

**ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA v PRAZE**

**Technická fakulta**

**Katedra materiálu a strojírenské technologie**

**Aplikace vláknových kompozitů v konstrukci automobilů**

**Bakalářská práce**

*Autor práce:*

*Dominik Piš*

*Vedoucí práce:*

*doc. Ing. Petr Valášek, Ph.D.*

Praha 2017

## Čestné prohlášení

*„Prohlašuji, že jsem diplomovou/bakalářskou prací na téma: " **Aplikace vláknových kompozitů v konstrukci automobilů**" vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.*

*Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.*

*Jsem si vědom, že moje bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí.*

*Jsem si vědom, že 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, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.“*

V Praze dne: 30. 3. 2017

---

Poděkování:

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce *doc. Ing. Petrovi Valáškoví, Ph.D.* za odborné vedení práce, užitečné informace k vypracování této bakalářské práce a čas strávený s konzultacemi této práce.

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Dominik Piš

Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

Aplikace vláknových kompozitů v konstrukci automobilů

Název anglicky

Application of fiber composites in automotive construction

---

Cíle práce

Cílem bakalářské práce je shromáždit aktuální literární poznatky o možnostech využití vláknových kompozitů v oblasti automobilového průmyslu. Identifikovat vývojové trendy těchto materiálů ve sledované oblasti a popsat konkrétní využití vláknových kompozitů pro jednotlivé díly automobilů. Mezi dílčí cíle práce patří popsání základních mechanických charakteristik těchto materiálů, ale i ekonomické zhodnocení možnosti využití kompozitních systémů v porovnání s dříve využívanými materiály.

Metodika

- Současný stav řešeného problému (literární rešerše),
- závěry a přínos práce.

Doporučený rozsah práce

30 s.

Klíčová slova

Ekonomická výhodnost, mechanické vlastnosti, synergický efekt.

---

Doporučené zdroje informací

AGARWAL, BHAGWAN D., LAWRENCE BROUTMAN, J.: Vláknové kompozity, 1.vyd., Praha: Nakladatelství techn. lit., 1987, 294 s.

ASTRÖM, B.T.: Manufacturing of Polymer Composites, 1. ed., London: Chapman & Hall, 1997, 469 s.

Časopisy: Applied composite materials, Journal of Adhesion and Adhesives, Strojírenská technologie, Manufacturing Technology

EHRENSTEIN, G.W.: Polymerní kompozitní materiály, Nakladatelství Scientia 1. vydání, Praha, 2009, 351 s.

CHAWLA, KRISHAN K.: Composite Materials: Science and Engineering, 2. ed., New York: Springer, 1998, 542 s.

KAW, AUTAR K.: Mechanics of Composite Materials, 2nd ed. Boca Raton: Taylor & Francis, 2006, 496 s.

MATTHEWS, F.L., RAWLINGS, R.D.: Composite Materials: Engineering and Science Boca Raton: CRC, 1994, 480 s.

VOJTĚCH, D.: Materiály a jejich mezní stavy, VŠCHT, Praha, 2010, 212 s.

---

Předběžný termín obhajoby

2016/17 LS – TF

Vedoucí práce

doc. Ing. Petr Valášek, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Elektronicky schváleno dne 1. 12. 2016

doc. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 21. 12. 2016

prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan

V Praze dne 17. 03. 2017

---

**Anotace:** Tato bakalářská práce se zabývá aplikací vláknových kompozitů v konstrukci automobilu. Vláknové kompozity se v automobilu uplatňují za účelem snížení hmotnosti automobilu, zvýšení bezpečnosti automobilu a ostatních účastníků provozu a udržení trvalého rozvoje. V úvodu práce je obeznámení s kompozitním materiálem, s jeho dělením a charakteristikami, práce dále seznamuje s druhy vláken a matric užívaných v konstrukci automobilu. Hlavní náplní této práce je aplikace a technologie výroby dílu z vláknového kompozitu pro automobilový průmysl. V poslední části je nastínění budoucího vývoje pro aplikaci vláknového kompozitu v konstrukci automobilu.

Klíčová slova: Ekonomická výhodnost, mechanické vlastnosti, synergický efekt.

### **Application of fiber composites in automotive construction**

**Abstract:** This thesis deals with the application of fiber composites in car construction. Fiber composites in automobile are applied to reduce the weight of vehicles, safer cars and other road users and maintaining sustainable development. The initial chapters is familiarization with composite material with his division and characteristics, another part is list of the types of fibers and matrices used in car construction. The main part of this work is description the application and manufacturing technology of fiber composites for the automotive industry. The last part is outlined the future development for the application of fiber composites in car construction.

Key words: Economical, mechanical properties, synergistic effect.

## Seznam použitých zkratk

- MMC - Metal matrix composite (kompozity s kovovou maticí)
- GF - Glass fiber (skleněná vlákna)
- AF - Aramid fiber (Aramidová vlákna)
- CF - Carbon fiber (uhlíková vlákna)
- PAN - Polyakrilonitril
- HT - High tenacity (vysoko pevnostní)
- HM - High modulus (vysoký modul)
- LM - Low modulus (nízký modul)
- HDT - tvarová stálost za tepla
- UP-R - unsaturated polyester resin (Nenasycená polyesterová pryskyřice)
- VE-R - vinyl ester resin (Vinylesterová pryskyřice)
- VEU-R - Vinyl ester urethane resin (Vinylester uretanová pryskyřice)
- PF-R - Phenol formaldehyde resin (Fenol formaldehydová pryskyřice)
- PP- Polypropylen
- PEEK- Polyeter eter keton
- PPS- Polyfenyl sulfid
- Prepreg – preimpregnated fiber (před impregnovaná výztuž)
- RTM - Resin Transfer Molding (tlakové vstřikování pryskyřice)
- SMC - Sheet Molding Compound (listové tvarování sloučeniny)
- A-SMC – Advance Sheet Molding Compound (pokročilé listové tvarování sloučeniny)
- R-RIM - Random Reaction Injection Molding (náhodné reaktivní vstřikování)
- S-RIM - Structural Reaction Injection Molding (strukturální reaktivní vstřikování)
- BMC - Bulk Moulding Compound (objemové tvarování sloučeniny)
- GMT - Glass Mat Thermoplastic (termoplasty vyztužené skleněné rohože)
- LFT- Long fiber Thermoplastics (termoplasty vyztužené dlouhými vlákny)
- D-LFT- Direct Long Fiber Thermoplastics (směrově vyztužené termoplasty)
- CFRP – Carbon Fiber Reinforced Plastic (plasty vyztužené uhlíkovým vláknem)

<b>1</b>	<b>ÚVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>CÍLE A METODIKA .....</b>	<b>2</b>
2.1	CÍL PRÁCE.....	2
2.2	METODIKA.....	2
<b>3</b>	<b>REŠERŠE – MOŽNOSTI VYUŽITÍ KOMPOZITŮ V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU .....</b>	<b>3</b>
3.1	KOMPOZITNÍ MATERIÁL.....	3
3.1.1	<i>Charakteristiky kompozitních materiálů.....</i>	<i>3</i>
3.1.2	<i>Částicové kompozity pro automobilový průmysl .....</i>	<i>5</i>
3.2	VLÁKNOVÉ KOMPOZITY PRO AUTOMOBILOVÝ PRŮMYSL .....	5
3.2.1	<i>Vyztužující vlákna .....</i>	<i>6</i>
3.2.2	<i>Matrice .....</i>	<i>13</i>
3.2.3	<i>Aplikace termosetických vláknových kompozitů v konstrukci automobilu.....</i>	<i>20</i>
3.2.4	<i>Aplikace termoplastických vláknových kompozitů v konstrukci automobilu .....</i>	<i>20</i>
3.3	TECHNOLIE VÝROBY POLYMERNÍCH KOMPOZITŮ V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU .....	21
3.3.1	<i>Ruční výroba vyztužených reaktivních pryskyřic .....</i>	<i>22</i>
3.3.2	<i>Lisování pomocí vakuového vaku .....</i>	<i>22</i>
3.3.3	<i>Lisování v autoklávu.....</i>	<i>22</i>
3.3.4	<i>Prepreg.....</i>	<i>22</i>
3.3.5	<i>Technologie - RTM (Resin Transfer Molding).....</i>	<i>23</i>
3.3.6	<i>Technologie SMC (Sheet Molding Compound) .....</i>	<i>24</i>
3.3.7	<i>Technologie R-RIM (Random Reactive Injection Moulding) .....</i>	<i>26</i>
3.3.8	<i>Technologie BMC (Bulk Moulding Compound) .....</i>	<i>26</i>
3.3.9	<i>Technologie GMT (Glass Mat Thermoplastic).....</i>	<i>27</i>
3.3.10	<i>Technologie LFT (Long fiber Thermoplastics).....</i>	<i>28</i>
3.4	POROVNÁNÍ VLÁKNOVÝCH KOMPOZITŮ S KONVENČNÍMI MATERIÁLY .....	29
3.5	BUDOUCNOST VLÁKNOVÝCH KOMPOZITŮ V KONSTRUKCI AUTOMOBILU.....	29
<b>4</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>31</b>
<b>5</b>	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>32</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>36</b>
	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>36</b>



# 1 Úvod

Myšlenka vzájemné kombinace různých vlastností materiálu je velmi stará, a to za účelem využívat příznivé vlastnosti jednotlivých materiálů a potlačovat jejich nevýhody vhodnou kombinací. Člověk se tvorbou takového materiálu inspiroval přírodou, ve které je princip kompozitu často využíván. Příkladem může být struktura dřeva, nebo včelí plástve, které kombinují prvky zajišťující odolnost proti mechanickému namáhání s prvky zabezpečujícími další funkce, například přenos výživných látek na vývoj struktury. Velký počet materiálů v technické praxi je vyroben tímto způsobem, jak pro běžné použití jako je například jízdní kolo, lyže, tenisová raketa, tak i pro odborné či specifické využití, železobeton nebo komponenty pro kosmický průmysl. Je logické, že i v automobilovém průmyslu si kompozitní materiály našly svoje místo a již v současné době jsou využívány a jejich aplikace v automobilu stále roste. V automobilovém průmyslu jsou vláknové kompozity vyráběny za účelem zlepšení mechanických vlastností, jako je tuhost, pevnost, tažnost a teplená odolnost, ale také různá kombinace těchto vlastností pro zvýšení odolnosti proti únavě materiálu, jeho křehkosti, nebo chemické a korozní odolnosti. Velkou předností vláknových kompozitů je příznivý poměr mezi pevností a měrnou hmotností, to umožňuje využití tam, kde je zapotřebí pevnost a je omezená celková hmotnost výchozího komponentu, jako je to například u automobilu. V současné době jsou vláknové kompozity, z hlediska trvale udržitelného rozvoje, považovány za srovnatelné s klasickými materiály.

## **2 Cíle a metodika**

### **2.1 Cíl práce**

Cílem bakalářské práce je shromáždit aktuální literární poznatky o možnostech a využití vláknových kompozitů v oblasti automobilového průmyslu. Identifikovat vývojové trendy těchto materiálů ve sledované oblasti a popsat konkrétní využití vláknových kompozitů pro jednotlivé díly automobilů.

### **2.2 Metodika**

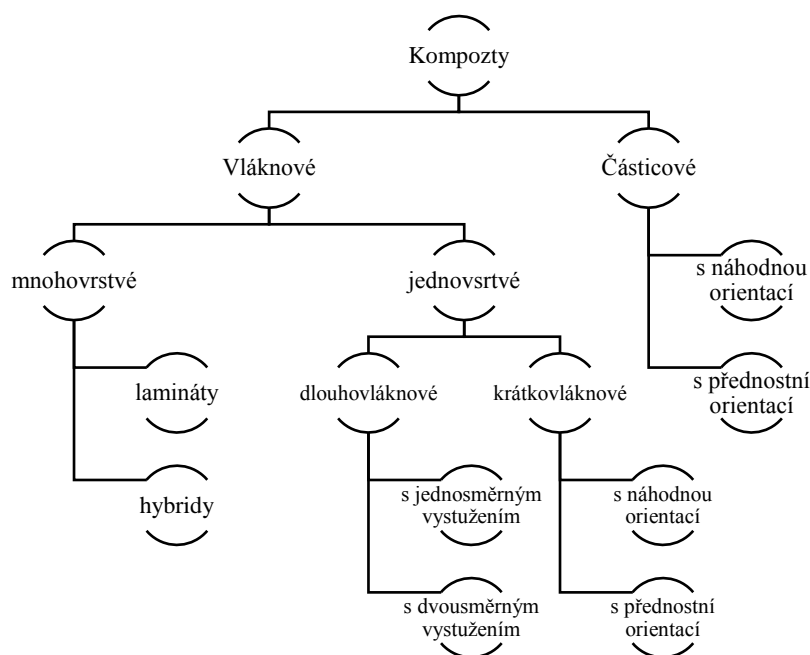
Na základě dostupných zdrojů, analýzy dokumentů a explanace je provedeno zpracování problematiky aplikace vláknových kompozitů v konstrukci automobilu.

Hlavně se jedná o excerpci z vědeckých, odborných časopisů a odborné literatury, týkající se vláknových kompozitních materiálů využívaných v konstrukci automobilu. Z vybraných poznatků je v rešerši struktura výskytu vláknových kompozitu a technologie jejich výroby. Poslední částí je nastínění budoucího vývoje dané problematiky.

### 3 Rešerše – možnosti využití kompozitů v automobilovém průmyslu

#### 3.1 Kompozitní materiál

Slovo kompozitní, nabývá významu: zhotovený či skládající se ze dvou nebo více odlišných částí. Materiál obsahující dvě nebo více odlišných materiálových složek, neboli fází a podle tohoto je tedy složeným materiálem. A však jen tehdy, pakliže mají vytvořené fáze značně rozdílné fyzikální vlastnosti, a tím pádem i vlastnosti složeného materiálu jsou velmi odlišné od vlastností jeho složek, pak označujeme takovýto materiál jako kompozitní materiál. Například běžné kovy mají v sobě obsaženy nežádoucí nečistoty nebo slitinové prvky, jednotlivé složky mají často téměř identické vlastnosti (např. modul pružnosti) a jedna z fází bývá přítomna v malém objemovém podílu, proto nejsou obecně klasifikovány jako kompozity. Klasifikace většiny dosud vyvinutých kompozitních materiálů je vytvářena pro zlepšení mechanických vlastností. Hierarchie razení kompozitu je zobrazena na obr. 1. [1]



Obr. 1 klasifikace kompozitních materiálů [1]

##### 3.1.1 Charakteristiky kompozitních materiálů

Kompozit je tvořen jednou nebo více nespojitých fází, obklopen spojitou částí. Nespojitá fáze je většinou tvrdší a pevnější než spojitá fáze a je nazývána vyztužení nebo vyztužovací materiál, zatímco spojitá se nazývá matrice. Vlastnosti kompozitů jsou převážně ovlivňovány vlastnostmi svých materiálových složek, jejich distribucí a interakcí. Vlastnost

kompozitu může být součtem vlastností složek podle jejich objemového podílu. Nebo složky mohou na sebe navzájem působit synergetickým způsobem, poté zajišťují kompozitu vlastnosti, které nesmějí být přičítány prostému součtu vlastností složek na základě jejich objemových podílů. Proto při popisu kompozitu jako materiálového systému je potřeba dbát nejen na specifikaci materiálů a vlastností složek, ale i na jejich geometrii vyztužení vzhledem k systému. Z aplikačního hlediska je většina vláknů vyztužených materiálů v automobilovém průmyslu uspořádána vrstveně a je nazývána lamináty. [1, 2]

### **Geometrický tvar vyztuže**

Geometrické tvary vyztuže jsou oddělovány v závislosti na kompozitním materiálu. U částicových kompozitů jeden rozměr útvarů vyztuže výrazně nepřesahuje rozměry ostatní. Vyztužující částice pak mohou mít tvar kulovitý, destičkovitý, tyčinkovitý i nepravidelný.

U vláknových kompozitů jeden rozměr vyztuže je výrazně větší než rozměry zbývající. Vláknové kompozity jsou děleny na kompozity s krátkými vlákny a kompozity s dlouhými (kontinuálními) vlákny. Krátká vlákna jsou výrazně menší v porovnání s daným výrobkem, zatímco dlouhá vlákna jsou srovnatelná s velikostí výrobku. Platí také, že poměr délky a průměru vlákna  $L/D$  je  $L/D \geq 100$  pro dlouhá vlákna a  $L/D < 100$  pro krátká vlákna. [3, 4]

### **Koncentrace**

Koncentrace se většinou udává v objemovém nebo hmotnostním podílu. Koncentrace je obecně brána za nejdůležitější parametr ovlivňující vlastnosti kompozitu a zároveň je jednoduše kontrolovanou výrobní proměnou užívanou pro upravování vlastností kompozitu. [1]

### **Koncentrační distribuce**

Koncentrační distribuce je mírou homogenity systému. Homogenita je důležitou charakteristikou, která určuje rozsah, ve kterém se mohou objemové části materiálu lišit ve fyzikálních a mechanických vlastnostech od průměrných vlastností materiálu. Nehomogenita je nežádoucí, protože zhoršuje ty vlastnosti, které jsou řízeny nejslabším článkem v materiálu a mohou být následkem například lomu. [1]

### **Orientace**

Orientace vyztužení ovlivňuje izotropii systému. Částicový kompozit se chová jako izotropní materiál, pakliže vyztužující částice (tvar s rozměry) jsou ve všech směrech přibližně

stejně, pokud jsou vyztužovací částice nestejně, může se kompozit chovat jako izotropní materiál za předpokladu, že částice jsou náhodně uspořádány jako v náhodně orientovaném kompozitu vyztuženém krátkými vlákny. V ostatní případech se kompozit chová jako anizotropní. Anizotropie může být žádoucí u jednosměrných nebo ve vrstvených vláknových kompozitech, pro získání anizotropie v určitých směrech může být dosaženo vytvořením vhodného návrhu a výrobou. Orientace výrazným způsobem ovlivňuje také další mechanické vlastnosti kompozitu. [1, 2]

### **3.1.2 Částicové kompozity pro automobilový průmysl**

Rozměry vyztužení určují její schopnost přispívat k vlastnostem kompozitu. Částice nejsou při zlepšování lomové odolnosti oproti vláknovým kompozitům příliš účinné. Částice jsou účinné pro zlepšování tuhosti kompozitů, ale nenabízejí možnost podstatného zvýšení tahové pevnosti. Částicová plniva jsou však velmi užívána k zlepšení vlastností matricových materiálů například pro úpravu tepelné vodivosti a elektrické vodivosti, k zlepšení chování při zvýšených teplotách, k redukci tření, k zvýšení odolnosti vůči opotřebením a otěru, pro zlepšení obrobiteľnosti zvýšení povrchové tvrdosti a k redukci smrštění. V automobilovém průmyslu jsou částicové kompozity využity především v pohonné části konstrukce automobilu. Materiál částic a matrice v částicovém kompozitu může být jakákoliv kombinace nekovových či kovových materiálů. [1, 5]

I částicové kompozity jsou čím dál více v automobilovém průmyslu využívány. Automobilky jsou vystavovány nátlaku pro snižování spotřeby paliva, zatímco spotřebitele požadují lepší interiérové vybavení a moderní elektronické systémy pro zvýšení bezpečnosti, navigace, zábavy. Všechny tyto komponenty zvyšují váhu vozu. Bylo vyzkoumáno, že při 10% snížení hmotnosti vozu se sníží spotřeba o 5,5 %. Hliníkový blok motoru, části odpružení vozu, panely karoserie a rámu navíc s přidáním hořčíku v komponentech jako kryty ventilů, skříně převodovek, sloupku řízení atd. jsou obsaženy v každém voze, kombinováním nebo výměnou za pokročilejší mikro a nano-kompozitu s kovovou maticí (MMC) je možno nejen snížit hmotnost, ale také zlepšit spolehlivost a efektivitu. [5]

### **3.2 Vlákenné kompozity pro automobilový průmysl**

Paradox pevného materiálu: Skutečná pevnost materiálu je podstatně nižší než pevnost vypočítaná teoreticky. [2]

U většiny materiálu jsou naměřené hodnoty pevnosti mnohonásobně menší (o několik řádů) než jejich teoretické hodnoty. Rozdíl hodnot pevnosti se přičítá vrozeným nedokonalostem a vadám v materiálu. Zvláště pevnost poškozují vady ve tvaru trhlin, které leží kolmo ke směru působícího zatížení. [1]

Paradox vláknité struktury: Materiál ve formě vláken má mnohonásobně vyšší pevnost než stejný materiál v kompaktní formě. Čím je vlákno tenčí, tím je jeho pevnost vyšší. [2] V důsledku malého příčného průřezu dochází k minimalizaci rozměrů vrozených vad materiálů, včetně vad povrchových. Řádově příznivější hodnoty jsou u klasických materiálů, jako jsou ocel, hliník než u plastů. Tab. 1 porovnává rozdílný E-modul a mez v pevnosti v tahu u různých materiálu mezi kompaktní a vláknovou formou. Ve formě vlákna je pevnost plastů řádově vyšší než u formy kompaktní. Z důvodu malých průřezových rozměrů se vlákna nemohou používat v technických aplikacích přímo. Vkládají se proto do maticových materiálů, aby vytvořily vláknové kompozity. [1, 2]

Materiál	E-modul (N*mm <sup>-2</sup> )			Mez pevnosti v tahu (N*mm <sup>-2</sup> )		
	Teoretický	naměřený		Teoretický	Naměřený	
		Vlákno	Kompaktní forma		Vlákno	Kompaktní forma
<b>Polyetylen</b>	300 000	100 000 (33%)	1 000 (0,33%)	27 000	1 500 (5,5%)	30 (0,1%)
<b>Polypropylen</b>	5 000	20 000 (40%)	1 600 (3,2%)	16 000	1 300 (8,1%)	38 (0,24%)
<b>Polyamid</b>	160 000	5 000 (3%)	2 000 (1,3%)	27 000	1 700 (6,3%)	50 (0,18%)
<b>Sklo</b>	80 000	80 000 (100%)	70 000 (87,5%)	11 000	4 000 (36%)	55 (0,5%)
<b>Ocel</b>	210 000	210 000 (100%)	210 000 (100%)	21 000	4 000 (19%)	1 400 (6,67%)
<b>Hliník</b>	76 000	76 000 (100%)	76 000 (100%)	7 600	800 (10,5%)	600 (7,89%)

Tab. 1 Porovnání teoretických a experimentálně zjištěných hodnot E-modulu a meze pevnosti v tahu některých konstrukčních materiálů. [2]

### 3.2.1 Vytuzující vlákna

Vlákna jako konstrukční materiál automobilu se cíleně používají zřídka. V kompaktní formě se stávají zajímavou skupinou materiálů, jako je tomu v kompozitních materiálech. [2]

#### Skleněná vlákna využívaná v automobilovém průmyslu

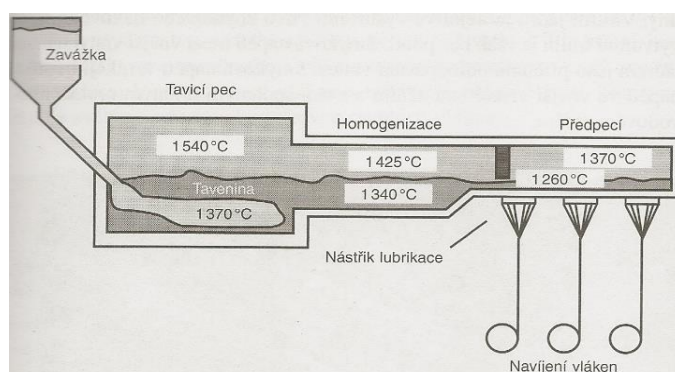
Textilní skleněná vlákna (GF) je společným názvem pro tenká vlákna (průměru 3,5 až 24 μm) s pravidelným kruhovým průřezem, tažená z roztavené skloviny, výrobní proces je zobrazen na obr. 2. Skleněná vlákna z bezalkalické skloviny jsou vynikajícím elektrickým

izolantem s vysokou propustností prozáření. Označují se jako E-vlákna vyráběná z E-skloviny. Jsou nejčastěji používaným druhem skloviny pro výrobu vláken, které postupně obsadily téměř 90 % trhu jako standartní typ. R-sklovina (v USA označována jako S-sklovina a v Japonsku jako T-sklovina) je sklovina s vyšším obsahem  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$  a  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a má o 40 až 70 % vyšší pevnost. Dále se vyrábí C-sklovina, ECR-Sklovina a AR-sklovina, jsou to vlákna s vysokou chemickou odolností. V konstrukci automobilu jsou nejčastěji využívána E-vlákna. [2]

Vlastnosti skleněných vláken – shrnutí:

- Skleněné vlákno je izotropní (materiálové vlastnosti jsou v podélném i příčném směru totožné).
- Modul pružnosti v tahu (E-modul) skleněných vláken a hliníku je přibližně stejně velký a tvoří přibližně jednu třetinu hodnoty oceli. Pevnost v tahu je větší než u většiny organických i anorganických vláken a je podstatně vyšší než u oceli (v kompaktní formě). Nižší hustota skla má za následek zvláště vysokou hodnotu měrné pevnosti vláken.
- Mez průtažnosti je kolem hodnoty 3 %. Deformace je téměř elastická oproti syntetickým vláknům, které mají viskoelastické chování.
- Tepelné vlastnosti překonávají jiné materiály, ani dlouhodobé tepelné namáhání při 250°C nesnižuje hodnoty mechanických vlastností. Tepelná vodivost je vyšší než u ostatních materiálů, ale nižší než u kovů.
- Jsou nehořlavá, a tudíž ohnivzdorná. Pro kompozity jsou vhodná.
- Bod měknutí E-skloviny je vyšší než 625°C.
- Součinitel teplotní délkové roztažnosti je nižší než u většiny konstrukčních materiálů.

[2]



Obr. 2 Výroba textilních skleněných vláken tažením z trysek [2]

Skleněná vlákna jsou v automobilovém průmyslu jako vyztužující materiál využívána nejčastěji, zejména kvůli poměru cena/výkon. Aplikována jsou pro jejich pevnost v tahu, teplotní odolnost a rozměrovou stabilitu. Oblast použití je velice široká, ať už s použitím termosetické či termoplastické matrice. Výskyt skleněných vláken v automobilu je např. jako výztuže pro pryžové hnací řemeny, zesílení kaučukových a termoplastických profilů (výztuhy nárazníku apod.), ochrana kabelových svazků a hadic před teplem a otěrem, spojkové lamely a brzdové destičky (které jsou vyztuženy tkanými skleněnými vlákny k zachování integrity kompozitu v horkém a abrazivním prostředí), stropní vložky, izolace, či části karoserie (blatníky, kapoty). [6]

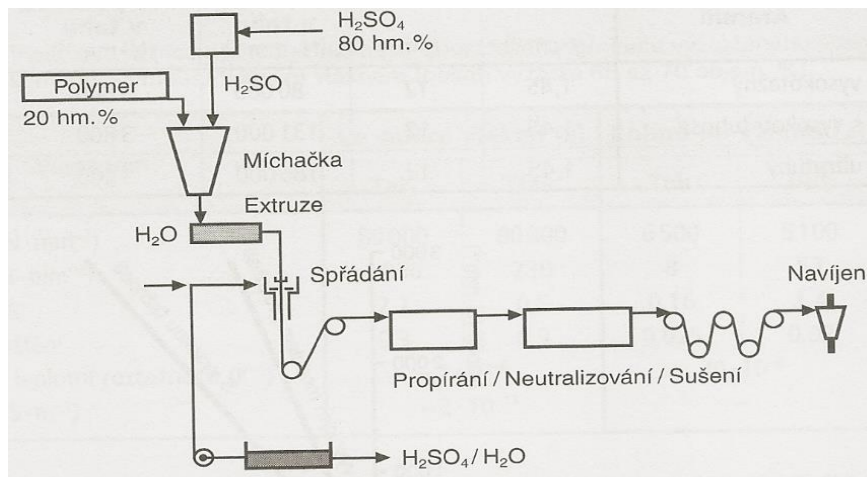
### **Aramidová vlákna využívaná v automobilovém průmyslu**

Aramidová vlákna (AF) jsou vlákna na bázi lineárních organických polymerů, jejichž kovalentní vazby jsou orientovány podle osy vlákna, předností těchto vláken je vysoká pevnost a tuhost. Výroba vláken spřádáním z taveniny není možná (teplota roztavení leží nad teplotou tepelného rozkladu). Vysoce krystalická vlákna se silně orientovanými molekulami se spřádají z vysoko viskózního 20% roztoku v koncentrované kyselině sírové. Výrobní postup je vidět na obr. 3. Aramidová vlákna se mohou zpracovávat se všemi běžnými reaktivními pryskyřicemi i termoplasty. [2]

Vlastnosti aramidových vláken – shrnutí:

- Nejlehčí vyztužující vlákno, hustota  $\rho=1,45 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ .
- Je silně anizotropní
- Mez pevnosti v tlaku ve směru vláken je podstatně nižší než mez pevnosti v tahu. Vhodné pro lehké konstrukce tahově namáhané. Nevhodné pro konstrukce namáhané ohybem nebo tlakem.
- Jsou hydrofilní (absorbují vlhkost), před použitím musí být vysušena. Vlhkost má vliv na pevnost spoje mezi vláknem a matricí, ale i pevnost vlastního vlákna.
- Při expozici zářením s vysokou energií (např. UV záření) dochází k výraznému poklesu pevnosti.
- Jako každá organická vlákna nejsou příliš odolná proti vysokým teplotám. Ve formě kompozitu odolávají teplotě 300°C, neroztaví se a jsou vhodná pro protipožární obleky.
- Adheze k matrici je často nižší oproti ostatním vláknům.
- Vytvrzené konstrukční prvky se obtížně obrábějí. [2]





Obr. 3 Výroba aramidových vláken [2]

Aramidová vlákna jsou podobně jako skleněná vlákna široce využívána pro automobilový průmysl např. jako součást hadic odolávajících vysoké teplotě u turbodmychadel. Obdobně jako u skleněných vláken jsou též aramidová vlákna součástí řemenů, brzdového a spojkového obložení. U závodních vozů jsou aramidová vlákna použita na části karoserie nebo části podvozku z důvodu bezpečnosti. Mohou být i součástí pneumatik kde snižují možnost defektu, zvyšují odolnost vůči trhání, zlepšují otěrových vlastností, a to s nižší hmotností. U speciálních vozidel jsou využita jako brnění proti útoku střelnými zbraněmi. [7]

### Uhlíková vlákna využívaná v automobilovém průmyslu

Uhlíková vlákna (CF) jsou technická vlákna s extrémně vysokou pevností a tuhostí, ale s nízkou tažností. Výchozí organické suroviny ve vláknitém tvaru jsou nejprve karbonizovány. Přitom se odštěpí téměř všechny prvky až na uhlík. Se stoupající teplotou se zvyšuje grafítizace, a zlepšují se mechanické vlastnosti. Při teplotě 1800°C je tvorba grafitové struktury ukončena, podle hlavních znaků struktury určíme typ vlákna (tab. 2). [2]

Výchozí suroviny pro výrobu jsou tři materiály:

- Celulóza - méně dokonalá struktura převážně využívaná jako izolační materiál pro vysoké teploty).
- Polyakrylonitril (PAN) – vlákna z něj jsou považována za standartní vlákna, schéma výroby je zobrazeno na obr. 4.
- Smola – příznivá cena (nákladná výroba ale nízká cena výchozí suroviny) podstatně nižší pevnost v tlaku oproti standartním vláknům. Na trhu mají pouze malý podíl. [2]

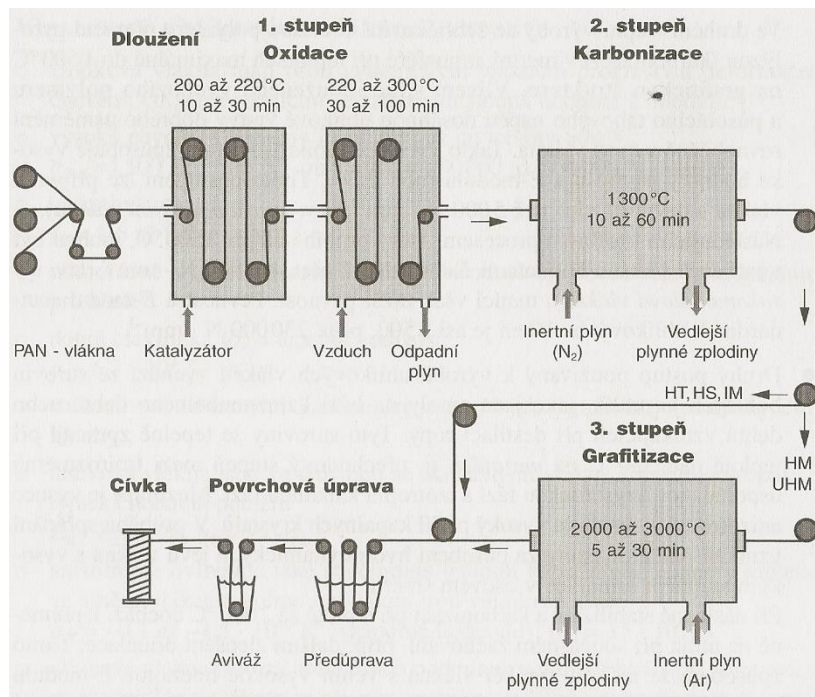
Hlavní znaky struktury	Typ uhlíkového vlákna
Roviny vrstev převážně rovnoběžné s osou vláken, osově nepravidelná struktura	Vysoce pevné (HT) vlákno
Roviny vrstev zcela rovnoběžné s osou vláken, osově pravidelná struktura	Vlákno s vysokým modulem pružnosti (HM)
Žádná zratelná orientace, velmi slabé uspořádání vláken v osovém směru	Sekaná vlákna s nízkou pevností (LM)

Tab. 2 Rozdělení uhlíkových vláken podle struktury [2]

Vlastnosti uhlíkových vláken – shrnutí:

- Mají progresivní deformační chování oproti syntetickým vláknům (se zvyšujícím se zatížením stoupá hodnota E-modulu).
- Vysoká pevnost i hodnoty E-modulu až do teploty 500°C.
- Nízká hustota  $\rho = 1,6$  až  $2,0 \text{ g*cm}^{-3}$ .
- Korozní odolnost mimořádně vysoká.
- Dobrá elektrická a tepelná vodivost.
- Snášelivost s tělesnými tkáněmi.
- Jsou silně anizotropní.
- Jsou za normálních podmínek velmi křehká. Při zpracování se povrchově upravují.
- Mají vysokou odolnost proti dynamickému namáhání. Lamináty mají lepší dynamické vlastnosti i oproti hliníku či oceli).
- Jsou hořlavá, avšak hoří velmi pomalu. [2]

V současné době zájem o uhlíkové kompozity v autoprůmyslu markantně roste. Dnes jsou využívána především na části karoserií, podvozků a rámu zejména u prémiových značek a sportovně laděných vozů. Důvodem použití pouze u dražších vozidel jsou vysoké náklady na výrobu. Standardní typ uhlíkového vlákna HT je až 40x dražší než skleněné vlákno. Ovšem v blízké budoucnosti budou součástí všech vozidel. Například v současné době automobilka Ford spolupracuje s firmou DowAksa a Americkým ministerstvem energie na velkoobjemové výrobě uhlíkových vláken a kompozitů. Cílem je překonat vysoké náklady a omezenou dostupnost. [8]



Obr. 4 Schéma výroby uhlíkových vláken PAN-vláken [2]

## Přírodní vlákna využívaná v automobilovém průmyslu

Pro vyztužování plastů jsou ze všech přírodních vláken vhodná pouze vlákna rostlinná, která mají jako základ celulózu. Mezi ně patří len, konopí, sisal, juta, ramie a bavlna, v tab. 3 jsou vyčísleny mechanické vlastnosti s porovnáním se skelnými vlákny. Jejich výhodou je odolnost stárnutí a čichová nezávadnost při měnících se klimatických podmínkách. Přírodní vlákna dosahují dobrých hodnot i v pevnosti v tahu. Vzhledem k nízké měrné hmotnosti jsou tato přírodní rostlinná vlákna zajímavou surovinou pro lehké konstrukce pro aplikaci v automobilovém průmyslu. [2]

Vlastnosti \ Vlákno	Sklo	Konopí	Len	Juta	Sisal
<b>E-modul (N*mm<sup>-2</sup>)</b>	75 000	70 000	30 000	55 000	20 000
<b>Mez pevnosti v tahu (N*mm<sup>-2</sup>)</b>	3 500	600	750	550	600
<b>Tažnost (%)</b>	4	1,6	2,0	2,0	2,0
<b>Hustota (g*cm<sup>-3</sup>)</b>	2,54	1,45	1,48	≈1,4	1,45

Tab. 3 Porovnání mechanických vlastností přírodních vláken a skleněných vláken. [2]

Přednosti:

- Nízká hustota.
- Malá abrazivita při mechanickém opracování.
- Výhodná likvidace spalováním. [2]

Problémy působí:

- Podmínky růstu mají vliv na vlastnosti vláken.
- Citlivost na vlhkost.
- Nebezpečí rozkladu vláken při vysoké teplotě zpracování (odolnost do 200°C) omezené možnosti volby matrice.
- Zhoršené vazby s matricí, pro zlepšení nákladná úprava.
- Omezená délka vláken.
- Biologické napadení může vyvolat změny. [2]

Z kompozitních materiálů vyztužených přírodním vláknem se staly v poslední době velmi perspektivní materiály, s ohledem na celosvětový důraz ekologických předpisů. Přírodní vlákna zejména sníží nejen problémy s likvidací odpadu, ale také sníží zatížení životního prostředí. Kompozity vyztužené přírodním vláknem jsou ekologicky atraktivním materiálem. Bylo prokázáno, že jako alternativa oproti tradičním skleněným vláknům mají přírodní vlákna mnoho výhod. Mezi hlavní výhody patří: nízká cena, dobré tepelné a zvukové izolační vlastnosti, snížení rozšíření CO<sub>2</sub>, lepší využití energie, snížení dermálního podráždění dýchacích cest a snížení opotřebení nástrojů na obrábění. V automobilovém průmyslu jsou používána především vlákna (kokosová, konopí a sisal). V roce 2014 bylo provedeno srovnání s vlákny datlovníkové palmy, které obstály velmi dobře v mnoha ohledech a jejich použití by mělo být nejvýhodnější ve většině průmyslových aplikací v automobilovém průmyslu. Přírodní vlákna se v automobilu vyskytují zejména v interiéru jako zvuková a tepelné izolace části přístrojových desek a jiných interiérových prvků. Již v současné době automobilky aplikují přírodní vlákna např. jako výztuže dveřních panelů, různé automobilky používají různá vlákna. Například automobilka Mercedes-Benz aplikuje jutu, Daimler Chrysler kombinaci len, konopí, kokos a Audi kombinaci len, sisal. [9, 10]

### 3.2.2 Matrice

Matricí je prosycen systém vláken (nebo partikulární komponent u částicových kompozitů) tak, že po zpracování vznikne tvarově stálý výrobek. Úkolem matrice je zaručení geometrického tvaru, zavedení a přenos sil, ochrana vláken. Tím se rozumí:

- Přenos namáhání na vlákna.
- Převod namáhání z vlákna na vlákno.
- Tvarová stálost výrobku a zajištění vláken v geometrické poloze.
- Ochránit vlákna před vlivem okolního prostředí. [2]

Zásadním hlediskem pro kvalitu kompozitu je zajištění adheze na fázovém rozhraní matrice-vlákno. Pro dosažení lepší fyzikální a případně i chemické vazby mezi vláknem a matricí se nanese na vlákno apretace vhodná pro určitý druh matrice. Matrice musí mít vhodnou viskozitu a povrchové napětí, aby vlákno smočila úplně a bez bublin. [2]

#### 3.2.2.1 Reaktivní pryskyřice pro vláknové kompozity v automobilovém průmyslu

Při výrobě vláknových kompozitů pro automobilový průmysl tvoří nejčastěji používanou skupinou termosetů. Kapalné nebo tavitelné pryskyřice, které buď samostatně, nebo za pomoci jiných složek (tvrdidel) vytvrzují polyadici nebo polymeraci bez odštěpení těkavých složek. [2]

Nejdůležitější typy reaktivních pryskyřic patří: Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP-R), Vinylesterové pryskyřice (VE-R), Fenakrylátové pryskyřice (PFA-R), Epoxidové pryskyřice (EP-R), Metakrylátové pryskyřice (MA-R). [2]

Reaktivní pryskyřice (termosety) jsou v počátečním stavu nízkomolekulární, a proto za normální teploty nízko viskózní, takže dobře smáčejí a prosycují vlákna výztuže. Musí se nejprve chemicky vytvrdit, aby dosáhly své konečné konzistence. Mezi nejdůležitější tvrdidla patří iniciátory a urychlovače, ale také aldehydy (fenol). [2]

#### **Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP-R)**

Roztoky v reaktivních rozpouštědlech lze vytvrzovat za normální, či zvýšené teploty bez vzniku těkavých vedlejších produktů. Uvolňují reakční teplo při vytvrzování a dochází k objemovému smrštění o 5-9 %. UP-R jsou v mnoha případech nejčastěji používaným materiálem pro kompozitní aplikace, kvůli nízké viskozitě, dobrému smáčení vláken, vysoké

rychlosti vytvrzování a nízké ceně. Základní typy s vlastnostmi a použitím ukazuje tab. 4. Existuje mnoho typů s různými vlastnostmi na základě různosti základních molekul. [2]

Vlastnosti Zák. Složky	$\eta$ (mPa*s)	HDT/Tg (°C)	$\sigma_{Pt}$ (N*mm <sup>-2</sup> )	E (N*mm <sup>-2</sup> )	$\delta$ (%)	Použití
Kyselina ortoftalová, standartní glykoly	700-900	90/122	85	4400	2,4	Středně až vysoce reaktivní, sklon k vzniku trhlin: nádrže potrubí výlišky
	240-290	108/130	80	3470	4,2	Vysoce reaktivní, nízká viskózní, dobré prosycování při ruční laminaci a injektování, lze hodně plnit
Dicyklopentadien	450-1000	70/-	66	3500	3,0	Dobře ze síťování, nízké prorážení výztuže
Kyselina treftalová	540-610	125/-	60	3350	2,1	Vysoká tepelná odolnost: Laminátové nádrže, potrubí (na uhlovodíky)
Kyselina maleinová, standartní glykoly	1150- 1400	145/-	55	3400	1,7	Základní pryskyřice pro lisovací hmoty (SMC) s malým smrštěním
Kyselina izoftalová, standartní glykoly	3000- 3600	130/150	60	3700	1,8	Vysoko viskózní pryskyřice pro lisovací hmoty (SMC/BMC) dobrá odolnost proti hydrolyze

Tab. 4 Vlastnosti a použití různých nenasyčených polyesterových pryskyřic. E-modul pružnosti v tahu, HDT-tvarová stálost za tepla, T<sub>g</sub> – teplota skelného přechodu,  $\delta$  – tažnost,  $\eta$  – viskozita,  $\sigma_{Pt}$  – mez pevnosti v tahu. [2]

Zvláštní vlastnosti nenasyčených polyesterových pryskyřic:

- Levné, spolehlivé a mnohostranně použitelné licí pryskyřice.
- Velká variabilita při zpracování, možnosti volby obsahu jednotlivých složek – styrenu a katalyzátoru/urychlovače.
- Velké smrštění při zpracování (5-9 %) z velké části po zgelovatění.
- Proti povětrnostním podmínkám dobrá odolnost, alkalickému namáhání částečně neodolávají.
- Působení styrenu = velké nároky na životní prostředí. [2]

Výběrem výchozího materiálu a pomocí různých přísad lze u nenasyčených polyesterových pryskyřic měnit zpracovatelnost i vlastnosti vyrobených pryskyřic ve velkém rozsahu. V automobilovém průmyslu jsou nenasyčené polyesterové pryskyřice využívány pro vláknové kompozity: např. pro technologie SMC viz str. 24 a technologie BMC viz str. 26. Z důvodu dobré odolnosti proti aromatickým uhlovodíkům jsou též využívány pro nádrže automobilů nebo součásti palivového systému. Pro automobilový průmysl největší problémy působí poměrně velké smrštění a zatížení životního prostředí. [2, 10]

## **Vinylesterové pryskyřice (VE-R)**

Od UP-R se liší tím, že zesíťování probíhá pomocí koncových metakrylátových skupin, kde jsou také esterové vazby. Vinylesterové pryskyřice vycházejí ze základních složek fenolických pryskyřic, jsou podstatně reaktivnější a vzhledem ke kratším molekulovým řetězcům mají nižší viskozitu a vyšší stupeň zesíťování. Proti vyšším teplotám jsou proto odolné, ale také relativně křehké (podobnost materiálům z UP-R na bázi propoxylovaného bisfenolu A). Jsou většinou rozpuštěny ve styrenu. Základní typy včetně vlastností a použitím jsou vypsány v tab. 5. [2]

### **Vinylester uretanové pryskyřice (VEU-R)**

Spojují dobré mechanické vlastnosti (tuhost) VE-R s vynikající odolností proti vysokým teplotám ( $T_g=220^{\circ}\text{C}$  a  $\text{HDT}=210^{\circ}\text{C}$ ) a vysokou chemickou odolnost (lepší než u VE-R). Nabízejí tixotropicitu a dobrou vazbu se skleněným vláknem. Oproti VE-R jsou však o něco křehčí a více hydrofilní. [2]

Zvláštní vlastnosti vinylesterových pryskyřic:

- Ve srovnání s UP-R jsou VE-R houževnatější a dražší.
- Velká variabilita při zpracování pomocí dávkování styrenu a urychlovače.
- Aplikace v korozním prostředí.
- Zatížení životního prostředí styrenem. [2]

Vinylesterové pryskyřice mají oproti nenasyceným polyesterovým pryskyřicím dvě přednosti: jsou výrazně houževnatější a mají vyšší chemickou odolnost. Stejně jako u UP-R je k dispozici široká paleta různých typů. V automobilovém průmyslu jsou nenasycené polyesterové pryskyřice využívány pro vláknové kompozity: pro některé druhy prepregů viz str. 22 použity například pro výrobu obalu pro baterie u elektricky poháněných vozů nebo pro technologii RTM viz str. 23, použity pro výrobu částí podlah nebo vnitřní částí kapotáže. Též mohou být zpracovávány technologií SMC viz str. 24. [2, 11, 12]

Vlastnosti Zák. složky	Nevytvrzená pryskyřice	Vytvrzená pryskyřice				Použití
	$\eta$ (mPa*s)	HDT/Tg (°C)	$\sigma_{Pt}$ (N*mm <sup>-2</sup> )	E (N*mm <sup>-2</sup> )	$\delta$ (%)	
Bisfenol A- Epoxid	440-500	105/130	95	3600	6,1	Středně reaktivní: pro nádrže, potrubí, sanaci kanálů
	360-400	105/130	95	3600	6,1	Středně reaktivní, se sníženou emisí styrenu
	650-750	107/132	90	3800	3,9	Velmi dobré mechanické vlastnosti a chemická odolnost: možno vytvrzovat UV zářením
	400-500	115/132	83	3500	4,2	Pryskyřice pro prepregy a lisovací hmoty s vysokou protikorozní chemickou odolností: použití pro části automobilů
Bisfenol A- uretan	400-500	125/-	85	3300	5-6	S vysokou tepelnou a chemickou odolností tixotropizovatelná, vhodná pro aramidová vlákna
Flexibilizovaný bisfenol A- uretan	210-280	140/150	90	3500	4,0	S velmi vysokou tepelnou a chemickou odolností při současně vysoké pružnosti, velmi dobré prosycení vláken
Epoxid novolak	1000	135/160	75	3400	2,6	S tepelnou a korozní odolností: nádrže, potrubí

Tab. 5 Vlastnosti a použití vinyl esterových pryskyřic. E - modul pružnosti v tahu, HDT – tvarová stálost za tepla, Tg – teplota skelného přechodu,  $\delta$  – tažnost,  $\eta$  – viskozita,  $\sigma_{Pt}$  – mez pevnosti v tahu. [2]

### Epoxidové pryskyřice (EP-R)

Epoxidové pryskyřice jsou kapalné až pevné látky (za normální teploty), mohou obsahovat např. rozpouštědla a jiné pomocné látky. V molekule obsahují většinou dvě epoxidové skupiny. Epoxidové systémy se skládají ze vzájemně reagujících molekul pryskyřic a tvrdidla. Tvrdidlo se musí s EP-R mísit v přesném stechiometrickém poměru. Vlastnosti vytvrzených pryskyřic jsou ve velkém rozsahu ovlivněny tvrdidlem, které je většinou přizpůsobeno pro speciální aplikaci. Vhodnou volbou pryskyřice, tvrdidla a přísad lze dosáhnout mnoha rozdílných vlastností pojiva. Přehled některých používaných systémů pryskyřice-tvrdidlo pro aplikace kompozitů v automobilovém průmyslu uvádí tab. 6. [2]

Zvláštní vlastnosti epoxidových pryskyřic:

- Cenově jsou nevýhodné, 3 až 4krát dražší než UP-R.
- Potřeba dodržení přesného stechiometrického poměru při mísení pryskyřice/tvrdidlo.
- Velmi dobré mechanické vlastnosti (zejména při dynamickém namáhání) jako matrice vhodné pro vysoko pevnostní vlákna (např. uhlíková).



- Pro poměrně vysokou viskozitu a pomalou vytvrzovací reakci jsou hůře zpracovatelné než UP-R nebo VE-R.
- Rozsah tepelného odolnosti je vyšší než u UP-R a VE-R (teplota skelného přechodu  $T_g > 200^\circ\text{C}$ ).
- Možné podráždění kůže a alergie při zpracování kapalných pryskyřic. [2]

Vlastnosti Zák. složky	Nevytvrzená pryskyřice	Vytvrzená pryskyřice				Poznámky
	$\eta^*$ (mPa*s)	HDT/Tg (°C)	$\sigma_{Pt}$ (N*mm <sup>-2</sup> )	E (N*mm <sup>-2</sup> )	$\delta$ (%)	
Roztok brómované EP-R	2100-2900	135-140	-	-	-	FR4 produkt pro prepregy a lamináty: desky pro tištěné spoje řídicích jednotek
Bisfenol A EP-R s formulovaným aminovým tvrdidlem	5200-6000	185-195	110-120	2800	5,5-6,5	Systém s dobrou odolností proti hydrolyze
Formulová EP-R pryskyřice s cykloalifitackým aminovým tvrdidlem	500-700	143-148	71-77	2600	4,5-5,5	Zpracovatelná technologií RTM laminování
Houževnatá modifikovaná EP-R s aminovým tvrdidlem	720-860	100-110	120-130	2800	9,0-12,0	Dobré mechanické vlastnosti a tažnost
Formulová EP-R s aminovým tvrdidlem	320-380 350-400	90-105	125-130	2900	7,0-12,0	Nízko viskózní flexibilní systém pro průmyslné aplikace
Formulová EP-R s tvrdidly na bázi alifatických polyamidů	300-400 550-800 1000-1200	81-86 77-82 85-89	70-74 82-86 85-90	3200 3500 3700	10,0-13,0 5,2-5,8 5,0-6,2	Nastavitelná reaktivita: systémy pro laminování velkých konstrukčních dílů
Modifikovaná bez rozpouštědlová pryskyřice s nadouvadlem a polyaminovým tvrdidlem	-	125-127	-	-	-	Aplikace v oblasti lehčených EP-systémů
Formulovaná expandující EP-R	-	125-135	-	-	-	Nízko emisní expandující systém: pro automobilový průmysl
Tetrafunkční EP-R vytvrzovaná aromatickým polyaminem	7000-19000 (50°C)	236	90	3400	2,0-3,0	Vícefunkční vysoko pevnostní pryskyřice: pro formulování prepregů
Dvousložkový systém na bázi bismaleinimidu	800-1000 (100°C)	290-300	176	3400	5,0-8,0	Systém s vysokou tepelnou odolností

Tab. 6 Vlastnosti a použití epoxidových pryskyřic. E - modul pružnosti v tahu, HDT – tvarová stálost za tepla, Tg – teplota skelného přechodu,  $\delta$  – tažnost,  $\eta$  – viskozita,  $\sigma_{Pt}$  – mez pevnosti v tahu.

\*) Viskozita při teplotě 25°C (není-li uvedeno jinak) [2]

Stejně jako u jiných pryskyřic, i zde existuje mnoho typů a modifikací. EP-R mají vysokou kvalitu a jsou používány především pro drahé výztuže jako např. uhlíkové vlákno. V automobilovém průmyslu vzhledem kvůli vyšší kvalitě epoxydových pryskyřic se většinou využívají pro výrobu velkých konstrukčních a nosných dílů automobilů vyráběných pomocí epoxydových prepregů viz str. 22 nebo technologií RTM viz str. 23. Kompozity tvořené z epoxydových pryskyřic vykazují menší smrštění než u UP-R a VE-R, to má za následek nižší vnitřní pnutí, vyšší pevnost, rozměrovou přesnost a stálost, z tohoto důvodu jsou také aplikovány na exteriérové komponenty vozu a bezpečnostní části vozu. [2, 13, 14, 15]

### **Fenolické pryskyřice (PF-R)**

Fenolické pryskyřice jsou vyrobeny kondenzací fenolů a 30-50% vodných roztoků aldehydů (především formaldehydu). Z různých druhů fenolických surovin, různých molárních poměrů fenol/formaldehyd a různých chemických nebo fyzikálních modifikacích, vycházejí jednotlivé varianty. Fenolické pryskyřice jsou křehké, proto jsou modifikovány pro většinu konstrukčních aplikací. Používají se k tomu deriváty fenolu jako alkylové fenoly nebo bisfenol A, nebo mohou být modifikovány elastomery. Podíl fenolických pryskyřic ve výrobě klasických vyztužených kompozitů je poměrně nízký. I když mohou být zpracovány řadou běžných technologických postupů (jsou omezeny tím, že při vytvrzování tvoří těkavé látky a pro velkorozměrné díly jsou příliš křehké). [2]

Zvláštní vlastnosti fenolických pryskyřic:

- Jejich zpracování je zatíženo použitím kyselin (rezoly) a odštěpováním reakčních zplodin.
- Jsou vysoce tepelně a chemicky odolné a tvarově stálé.
- Mají příznivé vlastnosti při požáru a při zachování vysoké zbytkové pevnosti (aplikace v dopravních prostředcích). [2]

Fenolické pryskyřice jsou křehké a nedají se použít pro většinu konstrukčních aplikací bez modifikací. Vhodným se ukázalo vytvrzování směsi fenolické a epoxidové pryskyřice, kdy se mohou např. společně lisovat dva odpovídající prepregy. Mezi vynikající vlastnosti patří chemická a tepelná vodivost, nízká hořlavost, velmi nízká hustota kouřových plynů a malá toxicita kouře, proto se používají pro vnitřní vybavení vozidel. Ačkoliv se v současnosti fenolické pryskyřice využívají převážně v interiéru v minulosti, byla využívána pro výrobu duroplastu, z kterého byl vyroben Sachsenring Trabant. [2, 15]

### 3.2.2.2 Termoplastická matrice pro vláknové kompozity v automobilovém průmyslu

Zpracovatelské i uživatelské vlastnosti se od termosetu liší, k velkému počtu různých materiálů jako je matrice, je jejich všeobecné porovnání velmi obtížné. Základní rozdíly mezi termoplastickými a termosetickými kompozity jsou uvedeny v tab. 7. Termoplasty jsou pevné látky za normální teploty, teprve po zahřátí (většinou nad teplotu 200°C) jsou dostatečně tekuté. Snížení viskozity za pomoci použití rozpouštědla je problematické, po odstranění rozpouštědla zůstává u termoplastů snížená odolnost proti korozi při napětí. [2]

	Termoplasty	Termosety
Matrice	Polymerová vysoko viskózní tavenina špatně se spojuje lepením	Nevytvrzená, nízko viskózní dobře se spojuje lepením a opatřuje nátěrem
Cena matrice	Nízká ale i vysoká	Nízká
Před impregnace	Obtížné smáčení a prosycování	Snadné
Cena před impregnace	Vysoká	Nízká
Skladování	Neomezeně skladovatelné	Omezená skladovatelnost (v chladu), reakce pomalu pokračuje
Polotovary	Termoplasty vyztužené skleněnou rohoží (GTM), pásy	Lisovací hmoty SMC (prepregy)
Přímé zpracování	Granulát (krátká vlákna) přímo zpracovatelný dlouho vláknitý polotovary (D-LFT)	Výztuž a reaktivní pryskyřice
Teplota při zpracování	Teplota taveniny	Teplota okolí
Tvarování	Vhodné pro velké série	Nevhodné
Ruční kladení	Nevhodné	Vhodné pro velkoplošné díly
Kladení pásů	Vysoká automatizace, malá lepivost, svařování	Vysoká automatizace, dobrá lepivost, citlivé vytvrzování
Teplota nástroje při lisování	Teplota taveniny 150-180°C	Reakční teplota 140-160°C
Lisovací tlak	GTM: 200-300 N*mm <sup>-2</sup> D-LFT: 30-100 N*mm <sup>-2</sup>	SMC: 20-50 N*mm <sup>-2</sup>
Plocha povrchu	Příměřená, svařitelné	Dobrá, tvrdá: lze ji lepit a natírat
Mechanické chování	Houževnaté, sklon k tečení	Dynamicky zatížitelný, křehký lom
Chování za tepla	Výrazné změkčení při T <sub>g</sub>	Méně závislé na teplotě
Stárnutí	Málo odolné až odolné	Velmi odolné proti stárnutí
Možnost opravy	Omezené	Dobrá

Tab. 7 některé rozdíly mezi vyztuženými termoplasty a termosety [2]

### Polypropylen (PP)

Polypropylen lze používat při teplotě cca +5 až 100°C. Tento materiál vyniká vysokou rázovou houževnatostí, je lehký, avšak stabilní. Má dobrou odolnost proti chemikáliím a především kyselinám. PP je dobře svařitelný, naopak se obtížně lepí. Je odolný proti UV záření. Není náchylný k vnitřnímu pnutí. PP je poměrně levný. V automobilovém průmyslu se aplikuje v mnoha částech např. obaly akumulátorů, box vzduchového filtru, vnitřní obklady bezpečnostních sloupků. Automobilka Volkswagen používá PP vyztužený 35 hm. % skleněnými vlákny pro výrobu sacího potrubí. [10, 16]

### **Polyether ether keton (PEEK)**

Profily PEEK jsou vyráběny z čisté polyetheretherketonové pryskyřice. K nejdůležitějším vlastnostem PEEK patří odolnost vůči teplotě (250-310°C), Dobrá je i chemická, mechanická i hydrolytická odolnost. Kompozity s PEEK matricí se pro automobilový průmysl používají především pro deformační zóny kvůli schopnosti pohlcovat velké množství nárazové energie. [10, 17]

### **Polyfenylensulfid (PPS)**

PPS patří do skupiny semi-krystalických materiálů, je řazený mezi vysokoteplotní plasty. Vyniká velmi dobrými mechanickými vlastnostmi i při vysokých provozních teplotách až do 220°C (krátkodobá odolnost i při teplotě 270°C), PPS je materiál nerozpustný ve všech známých rozpouštědlech při teplotách pod 200°C, velmi nízká nasákavost vody a velmi vysoká kríповá odolnost i při vyšších teplotách. V automobilovém průmyslu je PPS využíván pro části čerpadel, vstříku, rozváděcího potrubí paliva a části reflektorů. [10, 18]

#### **3.2.3 Aplikace termosetických vláknových kompozitů v konstrukci automobilu**

Termosetické kompozitní materiály se používají především v exteriéru. Poskytují vyšší tuhost, jakož i vynikající kvalitu povrchu pro nátěr. A mají stejný koeficient tepelné roztažnosti jako ocel, to znamená, že mezery mezi kovovými a termosetickými kompozitními částmi nebudou větší, při měnící se teplotě. To je velká výhoda tohoto materiálu. Také jsou méně citlivé na vysoké teploty. Takže jej lze použít na spodní části vozidla i tam, kde jsou součásti vystaveny vysokým teplotám, například v blízkosti výfuku a motoru. [19, 20]

#### **3.2.4 Aplikace termoplastických vláknových kompozitů v konstrukci automobilu**

Termoplastické kompozity stále nabírají na síle v automobilovém průmyslu, svoje využití mají především v interiéru (přístrojové desky), konstrukční části, ochranných krytech pod vozidlem (zejména uhlíkové vlákno, jiné vyztužující materiály v podvozkové část nevydrží), nebo jako izolační vrstvy. Svoje místo budou nacházet i jako deformační části automobilu při nehodě. Termoplast vyztužený uhlíkovým vláknem má mnohem vyšší absorpční energetický potenciál, než u hliníkových slitin, nebo u vláknových kompozitů s termosetickou matricí, rozdíl absorpční energie mezi různými vláknovými kompozity je v tab. 8. [10, 20, 21]

<b>Materiál</b>	<b>E<sub>s</sub> (KJ/kg)</b>
Skleněná vlákna/ VE-R	68
Skleněná vlákna/ UP-R	50
Skleněná vlákna/ EP-R	47
Uhlíková vlákna/ EP-R	110
Uhlíková vlákna/ PEEK	226
Aramidová vlákna/ EP-R	63

Tab. 8 Specifická energie absorpce u různých vláknových kompozitů [10]

### 3.3 Technologie výroby polymerních kompozitů v automobilovém průmyslu

Polymerní kompozity se v automobilové konstrukci aplikují od roku 1953, kdy byly poprvé použity v automobilu Chevrolet Corvette, které bylo vyrobeno z panelů z UP-R pryskyřice vyztužené skleněnými vlákny, panely byly přidělané k ocelovému šasi. Automatizované a rychlé výrobní procesy zahrnují použití inteligentních polotovarů nebo napůl hotových výrobků, aby mohl být využit potenciál kompozitních materiálů a zaintegrovat díly do výroby. Nejběžnějším kompozitem aplikovaným v automobilovém průmyslu je termoset vyztužený skleněnými vlákny, avšak rozvoj je velmi rychlý. Volba konkrétního způsobu zhotovení závisí na technických požadavcích a nákladech na komponent, který má být vyroben. Pro ekonomickou produkci jsou nezbytné metody s vysokou propustností. Tab. 9 porovnává často používané výrobní procesy, které jsou k dispozici a řeší jejich výhody, nevýhody a doby cyklu. [15, 22]

<b>Technologie</b>	<b>Výhody</b>	<b>Nevýhody</b>	<b>Doba cyklu</b>
Prepreg	Lepší pryskyřice/ kontrolované vlákno	Na rozsáhlé komplexní díly náročná práce	5-10 hodin
RTM	Možná kontrola tloušťky vnitřního a vnějšího povrchu	Nutná nízkoviskozitní pryskyřice, bez vakuové asistence možnost tvorby dutin	8-10 min pro velké díly 3-4 minuty pro asistenci vakua
Tlakové kapalinové lití	Oblíbená metoda pro sériovou výrobu s velkým obsahem vláken	Vysoké náklady pro nízkou produkci	1-2 min
SMC	Nákladově efektivní pro objem výroby 10 000-80 000ks za rok	Potenciál úspory hmotnosti je minimální	50-100 sec.
R-RIM	Nízké náklady na nástroje, prototypy mohou být vyrobeny za pomoci měkkých nástrojů	Obtížné kontrolovat proces	1-2 min.
S-RIM	Nízké náklady na nástroje, dobrý povrh	Obtížně kontrolovatelný proces zvláště pokud je nízká viskozita pryskyřice, delší doba vytvrzovacího cyklu	4 min
BMC	Levný základní materiál	Nízký obsah náhodně orientovaných vláken, nízká konstrukční kvalita, špatný povrh	30-60 sec.
Kompresně vytlačované modelování	Plně automatizovaný, možnost různých polymerů a vláken, až 60% hmotnostní podíl vláken	Ne pro díly zakončené povrchovou úpravou bez nátěru, folie	3-6 min.

Tab. 9 srovnání nejčastěji používaný modelování kompozitních procesů [22]

### **3.3.1 Ruční výroba vyztužených reaktivních pryskyřic**

Ruční kladení je nejjednodušší pracovní postup, který je vhodný pro malé série, prototypy a velkoplošné díly. Pracovní nástroje a potřebné pomůcky jsou jednoduché a levné. Jakost vyrobeného dílu závisí na znalostech a zkušenostech zpracovatele. Tato technologie pro sériovou výrobu částí pro automobil není vhodná, vhodná je pouze pro vytváření prototypů, nebo částí závodních vozů. [2]

### **3.3.2 Lisování pomocí vakuového vaku**

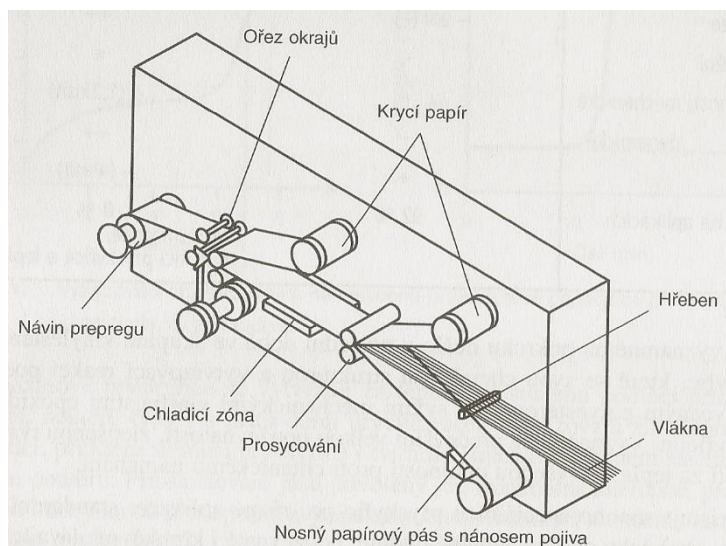
Podobně jako u ručního kladení se používá jednodílná forma. Následně se přikryje laminát porézní separační fólií, na kterou se položí hrubá odsávací tkanina, následně dojde k utěsnění formy pomocí fólie a těsnění. Připojením k čerpadlu se celá forma vakuuje. Oproti ruční výrobě je laminát zbaven vzduchových bublin a přebytečná pryskyřice je přitom odvedena do odsávací tkaniny. Obdobně jako u ručního kladení se použití v automobilovém průmyslu preferuje především u prototypů či závodních vozů. [2]

### **3.3.3 Lisování v autoklávu**

Autokláv je vyhřívaná tlaková nádoba, u níž přesné reprodukovatelné řízení teplotních, tlakových a vakuovacích cyklů umožňuje stabilizaci a vytvrzení kompozitních materiálů. Technologie vyžaduje vysoké základní investice, umožňuje výrobu vysoce kvalitních výlisků. Technologie autoklávu je vhodná pouze pro malosériovou výrobu, a proto jsou díly vyrobené v autoklávu součástí především supersportovních, závodních a luxusních vozů. [2, 23]

### **3.3.4 Prepreg**

Prepreg je polotovár s reaktivním termosetickým pojivem se musí až do doby dalšího zpracování skladovat za chladu asi  $-20^{\circ}\text{C}$ , přesto jsou však skladovatelné nejvýše 6 měsíců. Přibližně 6 hodin před vlastním zpracováním se prepreg rozmrazí, pokud možno bez přítomnosti vzduchu. Výroba nejjednoduššího prepregu je vyobrazena na obr. 5. Preferuje se ruční kladení a vytvrzení buďto v autoklávu nebo metodou lisování ve vakuu, lze i zpracovat metodou klasického lisování ve vyhřívané formě. [2]



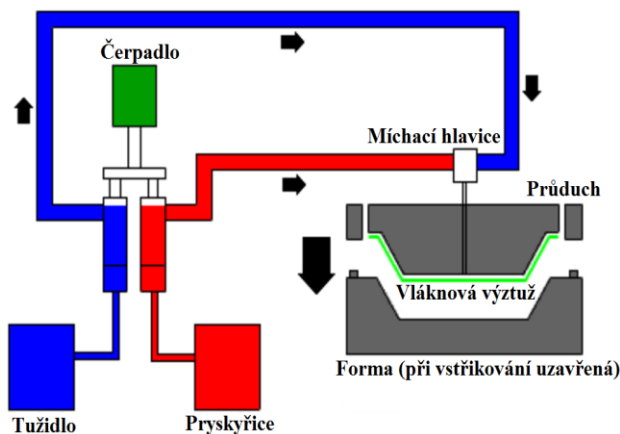
Obr. 5 Výroba jednosměrného orientovaného prepregu [2]

Prepregy jsou v automobilovém průmyslu využívány, pro výrobu částí či celých karoserií. Často je využíván prepreg typu MTM<sup>®</sup>57 vyvinut společností Cytec s dobrou odolností proti nárazu, lze jej univerzálně zpracovávat v autoklávu, vakuovém pytli či lisováním. Aplikována jsou především u závodních vozů, super sportovních vozů. Použití prepregů není nákladově efektivní, proto je nelze použít v sériové výrobě. [11, 23]

### 3.3.5 Technologie - RTM (Resin Transfer Molding)

Jde o technologii s uzavřenou formou, při které se při použití UP a VE pryskyřic do okolního prostoru neuvolňuje reaktivní rozpouštědlo. Ohřátá pryskyřice a ohřáté tvrdidlo se pomocí nízkotlakých čerpadel dopravují do mísící hlavy bezprostředně před injektáží směsi do ocelové nebo hliníkové formy. Technologie RTM zobrazuje obr. 7. Výhodou RTM je, že oba povrchy dílu jsou hladké a rozměry dílu jsou přesné. Podíl vyztužujících vláken (a tedy i mechanické vlastnosti dílu) je obvykle menší než při kladení jednosměrných prepregů, při navíjení a při pultruzi (tažení). Jako výztuž se používají tkaniny nebo rohože. Výztuž je obvykle před tvarována. Technologie RTM má mnoho modifikací např. HP-RTM (vysokotlaké), HS-RTM (vysoko rychlostní) VARTM (Asistence vakua). [24]

Například první použití technologie RTM v sériové konstrukci pro velký konstrukční díl automobilu byl systém Araldite<sup>®</sup> RTM pro výrobu prvního šasi z uhlíkových vláken na Lamborghini Aventador LP700-4 (obr. 6). Systém vytvořil pevný a lehký podvozek s vynikajícím poměrem výkonu k hmotnosti. Tento systém nabízí cenově efektivní řešení pro rychlou a opakovatelnou výrobu konstrukčních dílů s vysokými mechanickými a tepelnými vlastnostmi, které jsou srovnatelné s prepregy vytvrzené v autoklávu. [13]



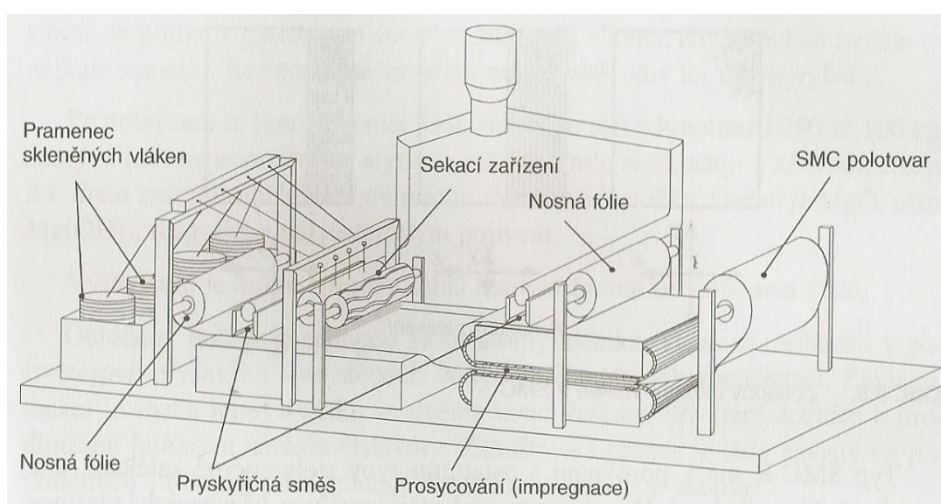
Obr. 7 Technologie RTM [25]



Obr. 6 Šasi Lamborghini Aventador LP700-4 [13]

### 3.3.6 Technologie SMC (Sheet Molding Compound)

Jde o lisovací technologii ve vytápěné ocelové dvoudílné formě. Polotovar pro lisování lze též nazývat také prepreg, výroba prepregu pro technologii SCM je zobrazena na obr. 8. Lisování SMC vyžaduje hydraulický lis a ocelovou vyhřívanou formu s leštěnými povrchy dutin (lis pro SMC technologii stojí okolo 1 000 000 USD). Povrchy dílů mají vysokou kvalitu. Technologie je používána pro výrobu vnějších částí karosérií automobilů (u osobních automobilů např. zadní dveře, u nákladních vozů kabina). Polotovar pro SMC je vyráběn z UP nebo VE pryskyřice, sekaných skleněných vláken (délka 20 až 50 mm), plniv, ztužujících přísad, termoplastického prášku pro dosažení malého až nulového smrštění, maziv a katalyzátoru. Pro dosažení co největší kvality povrchu je nyní používáno zastříknutí lisovaného dílu katalyzovanou pryskyřicí. [15, 24]

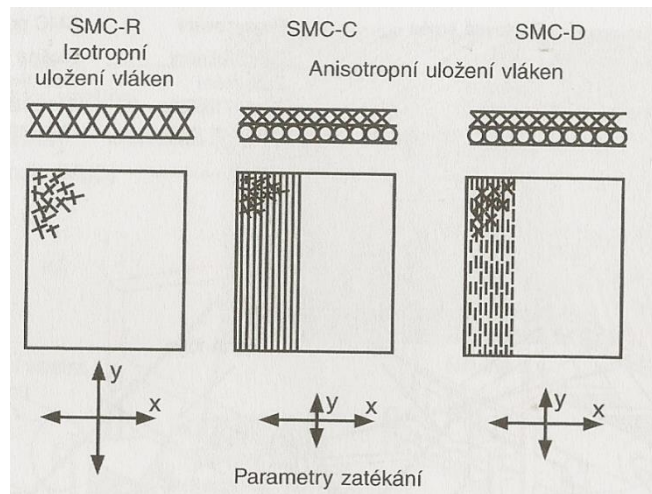


Obr. 8 Zařízení na výrobu SMC prepregů [2]



## Varianty SMC-R, SCM-C, SMC-D

Podle předem určené struktury vláken se rozlišují SCM prepregy na SCM-R (random), SCM-C (continuous) a SMC-D (directed). Rozdíly mezi jednotlivými druhy SCM jsou zobrazeny na obr. 9. Typ SMC-R je nejčastěji používaným pro stejnoměrné zatékání a pro jeho nejjednodušší zpracování, typy SMC-C a SMC-D mají horší zatékavost a používají se především na nosné konstrukční prvky. [2]



Obr. 9 Způsob uložení vláken v SMC [2]

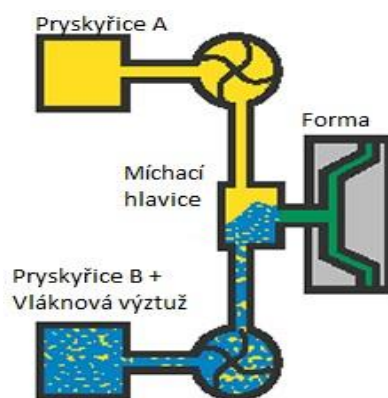
Technologie SCM je jednou z nejpoužívanějších technologií v automobilovém průmyslu. V roce 2000 v osobních automobilech bylo 48 % termosetických kompozitů vyrobeno technologií SCM. Technologie SCM není používána pro velkoplošné díly, je však vhodná pro menší, hlubokotažné části mimo kritickou bezpečnostní zónu. Dobrým příkladem je dříve vyráběná prohlubeň rezervního kola z VE-R se skleněnými vlákny používaná automobilkou Audi. V současnosti využívají technologii s termoplastickou maticí GMT, viz str. 27 nebo LFT viz str. 28, které dosahují lepších výsledků pohlcování energie při nehodě. [15, 22, 26]

## Technologie AdvanceSMC (A-SMC)

Na rozdíl od běžného SMC používá A-SMC pryskyřici s dlouhými vlákny (výrobky jsou pevnější a lehčí až o 25 % oproti SMC), zrání prepregu je urychleno mikrovlnami a výroba desky probíhá přímo u lisu. Oproti běžnému SMC, který má maximálně 30% hmotnostní podíl skleněných vláken, A-SMC má 50% hmotnostní podíl skleněných vláken. SMC se běžně používá v automobilech jako polo-konstrukční prvek např. jako zadní část podlahy nebo vnitřní díl pátých dveří. A-SMC je vážným kandidátem na konstrukční díly (bezpečnostní díly). [27]

### 3.3.7 Technologie R-RIM (Random Reactive Injection Moulding)

Skládá se z vstřikování a míchání dvou kapalných složek do formy, kde spolu reagují a polymerizují. Princip technologie R-RIM je znázorněn obr. 10. K vývoji technologie RIM (R-RIM, S-RIM) vedla nutnost extrémně zkrátit výrobní cyklus použitím velmi reaktivních pryskyřic. Základní výztuhou u R-RIM je sekané skleněné vlákno. Polyuretany jsou obvykle používány v těchto procesech, postupně jsou polyuretany nahrazovány polyureaou a jinými polymery, za účelem umožnění procesu R-RIM splňovat požadavky pro výrobu a vytváření lakovaných dílů pro karoserii vozu. [2, 28, 29]



Obr. 10 Návrh technologie R-RIM [29]

### Technologie S-RIM (Structural Reactive Injection Moulding)

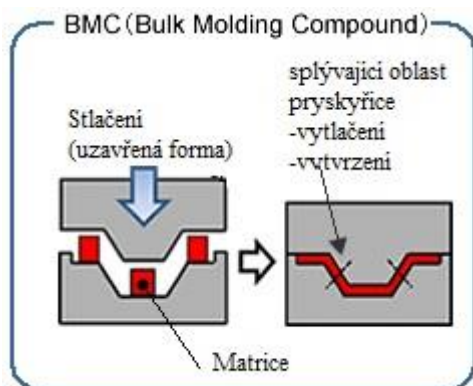
Variace R-RIM procesu zahrnuje strukturální RIM (S-RIM). V tomto procesu jsou dlouhé jednosměrné tkaniny, nasekané vláknité předlisky nebo rohože umístěny v dutině formy. Forma je sevřena a pryskyřice se vstřikuje do dutiny formy. Reagující pryskyřice zůstává kapalinou dostatečně dlouho, tak aby zcela vyplnila formu a pronikla do vyztužujícího vlákna. Potom se pryskyřice rychle vytvrzuje. Automobilový průmysl tvoří největší oblast využití technologie S-RIM nebo R-RIM, za pomoci této technologie jsou vyráběny jak interiérové části, tak exteriérové, například vnější panely karoserie. Především jsou technologií S-RIM vyráběny nárazníky. Nabízejí vynikající kombinaci tuhosti, odolnosti proti nárazu a tepelný odpor pro aplikace panelů karoserie [2, 28, 29]

### 3.3.8 Technologie BMC (Bulk Moulding Compound)

Jedná se o lisovací směs vyztuženou vlákny. Do uzavřené vytápěné formy je vložena tableta nebo prášek směsi reaktoplastu ve stavu resitolu (pryžová nerozpustná syntetická pryskyřice), s plnivem, sekanou vláknovou výztuží <25 mm (nejčastěji s délkou okolo 12 mm) a

tvrdidly. Teplem dojde k roztavení resitolu, k jeho toku a vytvrzení. Obr. 11 znázorňuje výrobu součásti technologií BMC. [24, 30]

Tato technologie je v automobilovém průmyslu velmi rozšířena, touto technologií jsou vyráběny například motorové kryty ventilů (obr. 12), tepelné štíty, reflektory světlometů pro osobní automobily, pojistkové skříně, spínací skřínky a jiné elektricky izolační komponenty, u kterých je požadována vysoká tvarová stálost za tepla a izolační vlastnosti. [31, 32]



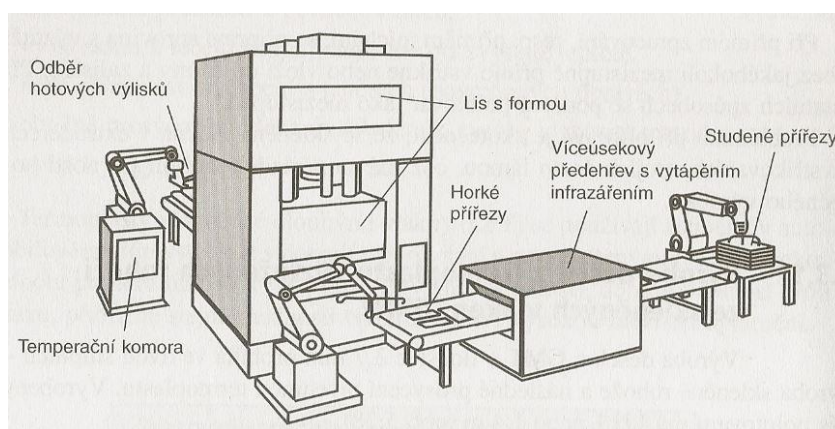
Obr. 11 Technologie BMC [33]



Obr. 12 kryt ventilu vyroben technologií BMC[32]

### 3.3.9 Technologie GMT (Glass Mat Thermoplastic)

Výroba GTM probíhá ve dvou stupních výroba skleněné rohože a následné prosycení taveninou termoplastu. Na obr. 13 je znázorněn postup výroby GTM polotovaru. Mezi dvě prošívání ze skleněných vláken, proložené v případě potřeby pásy z nekonečných vláken, je nanášen termoplast, který je v prvním úseku ve vytápěném pásovém lisu prosycuje. Pro dosažení srovnatelně dobré kvality povrchu, provádí se lisování mezi dvěma fóliemi. V dalším úseku lisu se v uzavřené chladné formě vylisuje potřebný tvar. [2, 24]



Obr. 13 výroba dílů z GMT [2]

### 3.3.10 Technologie LFT (Long fiber Thermoplastics)

LFT obdobně jako termoplasty vyztužené krátkými vlákny se také LFT zpracovává technologií klasického vstřikování. Při něm se nejdříve vyrobí granulát LFT, buď tažením (pultruzí), nebo vytlačováním (extruzí) a následně zpracuje na výlisek technologií lisovstřikování. [5]

Technologie LFT se stává velmi oblíbenou v automobilovém průmyslu. Příklad výrobků vyrobených za pomoci LFT jsou zobrazeny na obr. 14. Použití těchto termoplastických kompozitů v automobilech se v budoucnosti ještě zvýší, zejména tam, kde uhlíková vlákna nahradí skleněná vlákna pro vyšší pevnost a tuhost aplikace. [21]



Obr. 14 Aplikační příklady LFT komponentů v automobilu. Přístrojová deska (vlevo), příčný přední nosník (vpravo). [21]

### D-LFT (Direct Long Fiber Thermoplastic)

Technologie D-LFT byla vyvinuta z důvodu odstranění dvojnásobného zbytečného zahřívání materiálu, další výhodou je schopnost řídit délku vláken, to umožňuje řídit vlastnosti sloučeniny. Při D-LFT se směs dlouhých vláken a termoplastu neochlazuje, ale vstřikuje ve formě taveniny přímo do formy. Obecně je D-LFT křížený proces vstřikování a lisování. [2, 34]

### **3.4 Porovnání vláknových kompozitů s konvenčními materiály**

Vláknové kompozity mají oproti konvenčním materiálům vyšší měrný modul a vyšší měrnou pevnost. Výhody vláknových kompozitů jsou především v lepším využití vlastností materiálů (synergický efekt), lepší funkčnost (snížení hmotnosti automobilu = vyšší účinnost = úspora energie), možnost nevyčerpávat surovinové zdroje a zcela nové vlastnosti materiálů. U vláknových kompozitů lze měnit velký rozsah vlastností při mezní orientaci vláken. Hlavním důvodem proč se auta stále vyrábějí především z oceli, je současná efektivnost s ohledem na náklady (nízké náklady jako vstupní surovina) a rychlost zpracování. Celková změna technologie a výrobních procesu není v současnosti pro automobilky ekonomicky výhodné. [2, 10, 35]

### **3.5 Budoucnost vláknových kompozitů v konstrukci automobilu**

Přestože již v současnosti jsou vláknové kompozity často využívány, můžeme v budoucnu očekávat nárůst jejich výskytu, a to především v konstrukčních prvcích a karosářských částí. Technologie vláknových kompozitů pomáhají výrobcům dodržovat stále přísnější ekologické normy, podporovat odpovědný rozvoj a pokrok, vyrábět lehčí, méně znečišťující a více úspornější vozidla. V budoucnosti budou nejspíše klasické automobily následovat nynější trend super sportovních a sportovních vozů, a budou tvořena převážně kompozity, od karoserií a bezpečnostních prvků až po pohonné části jako například kardanový hřídel. V současné době nelze soupeřit s kovy pro výrobu kapot atd. v širokém měřítku. Nicméně není to příliš vzdálená budoucnost, kdy nám technologie umožní překonat tuto bariéru. V blízké budoucnosti bude exteriér vozu i nadále do značné míry tvořen z oceli, pokud někdo nepřijde s jedinečnou inovací. Spíše se bude kombinovat s propojením kovu s vyztuženými kompozity. Například ve střeše a sloupcích automobilu je mnoho silných vyztužujících profilů kvůli případu převrácení vozu, to má za následek vysoký nárůst hmotnosti a zvýšení těžiště, to je možno snížit za pomoci kompozitní vnitřní výztuže. Například již v současné době BMW u modelu i3 a i8 nepoužívá ocelové profily pro prahy a jiné části výztuh automobilu, ale kompozit vyztužený uhlíkovými vlákny s vnitřními výztužemi zobrazen na obr. 15. V současné době to byl odvážný krok, ale zdá se to jako dobrý marketingový nástroj. Další rostoucí trend bude mocen vidět v okolí motorového prostoru, kdy části jako kryt ventilů, olejové vany nebo sací potrubí, které jsou tradičně vyrobeny z oceli nebo hliníku, budou převedeny do výroby vláknů vyztuženého kompozitu. Další zvyšující trend v aplikaci jako konstrukční materiál bude nejspíše u sendvičových kompozitů a to zejména u elektricky poháněných vozů, kde je na karoserii

vyžadována nízká váha, dobré mechanické vlastnosti a elektrický izolant. Sendvičové kompozity jsou více vrstvé kompozity, kde mezi horní a spodní kompozitní nebo kovovou vrstvou je uložené jádro (vyrobené například z polypropylenu) v podobě medové plástve nebo pěny vyrobené z polyuretanu. V současnosti je ve výzkumu sendvičový materiál pro podlahy elektricky poháněných automobilů s hybridním kompozitem ve spodní a horní vrstvě a polypropylenovým plástevným jádrem. Hybridní kompozitní horní a spodní vrstvy jsou různé poměry skleněných a uhlíkových vláken za dosažení dobré mechanické výkonnosti a příznivé ceny. [10, 20, 35, 36]



*Obr. 15 část karoserie BMW i3*

## 4 Závěr

Tato bakalářská práce na téma “Aplikace vláknových kompozitů v konstrukci automobilu” se zabývá především aplikací a výrobou polymerních vláknových kompozitů užívaných v konstrukci automobilu. Zpracování bylo provedeno pomocí odborné literatury, odborných časopisů, vědeckých prací a internetových stránek zabývajících se danou problematikou. Toto téma je důležité nejen pro současnost, ale především pro budoucnost.

Přesto, že jsou vláknové kompozity pro konstrukci automobilu vhodnější než ocel, jejich rostoucí trend aplikace není tak strmý, jak by mohl být. Automobilky se předhánějí ve všech možných aspektech, používání různých materiálů není výjimka, avšak v karoserii vozidla je stále používána především ocel, jedním z hlavních důvodů je technická náročnost, změna technologie výroby, ekonomická efektivnost. V dnešní době jsou automobily v továrnách vyráběny v podstatě nepřetržitě, s příchodem nových modelů jsou pouze vyměněny lisovací formy, přeprogramovány svařovací roboti atd. Přejít na výrobu karoserie z vláknových kompozitů by byl technicky, finančně a časově náročný. Dobrým příkladem může být automobilka BMW, která u nových automobilů řad i (i3 a i8) vyrábí většinu karoserie z vláknového kompozitu ve velkých sériích.

V práci jsou popsány základní materiály tvořící polymerní vláknové kompozity, jejich současné a možné využití pro automobilový průmysl. Jsou zde popsány technologie výroby vláknových kompozitů využívaných v automobilovém průmyslu, jejich princip výroby, výhody, nevýhody a použití.

Z daných informací bylo dospěno k závěru, že pro použití deformačních zón automobilu je vhodnější použití vláknových kompozitů s termoplastickou maticí, které mají až dvojnásobnou hodnotu absorpce energie. Pro bezpečnostní zónu a exteriérové díly je naopak vhodnější vláknový kompozit s termosetickou maticí, zejména kvůli pevnosti. V obou příkladech jsou z konstrukčního hlediska nejvhodnější uhlíková vlákna, které jsou však v současné době dražší a to až 40x, než v současné době nepoužívanější skleněné vlákno.

V budoucnosti budou karoserie a jiné části stále částečně z oceli, bude se jednat převážně o postupné nahrazování ocele a kombinace s ocelí. Jako perspektivní se jeví technologie A-SMC, která kombinuje dobré vlastnosti a rychlý cyklus výroby, dále rozvoj technologie D-LFT pro termoplastické vláknové kompozity a celkově CFRP, pokud se najde řešení pro levnější výrobu uhlíkových vláken.

## 5 Seznam Použité literatury

- [1] AGARWAL, Bhagwan D a Lawrence J BROUTMAN. *Vláknové kompozity: celost. vysokošk. příručka pro vys. školy techn.* Přeložil Lubomír SODOMKA. Praha: SNTL, 1987.
- [2] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [3] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH, 2005. *Úvod do studia materiálů*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická. ISBN 8070805684.
- [4] *Composite engineering materials* [online]. SP Systems Guide to Composites, ©2007 [cit. 2017-03-08]. Dostupné z: [http://www.composites.ugent.be/home\\_made\\_composites/documentation/SP\\_Composites\\_Guide.pdf](http://www.composites.ugent.be/home_made_composites/documentation/SP_Composites_Guide.pdf)
- [5] KOLI, Dinesh Kumar, Geeta AGNIHOTRI a Rajesh PUROHIT, 2015. Advanced Aluminium Matrix Composites: The Critical Need of Automotive and Aerospace Engineering Fields. *Materials Today: Proceedings*. **2**(4-5), 3032-3041. ISSN 22147853.
- [6] *Automotive Fiberglass Applications* [online]. Saint-Gobain Vetrotex, ©2017 [cit. 2017-03-08]. Dostupný z: <http://www.vetrotextiles.com/applications/automotive>
- [7] *Increasing Performance in Automotive Components* [online]. DuPont, ©2017 [cit. 2017-03-08]. Dostupný z: <http://www.dupont.com/products-and-services/fabrics-fibers-nonwovens/fibers/uses-and-applications/automotive-components.html>
- [8] Ford and DowAksa bid to improve automotive carbon fiber. *Reinforced Plastics*. 2015, **59**(6), 275. ISSN 00343617.
- [9] AL-OQLA, Faris M. a S.M. SAPUAN. Natural fiber reinforced polymer composites in industrial applications: feasibility of date palm fibers for sustainable automotive industry. *Journal of Cleaner Production*. 2014, **66**, 347-354. ISSN 09596526.
- [10] PRADEEP, Sai Aditya, Rakesh K. IYER, Hakan KAZAN a Srikanth PILLA. Automotive Applications of Plastics: Past, Present, and Future. *Applied Plastics Engineering Handbook: Processing, Materials, and Applications*. William Andrew Publishing, 2017, **2**, 651-673. ISSN 978-032339040-8.



- [11] *Composite Materials for Automotive Applications* [online]. Cytec Industries Inc., ©2014 [cit. 2017-03-08]. Dostupný z: [https://www.cytec.com/sites/default/files/files/IM-3001-ENAutomotive\\_Aformat\\_SINGLE.pdf](https://www.cytec.com/sites/default/files/files/IM-3001-ENAutomotive_Aformat_SINGLE.pdf)
- [12] BONO, Jim. *Novel Vinyl Hybrid resin technology meet demanding performance and environmental requirements in Automotive* [online]. JEC Paris, 2014-03-12 [cit. 2017-03-08]. Dostupný z: [http://www.reichhold.com/brochures/composites/JEC%202014%20Novel%20Vinyl%20Hybrid%20resin%20technology%20meet%20demanding%20performance%20and%20environmental%20requirements%20in%20Automotive\\_J.Bono.pdf](http://www.reichhold.com/brochures/composites/JEC%202014%20Novel%20Vinyl%20Hybrid%20resin%20technology%20meet%20demanding%20performance%20and%20environmental%20requirements%20in%20Automotive_J.Bono.pdf)
- [13] RITTER, Klaus. *RTM advances facilitate mass production in the automotive market* [online]. Elsevier Ltd, ©2017 [cit. 2017-03-08]. Dostupný z: <http://www.materialstoday.com/composite-applications/features/rtm-advances-facilitate-mass-production-in-the/>
- [14] *Lehké kompozitní materiály pro automobily* [online]. BASF SE, ©2017 [cit. 2017-03-08]. Dostupný z: <https://www.basf.com/cz/cz/company/research/our-focus/lightweight-composites.html>
- [15] MAXWELL, James. *Plastic in the Automotive Industry*. Woodhead Publishing, 1994, 192 s. ISBN 9781845698645.
- [16] *Polypropylen – PP* [online]. VM Plast s.r.o., © 2017 [cit. 2017-03-12] Dostupný z: <http://www.vmplast.cz/sortiment/polypropylen/>
- [17] *PEEK - ErtaPEEK, TecaPEEK, SustaPEEK, přírodní (hnědo-šedý)* [online]. VM Plast s.r.o., © 2017 [cit. 2017-03-12] Dostupný z: <http://www.vmplast.cz/sortiment/termoplasty/peek-erta-teca-susta/>
- [18] *PPS – polyfenylensulfid* [online]. RESINEX Group, © 2017 [cit. 2017-03-12] Dostupný z: <http://www.resinex.cz/polymerove-typy/pps.html>
- [19] Carbon fibre bodywork on show. *Reinforced Plastics*. 2008, **52**(4), 6. ISSN 00343617.
- [20] MATHIJSEN, Django. Thermoplastic composites keep gaining momentum in the automotive industry. *Reinforced Plastics*. 2016, **60**(6), 408-412. ISSN 00343617.

- [21] FRIEDRICH, Karsten, 2016/05/18. Carbon fiber reinforced thermoplastic composites for future automotive applications. *AIP Conference Proceedings*. American Institute of Physics, **1736**(1), 020001. ISSN 0094243x.
- [22] GHASSEMIEH, Elaheh, 2011. Materials in Automotive Application, State of the Art and Prospects. *New Trends and Developments in Automotive Industry* [online]. InTech [cit. 2017-03-17]. ISBN 9789533079998.
- [23] Winning prepregs, 2009. *Reinforced Plastics*. **53**(1), 7. ISSN 00343617.
- [24] KOŘÍNEK, Zdeněk. *Kompozity* [online]. © 2016 [cit. 2017-02-18]. Dostupný z: <http://mujweb.cz/zkorinek/>.
- [25] *Resin Transfer Molding* [online]. CTiHuatai Composites, ©2008 [cit. 2017-03-11]. Dostupný z: <http://www.ctihuatai.com/products-rtmen.htm>
- [26] MALNATI, Peggy. *Spare wheel well: Functional integration* [online]. Gardner Business Media, Inc., © 2017 [cit. 2017-03-11]. Dostupný z: <http://www.compositesworld.com/articles/spare-wheel-well-functional-integration>
- [27] SHIRINBAYAN, M., J. FITOUSSI, F. MERAGHNI, B. SUROWIEC, M. BOCQUET a A. TCHARKHTCHI, 2015. High strain rate visco-damageable behavior of Advanced Sheet Molding Compound (A-SMC) under tension. *Composites Part B: Engineering*. **82**, 30-41. ISSN 13598368.
- [28] CHOUMER, Simon a Chaniel NIVERT, 2003. R-RIM and S-RIM: Composite materials moulding processes. *JEC Composites Magazine*. (3), 36-37. ISSN 1639965X.
- [29] *Reaction Injection Molding* [online]. Owens Corning, ©1999-2017 [cit. 2017-03-11]. Dostupný z: [http://composites.owenscorning.com/processes/Reaction\\_Injection\\_Molding.aspx](http://composites.owenscorning.com/processes/Reaction_Injection_Molding.aspx)
- [30] *Technologie výroby* [online]. Prefa Kompozity a.s., dceřinná společnost společnosti Prefa Brno a.s., ©2011-2015 [cit. 2017-03-08]. Dostupný z: <http://www.prefa-kompozity.cz/technologie-vyroby/>

- [31] FR compound meets EC regulations, 2003. *Reinforced Plastics*. **47**(8), 21. ISSN 00343617.
- [32] *Markets - Automotive & Heavy Truck*. Interior and Exterior Auto Parts Require the Dimensional Stability of Thermoset Composites [online]. IDI Composites International, © 2017 [cit. 2017-03-11]. Dostupný z: <http://www.idicomposites.com/markets-automotive.php>
- [33] *Advantages of 3D TIMON-CompositePRESS* [online]. Toray Engineering Co, Ltd., ©2008 [cit. 2017-03-11]. Dostupný z: <http://www.3dtimon.com/ENGLISH/product/compositepress.html>
- [34] *Direct Long Fiber Thermoplastic Molding (D-LFT)* [online]. Molded Fiber Glass Companies: © 2017 [cit. 2017-03-11]. Dostupný z: <http://www.moldedfiberglass.com/processes/processes/closed-molding-processes/direct-long-fiber-thermoplastic-molding>
- [35] MARTENSSON, P.: *Cost and weight effective composite design of automotive body structures*. Stockholm, Sweden 2014. Licentická práce. KTH School of Engineering Sciences Aeronautical and Vehicle Engineering, Lightweight Structures. ISBN 978-91-7595-151-5
- [36] SUKMAJI, Indro C a Wisnu R WIJANG, 2017/01/03. Application of sandwich honeycomb carbon/glass fiber-honeycomb composite in the floor component of electric car. *AIP Conference Proceedings*. American Institute of Physics, **1788**(1), 030056. ISSN 0094243x.

## Seznam obrázků

OBR. 1 KLASIFIKACE KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ [1] .....	3
OBR. 2 VÝROBA TEXTILNÍCH SKLENĚNÝCH VLÁKEN TAŽENÍM Z TRYSEK [2].....	7
OBR. 3 VÝROBA ARAMIDOVÝCH VLÁKEN [2] .....	9
OBR. 4 SCHÉMA VÝROBY UHLÍKOVÝCH VLÁKEN PAN-VLÁKEN [2] .....	11
OBR. 5 VÝROBA JEDNOSMĚRNÉHO ORIENTO VANÉHO PREPREGU [2].....	23
OBR. 6 TECHNOLOGIE RTM [27] .....	24
OBR. 7 ŠASI LAMBORGHINI AVENTADOR LP700-4 [20] .....	24
OBR. 8 ZAŘÍZENÍ NA VÝROBU SMC PREPREGŮ [2] .....	24
OBR. 9 ZPŮSOB ULOŽENÍ VLÁKEN V SMC [2].....	25
OBR. 10 NÁKRES TECHNOLOGIE R-RIM [28].....	26
OBR. 12 TECHNOLOGIE BMC [29].....	27
OBR. 11 KRYT VENTILU VYROBEN TECHNOLOGIÍ BMC[30].....	27
OBR. 13 VÝROBA DÍLŮ Z GMT [2].....	27
OBR. 14 APLIKAČNÍ PŘÍKLADY LFT KOMPONENTŮ V AUTOMOBILU. VLEVO: PŘÍSTROJOVÁ DESKA, VPRAVO: PŘÍČNÝ PŘEDNÍ NOSNÍK. [17].....	28
OBR. 15 ČÁST KAROSERIE BMW I3 .....	30

## Seznam Tabulek

TAB. 1 POROVNÁNÍ TEORETICKÝCH A EXPERIMENTÁLNĚ ZJIŠTĚNÝCH HODNOT E-MODULU A MEZE PEVNOSTI V TAHU NĚKTERÝCH KONSTRUKČNÍCH MATERIÁLŮ [2].....	6
TAB. 2 ROZDĚLENÍ UHLÍKOVÝCH VLÁKEN PODLE STRUKTURY [2] .....	10
TAB. 3 POROVNÁNÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTI PŘÍRODNÍCH VLÁKEN A SKLENĚNÝCH VLÁKEN. [2].....	11
TAB. 4 VLASTNOSTI A POUŽITÍ RŮZNÝCH NENASYCENÝCH POLYESTEROVÝCH PRYSKYŘIC. [2].....	14
TAB. 5 VLASTNOSTI A POUŽITÍ VINYL ESTEROVÝCH PRYSKYŘIC. [2].....	16
TAB. 6 VLASTNOSTI A POUŽITÍ EPOXIDOVÝCH PRYSKYŘIC. [2] .....	17
TAB. 7 NĚKTERÉ ROZDÍLY MEZI VYZTUŽENÝMI TERMOPLASTY A TERMOSETY [2] .....	19
TAB. 8 SPECIFICKÁ ENERGIE ABSORPCE U RŮZNÝCH VLÁKNOVÝCH KOMPOZITŮ [21].....	21
TAB. 9 SROVNÁNÍ NEJČASTĚJI POUŽÍVANÝ MODELOVÁNÍ KOMPOZITNÍCH PROCESŮ [6] .....	21