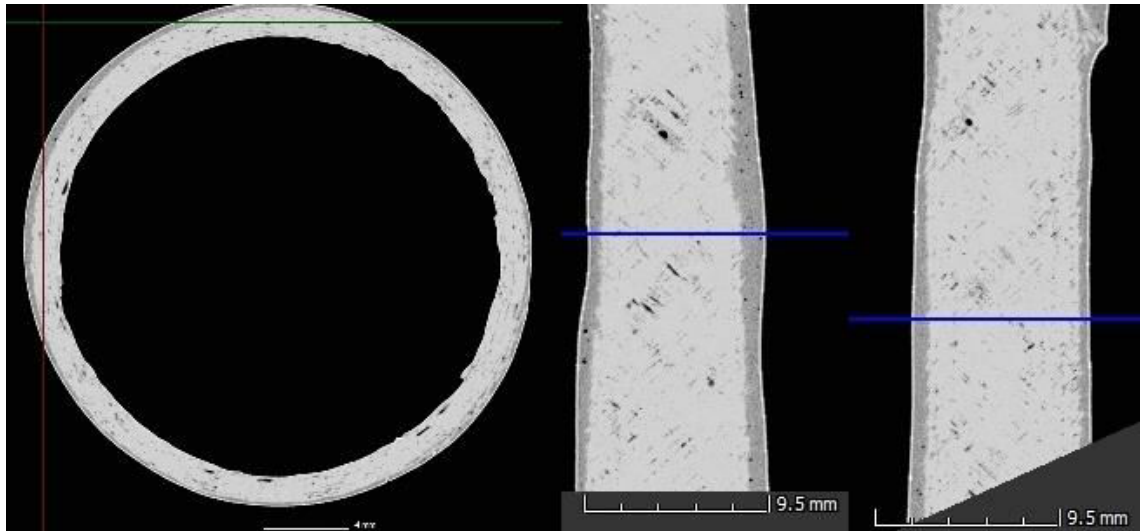
Varianta vzorku	Tloušťka stěny [mm]	Předepínací síla F [N]	Objemový poměr vlákna ϑ_f [%]	Poznámka o návínu
1	1,40	2,6	57,3	Bez mezer
2	1,44	9,6	S mezerami (1 mm)	
3	1,50	9,6	58,4	Bez mezer
4	1,64	16,6	54,6	S mezerami (1 mm)
5	1,83	25,7	63,7	Bez mezer

3.5 Analýza vnitřní struktury a homogenity kompozitních vzorků

Pro zkoumání vnitřní struktury a homogenity kompozitů bylo využito počítačové tomografie (3D rentgenového měření). Pro tyto účely bylo použito zařízení Zeis Metrotom 1500. Snímky vnitřní struktury kompozitů (pro varianty s nejmenší a největší předepínací silou vlákna při navíjení) jsou uvedeny na obr. 3.8 a obr. 3.9, které znázorňují příčný a podélný řez kompozitní trubicou. Pro dokumentaci vnitřní struktury byly vybrány snímky zobrazující nejkritičtější místa průřezu.



Obr. 3.8: Snímek z CT kompozitního vzorku 1.2 (série 1, vzorek 2)

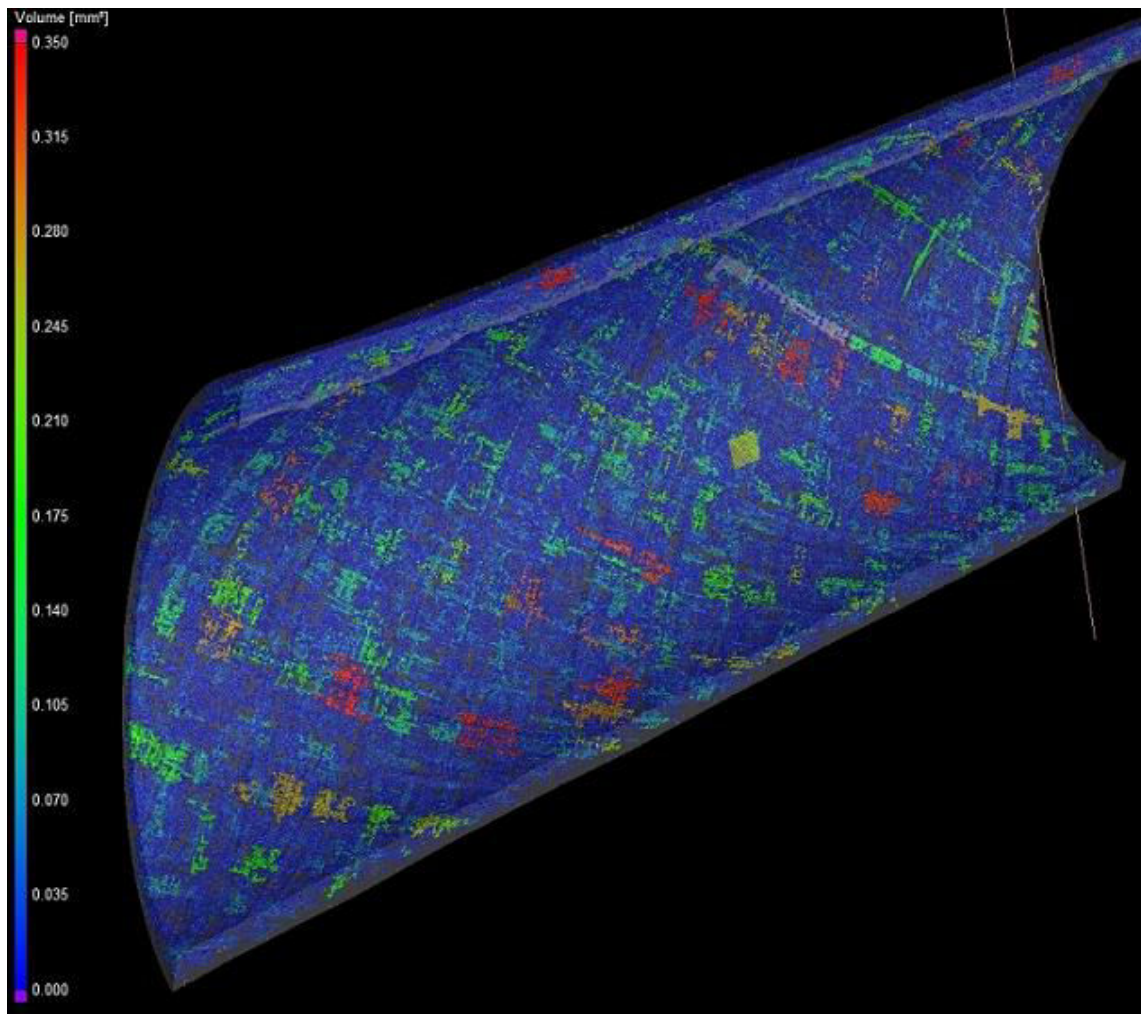


Obr. 3.9: Snímek z CT kompozitního vzorku 5.1 (série 5, vzorek 1)

Na obr. 3.8 jsou zřetelné mezery mezi navinutými vlákny vzorku z 1. výrobní série a tedy i jeho značná nehomogenita. Tato série byla zhotovena s minimálním předpětím vlákna (2,6 N) a pramenec měl tvar téměř dokonalého pásku o šířce 7 mm, který by byl pro namáhání kompozitní trubky kroutícím momentem velice výhodný. Pramenec zdánlivě dokonale nevytvářel žádné mezery mezi vnutím.

Na obr. 3.9 je znázorněn snímek kompozitního vzorku 1 z výrobní série 5. Tato série vzorků byla zhotovena s největší možnou předepínací silou vlákna, kterou dovoluje brzdící mechanismus (25,7 N). Pramenec se navíjel přeložený na téměř poloviční šířku a to se projevilo silnější stěnou výrobku, viz tab. 3.1. Návin byl bez značných mezer. Je zde vidět velké zlepšení homogenity materiálu. Mezi vzorky ze série 1 a 5 je také značný rozdíl v podílu vláken v kompozitu.

Na obr. 3.10 je snímek z CT zobrazující pórovitost materiálu, konkrétně se jedná o výrobní sérii 5 kompozitních vzorků. Jsou zde opět zřejmé mezery mezi vlákny, ale i menší póry, tedy vzduchové bubliny.

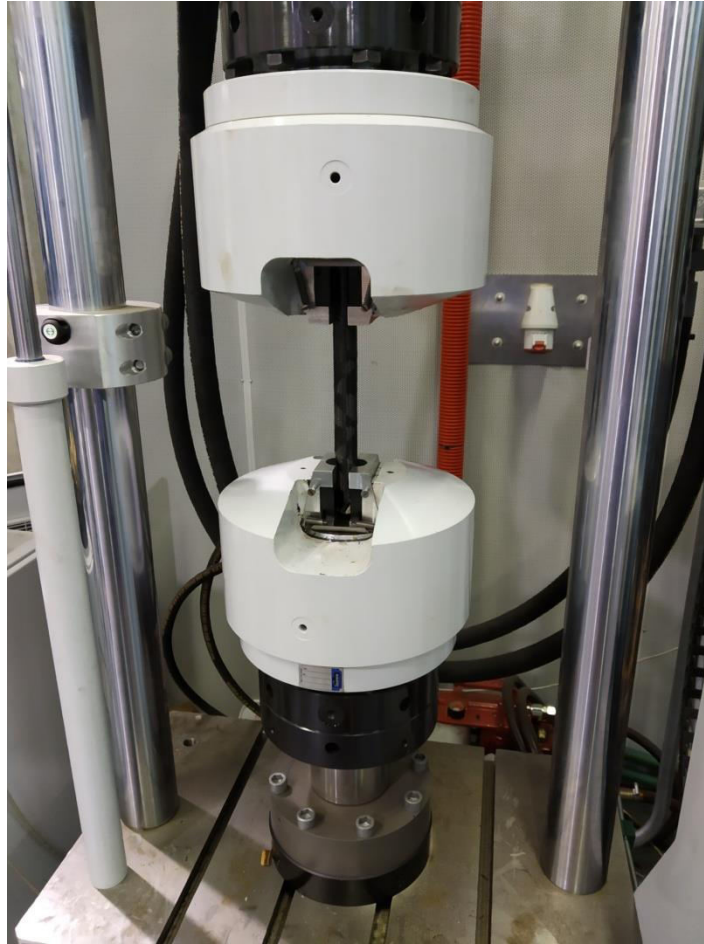


Obr. 3.10: Snímek z CT, zobrazení pórovitosti kompozitního vzorku - výrobní série 5

3.6 Statická zkouška krutem

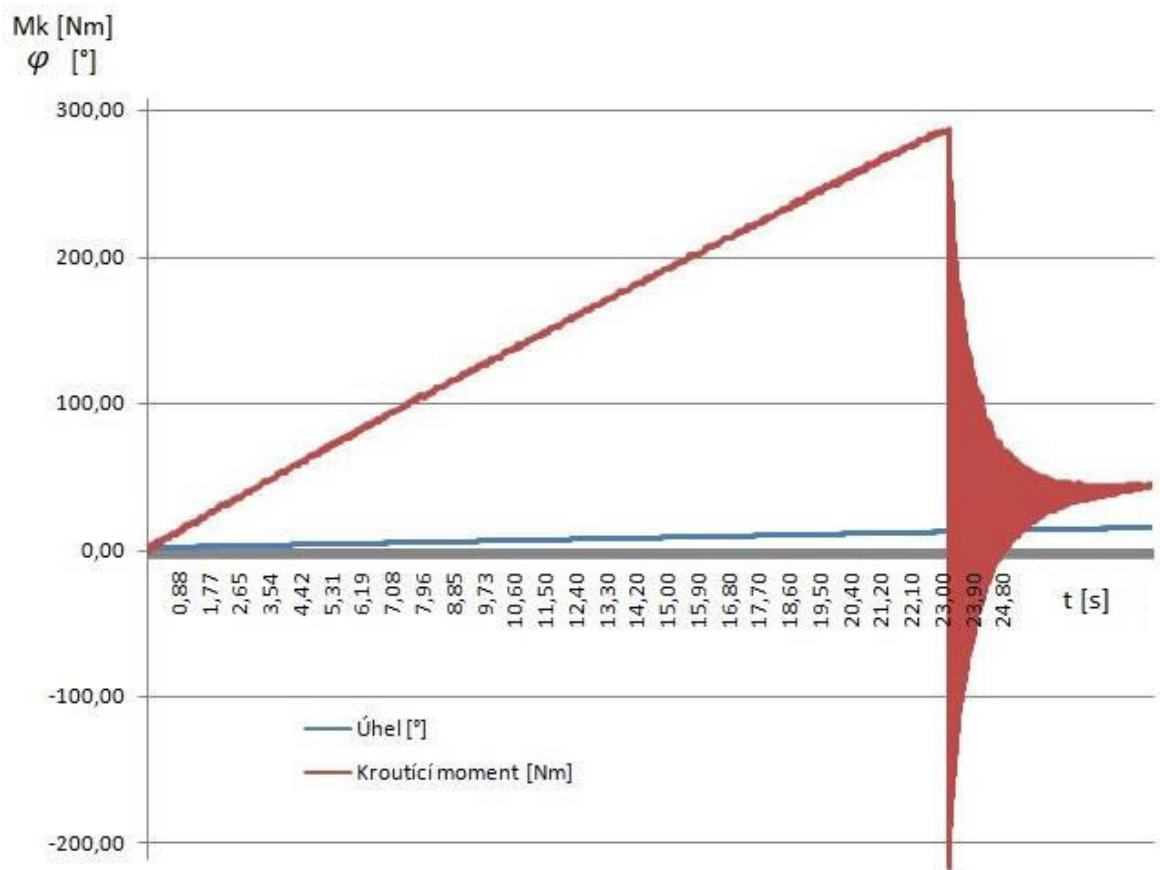
Statické zkoušce krutem bylo podrobena 20 zkušebních vzorků, tedy 4 vzorky z každé výrobní série v závislosti na předepínací síle vláken, viz tab. 3.1. Vnější průměr vzorků je dán jejich vnitřním průměrem 20 mm a tloušťkou stěny, viz tab. 3.2.

Experimentální měření bylo provedeno na hydraulickém zkušebním stroji Inova (Fu - 0 - 160 - 1600 - V2), viz obr. 3.11. Pro upnutí vzorků bylo nutné vyrobit nové upínací čelisti zařízení z důvodu většího průměru testovaných vzorků než jsou standardní vzorky pro statickou zkoušku krutem. Zkušební vzorky kruhového průřezu byly jedním koncem nehybně upnuty a na druhém konci zatíženy zvětšujícím se krutícím momentem za podmínek: pootočení horní čelisti zkušebního stroje o 20° za čas 40s. Aby nedošlo k deformaci kompozitní trubky čelistmi, byly do konců trubky před upnutím vloženy ocelové válečky. Po upnutí vzorků do zařízení byla vzdálenost mezi čelistmi 225 mm.



Obr. 3.11: Zkušební zařízení Inova (Fu - 0 - 160 - 1600 - V2)

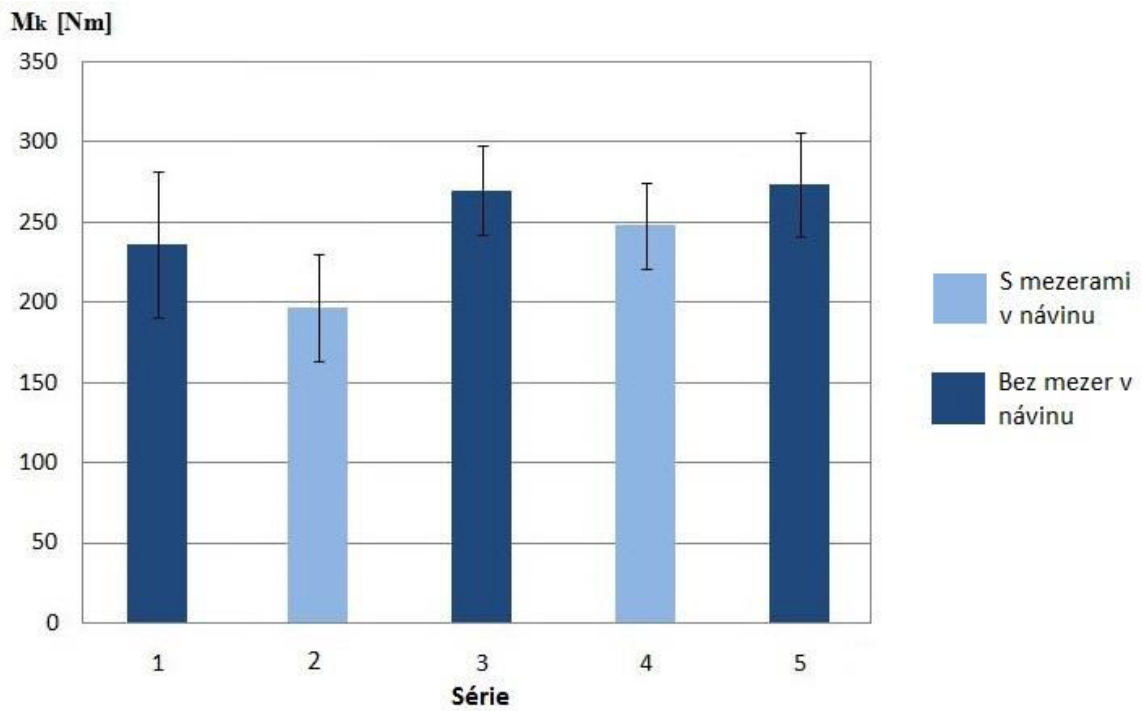
Statickou zkouškou krutem byl sledován úhel natočení krajních průřezů (φ) a maximální kroutící moment (M_k), tedy kroutící moment, kdy bude dosažena mez pevnosti v krutu. Na obr. 3.12 je uveden příklad grafické závislosti časového průběhu kroutícího momentu a úhlu natočení krajních průřezů při statické zkoušce krutem pro vzorek kompozitního dílu z výrobní série 5, tedy pro vzorek s předepínací silou vláken při navíjení 25,7 N. Kompletní přehled dosažených hodnot kroutícího momentu (M_k) a maximálního úhlu natočení krajních průřezů (φ_{MAX}) pro všechny vzorky je uveden v tab. 3.2. Jejich průměrné hodnoty v závislosti na výrobních sériích jsou znázorněny na obr. 3.13 a na obr. 3.14.



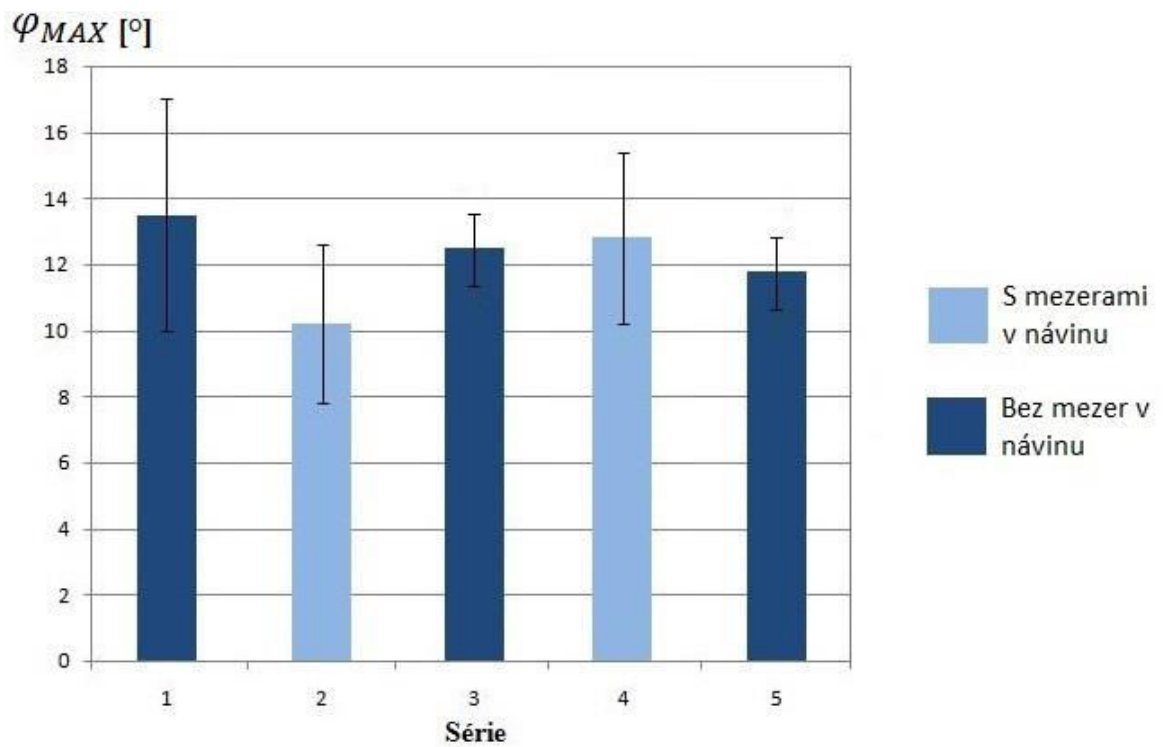
Obr. 3.12: Časový průběh statické zkoušky krutem vzorku 5.2

Tab. 3.2: Výsledky statické zkoušky krutem

Série	Číslo vzorku	Předepínací síla F [N]	Tloušťka stěny t_S [mm]	Maximální kroutcí moment M_k [Nm]	Maximální úhel φ_{MAX} [°]	
1	1	2,6	1,40	312	19,1	
	2			194	9,5	
	3			212	12,1	
	4			225	13,2	
	Průměrná hodnota				236	13,5
	Směrodatná odchylka				45,4	3,5
2	1	9,6	1,44	246	13,9	
	2			176	8,4	
	3			210	10,7	
	4			159	7,9	
	Průměrná hodnota				197	10,2
	Směrodatná odchylka				33,4	2,4
3	1	9,6	1,50	312	13,8	
	2			271	13,2	
	3			236	10,3	
	4			259	12,8	
	Průměrná hodnota				270	12,5
	Směrodatná odchylka				27,6	1,3
4	1	16,6	1,64	265	14,7	
	2			217	9,3	
	3			228	11,4	
	4			282	15,7	
	Průměrná hodnota				248	12,8
	Směrodatná odchylka				26,5	2,6
5	1	25,7	1,83	236	10,2	
	2			287	12,3	
	3			320	13,8	
	4			252	10,7	
	Průměrná hodnota				274	11,8
	Směrodatná odchylka				32,5	1,4



Obr. 3.13: Průměrné hodnoty maximálního kroučícího momentu M_k v závislosti na výrobní sérii



Obr. 3.14: Průměrné hodnoty maximálního úhlu φ_{MAX} v závislosti na výrobní sérii

Výsledky statické zkoušky krutem vykazují značný rozptyl v měřených hodnotách, jehož možné příčiny jsou diskutovány v kap. 4. Z výsledků statické zkoušky krutem je patrné, že nejméně odolnými vzorky byla série kompozitních dílů 2, která byla zhotovena se značnými mezerami v návínu. Při porovnání série vzorků 2 a 3 (se shodnou předepínací silou), vykazuje série 3, kde nebyly pozorovány mezery, značné zlepšení hodnot maximálního krouticího momentu. Další sérií vzorků, kde se vyskytovaly mezery mezi vlákny je série 4. Zde jsou patrné vyšší hodnoty úhlu natočení krajních průřezů (mezi čelistmi) a poměrně nízká tuhost. Z tohoto důvodu je zřejmé, že pravidelnost a přesnost návínu je pro výsledné mechanické vlastnosti navíjeného kompozitu zásadní.

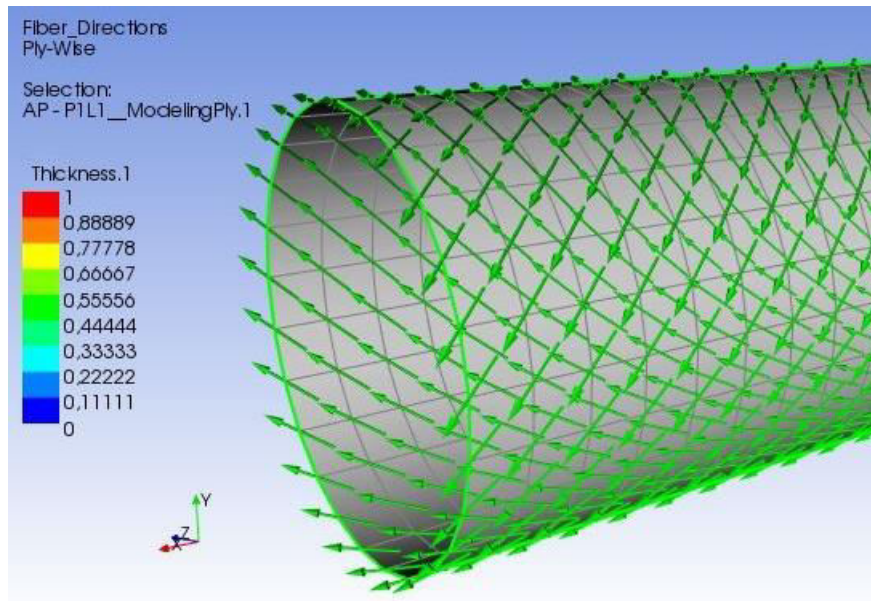
Při porovnání vzorků bez mezer mezi náviny (tj. série vzorků 1, 3 a 5) lze usuzovat, že se zvětšující se předepínací silou dochází ke zlepšení mechanických vlastností materiálu v krutu. Je třeba však brát v úvahu, že síla stěny kompozitní trubky se s předpětím zvyšovala také.

Poměrně dobrých výsledků dosáhla série 3, která měla tloušťku stěny 1,5 mm a výslednými hodnotami maximálního krouticího momentu a úhlu natočení se přibližovala vzorkům série 5 s největší předepínací silou, však také s největší tloušťkou stěny dílu. Z tohoto důvodu byla konfigurace výroby vzorků třetí série použita při výrobě finálního kompozitního dílu pro závodní vůz FS TUL Racing, viz kap. 3.7.

3.7 Finální návrh součásti

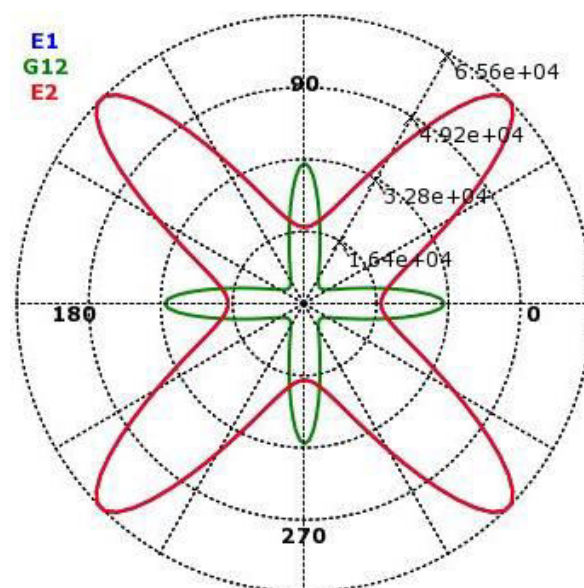
Návrh spojovací hřídele byl uskutečněn za pomoci software ANSYS a jeho modulu ACP (ANSYS Composite PrepPost).

Nejprve byla definována geometrie součásti. Dále byl součásti přiřazen předdefinovaný materiál „Epoxy Carbon UD (230 GPa) Wet“. Tento materiál byl zvolen kvůli své podobnosti s materiálem použitým při výrobě vzorků v předcházející etapě. Poté byla vytvořena síť prvků s velikostí jednoho prvku 5 mm. Následně byly definovány jednotlivé vrstvy laminátu se zohledněním směru vláken (viz obr. 3.15). Směr vláken je uvažován vzhledem k podélné ose trubky. Volba směru vláken je závislá na následném způsobu zatížení součásti. Vzhledem k zatížení součásti statickým krutem je výhodou vysoký modul pružnosti ve smyku materiálu.



Obr. 3.15: Směr vláken laminátu

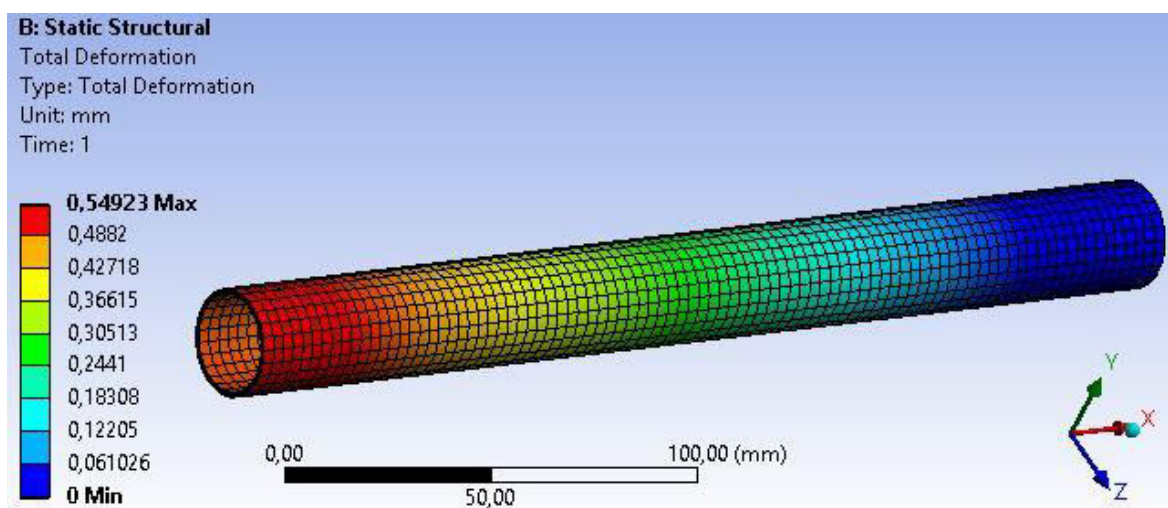
Definovány byly 4 vrstvy laminátu (oproti přípravné fázi, kde bylo použito vrstev 5) se směry vláken $\pm 45^\circ$. Dle polárního diagramu (obr. 3.16), který byl na základě této skladby vygenerován, propůjčuje tato skladba laminátu nejvyšší modul pružnosti ve smyku (G_{12}). Přesná hodnota byla „preprocesorem“ stanovena na 31 876 MPa. Pro definování tloušťky vrstvy laminátu byl změřen vzorek ze série 3 posuvným měřidlem a následně dopočítána tloušťka 1 vrstvy. Tloušťka jedné vrstvy laminátu byla stanovena na $t_L = 0,3 \text{ mm}$.



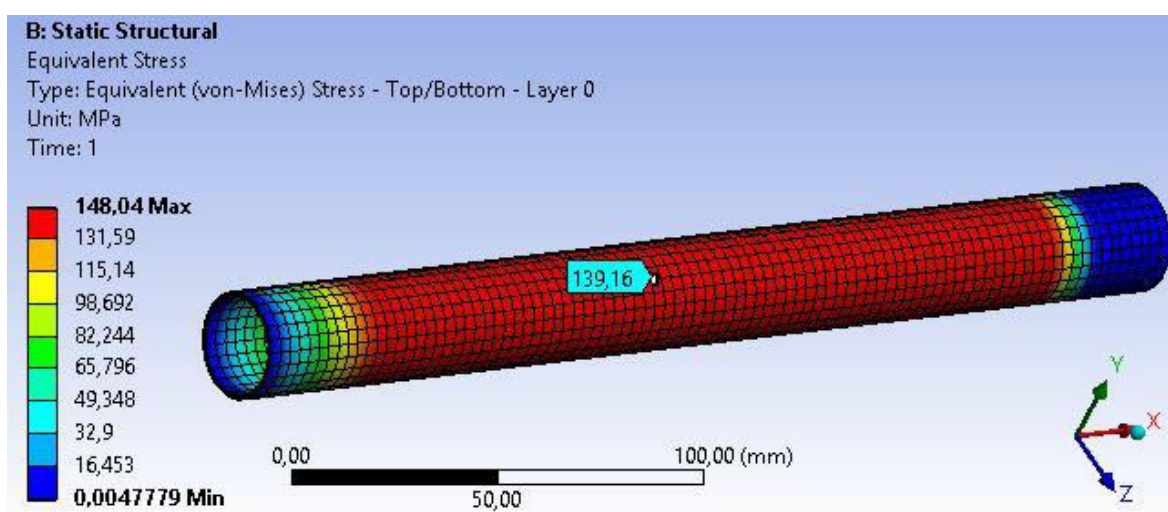
Obr.3.16: Polární diagram pro směr vláken $\pm 45^\circ$

Následně byl vytvořen pevný model (Solid Model) a byl importován do modulu „Static Structural“, kde byly definovány okrajové podmínky. Těmito okrajovými podmínkami bylo zavedení kroutícího momentu na jednom konci součásti a fixace součásti na konci druhém. Vzhledem k následnému spojení s drážkováním pomocí vlepené vložky byly tyto okrajové podmínky umístěny na vnitřní plochu součásti o délce 40 mm.

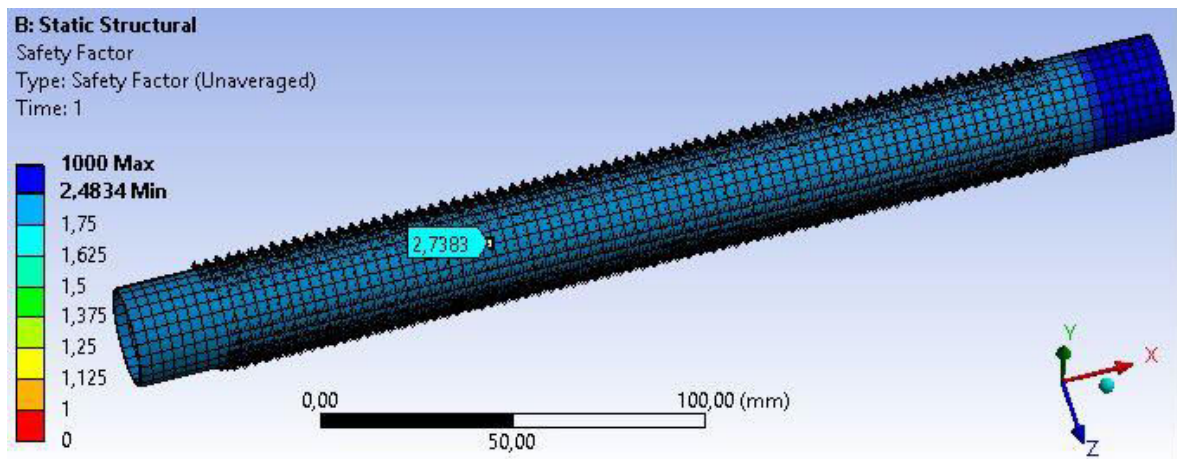
Dále byl proveden výpočet absolutní deformace, napětí a součinitele bezpečnosti, viz obr. 3.17 až obr. 3.18. Pro výpočet součinitele bezpečnosti bylo zvoleno kritérium Tsai - Wu. Pro toto kritérium byl součinitel bezpečnosti nejmenší v porovnání s ostatními kritérii (kritérium maximálního napětí, Puck, Tsai-Hill atd.). Maximální napětí v součásti dosáhlo hodnoty 148 MPa, viz obr. 3.18. Minimální hodnota součinitele bezpečnosti k byla stanovena simulačním softwarem na hodnotu $k = 2,48$, viz. obr. 3.18.



Obr. 3.17: Absolutní deformace



Obr. 3.18: Ekvivalentní napětí



Obr.3.19: Koeficient bezpečnosti

Na základě modulu pružnosti ve smyku materiálu (G), zatěžujícího momentu (M_k) a polárního momentu setrvačnosti průřezu (J_P), lze stanovit relativní úhlové natočení počátečního a koncového průřezu (φ) dle vztahu (3.1) [18].

$$\varphi = \frac{M_k l}{G J_P}, \quad (3.1)$$

Pomocí modulu pružnosti ve smyku kompozitu získaného pomocí „preprocesoru“ $G = 31\,876\text{ MPa}$ a zadaných parametrů délky $l = 205\text{ mm}$ (délka mezi vložkami s evolventním drážkováním) a kroutícího momentu $M_k = 82,6\text{ Nm}$ (viz kap. 3.1) bylo vypočteno relativní natočení krajních průřezů $\varphi = 2^\circ$. Tato hodnota je poměrně vysoká. Hodnota natočení krajních průřezů hřídele pro přesné převodové ústrojí se pohybuje v rozmezí $0,25^\circ - 0,5^\circ$ [18]. Krouticím momentem $M_k = 82,6\text{ Nm}$ může být součást však namáhána pouze v krajních případech (náhlá změna směru otáčení volantu z jedné krajní polohy do druhé při brzdění s výbornou přilnavostí pneumatik). Běžně se hodnota kroutícího momentu pohybuje v rozmezí $(4 - 11)\text{ Nm}$ [16]. Pro tuto hodnotu kroutícího momentu 11 Nm vychází úhel natočení $\varphi = 0,27^\circ$. Na základě této skutečnosti byla shledána tuhost součásti za dostatečnou.

3.8 Výroba a zatěžování spojovací hřídele řízení

Pro výrobu kompozitní hřídele bylo využito zkušeností a výsledků z výroby zkušebních vzorků, viz ka. 3.4. Požadované pevnostní a rozměrové parametry jsou uvedeny v kap. 3.1. Jedná se především o vnitřní průměr hřídele 24 mm a délku 280 mm . Materiál pro výrobu hřídele byl použit stejný jako u zkušebních vzorků, viz kapitola 3.4. Dále byla provedena statická zkouška krutem pro ověření dosažených vlastností. Pro spojení s evolventním

drážkováním převodky a převodovky řízení bylo nutné vlepení vložek s evolventním drážkováním. To obnáší výpočet a provedení lepeného spoje a volbu vhodného lepidla.

3.8.1 Navíjení

Při výrobě bylo postupováno obdobně jako při výrobě vzorků. Povrch navíjecího trnu byl před navíjením ošetřen separačním voskem. Následně byly navinuty 4 vrstvy prosyceného uhlíkového vlákna v orientaci $\pm 45^\circ$. Předpětí bylo zvoleno na základě dobrých výsledků vzorků ze 3. série, tedy 9,6 N. Bylo dbáno na správnou konfiguraci šířky vlákna v softwaru, a docíleno tak bylo návínů bez mezer. Po navinutí byl trn sejmut z navíjecího zařízení a vložen do temperační pece. Zde byl kompozit za rotace tepelně vytvrzován po dobu 10 hodin při teplotě 140 °C. Po zchladnutí byl navíjecí trn vytlačen pomocí přípravku a dále byly odřezány konce kompozitního výrobku s přebytečným materiálem. Následně byl kompozitní výrobek dělen na požadované rozměry.

3.8.2 Statická zkouška krutem

Pro ověření mechanických vlastností kompozitního výrobku byla opět provedena statická zkouška krutem za shodných podmínek, které jsou uvedeny v kap. 3.6. Testovány byly dva vzorky, jejich dosažené mechanické vlastnosti a další parametry zachycuje tab. 3.3. Po upnutí do kleštin byla volná délka trubky 205 mm.

Tab. 3.3: Výsledky statické zkoušky krutem pro spojovací hřídel řízení

Číslo vzorku	Předepínací síla F [N]	Tloušťka stěny t_s [mm]	Maximální kroučící moment M_k [Nm]	Maximální úhel φ_{MAX} [°]	Úhel po zatížení $M_k = 82,6 \text{ Nm}$ $\varphi_{82.6}$ [°]
1	9,6	1,2	228	6,6	1,93
2			176	5	2,18

3.8.3 Lepený spoj

Pro přenos kroučícího momentu z převodovky na hřídel a dále ze hřídele na převodku řízení je využito evolventního drážkování. Za tímto účelem jsou do kompozitního hřídele vlepeny hliníkové vložky s drážkováním, viz obr. 3.20. Pro vytvoření lepeného spoje bylo na základě konzultací s pracovníky firmy SKOLIL KOMPOZIT s.r.o. vybráno lepidlo Spabond 340LV HT. Technický list je k dispozici v příloze 3. Jedná se o dvousložkový epoxidový systém s tepelným vytvrzením.



Obr. 3.20: Hliníkové vložky (EN AW 7075) s evolventním drážkováním

Lepený spoj byl vypočten dle [20] ze vztahu (3.2) pro střední smykové napětí:

$$\tau_S = \frac{M_T}{2 \pi r^2 l_t} \leq 0,2 \tau_m, \quad (3.2)$$

kde τ_S - střední smykové napětí

M_T - kroutící moment

r - vnitřní poloměr kompozitní trubky

l_t - délka lepeného spoje

τ_m - mezní hodnota smykového napětí lepidla

Ze vztahu (3.2) byla vyjádřena rovnice (3.3) pro kroutící moment, který je možné lepeným spojem přenášet:

$$M_T = 0,2 \tau_m 2 \pi r^2 l_t \quad (3.3)$$

Parametry pro výpočet uvádí tab. 3.4.

Tab. 3.4: Parametry pro výpočet přenášeného kroutícího momentu

Parametr	Hodnota	Jednotka
τ_m	30	MPa
r	12	mm
l	40	mm

Výpočet maximálního kroutícího momentu:

$$M_T = 0,2 * 30 * 10^6 * 2 * \pi * 0,012^2 * 0,040 = 217,1 Nm$$

Protože přenášený kroutící moment $M_k = 82,6 Nm$ je výrazně menší než vypočtená hodnota maximálního přenášeného kroutícího momentu lepeným spojem:

$$M_T > M_k,$$

bylo rozhodnuto, že lepený spoj dle výpočtu splňuje požadované pevnostní parametry.

Pro vytvoření mezery pro vyplnění lepidlem byly při lepení umístěny po obvodu vlepované vložky 3 dráty o průměru $d = 0,1 mm$. Dráty byly umístěny jednotlivě po 120° , aby byla zaručena sousost kompozitní trubky a hliníkové vložky.

Po zavadnutí lepidla byla součást vložena do temperační pece a ohřívána po dobu 5 hodin na teplotu $70^\circ C$.

Konečná podoba kompozitního hřídele s vlepenými hliníkovými vložkami, po odstranění přetoků lepidla a jeho vytvrzení je zachycena na obr. 3.21.



Obr. 3.21: Kompletní kompozitní hřídel z uhlíkových vláken

4 Zhodnocení dosažených výsledků

Pro lepší reprodukovatelnost výroby kompozitních dílů a nastavení předepínací síly vlákna v širším rozsahu hodnot by bylo vhodné zkonstruovat jiný typ brzdícího mechanismu. Současné řešení v podobě pružného pásu neumožňuje vyšší předepínací sílu než 26 N. Na této síle se podílí i vedení vlákna pryskyřičnou lázní pomocí válečků, které samotné klade odpor 2,6 N. Tyto hodnoty byly naměřeny pomocí aparatury Dewetron DEWE - 5000 se snímačem síly GTM 500N. Další nevýhodou současného brzdícího mechanismu je únava materiálu pružného pásu. Je zřejmé, že po několika opakování procesu navíjení budou hodnoty předepínací síly i při utažení pružného pásu stále ke stejným značkám mírně odlišné.

Po nastavení předpětí vlákna se vlivem zakřivení koncového válečku vlákno deformovalo a překládalo. Nebylo tedy v ideálním tvaru pásu. Vlivem tohoto jevu docházelo k mírným nepravidlostem návinnu a zvětšení tloušťky stěny oproti případu s nejmenším předpětím vlákna. Pro zachování ideálního tvaru vlákna by bylo vhodné zkonstruovat koncový váleček tak, aby vlákno nemělo možnost sklouznout z vedení a zároveň, aby nedocházelo vlivem jeho zakřivení k překládání vlákna.

Výrobě požadované součásti předcházelo změření šířky vlákna v místě navíjení na trn. Tato hodnota je jedním ze vstupních parametrů pro konfiguraci navíjecího procesu a je zásadní pro návinn bez mezer. Vliv uspořádanosti návinnu je i přes výrazný rozptyl měřených hodnot jednoznačný. Proto byl na tento parametr při výrobě kompozitního dílu kladen důraz.

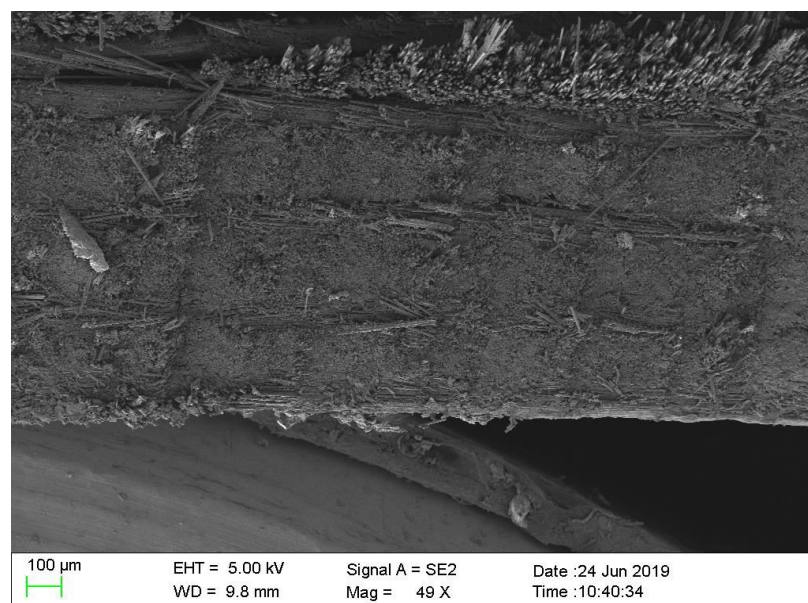
Výsledky dosažené statickou zkouškou krutem vykazují značný rozptyl jak u vzorků pro určení vhodného procesu navíjení, tak u vzorků představujících konečný kompozitní díl (spojovací hřídel). Lze se domnívat, že značnou roli ve velikosti rozptylu měřených hodnot (vyjádřeného směrodatnou odchylkou) sehrává homogenita vzorků a to jak z hlediska prosycení vláken epoxidovou pryskyřicí, tak také z hlediska rovnoměrnosti tloušťky stěn kompozitní trubky. Významnou úlohu má rovněž adheze vláken k polymerní matici, jež je do značné míry předurčena povrchovou úpravou vláken, tzv. sizingem (resp. vhodností matrice pro dané vlákno). Povrchová úprava vláken je know - how výrobce, který zpravidla pro dané vlákno doporučuje vhodnou polymerní matici. Jak ukazují výsledky elektronové mikroskopie, které byly provedeny na pokovených vzorcích platinou (o tloušťce 2 nm) na zařízení Carl Zeiss ULTRA Plus, nedochází u kompozitů

k uspokojivé adhezi vláken s matricí (mezi vlákny a matricí se nacházejí volné prostory), viz obr. 4.1 až obr. 4.6, což může ovlivňovat mechanické vlastnosti kompozitů (mez pevnosti v krutu), resp. jejich rozptyl v souboru měřených vzorků. Na základě této skutečnosti by bylo vhodné provést zkoušení ve větším množství vzorků, případně se v navazující studii zabývat vhodnou povrchovou úpravou vláken.

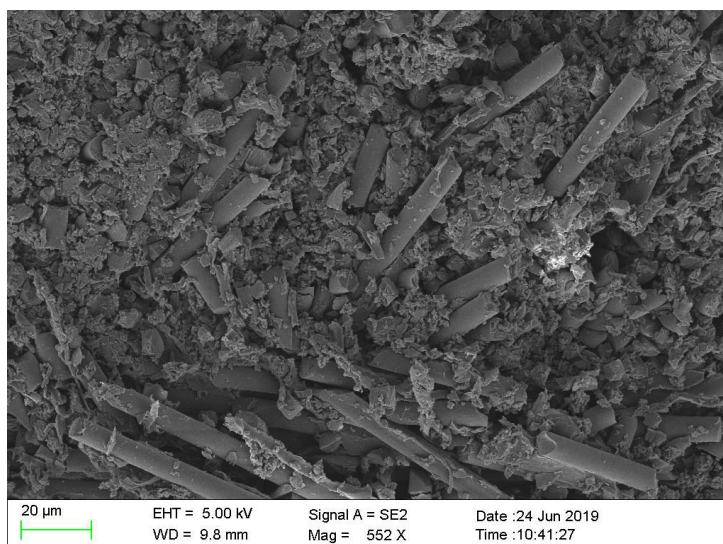
I přes značný rozptyl výsledků statické zkoušky krutem pro vzorky představující konečný kompozitní díl je zřejmé, že mez pevnosti materiálu je výrazně vyšší než bude maximální zatížení součásti. Vzorky splňují podmínku požadované bezpečnosti.

Pro přesnější návrh součásti by bylo vhodné znát reálné hodnoty zatížení součásti vyplývající z přesných měření pomocí tenzometrů při reálných provozních situacích. Tyto hodnoty nebyly v době zpracovávání této bakalářské práce k dispozici.

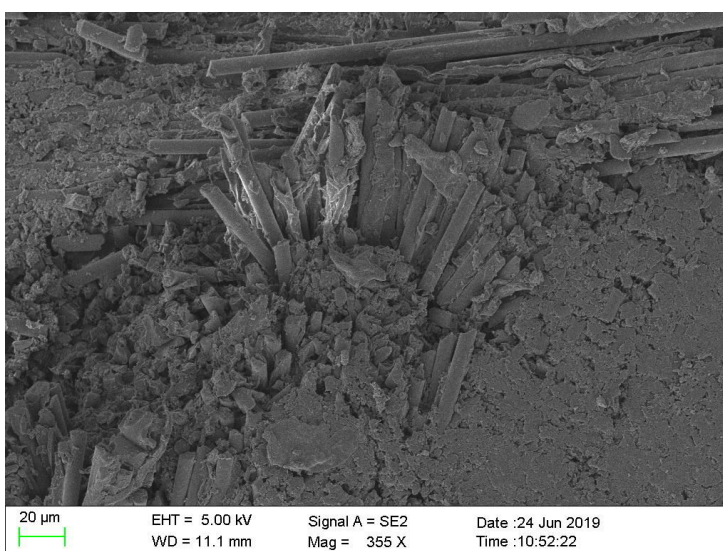
Při porovnání výsledků simulace a výsledků statické zkoušky krutem kompozitní součásti je nutné brát ohled na rozdílnou délku součásti. Při upnutí vzorku do kleštin zkušebního zařízení byla volná délka mezi kleštinami 205 mm. Pro tuto hodnotu délky byly stanoveny hodnoty natočení krajních průřezů uvedené v tab. 3.3. V numerické simulaci se součást kroutí v délce 280 mm. Dalším rozdílem jsou okrajové podmínky. V numerické simulaci jsou definovány kroučícím momentem a fixací součásti pomocí vnitřních ploch trubky. Při statické zkoušce krutem byly však reálně krouceny vnější plochy. Tato skutečnost má vliv na odchylku hodnot dosažených simulací od hodnot dosažených statickou zkouškou krutem.



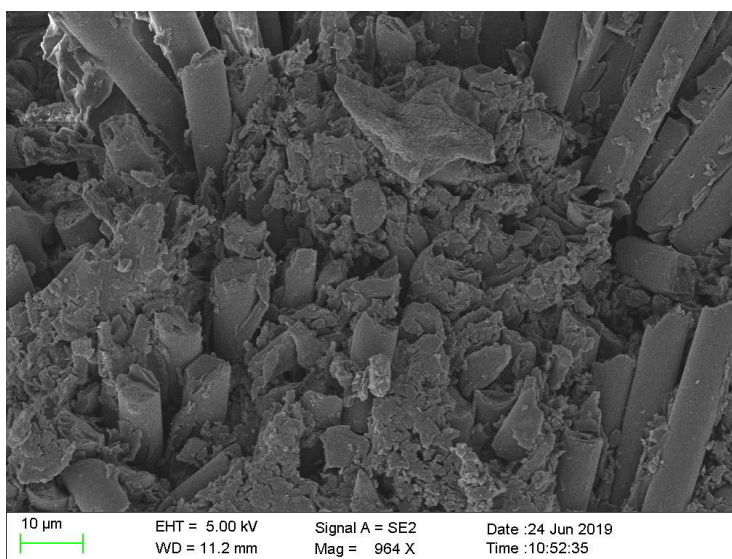
Obr. 4.1: Vnitřní struktura kompozitu výrobní série 1: díl s naměřeným $M_k=194 \text{ Nm}$ (SEM)



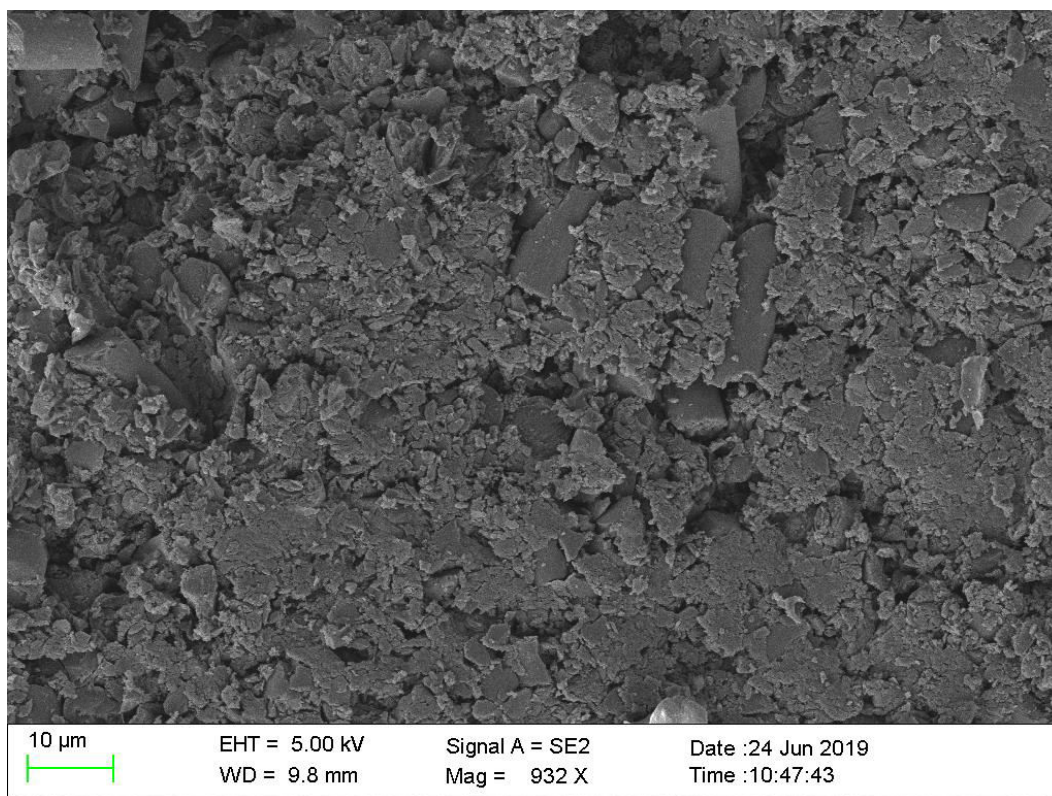
Obr. 4.2: Vnitřní struktura kompozitu výrobní série 1: díl s naměřeným $M_k=194 \text{ Nm}$ (SEM)



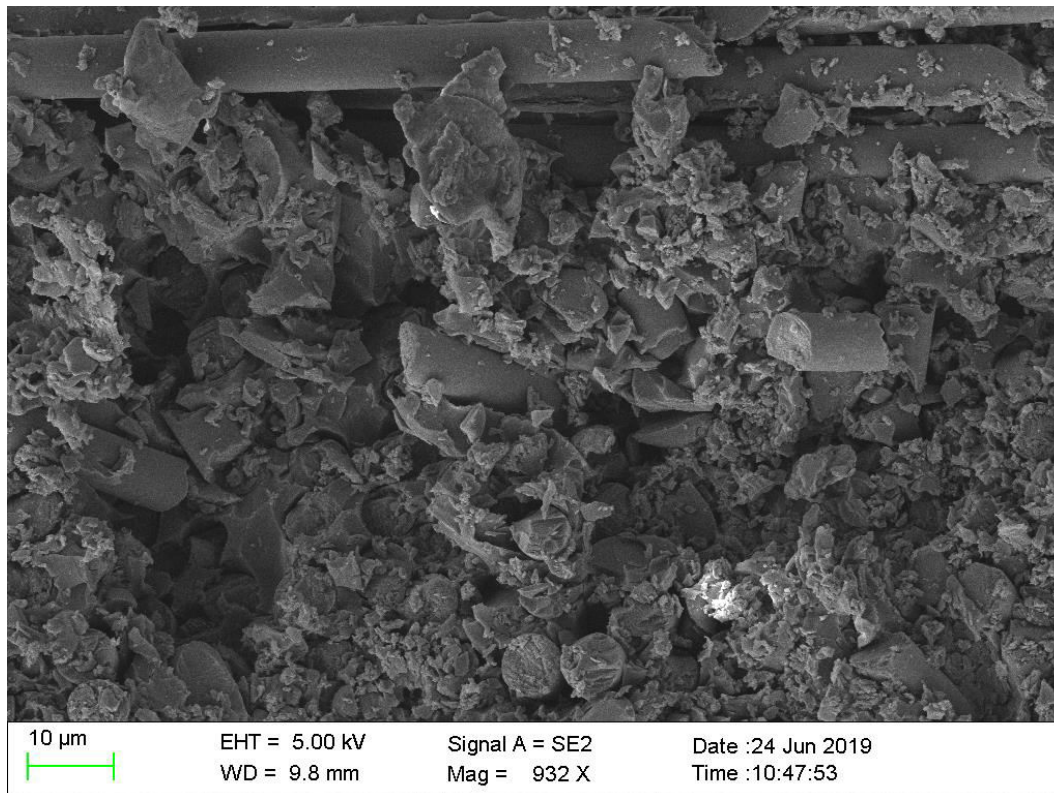
Obr. 4.3: Vnitřní struktura kompozitu výrobní série 5: díl s naměřeným $M_k=320 \text{ Nm}$ (SEM)



Obr. 4.4: Vnitřní struktura kompozitu výrobní série 5: díl s naměřeným $M_k=320 \text{ Nm}$ (SEM)



Obr. 4.5: Vnitřní struktura kompozitu výrobní série 1: díl s naměřeným $M_k=312$ Nm (SEM)



Obr. 4.6: Vnitřní struktura kompozitu výrobní série 1: díl s naměřeným $M_k=312$ Nm (SEM)

5 Závěr

Cílem této bakalářské práce byl návrh a zdokumentování procesu výroby navíjené kompozitní součásti z uhlíkových vláken pro vůz Formula Student. Práce je členěna do několika částí. Teoretická část práce seznamuje čtenáře s polymerními kompozity a technologiemi jejich výroby. Pozornost je věnována technologii navíjení uhlíkových vláken. V praktické části této práce je zachycen výběr a návrh kompozitní součásti a následně navržen a proveden technologický proces výroby.

Návrh součásti byl vytvořen pomocí simulačního softwaru ANSYS a jeho modulu ACP. Tím byly získány potřebné údaje pro návrh technologického procesu výroby. Pro uskutečnění výroby kompozitní součásti bylo nejdříve nutné sestavení navíjecího zařízení a následné provedení potřebných konstrukčních úprav. Dalším krokem před samotnou výrobou součásti byla výroba navíjecího trnu. Pro tepelné vytvrzení kompozitu bylo zkonstruováno a vyrobeno temperační zařízení s regulační technikou a pohonem navíjecího trnu. K zaručení vytažení navíjecího trnu z navinutého kompozitu byl zkonstruován a vyroben vylačovací přípravek. Pro co nejlepší konfiguraci navíjecího procesu byly nejprve zhotoveny zkušební vzorky, které byly podrobeny studiu struktury pomocí počítačové tomografie a mechanických vlastností pomocí statické zkoušky krutem. Snímky z CT a výsledky statické zkoušky krutem jsou znázorněny pomocí obrázků, tabulek a grafů. Výsledky statické zkoušky krutem disponují značným rozptylem hodnot. Pro lepší prozkoumání závislosti předpětí vlákna při navíjení by bylo vhodné zajistit větší rozsah hodnot pro předpětí a větší počet zkušebních vzorků. Významným faktorem, který značně ovlivňuje mechanické vlastnosti kompozitu se stala pravidelnost a rovnoměrnost navinutého vlákna, tedy návín s nebo bez značných mezer. Po zvolení vhodné konfigurace navíjecího procesu byly vyrobeny zkušební vzorky s parametry odpovídajícími výsledné kompozitní součásti a byla opět provedena statická zkouška krutem. Výsledky měly opět značný rozptyl, ale splňovaly pevnostní podmínky pro použití výrobku jako kompozitní hřídele řízení. Následně byla kompozitní součást dokončena vlepáním hliníkové vložky s evolventním drážkováním. Poté byl lepený spoj tepelně vytvrzen. Spojovací hřídel byla odlehčena díky výrobní technologii navíjení uhlíkových kompozitů z původní hmotnosti 318 g na hmotnost 89 g. Došlo tedy k redukci hmotnosti součásti o 72%. Kompozitní hřídel řízení byla úspěšně vyrobena a následně namontována do závodního vozu týmu FS TUL Racing, jež bude slavnostně představen veřejnosti dne 28. června 2019 pod názvem Anička. Jedná se o třetí generaci závodního vozu týmu FS TUL Racing..

Seznam použité literatury

- [1] STEIDL, Josef. Plasty a kompozity naplňují materiálové požadavky moderního strojírenství. *MM* [online]. 2005, 2005(1), 35 [cit. 2019-02-09]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/plasty-a-kompozity-naplnuji-materialove-pozadavky-moderniho-strojirens.html>
- [2] GRÉGR, Jan. Povrchové vlastnosti uhlíkových vláken. *Zpráva pro Výzkumné centrum „Textil“* [online]. 2004, (1), 1-74 [cit. 2019-02-09]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/10797731-Povrchove-vlastnosti-uhlikovych-vlaken.html>
- [3] MINSCH, Niklas, F.H. HERRMANN, T. GEREKE, A. NOCKE a C. CHERIF. Analysis of filament winding processes and potential equipment technologies. *Procedia CIRP: 1st CIRP Conference on Composite Materials Parts Manufacturing* [online]. 2017, 66, 125-130 [cit. 2019-02-08]. ISSN 2212-8271. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827117304729>
- [4] MERTINY, Pierre a Francis ELLYIN. Influence of the filament winding tension on physical and mechanical properties of reinforced composites. *Composites Part A Applied Science and Manufacturing* [online]. 2002, 33(12), 1615-1622 [cit. 2019-02-08]. DOI: 10.1016/S1359-835X(02)00209-9
- [5] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery*. Verze knihy: 15. Online: [Code Creator], 2015. ISBN 978-80-88058-66-3.
- [6] DAĎOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [7] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003. ISBN 80-214-2443-5.
- [8] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [9] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN isbn80-7080-617-6
- [10] *Manufacturing* [online]. [cit. 2019-06-05]. Dostupné z: <https://netcomposites.com/guide-tools/guide/manufacturing/>
- [11] *Vacuum Infusion Molding* [online]. [cit. 2019-06-05]. Dostupné z: <https://www.moldedfiberglass.com/processes/processes/closed-molding-processes/vacuum-infusion-molding>

- [12] TSUI, Chris. BMW Is Dropping the M3 And M4's Carbon Fiber Driveshaft for a Steel One. *The Drive* [online]. [cit. 2019-06-08]. Dostupné z: <https://www.thedrive.com/sheetmetal/13478/bmw-is-dropping-the-m3-and-m4s-carbon-fiber-driveshaft-for-a-steel-one>
- [13] Karbonový kardan. In: *Autoforum.cz* [online]. [cit. 2019-06-07]. Dostupné z: <https://www.autoforum.cz/technika/antipokrok-bmw-m3-prijde-o-karbonovy-kardan-vinen-je-obvykly-podezrely/obrazek/3>
- [14] *Coriolis Group acquires filament winding specialist MF TECH* [online]. In: . 2018 [cit. 2019-06-09]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/news/coriolis-group-acquires-filament-winding-specialist-mf-tech>
- [15] VYHNÁLEK, Michal. *Mechanické vlastnosti oplétaných kompozitních tyčí*. Liberec, 2012. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci.
- [16] MALAD, Jan. *Návrh a konstrukce řízení pro studentskou formuli*. Liberec, 2018. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Prof. Dr. Ing. Pavel Němeček.
- [17] *FORMULA SAE* [online]. [cit. 2019-06-09]. Dostupné z: <https://www.fsaeonline.com/cdswb/gen/DocumentResources.aspx>
- [18] PEŠÍK, Lubomír. *Části strojů, 2.díl*. Vyd. 5., dopl. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. ISBN 978-80-7494-184-9.
- [19] *Využití elektrických vlastností kompozitních materiálů s modifikovanou cementovou matricí* [online]. Brno, 2015 [cit. 2019-06-14]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=111135. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [20] *Spojování kompozitních materiálů s kovem* [online]. Plzeň, 2016 [cit. 2019-06-20]. Dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/24958/1/Disertacni_prace_Bernardin_2016.pdf. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Doc. Ing. Václava Lašová, Ph.D.

Seznam příloh

Příloha č. 1: Technický list uhlíkového vlákna TORAY T300

Příloha č. 2: Technický list epoxidového systému POX L20C

Příloha č. 3: Technický list epoxidového lepidla Spabond 340LV HT

Příloha č. 1

TORAYCA® T300 DATA SHEET

Baseline carbon fiber used in aerospace applications. Has 30 year production history and is known for its balanced composite properties, high quality, consistency, reliability and supplyability.

FIBER PROPERTIES

	English	Metric	Test Method
Tensile Strength	512 ksi	3,530 MPa	TY-030B-01
Tensile Modulus	33.4 Msi	230 GPa	TY-030B-01
Strain	1.5 %	1.5 %	TY-030B-01
Density	0.064 lbs/in ³	1.76 g/cm ³	TY-030B-02
Filament Diameter	2.8E-04 in.	7 µm	
Yield			
1K	22,568 ft/lbs	66 g/1000m	TY-030B-03
3K	7,523 ft/lbs	198 g/1000m	TY-030B-03
6K	3,761 ft/lbs	396 g/1000m	TY-030B-03
12K	1,862 ft/lbs	800 g/1000m	TY-030B-03
Sizing Type & Amount	40A, 40B 40D 50A, 50B	1.0 % 0.7 % 1.0 %	TY-030B-05 TY-030B-05 TY-030B-05
	Twist	Twisted, Untwisted, or Never twisted	

FUNCTIONAL PROPERTIES

CTE	-0.41 $\alpha \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Specific Heat	0.19 Cal/g $\cdot^{\circ}\text{C}$
Thermal Conductivity	0.025 Cal/cm $\cdot\text{s}\cdot^{\circ}\text{C}$
Electric Resistivity	1.7 $\times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$
Chemical Composition: Carbon	93 %
Na + K	<50 ppm

COMPOSITE PROPERTIES *

Tensile Strength	270 ksi	1,860 MPa	ASTM D-3039
Tensile Modulus	20.0 Msi	135 GPa	ASTM D-3039
Tensile Strain	1.3 %	1.3 %	ASTM D-3039
Compressive Strength	215 ksi	1,470 MPa	ASTM D-695
Flexural Strength	260 ksi	1,810 MPa	ASTM D-790
Flexural Modulus	18.0 Msi	125 GPa	ASTM D-790
ILSS	14 ksi	10 kgf/mm ²	ASTM D-2344
90° Tensile Strength	11.0 ksi	76 MPa	ASTM D-3039

* Toray 250°F Epoxy Resin. Normalized to 60% fiber volume.

TORAY CARBON FIBERS AMERICA, INC.

T300

COMPOSITE PROPERTIES**

Tensile Strength	255 ksi	1,760 MPa	ASTM D-3039
Tensile Modulus	19.5 Msi	130 GPa	ASTM D-3039
Tensile Strain	1.3 %	1.3 %	ASTM D-3039
Compressive Strength	230 ksi	1,570 MPa	ASTM D-695
Compressive Modulus	18.5 Msi	125 GPa	ASTM D-695
In-Plane Shear Strength	14 ksi	98 MPa	ASTM D-3518
ILSS	15.5 ksi	11 kgf/mm ²	ASTM D-2344
90° Tensile Strength	11.5 ksi	80 MPa	ASTM D-3039

** Toray Semi-Toughened 350°F Epoxy Resin. Normalized to 60% fiber volume.

See Section 4 for Safety & Handling information. The above properties do not constitute any warranty or guarantee of values.

These values are for material selection purposes only. For applications requiring guaranteed values, contact our sales and technical team to establish a material specification document.

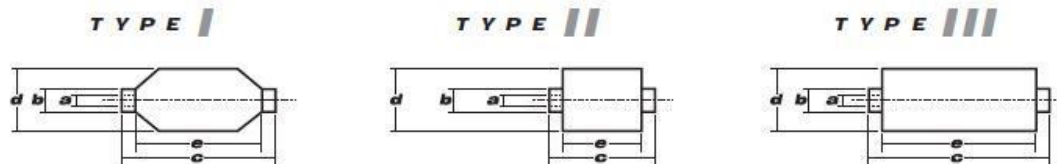
PACKAGING

The table below summarizes the tow sizes, twists, sizing types, and packaging available for standard material. Other bobbin sizes may be available on a limited basis.

Tow Sizes	Twist ¹	Sizing	Bobbin Net Weight (kg)	Bobbin Type ²	Bobbin Size (mm)					Spools per Case	Case Net Weight (kg)
					a	b	c	d	e		
1K	A	40A, 50A	1.0	I	94	99	320	135	260	15	15
	A	40A, 50A	1.0	II	76	82	192	132	156	16	16
	B	50B	1.0	II	76	82	192	132	156	16	16
3K	A	40A, 50A	2.0	II	76	82	192	157	156	12	24
	B	40B, 50B	2.0	II	76	82	192	157	156	12	24
6K	A	40D, 50A	2.0	II	76	82	192	157	156	12	24
	B	40D, 50B	2.0	II	76	82	192	157	156	12	24
12K	A	50A	4.0	II	76	82	192	204	156	6	24
	B	50B	4.0	II	76	82	192	204	156	6	24

¹ Twist A: Twisted yarn B: Untwisted yarn made from a twisted yarn through an untwisting process

² Bobbin Type See Diagram below



TORAY CARBON FIBERS AMERICA, INC.

6 Hutton Centre Drive, Suite #1270, Santa Ana, CA 92707 TEL: (714) 431-2320 FAX: (714) 424-0750

Sales@Toraycfa.com Technical@Toraycfa.com www.torayusa.com

Příloha č. 2



Hi-Tech laminační systémy

CHEMEX - POX L 20 C

Laminační epoxy - anhydridový systém

Popis

Chemex POX L 20 A je epoxy-anhydridový systém s dlouhou dobou zpracovatelnosti a nízkou viskozitou. Minimální teplota vytvrzování je 80⁰ C. Systém se skládá z epoxidové pryskyřice, anhydridového tvrdidla a akcelerátoru.

Použití

Systém vhodný pro navíjení, výrobu prepegů a pultruzi. Dále pro RTM/RIM/SCRIMP technologie.

Mísící poměry

	Váhové poměry
Složka A – pryskyřice	100
Složka B – tvrdidlo	85
Složka C - akcelerátor	0.5-2.0

Mechanické a fyzikální vlastnosti

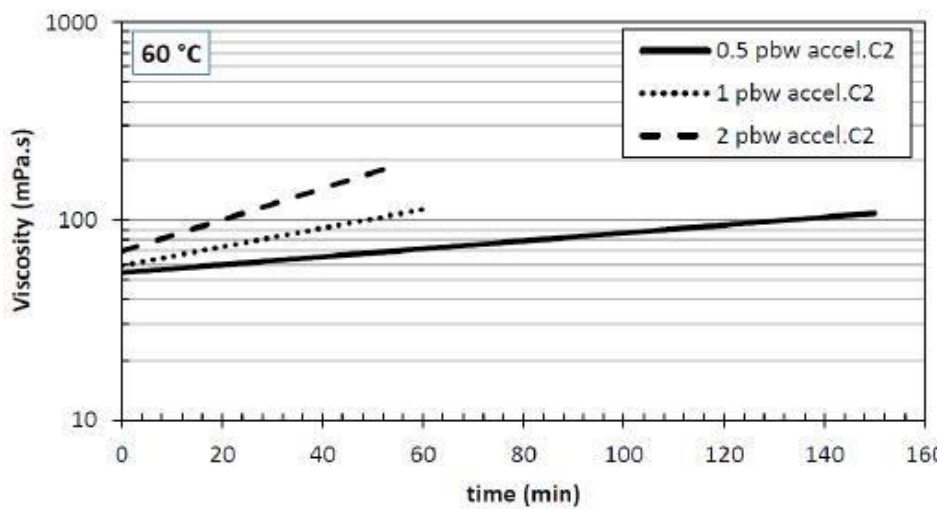
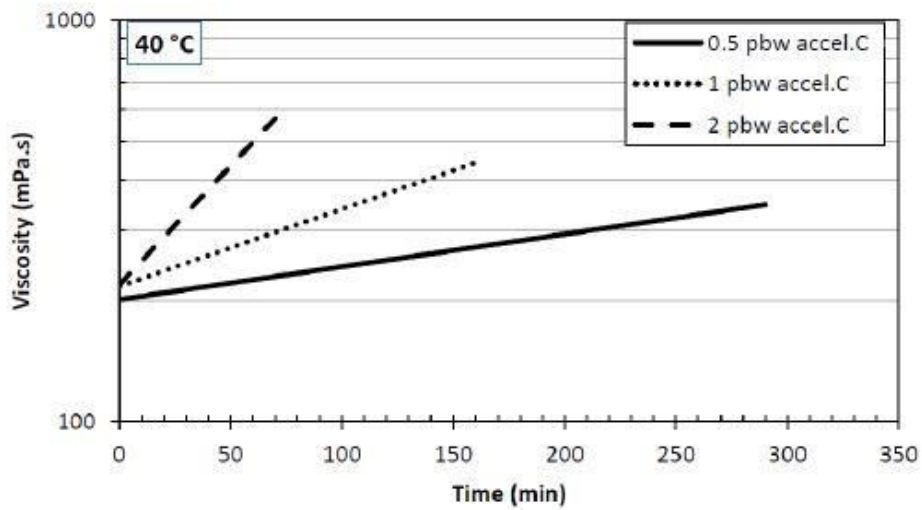
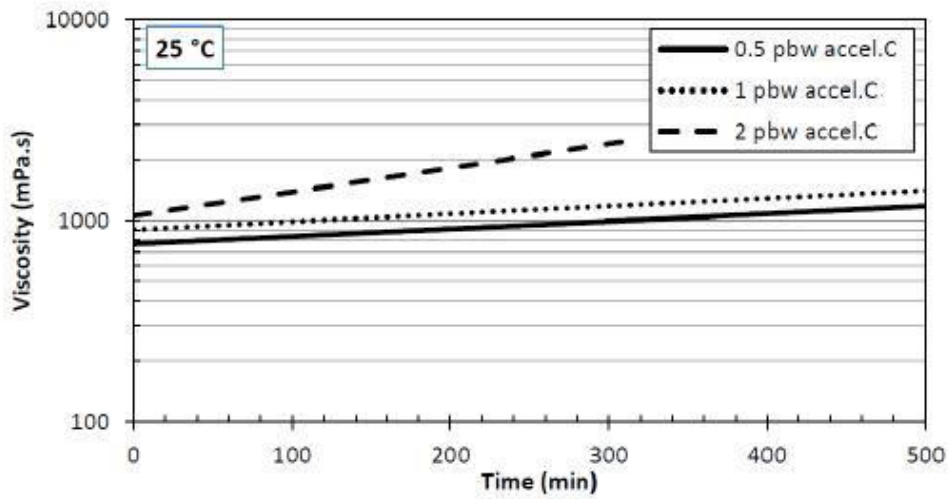
Stanoveno pro standardní vzorek při 23⁰ C. Vytvrzováno po 10 hodin při 140⁰ C.

Vlastnosti, 23 ⁰ C		jednotka
Objemové smrštění	5-7	%
Maximální prodloužení	3-4	%
E modul ohyb	3300-3700	MPa
Mez pevnosti v ohybu	140-150	MPa
E modul tah	2900-3200	MPa
Mez pevnosti v tahu	65-75	MPa
Nasákavost 10 dnů při 23 ⁰ C	0,35	%
Nasákavost 60 minut při 100 ⁰ C	0,35	%

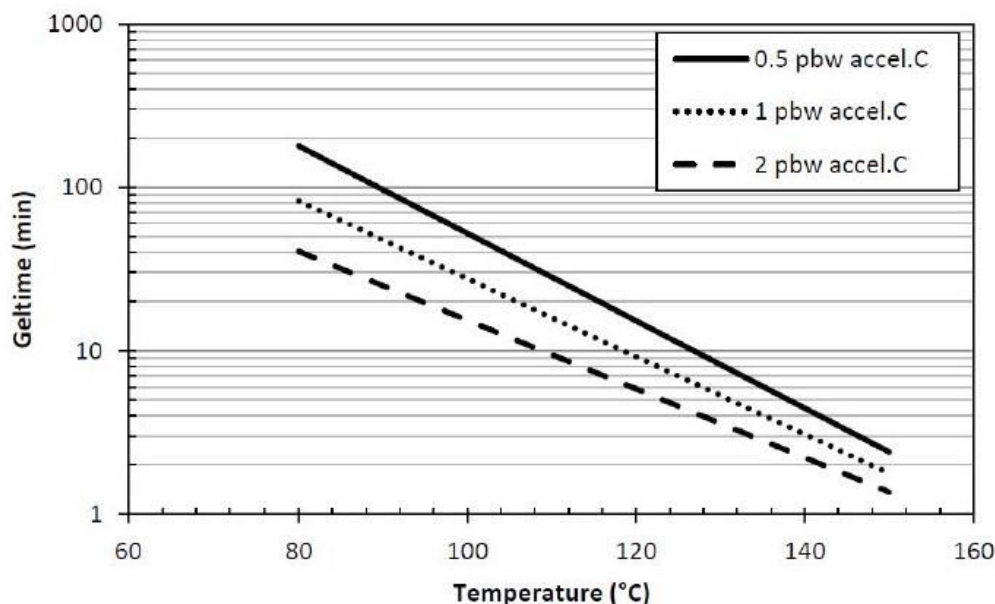
Viskozita A+B+C při 25 ⁰ C	Max. 2000	mPa.s
---------------------------------------	-----------	-------

Viskozita

Zvyšování viskozity v závislosti na čase a množství akcelérátoru při teplotě 25⁰, 40⁰ a 60⁰ C.



Geltime



Skladování

Prskyřice i tvrdidla skladujte v dobře uzavřených obalech, v krytých suchých skladech při teplotách 5-25⁰ C. Záruční doba je 12 měsíců od data výroby.

Při teplotách pod 15⁰ C může prskyřice krystalizovat. Což se může projevit jako zamlžení, či změna tekuté podoby na tuhou. Před zpracování je třeba tuto krystalizaci odstranit postupným zahřátím na 50-60⁰ C za současného míchání, či potřásání nádoby. Tím uvedete prskyřici do původního stavu bez jakékoli vady na kvalitě. Používejte nepřímé metody zahřátí – teplá voda, pec. Nikdy nezahřívajte na otevřeném ohni. Před zahřátím lehce otevřete nádobu, aby došlo k vyrovnání tlaku. Zpracovávejte pouze výrobky zcela jednotné barvy. Během ohřívání buďte opatrní. Vyvarujte se přehřátí. Při použití materiálů používejte bezpečnostní pomůcky.

Tvrdidla na bázi aminů reagují s vzdušnou vlhkostí a CO₂ – tvorba pevného karbamátu. Je třeba tvrdidla uchovávat důsledně uzavřená, aby nepřišla to styku se vzdušnou vlhkostí.

Bezpečnostní údaje

Důsledným používáním ochranných pomůcek se chraňte před přímým kontaktem prskyřice i tvrdidla s Vaší pokožkou, nebo očima.

Podrobné údaje týkající se bezpečného zacházení a ochrany zdraví jsou uvedeny v bezpečnostním listu.

SPABOND™ 340LV HT

HIGH TG STRUCTURAL EPOXY ADHESIVE

- ▢ Reduced component weights; lower density when compared to glass filled adhesives
- ▢ Higher thermal performance & fast cure progression
- ▢ High strength and toughness industrial adhesive
- ▢ Excellent gap filling properties
- ▢ Designed for cartridge and mixing machine dispense
- ▢ Three hardener speeds give a range of working times / clamp times
- ▢ Resin & hardener are pigmented to give a visual indication of mix quality
- ▢ DNV-GL Certified Formats Available

INTRODUCTION

Spabond™ 340 LV HT is a high performance adhesive designed for bonding large structures such as yacht hulls and wind turbine blades. It is a cost-effective system with good thermal and mechanical properties.

The formulation gives high thermal performance and allows fast curing, making this product ideal for bonding large composite structures where minimising cure time and increasing productivity is of value.

The components are pigmented to give a visual indication of mix quality, which is a useful feature when mixing by hand or with a machine. The system has a simple 2:1 mix ratio by volume.

Spabond™ 340LV HT is available in cartridges, straight-sided pails and 205 litre drums for machine mixing and dispense.

	SYSTEM	20°C POT-LIFE (500 G, MIXED IN AIR)*	20°C CLAMP TIME†	PAGE
Spabond™ 340LV	Product Information, Instructions for Use and Health & Safety			2
	Fast (HT)	16 minutes	3 hours 50 minutes	3
	Slow (HT)	45 minutes	17 hours 40 minutes	4
	Extra Slow (HT)	2 hours 20 minutes	24 hours	5

*working time properties are highly subjective to ambient conditions and should be used as an approximate guideline for all Spabond™ 340 systems

PRODUCT INFORMATION

The product is available in a number of formats please contact your local customer support or download the latest product catalogue available on www.gurit.com.

PRODUCT DESCRIPTION	STATUS	CERTIFICATION
Spabond™ 340LV Resin and HT Hardeners	Approved	DNV-GL TAK0001H8

TRANSPORT & STORAGE

The resin and hardeners should be kept in securely closed containers during transport and storage. Any accidental spillage should be soaked up with sand, sawdust, cotton waste or any other absorbent material. The area should then be washed clean (see appropriate Safety Data Sheet). Adequate long term storage conditions will result in a shelf life of 2 years for both the resin and hardeners. Storage should be in a warm dry place out of direct sunlight and protected from frost. The storage temperature should be kept constant between 10°C and 25°C, cyclic fluctuations in temperature can cause crystallization. Containers should be firmly closed. Hardeners, in particular, will suffer serious degradation if left exposed to air.

COMPONENT	UNITS	10 – 25°C
Spabond™ 340LV Resin	months	24
Spabond™ 340 HT Hardeners	months	24

For more information on crystallization please refer to the Adhesives section on the Gurit website. (www.gurit.com)

INSTRUCTIONS FOR USE

The product is optimised for use at 15 - 25°C. At lower temperatures the components thicken and may eventually become unworkable. To ensure accurate mixing and good workability pre-warm the resin & hardener as well as the surfaces to be bonded before use.

SURFACE PREPARATION

Before using the product ensure that surfaces to be bonded are clean, dry and dust-free. Prepare all surfaces by abrading with medium grit paper or other suitable abrasive, remove dust then wipe with acetone.

Metals - requires a chemical pre-treatment to create the best bond. Please contact Gurit for a Guide to Surface Preparation and Pre-treatments.

Polyester or vinylester - ensure laminates are fully cured before bonding, then prepare as above.

Epoxy laminates - it is recommended to use a suitable Peel Ply as the last stage in their manufacture, otherwise prepare as above. Trials may be required to test Peel Ply suitability.

Ferrocement - etch with 5% solution of hydrochloric acid, wash with fresh water, then dry.

Timber - sand with abrasive paper across grain. Degrease oily timber with a fast evaporating solvent (e.g. acetone). For resinous or gummy timber, etch with 2% caustic soda solution, wash off with fresh water and dry.

MIXING & HANDLING

Gurit recommends mixing machine dispense. If mixing by hand, mix thoroughly for at least one minute, paying particular attention to the sides and bottom of the mixing vessel, to ensure no streaks remain. Once fully mixed the adhesive should have a uniform colour. Use from pot quickly to maximise resin working life.

CARTRIDGE USE

If dispensing product from a two component cartridge, first prime the cartridge by dispensing slowly until both resin and hardener are at the outlet of the cartridge. Secondly, clean the outlet and attach the mixing head. When starting a new cartridge, dispense and discard a small amount of adhesive (typically the length of a mix head) prior to applying adhesive to the substrate, in order to ensure thorough mixing of the system. If using a pneumatic gun, regulate supply air pressure to a maximum of 4 Bar. Relieve the pressure on the cartridge after use.

HEALTH AND SAFETY

The following points must be considered:

1. Skin contact must be avoided by wearing protective gloves. Gurit recommends the use of disposable nitrile gloves for most applications. The use of barrier creams is not recommended, but to preserve skin condition a moisturising cream should be used after washing.
2. Overalls or other protective clothing should be worn when mixing, laminating or sanding. Contaminated work clothes should be thoroughly cleaned before re-use.
3. Eye protection should be worn if there is a risk of resin, hardener, solvent or dust entering the eyes. If this occurs flush the eye with water for 15 minutes, holding the eyelid open, and seek medical attention.
4. Ensure adequate ventilation in work areas. Respiratory protection should be worn if there is insufficient ventilation. Solvent vapours should not be inhaled as they can cause dizziness, headaches, loss of consciousness and can have long term health effects.
5. If the skin becomes contaminated, then the area must be immediately cleansed. The use of resin-removing cleansers is recommended. To finish, wash with soap and warm water. The use of solvents on the skin to remove resins etc must be avoided.
Washing should be part of routine practice:
 - ↪ before eating or drinking
 - ↪ before smoking
 - ↪ before using the lavatory
 - ↪ after finishing work
6. The inhalation of sanding dust should be avoided and if it settles on the skin then it should be washed off. After more extensive sanding operations a shower/bath and hair wash is advised.

APPLICABLE RISK & SAFETY PHRASES

Gurit produces a separate full Safety Data Sheet for all hazardous products. Please ensure that you have the correct SDS to hand for the materials you are using before commencing work.

SPABOND™ 340LV & HT FAST HARDENER

This 1 page product summary is intended for use in conjunction with further advice provided under the Instructions for Use section. All data has been generated from typical production material and does not constitute a product specification.

MIXING AND HANDLING

PROPERTY	UNITS	Spabond™ 340LV RESIN	FAST HARDENER	MIXED SYSTEM	TEST METHOD
Appearance - colour	Description	Yellow	Red	Pink	-
Appearance - form	Description	Thixotropic Paste			-
Mix ratio by weight	Parts by weight	100	49		-
Mix ratio by volume	Parts by volume	100	50	-	-
Density at 21 °C	g/cm ³	1.13	1.10	1.11	Archimedes

COMPONENT & MIXED SYSTEM VISCOSITY

PROPERTY	UNITS	15°C	20°C	25°C	30°C	TEST METHOD
Spabond™ 340LV Resin Viscosity	P	490	290	257	130	-
Spabond™ 340LV HT Fast Hardener Viscosity	P	713	472	322	259	-
Initial Mixed System Viscosity	P	733	427	275	196	-
Pot-life (500 g, mixed in air)*	hrs:min	00:20	00:16	00:12	00:10	-
Clamp Time* (time to 2kN cleavage strength)	hrs:min	05:12	03:50	02:50	02:05	BS 5350 Part C1
Sag resistance*	mm	-	20	20	-	-

ADHESIVE PERFORMANCE

MECHANICAL PROPERTIES	SYMBOL	UNITS	28 DAYS AT 21°C	16 HOURS AT 50°C**	5 HOURS AT 70°C**	TEST STANDARD
Cleavage on steel	F _{cleavage}	kN	9.2	11.3	7.8	BS 5350 Part C1
Lap shear on steel	τ _{steel}	MPa	29	31	30	BS 5350 Part C5

CURED MECHANICAL AND THERMAL PROPERTIES

MECHANICAL PROPERTIES	SYMBOL	UNITS	28 DAYS AT 21°C	16 HOURS AT 50°C**	5 HOURS AT 70°C**	TEST STANDARD
Glass Transition Temperature	T _{gi}	°C	54	67	71	ISO 6721 (DMA)
Cured Density	ρ _{dry}	g/cm ³	1.17	1.17	1.17	Archimedes
Volumetric Shrinkage		%	5.77	5.41	5.32	Archimedes
Tensile Strength	σ _T	MPa	37	50	48	ISO 527-2
Tensile Modulus	E _T	GPa	2.85	2.77	2.75	ISO 527-2
Tensile Strain	ε _T	%	7.73	9.07	10.1	ISO 527-2
3-point flexural strength	σ _F	N/mm ²	72	85	83	ISO 178
3-point flexural modulus	E _F	GPa	2.75	2.53	2.46	ISO 178
Charpy (notched)		kJ/m ²	1.49	2.26	1.91	ISO 179-1

*working time properties are highly subjective to ambient conditions and should be used an approximate guideline for all Spabond™ 340 systems
**initial cure of 24 hours at 21°C

SPABOND™ 340LV & HT SLOW HARDENER

This 1 page product summary is intended for use in conjunction with further advice provided under the Instructions for Use section. All data has been generated from typical production material and does not constitute a product specification.

MIXING AND HANDLING

PROPERTY	UNITS	Spabond™ 340LV RESIN	SLOW HARDENER	MIXED SYSTEM	TEST METHOD
Appearance - colour	Description	Yellow	Purple	Grey	-
Appearance - form	Description	Thixotropic Paste			-
Mix ratio by weight	Parts by weight	100	49		-
Mix ratio by volume	Parts by volume	100	50	-	-
Density at 21 °C	g/cm ³	1.13	1.11	1.12	Archimedes

COMPONENT & MIXED SYSTEM VISCOSITY

PROPERTY	UNITS	15°C	20°C	25°C	30°C	TEST METHOD
Spabond™ 340LV Resin Viscosity	P	490	290	257	130	-
Spabond™ 340LV HT Slow Hardener Viscosity	P	559	391	282	232	-
Initial Mixed System Viscosity	P	673	403	264	190	-
Pot-life (500 g, mixed in air)*	hrs:min	01:00	00:45	00:34	00:26	-
Clamp Time* (time to 2kN cleavage strength)	hrs:min	23:00	17:40	13:30	10:20	BS 5350 Part C1
Sag resistance*	mm	-	20	20	-	-

ADHESIVE PERFORMANCE

MECHANICAL PROPERTIES	SYMBOL	UNITS	28 DAYS AT 21°C	16 HOURS AT 50°C**	5 HOURS AT 70°C**	TEST STANDARD
Cleavage on steel	F _{cleavage}	kN	8.9	12.0	10.1	BS 5350 Part C1
Lap shear on steel	T _{steel}	MPa	32	37	36	BS 5350 Part C5

CURED MECHANICAL AND THERMAL PROPERTIES

MECHANICAL PROPERTIES	SYMBOL	UNITS	28 DAYS AT 21°C	16 HOURS AT 50°C**	5 HOURS AT 70°C**	TEST STANDARD
Glass Transition Temperature	T _{g1}	°C	52	66	72	ISO 8721 (DMA)
Cured Density	ρ _{dry}	g/cm ³	1.18	1.17	1.17	Archimedes
Volumetric Shrinkage		%	5.18	4.64	4.29	Archimedes
Tensile Strength	σ _T	MPa	34	49	49	ISO 527-2
Tensile Modulus	E _T	GPa	2.93	2.58	2.89	ISO 527-2
Tensile Strain	ε _T	%	6.31	7.83	8.28	ISO 527-2
3-point flexural strength	σ _F	N/mm ²	68	85	87	ISO 178
3-point flexural modulus	E _F	GPa	3.04	2.62	2.67	ISO 178
Charpy (notched)		kJ/m ²	1.42	2.53	2.56	ISO 179-1

*working time properties are highly subjective to ambient conditions and should be used as an approximate guideline for all Spabond™ 340 systems
**total cure of 24 hours at 21°C

SPABOND™ 340LV & HT EXTRA-SLOW HARDENER

This 1 page product summary is intended for use in conjunction with further advice provided under the Instructions for Use section. All data has been generated from typical production material and does not constitute a product specification.

MIXING AND HANDLING

PROPERTY	UNITS	Spabond 340LV RESIN	X-SLOW HARDENER	MIXED SYSTEM	TEST METHOD
Appearance - colour	Description	Yellow	Blue	Green	-
Appearance - form	Description	Thixotropic Paste			-
Mix ratio by weight	Parts by weight	100	47		-
Mix ratio by volume	Parts by volume	100	50	-	-
Density at 21 °C	g/cm ³	1.13	1.05	1.11	Archimedes

COMPONENT & MIXED SYSTEM VISCOSITY

PROPERTY	UNITS	15°C	20°C	25°C	30°C	TEST METHOD
Spabond™ 340LV Resin Viscosity	P	490	290	257	130	-
Spabond™ 340LV HT Extra-Slow Hardener Viscosity	P	578	330	215	150	-
Initial Mixed System Viscosity	P	683	381	242	167	-
Pot-life (500 g, mixed in air)*	hrs:min	03:10	02:20	01:40	01:15	-
Clamp Time* (time to 2kN cleavage strength)	hrs:min	33:50	24:00	14:50	10:30	BS 5350 Part C1
Sag resistance*	mm	-	20	20	-	-

ADHESIVE PERFORMANCE

MECHANICAL PROPERTIES	SYMBOL	UNITS	28 DAYS AT 21°C	16 HOURS AT 50°C**	5 HOURS AT 70°C**	TEST STANDARD
Cleavage on steel	F _{cleavage}	kN	7.9	11.2	11.9	BS 5350 Part C1
Lap shear on steel	T _{steel}	MPa	29	34	35	BS 5350 Part C5

CURED MECHANICAL AND THERMAL PROPERTIES

MECHANICAL PROPERTIES	SYMBOL	UNITS	28 DAYS AT 21°C	16 HOURS AT 50°C**	5 HOURS AT 70°C**	TEST STANDARD
Glass Transition Temperature	T _{g1}	°C	51	66	72	ISO 6721 (DMA)
Cured Density	ρ _{elv}	g/cm ³	1.15	1.14	1.15	Archimedes
Volumetric Shrinkage		%	3.42	3.06	3.15	Archimedes
Tensile Strength	σ _T	MPa	31	47	44	ISO 527-2
Tensile Modulus	E _T	GPa	2.90	2.83	2.89	ISO 527-2
Tensile Strain	ε _T	%	3.46	4.77	6.15	ISO 527-2
3-point flexural strength	σ _F	N/mm ²	63	84	83	ISO 178
3-point flexural modulus	E _F	GPa	2.89	2.88	2.70	ISO 178
Charpy (notched)		kJ/m ²	1.24	2.12	1.93	ISO 179-1

*working time properties are highly subjective to ambient conditions and should be used as an approximate guideline for all Spabond™ 340 systems
 **initial cure of 24 hours at 21°C