

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ  
TECHNOLOGIE**



**BAKALÁŘSKÁ  
PRÁCE**

**VÍT  
RITSCHEL**

**2021**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Ritschel** Jméno: **Vít** Osobní číslo: **484105**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**  
Studijní program: **Teoretický základ strojírenského inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Výroba kompozitních materiálů autoklávovou technologií**

Název bakalářské práce anglicky:

**The production of composite materials by autoclave technology**

Pokyny pro vypracování:

Rozdělení kompozitních materiálů a technologií jejich výroby  
Popis metody vakuového prosvycování s vytvrzením v autoklávu – princip, parametry, popis zařízení  
Návrh experimentu – nastavení a ověření procesu výroby  
Vyhodnocení dosažených výsledků a závěr

Seznam doporučené literatury:

- [1] Jančář, Josef. Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů. 1. vyd. Brno, 2003, 194 s. ISBN 80-214-2443-5.
- [2] Ehrenstein, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6. 11.
- [3] Chung, Deborah D. Composite materials: functional materials for modern technologies. London: Springer, 289 s. ISBN 18-523-3665-X
- [4] Krebs, S., Bryksí-Stunová, B., Kolařík, L.: Podklady k výuce předmětu Technologie zpracování plastů a kompozitů, FS, ČVUT v Praze, Praha, 2019
- [5] Firemní podklady firem LA Composite, Latecoere apod.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS**

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

**Ing. Lukáš Holub, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS**

Datum zadání bakalářské práce: **15.04.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **20.08.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2021**

\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## **Anotace**

- Autor: Vít Ritschel
- Název práce: Výroba kompozitních materiálů autoklávovou technologií
- Vedoucí BP: doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
- Konzultant: Ing. Lukáš Holub, Ph.D.
- Ústav: Ústav strojírenské technologie (U12123)
- Školní rok: 2020/21
- Klíčová slova: Autokláv, uhlík, kompozitní materiály, výroba kompozitů, uhlíkové kompozity
- Abstrakt: Cílem této bakalářské práce je seznámení s kompozitními materiály, metodami jejich výroby a následné otestování funkčních vlastností experimentálního autoklávu. V rámci testování vlastností experimentálního autoklávu jsou vytvořeny vzorky, které jsou následně otestovány.

## **Anotation**

Author:	Vít Ritschel
Name of the theses:	The production of composite materials by autoclave technology
Supervisor:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
Consultant:	Ing. Lukáš Holub, Ph.D.
Department:	Department od manufacturing technology (U12123)
School year:	2020/21
Key words:	Autoclave, carbon, composite materials, composite manufacturing, carbon composites
Abstract:	Purpose of this bachelor's thesis is getting acquainted with composite materials and their manufacturing methods. Second half of this thesis deals with testing of the experimental autoclave. Within the testing there have been few samples made.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci na téma Výroba kompozitních materiálů autoklávovou technologií vypracoval samostatně a veškeré citované literární či jiné zdroje informací uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů informací.

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

*V Praze dne .....*

.....

*Podpis autora*

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat mému vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Ladislavu Kolaříkovi, Ph.D. a mému konzultantovi panu Ing. Lukáši Holubovi, Ph.D. za jejich trpělivost, čas a cenné rady, které byly velkým přínosem pro vypracování této bakalářské práce.

Dále bych chtěl poděkovat paní doc. Ing. Marii Kolaříkové, Ph.D. za pomoc s metalografickým pozorováním struktury vzorků a panu Ing. Františku Tatíčkovi, Ph.D. za pomoc s tahovou zkouškou. V neposlední řadě děkuji týmu CTU CarTech za poskytnutý materiál na tvorbu vzorků a panu Bc. Otakaru Volkovi za konzultaci a asistenci při výrobě vzorků.

# Obsah

Seznam použitých zkratk.....	9
Úvod.....	10
1. Kompozitní materiály.....	11
1.1. Matrice .....	12
1.2. Výztuž .....	12
1.2.1. Vlákna.....	13
1.2.2. Částicová výztuž.....	13
1.3. Výhody kompozitních materiálů.....	13
1.4. Nevýhody kompozitních materiálů .....	14
2. Dělení kompozitních materiálů .....	15
2.1. Podle výztuže .....	15
2.1.1. Kompozity třetího druhu .....	15
2.1.2. Kompozity druhého druhu.....	15
2.1.3. Kompozity prvního druhu .....	16
2.1.3.1. Kompozit s kovovou maticí.....	16
2.1.3.2. Kompozit s keramickou maticí.....	17
2.1.3.3. Kompozit s polymerní maticí .....	18
2.1.3.3.1. Polymerní matrice .....	19
2.1.3.3.2. Uhlíkové vlákno .....	20

2.1.3.3.3.	Skelné vlákno .....	20
2.1.3.3.4.	Aramidové vlákno .....	21
2.1.3.3.5.	Prepreg .....	22
2.1.3.3.6.	Gelcoat .....	23
3.	Výroba.....	24
3.1.	Ruční kladení (ruční laminace) .....	24
3.2.	Injektážní a infuzní technologie .....	26
3.2.1.	Vysokotlaké vstřikování (RTM – resin transfer moulding) .....	27
3.2.2.	Vakuo-injektážní technologie (VARTM – vakuum assisted tranfer moulding, nebo také RTM light).....	28
3.2.3.	Vakuové proscování (VIP – vakuum infusion process) .....	28
3.3.	Navíjení .....	29
3.4.	Lisování.....	31
3.4.1.	Lisování za studena .....	31
3.4.2.	Lisování za tepla a tlaku .....	32
3.5.	Pultruze (tažení) .....	32
3.5.1.	Ostatní kontinuální metody .....	34
3.6.	Odstředivé lití.....	35
3.7.	Stříkání .....	36
3.8.	Odlévání .....	37



4.	Autoklávová technologie.....	39
4.1.	Používané Materiály.....	40
4.2.	Formy .....	41
4.3.	Proces výroby.....	42
5.	Popis a funkce autoklávu.....	45
6.	Ověření vlastností a funkčnosti autoklávu .....	53
7.	Výroba a kalibrace termočlánků typu J.....	55
8.	Měření homogenity tepelného pole.....	60
8.1.	Pokus č. 1 .....	60
8.2.	Pokus č. 2 .....	61
9.	Instalace vaukové vývěvy .....	64
10.	Výroba experimentálních kompozitních vzorků .....	68
10.1.	Výroba vzorků .....	69
11.	Vyhodnocení kvality vytvořených vzorků .....	75
11.1.	Tahová zkouška .....	75
11.1.1.	Příprava vzorků na tahovou zkoušku.....	75
11.1.2.	Tahová zkouška .....	77
11.2.	Metalografické vyhodnocení struktury.....	83
11.2.1.	Příprava vzorků.....	83
11.2.2.	Makroskopické vyhodnocení struktury.....	85

11.2.2.1. Vzorek 1:.....	85
11.2.2.2. Vzorek 1V.....	88
11.2.2.3. Vzorek 2.....	89
11.2.2.4. Vzorek 2V.....	90
12. Závěr.....	92
Seznam použitých literárních zdrojů.....	93
Seznam obrázků .....	95
Seznam příloh.....	96

## Seznam použitých zkratk

BMC	Bulk moulding compound (lisovací směsi)
CMC	Ceramic matrix composite (kompozit s keramickou maticí)
DMC	Dough moulding compounds (lisovací těsta)
MMC	Metal matrix composite (kompozit s kovovou maticí)
MPIA	Metafenylen-izoftalamid (meta-aramid)
PE	Polyethylen
PEEK	Polyéteréterketon
PMC	Polymer matrix composite (kompozit s polymerní maticí)
PP	Polypropylen
PPTA	P-fenylen-tereftalamid (para-aramid)
RTM	Resin transfer moulding (vysokotlaké vstřikování)
SMC	Sheet moulding compounds (lisovací rohože)
VARTM	Vakuum assisted resin transfer moulding (vakuo-injektážní technologie)
VIP	Vakuum infusion process (vakuové prosycování)

## Úvod

Kompozitní materiály jsou dnes stále více využívány ve všech odvětvích průmyslu. Jako pár příkladů je možné uvést automobilový či letecký průmysl, ale také například biomedicína. Z toho důvodu vybudovala Fakulta strojní na Ústavu strojírenské technologie laboratoř pro zpracování plastů a kompozitů. V této souvislosti byla získána dotace na realizaci autoklávového pracoviště pro výrobu kompozitních dílů. Úkolem této BP bylo především zapojení do testovacího provozu, dokončení zprovoznění a odzkoušení autoklávu.

Teoretická část této BP je zaměřena na přiblížení a seznámení s kompozitními materiály a technologiemi jejich výroby. Výrobě s použitím autoklávu je věnována samostatná kapitola.

Praktická část je zaměřena na ověření vlastností experimentálního autoklávu na Ústavu strojírenské technologie. Nejdříve byla měřena homogenita tepelného pole v autoklávu a následně vytvoření přetlaku a výdrž na požadovaných hodnotách. Po úspěšném odzkoušení vlastností byly v autoklávu vyrobeny historicky první vzorky. Na vzorcích byla následně provedena zkouška tahem a byla porovnána jejich struktura pod mikroskopem.

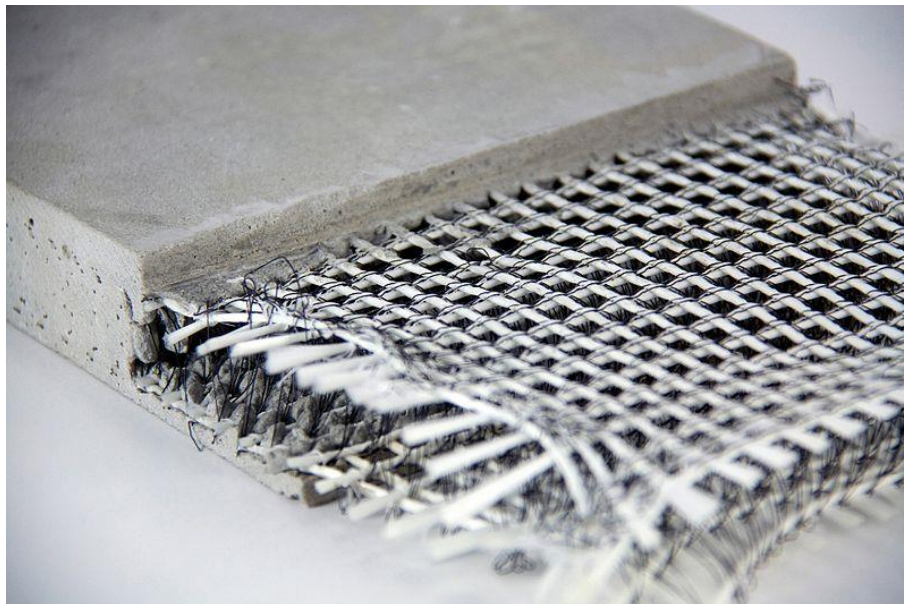
# 1. Kompozitní materiály

Kompozit je obecně definován jako směs dvou či více materiálů jiných fyzikálních, mechanických a chemických vlastností (kovové slitiny, polymery, minerály a dřevo).

Definice kompozitního materiálu dle mezinárodní normy ČSN EN ISO 472:2013 [1], definice 2.182.1 „pevný výrobek složený ze dvou nebo více odlišných fází, které zahrnují pojivo (matrici) a částicový nebo vláknitý materiál“.

Rozdílné materiály jsou kombinovány za účelem vytvoření nového materiálu, který bude mít lepší vlastnosti než jeho jednotlivé složky. Mezi fázemi je rozhraní. Složky si zachovávají identitu a mohou být fyzikálně identifikovány. Díky této vlastnosti lze vytvořit velké množství různých materiálových kombinací. Ty jsou děleny do skupin podle materiálů matrice, charakteru výztuže (částicové, vláknové,...) a měřítka výztuže (makro-, mikro-, či nano kompozity). [2][3][4][17]

Na obrázku 1 je příklad kompozitního materiálu, kde výztuž tvoří textilní vlákna a matricí je beton. I po jeho rozložení jsou obě složky dobře rozpoznatelné.



*Obrázek 1: Kompozitní materiál – beton vyztužený textilními vlákny*

## 1.1. Matrice

Kompozit by měl obsahovat nejméně jednu spojitou fázi - matici, která slouží jako pojivo. Úkolem matrice je přenos namáhání na vlákno a následně i mezi vlákny. Dále zajišťuje stálou geometrickou vzdálenost vláken a chrání je před vlivy okolí. Pevnost v tahu matrice je nižší, než pevnost výztuže. Zásadním hlediskem pro posouzení kvality kompozitu je zajištění adheze na fázovém rozhraní matrice-vlákno. Složení matrice ovlivňuje pružnost, tvrdost a další vlastnosti kompozitu. Druhy matic jsou podrobněji popsány v kapitole 2.1.3. [3][4][17][19]

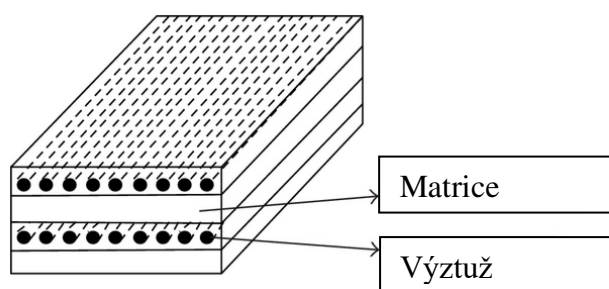
## 1.2. Výztuž

Nespojitá fáze – výztuž, je druhou klíčovou složkou kompozitu. Měla by být v kompozitu rovnoměrně rozptýlena. Je obecně pevnější v tahu, má vyšší modul pružnosti a jejím úkolem je přenášet zatížení (70 až 90%), které je na daný kompozit vyvíjeno. Dále zajišťuje elektrickou vodivost či izolaci, záleží na použitém typu vlákna. Forma, materiál, tvar a obsah výztuže definují a ovlivňují charakter výsledného kompozitu.

Rozlišují se dva základní typy výztuže – vlákna a částice. Podle nich se dají kompozity dělit na vláknové a částicové.

Zvláštním druhem výztuže jsou tzv. whiskery. Jsou to monokrystaly s vysokým poměrem základních rozměrů pěstované na podkladových materiálech, u kterých se předpokládá ideální krystalická mřížka. [2][17]

Na obr. 2 je schématicky zobrazen řez kompozitem. Ukazuje jak jsou vlákna výztuže obklopena maticí.



Obrázek 2: Ukázka jednotlivých složek kompozitu

### 1.2.1. Vlákna

Vlákna můžeme obecně rozdělit a organická a anorganická. Mezi anorganická řadíme například vlákna uhlíková, skelná, borová či vlákna z karbidu křemíku. Do organických vláken spadají polymerní vlákna (aramidová, PE,..), přírodní vlákna a například proteinová vlákna.

Hlavní mechanickou vlastností, kterou sledujeme u vláken je modul pružnosti, ovlivňující tuhost. Další důležité vlastnosti jsou mez pevnosti v tahu, tažnost, hustota, teplotní a elektrická vodivost. [17]

### 1.2.2. Částicová výztuž

Výztuž je považována za částicovou, pokud má velikost částic větší než 1  $\mu\text{m}$ . Menší částice jsou považovány za výztuž disperzí nebo nanokompozity. Velikost částic ovlivňuje způsob zpevnění kompozitu. Disperze brání šíření dislokací. Velké částice nejsou pro dislokace překážkou, ale přenáší zatížení a působí proti makrodeformacím. Výztuž musí být homogenně rozptýlena v matrici. [17]

## 1.3. Výhody kompozitních materiálů

- Možnost nahradit několik kovových součástí jednou součástí z kompozitu. Tím se usnadní montáž.
- Kompozitní struktury mohou být monitorovány senzory, které jsou do nich vloženy při výrobě tzv. chytré materiály
- Vysoká pevnost – některé kompozity nabízí pevnost oceli, ale s pětinou váhou případně s poloviční váhou v porovnání s hliníkem.
- Odolnost proti únavě – Ocel a hliníkové slitiny prokazují uspokojivé výsledky únavy při 50% zatížení jejich statické pevnosti. Jednosměrné uhlíkové kompozity mají dobré vlastnosti do téměř 90%.
- Kompozity s polymerní matricí nabízí vysokou korozivzdornost a dobrou odolnost proti chemickému poškození.
- Umožňují velkou flexibilitu při designu součástí. Při výběru správných materiálů může být tepelná expanze rovna nule. To znamená, že jsou tyto součásti rozměrově velmi stabilní.

- Mohou být vytvářeny součásti, které potřebují malé, případně vůbec žádné obrobení. To snižuje časovou náročnost výroby a tím pádem i cenu.
- Komplexní součásti mohou být vyráběny bez nutnosti svarů, nýtů či jiných spojů. To zvyšuje odolnost a spolehlivost. [2]

#### **1.4. Nevýhody kompozitních materiálů**

- Vysoká cena – poměr ceny na kilogram je 5 až 20 krát vyšší než hliník či ocel
- Žáruvzdornost kompozitních materiálů závisí na materiálu použité matrice. Protože většina kompozitních materiálů využívá matrici na bázi polymerů, je jejich žáruvzdornost omezena vlastnostmi použitých polymerních materiálů. To znamená rozsah teplot od -40 do +100°C. Pro epoxidy až +200°C, což je v porovnání s ocelí a hliníkem velmi nízké rozmezí pracovních teplot.
- Některé polymery nejsou odolné proti rozpouštědlům a jiným chemikáliím.
- Kompozity mohou absorbovat vlhkost, tím jsou následně ovlivněny jejich vlastnosti. [2]



## 2. Dělení kompozitních materiálů

### 2.1. Podle výztuže

- prvního druhu – pevná
- druhého druhu – kapalná
- třetího druhu – plynná. [4]

#### 2.1.1. Kompozity třetího druhu

Mezi tuto skupinu můžeme zařadit různé pěnové hmoty:

- Pěnoplasty – pěnový polystyren
- Kovové pěny – hliníková pěna
- Pěnokeramika – pěnokorund [4]



Obrázek 3: kovové pěny

#### 2.1.2. Kompozity druhého druhu

Tento typ není příliš zastoupený mezi vyráběnými kompozitními materiály. Do této kategorie spadají například některé materiály používané k výrobě samomazných ložisek. Ty jsou vyráběny spékáním kovu s disperzí oleje. Používají se pro výrobu ložisek vodních strojů jako jsou čerpadla, která musí pracovat pod vodou. Častější zastoupení nalezneme v přírodě. Kompozit druhého druhu je například dřevo, které obsahuje systém trubic s mízou, nebo skořápky mořských živočichů. [4]

### 2.1.3. Kompozity prvního druhu

Kompozity prvního druhu – pevné kompozity – jsou nejdůležitější skupinou v technice. Dělíme je na:

- MMC – kompozit s kovovou maticí (metal matrix composite)
- CMC – kompozit s keramickou maticí (ceramic matrix composite)
- PMC – kompozit s polymerovou maticí (polymer matrix composite)
- Speciální typy – mezi ně patří například skleněná matrice [4]

#### 2.1.3.1. Kompozit s kovovou maticí

MMC se skládá z kovové matrice a keramického zrna, které tvoří výztuž. MMC mají při nižší hmotnosti lepší vlastnosti než jiné materiály. Nacházejí využití například v automobilovém průmyslu, který se snaží o redukci hmotnosti a následné snížení spotřeby paliva a emisí. Lehká konstrukce ze slitin má však své limity a to hlavně v mechanickém, tepelném a silném tribologickém namáhání. Tato slabina se odstraňuje právě cíleným vyztužením kovu keramickými částicemi. U keramických částic je možné určit typ, velikost a podíl celkového objemu. Cíle této aplikace jsou zvýšení mechanické pevnosti, ovlivnění tření a opotřebení, ovlivnění tepelné roztažnosti a zlepšení tepelné stability. Příklady použití jsou vložky válců motoru, ložiska, opěrné desky brzdových obložení a brzdové kotouče.

#### MMC se dále dělí podle použité matrice:

- **Hliníková matrice** – velmi rozšířené v automobilovém a leteckém průmyslu. Do slitiny se přidávají zpevňující složky jako SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a B<sub>4</sub>C, které je možné snadno mixovat s roztaveným hliníkem.
- **Hořčíková matrice** – má podobné vlastnosti jako hliníková, ale kvůli své menší vodivosti není tolik využívána. MMC na bázi hořčíku byly vyvinuty pro vesmírný průmysl. Hořčík je vhodný pro toto využití díky své nízké měrné hmotnosti.
- **Titanová matrice** – titanové slitiny se využívají kvůli své pevnosti při zvýšených teplotách a excelentní korozivzdornosti. Jsou ovšem náročné na výrobu, protože titan je vysoce reaktivní.

- **Matrice ze super slitin** – Využívají se například k výrobě lopatek plynových turbín, které musí pracovat při vysokých teplotách a rychlostech. [5]



Obrázek 4: Součást z leteckého hliníku vyztužená částicemi karbidu křemíku

### 2.1.3.2. Kompozit s keramickou maticí

U CMC tvoří matici i výztuž keramické materiály. Nejčastěji používané materiály jsou karbid křemíku SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>. Výztuž může mít podobu dlouhých či krátkých vláken, částic, whiskerů či nanovláken. Tato vlákna mají polykrystalickou strukturu jako tradiční keramika. CMC musí být stabilní i v teplotách okolo 1000°C, proto se nevyužívají skelná, organická či kovová vlákna. Používaná vlákna jsou několikanásobně tenčí než lidský vlas.

Cílem CMC je zvýšení houževnatosti, zpevnění a zvýšení otěruvzdornosti v extrémních podmínkách. [6]



*Obrázek 5: Pouzdra na hřídel z kompozitu s keramickou maticí*

### **2.1.3.3. Kompozit s polymerní maticí**

PCM se skládá z částic nebo vláken, která jsou napuštěna polymerovou maticí. Vlákná a částice zlepšují fyzikální vlastnosti kompozitu. Částice o velikosti mikronů poskytují lepší termální stabilitu a nano částice zlepšují mechanické vlastnosti. Dlouhé částice (whiskery, krátká vlákna a kontinuální vlákna) také pomáhají se zlepšením mechanických vlastností. Kontinuální vlákna mají obvykle největší efekt na zvýšení tuhosti a pevnosti. Přidávají se do kompozitu v podobě rohoží, tkaniny a stehované látky. Tkaniny mohou být jednosměrné nebo dvousměrné. Vlákná jsou obvykle skelná, uhlíková nebo aramidová. Kompozity s polymerní maticí jsou vyráběny také z tzv. prepregů. [1][17]

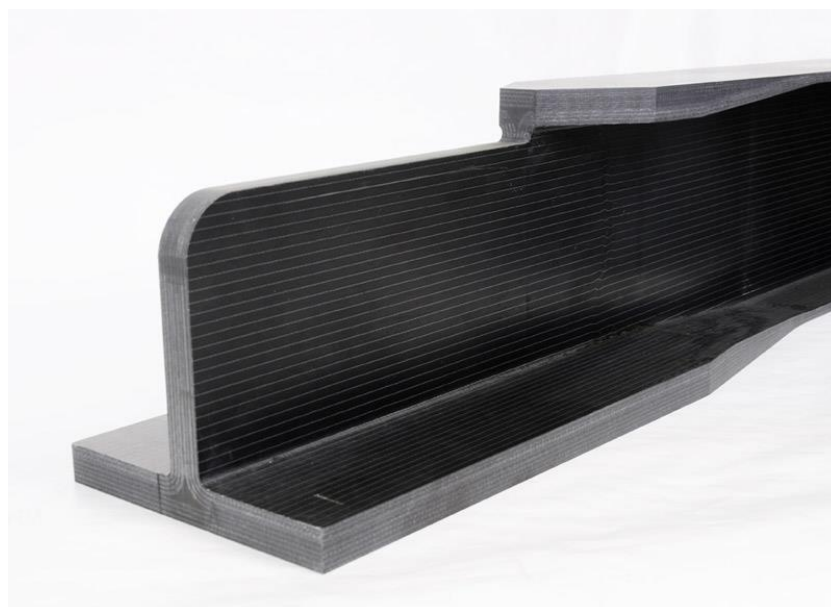
### 2.1.3.3.1. Polymerní matrice

U polymerních kompozitů dělíme matrice na termosety (reaktoplasty) a termoplasty.

Tab. 1: Typy používaných matric

Matrice	Teplota zpracování	Viskozita při teplotě zpracování
Nevyztužená nenanesená polyesterová pryskyřice vytvrzovaná za studena	10 až 40°C	stovky mPa·s
Nenasycená polyesterová pryskyřice vytvrzovaná za tepla	≈ 140°C	≈ 1000 mPa·s
Nevyztužená epoxidová pryskyřice vytvrzovaná za tepla	např. 130°C	stovky mPa·s
Polypropylen (PP)	200 až 270°C	10 <sup>3</sup> Pa·s
Polyéteréterketon (PEEK)	≈ 350 až 400°C	10 <sup>3</sup> až 10 <sup>4</sup> Pa·s

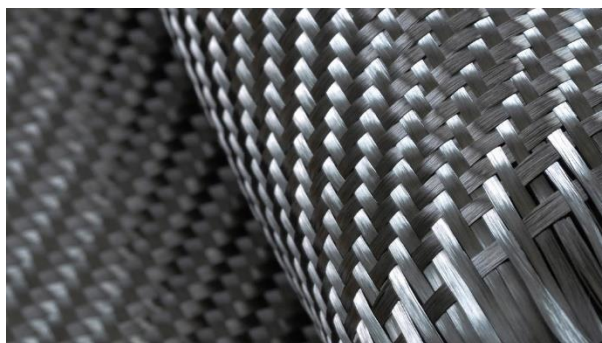
[18]



Obrázek 6: Součást z uhlíkového kompozitu

### 2.1.3.3.2. Uhlíkové vlákno

Uhlíkové vlákno dosahuje nejvyšších mechanických vlastností ze všech používaných vláken. Kombinuje vysoký modul pružnosti s nízkou hmotností. [17]



*Obrázek 7: Tkanina z uhlíkového vlákna*

Uhlíková vlákna jsou vyráběna karbonizací oxidovaného prekurzoru za teploty 1300°C v atmosféře N<sub>2</sub>. Během karbonizace ztrácí prekurzor ztratí většinu neuhlíkových atomů z řetězcích. Tím získáme vlákna s vysokou pevností a nižším modulem pružnosti. Chceme-li vysoký modul pružnosti, musíme po karbonizaci zařadit ještě grafitizaci. Ta probíhá za 2000-3000°C v ochranné atmosféře argonu. Po zpracování probíhá povrchová úprava vlákna, sdružování a navíjení. Výsledné vlákno má tloušťku v jednotkách μm. [17]

Uhlíková vlákna mají, na rozdíl od ostatních syntetických vláken, progresivní deformační charakteristiku. To znamená, že se zvyšujícím zatížením se zvětšuje i hodnota modulu pružnosti. Tato vlákna mají mimořádně vysokou korozní odolnost. Proto je možné je využívat například k výrobě implantátů jako jsou kyčelní klouby. [18]

### 2.1.3.3.3. Skelné vlákno

Skelné vlákno nabízí dobrou kombinaci vlastností a ceny. Rozeznáváme několik druhů, které se liší vlastnostmi a použitím: E-sklo – vyšší elektrický odpor, S-sklo – vysoká pevnost, C-sklo – vysoká chemická odolnost, sklo ACR – odolná proti alkáliím, křemenná vlákna. [17]



*Obrázek 8: Sekaná skelná vlákna*

Základ skelného vlákna tvoří vždy silikát  $\text{SiO}_2$  s přísádky kovů (např. hliník, vápník, hořčík, bor, sodík, draslík,...).

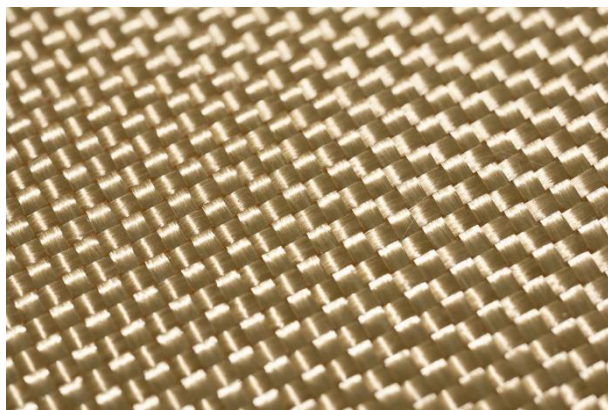
Modul pružnosti v tahu skelného vlákna je srovnatelný s hliníkem, asi třetinová v porovnání s ocelí a je vyšší než u většiny organických i anorganických vláken. Skelné vlákno může dlouhodobě operovat v teplotách okolo  $250^\circ\text{C}$ . Tepelná vodivost je vyšší než u jiných materiálů, ale stále podstatně menší než u kovů. Skelná vlákna jsou nehořlavá. [17][18]

#### **2.1.3.3.4. Aramidové vlákno**

Jedná se o organické vlákno. Aramidové vlákno má poměrně vysoké hodnoty pevnosti v tahu a modul pružnosti, ale jeho specifickou vlastností je odolnost v aplikacích s rázy. Tato vlastnost je horně využívána v letectví, ale také v neprůstřelných vestách a jiných pancéřováních. Aramidové vlákno je nejlehčí vyztužující vlákno. Jeho nevýhodou je malá pevnost v tlaku v podélném směru. Z toho důvodu je vhodné navrhovat aramidové konstrukce tak, aby byla vlákna zatěžována převážně tahem v podélném směru. [17][18]

Aramidová vlákna dokáží absorbovat vlhkost až do 7%. Vlhkost vláken ovlivňuje pevnost jejich spojení s maticí i jejich vlastní pevnost. Před použitím by se měla vlákna sušit aspoň 20 minut při  $120^\circ\text{C}$ . [18]



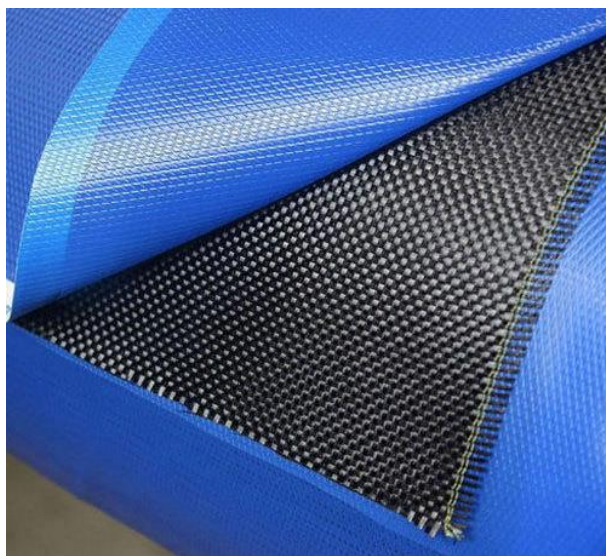


*Obrázek 9: Tkanina z aramidových vláken*

Aramidy se dělí na dvě skupiny. První z nich jsou para-aramidy (PPTA – například Kevlar), které mají vysokou pevnost i modul pružnosti. Druhou jsou meta-aramidy (MPIA – např. Nomex) které vynikají teplotní odolností a elektroizolačními schopnostmi. [17]

#### **2.1.3.3.5. Prepreg**

Prepreg je polotovár pro výrobu kompozitních dílů. Je to předimpregnovaná rohož nebo tkanina s matricí v podobě pryskyřice. Prepreg v této formě je v tzv. B-stavu. To znamená, že je pryskyřice tuhá, lepkavá a na výztuži ulpívá. Prepreg je poddajný a lze ho libovolně tvarovat a umísťovat do forem. Takto připravený prepreg má omezenou trvanlivost, protože dochází k samovytvrzování pojiva.



*Obrázek 10: Prepreg - předimpregnovaná uhlíková tkanina v ochranných fóliích*



Mezi hlavní výhody prepregu patří minimální poměr matrice k výztuži. To zaručuje dobrou stabilitu a opakovatelnost výroby. Další výhodou je jednoduchost manipulace. Lepkavost prepregu zajišťuje snadné tvarování a kladení do formy, kam sám přilne. Vlákná je třeba skládat vždy tak, aby byla namáhána na tah. Skládání do formy se musí provádět v tzv. čistých místnostech, kde jsou udržovány konstantní teplota, vlhkost a obsah prachových částic. Pokládání do formy musí být prováděno opatrně, protože nesprávným posunutím se může tkanina nenávratně zdeformovat. [17][19]

#### **2.1.3.3.6. Gelcoat**

Gelcoat je materiál používaný k zajištění vysoce kvalitní povrchové úpravy kompozitu. Nejběžnější jsou termosetové polymery na bázi epoxidové nebo nenasyčené polyesterové pryskyřice. Gelcoat se nanáší na formu v kapalném stavu. Po vytvrzení jsou na něj nanášeny termosetové polymerní kompozity. [19]



*Obrázek 11: Nanášení gelcoatu na formu*

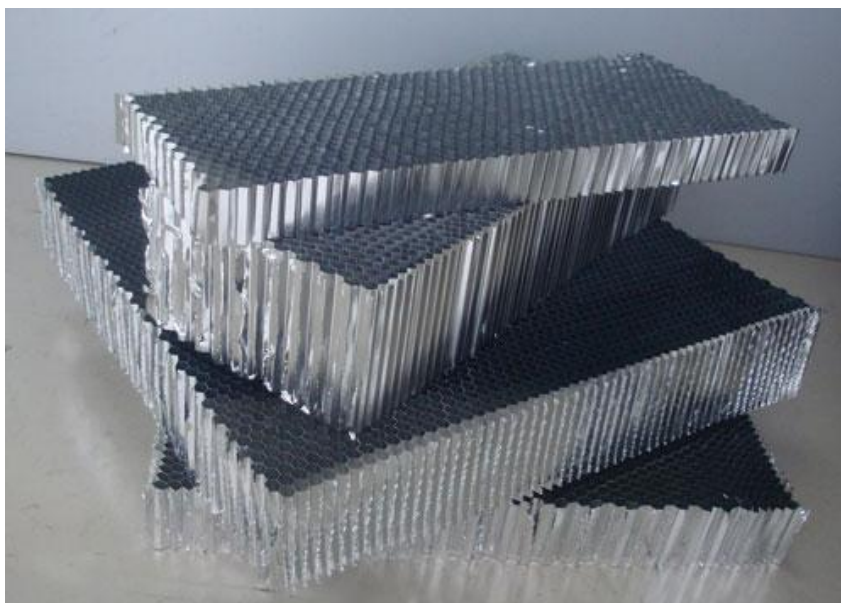
## 3. Výroba

### 3.1. Ruční kladení (ruční laminace)

Jedná se o nejstarší a dosud nejrozšířenější metodu výroby kompozitu. Ruční kladení patří mezi „otevřené“ technologie. Vše začíná u formy, která se musí ošetřit 0,3-1 mm tlustou vrstvou gelcoatu. Gelcoat zajišťuje ochranu vůči okolnímu prostředí (voda, chemická média) a také zlepšuje estetičnost povrchu. Na vytvrzený gelcoat se ručně kladou jednotlivé vrstvy výztuže, které jsou prosycovány iniciovanou pryskyřicí pomocí štětce nebo válečku. Po dokončení kladení se přebytečná pryskyřice a vzduchové bublinky odstraní rýhovaným válečkem nebo štětcem.

Vytvrzování probíhá při pokojové teplotě a bez aplikace tlaku. Ten je potřeba pouze v případech, že se jedná o sendvičovou konstrukci stěny se zabudovaným lehkým jádrem (např. pěna).

Sendvičové struktury pomáhají tvořit složitější struktury kompozitních výrobků. Nejčastěji se využívají k zvýšení tuhosti struktury při minimálním zvýšení hmotnosti. K tomuto účelu se využívají voštiny, pěny, přírodní materiály a kompozitní materiály. Voština je uspořádána do buněčné struktury připomínající včelí plástev. [17]



Obrázek 12: Hliníková voština

Pro potřeby montáže se mohou vkládat různé inserty. Titanové inserty na obrázku 12 nahrazují kompozit v místech, kde by se mohly projevit jeho nedostatky. Konkrétně u uchycení zadního kola a průchodu pro šroub k uchycení vidlice k rámu. [17]



Obrázek 13: Křivná vidlice BMW z uhlíkového kompozitu s titanovými inserty

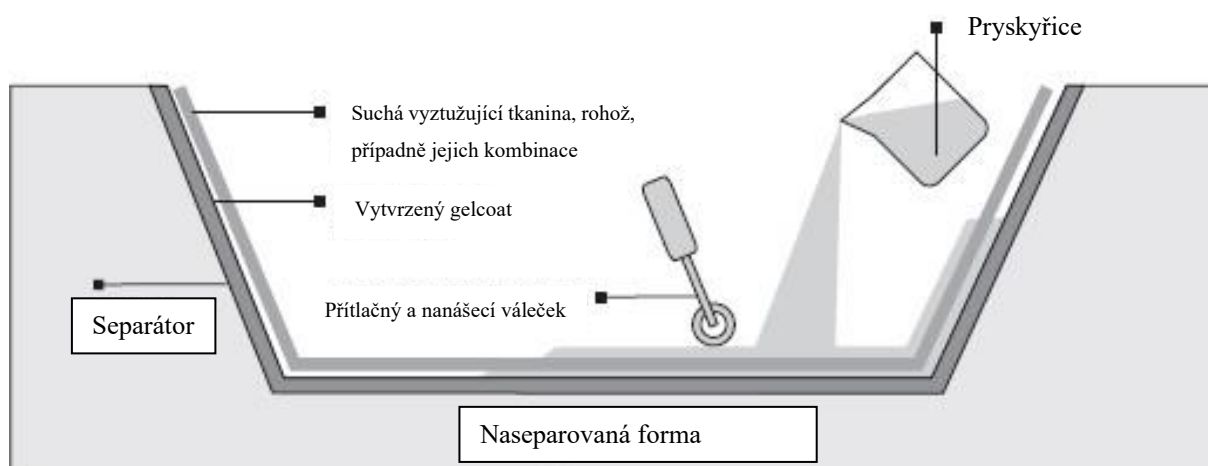
Úplný kontakt kompozitu s formou je zajištěn zabalením do vakuového vaku a následným odsáním vzduchu.

#### **Používané materiály:**

- **Výztuž:** skleněná, uhlíková, aramidová či jiná syntetická nebo přírodní vlákna. Nejčastější forma výztuže jsou tkaniny různé gramáže, stylu tkaní a orientace nebo rohože a různé netkané či tkané plošné nebo trojrozměrné materiály.
- **Matrice:** nejčastěji polyesterové nebo epoxidové pryskyřice. Jejich typ se volí dle časové náročnosti zpracování, požadavků na pevnostní charakteristiky, teplotní a chemickou odolnost nebo speciální požadavky jako jsou snížená hořlavost, nízké smrštění a podobně.

Ruční kladení je vhodné pro malé až velkorozměrové výrobky od jednoduchých až po značně složité díly. Roční kladení je časově náročný proces. Je využíváno pro kusovou výrobu až nižší sériovost (do 1000 kusů). Nenáročnost procesu a nízké náklady jsou skvělým předpokladem pro výrobu prototypů. [7]

## Ruční kladení/ *hand lay-up*



Obrázek 14: Schéma výroby kompozitu ručním kladením



Obrázek 15: Trup lodi ve formě vyrobený ručním kladením

### 3.2. Injektážní a infuzní technologie

Tyto metody patří mezi „uzavřené technologie“. Uzavření ve formě zamezuje odparu škodlivého styrenu, k čemuž dochází během zpracování a vytvrzování. Tato metoda je stále více využívaná kvůli požadavkům na snížení emisí. Nahrazuje ruční kladení a stříkání. Tyto technologie jsou založeny na prosycování suché výztuže ve formě kapalnou pryskyřicí pomocí injektáže, vakua nebo jejich kombinací. [8]

### 3.2.1. Vysokotlaké vstřikování (RTM – resin transfer moulding)

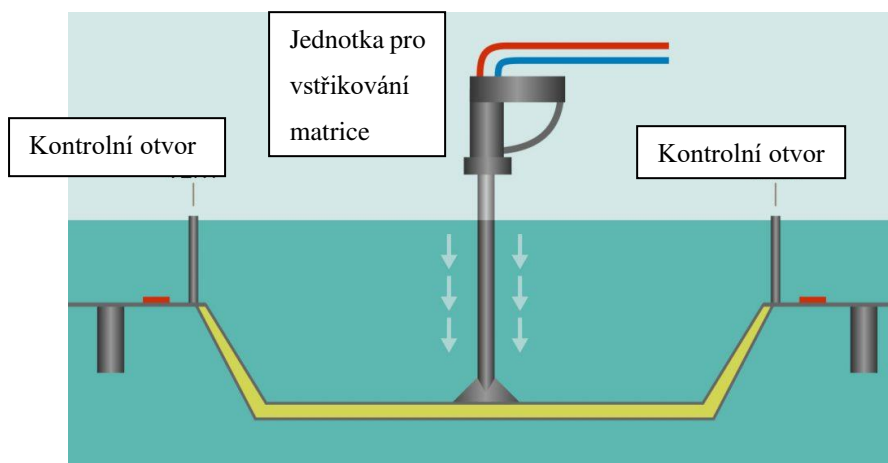
Výroba v kovové nebo polymerbetonové formě. Jejich konstrukce musí být robustní, aby vydržela vysoké vnitřní tlaky.

Do formy je nanesen gelcoat a následně je vyskládána suchou výztuží. Při velkosériové výrobě se vkládají tzv. předlisky z výztužného materiálu. Vyztužující materiál je na bázi skelných nebo jiných vláken. Výztuž musí umožnit dostatečný tok matrice, aby došlo k prosycení v krátkém čase. Následně je forma uzavřena tuhým vrchní dílem a je zajištěna rychloupínacím systémem. Pojivo je přivedeno do vstřikovacího otvoru pomocí injektážní pistole. Vstřikování probíhá dokud nezačne vytékat pojivo z kontrolních otvorů, což signalizuje úplné prosycení.

#### Používané materiály:

- **Výztuž:** rohože z nekonečného vlákna, prošíváné rohože, speciální komplex skleněná rohož + vnitřní řídká rohož se syntetických vláken, povrchové rohože o nízké gramáži
- **Pojivo:** polyesterové pryskyřice se zabudovaným urychlovačem – často ve směsi s levnými plnivý (uhličitan vápenatý, auminiumtrihydrát) pro snížení nákladů a úpravu vlastností, speciální typy tzv. class A se sníženým smrštěním pro automobilové díly

Tato technologie je vhodná pro vyšší sériovou výrobu, čítající až několik tisíců kusů, díky krátkým výrobním cyklům a regulovatelné kvalitě. Nevýhodou je vysoká počáteční investice na vstřikovací zařízení a náklady na výrobu forem. [8]



Obrázek 16: Schéma výroby pomocí vysokotlakého vstřikování

### 3.2.2. Vakuo-injektážní technologie (VARTM – vakuum assisted tranfer moulding, nebo také RTM light)

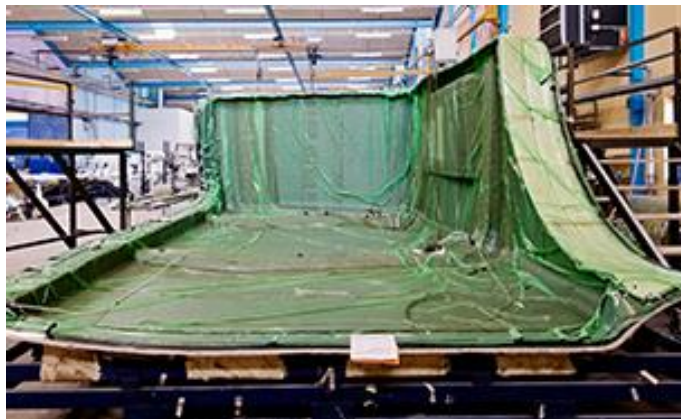
Jedná se o modifikaci RTM. Zde pomáhá prosycení vakuem. VARTM dělíme na dvě základní uspořádání:

- a) Vstříkování do středu formy, vakuum je aplikováno po obvodu formy
- b) Přívod pojiv do obvodového kanálku, vakuum je aplikováno ve středu formy

Výhodou tohoto procesu výroby jsou nižší tlaky (0,5-1 bar), které umožňují konstrukci méně robustních forem a tím pádem i výrobu větších dílců.

#### Používané materiály:

- Stejně jako u RTM + těsnicí profily a pásky na zajištění vakua ve formě. [8]



Obrázek 17: Výrobek ve vakuovém vaku

### 3.2.3. Vakuové prosycování (VIP – vakuum infusion process)

Tato technologie je obdobná RTM light s tím rozdílem, že se nevyužívá injekční zařízení. VIP je dělí na 3 typy:

- a) VIP s pružnou vrchní částí formy. Tato část je kompozitní a reguluje přítlak. Spodní část formy je tuhá s odsávacími kanálky. Uzavírací sílu a prosycování zajišťuje vakuum 0,6-0,8 bar. Pojivo se přivádí ze zásobníku nebo je nanášeno na suchou výztuž před

uzavřením formy. Tato metoda je vhodná pro oboustranně hladké dílce s možností jádrových materiálů pro vytvoření sendvičové struktury.

- b) Vakuové prosycování pod pružnou fólií. Spodní forma je stejná jako u ručního kladení a jako horní část formy slouží pružná fólie. Ta se připevní k okrajům formy pomocí těsnící pásky. Pojivo je opět přidáváno ze zásobníku. Vakuum se vytváří pomocí kanálků na obvodu formy.
- c) Metoda SCRIMP je velmi podobná metodě b). Vrchní díl tvoří fólie a spodní díl je jako u ručního kladení. Pryskyřice je rozváděna speciální sítkou, která se umístí na celý povrch suché výztuže.

#### **Používané materiály:**

- **Výztuž:** Tkaniny na bázi skelných, uhlíkových a aramidových vláken, nebo jejich kombinace o různé gramáži, stylu tkaní a různou orientací
  - Jádra: pěnové nebo voštinové materiály pro sendvičové struktury
- **Pojivo:** polyesterové pryskyřice, epoxidové pryskyřice [8]

### **3.3. Navíjení**

Tento výrobní proces slouží převážně k výrobě kompozitních dutých těles jako jsou trubky, nádrže a nádoby různého tvaru a velikosti. Výroba probíhá, jak uvádí název, navíjením skelného, uhlíkového či aramidového vlákna na jádro (trn) ve tvaru výrobku. Toho vlákno je již impregnované pojivem.

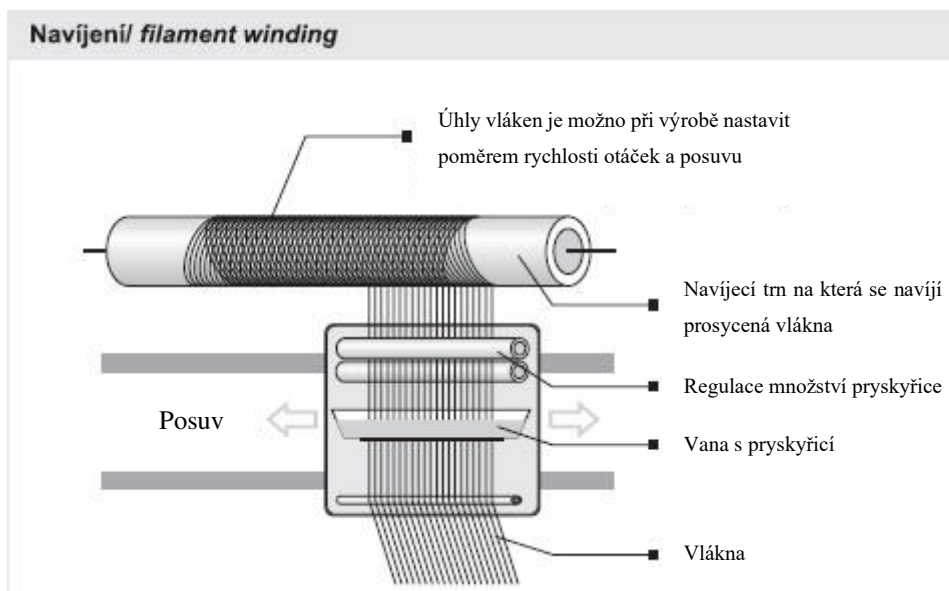
Proces navíjení je plně automatizovaný. Trn rotuje zatímco se ukládací rameno pohybuje podél osy. To umožňuje přesné kladení vláken v několika osách a vytváření relativně složitých tvarů. Impregnační a naváděcí zařízení vytváří určité předpětí, které umožňuje přesné uložení na jádro. Rychlost otáčení trnu a posun ukládacího ramene umožňují regulovat úhel návínů od 90° přes křížový návín s různým úhlem až po 0°. Rozebíratelné a vyjímatelné trny umožňují integrálním navíjením vytvořit kompletní nádoby včetně dna a vrchlíků pouze s malými polárními otvory.



### Používané materiály:

- **Výztuž:** pramence skleněných, uhlíkových nebo aramidových vláken
- **Pojiva:** polyesterové pryskyřice, vinylestery, epoxidy

Tato technologie je na vzestupu. Její hlavní nevýhodou je vysoká pořizovací cena stroje a navíjecích trnů. Navíjením je možné vyrábět trubky o průměru od 150 mm do 3000 mm a nádrže od 1 m<sup>3</sup> do 100 m<sup>3</sup>. [9]



Obrázek 18: Schéma výroby kompozitu navíjením



Obrázek 19: Hnací hřídel vyrobená navíjením



### 3.4. Lisování

#### 3.4.1. Lisování za studena

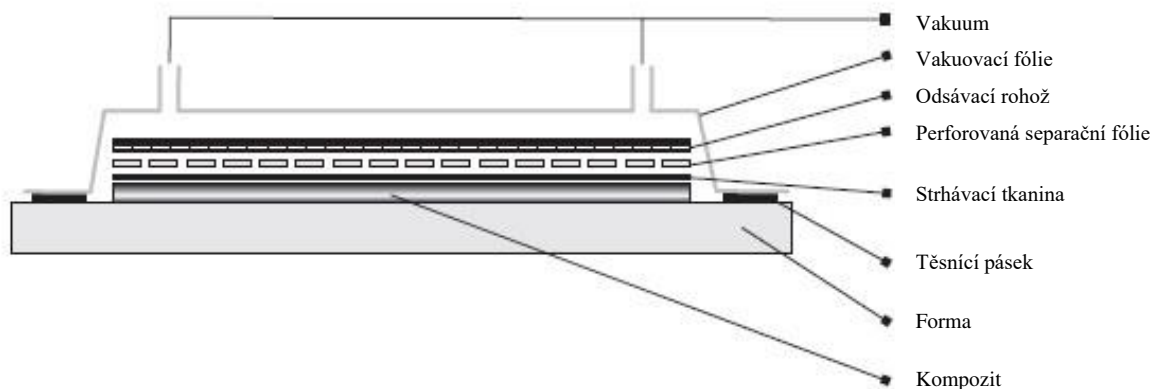
Probíhá za nízkého tlaku 0,3-10kg/cm<sup>2</sup> a za pokojové teploty. Díky tomu nemusí být formy vyhřívány, takže je jejich cena nižší. Formy se vyrábí z plechu, laminátu nebo hladkého dřevotřískového lamina a jsou dvoudílné. Tlak vytváří šroubové svěrky, hydraulické válce nebo nízkotlaké etážové lisy.

#### Používané materiály:

- **Výztuž:** Nejčastěji tkaniny na bázi skleněných či jiných vláken o různé gramáži, stylu tkaní a orientaci.
- **Pojivo:** Polyesterové nebo epoxidové pryskyřice

Tato technologie není investičně náročná a je vhodná pro výrobu po sériích o 100-5000 kusech. [10]

#### Lisování pomocí vakua/ vacuum bagging



Obrázek 20: Schéma výroby kompozitu lisováním

### 3.4.2. Lisování za tepla a tlaku

Proces probíhá za zvýšené teploty i tlaku. Formy jsou dvou nebo vícedílné a musí mít leštěné či tvrdě chromované povrchy. Vyhřívání je nejčastěji elektrické nebo topným médiem. Tlak 10-300 kg/cm<sup>2</sup> zajišťují hydraulické lis. Výchozím materiálem jsou buď prepregy – lisovací rohože (SMC – sheet moulding compounds), lisovací těsta (DMC – dough moulding compounds) nebo lisovací směsi – premixy (BMC – bulk moulding compounds)

Prepregy – lisovací rohože (SMC) jsou směsi sekaných vláken a pojiva na bázi polyesterových nebo vinylesterových pryskyřic. Tato směs je převedena do částečně vytvrzeného stavu s aditivou plniv, pigmentů a různých látek zlepšujících kvalitu povrchu, tokové a jiné vlastnosti. Zvýšením teploty a tlaku je prepregový přířez schopný zaplnit dutinu formy a dalším působením tepla se vytvrdí.

#### Používané materiály:

- **Výztuž:** prepregy – lisovací rohože (SMC), lisovací těsta (DMC), premixy (BMC)
- **Pojivo:** Polyesterové pryskyřice různých typů

Lisování za tepla je velmi produktivní výrobní technologie. Je vhodné pro velkosériovou výrobu (2-5 tisíc kusů) malých a středních dílů. Výhodou je krátká doba výrobního cyklu (několik minut), možnost automatizace a vysoká reprodukovatelnost kvality a rozměrů. Nevýhodou je vysoká pořizovací cena a náklady na formy. [10]

### 3.5. Pultruze (tažení)

Tažení umožňuje efektivní výrobu kontinuálním způsobem plných, dutých i tvarových profilů s vysokým obsahem výztuže (až 80%). Výztuž prochází lázní s iniciovanou pryskyřicí. Po prosycení a odstranění přebytečné pryskyřice je výztuž vtahována do tvarovacích a vytvrzovacích průvlaků. Dutina průvlaku přesně odpovídá vnějšímu tvaru vyráběných profilů. Suchá výztuž může být také prosycována až v počáteční sekci formy.

Ve formě dochází k vytvrzení působením sdíleného tepla. Kompozitní profil je z formy odtahován hydraulicky nebo pásovými elementy a následně je dělen na požadovanou délku.

### Používané materiály:

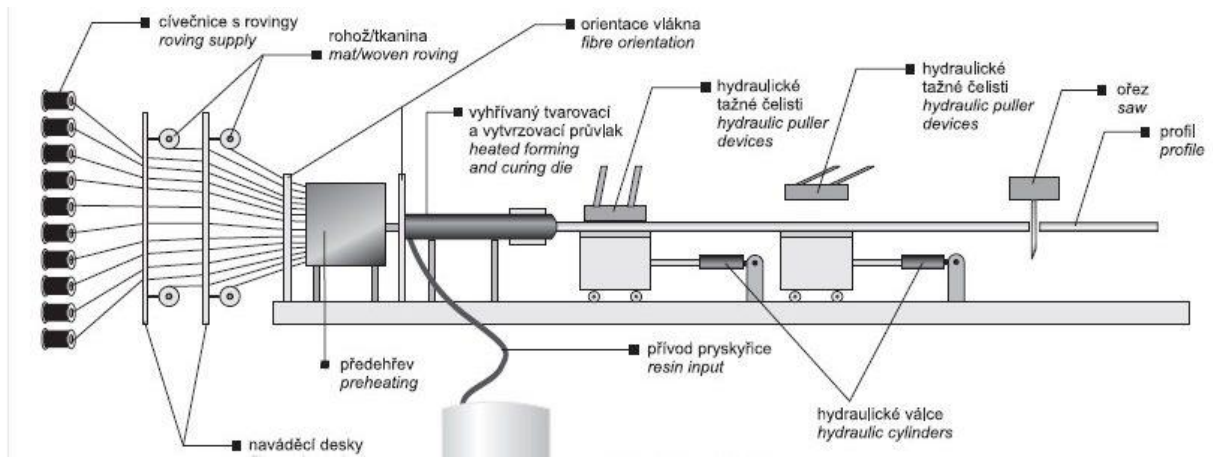
- **Výztuž:** skleněný roving (z angl.: provazec, je to nekonečný svazek textilních vláken bez zákrutu), uhlíkové pramence, tkané stuhy a pásy z různých vláken, rohože s těžkorozpustným pojivem



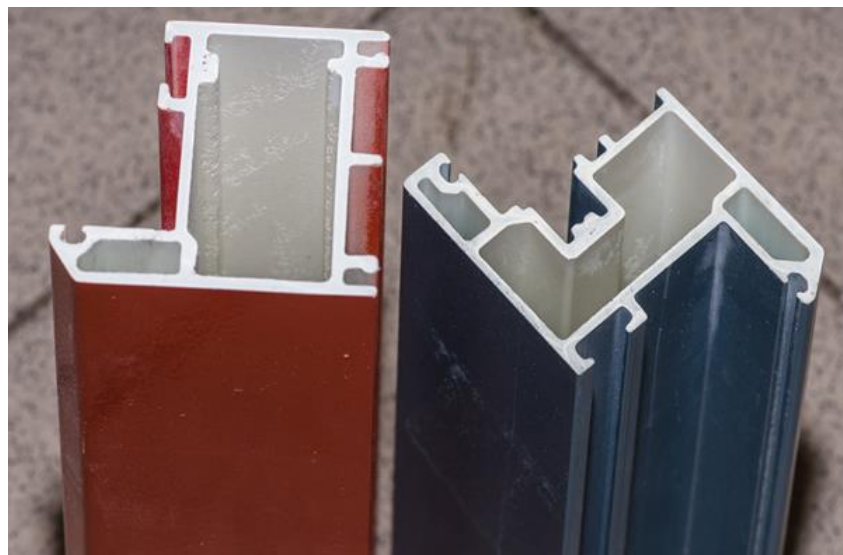
*Obrázek 21: Skleněný roving*

- **Pojivo:** nízkoviskózní polyesterové, vinylesterové nebo epoxidové pryskyřičné systémy vytvrzující se rychle za zvýšených teplot (80-160°C). Obvykle obsahují vnitřní separátory, aditiva pro zlepšení hladkosti povrchu a usnadnění probarvení, pigmenty a plniva

Tato technologie je vhodná pro kontinuální výrobu profilů. Lze tak vyrábět tenké a jednoduché pásy (1 mm), tyče a trubky různých průměrů, ale také velmi složité díly s šířkou a výškou několik desítek cm a tloušťkou stěny až 15 mm. [11]



Obrázek 22: Schéma výroby kompozitu tažením



Obrázek 23: Profily vyrobené tažením

### 3.5.1. Ostatní kontinuální metody

Laminátové desky (rovné i vlnité) se také vyrábí na kontinuálních linkách. Jako výchozí materiál jsou používány tkané materiály, sekané pramence nebo rohože. Nanáší se na nosnou fólii a následně jsou prosycovány pryskyřicí během průchodu lázní nebo zkrápěním. Po překrytí vrchní separační fólií je materiál vtahován do tvarovací a vytvrzovací zóny. Linka je zakončena odtahovým, formovacím a řezacím zařízením. [11]

### 3.6. Odstředivé lití

Tato technologie se využívá k výrobě dutých těles rotačního tvaru na stroji, který kombinuje strojní stříkání a odstředivé lití.

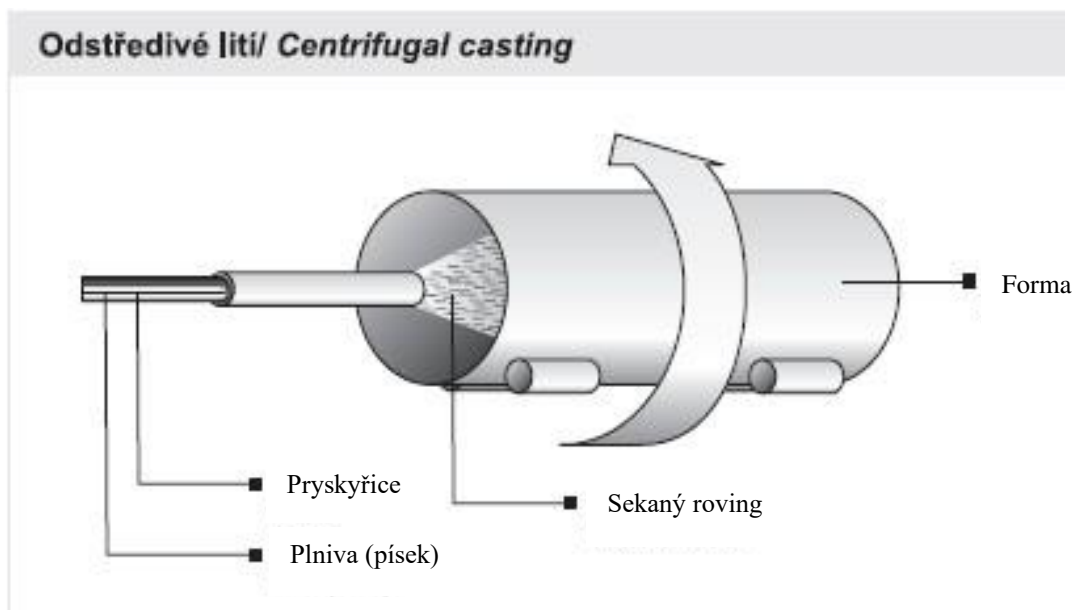
V duté rotující formě se pohybuje stříkací zařízení, které nanáší směs sekaných vláken, iniciované pryskyřice a různých plniv. Odstředivá síla nanesené vrstvy postupně zhutňuje. Má-li díl sloužit jako potrubí, tak se jako poslední vrstva nanáší pružná chemicky odolná pryskyřice. Po vytvrzení lze trubku snadno vyjmout z formy.

#### Používané materiály:

- **Výztuž:** převážně sekaný skleněný roving
- **Pojiva:** jako základ se používají polyesterové pryskyřice ortoftalového typu
- **Plnivo:** až 35% směs uhličitanu vápenatého a křemičitého písku

Vnitřní (linerová) vrstva je tvořena vinylestery pro korozně namáhané aplikace nebo vysoce pružnou speciální pryskyřicí, ta je odolná vůči abrazi pro odvod splaškových vod.

Odstředivé lití do jisté míry konkuruje technologii navíjení, je však vhodnější pro silnostěnná potrubí určená pro zásyp. [12]



Obrázek 24: Schéma výroby kompozitu odstředivým litím

### 3.7. Stříkání

Při tomto výrobním procesu je pneumaticky nanášen sekaný roving a iniciovaná pryskyřice na formu. Ovládání stříkací pistole je prováděno převážně ručně, ale je možná i automatizace. Formy jsou stejné jako pro ruční kladení – nenákladné a většinou vyrobené z kompozitů.

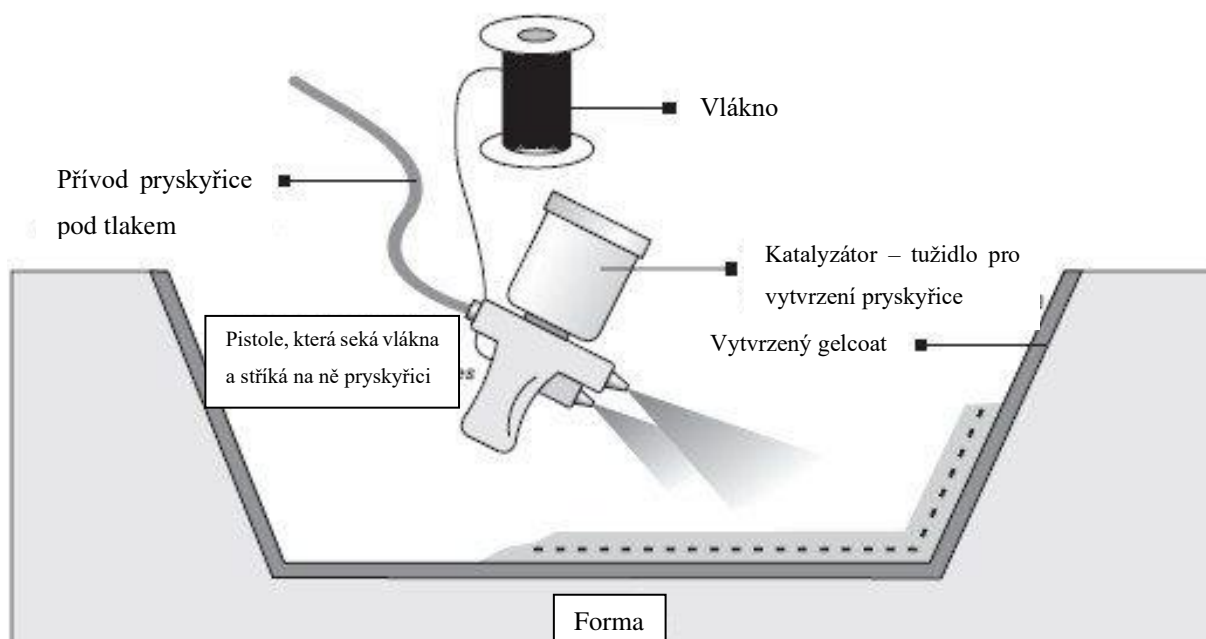
Na začátku výroby je aplikován gelcoat a následné stříkání se provádí v několika vrstvách „mokrě do mokrého“ podle požadované tloušťky. Nanesená vrstva se zhutňuje a odstraní ze z ní bubliny rýhovanými nebo štětinovými válečky.

Stříkání je nutno provádět v odvětrávaných prostorech, protože se používají téměř výhradně polyesterové pryskyřice obsahující styren.

#### Používané materiály:

- **Výztuž:** skleněný roving nebo výjimečně jiné kontinuální vlákno
- **Pojivo:** většina polyesterových pryskyřic ortoftalového, izoftalového nebo tereftalového typu.

Stříkání je vhodné pro výrobu středních až velkorozměrových jednodušších dílů. Využívá se například k nanášení laminátové směsi na rub polymethylmetaakrylátových sanitárních výrobků (vany, umyvadla, dna sprchových koutů) pro zvýšení jejich pevnosti a tvarové stability. Stříkání je vhodné pro sériovou výrobu. Nevýhodou je zvýšená produkce odpadu a relativně vysoké vstupní investice na stříkací zařízení a odsávané boxy spojené se systémem na likvidaci styrenových par. [13]



*Obrázek 25: Schéma výroby kompozitu stříkáním*



*Obrázek 26: Stříkání rovingu s pojivem na formu*

### **3.8. Odlévání**

Odlévání se používá pro výrobu vláknů nevyztužených kompozitů. Jedná se o lití směsi pryskyřic, plniv, pigmentů, aditiv a vytvrzovacích složek do forem za určitých podmínek. Ty jsou závislé na požadavcích na konečný produkt.

**Používané materiály:** běžné polyesterové pryskyřice orto nebo izoftalového typu, plniva, pigmenty

**Produkty:** umělý mramor, polymerbeton

Technologie lití je vhodná pro: výroba umělého mramoru pro sanitární aplikace, polymerbeton pro průmyslové aplikace (odpadní trubky a drenážní systémy, dlažby a kraje chodníků, průmyslové podlahy), solid surface pro vybavení koupelen, kuchyňské a jiné pulty, desky stolů, dlaždice a jiné dekorativní aplikace. [14]



*Obrázek 27: Sběrná vpust' z polymerbetonu*



## 4. Autoklávová technologie

Autokláv je v podstatě pec, která využívá tlak a teplotu zároveň. Teplota a tlak jsou udržovány počítačem na stálé hodnotě. Tlak je zvyšován přívodem ohřátého vzduchu či dusíku do komory. Autoklávy jsou využívány napříč různými odvětvími průmyslu. Často jsou využívány k sterilizaci vybavení v nemocnicích a ke zrání a vytvrzování kompozitních součástí. Další využití je například pro: laminování skla, vulkanizaci gumy a ošetření dřeva.

Kvůli vnitřnímu přetlaku má autokláv tvar válce s klenutými podstavami. Ten nejlépe rozloží působení vnitřních sil bez hromadění pnutí na hranách. [16]



Obrázek 28: Největší autokláv na světě, který byl zapsán do Guinnessovy knihy rekordů s pracovní délkou 23,5 metru a průměrem 9,26 metru [20]

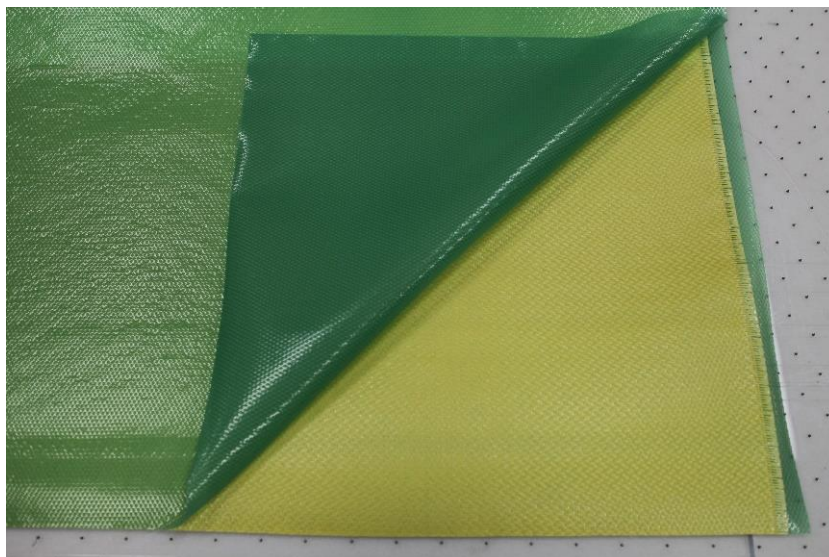
Při tomto způsobu výroby kompozitních materiálů jsou využívány termoplastické prepregy (viz kapitola 2.1.3.3.5). Ty jsou kladeny do formy v požadované sekvenci. Formy s položeným kompozitem jsou následně vakuově zabaleny a vloženy do autoklávu. Po vytvrzení je výrobek vyjmut z formy. [1]

#### **4.1. Používané Materiály**

Nejčastěji zastoupeným materiálem výztuže je uhlíkové vlákno. To je obvykle ve formě prepregu. Jako matrice prepregu se využívá polyetereterketonová nebo polyfenylsulfidová matrice. Skleněná a kevlarová vlákna se také používají, ale podstatně méně. Jsou párována s polypropylenovou nebo nylonovou matricí. [1]



*Obrázek 29: Prepreg z uhlíkového vlákna (viz. obrázek 10)*



*Obrázek 30: Prepreg z kevlarového vlákna*

## **4.2. Formy**

Formy jsou většinou vyráběny z korozi vzdorné oceli nebo z hliníkových slitin. Pro trubky může mít forma tvar vřetene. Pro zbytek výrobků jsou používány otevřené formy různých tvarů a rozměrů. Při návrhu a výrobě formy je důležité zohlednit změnu rozměrů výrobku i formy, která vzniká vlivem teploty v autoklávu. [1]



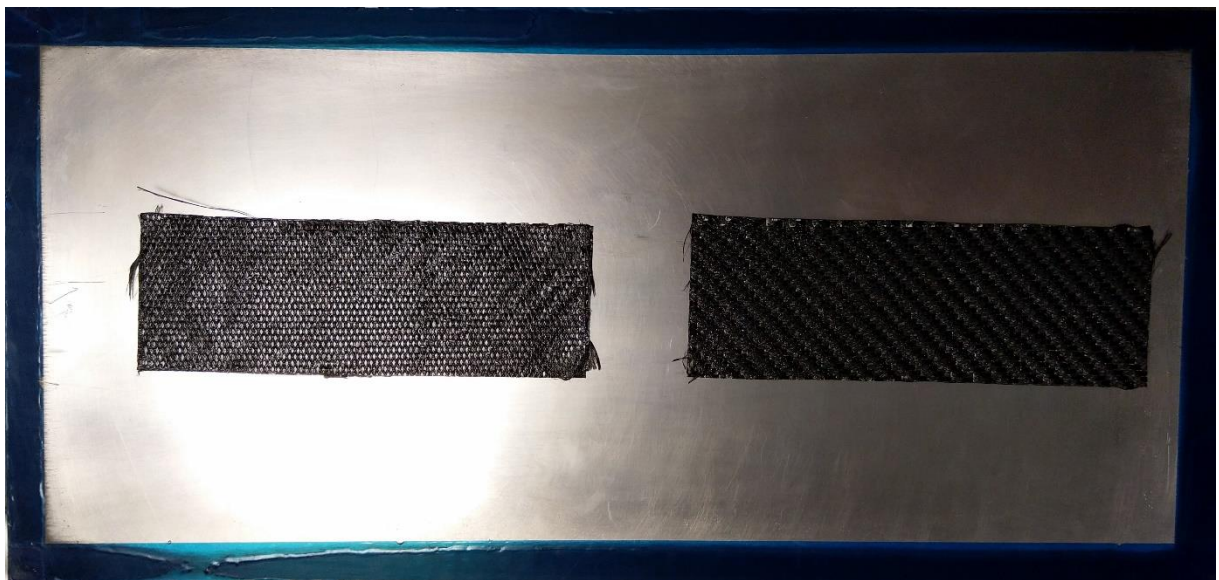
*Obrázek 31: Forma pro výrobu kompozitních součástí pro vesmírný průmysl*



### 4.3. Proces výroby

První fází výroby je příprava formy. Ta musí být řádně očištěna, odmaštěna a obecně připravena k použití.

V dalším kroku jsou prepregy vkládány do formy v požadované sekvenci. Kusy prepregu s termoplastovou matricí jsou bodově svařeny, aby se zamezilo jejich pohybu ve formě. Termosetový prepreg je lepkavý a jeho kusy na sobě drží samy, bez nutnosti svaření. Termosetové prepregy jsou díky své lepkavosti jednodušší na manipulaci. Je možné z nich vytvářet mnohem složitější tvary.



*Obrázek 32: Prepreg položený na formě*

Po dokončení kladení kompozitu do formy následuje příprava na vakuové balení. Na prepreg je položena strhávací tkanina (viz obr. 33), která slouží k snadnějšímu oddělení hotové součásti od ostatních balících vrstev. Po strhávací tkanině následuje děrovaná vakuovací fólie a nakonec odsávací rohož.



*Obrázek 33: Role strhávací tkaniny*

Následně je celá forma s kompozitem vložena do vakuového pytle. Z něj je pak odsáto co nevíce vzduchu. Vzduchové kapsy mezi vrstvami prepregu musí být odstraněny, protože by mohly narušit strukturu a s ní mechanické vlastnosti vytvářené součásti. Při výrobě součástí s větší tloušťkou průřezu je nutné průběžně vakuově odstraňovat vzduch z vrstev prepregu. Pro zlepšení pevnosti je vhodné odstranit většinu vzduchu už při samotném kladení. Materiály, ze kterých jsou vyráběny vakuové pytle, musí vydržet vysoké teploty uvnitř autoklávu (cca do 200°C). Po vakuovém zabalení je forma vložena do autoklávu.

V autoklávu na výrobek působí tlak a teplota. Aplikace tepla a tlaku se liší u termoplastů a termosetů. Teplota v autoklávu se postupně zvyšuje v krocích 2-4°C/min. Termoplasty je třeba zahřát na vyšší teploty než termosety. Ohřev musí být pod teplotu tavení dané matrice. Kvůli vyšší viskozitě termoplastů je třeba působení většího tlaku v autoklávu. Celý proces probíhá kratší dobu než u termosetů, protože nemusí proběhnout chemická reakce, která zapříčiní vytvrzení.

Jsou používány dva základní způsoby. První je vakuum z vaku, ve kterém je forma s kompozitem zabalena a druhý je externí tlak autoklávů. Tlak pomáhá odstranit vzduchové bublinky z kompozitu a také zlepšuje tok matrice mezi výztuží během vytvrzování. Tok matrice je způsoben teplotou, která se vytvoří v autoklávu. Molekulární difuze a tím i pevnost jsou

závislé na délce vytvrzování. S časem se v matrici vytváří delší řetězce polymerů a tím se výsledný produkt stává pevnějším. Po vytvrzení je součást vyjmuta z formy a pokračuje na další zpracování.

Termosetové kompozity jsou mnohem jednodušší na výrobu. Snadněji se kladou a k jejich vytvrzení je třeba nižších teplot než u termoplastových kompozitů.

## 5. Popis a funkce autoklávu

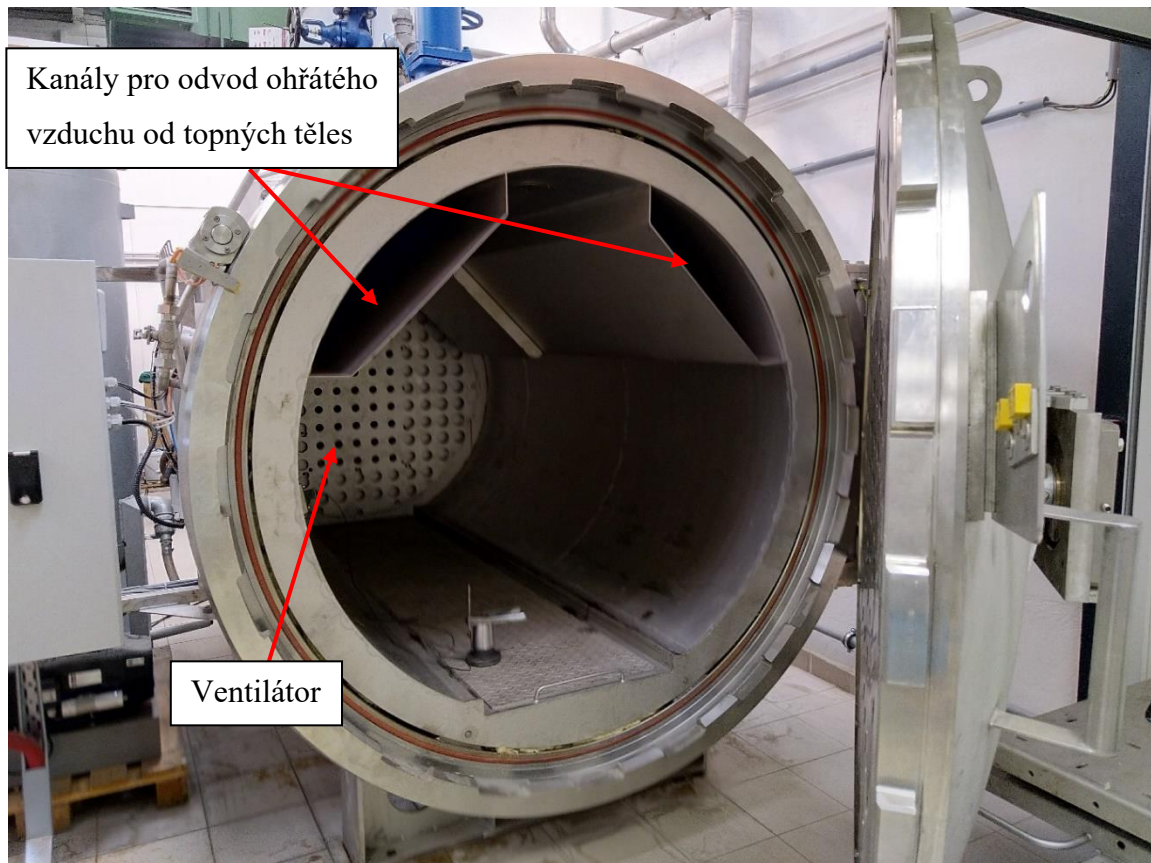
Jak bylo již uvedeno výše, autokláv je pec, která využívá teplotu a tlak. Dále bude následovat popis experimentálního zařízení (autoklávu) umístěného v Laboratoři výroby a zpracování kompozitních materiálů na Ústavu strojírenské technologie, který byl použit v této bakalářské práci. Celkové rozměry autoklávu viz příloha 1.

Tlak se vytváří přívodem vzduchu (nebo dusíku) do vnitřní komory autoklávu který je zajištěn přívodem vzduchu pomocí kompresoru Aircraft 15 Bar, 5,5 kW, 400V. Vzhledem k hlučnosti a menšímu výkonu byl autokláv připojen na velký kompresor Atlas Copco GA15 FF v halových laboratořích Ústavu strojírenské technologie. Autokláv je schopný vytvořit vnitřní přetlak až 1,5 MPa s přesností řízení 0,1 MPa. Vnitřní tlak je regulován pojistným ventilem, který při přetlaku 0,4 Bar nad požadovanou hodnotu odfoukne na -0,1 Bar pod požadovanou hodnotu. Tato regulace tlaku probíhá automaticky a je řízena počítačem.



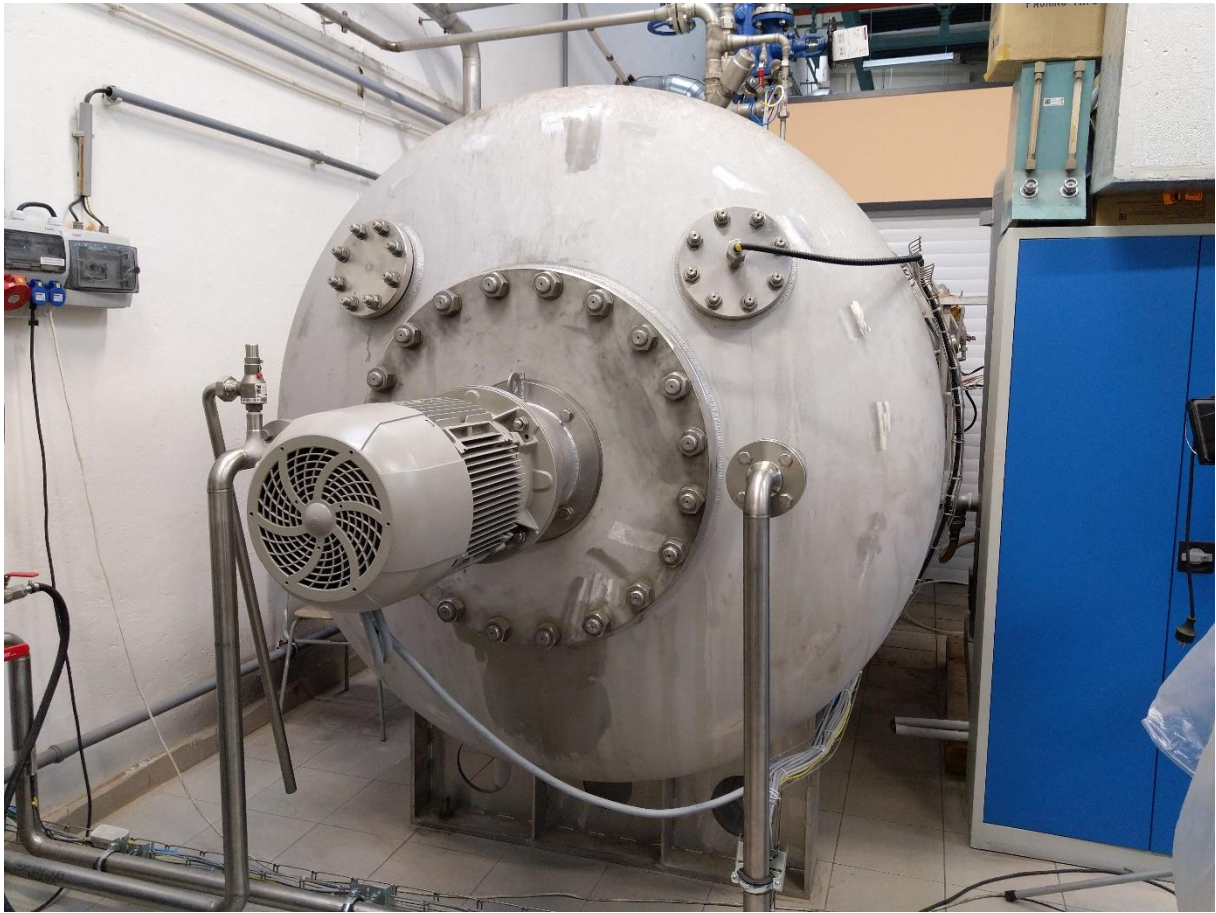
Obrázek 34: Ventil pro regulaci vnitřního tlaku

Ohřev a chlazení jsou také automatické. Celkový elektrický příkon autoklávu je 100 kW a příkon topných tyčí je 80 kW. Rozvod ohřátého vzduchu a rovnoměrné rozdělení vnitřní teploty obstarává vestavěný ventilátor.



*Obrázek 35: Čelní pohled do autoklávu*





*Obrázek 36: Elektromotor ventilátoru (zadní pohled na autokláv)*



*Obrázek 37: Dveře autoklávu s kanálem pro rozvod ohřátého vzduchu*

Vzduch je hnán ventilátorem přes topná tělesa, skrz tunely na stropě komory a přes dveře do vnitřního prostoru autoklávu (viz obrázky 35 a 37). Maximální pracovní teplota je 200°C s rychlostí ohřevu 0,5-6 °C/min a rychlostí ochlazování 3-6°C/min. Teplotu je možné měřit vícebodově. Konkrétně s dvěma vestavěnými termočlánky od výrobce a dalšími šesti, které je možné připojit a umístit dle potřeby. Teplota je řízena jedním zvoleným termočlánkem.



*Obrázek 38: Konektory pro připojení termočlánků (ve vnitřním prostoru autoklávu)*

Dveře autoklávu se zavírají pomocí zámkového zásuvného systému a jsou opatřeny bezpečnostními prvky proti možnosti otevření autoklávu pokud je pod tlakem (viz obrázek 39).



*Obrázek 39: Zásuvný zámkový systém (zleva otevřený, napůl zavřený, zavřený)*

Autokláv má vlastní chladicí okruh, který byl zkonstruován poté, co přirozené chladnutí nesplňovalo požadované a předpokládané parametry. Chladicí okruh je uzavřený. Z autoklávu vystupuje voda o teplotě až 200°C pod tlakem 20 bar. Tato voda proudí do deskového výměníku Alfa Laval. Do tohoto primárního okruhu je dále vložen filtr, čerpadlo a expanzní nádoba. V sekundárním okruhu je zásobník vody z korozivzdorné oceli o objemu 2000 litrů, čerpadlo, filtr a domácí vodárna. Tlak v sekundárním okruhu je atmosférický. V řídicím systému jsou frekvenční měniče pro čerpadla, vyhodnocovací jednotka a snímače teploty na zásobní nádrži a deskovém výměníku Alfa Laval. Toho zařízení je dimenzováno na chlazení 5°C/min za předpokladu vstupní chladicí vody o teplotě 15°C. Celý chladicí proces by měl být nastaven na cca 30 minut při chlazení z 200°C na 50°C. Po dokončení procesu bude v akumulární nádobě užitková voda o teplotě 25-30°C. Podrobnější zobrazení schématu chlazení je uvedeno v příloze 2.



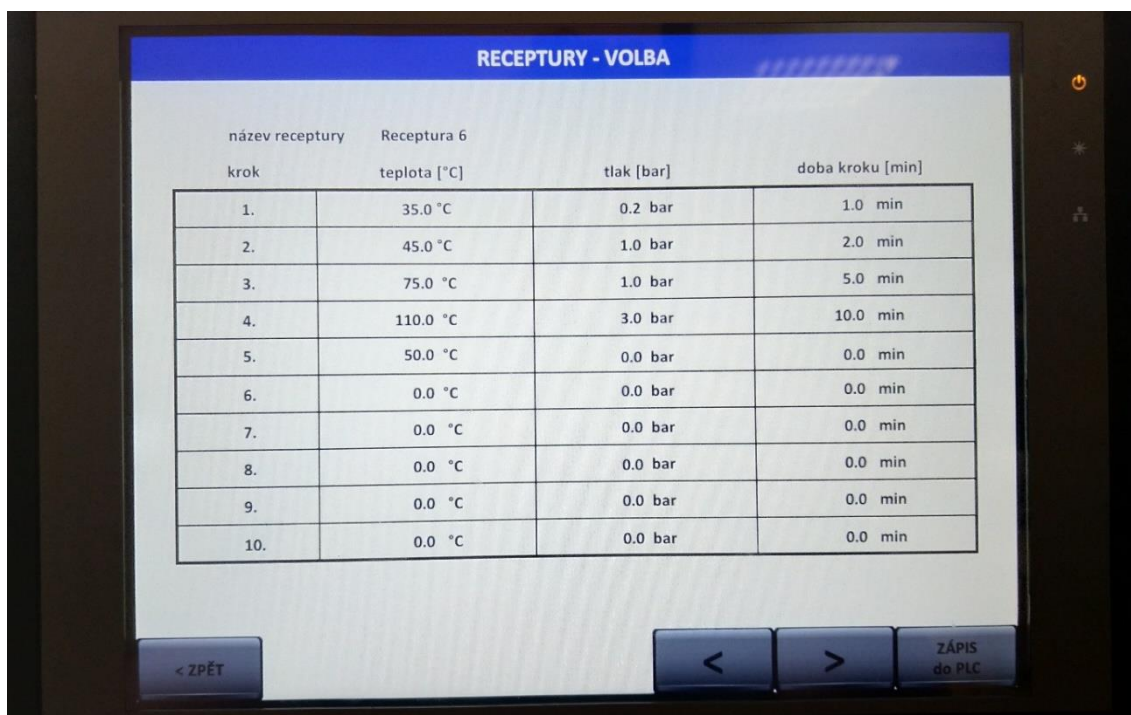


*Obrázek 40: Chladicí systém autoklávu*

Automatický řídicí systém umožňuje nastavení programu po jednotlivých krocích. Každý krok může mít speciálně nastavenou hodnotu teploty, tlaku a dobu trvání těchto podmínek. Tlak i teplota jsou řízeny zároveň a po dosažení obou podmínek je aktuální stav udržován po požadované dobu. Celkový průběh ohřevu a tlakování je zaznamenávám do grafu, který je možné exportovat na flashdisk. Je tak možné dokumentovat průběh výrobního procesu.



Obrázek 41: Ovládací panel autoklávu



Obrázek 42: Volba receptury na displeji autoklávu

Před dokončením je vhodné nechat autokláv v posledním kroku vychladit. Nejnižší možná teplota, na kterou je možné chladit, je 50°C. Autokláv není možné z bezpečnostních důvodů otevřít, pokud je v něm stále přetlak. Proto je u výše uvedeno výrobního potupu poslední krok 50°C a 0 bar.

Poslední funkcí, kterou autokláv nabízí, je udržování vakua ve výrobku. Vývěva je součástí samostatného systému.

Výrobce udává délka vnitřní komory je 2500mm a její průměr 1500mm (viz příloha 1).

Předpokládaná maximální hmotnost vsázky je 800 kg. Vsázka může být do komory umístěna libovolně. Pro snadnější nakládání a vykládání zpracovávaných dílů je možné použít speciální vozík s nosností 1000 kg (viz obrázek 43).



*Obrázek 43: Speciální vozík autoklávu*

## 6. Ověření vlastností a funkčnosti autoklávu

Protože se při budování výše zmíněné laboratoře jednalo o dodání prototypového zařízení (autoklávu pro výrobu kompozitních materiálů), bylo potřeba po instalaci zařízení provést zkušební provoz a ověřit funkčnost autoklávu podle požadovaných parametrů a charakteristik, které byly smluvně domluveny s výrobcem a dodavatelem zařízení – firmou Pacovské strojírny a.s. (které jsou uvedeny v tabulce 1).

Prvním krokem při ověření vlastností autoklávu byla zkouška ohřevu a tlakování autoklávu. Při prvotní výrobě vzorku s termočlánekem (která byla provedena ještě před řešením této BP) bylo zjištěno, že jeden z vestavěných termočláneků výrobce měří s odchylkou okolo 20°C a druhý neměří vůbec. Požadované vlastnosti autoklávu:

*Tab. 1 – Požadované vlastnosti autoklávu:*

Max přetlak	1 MPa
Přesnosti nastavení tlaku	0,1 MPa
Max. pracovní teplota	200°C
Homogenita teplotního pole	+/- 5 °C
Rychlost ohřevu	0,5 – 6 °C/min
Rychlost ochlazování	3 – 6 °C/min



*Obrázek 44: Kalibrace termočláunku 1*





Obrázek 46: Kalibrace termočlánu 1

Z toho důvodu byl vyroben, zkalibrován a nainstalován nový termočlánek. Jeho funkčnost byla otestována zkušebním cyklem uvedeným na obrázku č. 47:

**RECEPTURY - VOLBA**

název receptury	Receptura 6		
krok	teplota [°C]	tlak [bar]	doba kroku [min]
1.	35.0 °C	0.2 bar	1.0 min
2.	45.0 °C	1.0 bar	2.0 min
3.	75.0 °C	1.0 bar	5.0 min
4.	110.0 °C	3.0 bar	10.0 min
5.	50.0 °C	0.0 bar	0.0 min
6.	0.0 °C	0.0 bar	0.0 min
7.	0.0 °C	0.0 bar	0.0 min
8.	0.0 °C	0.0 bar	0.0 min
9.	0.0 °C	0.0 bar	0.0 min
10.	0.0 °C	0.0 bar	0.0 min

< ZPĚT      <      >      ZÁPIS do PLC

Obrázek 47: Testovací cyklus termočlánu 1



Maximální teplota a tlak byly ověřeny samostatně výsledek byl vyhovující. Test programu „Receptura 6“ (viz obr. 47) byl úspěšný. Autokláv po dosažení požadovaných hodnot kroku udržoval daný stav, dle odchylek udávaných výrobcem (přesnost tlaku 0,1 MPa a přesnost teploty +/- 5°C), po nastavený časový interval.

## 7. Výroba a kalibrace termočlánků typu J

K výrobě měřicích termočlánků byly použity komponenty pro termočlánky typu J. Ty byly vyrobeny z vodiče J / 2 x 0,2mm s typem vedení GLGL wrap a izolací sklo/sklo. Použité konektory nesou označení MTCK-SM-J (viz obrázek 45).



Obrázek 48: Konektor MTCK-SM-J (pohled z vrchní a spodní části)

První fází výroby termočlánků byla příprava pěti dvou metrových kabelů. Následně byly obnaženy konce drátů a jeden konec byl svařen na mikroTIGové svářečce Orion 200 i3 (bez přídavného materiálu). Jako ochranný plyn byl použit argon 4.8.



Obrázek 49: MikroTIGová svářečka Orion 200 i3



Obrázek 50: Svařený konec termočládku



Obrázek 51: Sestavený konektor termočládku

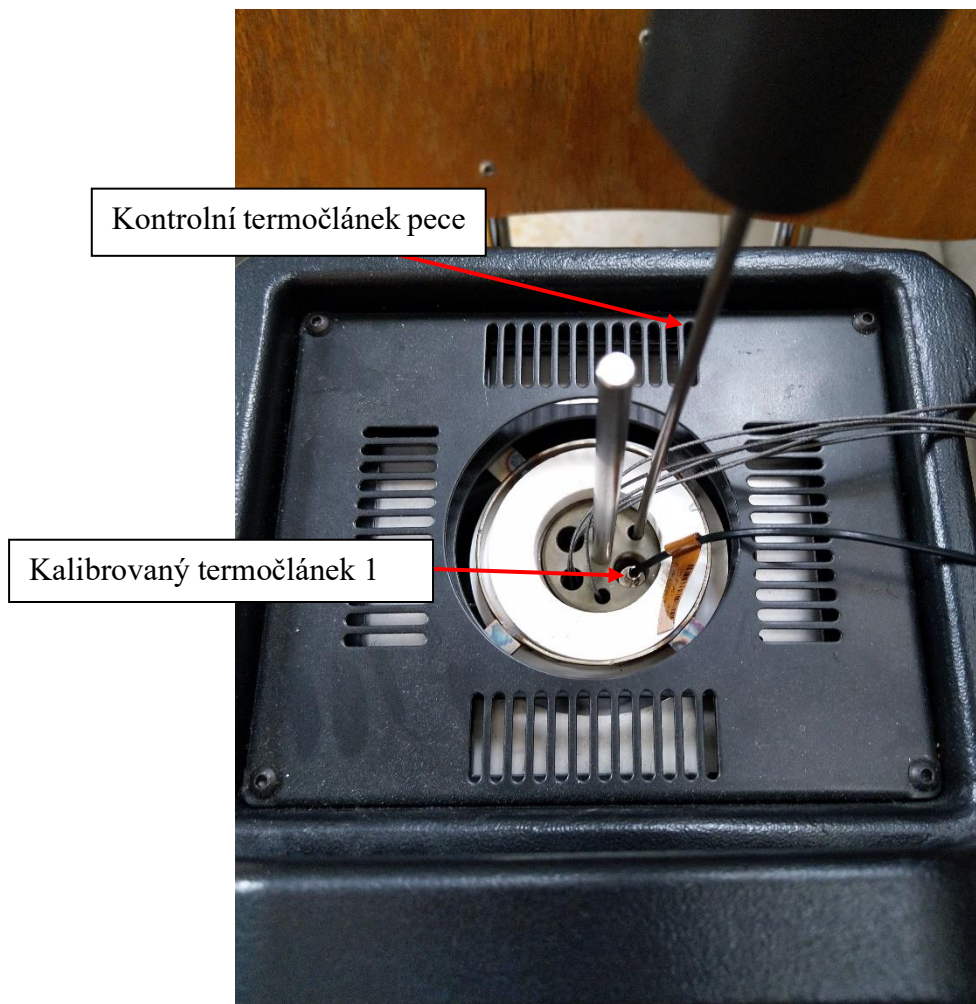
Po dokončení výroby bylo třeba termočládky zkalibrovat. K tomu byl použit teplotní kalibrátor RJUPITECH (viz obrázek 50). Teplotní kalibrátor RJUPITECH má dva zobrazovací displeje. Displej „CONTROLLER“ zobrazuje teplotu v ohřivané dutině kalibrátoru a provádí se na něm nastavování teploty ohřevu. Displej „INDICATOR“ zobrazuje teplotu, kterou naměří kontrolní termočlánek.



Obrázek 52: Teplotní kalibrátor RJUPITECH



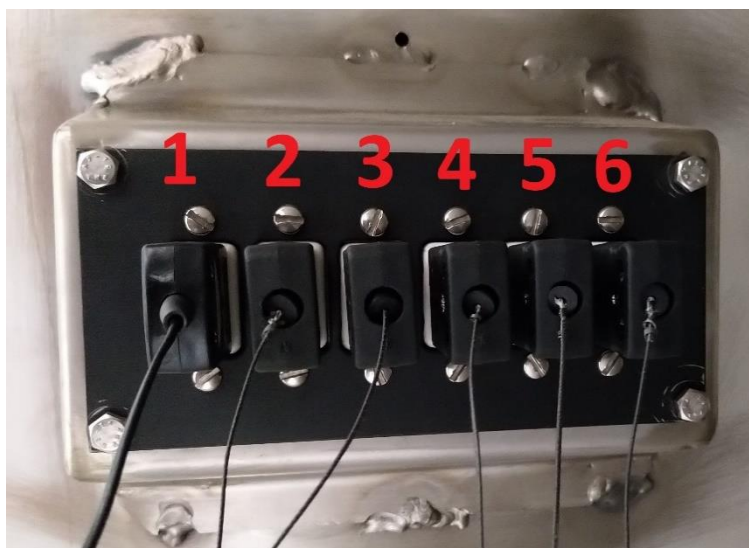
Obrázek 53: Detail záznamu o kalibraci



*Obrázek 54: Termočláanky vložené do pece*

Termočláanky 2-6 byly vloženy do ohřívané dutiny kalibrátoru a připojeny k autoklávu. Na jeho displeji se pak zobrazovala teplota, kterou naměřily termočláanky. Do pece byl vložen i dříve kalibrovaný termočlánek 1. Sloužil jako kontrola správnosti zobrazování teploty na displeji autoklávu.





Obrázek 55: Zapojené termočlánky

Termočlánky byly proměřovány na teplotách 70°C, 110°C, 150°C a 200°C s tím, že maximální teplota, kterou lze v autoklávu dosáhnout je právě 200°C. Při tomto měření bylo zjištěno, že po dosažení 200°C přestává displej zobrazovat teploty měřené termočlánky. Z toho důvodu bylo měření provedeno pouze do 198°C, aby byly všechny hodnoty zobrazeny i s případnou odchylkou měření.

Tab. 2 – Výsledky měření kalibrace termočlánků

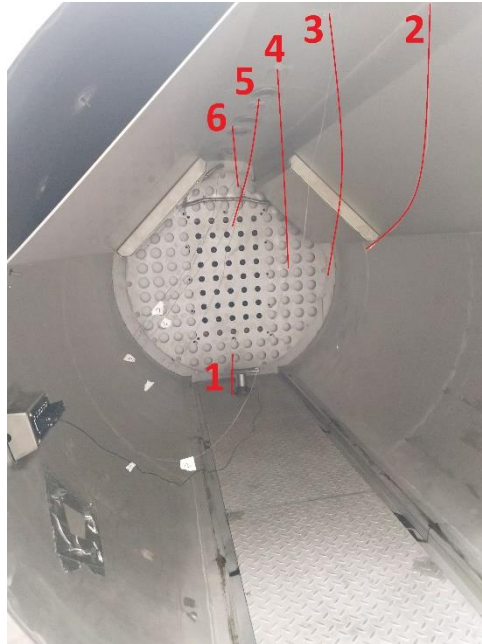
Teplota autoklávu [°C]	Teplota na termočlánku [°C]						
	INDICATOR	1	2	3	4	5	6
70,9	70,41	70,3	71	70,6	70,3	70,6	70,5
100	100,1	100,1	101,1	100,5	100,5	100,9	100,7
150,1	150,2	150,4	151,4	150,8	150,6	151,4	151,2
198	197,9	198,1	199,3	198,8	198,6	199,5	199,3

Výše uvedeným způsobem bylo zkalibrováno 5 termočlánků sloužících k měření teploty v dutině autoklávu. Maximální odchylka od nastavené hodnoty byla -1,1°C a +1,5°C. Na základě toho měření s jistotou víme, že termočlánky měří s maximální odchylkou +/-1,5°C.

## 8. Měření homogenity tepelného pole

### 8.1. Pokus č. 1

Při prvním pokusu nebyla uvažována velmi podstatná věc, kterou je proudění vzduchu v autoklávu.

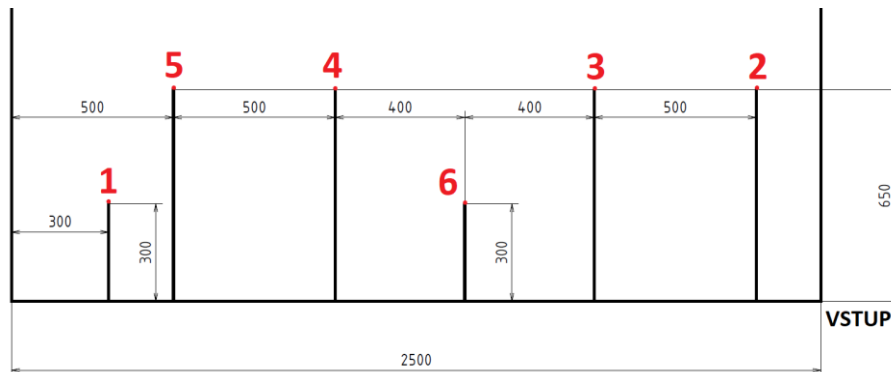


Obrázek 56: Rozmístění termočlánky při 1. pokusu měření

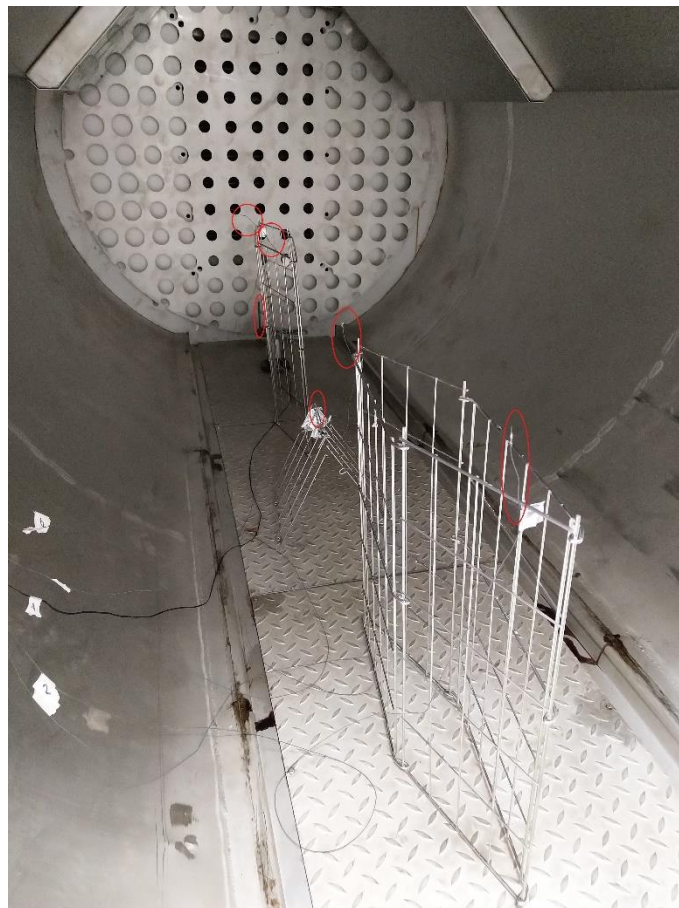
Termočlánky byly volně zavěšeny ze stropu (viz obrázek 56) a vlivem proudění větru se všechny deformovaly a měřily teplotu v úplně jiném místě. Vlivem jejich pohybu vznikla odchylka až 20°C. Velikost odchylky vzrůstala společně s rostoucí teplotou v autoklávu. Z toho důvodu bylo měření neprůkazné a bylo potřeba ho zopakovat při lépe definovaných podmínkách umístění termočlánků.

## 8.2. Pokus č. 2

Při druhém měření byly termočlánky připevněny na pevnou konstrukci s následujícím rozmístěním (viz obrázky 57 a 58):



Obrázek 57: Schéma rozmístění termočlánků při 2. pokusu měření s rozměry



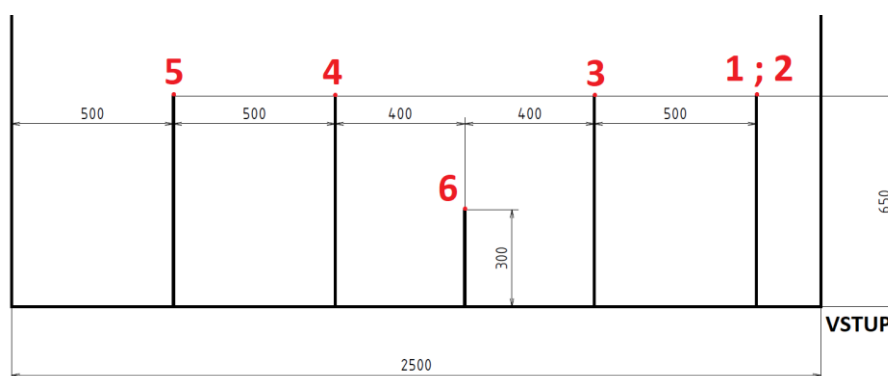
Obrázek 58: Rozmístění termočlánků v autoklávu

Během tohoto měření byla z autoklávu odstraněna příruba kvůli instalaci vývěvy vakua. Proto nebylo možné v autoklávu vytvořit konstantní přetlak. Testovací cyklus měl pouze jeden krok a to na 90°C. Autokláv byl naprogramován na vypnutí ohřevu, když termočlánek 1 dosáhne požadované hodnoty. Po zahřátí byly změřeny hodnoty uvedené v tabulce 3:

Tab. 3 – Naměřené teploty při rozmístění termočláneků viz obrázek 54

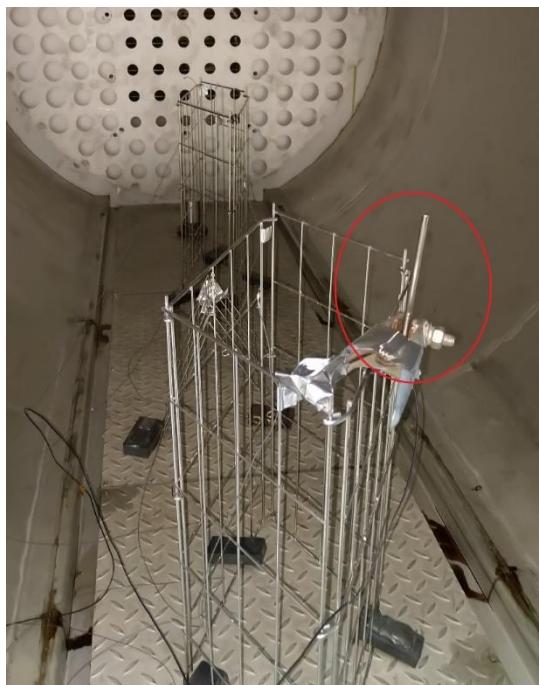
Topná spirála [°C]		Termočlánek [°C]					
1	2	1	2	3	4	5	6
117,2	129,9	91,7	106,5	103,2	104,1	105,5	105,5

Následně byl termočlánek 1 přesunut dopředu k termočlátku 2 a celé měření bylo zopakováno. Ohřev byl opět na 90°C.



Obrázek 59: Schéma rozmístění termočláneků po přesunu termočlátku 1





Obrázek 60: Umístění termočlásku 1

Po přesunu termočlásku 1 byly změřeny hodnoty uvedené v tabulce 4:

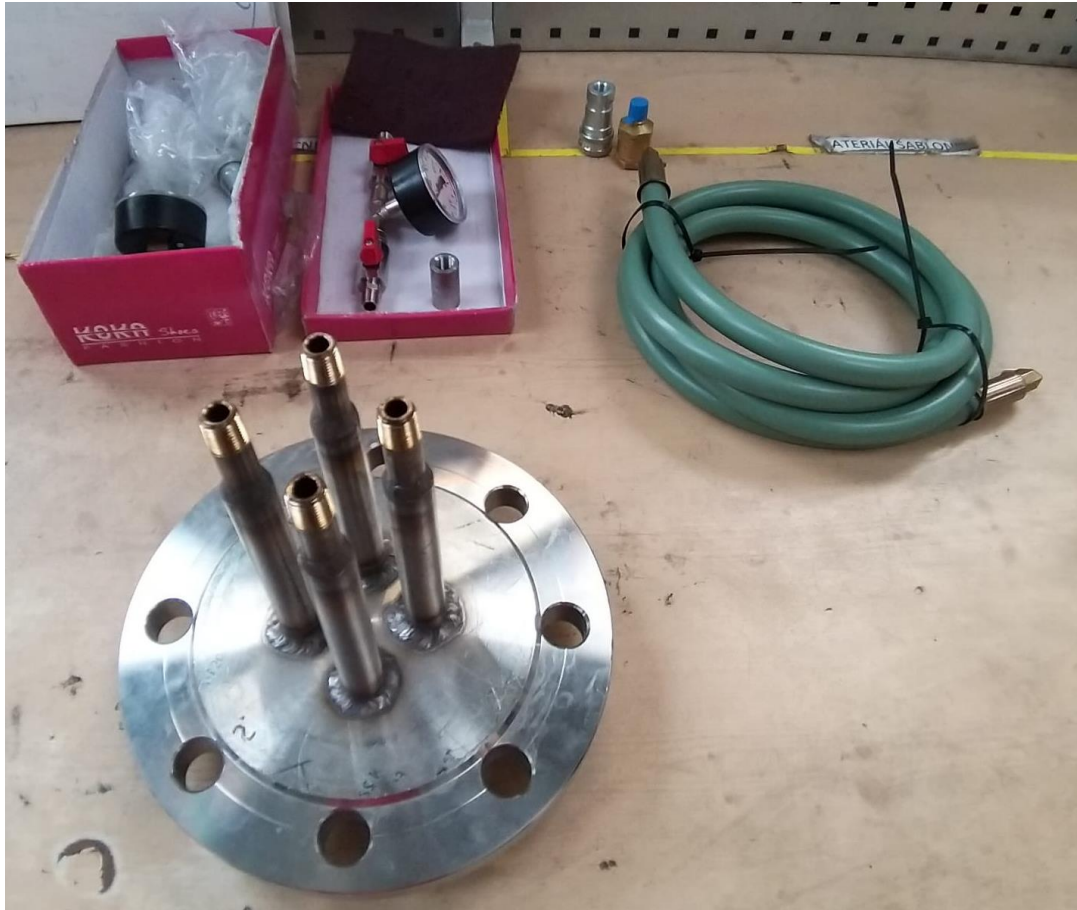
Tab. 4 - Naměřené teploty při rozmístění termočlásků viz obrázek 56

Topná spirála [°C]		Termočlánek [°C]					
1	2	1	2	3	4	5	6
104	113,8	90,5	98,9	95,7	96,6	97,7	97,5

Na základě obou měření lze usuzovat, že je vhodné umístit řídicí termočlánek ke dveřím autoklávu (tzn. do přední části autoklávu). V zadní části byla největší odchylka od spínací teploty 14,5°C. Po přesunu řídicího termočlásku ke dveřím bylo dosaženo maximální odchylky 8,4°C. Rozdíl odchylek poukazuje nehomogenitu tepelného pole při porovnání přední a zadní části autoklávu. Odchylka 8,4°C je mimo udávaný interval +/- 5°C nehomogenity tepelného pole.

## 9. Instalace vaukové vývěvy

Vyráběné kompozitní součásti je třeba stále udržovat vakuově zabalené. Z toho důvodu byla nainstalována k autoklávu externí vývěva vakua, která pomáhá s udržením vakua v zabaleném výrobku. Pro tento účel musela být vyrobena nová příruba s vývody pro vakuové hadice.



Obrázek 61: Příruba, vakuovací hadice a barometry

Tato příruba byla následně nainstalována na autokláv a tři z jejích čtyř vývodů byli prozatím zapečetěny. V případě potřeby bude možné využívat vakuum až pro čtyři výrobky zároveň (viz obrázek 62).



*Obrázek 62: Nainstalovaná příruba se zaslepenými vývody (pohled z vnější strany autoklávy)*



*Obrázek 63: Pohled na přírubu z vnitřní strany autoklávu*

Na přírubu byly poté připojeny ventily sloužící k uzavření odsávání a kontrolní barometr. Vše bylo následně připojeno k vývěvě.



*Obrázek 64: Ventily pro uzavření odsávání a kontrolní barometr*





*Obrázek 65: Vývěva vakua*

Tímto byl dokončen instalační režim zařízení a mohlo se přejít na výrobu prvních vzorků kompozitních dílů s využitím všech funkcí autoklávu.

## 10. Výroba experimentálních kompozitních vzorků

V rámci experimentální výroby byly vytvořeny čtyři vzorky za různých provozních režimů. Dva vzorky byly vytvrzovány pouze teplotou a druhé dva byly vytvrzovány teplotou v kombinaci s působením tlaku.

Použitý prepreg byl kombinací uhlíkového vlákna T300 a termosetová matrice ER 38.

Tab. 5 – Vlastnosti vlákna T300

Mez pevnosti v tahu	3,530 MPa
Modul pevnosti v tahu	230 GPa
Hustota	1,76 g/cm <sup>3</sup>
Průměr vlákna	7 μm

Více informací o použitém uhlíkovém vlákně viz příloha 3.

### ER 38:

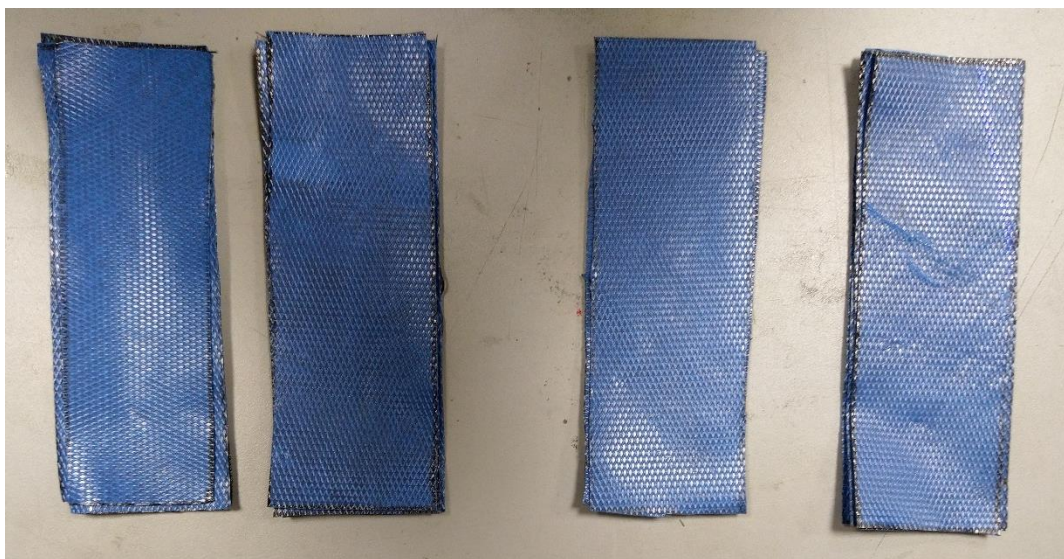
Udávaný postup vytvrzování:

- I. Aplikace vakua (cca 0,9 bar)
- II. Natlakování autoklávu na 1 – 7 bar
- III. Ohřev rychlostí 2-4°C/min na teplotu 100-130°C
- IV. Výdrž na teplotě a tlaku 45-120 minut
- V. Chlazení rychlostí 2-5°C/min
- VI. Odpuštění tlaku po ochlazení výrobku na 65°C

Více informací o použité matrici viz příloha 4.

## 10.1. Výroba vzorků

Bylo nastříháno 16 kusů prepregu o rozměru 50 x 150 mm. Čtyři kusy pro každý vzorek (viz obrázek 66).



*Obrázek 66: Nastříhaný prepreg*

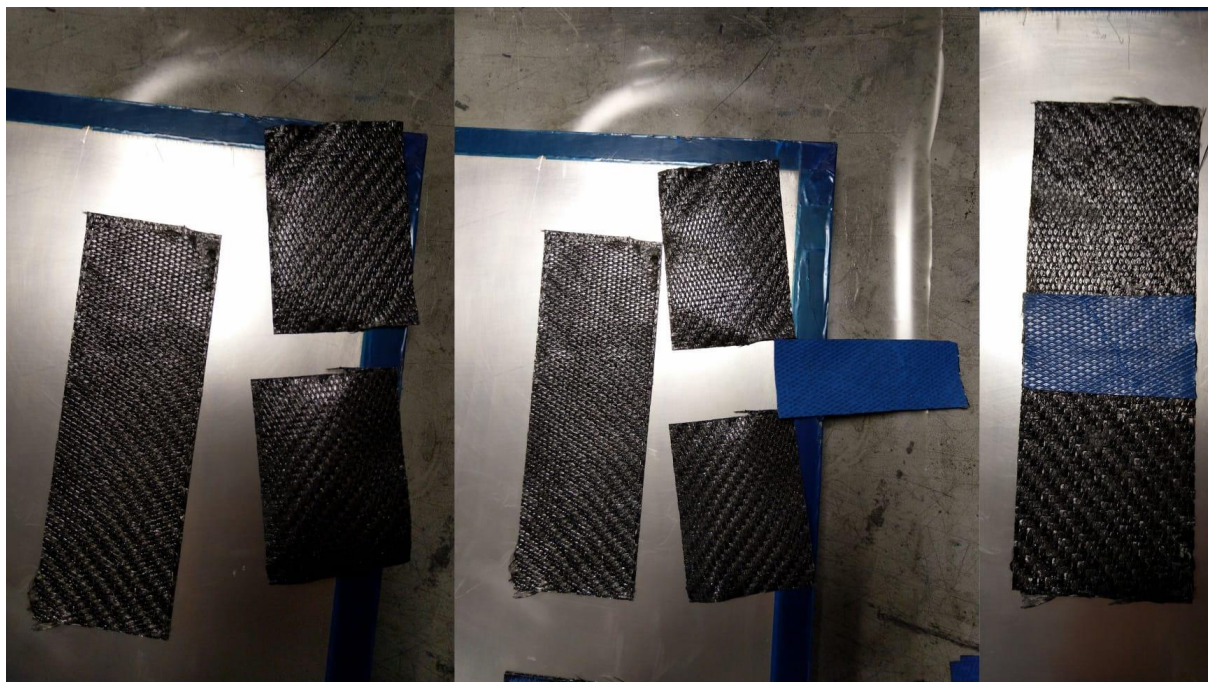
Po nastříhání bylo možné začít klást jednotlivé vrstvy prepregu na hliníkové formy. Ty byly před použitím očištěny a odmaštěny (viz obrázek 67).



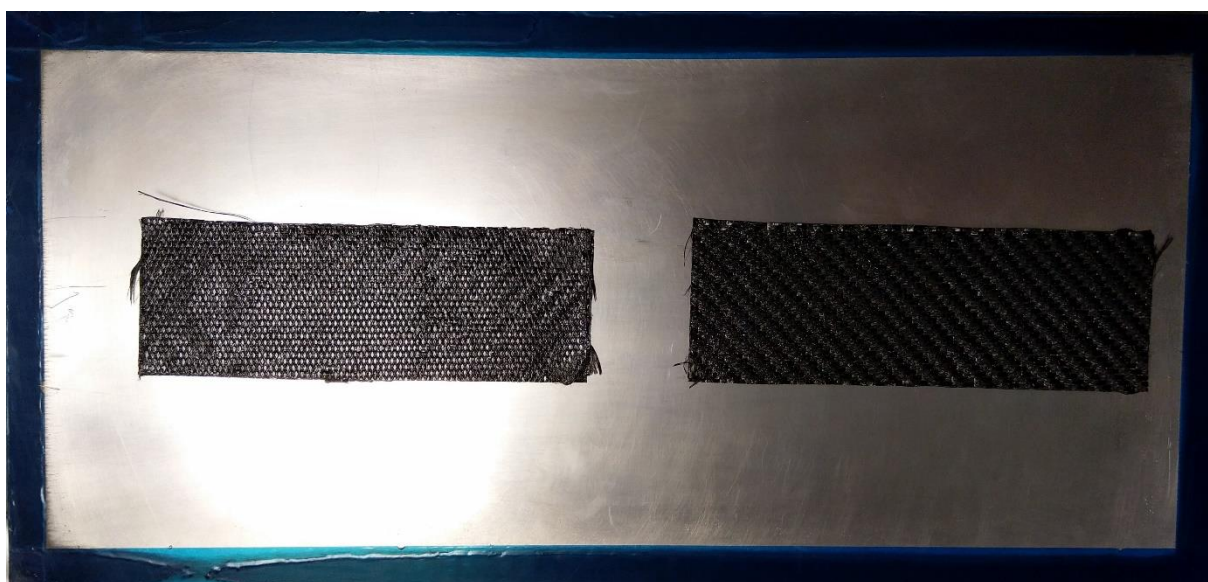
*Obrázek 67: Hliníkové desky, které byly použity jako formy*



V jednom ze vzorků v každé dvojici byla uměle vytvořena vada. Jedna vrstva prepregu byla uprostřed příčně přerušena. Přes daný řez byl pak umístěn pruh prepregu a následně byla položena finální čtvrtá vrstva.



*Obrázek 68: Uměle vytvořená vada ve vzorku*



*Obrázek 69: Hotové vzorky připravené k zabalení*

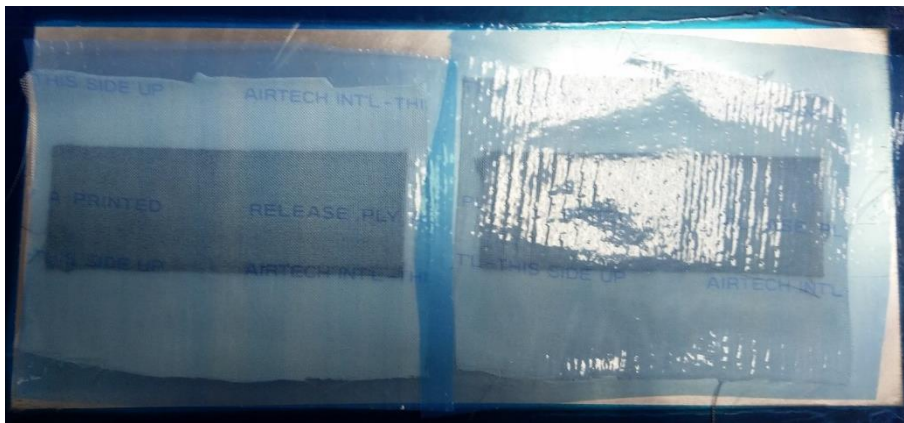
Po naskládání všech vrstev prepregu byla na vzorky položena nejprve strhvací tkanina, která musí zakrývat celý vzorek (viz obrázek 70).





*Obrázek 70: Vzorky se strhávací tkaninou*

Dále byla na strhávací tkaninu umístěna děrovaná vakuovací fólie a na ni odsávací rohož. Vše bylo následně umístěno do vakuovacího pytle společně s ventilem pro odsávání (viz obrázek 68).



*Obrázek 71: Děrovaná vakuovací fólie*



*Obrázek 72: Odsávací rohož*



Obrázek 73: Vzorky utěsněné ve vaku, připravené na vakuování

Po utěsnění byl z vaku odsát veškerý vzduch a následně bylo vše umístěno do autoklávu a připojeno na vývěvu. Do této chvíle byl postup stejný u prvního i druhého páru vzorků.



Obrázek 74: Vzorky připojené na vývěvě s termočlánkem 1

První vzorky byly vytvrzovány s následující recepturou uvedené v tabulce 6:

Tab. 6 – Receptura použitá pro vytvrzování vzorků 1

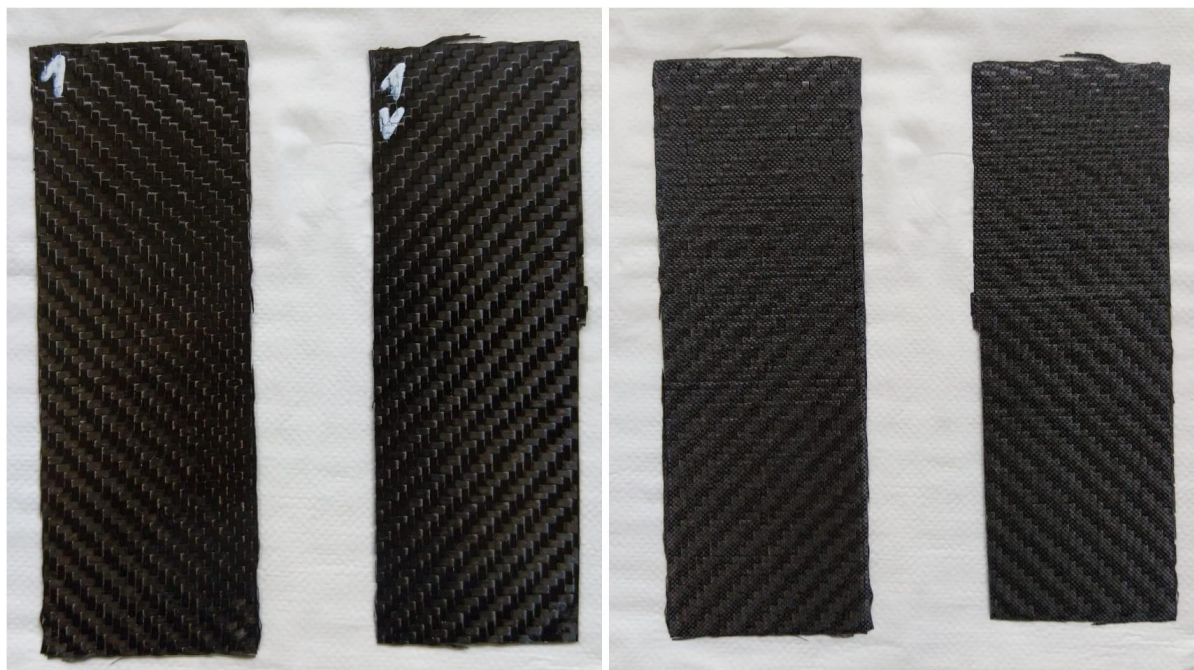
Krok	Teplota [°C]	Tlak [bar]	Doba kroku [min]
1.	80	0	1
2.	130	0	45
3.	65	0	1

Druhá receptura:

Tab. 7 – Receptura použitá pro vytvrzování vzorků 2

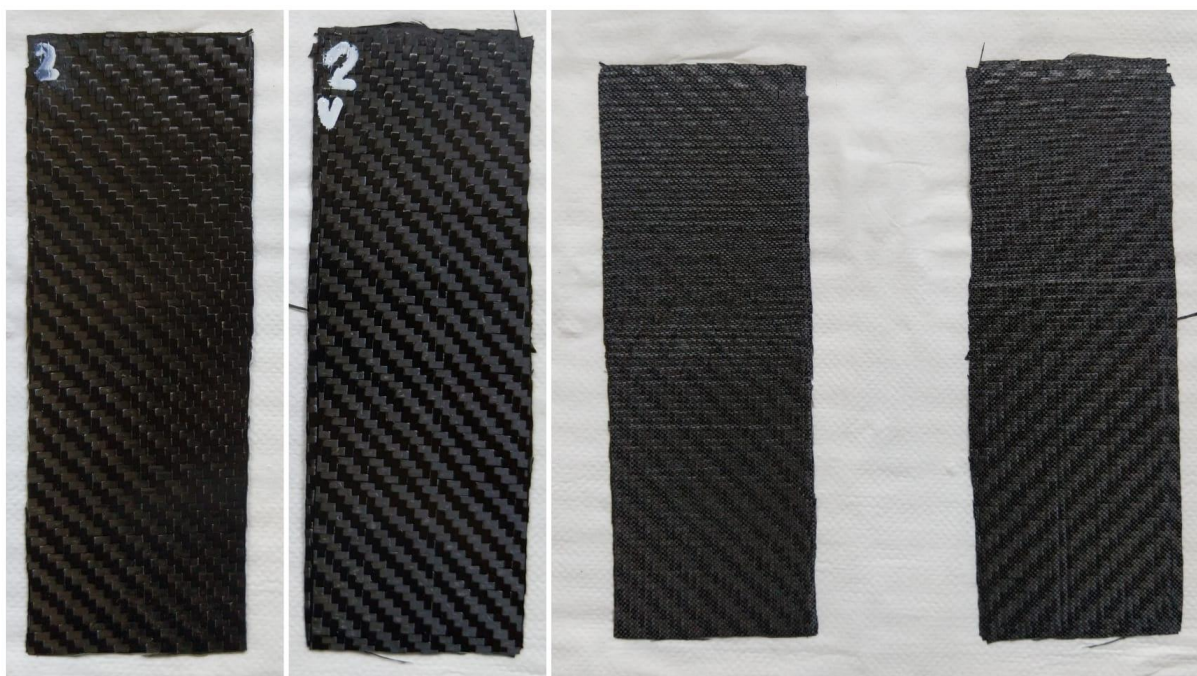
Krok	Teplota [°C]	Tlak [bar]	Doba kroku [min]
1.	80	5	1
2.	130	5	45
3.	65	5	1
4.	65	0	1

Vytvrzené vzorky byly vyjmuty z autoklávu a byly z nich odstraněny zbytky balícího materiálu. Vzorky vytvrzené bez tlaku byly označeny číslem 1 a písmeno „V“ značí vzorek s vadou.



Obrázek 75: Vzorky I a IV – pohled na spodní (vlevo) a vrchní (vpravo) část





*Obrázek 76: Vzorky 2 a 2V - – pohled na spodní (vlevo) a vrchní (vpravo) část*

Po dokončení obou sad vzorků je patrné, že působení tlaku při vytvrzování mělo vliv na výslednou tloušťku vzorků. Vzorky 2 a 2V jsou se svou tloušťkou 0,75mm o 0,15mm tenčí, než vzorky 1 a 1V s tloušťkou 0,9mm.

## 11. Vyhodnocení kvality vytvořených vzorků

Vzorky byly vyhodnoceny vizuálně a následně byla provedena zkouška tahem a bylo ověřena a porovnána struktura metalograficky.

### 11.1. Tahová zkouška

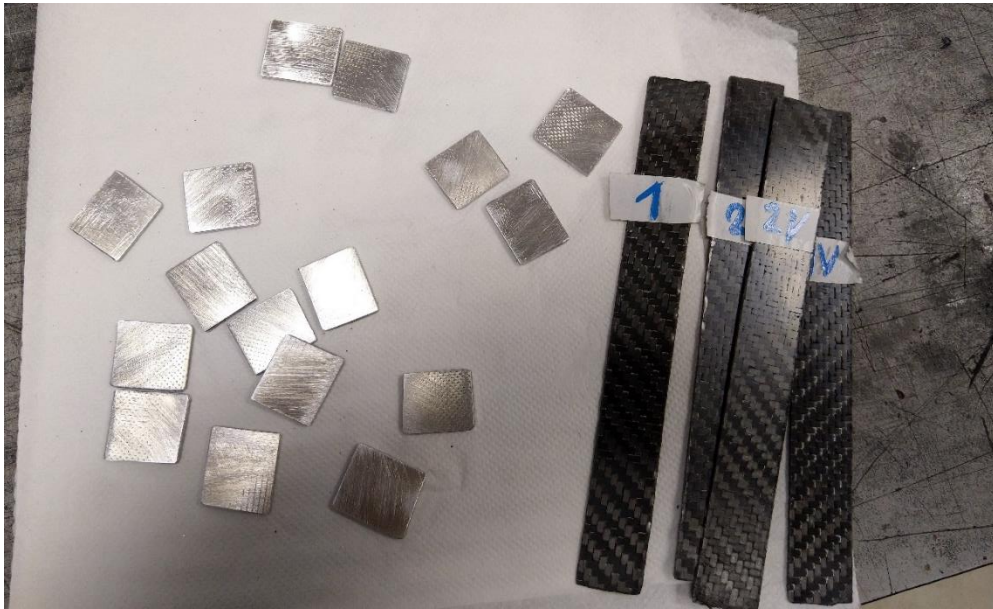
#### 11.1.1. Příprava vzorků na tahovou zkoušku

Vzorky nebyly vyřezány do normalizovaných tvarů a rozměrů odpovídající zkušebním vzorkům pro zkoušku tahem, proto bylo nutné nejprve vzorky upravit. Z každého vzorku byl ze středu vyříznut 20 mm široký plát.



Obrázek 77: Řezání vzorků na tahovou zkoušku

Po nařezání byly připraveny hliníkové destičky, které byly přilepeny na konce vzorků, aby za ně mohl být zkušební vzorek uchycen při tahové zkoušce. Konce vzorků i hliníkové destičky byly zdrsňeny brusným papírem (viz obrázek 78).



*Obrázek 78: Nařezané vzorky s hliníkovými destičkami*

Následně bylo vše očištěno a odmaštěno. Destičky byly přilepeny dvousložkovým epoxidovým lepidlem Loctite EA 9466. Po nanesení lepidla byly vzorky zatíženy svorkami a vytvrzovány po dobu 24 hodin.



Obrázek 79: Vzorky po 24 hodinách s přilepenými hliníkovými destičkami

### 11.1.2. Tahová zkouška

Tahová zkouška byla prováděna na zkušebním zařízení LabTest 5.100SP1 (viz obrázek 80). Vzorky byly postupně upínány a zatěžovány do jejich porušení. Pro výpočet maximálního napětí byly použity rozměry průřezů uvedené v tabulce 8:

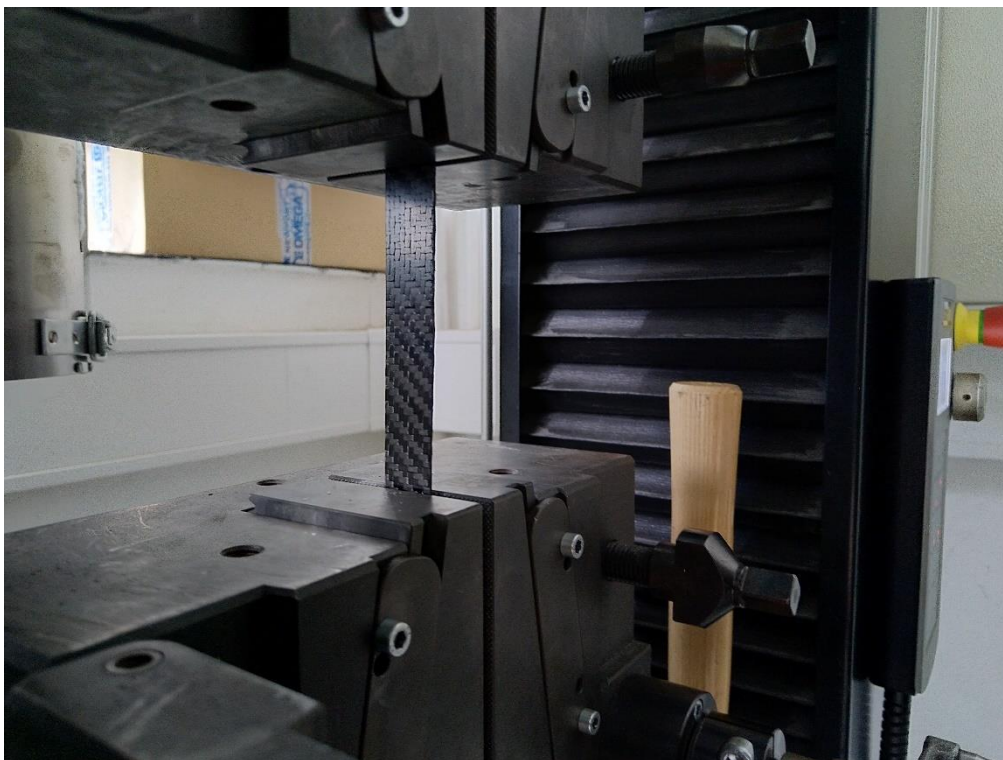
Tab. 8 – Rozměry průřezu vzorků

Vzorek	Šířka [mm]	Tloušťka [mm]
<b>1</b>	19,6	0,9
<b>1V</b>	19,8	0,9
<b>2</b>	19,7	0,75
<b>2V</b>	20	0,75





*Obrázek 80: Zkušební zařízení LabTest 5.100SP1*

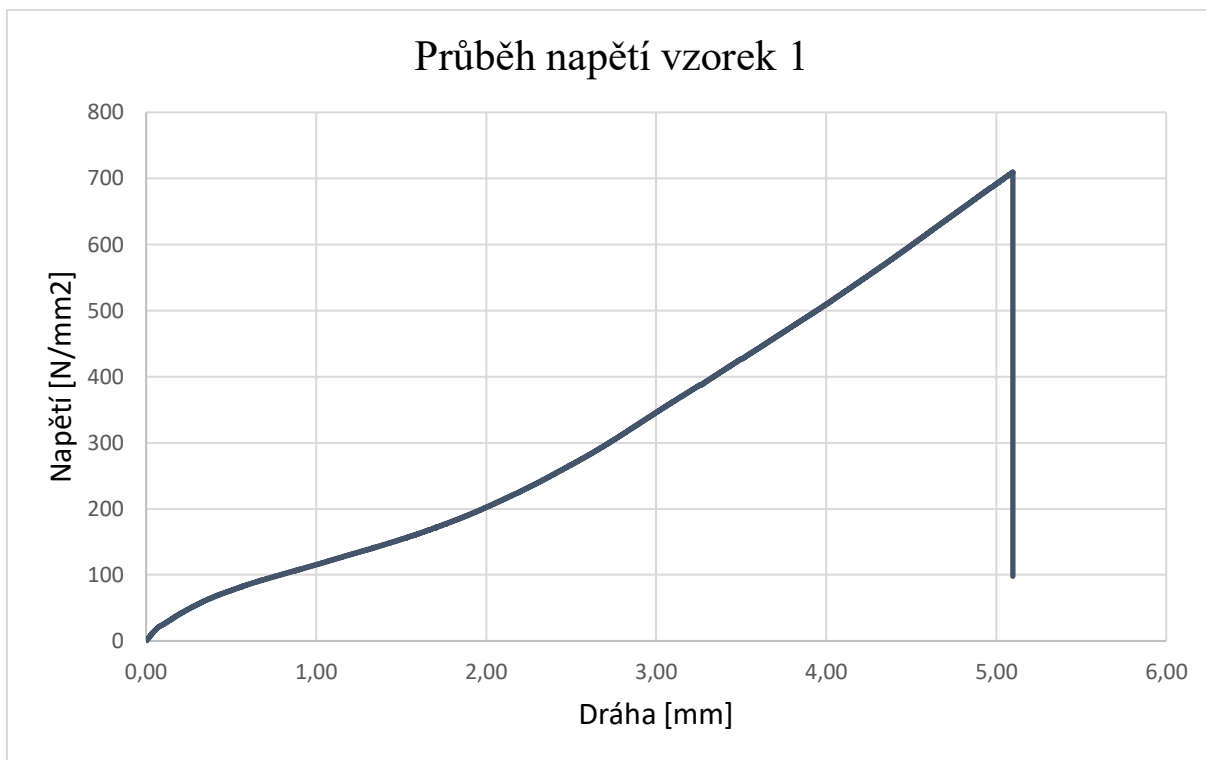


Obrázek 81: Vzorek 1 upnutý v čelistech trhacího zařízení

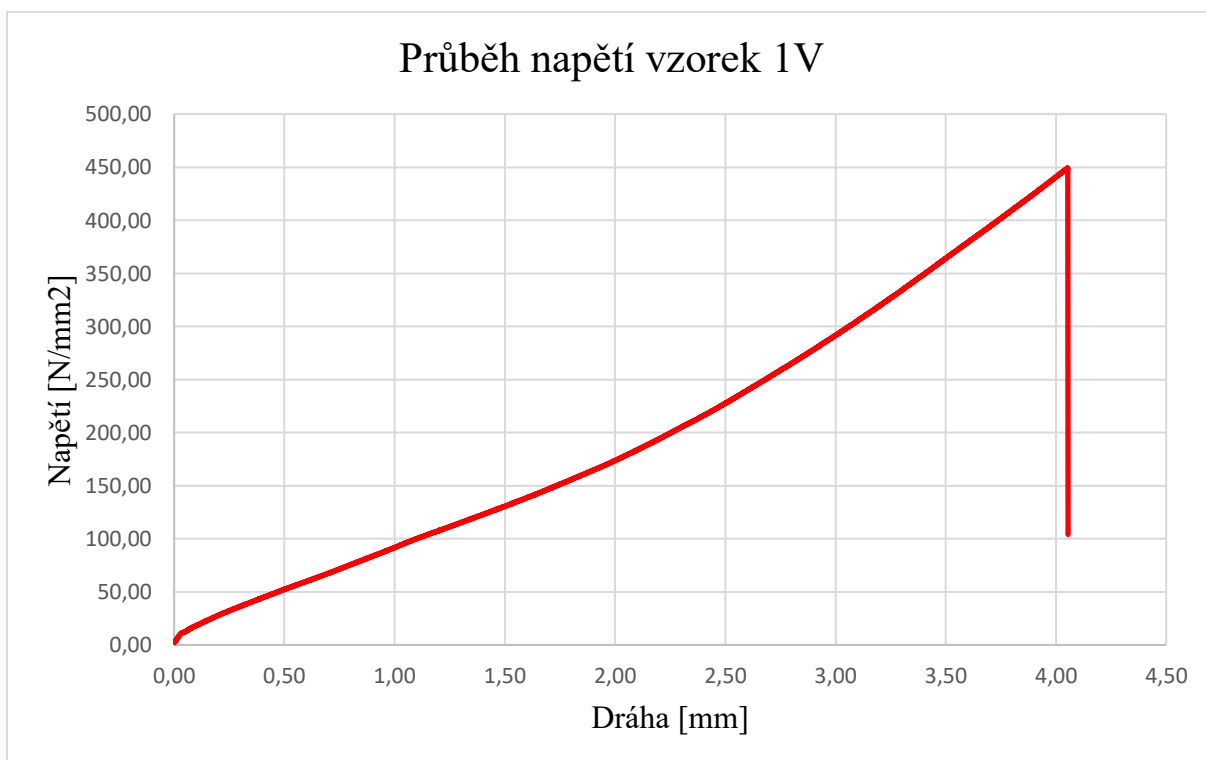
Z tahové zkoušky byla získána data uvedená v tabulce 9:

Tab. 9 – Výsledky tahové zkoušky

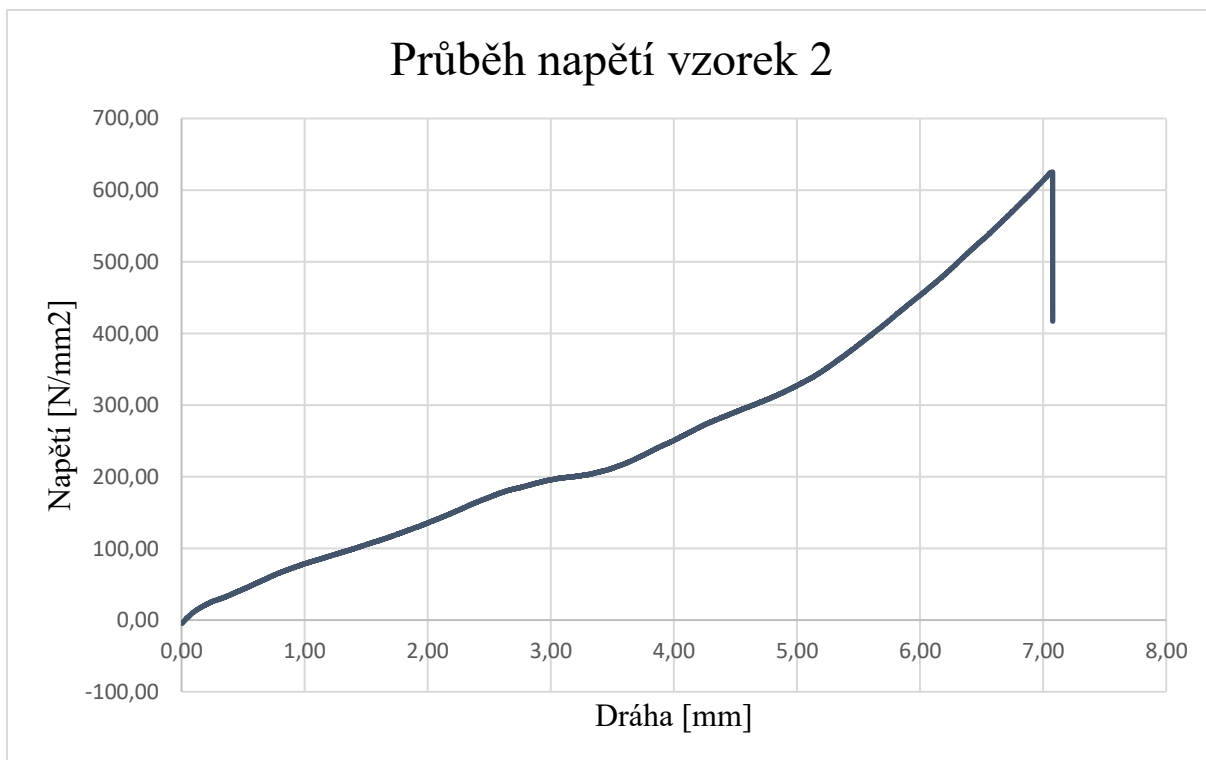
Vzorek	Maximální zatěžující síla [N]	Maximální napětí [N/mm <sup>2</sup> ]
1	12514,20	709,42
1V	8007,30	449,34
2	9239,10	625,32
2V	6411,70	427,45



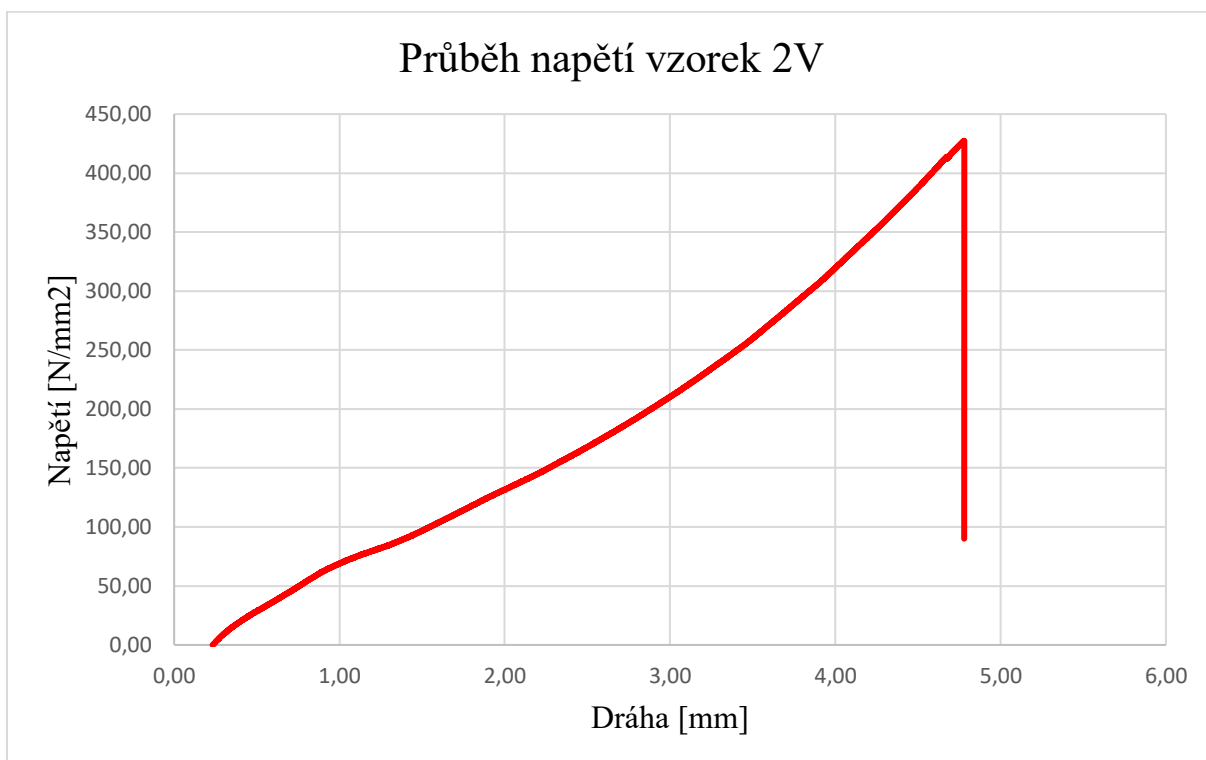
Obrázek 82: Průběh napětí vzorek 1



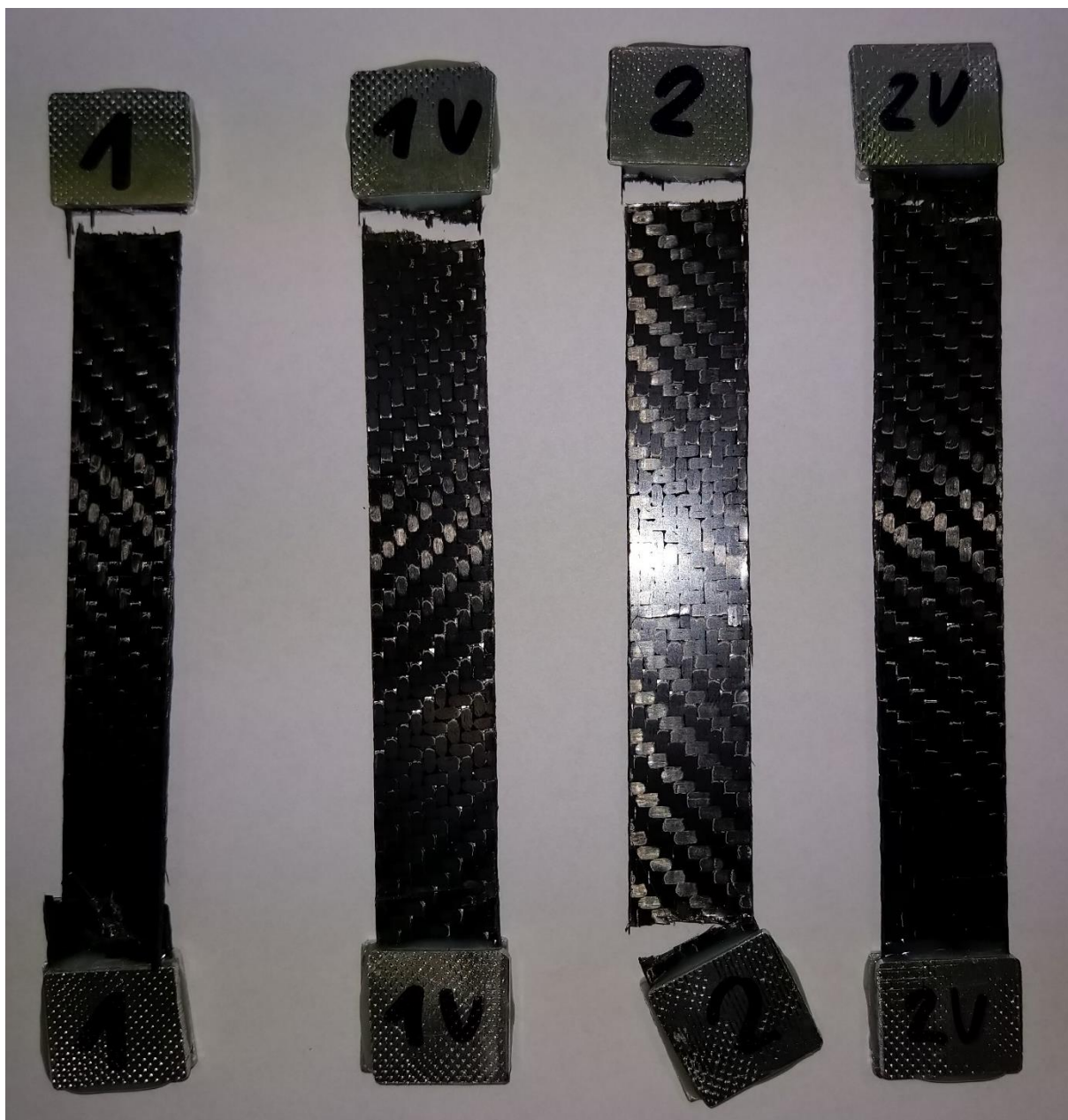
Obrázek 83: Průběh napětí vzorek 1V



Obrázek 84: Průběh napětí vzorek 2



Obrázek 85: Průběh napětí vzorek 2V



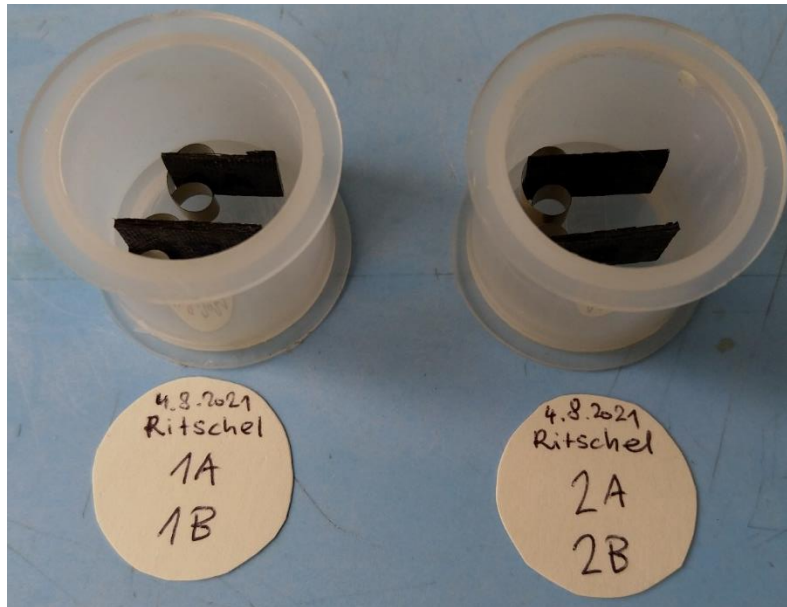
*Obrázek 86: Přetrhané vzorky po tahové zkoušce*

Hodnoty napětí vzorků bez vady se pohybovaly v rozmezí od 625 do 709 N/mm<sup>2</sup> a s vadami od 427 do 449 N/mm<sup>2</sup>. Nicméně oproti předpokladu vykazovali větší pevnost vzorky, kde nebyl aplikován tlak autoklávu. Vzhledem k nenormalizovanému tvaru a vlivem ruční přípravy zkušebních vzorků nelze zkoušku plnohodnotně vyhodnotit. Napětí na mezi pevnosti vzorků s vadou je i přesto přibližně o třetinu nižší. Z těchto důvodů nejsou hodnoty pevnosti porovnatelné a bude potřeba zkoušku v rámci dalšího výzkumu zopakovat za dodržení podmínek pro přípravu resp. Výrobu vzorků pro tahovou zkoušku.

## 11.2. Metalografické vyhodnocení struktury

### 11.2.1. Příprava vzorků

Pro pozorování struktury pod mikroskopem bylo potřeba nejdříve nařezat malé segmenty z kompozitních vzorků. Ty byly upevněny do stojánku a vloženy do forem (viz obrázek 87).



Obrázek 87: Vzorky ve formách

Takto připravené vzorky byly zality akrylátovou zalévací hmotou VersoCit-2. Ta je vytvrzována vlastní chemickou reakcí, která ohřeje pryskyřici na 70°C.

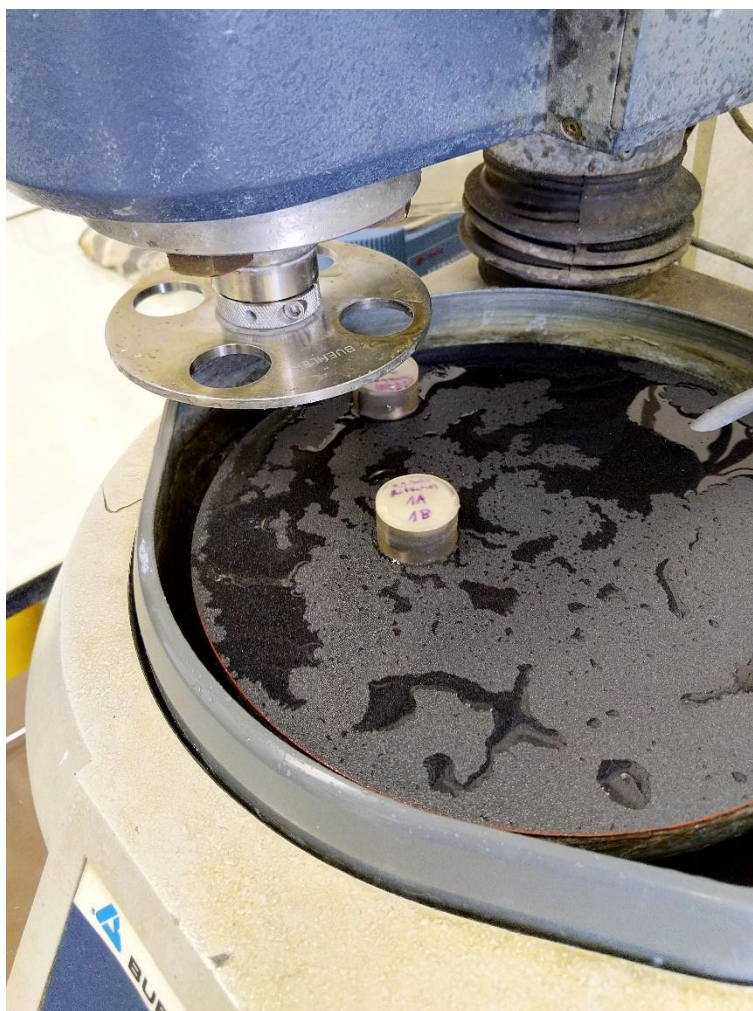


Obrázek 88: Vzorky ve formě zalité akrylátovou pryskyřicí

Po vytvrzení byly vzorky vyjmuty a umístěny do metalografické brusky/leštičky BEUHLER Phoenix Beta s automatickou hlavou Vector. Zde byly vzorky broušeny na

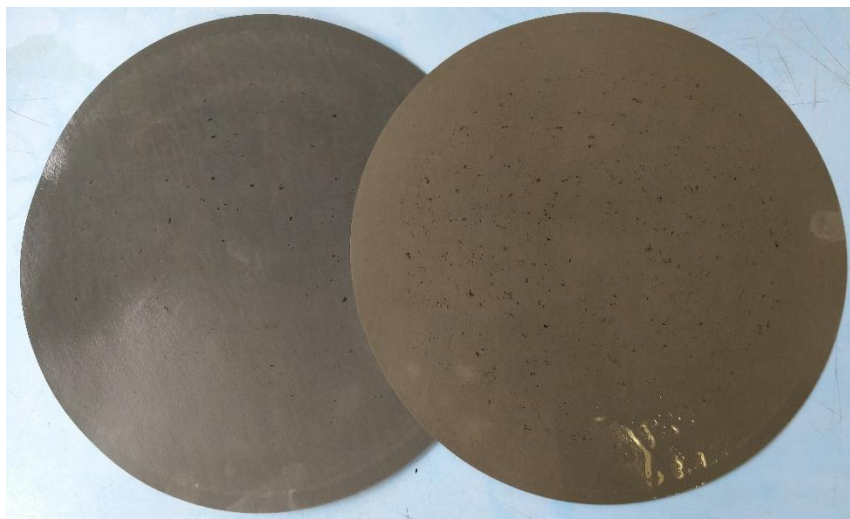


brusných papírech o hrubosti 180, 1200, 2000, 4000. Nakonec byly vzorky leštěny na sucho pastou Masterprep 0,05  $\mu\text{m}$ .



*Obrázek 89: Vzorky v leštičce BAUHLER Phoenix Beta*

Během broušení vzorků bylo zjištěno, že z nich brusné papíry vytrhávají vlákna (viz obrázek 90). Nicméně se tak dělo pouze u vzorků 1 (tzn. u těch, které byly vytvářeny bez tlaku). Na základě toho lze usuzovat, že vzorky 2 (vytvářené s tlakem) byly konzistentnější.

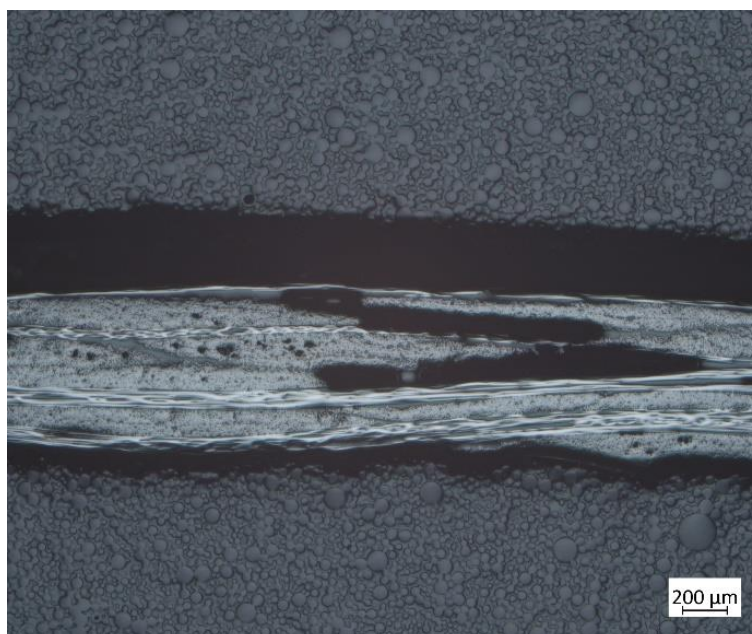


*Obrázek 90: Brusné papíry s vytrhanými vlákny*

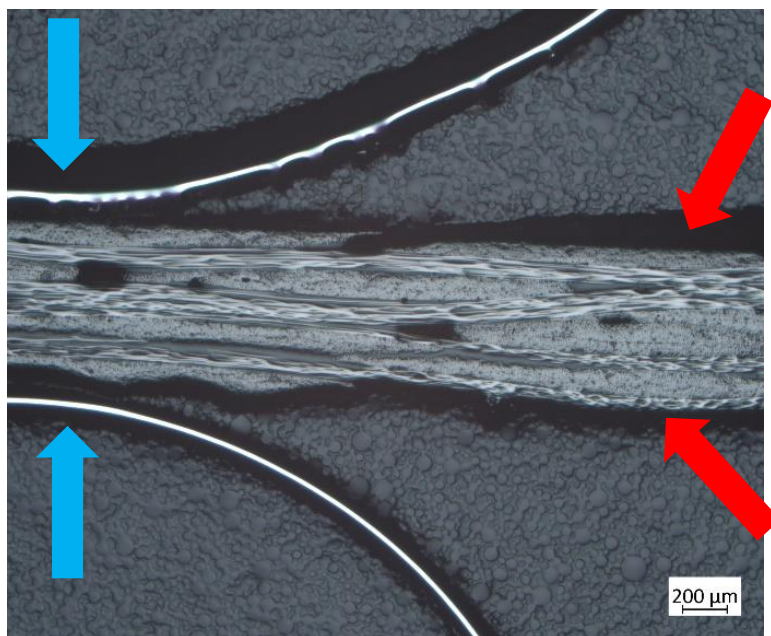
## **11.2.2. Makroskopické vyhodnocení struktury**

Po vyleštění byly vzorky pozorovány na mikroskopu ZEISS Axio Observer D1m.

### **11.2.2.1. Vzorek 1:**

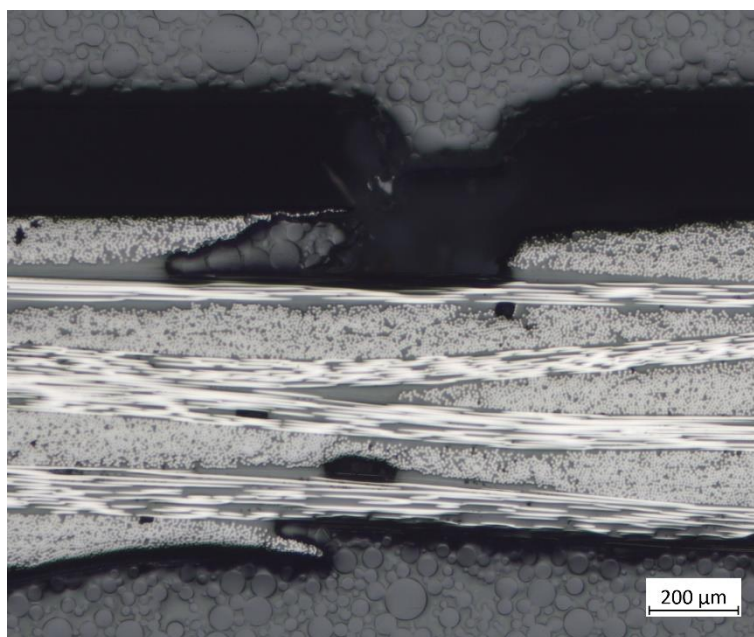


*Obrázek 91: Vzorek 1, zvětšení 25x*



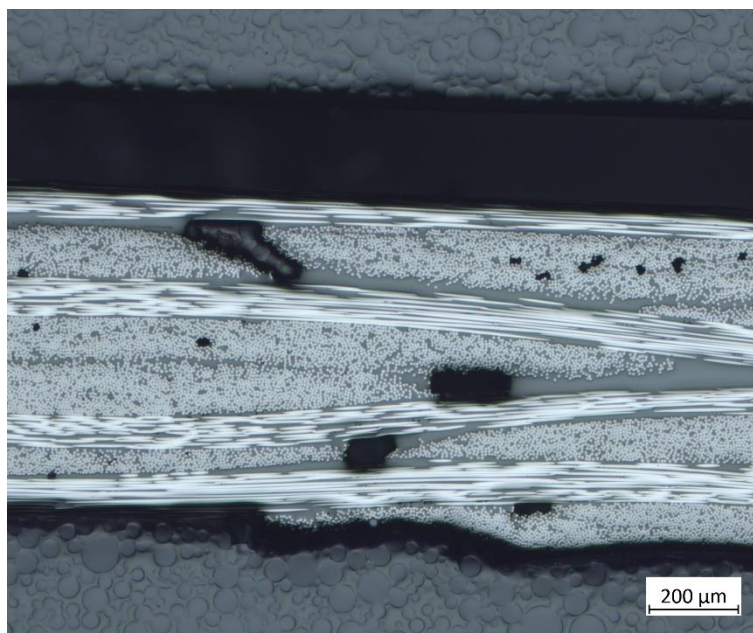
Obrázek 92: Vzorek 1, zvětšení 25x

Na vzorku 1 je jasně patrné, kde došlo k vytrhání vláken (označeno na obrázku červenými šipkami). Černá část vedle vzorku je prázdné místo, kde chybí skoro celá vrstva vláken. Na obrázku 92 je vidět, že vlákna sevřená stojánkem pro přidržení vzorku nejsou vytrhána (označeno na obrázku modrými šipkami).

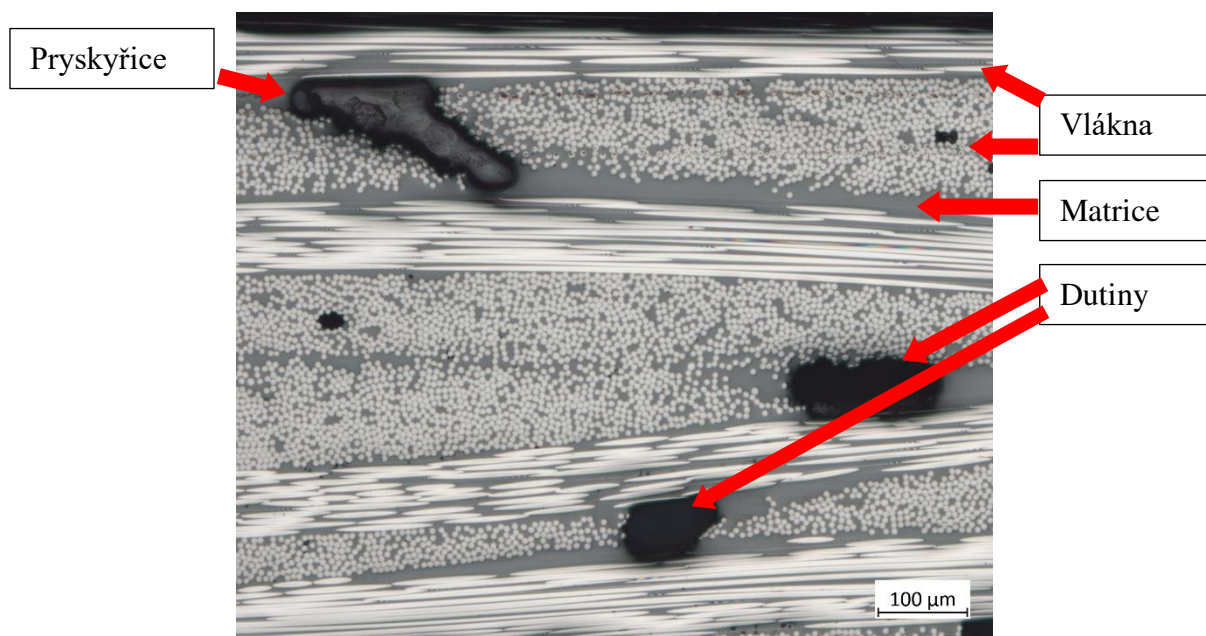


Obrázek 93: Vzorek 1, zvětšení 50x





Obrázek 94: Vzorek 1, zvětšení 50x

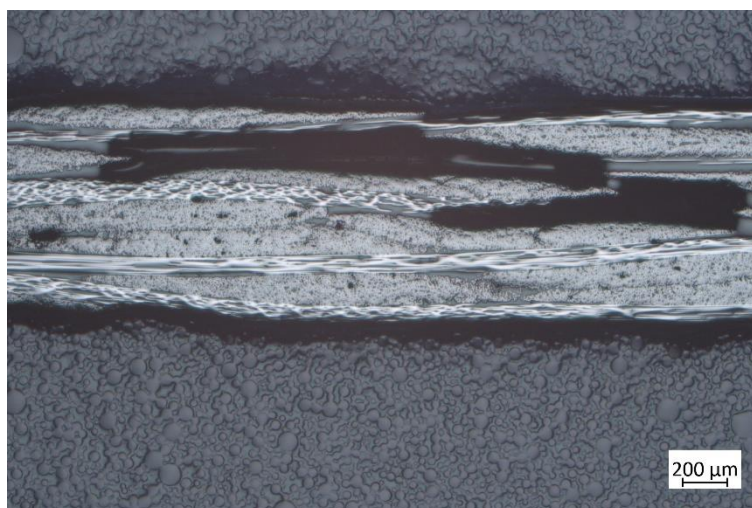


Obrázek 95: Vzorek 1, zvětšení 100x

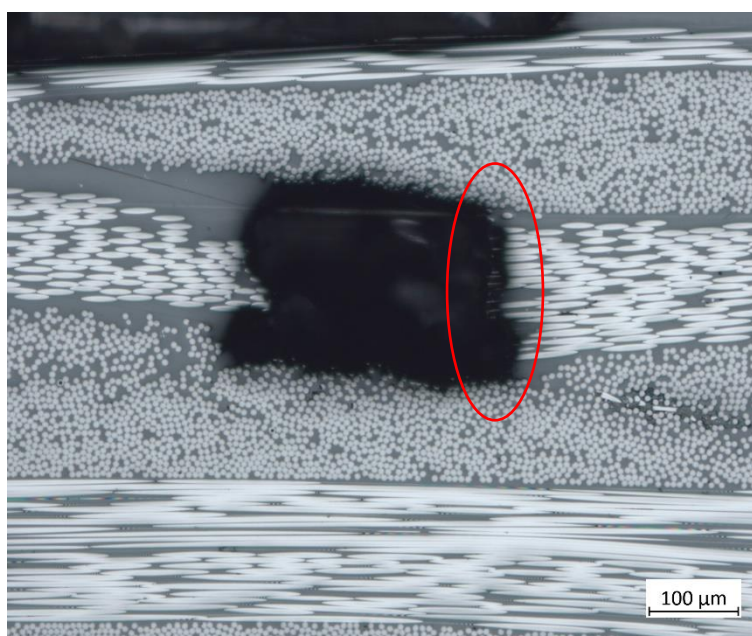
Na obrázcích 93, 94 a 95 je možné vidět, že ve vzorku byly dutiny už před broušením. Do těchto dutin při zalévání ve formě zatekla prskyřice a vytvořila strukturu, kterou je možné vidět na obrázku 95 v horním levém rohu. Další vadou jsou černé oblasti ve struktuře, které jsou tvořeny dutinami které vznikly vytrháním vláken.

### 11.2.2.2. Vzorek 1V

Ve vzorku 1V je možné též pozorovat vytrhání vláken na okraji vzorku. Zároveň jsou zde patrné poměrně velké vady – černé oblasti tvořící dutiny ve struktuře. Na obrázku 97 je vidět ostrá hranice ukončení vláken. To je místo, kam byla vložena vada (označeno červeným kolečkem).



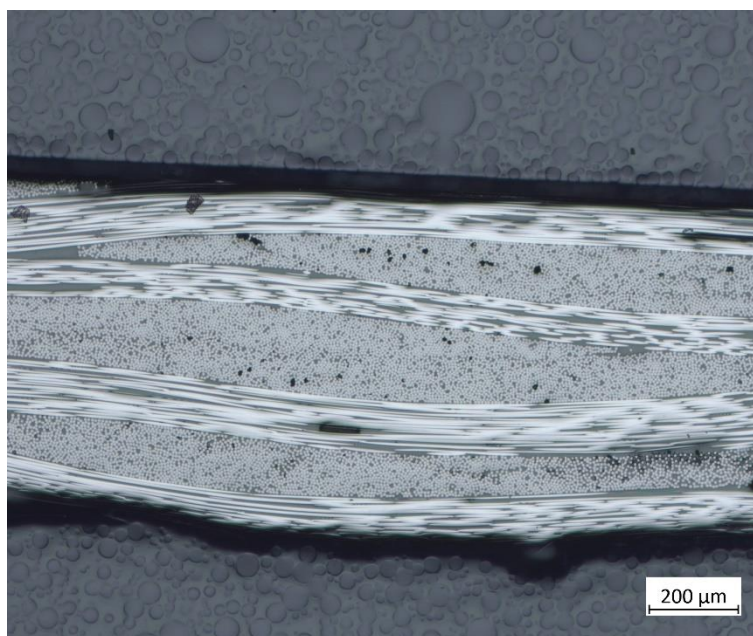
Obrázek 96: Vzorek 1V, zvětšení 25x



Obrázek 97: Vzorek 1V, zvětšení 100x, přerušená vrstva

### 11.2.2.3. Vzorek 2

Vzorek 2 (byl vytvářen v autoklávu za působení tlaku) má poměrně pravidelnou strukturu bez větších deformací nebo vad (viz obrázek 98). Na okrajích vzorku jsou také černé oblasti, ale tenčí než u vzorku 1 a 1V a jsou zřejmě způsobeny smrštěním zalévací hmoty při přípravě metalografického výbrusu.

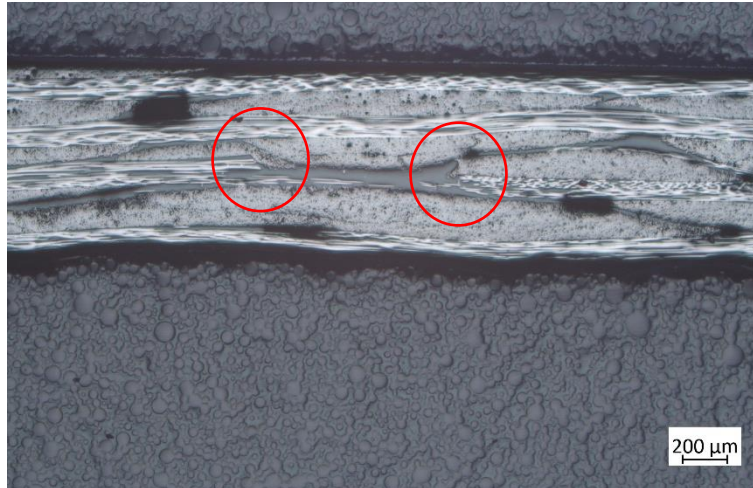


Obrázek 98: Vzorek 2, zvětšení 50x

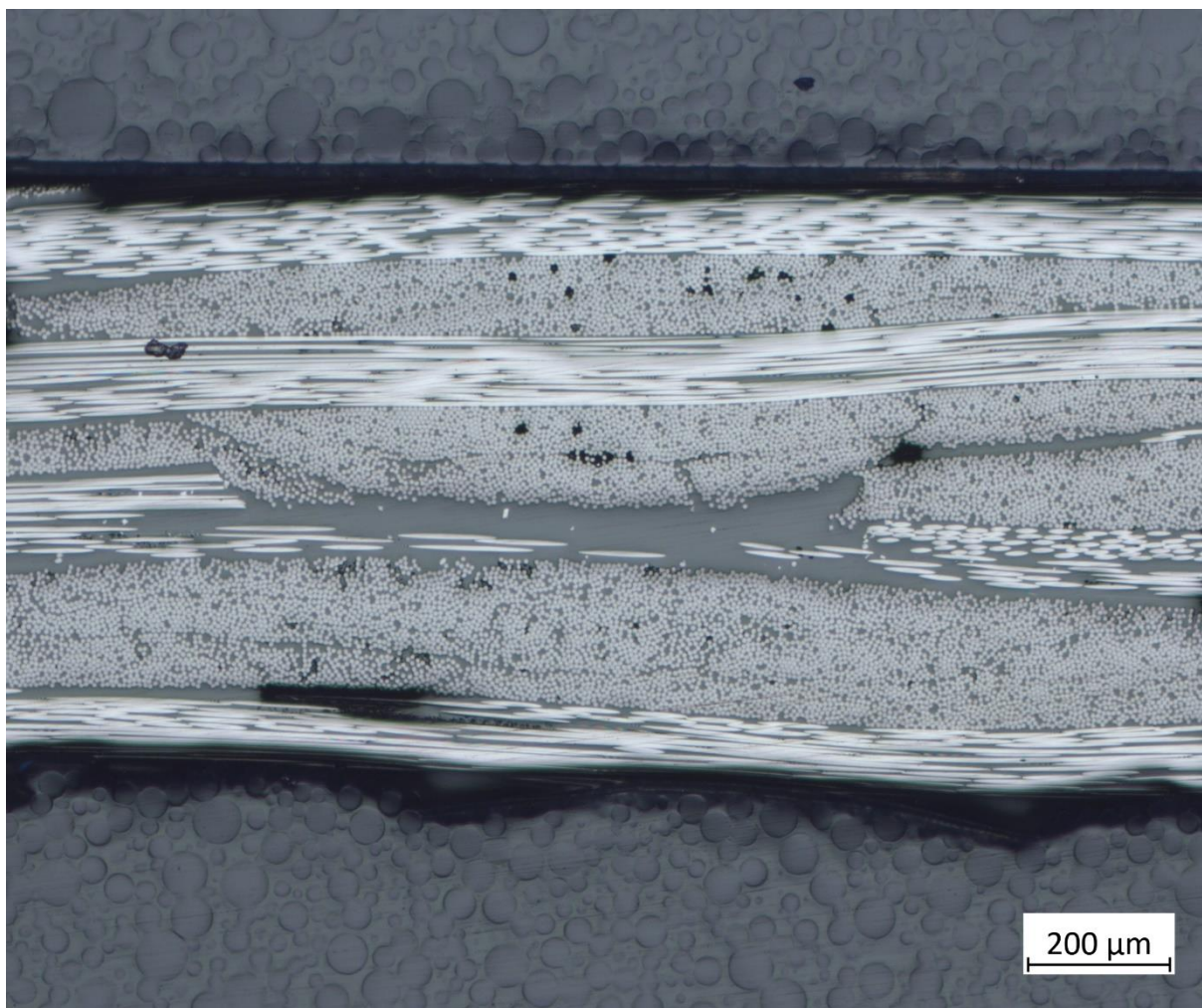


#### 11.2.2.4. Vzorek 2V

V tomto vzorku je uměle vytvořená vada hezky viditelná oproti vzorku 1V (označeno červenými kruhy). Můžeme zde pozorovat menší přirozené vady ve struktuře (černé oblasti tvořící dutiny).



Obrázek 99: Vzorek 2V, zvětšení 25x, vyznačené hranice vadné vrstvy



*Obrázek 100: Detail uměle vytvořené vady u vzorku 2V, zvětšení 50x*

Rozdíl ve struktuře vzorků 1 a 2 je patrný a je způsoben absencí přetlaku při výrobě vzorků 1 a 1V. Dále bylo potvrzeno, že vzorky s uměle vytvořenými vadami mají jiné (snížené) mechanické vlastnosti a vady jsou patrné na struktuře – což je možné využít pro další plánované experimenty na Ústavu strojírenské technologie.

## 12. Závěr

V rámci bakalářské práce byla nejprve provedena rešerše na téma kompozitních materiálů a metod výroby kompozitních součástí. Dále bylo popsáno experimentální zařízení (autokláv) a jeho vlastnosti.

V praktické části se bakalářská práce zabývala ověřením funkčnosti autoklávu. Nejdříve byla pomocí zkušebního cyklu ověřena schopnost autoklávu udržet požadované hodnoty teploty a tlaku. Následně byly autorem práce vyrobeny a zkalibrovány termočlánky typu J. S jejich pomocí byla proměřena homogenita tepelného pole autoklávu. Výsledkem tohoto měření je, že tepelné pole je nehomogenní a teplota se může lišit až o 14,7°C.

Po instalaci vývěvy vakua bylo možné zhotovit první vzorky. Jako první vzorek byly zvoleny obdélníkové destičky o rozměru 150 x 50 mm. Do dvou z nich byly navíc vytvořeny (vložené) umělé vady. Vzorky byly vytvrzeny za rozdílných podmínek (u první nebyl aplikován tlak) pro porovnání vlivu výrobního procesu.

Vyrobené kompozitní díly byly vizuálně zkontrolovány a následně z nich byly vyrobeny vzorky pro tahovou zkoušku. Po provedení tahové zkoušky bylo zjištěno, že vzorky s vadou mají přibližně o třetinu nižší maximální napětí v tahu. Nicméně oproti očekávání byly hodnoty napětí vyšší pro vzorky vytvrzované bez přetlaku. Po tahové zkoušce bylo provedeno metalografické pozorování struktury vzorků. Po porovnání vzorků 1 (vytvrzováno bez tlaku) a vzorků 2 (vytvrzováno s tlakem) bylo zjištěno, že struktura vzorků 2 je soudržnější než struktura vzorků 1. To je dáno působením tlaku při vytvrzování a tím pádem lepším spojením vláken prepregu.

Pro další testovací vzorky je možné doporučit vyhotovení vzorků odpovídající normalizovaným vzorkům na tahovou zkoušku a použití tlaku při zapékání vzorků.

## Seznam použitých literárních zdrojů

- [1] ADVANI, Suresh a Kuang-Ting HSIAO, ed. Manufacturing techniques for polymer matrix composites / (PCMs). Woodhead Publishing Limited, 2012.
- [2] MAZUMBAR, Sanjay. COMPOSITES MANUFACTURING: Materials, Product and Proces Engineering. CRC Press, 2002. ISBN 9780849305856.
- [3] SINGH, Ramesh. Composites Manufacturing. In: Department of Mechanical Engineering: Indian Institute of Technology Bombay [online]. [cit. 2021-02-11]. Dostupné z: <https://www.me.iitb.ac.in/~ramesh/courses/ME338/comp.pdf>
- [4] DAĐOUREK, Karel. Kompozitní materiály. In: KATEDRA MATERIÁLU [online]. Technická univerzita v Liberci, 2010, 2010 [cit. 2021-02-11]. Dostupné z: [http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady\\_kmt\\_bakalari/ZMI/06kompozityzmi.pdf](http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_bakalari/ZMI/06kompozityzmi.pdf)
- [5] HAGSHENAS, M. Reference Module in Materials Science and Materials engineering [online]. University of Waterloo, Waterloo, ON, Canada, 2016 [cit. 2021-02-11]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128035818039503>
- [6] What Are Ceramic Matrix Composites. L&L SPECIAL FURNACE CO, INC [online]. 30.8.2018 [cit. 2021-02-11]. Dostupné z: <https://lffurnace.com/blog/what-are-ceramic-matrix-composites/>
- [7] SEDLÁČEK, Radek, Jan ORTL a Zdeněk PADOVEC. Ruční kladení. Spolek pro technickou podporu a propagaci polymerních kompozitů [online]. Brodského 1667/10, Praha, 149 00 [cit. 2021-02-11]. Dostupné z: <https://polymer-composites.cz/hand-lay-up/>
- [8] SEDLÁČEK, Radek, Jan ORTL a Zdeněk PADOVEC. Injektážní a infuzní technologie. Spolek pro technickou podporu a propagaci polymerních kompozitů [online]. Brodského 1667/10, Praha, 149 00 [cit. 2021-02-11]. Dostupné z: <https://polymer-composites.cz/injektazni-infuzni-technologie/>
- [9] SEDLÁČEK, Radek, Jan ORTL a Zdeněk PADOVEC. Navíjení. Spolek pro technickou podporu a propagaci polymerních kompozitů [online]. Brodského 1667/10, Praha, 149 00 [cit. 2021-02-11]. Dostupné z: <https://polymer-composites.cz/filament-winding/>
- [10] SEDLÁČEK, Radek, Jan ORTL a Zdeněk PADOVEC. Lisování. Spolek pro technickou podporu a propagaci polymerních kompozitů [online]. Brodského 1667/10, Praha, 149 00 [cit. 2021-02-11]. Dostupné z: <https://polymer-composites.cz/press-moulding/>
- [11] SEDLÁČEK, Radek, Jan ORTL a Zdeněk PADOVEC. Pultruze (tažení). Spolek pro technickou podporu a propagaci polymerních kompozitů [online]. Brodského 1667/10, Praha, 149 00 [cit. 2021-02-11]. Dostupné z: <https://polymer-composites.cz/pultrusion/>
- [12] SEDLÁČEK, Radek, Jan ORTL a Zdeněk PADOVEC. Odstředivé lití. Spolek pro technickou podporu a propagaci polymerních kompozitů [online]. Brodského 1667/10, Praha, 149 00 [cit. 2021-02-11]. Dostupné z: <https://polymer-composites.cz/centrifugal-casting/>
- [13] SEDLÁČEK, Radek, Jan ORTL a Zdeněk PADOVEC. Stříkání. Spolek pro technickou podporu a propagaci polymerních kompozitů [online]. Brodského 1667/10, Praha, 149 00 [cit. 2021-02-11]. Dostupné z: <https://polymer-composites.cz/spray-up/>
- [14] SEDLÁČEK, Radek, Jan ORTL a Zdeněk PADOVEC. Odlévání. Spolek pro technickou podporu a propagaci polymerních kompozitů [online]. Brodského 1667/10, Praha, 149 00 [cit. 2021-02-11]. Dostupné z: <https://polymer-composites.cz/odlevani/>
- [15] Understanding Industrial Autoclaves & Their Function. DIDION'S MECHANICAL [online]. 10.2.2016 [cit. 2021-02-11]. Dostupné z: <http://www.didionsmech.com/blog/understanding-industrial-autoclaves-functioning/>

- [16] INDUSTRIAL AUTOCLAVES AND HOW THEY FUNCTION. BONDTECH CORPORATION [online]. 1278 HWY 461 Somerset, KY 42503 United States, 17.12.2019 [cit. 2021-02-11]. Dostupné z: <https://bondtech.com/blog/how-industrial-autoclaves-work/>
- [17] Ing. Stefan Kerbs, doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE a Ing. Bc. Barbora Bryksí Stunová, Ph.D. Teorie zpracování plastů a kompozitů. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, Thákurova 1, 160 41 Praha 6, 2020. ISBN 978-80-01-06722-2.
- [18] EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály: materiály, zpracování, vlastnosti. Křížová 10118/6, 150 05 Praha 5: NAKLADATELSTVÍ SCIENTA, spol., 2009.
- [19] HOVORKOVÁ, Bc. Markéta. Dynamicko-mechanická analýza kompozitů s anorganickou výztuží. Liberec, 2010. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta textilní. Vedoucí práce Ing. Miroslava Maršálová, Ph.D.
- [20] ASC Manufactures the World's Largest Autoclave [online]. [cit. 2021-8-11]. Dostupné z: <http://www.aschome.com/index.php/en/asc-completes-worlds-largest-autoclave>

## Seznam obrázků

- Obrázek 1: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Textilbeton1.jpeg>
- Obrázek 2: [https://www.researchgate.net/figure/Composite-material-with-fiber-and-matrix\\_fig13\\_258393869](https://www.researchgate.net/figure/Composite-material-with-fiber-and-matrix_fig13_258393869)
- Obrázek 3: [http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady\\_kmt\\_bakalari/ZMI/06kompozityzmi.pdf](http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_bakalari/ZMI/06kompozityzmi.pdf)
- Obrázek 4: <https://www.crpmeccanica.com/machining-metal-matrix-composites-mmc/>
- Obrázek 5: [https://www.wikiwand.com/en/Ceramic\\_matrix\\_composite](https://www.wikiwand.com/en/Ceramic_matrix_composite)
- Obrázek 6: <https://www.scit-composites.com/aeronautique-en.php>
- Obrázek 7: <https://prim-hodinky.cz/prim-carbon-fiber/>
- Obrázek 8: <https://www.stavebniny-janik.cz/vlakna-do-betonu-sklenena-anti-crak-hd-600-g>
- Obrázek 9: <http://www.veba.cz/cs/materialy>
- Obrázek 10: <https://www.indiamart.com/proddetail/prepreg-carbon-fiber-17865782888.html>
- Obrázek 11: <https://industry.sika.com/en/home/advanced-resins/model-and-mold-manufacturing/gelcoats.html>
- Obrázek 12: <https://www.indiamart.com/proddetail/aluminum-honeycomb-core-16490753412.html>
- Obrázek 13: <https://www.materialstoday.com/composite-applications/features/motorcycle-swingarm-redesigned-in-carbon-composite/>
- Obrázek 14: <https://polymer-composites.cz/hand-lay-up/>
- Obrázek 15: <https://blog-fgci.com/2016/11/03/how-to-guide-hand-lay-up-on-fiberglass-molds/>
- Obrázek 16: <https://www.moldedfiberglass.com/processes/resin-transfer/>
- Obrázek 17: [https://www.fibreglast.com/product/vacuum-infusion-Guide/Learning\\_Center](https://www.fibreglast.com/product/vacuum-infusion-Guide/Learning_Center)
- Obrázek 18: <https://polymer-composites.cz/filament-winding/>
- Obrázek 19: <https://quartermax.com/3-75-carbon-fiber-driveshaft-1480/>
- Obrázek 20: <https://polymer-composites.cz/press-moulding/>
- Obrázek 21: <http://cz.glassfibersp.com/fiberglass-roving/direct-roving/roving-for-pultrusion.html>
- Obrázek 22: <https://polymer-composites.cz/pultrusion/>
- Obrázek 23: <https://www.compositesone.com/process/pultrusion/>
- Obrázek 24: <https://polymer-composites.cz/centrifugal-casting/>
- Obrázek 25: <https://polymer-composites.cz/spray-up/>
- Obrázek 26: <https://www.arrowheadinc.com/producing-open-molded-spray-parts/>
- Obrázek 27: <https://www.nonstopstavebniny.cz/sberna-vpust-polymerbetonova-1-5t-nerez-mriz--360-x-125-x-400-mm/>
- Obrázek 28: <http://www.aschome.com/index.php/en/asc-completes-worlds-largest-autoclave>
- Obrázek 29: <https://www.heatcon.com/product/hcs2402-103-hexcel-carbon-fiber-prepreg-fabric/>
- Obrázek 30: <https://www.heatcon.com/product/hcs2403-015-hexcel-kevlar-prepreg-f155-71-2/>



Obrázek 31: <https://lucasindustries.com/molds-aerospace-composites/#engineering-expertise>

Obrázek 32: Autor Vít Ritschel

Obrázek 33: <http://www.icontex.cz/cz/produkty/strhavaci-tkaniny/>

Obrázek 34 – 100: Autor Vít Ritschel

## **Seznam příloh**

Příloha 1: 30667N\_ZPRACOVANI\_CHLADICI\_VODY\_AUTOKLAVU

Příloha 2: 00356310\_AUTOKLAV\_CVUT\_SESTAVA\_20161027

Příloha 3: T300\_Data\_Sheet

Příloha 4: ER\_38\_Data\_Sheet