

# **Návrh konstrukčně-technologického řešení automobilového dílu vyráběného technologií autoklávového lisování**

Marek Tomeček

---

Bakalářská práce  
2022

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2021/2022

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Marek Tomeček
Osobní číslo:	T19262
Studijní program:	B3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Technologická zařízení
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Návrh konstrukčně-technologického řešení automobilového dílu vyráběného technologií autoklávového lisování

## Zásady pro vypracování

1. Literární rešerše na problematiku zpracování kompozitních materiálů, rozdělení, výroba a využití v automotive.
2. Popis aktuální situace využití kompozitu při výrobě automobilových součástí.
3. Zrealizujte experimentální výrobu zvolené kompozitní aplikace, návrh materiálové skladby, volba technologických podmínek.
4. Testování mechanických vlastností.
5. Experimentální vyhodnotte dosažené výsledky.
6. Závěr.

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

**Seznam doporučené literatury:**

- BARBERO, E. J.: Introduction to composite materials design, Third edition, 2018, CRC Press, Taylor & Francis Group, ISBN-13: 978-1138196803.
- ŠUBA, O.: Mechanika polymerů a kompozitů, Zlín, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011, ISBN 978-80-7454-015-8.
- ŠUBA, O.: Dimenzování a navrhování výrobků z polymerů. Vyd. 3. Zlín, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010, 112 s., ISBN 978-80-7318-948-8.
- EHRENSTEIN G. W.: Polymerní kompozitní materiály, Praha, SCIENTIA v Praze, 351s, 2009, ISBN 978-80-86960-29-6.
- LIPTÁKOVÁ, T.: Polymérne konstrukčné materiály. University of Žilina, Žilina, 189 s, 2012, ISBN 978-80-554-0505-6.
- SRINIVASAN, K.: Composite Materials: Production, Properties, Testing and Applications, Alpha Science International Limited, 2009, ISBN 1842654918, 9781842654910.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Soňa Rusnáková, Ph.D.**  
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **3. ledna 2022**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **20. května 2022**

**prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.**  
děkan

L.S.

**prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D. v.r.**  
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 24. února 2022

## **PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

Beru na vědomí, že:

- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považuji se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

### **Prohlašuji,**

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....  
podpis studenta

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce se zabývá návrhem automobilového dílu vyráběného za pomoci autoklávového lisování. Práce je rozdělena na část teoretickou a praktickou. Teoretická část zahrnuje základní informace o kompozitu a jeho použití v automobilovém průmyslu v historii i v současnosti. Praktická část obsahuje výrobu kompozitních tělísek při různém typu skládání prepregů, zkoušení jejich mechanických vlastností při zkoušce tříbodovým ohybem a na rázovou houževnatost. Poslední pasáží praktické části je výroba automobilového prototypu, návrh rámcového technologického postupu a návrh přípravku.

Klíčová slova: kompozit, automobil, autokláv, prepreg

## **ABSTRACT**

The bachelor thesis deals with the design of an automotive part produced by autoclave pressing. The thesis is divided into theoretical and practical parts. The theoretical part includes basic information about the composite and its use in the automotive industry in history and now. The practical part includes the production of composite bodies in different types of prepreg lay-up, testing their mechanical properties in three-point bending and impact toughness tests. The last passage of the practical part is the production of an automotive prototype, the design of the framework technological procedure and the design of the preparation.

Keywords: composite, automobile, autoclave, prepreg

Rád bych poděkoval doc. Ing. Soně Rusnákové, Ph.D. za její odborné vedení, rady a vstřícný přístup, který mi věnovala během mé bakalářské práce. Dále děkuji Ing. Milanu Žaludkovi, Ph.D. za odbornou pomoc, kterou mi poskytl při měření mechanických vlastností. V neposlední řadě chci poděkovat rodině za podporu během studia.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>10</b>
<b>1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY</b> .....	<b>11</b>
1.1 ROZDĚLENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ .....	11
1.2 VLÁKNA .....	12
1.2.1 Skleněná vlákna .....	12
1.2.2 Uhlíková a grafitová vlákna .....	13
1.2.3 Aramidová vlákna .....	13
1.2.4 Basaltová vlákna .....	14
1.2.5 Přírodní vlákna .....	14
1.3 MATRICE .....	16
1.3.1 Uhlíková matrice .....	16
1.3.2 Keramická matrice .....	16
1.3.3 Skleněná matrice .....	17
1.3.4 Kovová matrice .....	17
1.3.5 Polymerní matrice .....	17
<b>2 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU</b> .....	<b>19</b>
2.1 HISTORIE .....	20
2.2 POUŽITÍ KOMPOZITŮ U AUTOMOBILŮ .....	23
2.2.1 Aston Martin .....	23
2.2.2 Ford .....	24
2.2.3 BMW .....	25
2.2.4 McLaren .....	26
2.3 RECYKLACE .....	27
<b>3 PREPREGY</b> .....	<b>28</b>
3.1 TECHNOLOGIE VÝROBY PREPREGŮ .....	28
3.1.1 Metoda tavení za tepla .....	29
3.1.2 Metoda rozpouštědlového máčení .....	29
3.2 RECYKLACE .....	30
<b>4 VYTVRZOVÁNÍ V AUTOKLÁVU</b> .....	<b>31</b>
4.1 VYTVRZOVACÍ CYKLUS .....	33
<b>5 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ</b> .....	<b>34</b>
5.1 ZKOUŠKA OHYBEM.....	35
5.2 ZKOUŠKA RÁZEM DLE CHARPYHO.....	36
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>37</b>
<b>6 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE</b> .....	<b>38</b>
<b>7 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH DESEK</b> .....	<b>39</b>

7.1	PŘÍPRAVA A SEPARACE FORMY .....	40
7.2	STŘIHÁNÍ A KLADENÍ PREPREGŮ DO FORMY .....	40
7.3	VAKUOVÁNÍ FORMY .....	42
7.4	AUTOKLÁVOVÉ LISOVÁNÍ .....	42
7.5	MECHANICKÉ ZKOUŠKY .....	44
7.5.1	Zkouška ohybem ČSN EN ISO 178.....	44
7.5.2	Zkouška rázové houževnatosti metodou Charpy (ČSN EN ISO 179-1).....	48
<b>8</b>	<b>DISKUZE VÝSLEDKŮ.....</b>	<b>51</b>
8.1	VYHODNOCENÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLÍSEK U OHYBOVÉ ZKOUŠKY .....	51
8.2	VYHODNOCENÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLÍSEK RÁZOVÉ (CHARPYHO) ZKOUŠKY .....	53
8.3	POROVNÁNÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLÍSEK .....	53
<b>9</b>	<b>VÝROBA PROTOTYPU BLATNÍKU .....</b>	<b>55</b>
9.1	NÁVRH A VÝROBA FORMY .....	55
9.2	RÁMCOVÝ TECHNOLOGICKÝ POSTUP.....	55
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>57</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>58</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>63</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>65</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>67</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>68</b>



## ÚVOD

Kompozity jsou materiály, které rok od roku zaujímají větší procento v celkovém objemu používaných materiálů. Jsou složeny ze dvou a více částí, kdy každá z nich má jiné důležité vlastnosti. Hlavním důvodem jejich použití je snížení hmotnosti (lehčí než hliník), ale zároveň velká tuhost, odolnost a vysoká pevnost srovnatelná s kovovými materiály. Uplatnění nacházejí především v automobilovém, leteckém a vojenském průmyslu.

Použití kompozitních materiálů v automobilovém průmyslu není žádnou novinkou. Dříve byly kompozitní materiály v autech vyráběny kusově, ale v posledních letech se rozběhla sériová výroba aut s kompozitními součástmi. Vyrábí se z nich karoserie, listové pružiny, disky kol, kryty v interiéru, ale i kryty světel. V dnešní době je kladen velký důraz na recyklaci materiálů a jejich uplatnění ve výrobě, proto se otevírá téma použití přírodních kompozitů, jejichž vlákna se dají znovu použít. Díky tomu je velmi pravděpodobné, že popularita kompozitních materiálů se bude v budoucnu zvyšovat a tento materiál bude z hlediska použití konkurovat oceli.

Hlavním důvodem použití kompozitů v automobilovém průmyslu je snížení hmotnosti automobilů a snížení spotřeby paliva. Snížením hmotnosti o 100 kg se sníží spotřeba paliva o 0,3 l/100 km a emise o 8,5 g CO<sub>2</sub>/km. Z hlediska pevnosti jsou kompozity srovnatelné s ocelí, avšak hmotnost mají o 50% nižší. Dále jsou kompozity také šetrné k životnímu prostředí.

Teoretická část obsahuje obecné informace o kompozitu a jeho použití v automobilovém průmyslu v historii i v současnosti, popisuje druhy vláken, matrice, ale i autokláv a jeho vytvrzovací cyklus. Dále je zaměřena na prepregy a jejich technologii výroby.

Praktické část bakalářské práce zahrnuje přípravu kompozitních zkušebních tělísek, zkoušení jejich mechanických vlastností, výrobu prototypového automobilového dílu, návrh jeho rámcového technologického postupu a návrh přípravku.

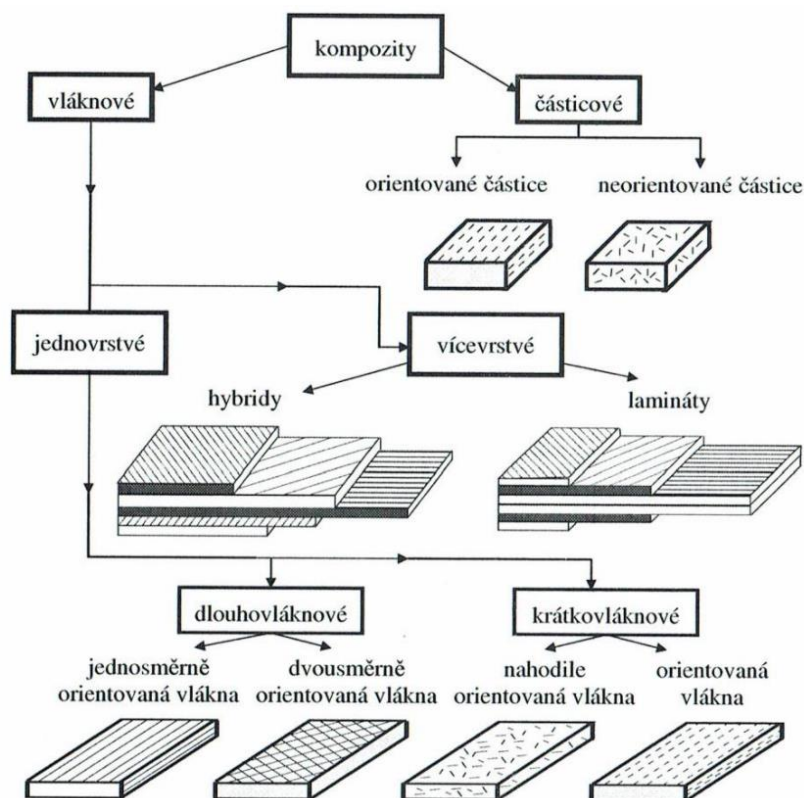
## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

# 1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Kompozity jsou materiály složené ze dvou nebo více složek. První složkou jsou vlákna, druhou složkou je pojivo (matrice), které drží vlákna pohromadě. Vlákna jsou zejména pevnější a tužší než matrice. Spojení těchto složek je nezbytné pro vytvoření kompozitu. Obě složky si zachovávají své individuální vlastnosti a ovlivňují vlastnosti vyrobeného kompozitu. Zvyšování objemového obsahu vláken může do určité míry zvýšit pevnost a tuhost kompozitu. Pokud bude podíl vlákna vysoký, bez dostatku matrice, může dojít k zamotání vláken. Podobně může geometrie jednotlivých vláken a jejich uspořádání v matrici ovlivnit vlastnosti kompozitu. [1,2]

## 1.1 Rozdělení kompozitních materiálů

Kompozitní materiály se obvykle dělí podle typu použité výztuže na vláknové a částicové. Každá z nich má jedinečné vlastnosti, aplikační potenciál a lze je rozdělit do specifických kategorií. Vláknový kompozit se skládá z kontinuálních (dlouhých) nebo sekaných vláken (whiskers). Částicový kompozit je složený z částic. Částice mohou mít prakticky libovolný tvar, velikost nebo konfiguraci. Příklady známých částicových kompozitů jsou beton a dřevotřískové desky. [2]



Obrázek 1 Rozdělení kompozitních materiálů [18]

## 1.2 Vlákná

Vlákná jsou hlavní nosnou složkou kompozitu. Společnou vlastností všech vláken je vysoký měrný modul (poměr modulu k hmotnosti) a měrná pevnost (poměr pevnosti k hmotnosti). Vlákná mají průměr od 3 do 200  $\mu\text{m}$  a obvykle jsou lineárně pružná nebo plastická. Obecně lze říct, že jsou pevnější a tužší než stejný materiál v sypké formě. Nejčastěji používanými vlákny jsou bór, sklo, uhlík a kevlar. Vlákná dělíme na organická a anorganická. Mezi organická vlákna řadíme aramidová nebo přírodní vlákna. Do anorganických spadají skelná a uhlíková vlákna. Tyto druhy vláken se od sebe liší svými vlastnostmi. [2,3,4]

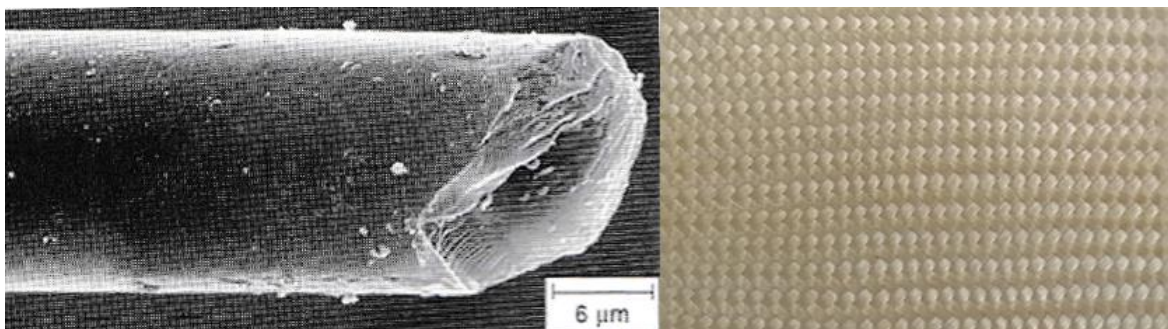
### 1.2.1 Skleněná vlákna

Skleněná vlákna tvoří 90 % používaných vláken u kompozitních materiálů. Většina používaných vláken se porovnává s E-sklem z hlediska výkonu a ceny. [3,16]

Podle svého složení je dělíme:

- **E-sklo** (elektrické) je nejběžnějším vláknem používaným v automobilovém průmyslu. Tyto vlákna jsou levná, mají vysokou pevnost v tahu, vysokou chemickou odolnost a silnou odolnost vůči vodě. Mezi nevýhody patří relativně nízký modul pružnosti a nízká odolnost proti únavě.
- **S-sklo** vykazuje vyšší pevnost v tahu (o 33 % vyšší než E-sklo) ve srovnání s ostatními typy skel, ale je dražší než E-sklo. Běžný typ S-skla, tzv. S2-sklo je určeno pro použití ve špičkových aplikacích v elektronice, letectví, kosmonautice a vojenství. Levnější verzí S-skla je S1-sklo, které vyplňuje cenovou a výkonnostní mezeru mezi E-sklem a S2-sklem. Pouze malý přídavek S2-skla k E-sklu zlepšuje vlastnosti kompozitů. Vylepšená skleněná vlákna "HiPer-Tex" mají vlastnosti podobné S-sklu a jejich cena je jen o něco málo vyšší než u E-skla.
- **A-sklo** je vysoce alkalické sklo, má velmi dobrou odolnost vůči chemikáliím, ale horší elektrické vlastnosti.
- **C-sklo** (chemické, odolné proti korozi) je chemická třída, která nabízí extrémně vysokou chemickou odolnost.

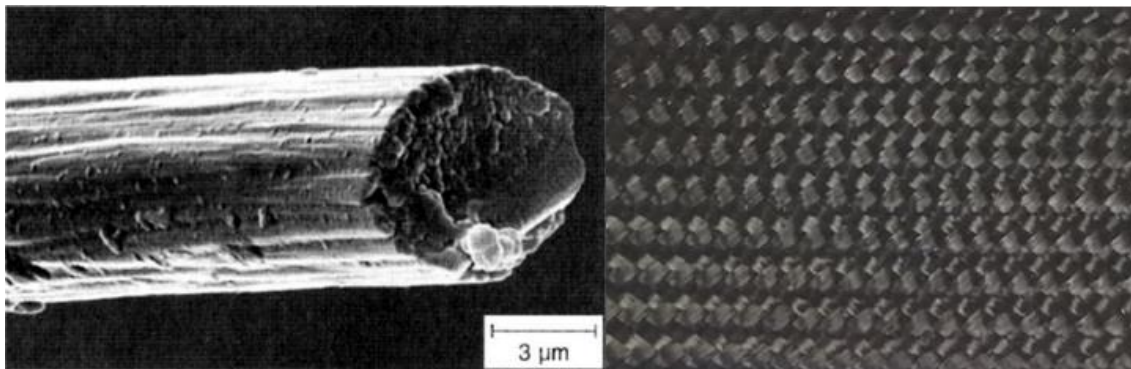
- **D-sklo** má vynikající elektrické vlastnosti s nízkou dielektrickou konstantou [3,5]



Obrázek 2 Struktura skleněného vlákna [6,30]

### 1.2.2 Uhlíková a grafitová vlákna

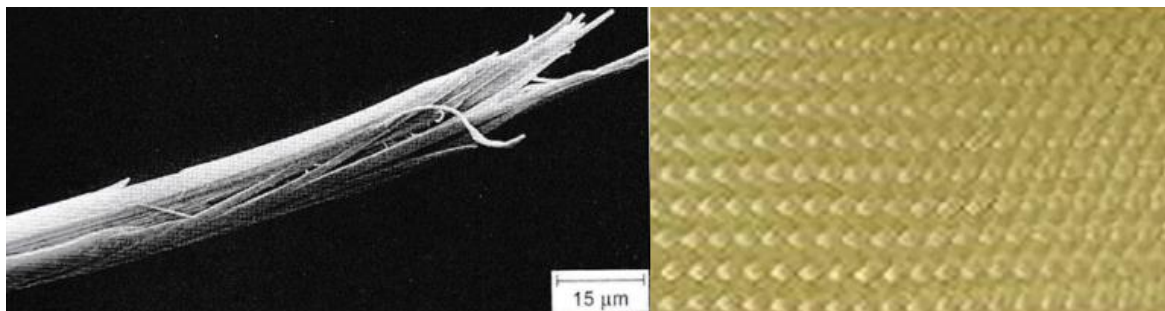
Dříve se uhlíková a grafitová vlákna rozlišovala, avšak v dnešní době jsou obě tato vlákna řazena do stejné skupiny, ve které se rozlišují svými vlastnostmi. Tyto vlákna dosahují nejvyšších mechanických vlastností. Uhlíková vlákna tvoří mezeru na automobilovém trhu a obvykle se používají u drahých a vysoce výkonných vozidel pro svůj vysoký modul pružnosti a nízkou hmotnost. Nevýhodou je nízká odolnost proti rázům a možnost "zkratování" elektrických obvodů kvůli vodivosti vláken. [3,4]



Obrázek 3 Struktura uhlíkového vlákna [4,30]

### 1.2.3 Aramidová vlákna

Aramidová neboli kevlarová vlákna jsou charakteristickým zástupcem organických vláken používaných v kompozitech. Mají jedinečné vlastnosti jako je vysoká pevnost v tahu, teplotní stabilita, rozměrová stálost, ohybové vlastnosti, odolnost vůči chemikáliím a vysoký modul pružnosti. Jejich specifickou vlastností je odolnost proti rázům (neprůstřelné vesty, pancéřování). Hlavní nevýhodou je jejich obtížná obrobiteľnosť. Materiál z kevlarových vláken je vysoce anizotropní a vykazuje vynikající podélné vlastnosti, ale skromné příčné vlastnosti. [3,4,5]

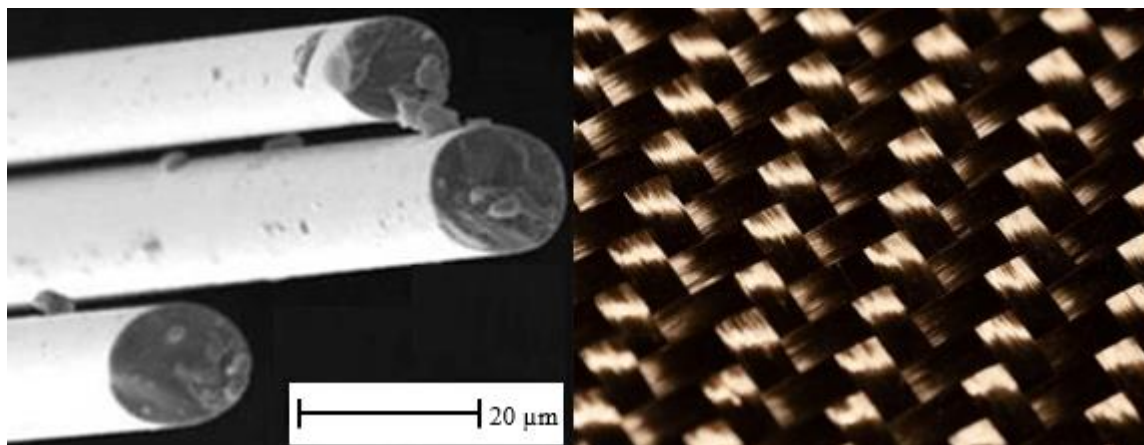


Obrázek 4 Struktura aramidového vlákna [6,30]

Aramidová vlákna mají kruhový průřez, na povrchu jsou hrubá a průměr vláken mají 12 µm. Měrná hmotnost je v porovnání s ostatními vlákny nízká. Aramidová vlákna jsou na trhu ve formě pramenců, přízí, tkanin a povrchových rohoží. Vlákna jsou citlivá na působení vody. [6]

#### 1.2.4 Basaltová vlákna

Basalt je přírodní materiál a jeho vlákna mají průměr mezi 9 a 13 µm. V automobilovém průmyslu se basalt používá jako náhrada azbestu u brzdových destiček, díky jeho vysoké teplotní roztažnosti a relativně nízkému opotřebení kotouče nebo bubnu v porovnání s keramikou. Používá se také v konstrukčních aplikacích jako jsou automobilové stropy. [3]

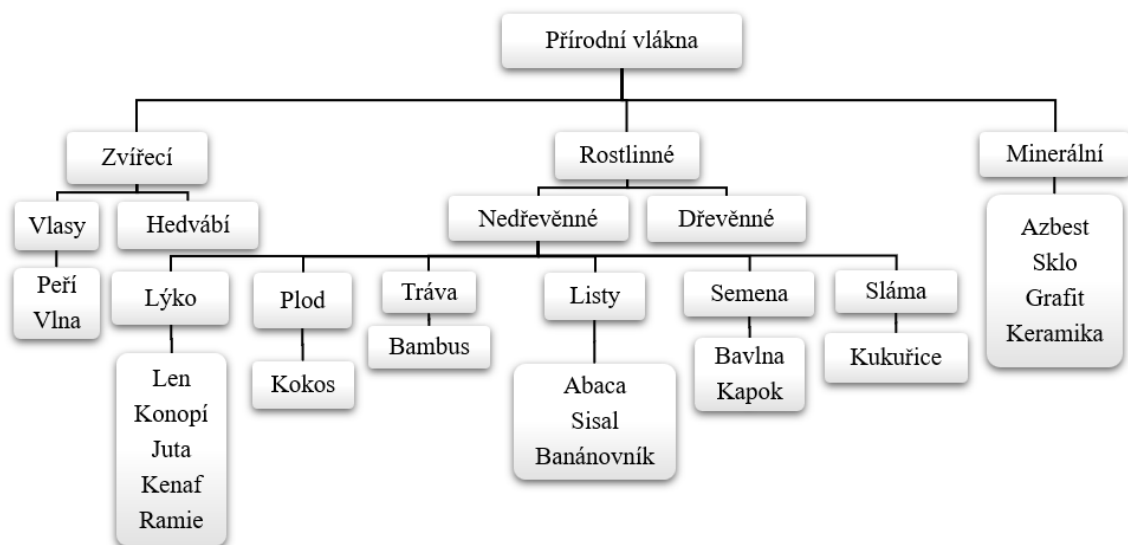


Obrázek 5 Struktura basaltového vlákna [32,33]

#### 1.2.5 Přírodní vlákna

Přírodní vlákna jsou sloučeniny kombinující celulózu, hemicelulózu a lignin. Mohou pocházet z listů (např. sisalu), lýka (např. lnu, konopí), semen (např. bavlny) nebo plodů (např. kokosové vlákno). Největší výhody přírodních vláken se týkají životního prostředí. Jsou biologicky rozložitelné a mají nízké emise, protože absorbují více oxidu uhličitého, než

vyprodukuje. Kromě toho nedráždí a nejsou abrazivní. Použitím přírodních vláken namísto anorganických je možné snížit hmotnost kompozitního materiálu až o 40 % a je také možné zvýšit pevnost v ohybu, tuhost a odolnost proti poškození. Avšak z hlediska celkových vlastností vykazují anorganická vlákna lepší výsledky než přírodní, i když existují určitá přírodní vlákna, která se mohou přiblížit modulu pružnosti v tahu a napětí v tahu jako je u skleněných vláken. [1]



Obrázek 6 Rozdělení přírodních vláken [24]

Probíhají pokusy nahradit skleněná vlákna přírodními vlákny jako jsou len a konopí. Nova institut odhaduje, že každý evropský automobil nyní obsahuje v průměru 1,9 kg přírodních vláken, přičemž z technického hlediska jsou možné mnohem vyšší objemy. [16]

Tabulka 1 Porovnání vlastností vláken [23,24]

	<b>Pevnost v tahu (GPa)</b>	<b>Modul pružnosti v tahu (GPa)</b>	<b>Hustota (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Prodloužení (%)</b>
A-sklo	3,3	72	2,46	-
C-sklo	3,3	69	2,48	-
E-sklo	3,45-3,5	72,5-73,5	2,5-2,55	0,5-3
S/S2-sklo	4,6-4,9	86-89	2,5	2,8
Aramid	2,6-3,4	55-127	1,4	3,3-3,7
Basalt	4,84	89	-	-
Uhlík	3,4-4,8	230-425	1,4-1,78	1,4-1,8
Bavlna	0,2-0,8	5,5-15,1	1,5-1,6	2,1-12
Len	0,34-1,6	25-81	1,3-1,5	1,1-3,3
Konopí	0,29-1,74	14,4-70	1,1-1,6	0,8-4

### 1.3 Matrice

Matrice je jedna ze dvou základních složek kompozitu. Je kontinuálně rozložená v celém objemu kompozitního dílu.

Klíčové funkce matrice:

- uzavření a vázání výztuže,
- ochrana výztuže před vlivy okolí,
- efektivní distribuce zatížení,
- zajištění geometrické polohy vláken a tvarové stálosti výrobku.

Fyzikální a chemické vlastnosti matrice zajišťují dokonalé spojení mezi matricí a výztuží, efektivně přenesou zatížení na výztuž a účinně ji ochrání před mechanickým poškozením nebo např. před UV zářením apod. [4,6]

Matrice je pojivový materiál, který rozděluje a chrání vlákna. Matrice mohou být křehké, tvárné, pružné nebo plastické. Mohou mít lineární nebo nelineární chování v závislosti na napětí a deformaci. Kromě toho musí být materiál matrice schopen v určité fázi výroby kompozitu obtékat výztuž. Vlákna musí být často chemicky ošetřena, aby byla zajištěna správná přilnavost k matrici. Nejčastěji používané matrice jsou polymerní (PMC), keramické (CMC), kovové (MMC), uhlíkové a jiné. [2]

#### 1.3.1 Uhlíková matrice

Uhlíková matrice má vysokou tepelnou kapacitu. Používá se jako trysky raket, spojky a brzdové destičky pro letadla. Uhlík může v určitých případech napodobovat vlastnosti kompozitů s keramickou matricí. [2,7]

#### 1.3.2 Keramická matrice

Keramická matrice je obvykle křehká. V extrémním prostředí (vysoké teploty) se používá společně s uhlíkovými, keramickými, kovovými a skleněnými vlákny. Oproti kovovým matricím má mechanické vlastnosti vyhovující i za vyšších teplot. V současné době jsou tyto matrice považovány za drahé ve srovnání s dostupnými alternativami. [2,4,7]



### 1.3.3 Skleněná matrice

Skleněné a sklokeramické kompozity mají obvykle modul pružnosti mnohem vyšší. Nejběžnějším typem výztuže u skleněné matrice jsou uhlíková a kovová. Nejlepšími vlastnostmi kompozitů se skleněnou maticí je jejich pevnost při vysokých provozních teplotách. Kompozity se skleněnou maticí se používají především pro tepelně odolné díly v motorech, výfukových systémech a elektrických součástkách. [2]

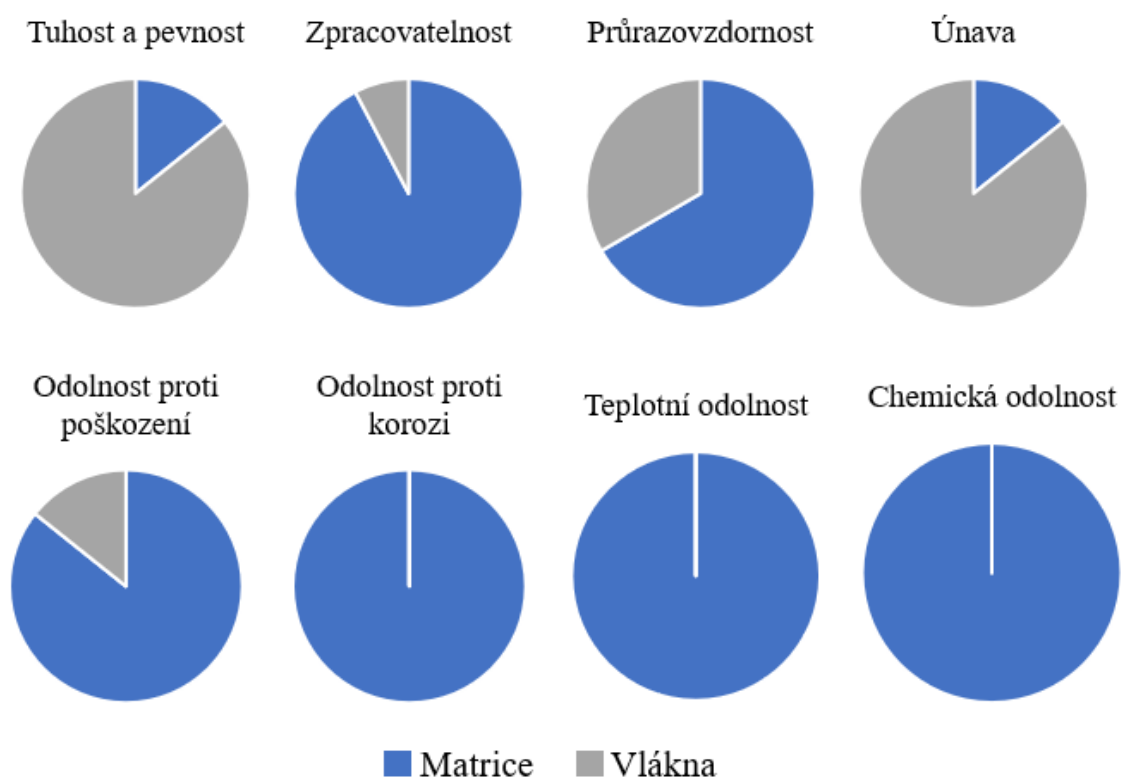
### 1.3.4 Kovová matrice

Kovové matrice jsou zejména vhodné pro použití při vysokých teplotách v oxidačním prostředí. Nejčastěji používané kovy jsou železo, nikl, wolfram, titan, hořčík a hliník. Můžeme se setkat i s maticemi ze slitin mědi či stříbra při použití pro elektrotechnické účely. [2,4]

### 1.3.5 Polymerní matrice

Polymerní matrice jsou nejpoužívanější a nejlevnější. Vyskytují se v přírodě jako jantar a pryskyřice. Polymery se snadno zpracovávají, mají nízkou hustotu, dobré mechanické vlastnosti, obvykle dobře impregnují výztuže a poskytují dobrou přilnavost. Vzhledem k nízkým teplotám zpracování lze použít mnoho organických výztuží. Polymerní matrice je buď viskoelastická nebo viskoplastická, což znamená, že je ovlivňována časem, teplotou a vlhkostí. [2]

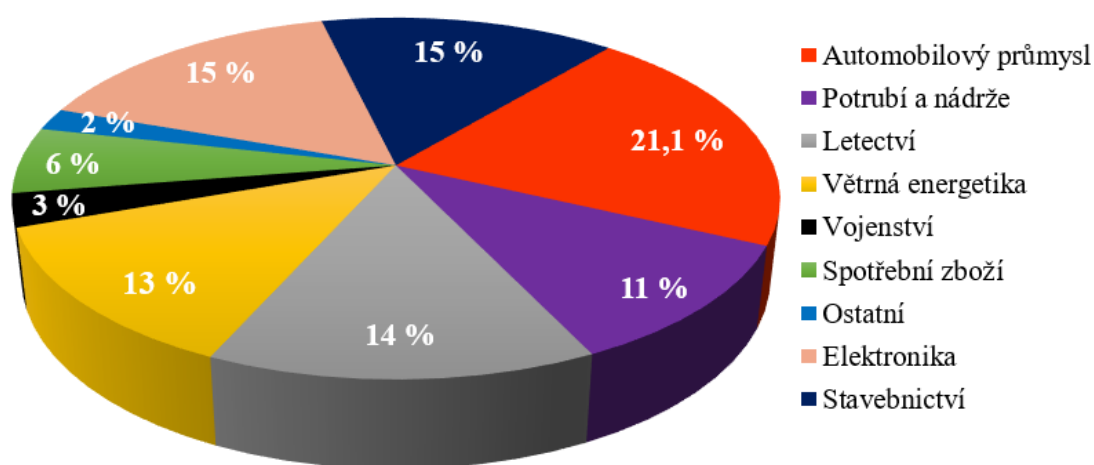
Polymerní matrice můžeme dělit na reaktoplastické a termoplastické, každá z nich má jiný způsob zpracování. Reaktoplastické matrice jsou historicky rozšířenější, využívají se především v letadlové a kosmické technice. V poslední době se např. v automobilovém průmyslu začaly používat kompozitní díly s termoplastickou maticí. Jako termoplasty jsou to nejčastěji polypropyleny a polyamidy, dále PBT, PC, POM, PPO. U termoplastů, jako je PET, PS, PVC, PE jsou poměrně vysoké náklady na zpracování, a proto se používají výjimečně. [4]



Obrázek 7 Vlastnosti matrice a vláken [22]

## 2 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU

Za posledních 5 let se použití kompozitů v automobilovém průmyslu stalo největším odvětvím podle tonáže. Přesto se v širším měřítku kompozity podílejí pouze 1,5 % v celosvětovém objemu materiálů. Kompozitní výrobky v automobilovém průmyslu se obvykle vyrábějí z polymerní matrice vyztužené skleněnými nebo uhlíkovými vlákny. Pokud jsou správně navrženy, mohou se z hlediska tuhosti, pevnosti a tlumících vlastností měřit s kovovými výrobky. [16,26]



Obrázek 8 Rozdělení kompozitních materiálů (v mil. USD) dle průmyslu v r. 2019 [31]

Hlavním důvodem pro použití kompozitů v automobilovém průmyslu je nízká hmotnost. U sportovních automobilů se odlehčení projevuje ve zvýšení výkonu (zrychlení a maximální rychlosti). V sériové výrobě vozidel je nejdůležitější úspora paliva a snížení emisí. Snížení hmotnosti o 100 kg znamená snížení spotřeby paliva o 0,3 l/100 km a emisí o 8,5 g CO<sub>2</sub>/km. Hlavní nevýhodou použití kompozitních materiálů je jejich vyšší cena než u většiny konvenčních kovů. V případě použití uhlíkových vláken jsou náklady až desetkrát vyšší. Proto je jedním z hlavních cílů použití levných vláken v dílech, které nevyžadují výjimečné vlastnosti. [9]

## 2.1 Historie

První automobil vyrobený z kompozitního materiálu „Soya bean car“ předvedl Henry Ford v roce 1941. Technické panely karoserie byly vyztuženy celulóзовými vlákny s matricí ze sojové pryskyřice. Potvrdila se schopnost kompozitů odolávat nárazovému zatížení, snížila se hmotnost o 900 kg a ukázala se možnost využití ekologicky šetrných technologií z přírodních vláken. [7]



Obrázek 9 „Soya bean car“ [21]

V roce 1936 společnost DuPont vyvinula skleněné vlákno (jako sklolaminát) vyztužené plastem. Osobní automobil ze skleněných vláken byl vyvinut v Rusku v roce 1937 a později byla karoserie automobilu prototypována společností Stout Scarab v roce 1946. Stout scarab byl první vůz, který měl karoserii z kompozitních skelných vláken a předběhl model Lotus Elite tím, že použil tento materiál pro monokokový rám karoserie. [8,14]



Obrázek 10 Stout Scarab [14]

Snad nejznámějším použitím kompozitů v automobilovém průmyslu bylo použití kompozitů vyztužených skleněnými vlákny pro panely karoserie Chevrolet Corvette začátkem roku 1953. Corvette byl prvním vozem s karoserií vyrobenou ze skelných vláken, ukázal výhody použití plastu vyztuženého skleněnými vlákny (GFRP) při výrobě velkých karoserií a složitých tvarových dílů. Od té doby se využití kompozitů v automobilovém průmyslu rozšířilo, díky tomu, že se tyto materiály začaly snadněji zpracovávat než kovové díly, protože mají vynikající mechanické vlastnosti a snižují hmotnost až o 40 %. [7,9]



Obrázek 11 Chevrolet Corvette [9]

Počátky uhlíkových vláken sahají do roku 1963. V této době byla technologie uhlíkových vláken velmi nákladná a používala se pouze ve vojenském průmyslu nebo na výrobu kosmických lodí. Na konci 70. let se o tyto kompozity začaly zajímat týmy Formule 1. Uhlíková vlákna poprvé použil McLaren, který v roce 1981 zkonstruoval průkopnický vůz Formule 1 s názvem McLaren MP4/1. Byl to první automobil s kompozitním podvozkem, který byl navržen jako výlisek. V současné době je každý vůz Formule 1 vyroben z těchto vláken. [11,25]



Obrázek 12 McLaren MP4/1 [25]

BMW i3 bylo představeno v roce 2011. Jednalo se o první sériově vyráběný vůz z kompozitních materiálů s elektrickým pohonem (za rok 2015 se vyrobilo 30000 vozů). BMW se rozhodlo využít polymery vyztužené uhlíkovými vlákny jak ve vnitřních částech, tak i v karoserii vozidla. Střecha je vyrobena z recyklovaných uhlíkových vláken. [19]



Obrázek 13 BMW i3 [19]

V roce 2019 byl vyroben prototyp autobusu společností Ebusco, který je 100 % udržitelný a mimořádně inovativní, protože se jedná o první celokompozitní autobus. Je o 25% lehčí než běžné městské autobusy vyrobené z oceli. Výhodou je mnohem menší spotřeba energie a možnost ujet mnohem více km na stejnou baterii. [12]

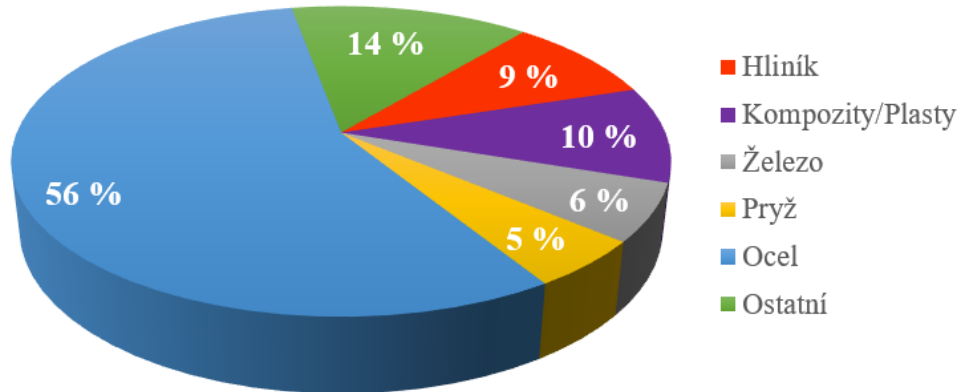


Obrázek 14 Ebusco 3.0 [12]



## 2.2 Použití kompozitů u automobilů

Hlavní výhodou použití kompozitů v automobilech je snížení hmotnosti až o 10 % (kompozity jsou až o 35 % lehčí než hliník a o 60 % lehčí než ocel). [27]



Obrázek 15 Rozdělení materiálu v automobilu [27]

### 2.2.1 Aston Martin

Aston Martin připojil k hlavní konstrukci jednodílnou bočnici z kompozitních materiálů se sloupky předního skla z uhlíkových vláken, aby vytvořil bezpečnou kabinu s vysokou pevností. V přední části kabiny se nachází pomocný rám z uhlíkových vláken, oceli a hliníku, v němž je umístěn motor, převodovka a přední zavěšení. Před motorem a předním zavěšením se nachází deformovatelná kompozitní konstrukce, která nese výraznou síťovanou mřížku sání vzduchu Aston Martin. Ta nejenže zvyšuje ochranu před nárazem, ale také v ní jsou umístěny chladiče a mezichladiče motoru, převodovky a klimatizace. [34]



Obrázek 16 Aston Martin V12 Vanquish [34]

Z kompozitního materiálu je dále podlaha, přihrádka a boční lišty zavazadlového prostoru, aby spolu s hliníkovými nosníky poskytovaly dodatečnou deformační ochranu při nárazu. [34]

### 2.2.2 Ford

Automobilka Ford spolupracuje s řetězcem McDonald's na testování udržitelné výroby automobilových komponentů. McDonald's bude Fordu dodávat slupky z kávových zrn, které se uvolňují při pražení. Tato surovina pak bude použita k výrobě nového kompozitního materiálu. Když se kávový odpad zahřeje na vysokou teplotu s nízkým obsahem kyslíku, lze jej smíchat s plastem a dalšími přísadami a přeměnit na pelety. Z těchto pelet lze lisovat díly vozidel, například kryty světlometů, které jsou až o 20 % lehčí. Navíc se při lisování spotřebuje o 25 % méně energie. Podle společnosti Ford jsou tepelné vlastnosti tohoto nového materiálu výrazně lepší než u některých materiálů používaných v současnosti. [36]



Obrázek 17 Ford testuje použití kávových zrn na výrobu světlometů [36]

Ford jako první nabídl sériově vyráběné disky z uhlíkových vláken (r. 2015) jako standartní výbavu modelu Shelby GT350R Mustang. Ford GT bude nabízet novou generaci z uhlíkových vláken s pokročilou technologií pryskyřice a vláken, která dává designérům větší volnost a zároveň vynikne struktura vlákna tohoto materiálu. Disky z uhlíkových vláken přinášejí oproti tradičním hliníkovým diskům řadu výhod, včetně úspory hmotnosti, lepší dynamiky vozidla a kvality jízdy. [20]

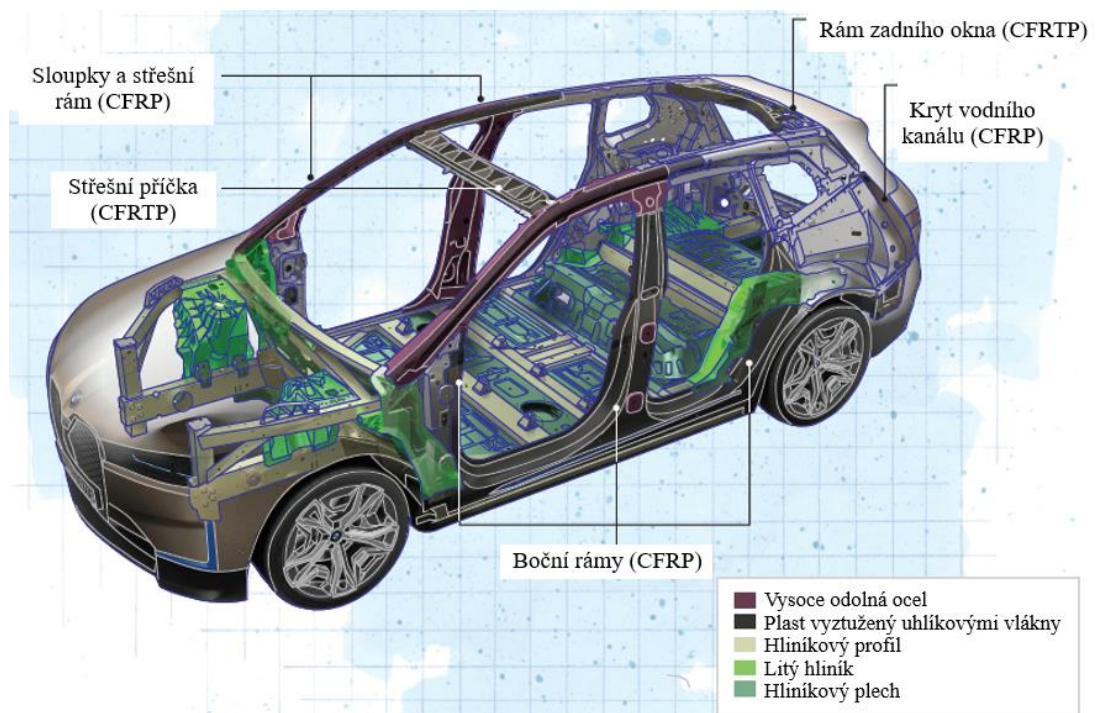




Obrázek 18 Ford Shelby GT350 Mustang [35]

### 2.2.3 BMW

BMW představilo vícemateriálovou uhlíkovou konstrukci s řadou vozidel iX. Toto vozidlo je dalším počinem BMW v oblasti kompozitního designu, který je zaměřen výhradně na elektromobily a vyznačuje se karoserií z více materiálů, kterou BMW nazývá "Carbon Cage". V modelu iX je zkombinováno uhlíkové jádro z řady 7 s plně uhlíkovou karoserií z předchozích vozů BMW i, i3 a i8. Částečně díky jeho lehké konstrukci má vozidlo BMW iX dojezd až 480 km na jedno nabití. [37]



Obrázek 19 Druhy materiálů v automobilu BMW iX [37]

### 2.2.4 McLaren

McLaren spolupracuje se společností Bcomp na vývoji prvního závodního sedadla ze lněných vláken ve Formuli 1. Len je surovinou neutrální z hlediska CO<sub>2</sub> a jeho vlákna jsou biologicky rozložitelná. Po skončení životnosti sedačky je lze rozemlít na nový podkladový materiál nebo tepelně recyklovat bez zbytkového odpadu. [38]

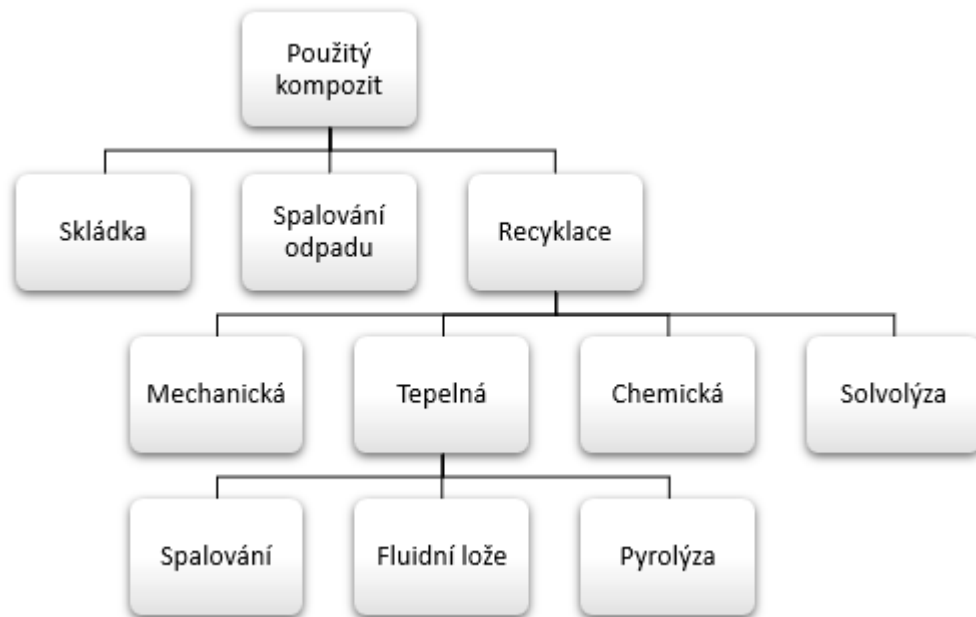


Obrázek 20 Uhlíkové (vlevo) a lněné (vpravo) závodní sedadlo F1 [38]

Trubicová struktura lněných vláken zajišťuje nízkou hustotu a vysokou tuhost, což poskytuje možnost snížit hmotnost, současně zlepšit tlumení vibrací a odolnost proti zlomení, zkroucení a stlačení. Toto řešení poskytuje rovnocenný výkon jako uhlíková vlákna. Snižuje náklady, vibrace a ekologickou stopu o 75 % a zvyšuje bezpečnost. Lněná vlákna jsou o 9 % lehčí než uhlíkový materiál a nabízejí výrazně lepší tlumení vibrací. Na rozdíl od uhlíkových vláken nejsou náchylná ke vzniku trhlin – tato vlastnost je posílena strukturou vláken powerRibs™. Pokud se zlomí, měkčí úlomky zůstanou připojeny k hlavní struktuře. [38]

## 2.3 Recyklace

Na automobilový průmysl je kvůli velkému množství produkce kladen velký důraz na recyklaci. Vzhledem ke zvýšenému důrazu na recyklaci a ekologii je však nyní nutné zkoumat potenciál kompozitních materiálů jako recyklovatelných a znovu použitelných. Pokud však recyklovatelnost kompozitních materiálů není dobře promyšlena, může být použití kompozitů pro všechny aplikace omezeno regulačními a ekologickými faktory. [7]

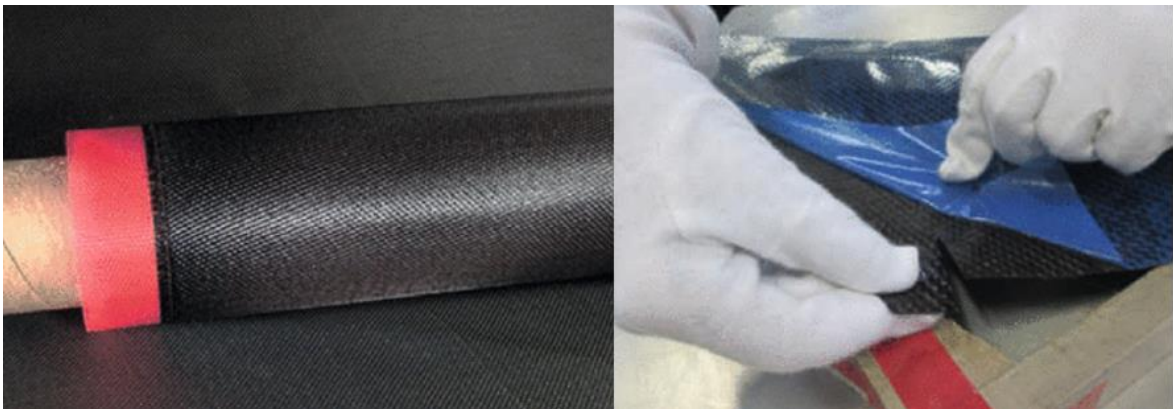


Obrázek 21 Zpracování uhlíkových a skleněných kompozitů na konci jejich životnosti [23]

Recyklace kompozitních materiálů, včetně těch, které se používají pro nárazníky a palubní desky, představuje vážný problém v průmyslu. Tyto materiály jsou známé tím, že jsou lehké a odolné, a proto se obtížně recyklují. Na univerzitě v Leedsu vyvinuli nový proces, který je schopen přeměnit kompozitní materiály na jejich původní recyklovatelné složky za pomoci pyrolýzy a separace. Kompozity se rozmělnují na plyn, olej, malé množství uhlíku a vláken. Recyklovaný olej a vlákna se znovu zpracují na kompozitní plasty. Pyrolýza zahrnuje zahřívání plasty za nepřítomnosti kyslíku při teplotách pod úrovní hoření, přičemž si vlákna zachovávají většinu své původní pevnosti. [15]

### 3 PREPREGY

Prepreg je polotovár, který se používá pro výrobu kompozitních dílů. Je to v podstatě předimpregnovaná tkanina nebo rohož s matricí v podobě pryskyřice. Pokud je prepreg (tzv. v B stavu) je pryskyřice již tuhá a lepkavá. Přesto je prepreg poddajný a lze jej tvarovat do požadovaných tvarových složitostí formy. Prepreg lze takto uchovávat pouze krátkou dobu, protože dochází k samovytvrzování pojiva. Doba použitelnosti prepregu závisí na teplotě jeho skladování. Prepreg je proto nejlépe uchovávat v mrazácích při teplotě  $-18^{\circ}\text{C}$ . Po vyskladnění se prepregy několik hodin ohřívají na teplotu okolí a následně jsou řezány na řezacím plotru na požadované velikosti. Na obou stranách prepregu jsou krycí fólie, které se těsně před použitím odtrhnou. [4]



Obrázek 22 Tkaninový prepreg [13]

Dnes jsou tyto materiály celosvětově rozšířené a používají se pro výrobu kompozitních dílů v automobilovém, leteckém, kosmickém průmyslu. Více než polovina celosvětové produkce uhlíkových vláken se používá k výrobě prepregů. Předimpregnované materiály si nárokuje prvenství mezi kompozitními materiály. Prepregy se používají pro velmi malé až středně velké výrobní série. Mezi hlavní výhody se řadí přesný poměr matrice a plniva a zlepšení pracovního postupu při tvarování výrobků. Mezi nevýhody řadíme především větší spotřebu energie kvůli technologickému procesu a skladování prepregů ve speciální mrazničce (maximální životnost prepregu při nízkých teplotách je 1 rok) [13,17]

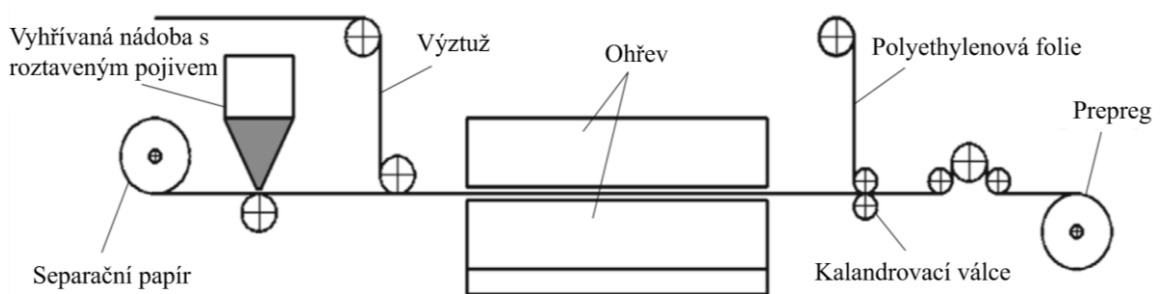
#### 3.1 Technologie výroby prepregů

Současné výrobní techniky a procesy zaručují stálou kvalitu prepregů z hlediska obsahu vlákna a pryskyřice na velmi vysoké úrovni. Jako matrice lze použít jak termoplastické, tak i termosetové materiály. Dále se budeme zabývat výrobou termosetových prepregů. [13]



### 3.1.1 Metoda tavení za tepla

První metoda tavení za tepla neboli „Hot melt processes“ vyžaduje výrobu vhodného povlaku z pryskyřice. K vytvoření povlaků se mísí základní materiály jako jsou epoxidové pryskyřice, houževnaté látky, vytvrzovací činidla a další složky. Protože jsou tyto pryskyřice extrémně viskózní a vytvrzují se při zvýšených teplotách velmi často je musíme homogenizovat pomocí extrudérů. Předmíchané pryskyřice se nanáší na nosný papír potažený silikonem pomocí vyhřívaných kalandrových válců. Materiál je následně navinut a ochlazen, aby se zpomalila jeho vytvrzovací reakce. [13]



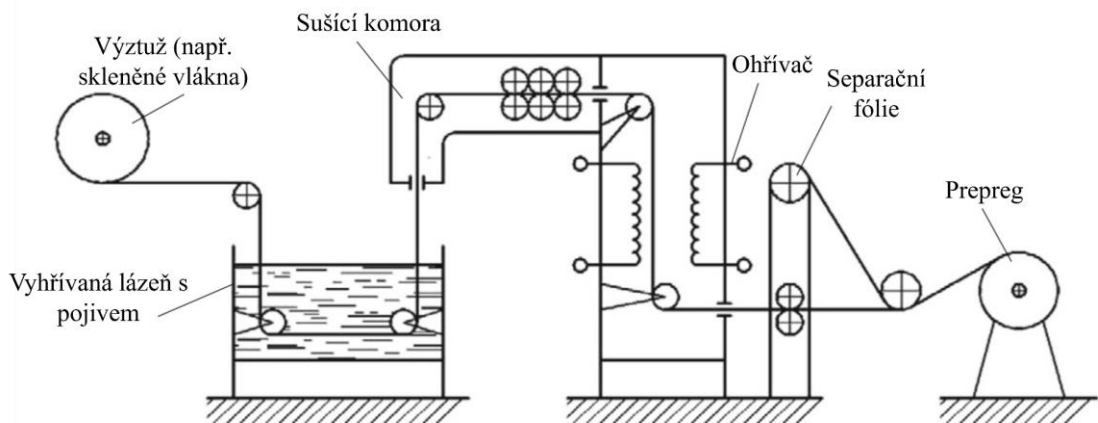
Obrázek 23 Metoda tavení za tepla [17]

Výhodou této technologie je nízký rozsah fyzikálních a mechanických vlastností. Nevýhodou této technologie je vysoký obsah matrice a zvýšení energetické náročnosti procesu tváření prepregů. Nevýhody lze minimalizovat díky regulaci reologických vlastností pojiva. [17]

### 3.1.2 Metoda rozpouštědlového máčení

Metoda rozpouštědlového máčení „Solvent Dip Process“ se používá k impregnaci textilií nebo jednotlivých vláken (předimpregnovaných vláken). V tomto případě je souprava s cívkami nahrazena odvíječem válců, který podává polotovar tkaniny do linky. Materiál poté prochází lázní s rozpuštěnou pryskyřicí. Viskozita roztoku pryskyřice je řízena teplotou lázně a obsahem rozpouštědla v lázni. Přebytek pryskyřice na povrchu se odstraní pomocí pilového kotouče a následně se sesbírá. Kalandrové válce se používají ke kontrole obsahu pryskyřice a tloušťky prepregu. Jakmile obsah těkavých látek dosáhne požadované úrovně, je prepreg chlazen pomocí chladících válců, aby se zastavil tok pryskyřice a vytvrzovací reakce. Dále materiál pokračuje přes optickou zkoušku, na možnou přítomnost vad a poté se stanoví jeho plošná hmotnost. Na impregnovaný materiál se nanese fólie nebo nosný papír potažený silikonem, aby byl materiál chráněn před přilepením, poškozením nebo

kontaminací. Na rozdíl od metody tavení za tepla se prepregy potažené roztokem nezkracují, jejich šířka se určuje na základě šířky tkaniny. [13]



Obrázek 24 Metoda rozpouštědlového máčení [17]

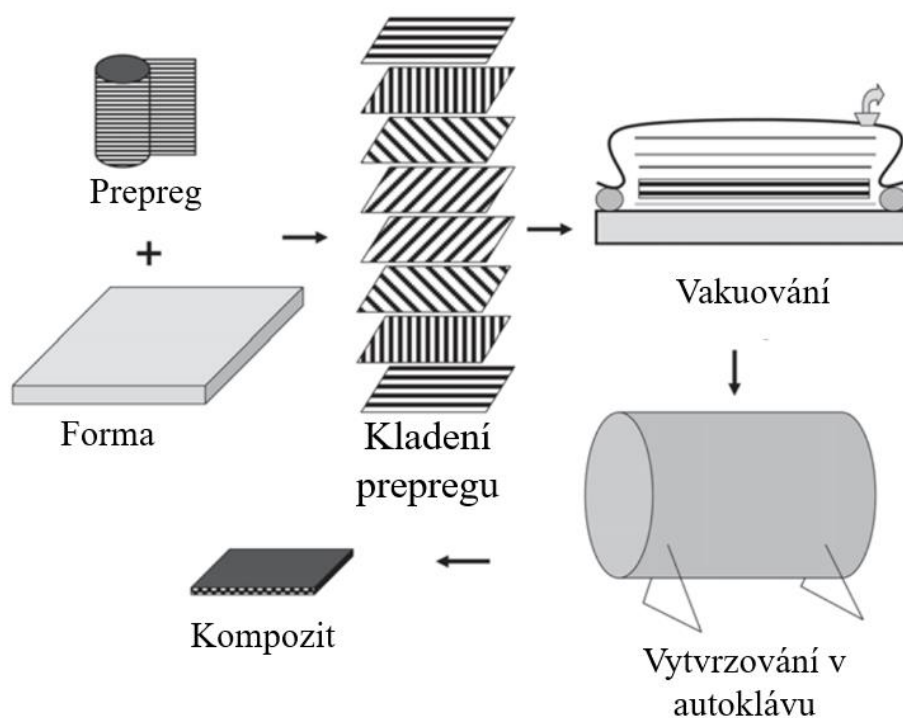
Hlavními výhodami této technologie je možnost zajištění přesné hodnoty pojiva a jednoduchost procesu. Nevýhodou je relativně vysoká pórovitost způsobená vysokým obsahem rozpouštědla v prepregu, která se během vytvrzování odpařuje za vzniku pórů. Použití rozpouštědel navíc vyžaduje zvláštní bezpečnostní opatření. Nevýhody této metody lze v některých případech snížit použitím aktivních rozpouštědel a optimalizací sušení prepregů. [17]

### 3.2 Recyklace

Prepregy nejsou ve vytvrzeném stavu ani znovu tvarovatelné ani tavitelné, proto musí být před dalším využitím rozdraceny. Po hrubém rozdracení jsou následně rozemlety v drtiči. Výsledná drť obsahuje několik centimetrů dlouhé svazky skleněných vláken propojených se zbytky matrice. Tento prepregový materiál můžeme dále využít nejen jako plnivo, ale i jako vyztužující surovinu. Tento způsob nazýváme částečnou recyklací. Při výrobě prepregu můžeme použít až 20 % tohoto recyklátu, aniž by došlo k výraznému zhoršení jeho mechanických vlastností. [6]

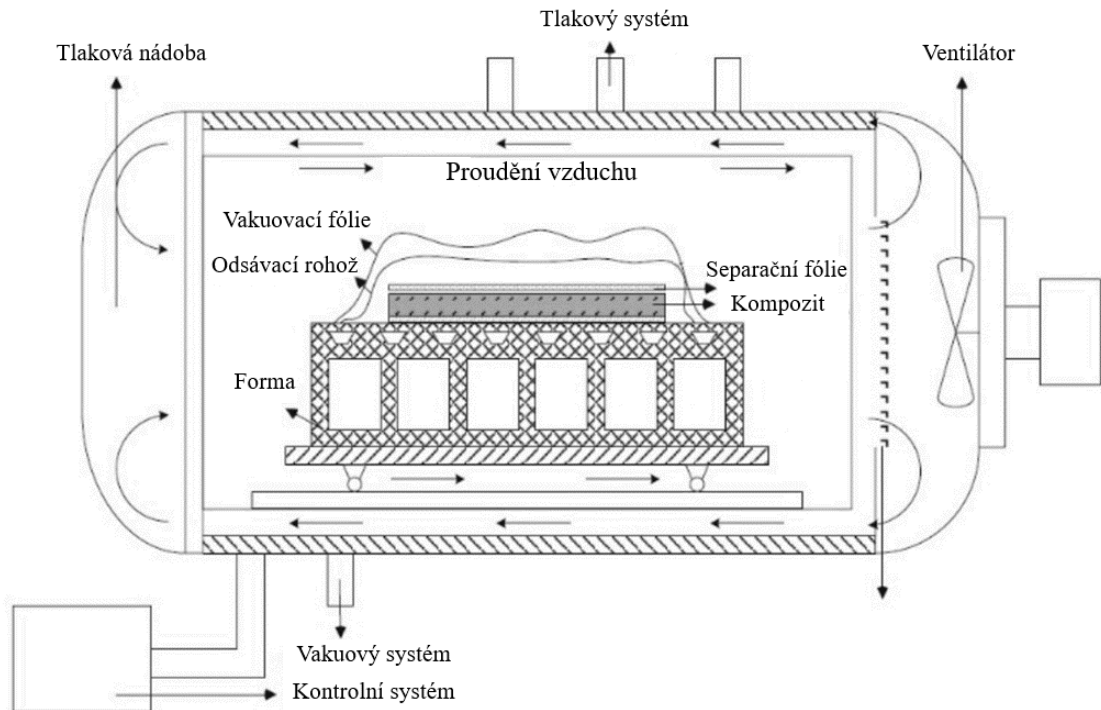
## 4 VYTVRZOVÁNÍ V AUTOKLÁVU

Vytvrzování v autoklávu je nejběžnější metodou vytvrzování prepregů. Touto metodou lze vyrábět vysoce kvalitní výlisky bez dutin díky řízenému působení teploty, vakua a tlaku. Vytvrzovací tlaky se pohybují v rozmezí mezi 3-7 bar. Vytvrzovací cykly trvají obvykle i několik hodin. V automobilovém průmyslu je tato metoda ekonomicky neúnosná a omezuje se na aplikace pro výkonná nebo závodní vozidla (monokoková karoserie Formule 1). Avšak běžně se používá pro výrobu kompozitních materiálů pro letecký a kosmický průmysl. [3,28]



Obrázek 25 Postup výrobního procesu vytvrzování v autoklávu [28]

Autokláv je vyhřívaná tlaková nádoba vybavená elektrickým a digitálním řídicím systémem, generátorem horkého plynu a vakuovým systémem. (Obr. 29). Tlak uvnitř autoklávu je tvořen inertním plynem (např.  $N_2$  nebo  $CO_2$ ). Lze použít i vzduch, avšak při vysokých teplotách vytvrzování se zvyšuje nebezpečí požáru. [3,13]



Obrázek 26 Autoklávové vytvrzování [29]

## Výhody:

- Nejlepší mechanické vlastnosti kompozitu oproti jiným metodám.
- Schopnost zpracovávat širokou škálu materiálů (jakýkoliv polymerní materiál, pokud jeho vytvrzovací cyklus nepřesahuje teplotu a tlak autoklávu).
- Flexibilní způsob působení tlaku na díl (tlak na díl je zesilován současným podtlakem).
- Zpracovatelnost tvarových dílů.

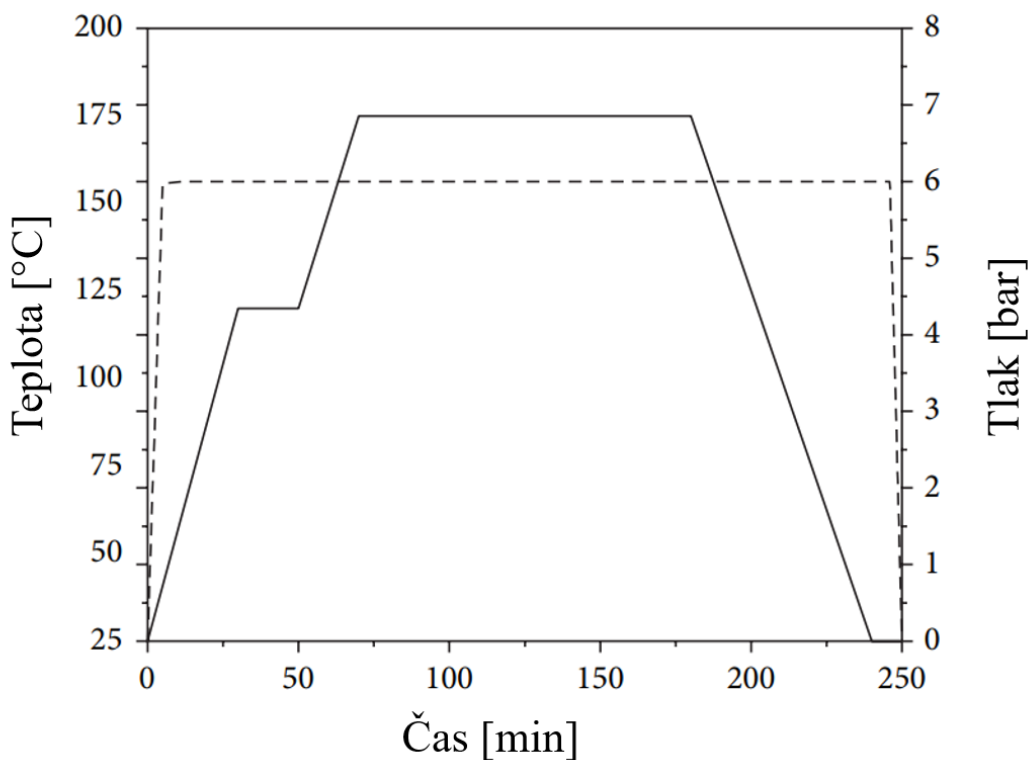
## Nevýhody:

- Pomalá teplotní a tlaková odezva.
- Velké rozměry autoklávu (velikost autoklávu omezuje velikost kompozitu).
- Pořizovací cena (malý laboratorní autokláv stojí 4,5 mil. Kč).
- Vysoká manuální náročnost a náklady na provoz. [13,28]



#### 4.1 Vytvrzovací cyklus

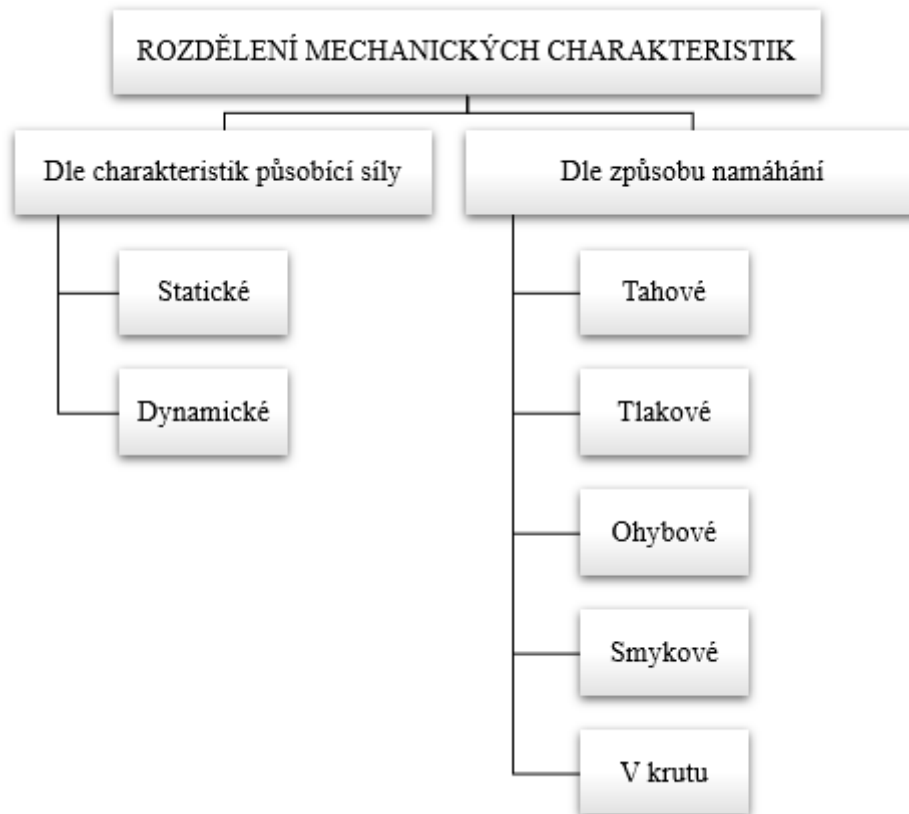
Obvyklý postup zpracování pro vytvrzování termosetových prepregů v autoklávech spočívá v tom, že se nejprve zvýší tlak a hned poté se autokláv zahřeje zvolenou rychlostí ohřevu na požadovanou teplotu. Podle chování většiny kapalin se viskozita matrice při tomto zvýšení teploty sníží. V důsledku toho začne pryskyřice volně téct při zvýšené teplotě což usnadní proces zpevnění, až nakonec začne docházet k chemickému zesíťování a tvorbě gelu. V tomto okamžiku se pryskyřice brzy změní z kapaliny na pevnou látku a začne bránit viskóznímu toku. První prodleva se provádí za účelem prodloužení časového rozmezí pro zpevnění a případně pro předreakci matrice, aby se snížilo riziko velkých exotermů. Druhá doba prodlevy je skutečným krokem vytvrzování. Většina prepregových materiálů na bázi epoxidu vyžaduje vytvrzovací teploty 121 °C nebo 178 °C. Aplikace tlaku napomáhá zpevňovat a pomáhá vytěsnit dutiny v laminátech. Nicméně vysoké tlaky mohou nakonec vytlačit příliš mnoho pryskyřice z vrstvy vláken, což opět vede k tvorbě dutin, tentokrát v důsledku nedostatku pryskyřice. [39]



Obrázek 27 Autoklávový vytvrzovací cyklus [39]

## 5 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

Mechanické charakteristiky můžeme rozdělit na statické a dynamické. Při statickém zatížení na těleso působí klidná síla, u dynamického působí síla, která je proměnlivá s časem. Při těchto zkouškách dochází k deformaci zkušebních těles. [40]



Obrázek 28 Rozdělení mechanických charakteristik [40]

Mechanické vlastnosti materiálů jsou 4: pevnost, pružnost, plasticita a houževnatost, ale mechanických charakteristik, které poskytují důležité informace pro jejich použití je mnohem více. Oproti nevyztuženým plastům nejsou vlastnosti kompozitních materiálů tolik závislé na teplotě, době zatížení a podmínkách prostředí. Vliv na jejich chování při mechanickém namáhání má vytvrzení matrice, rozložení matrice nebo vláken a orientace vláken. [6,40]

## 5.1 Zkouška ohybem

Zkouška ohybem, patří mezi statické zkoušky. Zkušební tělíska u ohybových zkoušek jsou ve tvaru hranolu a jsou umístěna na dvou podpěrách. Ohybová zkouška může probíhat při tříbodovém nebo čtyřbodovém ohybu. Tříbodový ohyb je to tehdy, pokud síla působí uprostřed mezi podpěrami. Při této zkoušce je ve zkušebním tělese napjatost s maximálním zatížením a definovaným místem lomu ve středu délky tělíska. Maximální smykové napětí se nachází mezi vrstvami uprostřed tloušťky tělíska. [6,40]



Obrázek 29 Zkouška ohybem [40]

Napětí v ohybu:

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2} \text{ [kJ} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (1)$$

Deformace ohybem:

$$\varepsilon_f = \frac{6sh}{L^2} \text{ [-nebo \%]} \quad (2)$$

Pro určení modulu pružnosti v ohybu  $E_f$  se nejprve vypočítají průhyby  $s_1$  a  $s_2$  podle rovnice:

$$s_i = \frac{\varepsilon_{fi} L^2}{6h} \text{ [mm]} \quad (3)$$

Výpočet modulu pružnosti:

$$E_f = \frac{\sigma_{f2} - \sigma_{f1}}{\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}} \text{ [MPa]} \quad (4)$$

## 5.2 Zkouška rázem dle Charpyho

Zkouška rázem podle Charpyho patří mezi dynamické zkoušky. Rázová houževnatost je definována jako kinetická energie potřebná k přetažení zkušebního tělíska vztažená na jeho původní průřez, tloušťku a šířku. [40]

$$a_{cU} = \frac{W}{h \cdot b} \cdot 10^3 \text{ [kJ} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (5)$$

Zkušební tělísko ve tvaru hranolu je umístěno vodorovně na podpěrách a přeráženo úderem kladiva, přičemž směr rázu je veden středem vzdálenosti mezi podpěrami na užší nebo na širší stranu. Zkušební tělísko je namáháno Charpyho kladivem konstantní rychlostí (2,9 m/s). [40]



Obrázek 30 Zkouška rázem dle Charpyho [40]

Během zkoušky se zaznamenává energie spotřebovaná k přeražení zkušebního tělíska. Přeražení dělíme na 3 typy: N (nepřeraženo), P (částečně přeraženo) a C (úplné přeražení, ale i neúplné přeražení, kdy obě části zkušebního tělíska drží pohromadě pouze tenkou obvodovou vrstvou). [40]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 6 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem bakalářské práce je navrhnout materiálové složení kompozitní skladby včetně orientace v jednotlivých vrstvách a výroba prototypového dílu blatníku.

V rámci mechanického testování byly vyrobeny zkušební desky z uhlíkového prepregu s epoxidovou matricí GG-204 T s třemi různými orientacemi vrstev pomocí technologie autoklávového lisování. Zkušební tělíska byla podrobena mechanickým zkouškám: zkouška ohybem ČSN EN ISO 178 a rázová houževnatost metoda Charpy ČSN EN ISO 179.

Pro prototypovou výrobu kompozitního blatníku byl navržen vytvrzovací přípravek z duralu EN AW-2017, dále byl navržen rámcový technologický postup včetně jeho ověření technologií autoklávového lisování.

Cíle bakalářské práce můžeme formulovat:

- Výběr prepregu vhodného pro zpracování v autoklávu.
- Výroba zkušebních desek při různém typu skládání prepregů.
- Nařezání jednotlivých zkušebních tělísek pomocí vodního paprsku pro experimentální testování dle zvolených norem.
- Experimentální provedení zkoušek dle zvolených norem.
- Návrh rámcového technologického postupu výroby pro výrobu prototypu.
- Samostatná výroba prototypu pomocí autoklávového lisování dle zvolených technologických podmínek.
- Vyhodnocení dosažených výsledků a diskuze.
- Závěr bakalářské práce.

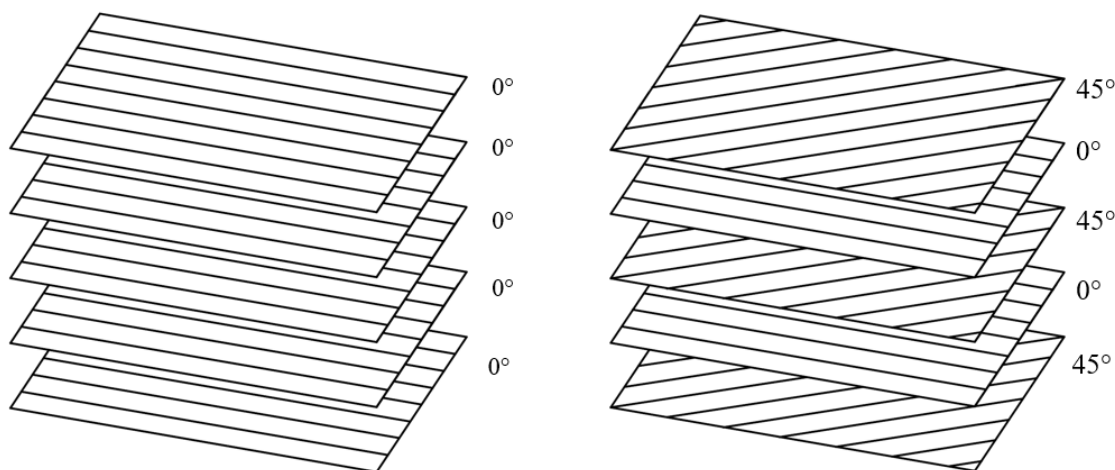
## 7 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH DESEK

Před začátkem výroby bylo potřeba si zvolit prepreg vhodný pro vytvrzování v autoklávu. Pro výrobu kompozitních desek byl použit uhlíkový prepreg s epoxidovou matricí GG-204 T (Tab. 2)

Tabulka 2 Vlastnosti matrice v prepregu GG-204 T

Vlastnosti	Velikost	Jednotky
Hustota	1,15 ÷ 1,25	g/cm <sup>3</sup>
Doba želatinizace při 125 °C	6 ÷ 9	min
Doba želatinizace při 110 °C	20 ÷ 26	min
Lepivost	Střední/ Vysoká	-
Množství pórů	<1	%
T <sub>g</sub> vytvrzené pryskyřice podle DMA	120	°C
Doba skladování při 23 °C	5	týdnů
Doba skladování při -18 °C	1	rok

Dále bylo potřeba vyrobit 4 desky ve 2 velikostech. Jejich velikost byla dána počtem zkušebních tělísek. Na tříbodový ohyb (deska A) o rozměrech 400 x 333 mm a na rázovou zkoušku (deska B) o rozměrech 240 x 170 mm. Skládání prepregů bylo dále rozděleno do 2 variant. V první variantě se u obou desek pokládaly prepregy ve stejném směru na sebe pod úhlem 0°. U druhé varianty se vrstvy prepregů střídaly pod úhlem 45° a 0° (Obr. 31).



Obrázek 31 Schéma vrstvení prepregů varianta 1 (vlevo) a varianta 2 (vpravo)

## 7.1 Příprava a separace formy

Prvním krokem bylo očistit formu od staré matrice pomocí škrabky. Poté se pomocí papírového ubrousku nanesl plnič pórů „Zywax Sealer GP™“ na skleněnou formu, kde byl následně rozleštěn. Tento postup se opakoval 4x po 15 minutách, jak uvádí výrobce ve svém technickém listu. Po posledním rozleštění bylo potřeba nechat formu zaschnout 30 minut a následně na ní byly nanесeny taktéž papírovým ubrouskem 4 vrstvy vysokoteplotního separátoru „Chemlease 2191W“ po 10 minutách.



Obrázek 32 Separátor Chemlease 2191W (vlevo), plnič pórů Zywax Sealer GP™

## 7.2 Stříhání a kladení prepregů do formy

Nejprve bylo potřeba naměřit a nastříhat prepreg GG-204 T (Obr. 33)



Obrázek 33 Příprava prepregu



Z takto připraveného prepregu se musela odtrhnout vrchní a spodní ochranná fólie, až potom se prepreg mohl položit na naseparovanou formu a pomocí válečku (Obr. 34) byly odstraněny vzduchové bubliny.



Obrázek 34 Váleček (vlevo) a prepreg (vpravo)

**Pro ohybovou zkoušku:**

$$n = \frac{T}{m_s} = \frac{2}{0,214} = 9,4 \rightarrow \text{zvoleno 9 vrstev} \quad (6)$$

**Pro rázovou zkoušku:**

$$n = \frac{T}{m_s} = \frac{4}{0,214} = 18,7 \rightarrow \text{zvoleno 19 vrstev} \quad (7)$$

U desky A se prepregy pokládaly ve směru vláken tak, aby tloušťka byla cca 2 mm tzn. 9 vrstev (rovnice 6) a u desky B tak, aby byla tloušťka cca 4 mm tzn. 19 vrstev (rovnice 7). Aby byly desky po vytvrzování v autoklávu lehce odseparovatelné i z „nepohledové strany“ bylo nutné použít (modrou) separační fólii. Na ni se kvůli absorpci přebytečné matrice umístila (bílá) odsávací rohož (Obr. 35).



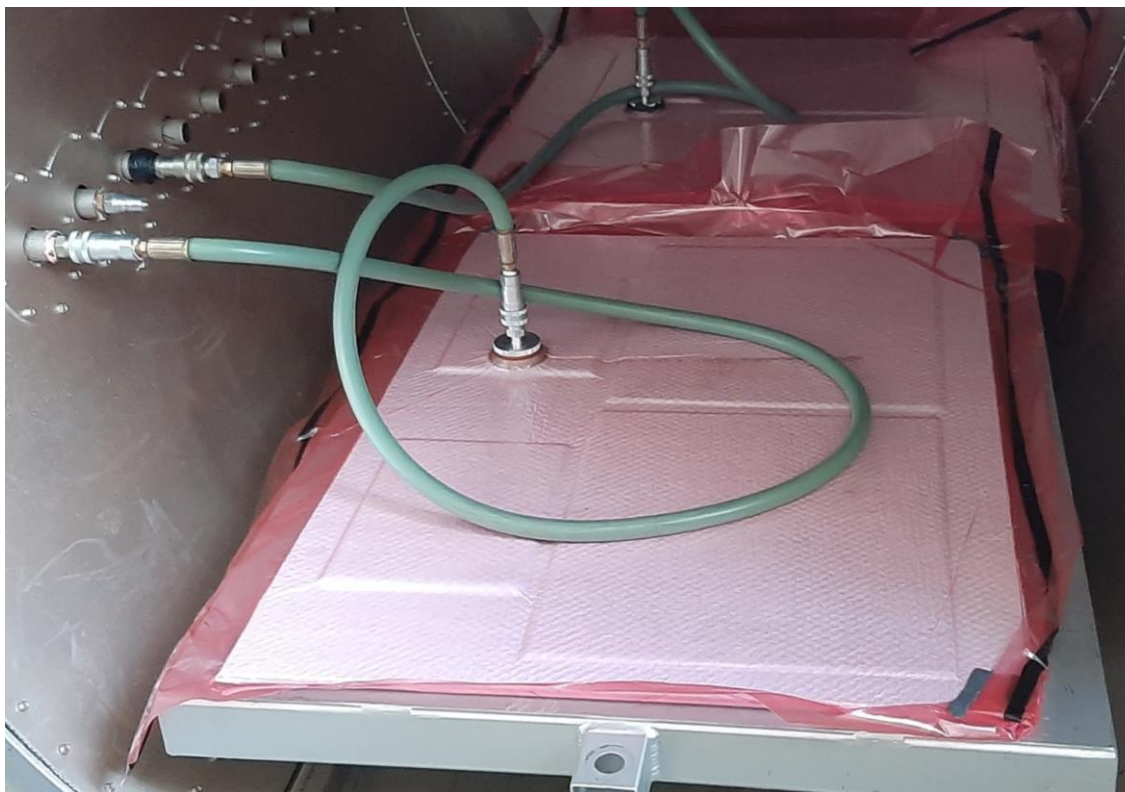
Obrázek 35 Navrstvený prepreg a separační fólie

### 7.3 Vakuování formy

Aby byl výrobek správně zavakuován bylo nezbytné na odsávací rohož položit (červenou) vakuovací fólii, tak aby přesahovala přes výrobek a bylo ji možné dostatečně pokrčít a utěsnit pomocí těsnicí pásky a tím zajistit podtlak. Přes vakuovací fólii byl připevněn ventil a pomocí těsnicí pásky se utěsnily mezery.

### 7.4 Autoklávové lisování

Před vložením formy do autoklávu bylo nutné otevřít ventil pro přívod vody a vzduchu. Až poté bylo možné autokláv otevřít, vložit do něj formu a propojit ventil s jeho vakuovacím systémem. Po uzavření dveří došlo k nastavení programu a jeho spuštění. Program trval cca 2,5 hodiny. Po konci vytvrzování bylo možné autokláv otevřít a formu opatrně vyjmout. Poslední fází tohoto kroku bylo samotné odstranění vakuovací fólie, odsávací fólie a separační tkaniny a vyjmutí vytvrzeného výrobku.

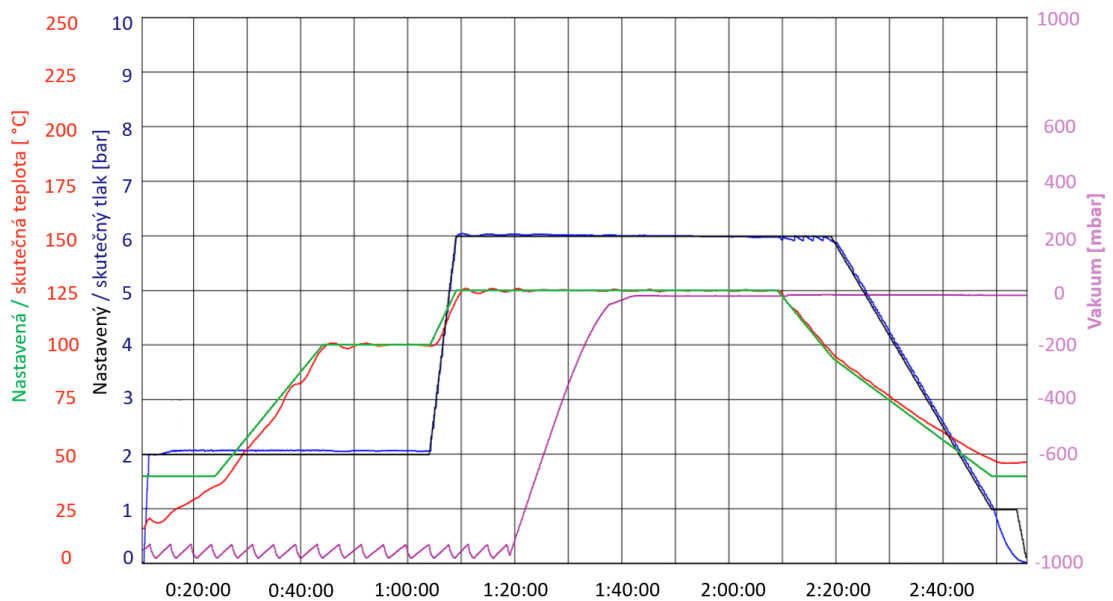


Obrázek 36 Zavakuovaný výrobek

Byl použit autokláv OP Panini S.r.l., model G00300572.



Obrázek 37 Autokláv OP Panini S.r.l

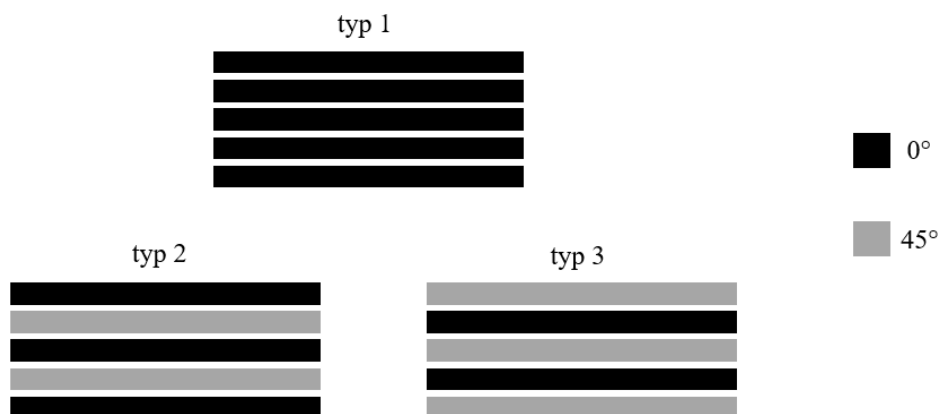


Obrázek 38 Vytvrzovací cyklus autoklávové lisování

Na Obr. 38 je vyobrazen vytvrzovací cyklus, který s menšími odchylkami odpovídal nastaveným hodnotám od výrobce. Na levé straně jsou vidět hodnoty pro nastavenou a skutečnou teplotu (ve °C) a pro nastavený a skutečný tlak v barech. Na pravé straně se nachází hodnoty vakua (v mbar). Na dolní vodorovné ose je znázorněn čas (v min), který odpovídá 165 minutám, jak uváděl výrobce.

## 7.5 Mechanické zkoušky

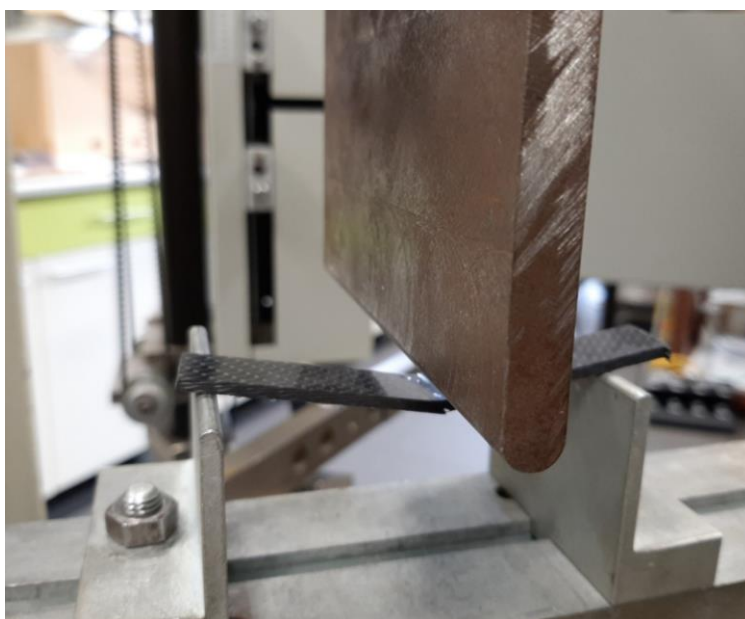
U zkušebních tělísek byly prováděny zkoušky ohybem (ČSN EN ISO 178) a na rázovou houževnatost metodou Charpy (ČSN EN ISO 179-1) ke zjištění mechanických vlastností. Zkoušky byly provedeny v laboratoři Fakulty technologické Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně. Ze všech vytvrzených desek byly vodním paprskem vyřezány tři typy zkušebních tělísek.



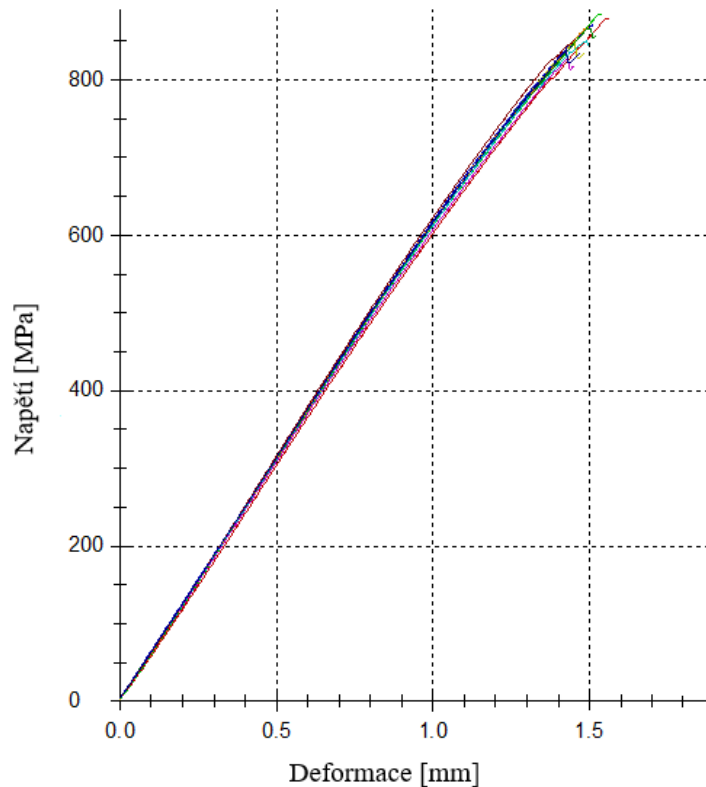
Obrázek 39 Typy zkušebních tělísek

### 7.5.1 Zkouška ohybem ČSN EN ISO 178

Zkouška byla provedena na stroji Zwick 1456, který je určen pro zkoušky tahem, tlakem a ohybem. Tělíška u zkoušky ohybem měla rozměr 100x15x2 mm a podpěry od sebe byly vzdáleny 80 mm jak uvádí norma.



Obrázek 40 Zkouška ohybem



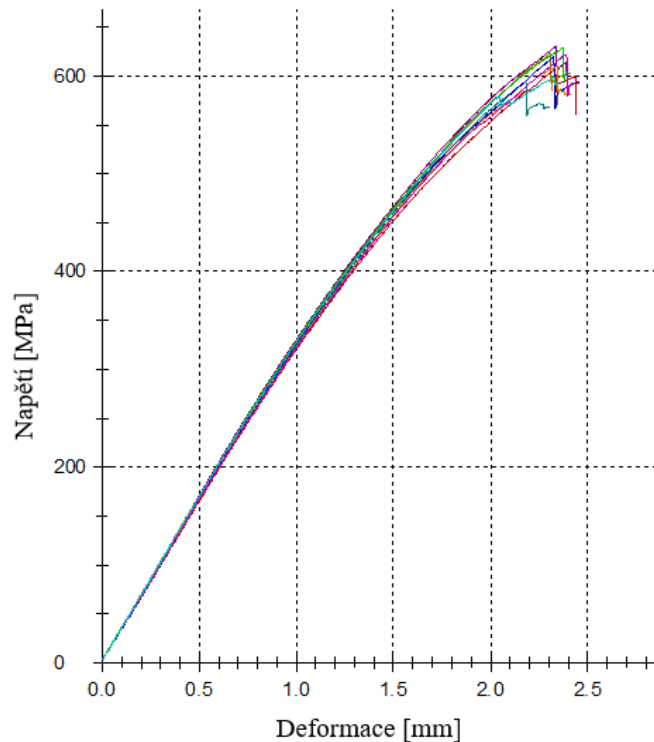
Obrázek 41 Závislost ohybového napětí na deformaci pro zkušební tělíska typ 1

Na Obr. 41 a v Tab. 3 je vidět průběh měření u zkušebních tělísek typu 1. Aritmetický průměr se směrodatnou odchylkou z deseti měření je u pružnosti v ohybu  $E_f = 61457 \pm 642$  MPa, pro pevnost v ohybu  $\sigma_f = 859 \pm 18$  MPa, pro vykonanou práci  $W_f = 2361,5 \pm 125,7$  Nmm, pro deformaci ohybem  $\epsilon_f = 1,48 \pm 0,04$  % a pro průhyb  $s = 8,0 \pm 0,2$  mm.

Tabulka 3 Naměřené a vypočítané hodnoty z ohybové zkoušky pro zkušební tělíska typ 1

n	$E_f$ [MPa]	$\sigma_f$ [MPa]	$W_f$ [Nmm]	$\epsilon_f$ [%]	s [mm]
1	60004	880	2525,9	1,56	8,3
2	61656	886	2523,6	1,54	8,2
3	61821	871	2452,4	1,50	8,1
4	61583	869	2409,3	1,50	8
5	60779	828	2170,8	1,43	7,7
6	61472	851	2370,6	1,48	8
7	61688	851	2268,3	1,44	7,9
8	62370	854	2306,4	1,46	7,8
9	61494	867	2396,0	1,50	8,1
10	61707	838	2191,3	1,43	7,8
$\bar{x}$	61457	859	2361,5	1,48	8
$s_{\bar{x}}$	642	18	125,7	0,04	0,2
$v_{\bar{x}}$ [%]	1,04	2,13	5,3	3,01	2,4



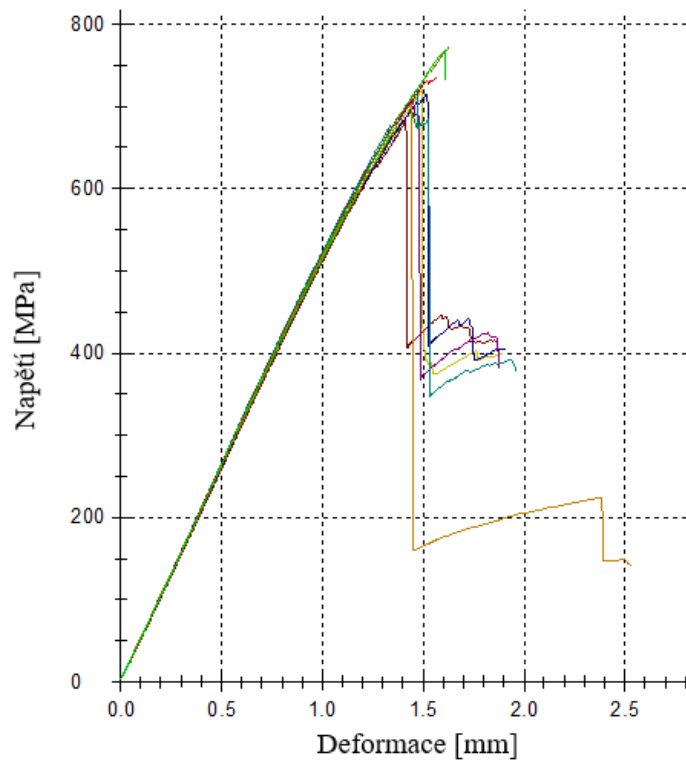


Obrázek 42 Závislost ohybového napětí na deformaci pro zkušební tělíska typ 2

Na Obr. 42 a v Tab. 4 je vidět průběh měření u zkušebních tělísek typ 2. Aritmetický průměr se směrodatnou odchylkou z deseti měření je u pružnosti v ohybu  $E_f = 33005 \pm 485$  MPa, pro pevnost v ohybu  $\sigma_f = 616 \pm 13$  MPa, pro vykonanou práci  $W_f = 2864,54 \pm 123,01$  Nmm, pro deformaci ohybem  $\varepsilon_f = 2,32 \pm 0,06$  % a pro průhyb  $s = 12,8 \pm 0,3$  mm.

Tabulka 4 Naměřené a vypočítané hodnoty z ohybové zkoušky pro zkušební tělíska typ 2

n	$E_f$ [MPa]	$\sigma_f$ [MPa]	$W_f$ [Nmm]	$\varepsilon_f$ [%]	s [mm]
1	33525	622	2856,59	2,31	12,9
2	33420	630	2940,51	2,34	13,1
3	32931	594	2555,18	2,18	12,3
4	33368	623	2858,69	2,31	12,5
5	32140	606	2827,88	2,33	13,0
6	33367	629	3000,49	2,36	12,8
7	32503	620	2868,68	2,33	12,8
8	32678	610	2878,58	2,34	12,9
9	32682	622	2984,91	2,40	12,9
10	33440	599	2873,95	2,33	12,5
$\bar{x}$	33005	616	2864,54	2,32	12,8
$s_{\bar{x}}$	485	13	123,01	0,06	0,3
$v_{\bar{x}}$ [%]	1,47	2,04	4,29	2,52	2,02



Obrázek 43 Závislost ohybového napětí na deformaci pro zkušební tělíska typ 3

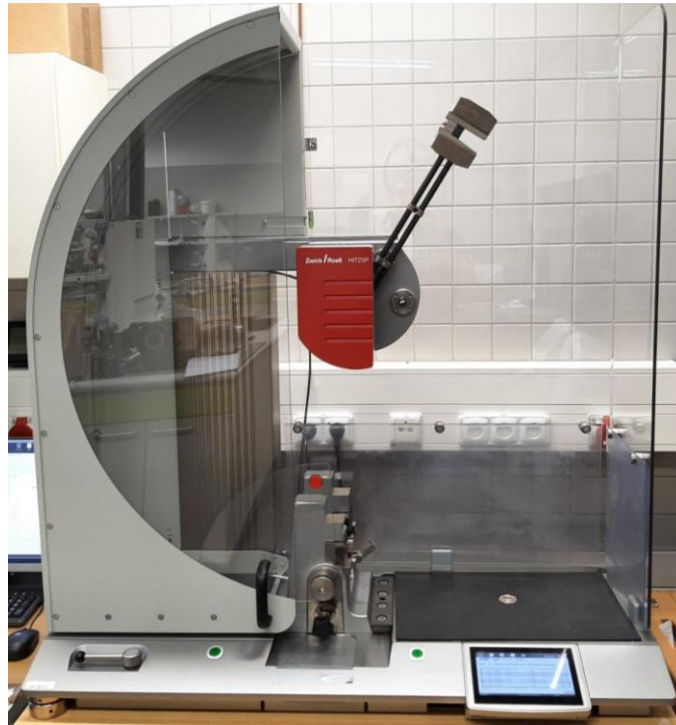
Na Obr. 43 a v Tab. 5 je vidět průběh měření u zkušebních tělísek typ 3. Aritmetický průměr se směrodatnou odchylkou z osmi měření u pružnosti v ohybu vycházel  $E_f = 51817 \pm 485$  MPa, pro pevnost v ohybu  $\sigma_f = 723 \pm 30$  MPa, pro vykonanou práci  $W_f = 2038,3 \pm 200,8$  Nmm, pro deformaci ohybem  $\varepsilon_f = 1,50 \pm 0,08$  % a pro průhyb  $s = 9,8 \pm 1,6$  mm.

Tabulka 5 Naměřené a vypočítané hodnoty z ohybové zkoušky pro zkušební tělíska typ 3

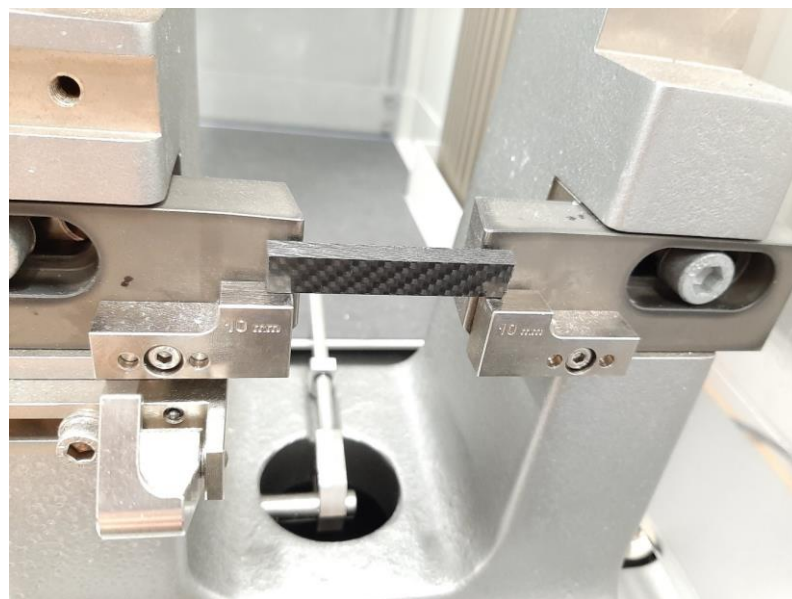
n	$E_f$ [MPa]	$\sigma_f$ [MPa]	$W_f$ [Nmm]	$\varepsilon_f$ [%]	s [mm]
1	51475	720	1992,5	1,50	10,1
2	51233	682	1783,0	1,41	9,9
3	51142	695	1870,7	1,44	8,2
4	51610	715	2065,5	1,52	10,2
5	51486	706	1878,1	1,44	13,5
6	52294	709	1915,6	1,44	10,0
7	52485	722	1973,3	1,46	10,4
8	52215	772	2374,6	1,63	8,7
9	52247	735	2211,0	1,58	8,4
10	51983	769	2319,2	1,61	8,6
$\bar{x}$	51817	723	2038,3	1,50	9,8
$s_{\bar{x}}$	485	30	200,8	0,08	1,6
$v_{\bar{x}}$ [%]	0,93	4,03	9,85	5,22	15,85

### 7.5.2 Zkouška rázové houževnatosti metodou Charpy (ČSN EN ISO 179-1)

Zkouška byla prováděna na přístroji Zwick HIT25P. Z vytvrzených zkušebních desek byla nařezány tělíska s rozměrem 55x10x4 mm. U zkušebních tělísek nebylo potřeba dělat vrub z důvodu křehkosti uhlíkových vláken. Tělíska byla vložena pohledovou stranou směrem ke kladivu na podpěry, které byly od sebe vzdáleny 40 mm.



Obrázek 44 Přístroj Zwick HIT25P



Obrázek 45 Zkouška rázové houževnatosti



Tabulka 6 Naměřené hodnoty ze zkoušky rázové houževnatosti pro zkušební tělíska typ 1

n	W [J]	$a_{cU}$ [ $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ]
1	2,91	55,43
2	2,77	56,05
3	2,40	45,79
4	2,79	53,17
5	2,75	52,33
6	2,69	51,23
7	2,65	50,56
8	2,97	56,56
9	2,70	51,39
10	2,79	53,07
$\bar{x}$	2,74	52,56
$s_{\bar{x}}$	0,15	3,16
$v_{\bar{x}}$ [%]	5,59	6,02

V Tab. 6 můžeme vidět, naměřené hodnoty při rázové zkoušce. Aritmetický průměr a směrodatná odchylka pro deset zkušebních tělísek činí u práce  $W = 2,74 \pm 0,15$  J a u rázové houževnatosti  $a_{cU} = 52,56 \pm 3,16$   $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$ .

Tabulka 7 Naměřené hodnoty ze zkoušky rázové houževnatosti pro zkušební tělíska typ 2

n	W [J]	$a_{cU}$ [ $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ]
1	4,1	78,09
2	3,8	72,4
3	4,04	77,01
4	3,89	74,19
5	4,71	89,73
6	4,27	81,36
7	3,87	73,68
8	4,08	77,7
9	3,75	71,48
10	3,95	75,25
$\bar{x}$	4,05	77,09
$s_{\bar{x}}$	0,28	5,34
$v_{\bar{x}}$ [%]	6,92	6,92

V Tab. 7 můžeme vidět, naměřené hodnoty při rázové zkoušce. Aritmetický průměr a směrodatná odchylka u 10 zkušebních tělísek činí u práce  $W = 4,05 \pm 0,28$  J a u rázové houževnatosti  $a_{cU} = 77,09 \pm 5,34$   $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$ .

Tabulka 8 Naměřené hodnoty ze zkoušky rázové houževnatosti pro zkušební tělíska typ 3

n	W [J]	$a_{cU}$ [ $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ]
1	4,47	85,17
2	4,01	76,34
3	4,01	76,34
4	4,25	80,96
5	4,4	83,85
6	4,43	84,39
7	4,28	81,43
8	4,32	82,38
$\bar{x}$	4,27	81,36
$s_{\bar{x}}$	0,18	3,41
$v_{\bar{x}}$ [%]	4,2	4,2

V Tab. 8 můžeme vidět, naměřené hodnoty při rázové zkoušce. Aritmetický průměr a směrodatná odchylka u osmi zkušebních tělísek činí u práce  $W = 4,27 \pm 0,18$  J a u rázové houževnatosti  $a_{cU} = 81,36 \pm 3,41$   $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$ .

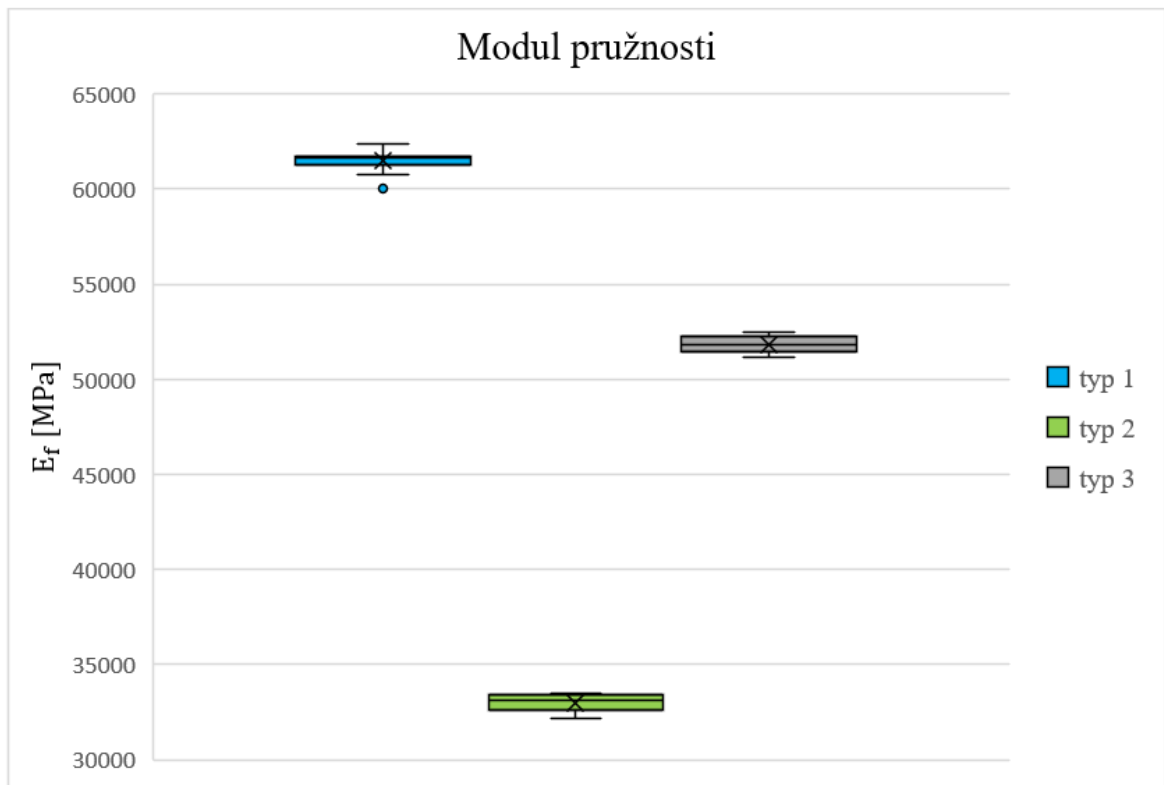


Obrázek 46 Typy porušení zkušebních tělísek u zkoušky rázové houževnatosti metodou Charpy

## 8 DISKUZE VÝSLEDKŮ

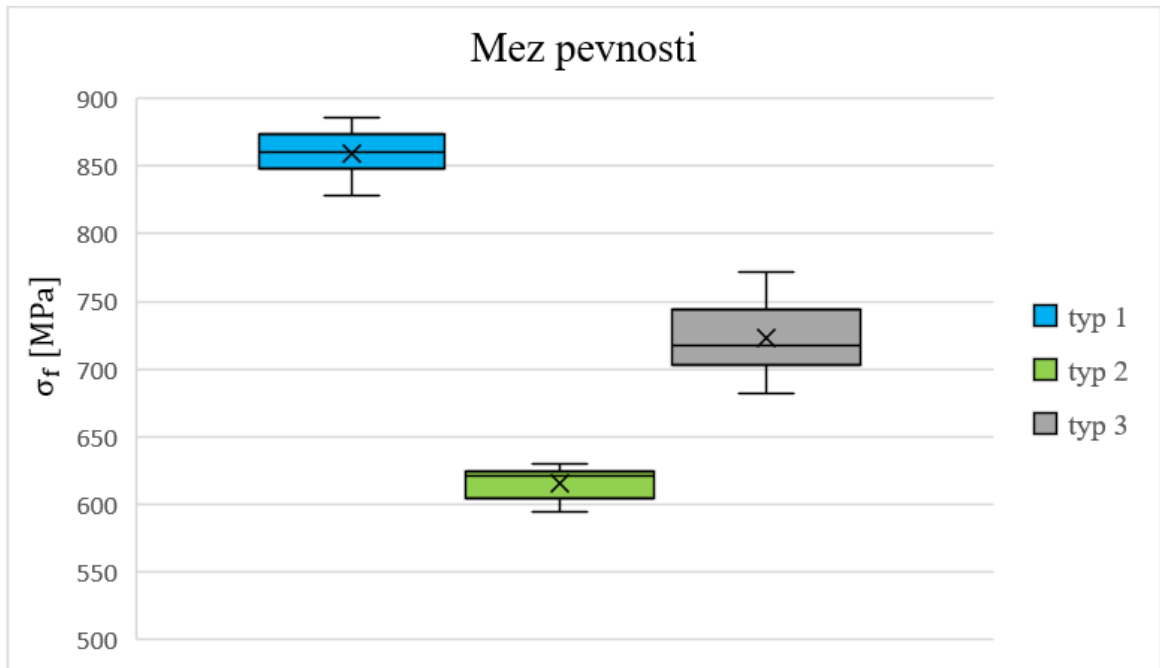
Porovnávání naměřených hodnot a jejich vyhodnocení. Na obrázcích jsou vidět naměřené hodnoty, které jsou znázorněny formou krabicových grafů. V grafech je označováno minimum a maximum pomocí vodorovných okrajových čar, uvnitř obdélníku je čarou znázorněn medián a křížkem aritmetický průměr.

### 8.1 Vyhodnocení zkušebních tělísek u ohybové zkoušky



Obrázek 47 Vyhodnocení modulu pružnosti při zkoušce tříbodovým ohybem

Na Obr. 47 je znázorněno porovnání modulu pružnosti mezi třemi typy tělísek. Nejvyšších hodnot modulu pružnosti dosahovala tělíska typ 1 (prepregy skládané pod stejným úhlem 0 °C) v porovnání s ostatními typy tělísek. Jeho maximální naměřená hodnota modulu pružnosti byla 62370 MPa. Nejnižší modul pružnosti 33525 MPa byl naměřen u tělísek typ 2.



Obrázek 48 Porovnání meze pevnosti při zkoušce tříbodovým ohybem

Na Obr. 48 jsou uvedeny naměřené hodnoty mezí pevnosti u třech typů tělísek. Tělíska typ 1 (prepregy skládané pod stejným úhlem  $0^\circ\text{C}$ ) snesly největší zatížení a to 886 MPa. Naopak nejmenší zařížení snesly tělíska typ 2 (střídající se vrstvy  $0^\circ\text{C}$  a  $45^\circ\text{C}$ ), maximálně 630 MPa. Tělíska typ 3 (střídající se vrstvy  $45^\circ\text{C}$  a  $0^\circ\text{C}$ ), dosahovaly středních hodnot, jejich nejvyšší naměřená hodnota byla 769 MPa.

## 8.2 Vyhodnocení zkušebních tělísek rázové (Charpyho) zkoušky



Obrázek 49 Vyhodnocení rázové houževnatosti

Na Obr. 49 je znázorněno porovnání rázové houževnatosti mezi třemi typy tělísek. Rázová houževnatost určuje, kolik je potřeba energie, než dojde k porušení zkoušených tělísek. Nejlepší vlastnosti vykazovaly tělíska typ 3, maximální naměřená hodnota byla 85,17 kJ · m<sup>-2</sup>. Výsledné hodnoty u tělísek typ 3 a typ 2 se od sebe příliš nelišily, takže jejich odolnost vůči rázové zkoušce můžeme považovat za podobnou. Zároveň můžeme v grafu vidět odlehlou hodnotu u zkušebních tělísek typ 2, která je pravděpodobně způsobena nedostatečným vystředěním vzorku na podpěrách při zkoušce.

## 8.3 Porovnání zkušebních tělísek

Pro vyhodnocení tří typů tělísek, byly použity tyto zkoušky: zkouška v ohybu a zkouška rázové houževnatosti metodou Charpy. Z vyhodnocených hodnot vyplývá, že žádný typ tělísek neměl ideální vlastnosti v obou provedených zkouškách. Zkušební tělíska typ 1 dosahovala nejvyšších hodnot u ohybové zkoušky, avšak u rázové zkoušky její hodnoty patřily k těm nejnižším. Naproti tomu zkušební tělíska typ 2 patřila z hlediska rázové zkoušky k odolnějším, ale jejich výsledky u ohybové zkoušky dosahovala mnohem nižších hodnot. Po shrnutí těchto výsledků lze říci, že tělíska typ 3 jsou z hlediska mechanických vlastností nejdolnější i když u zkoušky ohybem tělíska nedosahovala takových hodnot jako tělíska typ 1.

Tabulka 9 Porovnání hodnot ohybových vlastností z vědeckých prací

	Vlákna	Technologie	$E_f$ [MPa]	$\sigma_f$ [MPa]	$W_f$ [Nmm]	$\epsilon_f$ [%]
typ 1	uhlíkové	autokláv	64157	859	2361,5	1,48
typ a	uhlíkové	ruční kladení	29755	346	432,3	1,2
typ b	skelné	autokláv	27200	392	-	1,6

V Tab. 9 a Tab. 10 lze vidět porovnávání zkušebních tělísek z vědeckých prací o stejném vrstvení pod úhlem  $0^\circ$ .

Ve vědecké práci [43] (typ a) byly zjišťovány mechanické vlastnosti zkušebních tělísek u ohybové zkoušky. Na výrobu tělísek metodou ruční laminace pod vakuovou fólií byla použita uhlíková plátňová tkanina nasycená polyuretan-metakrylátovou matricí. Při porovnání výsledků tělísek typ 1 lze na první pohled vidět, že modul pružnosti v ohybu, pevnost v ohybu, ale i vykonaná práce jsou dvakrát vyšší. Důvodem lepších výsledků u tělísek typ 1 bude zřejmě použití uhlíkového prepregu, který má velký procentuální podíl výztuže a svou roli může mít také použitá metoda autoklávové lisování.

Tělíska ve vědecké práci [44] (typ b) byla vyráběna ze skelného prepregu vytvrzovaného pomocí autoklávové lisování. Výsledky tělísek typ 1 u modulu pružnosti v ohybu, pevnost v ohybu, ale i u vykonané práce jsou více než dvakrát vyšší. Jak je dále vidět v Tab. 10, skelná vlákna jsou na rázovou houževnatost mnohonásobně odolnější, ale jejich ohybové vlastnosti dosahují menších hodnot.

Tabulka 10 Porovnání hodnot u rázové zkoušky z vědeckých prací

	Vlákna	Technologie	$a_{cU}$ [kJ · m <sup>-2</sup> ]
typ 1	uhlíkové	autokláv	52,56
typ b	skelné	autokláv	90,882

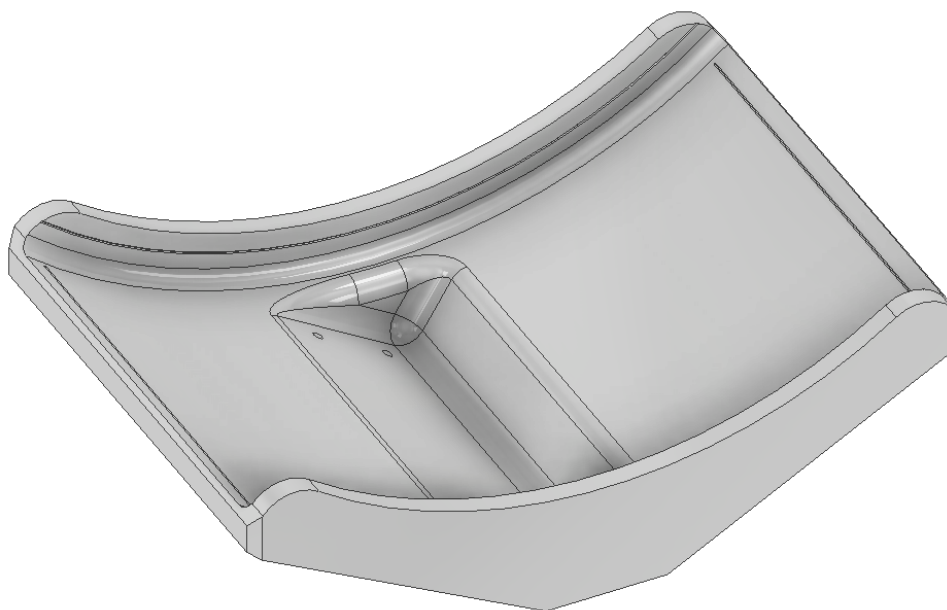
Závěrem bylo zjištěno, že výroba pomocí autoklávového lisování je sice z hlediska pořizovacích i výrobních nákladů vyšší než ruční laminace, avšak výsledky mechanických vlastností u výrobků dosahují mnohonásobně vyšších hodnot. Nutno podotknout, že vliv na mechanické vlastnosti má i druh použitého materiálu a skladba vrstev. Při porovnání tělísek z uhlíkových a skelných vláken vyrobených autoklávovým lisováním vykazují skelná tělíska mnohem nižší ohybové vlastnosti, ale zároveň daleko vyšší rázové houževnatost.

## 9 VÝROBA PROTOTYPU BLATNÍKU

Po vyzkoušení mechanických vlastností u zkušebních tělísek bylo navrženo vrstvení prepregu stejné jako u typ 3 a tloušťka výrobku 2 mm, což znamená 9 vrstev (rovnice 6). Byl použit uhlíkový prepreg s epoxidovou matricí GG-204 T. Dále byla navržena forma blatníku a následně vytvořen rámcový technologický postup.

### 9.1 Návrh a výroba formy

Podle výkresové dokumentace (Příloha P IV) byla vytvořena forma blatníku (Příloha P III). Na materiál formy byl použit dural EN AW-2017 kvůli jeho teplotní a tlakové odolnosti pro vytvrzování v autoklávu. Forma bylo vyrobena na pětiosé frézce a následně byla nabroušena a vyleštěna.


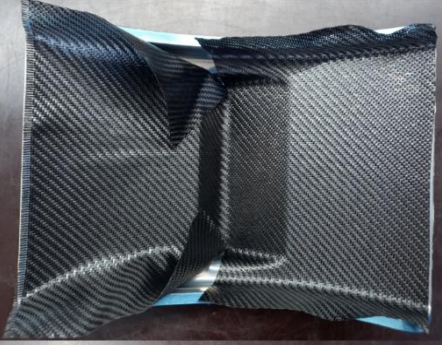


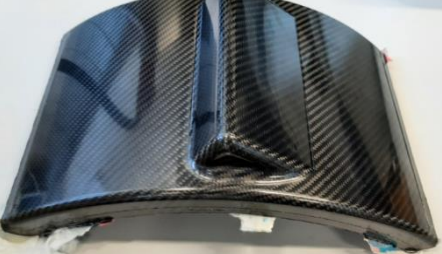

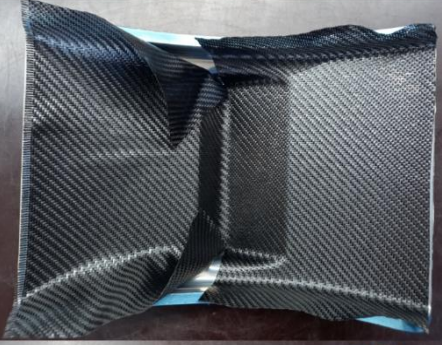


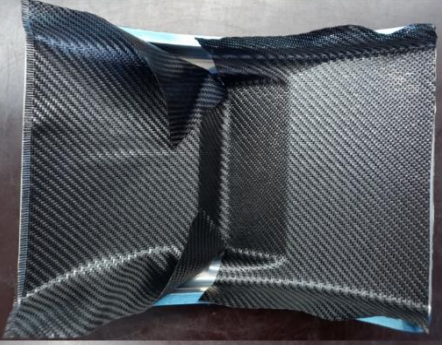




Obrázek 50 Model formy

### 9.2 Rámcový technologický postup

Technologický postup je pořadí prací, podle kterých lze vyrobit výrobek. V Tab. 11 je znázorněn rámcový technologický postup ve kterém je uveden popis jednotlivých prací. U každé z nich jsou uvedeny použité pomůcky a měřidla. V posledním sloupci je doložena příslušná fotodokumentace.

Tabulka 11 Rámcový technologický postup

Číslo	Popis práce	Pomůcky, měřidla	Fotodokumentace
1	Příprava prepregu (Vyjmutí prepregu z mrazáku den předem)	-	
2	Čištění formy	Škrabka, papírový ubrousek, líh	
3	Plnič pórů + separace	Papírový ubrousek, separátor, plnič pórů	
4	Kontrola separátoru	lepící páska	
5	Stříhání prepregu	Nůžky, zalamovací nůž, metr, pravítko, úhelník	
6	Pokládání 1. vrstvy prepregu	Váleček	
7	Aplikace vakua na 1. vrstvu	-	
8	Pokládání 2.-7. vrstvy prepregu	Váleček	
9	Vakuování	Separáční fólie, odsávací rohoř, vakuovací fólie, t�sn�n�, těsnící páska	
10	Vytvrzování	Autokláv	
11	Odformování	Stla�en� vzduch, speci�ln� p�pravky	
12	Ořezání výrobku	Diamantov� kotouč, bruska	
13	Leřt�n� dílu	Leřt�c� pasta, textilie	
14	Lakování dílu	Lakovací pistol	



## ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývala návrhem kompozitního dílu prototypu do automobilu, volbou materiálového složení, testováním mechanických vlastností. Na základě dosažených výsledků byla zvolena výroba prototypu blatníku do automobilu a vytvořen jeho rámcový technologický postup.

V teoretické části bakalářské práce byly popsány kompozitní materiály, vlákna s matricí a jejich druhy. V práci je také popsáno použití kompozitů v automobilovém průmyslu v historii i v současnosti. Dále jsou popsány prepregy a způsob výroby, popis principu autoklávu a jeho výhody a nevýhody.

V praktické části byl zvolen prepreg, který může být použit pro zpracování v autoklávu. Dále proběhlo stanovení počtu vrstev a typ skládání prepregů. Následně byla popsána výroba kompozitních zkušebních desek, ze kterých byly nařezány zkušební tělíska. Vrstvení u kompozitních desek bylo rozděleno do dvou variant. U první varianty se prepregy skládaly pod úhlem  $0^\circ$ . U druhé varianty se vrstvy pokládaly pod úhlem  $45^\circ$  a  $0^\circ$ . Tloušťka desek byla dána počtem vrstev, pro třibodový ohyb to byly 2 mm (9 vrstev), pro rázovou houževnatost 4 mm (19 vrstev). U zkušebních tělísek byly dále zvoleny tři typy vrstvení prepregů. U typ 1 byly všechny vrstvy skládané na sebe pod úhlem  $0^\circ$ , u typ 2 se vrstvy pokládaly pod úhlem  $45^\circ$  a  $0^\circ$ , a u vrstvy typ 3 se skládaly pod úhlem  $0^\circ$  a  $45^\circ$ . Prepregy byly ručně kladeny na naseparovanou formu, kde byly zavakuovány a následně vytvrzeny v autoklávu.

Po vytvrzení a nařezání kompozitních zkušebních desek na normalizované rozměry, mohly být provedeny mechanické zkoušky. Konkrétně se jednalo o zkoušku ohybem a zkoušku rázové houževnatosti metodou Charpy. Následovalo vyhodnocení a porovnání vzorků. U zkoušky ohybem byl naměřen mnohonásobně vyšší modul pružnosti  $E_f$  u zkušebních vzorků typ 1. U zkoušky rázové houževnatosti (Charpy) byla naměřeno největší odolnost vzorků typ 2 a typ 3.

V poslední části bakalářské práce se po provedení mechanických zkoušek dospělo k závěru, že vrstvení typ 3 dosahovalo nejlepších vlastností, a proto bylo zvoleno na výrobu kompozitního prototypu blatníku. Následně byla vytvořena forma, která byla vyrobena na pětiosé frézce a byl navržen jeho technologický postup. Následně proběhla experimentální výroba dle zvolené orientace na navržené formě.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] BARÓ, Maria et al., 2017. *Advances in Applications of Industrial Biomaterials* [online]. Imprint: Springer [cit. 2022-03-07]. ISBN 978-331-9627-670.
- [2] STAAB, George H., [2015]. *Laminar composites* [online]. Second edition. Boston, MA: Butterworth-Heinemann [cit. 2022-03-07]. ISBN 978-012-8024-003.
- [3] VAIDYA, Uday, 2011. *Composites for Automotive, Truck and Mass Transit - Materials, Design, Manufacturing* [online]. DEStech Publications [cit. 2022-03-07]. ISBN 978-1-5231-0107-8.
- [4] KREBS, Stefan, Ladislav KOLAŘÍK a Barbora BRYKSÍ STUNOVÁ, 2020. *Teorie zpracování plastů a kompozitů*. V Praze: České vysoké učení technické. ISBN 978-80-01-06722-2.
- [5] KAR, Kamal K., 2017. *Composite Materials* [online]. Německo: Springer Nature [cit. 2022-03-07]. ISBN 978-3-662-49514-8.
- [6] EHRENSTEIN, Gottfried W., 2009. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [7] *ASM Handbook*, 2001. Materials Park: ASM International. ISBN 08-717-0703-9.
- [8] FARUK, Omar, Jimi TJONG a Mohini SAIN, 2017. *Lightweight and Sustainable Materials for Automotive Applications*. Taylor & Francis Group. ISBN 978-1-5231-1812-0.
- [9] WAHAB, Magd Abdel, 2016. *Joining Composites with Adhesives: Theory and Applications* [online]. DEStech Publications. [cit. 2022-03-12]. ISBN 978-1-5231-4013-8.
- [10] *Class A composites: A history* [online]. [cit. 2022-03-12]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/class-a-composites-a-history>
- [11] *Carbon Fiber Composites* [online], 2020. [cit. 2022-03-12]. Dostupné z: <http://www.dexcraft.com/carbon-fiber-composites>
- [12] *A first in the Netherlands: 39 of Ebusco's fully-composite, electric buses will operate in the Gooi and Vecht region* [online], 2021. [cit. 2022-03-21]. Dostupné z: <https://www.ebusco.com/a-first-in-the-netherlands-39-of-ebuscos-fully-composite-electric-buses-will-operate-in-the-gooi-and-vecht-region/>

- [13] *Composite Technology: Prepregs and Monolithic Part Fabrication Technologies*, 2016. Hanser Publications. ISBN 978-1-5231-0441-3.
- [14] *The Stout Scarab – An Art Deco Automotive Artifact That Was Ahead of Its Time* [online], 2014. [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: <https://www.thetruthaboutcars.com/2014/07/the-stout-scarab-an-art-deco-automotive-artifact-that-was-ahead-of-its-time/>
- [15] *Green composites: polymer composites and the environment* [online], 2004. Cambridge: Woodhead Publishing Limited [cit. 2022-03-07]. ISBN 18-557-3739-6.
- [16] WILSON, Adrian, 2017. Vehicle weight is the key driver for automotive composites. *Reinforced Plastics* [online]. **61**(2), 100-102 [cit. 2022-03-26]. ISSN 00343617. Dostupné z: doi:10.1016/j.repl.2015.10.002
- [17] BAUROVA, N. I. a V. A. ZORIN, 2017. Current prepreg-formation technologies. *Polymer Science, Series D* [online]. **10**(2), 156-159 [cit. 2022-03-26]. ISSN 1995-4212. Dostupné z: doi:10.1134/S1995421217020022
- [18] LAŠ, Vladislav, 2008. *Mechanika kompozitních materiálů. 2.*, přeprac. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita. ISBN 978-807-0436-899.
- [19] *He BMW i3 is a Trend Setter* [online]. [cit. 2022-03-29]. Dostupné z: <http://compositeslab.com/bmw-i3-first-mass-produced-car-made-largely-with-composites/>
- [20] *FORD GT CARBON-FIBER WHEELS SHOWCASE THE DYNAMIC, WEIGHT, NVH AND EFFICIENCY ADVANTAGES OF INNOVATIVE MATERIAL* [online], 2016. [cit. 2022-03-29]. Dostupné z: <https://media.ford.com/content/fordmedia/fna/us/en/news/2016/05/17/ford-gt-carbon-fiber-wheels.html>
- [21] *Soybean Car* [online]. [cit. 2022-03-29]. Dostupné z: <https://www.thehenryford.org/collections-and-research/digital-resources/popular-topics/soy-bean-car/>
- [22] KUMAR, K., PAULO DAVIM, J., ed., 2018. *Composites and Advanced Materials for Industrial Applications* [online]. IGI Global [cit. 2022-04-01]. ISBN 9781522552178.

- [23] KRAUKLIS, Andrey E. et al., 2021. Composite Material Recycling Technology— State-of-the-Art and Sustainable Development for the 2020s. *Journal of Composites Science* [online]. **5**(1), 1-33 [cit. 2022-04-01]. ISSN 2504-477X. Dostupné z: doi:10.3390/jcs5010028
- [24] ISLAM, Md Zahidul et al. Green composites from natural fibers and biopolymers: A review on processing, properties, and applications. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* [online]. [cit. 2022-04-01]. ISSN 0731-6844. Dostupné z: doi:10.1177/07316844211058708
- [25] *McLaren MP4-1* [online]. [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: <https://www.f1technical.net/f1db/cars/476/mclaren-mp4-1>
- [26] SPASENOVIĆ, Jovana a Ivan BLAGOJEVIĆ, 2021. Composite materials in automotive industry: A review. *Industrija* [online]. **49**(2), 57-68 [cit. 2022-04-01]. ISSN 0350-0373. Dostupné z: doi:10.5937/industrija49-34540
- [27] PERVAIZ, Muhammad et al., 2016. Emerging Trends in Automotive Lightweighting through Novel Composite Materials. *Materials Sciences and Applications* [online]. **07**(01), 26-38 [cit. 2022-04-08]. ISSN 2153-117X. Dostupné z: doi:10.4236/msa.2016.71004
- [28] HOA, Suong V., 2009. *Principles of the manufacturing of composite materials* [online]. Lancaster: DEStech [cit. 2022-04-08]. ISBN 978-1-932078-26-8.
- [29] JU, Xiangwen et al., 2021. Research on the Manufacturing Quality of Co-Cured Hat-Stiffened Composite Structure. *Materials* [online]. **14**(11) [cit. 2022-04-09]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma14112747
- [30] PEI, Lei et al., 2019. Surface parameters measurement for braided composite preform based on gray projection. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics* [online]. **14** [cit. 2022-04-09]. ISSN 1558-9250. Dostupné z: doi:10.1177/1558925019887621
- [31] ALI, M S et al., 2021. Nano and bio-composites and their applications: A review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. **1067**(1) [cit. 2022-04-17]. ISSN 1757-8981. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/1067/1/012093
- [32] AKHLAGHI, F, R ESLAMI-FARSANI a SMM SABET, 2013. Synthesis and characteristics of continuous basalt fiber reinforced aluminum matrix

- composites. *Journal of Composite Materials* [online]. **47**(27), 3379-3388 [cit. 2022-04-09]. ISSN 0021-9983. Dostupné z: doi:10.1177/0021998312465765
- [33] *Materiály* [online]. [cit. 2022-04-09]. Dostupné z: <https://www.veba.cz/cs/materialy>
- [34] *The V12 Vanquish Celebrates 20-year anniversary* [online]. [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://www.supercars.net/blog/the-v12-vanquish-celebrates-20-year-anniversary/>
- [35] *Quantifying the Performance Benefits of the Shelby GT350R's Carbon-Fiber Wheels* [online], 2016. [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://www.caranddriver.com/news/a15350088/tested-quantifying-the-performance-benefits-of-the-shelby-gt350rs-carbon-fiber-wheels/>
- [36] *Ford Uses Coffee Bean Skins to Create New Composite Material* [online], 2020. [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://www.springerprofessional.de/en/materials-technology/body/ford-uses-coffee-bean-skins-to-create-new-composite-material/17571146>
- [37] *BMW rolls out multi-material Carbon Cage with 2022 iX vehicle line* [online], 2021. [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/bmw-rolls-out-multi-material-carbon-cage-with-2022-ix-vehicle-line>
- [38] *HOW McLAREN IS PIONEERING THE USE OF SUSTAINABLE COMPOSITES IN FI* [online], 2020. [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://www.mclaren.com/racing/team/natural-fibre-sustainable-composite-racing-seat/>
- [39] DRAKONAKIS, Vasileios M., James C. SEFERIS a Charalambos C. DOUMANIDIS, 2013. Curing Pressure Influence of Out-of-Autoclave Processing on Structural Composites for Commercial Aviation. *Advances in Materials Science and Engineering* [online]. **2013**, 1-14 [cit. 2022-05-02]. ISSN 1687-8434. Dostupné z: doi:10.1155/2013/356824
- [40] BĚHÁLEK, Luboš, 2015. *Polymery* [online]. Verze knihy: 15. [cit. 2022-05-02]. ISBN 978-80-88058-66-3.
- [41] ČSN EN ISO 178, 2011. *Plasty: Stanovení ohybových vlastností*.
- [42] ČSN EN ISO 179-2, 2000. *Plasty: Stanovení rázové houževnatosti*.

- [43] BODLÁK, Lukáš, 2016. *Vliv křížení vrstev na mechanické vlastnosti kompozitních systémů*. Zlín. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati. Vedoucí práce Soňa Rusnáková.
- [44] ŽALEK, Tomáš, 2015. *Vývoj technologie lisování kompozitu pro automobilový průmysl*. Zlín. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati. Vedoucí práce Soňa Rusnáková.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

PMC	Polymer matrix composite	
CMC	Ceramic matrix composite	
MMC	Metal matrix composite	
PBT	Polybutylen-tereftalát	
PC	Polykarbonát	
POM	Polyoxymetylen	
PPO	Polyfenylenoxid	
PET	Polyethylentereftalát	
PS	Polystyren	
PVC	Polyvinylchlorid	
PE	Polyethylen	
GFRP	Glass-fiber-reinforced polymer	
CFRP	Carbon-fiber-reinforce polymers	
CFRTP	Carbon-fiber-reinforce thermo-palstics	
N <sub>2</sub>	Dusík	
CO <sub>2</sub>	Oxid uhličitý	
$\sigma_f$	Napětí v ohybu	[MPa]
F	Síla	[N]
L	Vzdálenost podpěr	[mm]
b	Šířka	[mm]
h	Tloušťka	[mm]
$\varepsilon_f$	Deformace ohybu	[%]
E <sub>f</sub>	Modul pružnosti v ohybu	[MPa]
W <sub>f</sub>	Vykonaná práce	[Nmm]
s	Průhyb	[mm]

---

$a_{cU}$	Vrubová houževnatost	$[\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}]$
$W$	Energie při přeražení	$[\text{J}]$
$n$	Počet vrstev	$[-]$
$T$	Tloušťka výrobku	$[\text{mm}]$
$m_s$	Plošná hmotnost	$[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$



**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obrázek 1 Rozdělení kompozitních materiálů [18] .....	11
Obrázek 2 Struktura skleněného vlákna [6,30].....	13
Obrázek 3 Struktura uhlíkového vlákna [4,30].....	13
Obrázek 4 Struktura aramidového vlákna [6,30].....	14
Obrázek 5 Struktura basaltového vlákna [32,33].....	14
Obrázek 6 Rozdělení přírodních vláken [24].....	15
Obrázek 7 Vlastnosti matrice a vláken [22].....	18
Obrázek 8 Rozdělení kompozitních materiálů (v mil. USD) dle průmyslu v r. 2019 [31]..	19
Obrázek 9 „Soya bean car“ [21] .....	20
Obrázek 10 Stout Scarab [14].....	20
Obrázek 11 Chevrolet Corvette [9].....	21
Obrázek 12 McLaren MP4/1 [25].....	21
Obrázek 13 BMW i3 [19] .....	22
Obrázek 14 Ebusco 3.0 [12] .....	22
Obrázek 15 Rozdělení materiálu v automobilu [27].....	23
Obrázek 16 Aston Martin V12 Vanquish [34].....	23
Obrázek 17 Ford testuje použití kávových zrn na výrobu světlometů [36].....	24
Obrázek 18 Ford Shelby GT350 Mustang [35] .....	25
Obrázek 19 Druhy materiálů v automobilu BMW iX [37].....	25
Obrázek 20 Uhlíkové (vlevo) a lněné (vpravo) závodní sedadlo F1 [38] .....	26
Obrázek 21 Zpracování uhlíkových a skleněných kompozitů na konci jejich životnosti [23] .....	27
Obrázek 22 Tkaninový prepreg [13].....	28
Obrázek 23 Metoda tavení za tepla [17].....	29
Obrázek 24 Metoda rozpouštědlového máčení [17].....	30
Obrázek 25 Postup výrobního procesu vytvrzování v autoklávu [28].....	31
Obrázek 26 Autoklávové vytvrzování [29] .....	32
Obrázek 27 Autoklávový vytvrzovací cyklus [39].....	33
Obrázek 28 Rozdělení mechanických charakteristik [40] .....	34
Obrázek 29 Zkouška ohybem [40].....	35
Obrázek 30 Zkouška rázem dle Charpyho [40] .....	36
Obrázek 31 Schéma vrstvení prepregů varianta 1 (vlevo) a varianta 2 (vpravo) .....	39
Obrázek 32 Separátor Chemlease 2191W (vlevo), plnič pórů Zywx Sealer GPTM.....	40
Obrázek 33 Příprava prepregu .....	40

Obrázek 34 Váleček (vlevo) a prepreg (vpravo) .....	41
Obrázek 35 Navrstvený prepreg a separační fólie .....	41
Obrázek 36 Zavakuovaný výrobek .....	42
Obrázek 37 Autokláv OP Panini S.r.l .....	43
Obrázek 38 Vytvrzovací cyklus autoklávové lisování .....	43
Obrázek 39 Typy zkušebních tělísek .....	44
Obrázek 40 Zkouška ohybem .....	44
Obrázek 41 Závislost ohybového napětí na deformaci pro zkušební tělíska typ 1.....	45
Obrázek 42 Závislost ohybového napětí na deformaci pro zkušební tělíska typ 2.....	46
Obrázek 43 Závislost ohybového napětí na deformaci pro zkušební tělíska typ 3.....	47
Obrázek 44 Přístroj Zwick HIT25P .....	48
Obrázek 45 Zkouška rázové houževnatosti .....	48
Obrázek 46 Typy porušení zkušebních tělísek u zkoušky rázové houževnatosti metodou Charpy.....	50
Obrázek 47 Vyhodnocení modulu pružnosti při zkoušce třibodovým ohybem .....	51
Obrázek 48 Porovnávání meze pevnosti při zkoušce třibodovým ohybem.....	52
Obrázek 49 Vyhodnocení rázové houževnatosti .....	53
Obrázek 50 Model formy.....	55

**SEZNAM TABULEK**

Tabulka 1 Porovnání vlastností vláken [23,24] .....	15
Tabulka 2 Vlastnosti matrice v prepregu GG-204 T .....	39
Tabulka 3 Naměřené a vypočítané hodnoty z ohybové zkoušky pro zkušební tělíska typ 1 .....	45
Tabulka 4 Naměřené a vypočítané hodnoty z ohybové zkoušky pro zkušební tělíska typ 2 .....	46
Tabulka 5 Naměřené a vypočítané hodnoty z ohybové zkoušky pro zkušební tělíska typ 3 .....	47
Tabulka 6 Naměřené hodnoty ze zkoušky rázové houževnatosti pro zkušební tělíska typ 1 .....	49
Tabulka 7 Naměřené hodnoty ze zkoušky rázové houževnatosti pro zkušební tělíska typ 2 .....	49
Tabulka 8 Naměřené hodnoty ze zkoušky rázové houževnatosti pro zkušební tělíska typ 3 .....	50
Tabulka 9 Porovnání hodnot ohybových vlastností z vědeckých prací.....	54
Tabulka 10 Porovnání hodnot u rázové zkoušky z vědeckých prací.....	54
Tabulka 11 Rámcový technologický postup.....	56

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: MATERIÁLOVÝ LIST TKANINY

Příloha P II: MATERIÁLOVÝ LIST MATRICE

Příloha P III: VÝKRES FORMY

Příloha P IV: VÝKRES BLATNÍKU

# PŘÍLOHA P I: MATERIÁLOVÝ LIST TKANINY



## WOVEN FABRIC Technical Data Sheet

### Carbon Fabric

Product Code: **GG-204 T**

CHARACTERISTICS	Nominal	UM	Tolerance	Normative
Mass per unit area	214	g/m <sup>2</sup>	± 5%	ISO 4605
Weave	2X2 Twill			ISO 2113
Width	1000/1200	mm	± 2,5%	ISO 22198
Thickness	0,2	mm	± 2,5%	ISO 5084(**)
Other informations	Loomstate			

Nominal Construction	WARP		WEFT	
Fiber Description	3K		3K	
Fiber Producer				
Thread Count	5,2 ends/cm	ISO 4602	5,5 ends/cm	ISO 4602
Weight Distribution	104 g/m <sup>2</sup>	49%	110 g/m <sup>2</sup>	51%
Selvages	Weaving style	LENO	Type of Fiber	HM polyester 22 tex

Mechanical Properties of Fiber	Strength (nominal)	Modulus (nominal)
3K	3675 MPa	238 GPa

(\*\*) Theoretical thickness for an epoxy laminate with 40% of reinforcement in volume.

Note : Technical information furnished is based on laboratory findings and believed to be correct. No warranties of any kind are made except that the materials supplied are of standard quality. All risk and liabilities arising from handling, storage and use of products, as well as compliance with applicable legal restrictions, rests with the user.

Date of Issue

19/03/2018

G. Angeloni srl  
via Abate Tommaso , 72/A5 - 30020  
Quarto d'Altino (VE) - ITALY

Web Site: [www.g-angeloni.it](http://www.g-angeloni.it)  
E-Mail : [info@g-angeloni.com](mailto:info@g-angeloni.com)

Tel. +39 0422 780580  
Fax +39 0422 782782

# PŘÍLOHA P II: MATERIÁLOVÝ LIST MATRICE



Via Tiepolo, 19 20022 CASTANO PRIMO (MI) Tel. +39 0331 880564 [www.impregnatex.it](http://www.impregnatex.it)

**MATRIX PRODUCT DATA**

**IMP503Z**

ST-130213-rev7-09/01/2015

## DESCRIPTION

Modified epoxy resin IMP503Z is suitable for prepregging of carbon/glass and aramid fabrics. IMP503Z with his high transparency is suitable for "carbon look" composite part where high cosmetical requirements are needed. IMP503Z can be used with carbon or metallic mould with the standard technologies: Hot Press, Wrapping, Autoclave and Vacuum Bag.

## BENEFITS AND FEATURES

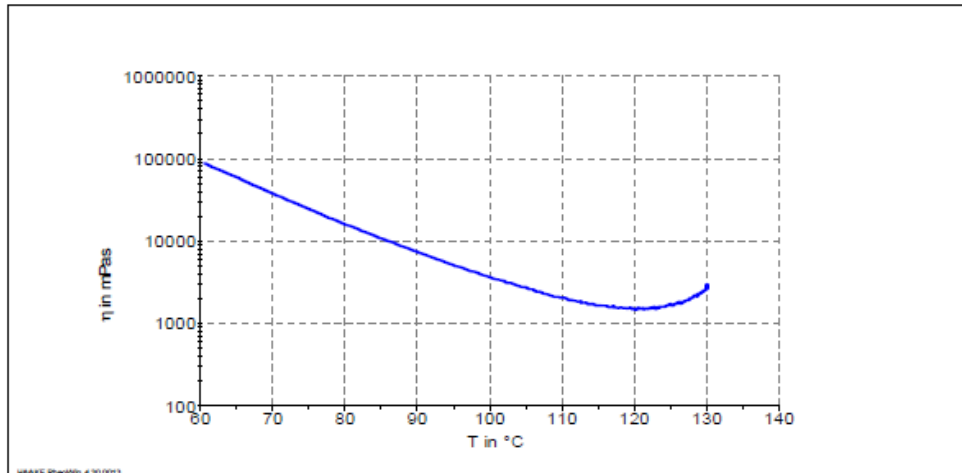
- Field of applications: automotive, sporting goods, marine, industrial
- Different curing cycles are possible
- Good mechanical properties
- UV resistance improved

## RESIN PROPERTIES

TYPE		TOUGHENED
Cured resin density	gr/cm <sup>3</sup>	1,15 ÷ 1,25
Gel Time at 125 °C (257 °F)	minuti	6'-9'
Gel Time at 110 °C (221 °F)	minuti	20 ÷ 26
TACK		MEDIUM/HIGH
Resin VOC on prepreg	%	< 1
Tg fully cured (Tan Delta DMA)	°C (°F)	120 (248)
Shelf life at room temperature (23 °C)	weeks	5
Shelf Life (-18°C approx)	years	1

### VISCOSITY VS TEMPERATURE BEHAVIOUR

The plot under depicted below is performed with cone-plate rehometer starting from 60°C until viscosity kick off. Parameters: frequency 0.2 Hz and heating rate 3 °C/ min.



### CURING CYCLES SUGGESTED

TEMPERATURES	TIME	Tg ( TanDelta DMA, °C)
110	2h	120-125
125	1h	120-125

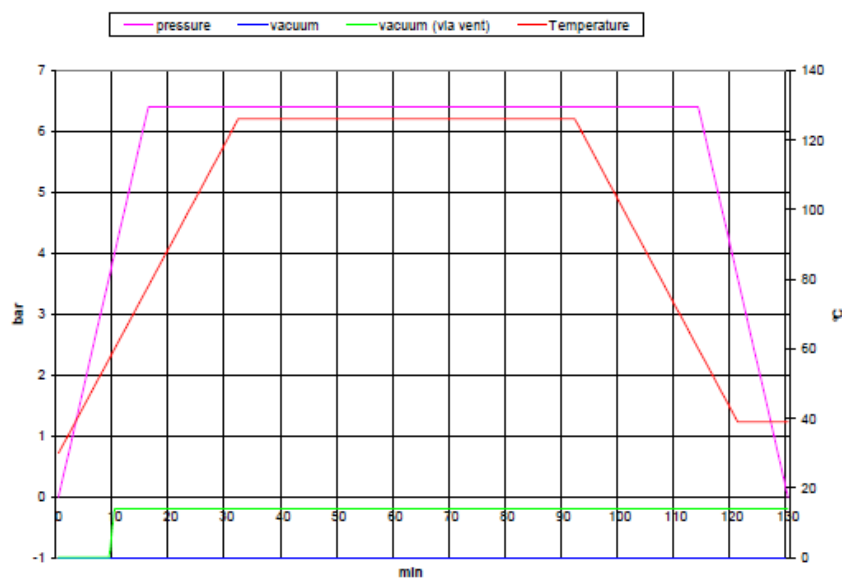
## PROCESS DESCRIPTIONS

## Autoclave:

## 125°C cycle

1. After making the bag put it in the autoclave and apply -0.9 ÷ -1.0 bar vacuum
2. Heat to 125°C at 1-3 min/°C rate
3. Apply the pressure, with quick increment slope, in order to reach the maximum possible value (ex. 4÷7 bar) before 80°C. Reached the process pressure is possible reduce the vacuum value to -0.2 bar (via vent). This option depend on the evaluations of the autoclave driver.
4. When 125°C temperature is reached dwell it and the pressure for 1h
5. Cool to 60°C under pressure, then release the pressure
6. At room temperature get the part out of the autoclave

AUTOCLAVE CYCLE



## Hot Press:

## 125°C cycle:

1. Put the prepreg material into the mould at room temperature and close the mould at 1Bar pressure
2. Heat to 125°C a 1-3°C/min (3-5°C/min for small part if possible)
3. When 100-110°C is reached apply 2-3 Bar or over if the flow can be controlled
4. When 125°C temperature is reached dwell it and the pressure for 1h
5. Cool to 40-50°C under pressure and pull the part out

IMP503 Z is a reactive epoxy formulation, too high heat up rate and/or too high temperature dwell can give out of control temperature inside the stack lay up when thick laminate are processed (thickness over 1 cm)

*These autoclave and hot press cycle are only suggestions based on Impregnatex Compositi experiences and are not absolute way to process properly the material. Different equipments may need different curing cycle conditions.*



## TYPICAL MECHANICAL PROPERTIES

The mechanical data below were performed on laminate cured by hot press technology at 125°C curing cycle (see above).

FABRIC	Flexural Strength ASTM D790 [Mpa]	Flexural Modulus ASTMD790 [GPa]	G1c mod. ASTM D5528 [J/m <sup>2</sup> ]	ILSS ASTM 2344 [N/mm <sup>2</sup> ]	Volume of fibre [%]
GG630T	730	57	800	56	64
GG428T	800	52	-	64	59
GG204T-V (1)	800	54	-	64	59
GG205T	810	55	750	68	58
GG240T	800	54	760	65	56
GG380T	800	55	730	64	62
GG90P	655	52	-	70	65
GG204P	810	53	-	66	59
CX400	938	56	-	54	62 (provini ricavati in direzione +45°)
GG800T	822	60	-	52	64
GG285T4	805	51	-	61	65
VV290T	630	27	-	57	64.8
VV380	710	23	-	64	60

FABRIC	Flexural Strength ASTM D790 [Mpa]	Flexural Modulus ASTM D790 [GPa]	G1c mod. ASTM D5528 [J/m <sup>2</sup> ]	ILSS ASTM 2344 [N/mm <sup>2</sup> ]	Volume of fibre [%]
VV580T	760	30	1160	60	56
VV700	750	25	-	56	64
KK300	440	21	-	44	56
GV330UD	1150	115	700	73	66
GV335UD	650	250	-	62	54

The values are to be understood as the average of the experimental values observed.

- (1) is also available as stabilized WF1, for exposed areas where high aesthetic of textile construction must be maintained during the process.

*These mechanical data were obtained by hot press technology. With different curing cycle technology these data can be different.*

## PREPREG STORAGE LIFE

This prepreg should be stored as received in a cool dry place or in a refrigerator. Storage life at different temperatures:

- 12 Months at -18 °C
- 5 weeks at +23 °C

After removal from refrigerator storage, prepreg should be allowed to reach room temperature before opening the polythene bag to prevent water condensation.

## PRECAUTIONS FOR USE

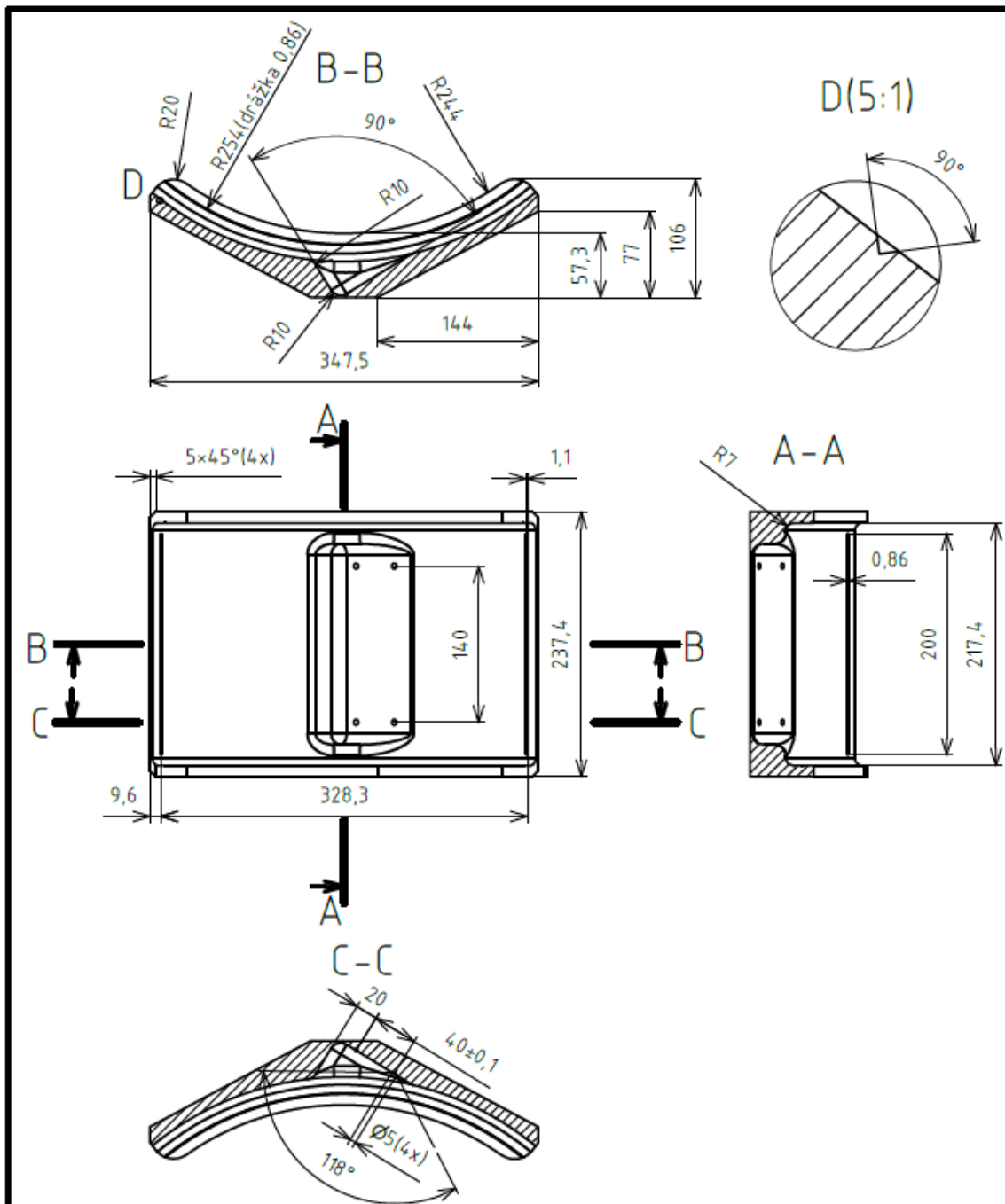
To handle properly the prepreg product observe the established precautions.

Operators working with this prepreg should wear clean and impervious gloves to reduce the possibility of skin contact and to prevent the prepreg contamination  
Safety data sheet is available for this product.

## NOTE

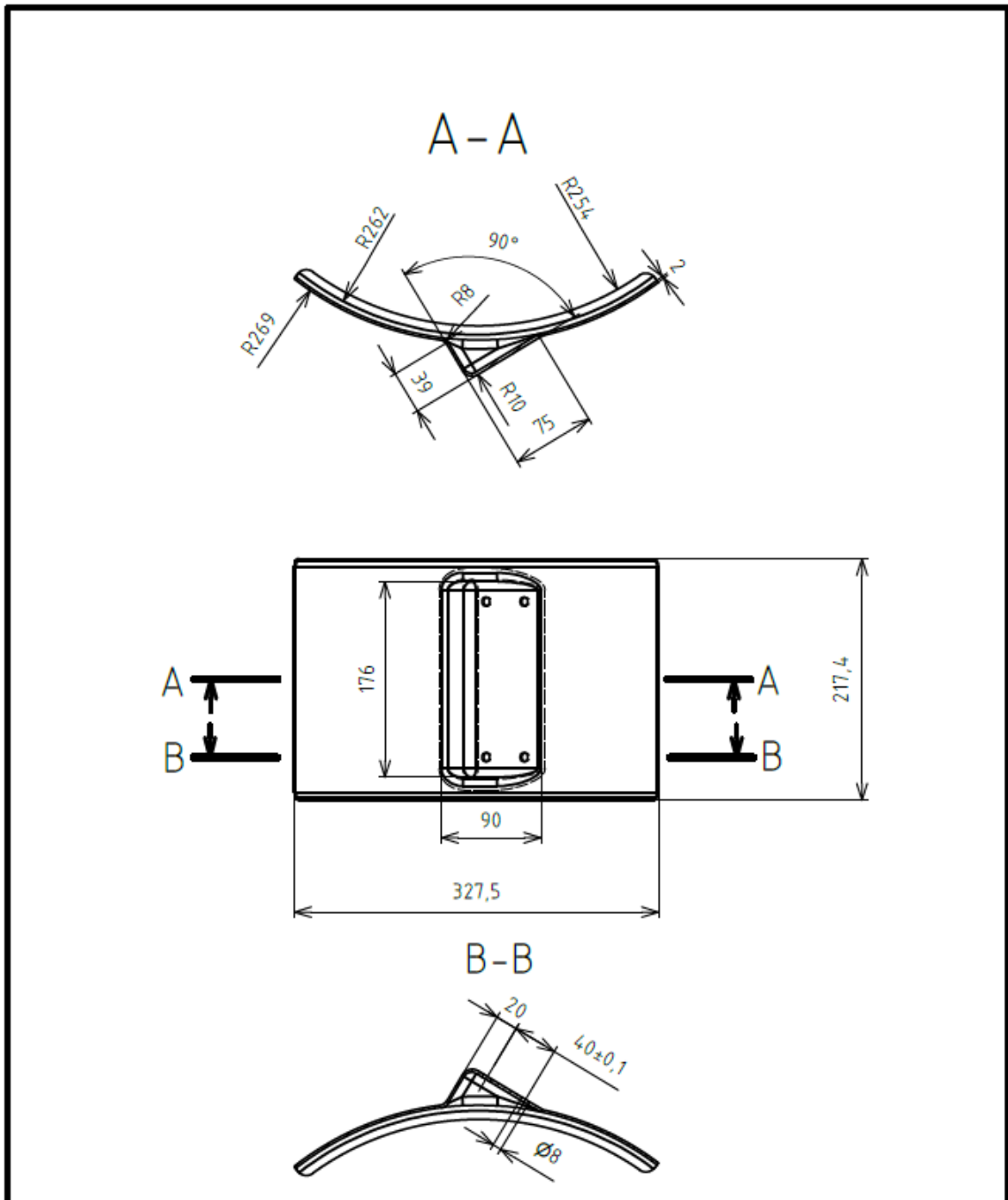
The above mentioned technical informations are based on our actual knowhow and accurate, reproducible laboratories tests but due to the product complexity and its further processing, is not possible guarantee these.  
Impregnatex Compositi will reserve to made further modification to this paperwork

# PŘÍLOHA P III: VÝKRES FORMY



 <b>Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně</b> Fakulta technologická	Měřítko	Přesnost ISO 2768-mH
	1:5	Promítání 
Materiál	EN AW-2017	Sestava
Polotovár		Chráněno podle ISO 16016
Skupina		Název
Kreslil	TOMEČEK MAREK	FORMA BLATNÍKU
Datum	17.4.2022	Číslo výkresu
		List 1/1

# PŘÍLOHA P IV: VÝKRES BLATNÍKU



 <b>Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně</b> Fakulta technologická	Měřítko	Přesnost ISO 2768-mH
	1:5	Promítání 
Materiál	PREPREG GG-204 T	Sestava
Polotovar		Chráněno podle ISO 16016
Skupina		<h2 style="text-align: center;">BLATNÍK</h2>
Kreslil	TOMEČEK MAREK	
Datum	17.4.2022	List 1/1