



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

PŘÍPRAVA A APLIKACE KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ NA SOUČÁSTI AUTOBUSŮ

MANUFACTURING PROCESS AND APPLICATIONS OF COMPOSITE MATERIALS FOR BUSES
PARTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAN RUSEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. KAREL NĚMEC, Ph.D.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav materiálových věd a inženýrství

Akademický rok: 2013/14

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jan Rusek

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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

Příprava a aplikace kompozitních materiálů na součásti autobusů

v anglickém jazyce:

Manufacturing Process and Applications of Composite Materials for buses parts

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zpracování přehledu o kompozitních materiálech v současnosti používaných při výrobě autobusů, zhodnocení výhod a nevýhod různých kompozitních materiálů pro aplikaci na jednotlivé komponenty automobilů a ukázka použití vybraného materiálu na konkrétní součásti.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Zpracování přehledu o dané problematice
- 2) Popis kompozitních materiálů používaných při výrobě autobusů
- 3) Zhodnocení výhod a nevýhod různých kompozitních materiálů pro součásti autobusů
- 4) Ukázka použití vybraného materiálu na konkrétní součásti

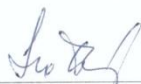
Seznam odborné literatury:

- 1) Ptáček, L. Nauka o materiálu. II. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. 392 s. ISBN 80-7204-248-3
- 2) Kratochvíl, B.; Švorčík, V.; Vojtěch, D.. Úvod do studia materiálů. Praha: VSCHT, 2005. 190 s. ISBN 80-7080-568-4
- 3) Chung, Deborah D. L. Composite materials: functional materials for modern technologies. London: Springer, 2003. 289 s. ISBN 185233665X

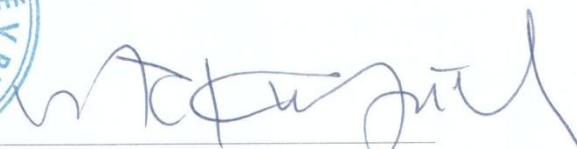
Vedoucí bakalářské práce: Ing. Karel Němec, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 22.11.2013



prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
Ředitel ústavu



prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan

ABSTRAKT

Cílem bakalářské práce je zhodnocení a ukázka využitelnosti kompozitních materiálů v autobusovém průmyslu. V první části obsahuje přehled vybraných typů kompozitních materiálů, základní rozdělení, popis jejich složek a ukázku vybraných způsobů výroby. Druhá část bakalářské práce je zaměřena na vyhodnocení výhod a nevýhod při použití kompozitních materiálů. V poslední části je zaměřena na ukázku výroby dílu ze sklolaminátu.

KLÍČOVÁ SLOVA

kompozit, sklolaminát, ruční laminace, matrice, výztuž, výroba

ABSTRACT

The aim of the bachelor's thesis is the evaluation and demonstration of the usability of composite materials in the bus industry. The first chapter provides an overview of selected types of composite materials, basic classification, description of their parts and demonstrations of methods of production. The second part of the bachelor's thesis is focused on the evaluation of the advantages and disadvantages of using composite materials. The last part is focused on the production of the sample from fiberglass.

KEYWORDS

composite, fiberglass, hand lamination, matrix, reinforcement, production

Bibliografická citace

RUSEK, J. *Příprava a aplikace kompozitních materiálů na součásti autobusů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 49 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Karel Němec, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „*Příprava a aplikace kompozitních materiálů na součásti autobusů*“, jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Karlu Němcovi Ph.D. za vedení a spolupráci při tvorbě bakalářské práce. Velké poděkování patří také mojí rodině, které mě podporovala během celého mého studia.

Obsah

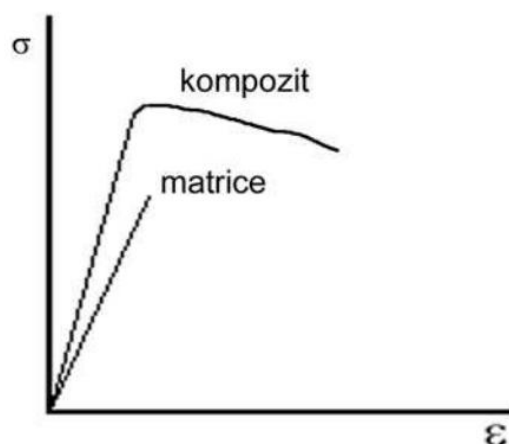
Úvod	13
1. Kompozitní materiály	15
1.1. Historie kompozitních materiálů	16
1.2. Klasifikace kompozitů	17
1.3. Matrice	17
1.3.1. Keramická matrice	17
1.3.2. Kovová matrice	18
1.3.3. Polymerní matrice	18
1.4. Výztuž	18
1.4.1. Částicové kompozity	19
1.4.2. Vláknové kompozity	20
1.5. Technologické způsoby výroby	25
1.5.1. Ruční kladení za mokra (laminování)	25
1.5.2. RTM	26
1.5.3. RIM	27
1.5.4. Vakuově – vypěňovací technologie	28
1.5.5. Studené lisování	28
2. Aplikace kompozitních materiálu u autobusů	29
2.1. Vývoj využití	29
2.2. Aspekty využití kompozitů	30
2.2.1. Hmotnost	30
2.2.2. Bezpečnost	31
2.2.3. Tvarovatelnost	33
2.2.4. Cena	33
2.2.5. Dopad na životní prostředí	33
3. Výroba konkrétní součásti ze sklolaminátu	35
3.1. Vstupní materiály	35
3.2. Výroba formy	37
3.3. Ruční laminace výrobku	40
3.4. Ořez a dokončení	42
Závěr	45
Literatura	47
Seznam použitých zkratk a symbolů	49

ÚVOD

Kompozitní materiály v autobusovém průmyslu nejsou v současné době zdaleka tak široce využívány, jak je tomu v jiných dopravních odvětvích. Při pohledu do minulosti byl v podobné situaci, jako je dnes autobusový průmysl, byl pár let resp. desetiletí zpět, automobilový průmysl. Věřím tomu, že podobný rozmach, jako dnes zažívají kompozitní materiály u automobilů, zažije také autobusová doprava. Zatím tomu vše nasvědčuje, rok od roku kompozity nahrazují stále větší počty dílů dříve vyráběných z kovů. Předpokládám, že tato práce mi umožní se této problematice dále a podrobněji věnovat. Práce je rozdělena do tří hlavních částí. V první části práce je obecný pohled na kompozity, jejich jednotlivé složky a postupy výroby využívané při výrobě autobusů. Náplní druhé části je poukázání na výhody a nevýhody využití kompozitů z různých hledisek a snaha zmínit oblasti, na které by se výrobci měli zaměřit. V poslední části je popsána výroba konkrétního dílu od obdržení objednávky až po samotný hotový výrobek. Ve své práci se budu snažit využívat nejnovější a nejaktuálnějších poznatků přímo od výrobců a odbornou literaturu, abych dokázal přiblížit aktuální situaci na trhu.

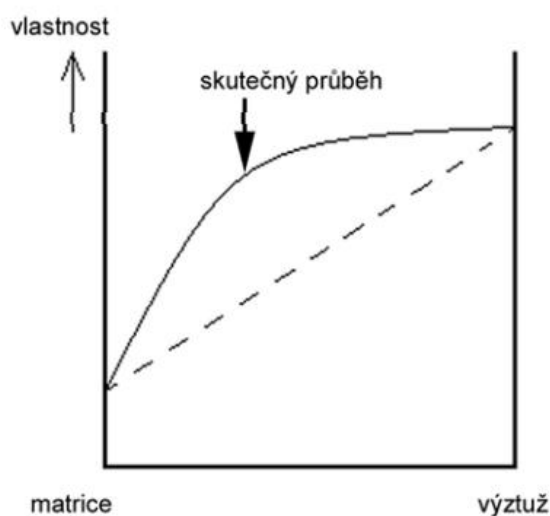
1. KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Kompozitní materiál je takový materiál, ve kterém jsou specifickým způsobem zastoupeny dvě nebo více složek, které vhodným způsobem kombinují různé vlastnosti, jako jsou například fyzikální, chemické a mechanické vlastnosti těchto složek. Výsledné vlastnosti kompozitu jakožto celku, jsou dány kombinací vlastností všech obsažených složek a mělo by platit, že vhodnou kombinací dosáhneme mnohem lepších vlastností, než mají jednotlivé složky samostatně. Každou část kompozitu lze zařadit z hlediska funkce v celku buď jako matici nebo výztuž. Matrice, která bývá zpravidla měkčí a plní funkci obklopování a spojování jednotlivých částí výztuže. Dále také přenáší napětí mezi těmito částmi a dává kompozitu výsledný tvar. Úlohou výztuže je pak přenos hlavního zatížení na matici.



Obr. 1.1 Porovnání tahových diagramů křehké matrice a kompozitu složeného z této matrice [1]

Dalším charakteristickým rysem kompozitu je, že na rozdíl od kovových materiálů si složky v kompozitu zachovávají své charakteristiky (fyzikální, mechanické, chemické) a získaný materiál dosahuje vlastností, které nemohou být ani zdaleka dosaženy sečtením jednotlivých složek. Tento jev nazýváme synergismus.

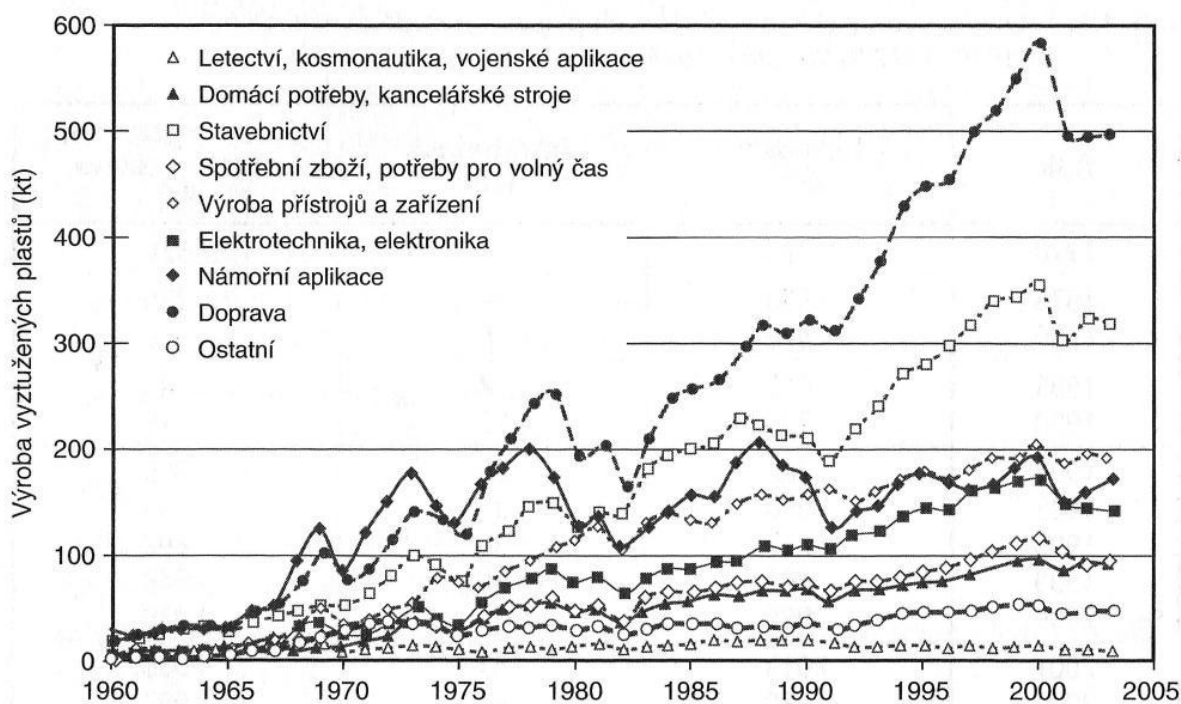


Obr. 1.2 Synergické chování složek kompozitu [2]

Charakteristickým rysem kompozitu je výroba mísením jednotlivých komponent s tím, že objemový podíl vyztužující složky činí alespoň 5% a mechanické, fyzikální, chemické vlastnosti jsou významně odlišné. [1, 2, 3, 4]

1.1. Historie kompozitních materiálů

Když si roku 1907 podal L. H. Baekeland patent na výrobu fenolických pryskyřic, asi netušil, že od tohoto data se začne psát historie kompozitu tak, jak jej známe dnes. Trvalo však až do roku 1930, než společnost Owens Corning z USA vynalezla úplně náhodou skelné vlákno. O 5 let později se již rozjíždí jeho první průmyslová výroba. Další velký krok byl učiněn během druhé světové války, kdy začaly být kompozity využívány v letectví a konstruktéři z USA si začali uvědomovat jejich nespočetné výhody. Avšak kompozity se v širším rozsahu v letectví i přes výborné vlastnosti nevyužívaly dalších téměř 50 let. Firmy, vyrábějící kompozity se nechtěly vzdát své výroby, a proto začaly hledat další uplatnění, a to především v dopravním průmyslu. Dnes si již bez těchto materiálů nedovedeme představit běžné fungování výroby dopravní prostředků, stavebnictví a vesmírných lodí. [4]



Obr. 1.3 Aplikace vyztužených polymerů v USA v letech 1960-2005 [4]

1.2. Klasifikace kompozitu

V současné době je již nepřehledné množství kompozitních materiálů a další stále přibývají. Z tohoto důvodu je nutné je třídit do skupin či je jinak klasifikovat. Základním rozdělením je dělení podle *materiálu matrice*, podle *materiálu výztuže* a podle *geometrie výztuže*.

podle materiálu matrice:

- kompozity s kovovou maticí
- kompozity s keramickou maticí
- kompozity s polymerní maticí
- kompozity s uhlíkovou maticí

podle materiálu výztuže:

- kompozity s uhlíkovou výztuží
- kompozity s keramickou výztuží
- kompozity s polymerní výztuží
- kompozity s kovovou výztuží
- kompozity se sklenou výztuží
- whiskery (kompozity vyztužené vláknovými monokrystaly)

podle geometrie výztuže:

- vláknové kompozity
- částicové kompozity
- strukturní kompozity

Díky vhodné kombinaci materiálu matrice, materiálu výztuže, geometrii výztuže a dalších vstupních faktorů lze dosáhnout předem požadované vlastnosti kompozitu. [3, 4, 5]

1.3. Matrice

Jak jsem již zmínil v úvodu této kapitoly, pod pojmem matrice se rozumí materiál, který má nižší hustotu a pevnost než výztuž. Hlavní úkol matrice je přenos namáhání na jednotlivá vlákna, rozložení namáhání z jednoho vlákna na více vláken, zajištění geometrické polohy výztuže, tvarová stálost výrobku a v neposlední řadě má funkci ochranou, kdy chrání výztuž před okolními vlivy (vlhkost, zvýšená/ snížená teplota, záření, atd.). Základním faktorem v posuzování kvality kompozitu je zajištění maximální adheze mezi maticí a výztuží. Jinak řečeno, čím lépe matrice pokryje výztuž, tím lépe. [3, 4, 21]

1.3.1. Keramická matrice

Na rozdíl od polymerních a kovových matic obecně podléhají keramické matrice selhání nebo v nich vznikají mikrotrhliny dříve, než je tomu u výztuže (jsou křehčí). Tím pádem se výztuž stává nechráněnou a může daleko dříve podléhat zkáze. Materiály pro keramickou

matrici mají většinou nízkou tepelnou vodivost a jsou elektricky nevodivé. Kompozity s keramickou matricí jsou vyztužované dlouhými nebo krátkými vlákny. Jako materiál plniva bývají často používány prášky karbidů, nitridů, boridů a oxidů [2, 3, 4]

1.3.2. Kovová matrice

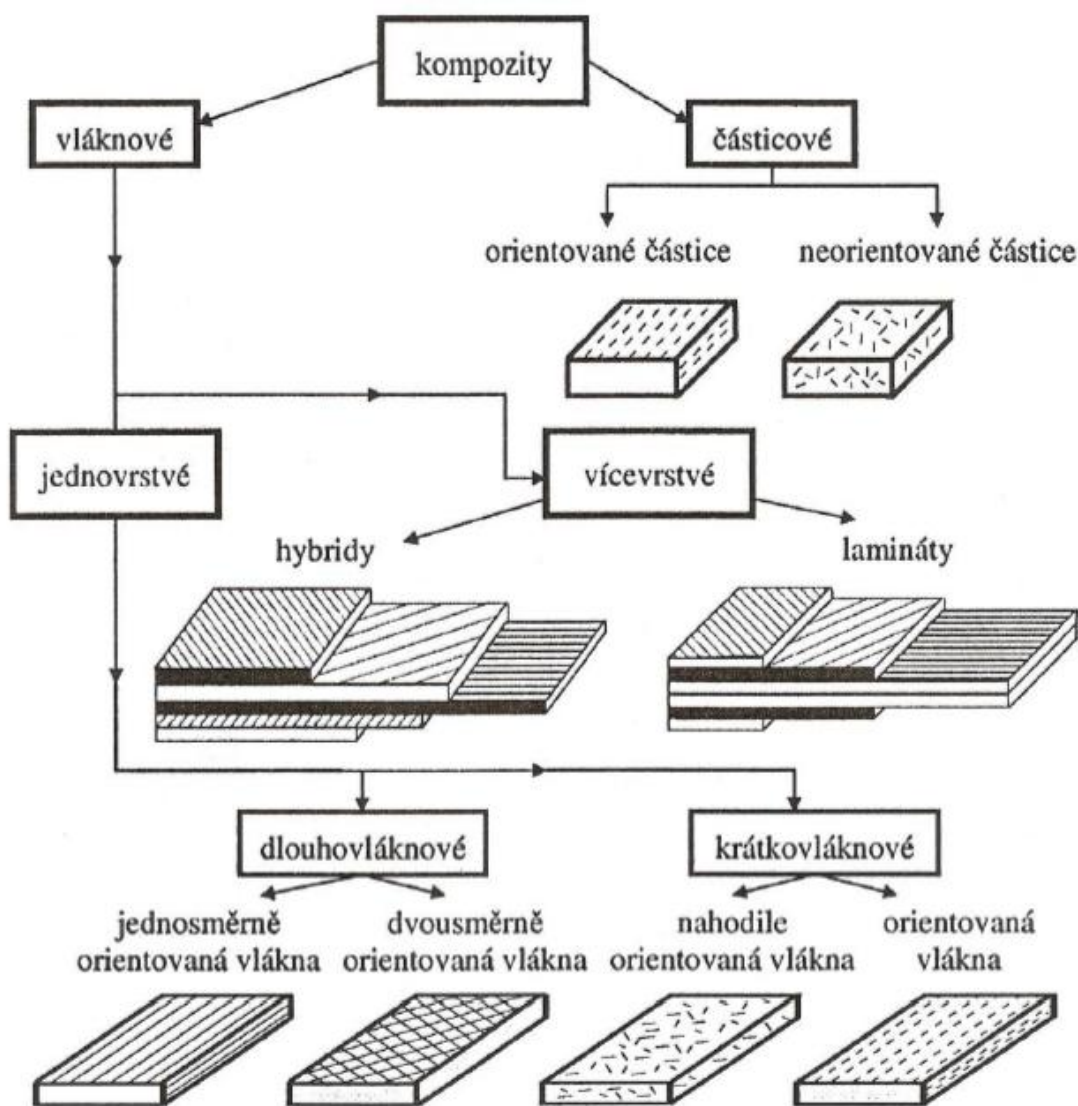
S využitím této matrice se setkáváme nejčastěji v kombinaci s kovovou nebo keramickou výtuzí, díky čemuž odolává daleko lépe vyšším provozním teplotám a má lepší mechanické vlastnosti (mez kluzu, mez pevnosti, tvrdost) než původní materiál. Tyto jednotlivé vlastnosti mohou být upraveny podle použité velikosti, tvaru a relativního množství částic nebo vláken použitých při výrobě. Výtuz bývá ve formě jak vláken, tak také částic. Materiálem matric je například titan, měď, hliník a hořčík. Materiálem výtuz jsou například Al_2O_3 , SiC, uhlíková vlákna, TiC, W. [2, 3, 6]

1.3.3. Polymerní matrice

Nejvíce rozšířenou skupinou kompozitu jsou právě kompozity s polymerní matricí. Je to zejména díky své korozivzdornosti, chemické odolnosti a relativně nízké hmotnosti. Mezi základní materiály bychom měli zmínit polyamid, polypropylen, epoxidové a polyesterové pryskyřice. Výtuz tvoří nejčastěji skleněná, uhlíková a aramidová vlákna. U autobusů se tyto kompozity nejčastěji (téměř výhradně) využívají u karoserií. Pokud kompozity obsahují nenasycený polyester nebo epoxidové živce, mluvíme o nich jako o kompozitech s termoplastickou matricí, a pokud obsahují polyetylen, polypropylen, polykarbonát, polyvinylchlorid, mluvíme o nich jako o kompozitech s termosetickou matricí. Termoplastická matrice je za normální teploty pevná látka, ale pro další zpracování, resp. její vyztužení je nutné její zahřátí nad teplotu $200^{\circ}C$ aby přešla do kapalného stavu. Polymerní matrice je nevhodná do míst se zvýšenou teplotou, a to zejména kvůli vysoké tepelné roztažnosti. [2, 3, 4, 21]

1.4. Výtuz

Abychom o nějakém materiálu mohli říct, že je výtuzí kompozitního materiálu, musí jeho obsah v materiálu přesáhnout alespoň 5%. Dalším důležitým hlediskem je, aby výtuz ovlivňovala mechanické, chemické nebo fyzikální vlastnosti. Pokud tyto všechny vlastnosti daný materiál splňuje, mluvíme o něm jako o výtuzi kompozitu. Výtuzí je ovšem nepřeberné množství a je dobré zařadit si je do jednotlivých skupin. Hlavní pohled při dělení je buď podle geometrie výtuz nebo materiálu výtuz. Z geometrického hlediska dělíme kompozity na částicové a vláknové (obr. 1.4). [2, 3, 5, 7]

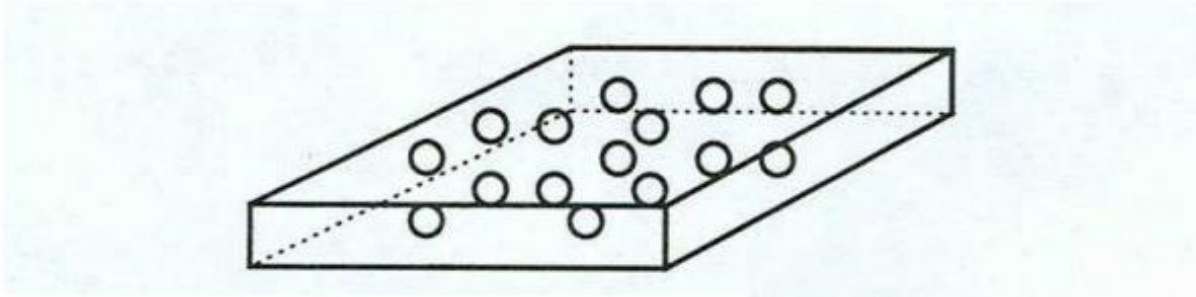


Obr. 1.4 Rozdělení kompozitu podle výztuže [7]

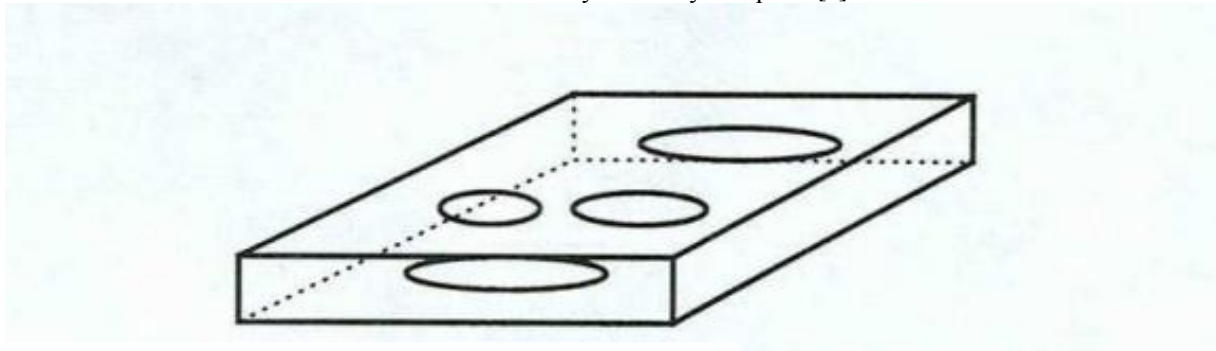
1.4.1. Částicové kompozity

Částicové kompozity jsou v současnosti méně rozšířené než kompozity vláknové. Za částicové kompozity lze považovat všechny materiály, jejichž struktura je tvořena maticí zpevněnou jemnými částicemi (obvykle o rozměrech menších než $1\ \mu\text{m}$), které zabraňují šíření plastických deformací a tím zlepšují mechanické vlastnosti kompozitního materiálu. Tyto kompozity se využívají v podmínkách se zvýšenou teplotou, pro svou pevnost v místech se zvýšenými nároky na odolnost vůči oděru, pro svojí elektrickou vodivost v místech průtoku elektrického proudu (keramické izolanty, elektrody pro odporové svařování, atd.). Díky těmto vlastnostem jsou často využívány jako lepší alternativa k jednosložkovým (nevýztuženým) materiálům. V odborné literatuře se můžeme setkat také s dělením těchto kompozitů podle

tvaru výztuže na izometrické (obr. 1.5) a anizometrické (obr. 1.6) Mezi nejrozšířenější patří kompozity vyztužené kovovou maticí, zvláště pak materiály Al_2O_3 , ThO_2 , ZrO_2 , Y_2O_3 , SiC , WC , TiC . Polymerní matrice se nejčastěji vyztužují kaolínem, slídou, bronzem, vápencem, sazemí, grafitem, CaCO_3 , SiO_2 . Kompozity vyztužené WC (TiC)/ Co tzv. cermety, jsou známy především pod názvem slinuté karbidy. Ty jsou pro svojí velkou tvrdost a odolnost používány pro výrobu obráběcích nástrojů. [2, 4, 5, 7]



Obr. 1.5 Izometrický částicový kompozit [7]



Obr. 1.6 Anizometrický částicový kompozit [7]

1.4.2 Vláknové kompozity

Vlákna v kompozitu mají především zajistit mechanické vlastnosti, jakými jsou pevnost a tuhost. O vláknovém kompozitu se dá mluvit ve chvíli, kdy délka jeho výztuže mnohonásobně převyšuje jeho průměr. Tento fakt sebou ale nese i nepříjemnou vlastnost, že namáhaný kompozit nemá všemi směry stejné mechanické vlastnosti. V takovém případě hovoříme o anizotropii materiálu. V důsledku tohoto jevu jsou stanovena některá pravidla, která by měla vlákna splňovat.

- vyztužující vlákna musí být pevnější než matrice
- vyztužující materiál musí mít vyšší tuhost jak matrice
- matrice se nesmí porušit dříve než vyztužující vlákno

Nejčastěji používaným typem vláken jsou vlákna skleněná, uhlíková a aramidová. Jednotlivá vlákna jsou ale jednotlivě téměř nepoužitelná, a proto je nutné z nich vytvořit svazek stejně orientovaných vláken, tzv. roving (obr. 1.7), který má odolnost vůči mechanickému namáhání pouze v jednom směru, směru průběhu vláken. Často máme ale kompozit namáhaný více

směry najednou, v takovém případě je nutné použít tkaniny z rovingu (obr. 1.8) nebo rohože z rovingu (obr. 1.9).



Obr. 1.7 roving ze skelného vlákna [8]



Obr. 1.8 Tkanina ze skelného rovingu [9]



Obr. 1.9 Rohož ze skelného rovingu [9]

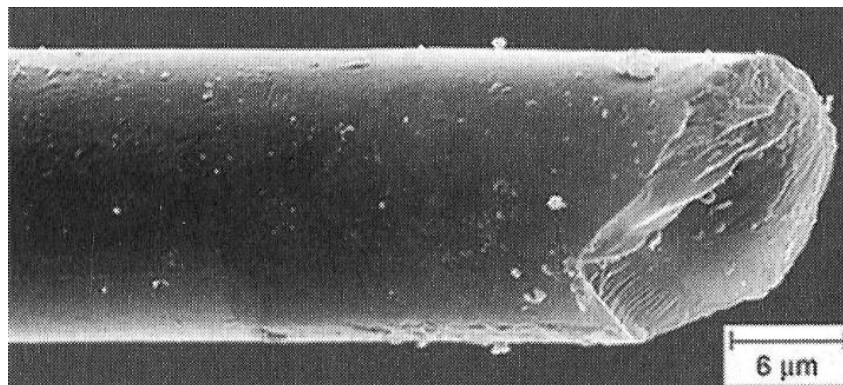
Vláknové výztuže jsou kvůli svým vlastnostem (pevnost, přesné rozmístění vláken, atd.) rozšířenější než částicové výztuže. Při zachování stejných mechanických vlastností (tuhost, pevnost, atd.) jsou výrobky z vláknového kompozitu lehčí a stále více se prosazují ve sportu (cyklistika, tenis, hokej, motorsport, atd.). V tabulce 1.4.2 můžeme vidět srovnání tří nejvíce využívaných vláken v kompozitní výrobě. Je však potřeba zmínit, že vlastnosti vláken jsou závislé také na vlastnostech použité matrice, a proto bychom tyto údaje měli brát spíše orientačně. [2, 3, 4, 8, 9]

Vlastnosti	Kompozity		
	vyztužené sklem	aramidové	uhlíkové
Hustota	+/-	++	+
Mez pevnosti v tahu	+	+	+
Modul pružnosti	-	+	++
Mez pevnosti v tlaku	+	-	+
Rázová houževnatost	+	+	-
Tlumení	-	+	-
Chování při statickém a dynamickém namáhání	+	+	++
Dielektrické vlastnosti	++	++	-
Adheze, přilnavost	++	-	+
Nasákavost	+	-	+
Cena	++	+/-	-

Tab. 1.4.2 Všeobecné srovnání některých vlastností kompozitů
(++ velmi příznivé, + příznivé, - nepříznivé) [4]

Skleněná vlákna

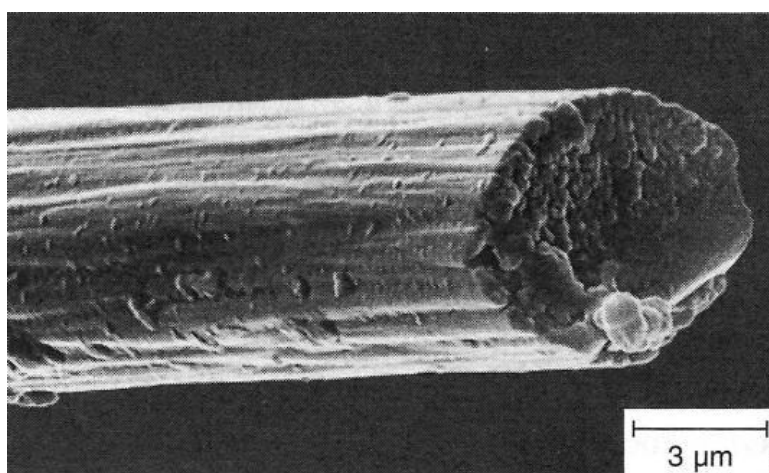
Mezi tradiční (a jedny z nejvíce rozšířených) vláken patří vlákna skleněná (obr. 1.10), která jsou tvořena směsí oxidu siřičitého (SiO_2) a příměsí dalších oxidů (Fe, Al, B, Ca). Díky poměrně jednoduché výrobě jsou skleněná vlákna poměrně levná. Vyrábí se pomocí rychlého tažení z taveniny. Nejčastěji se využívají v kombinaci s polymerní matricí jako tzv. sklolamináty, které mají využití napříč obory. V tomto případě se využívá tzv. E- sklo, což je vlákno obsahující SiO_2 , Al_2O_3 , CaO a MgO. Průměr vlákna se pohybuje v rozmezí 5 – 15 μm . Kladně hodnotíme jejich odolnost vůči vysokým teplotám, odolnost proti chemikáliím a poměrně vysokou pevnost v tahu. Jistou nevýhodou je nízký modul pružnosti, proto jsou v konstrukcích s vysokými nároky na tuhost kombinovány s uhlíkovými vlákny do tzv. hybridního kompozitu. [2, 3, 4, 5, 9]



Obr. 1.10 Skleněné vlákno pod rastrovacím elektronovým mikroskopem [4]

Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna (obr. 1.11) jsou nejpreferovanějšími vlákny u moderních vysokovýkonných kompozitních materiálů. Průměr vlákna bývá v rozmezí 4 – 8 μm. Tyto vlákna jsou vyráběna pyrolýzou (tepelný rozklad) organických vláken v inertní atmosféře (N₂, Ar), teploty při tomto procesu dosahují až 2000°C. Avšak z pohledu optimální pružnosti a pevnosti je nejvhodnější teplota na hranici 1500°C. Uhlíková vlákna jsou až z 95 % tvořena uhlíkem. Rozlišujeme dvě kvality uhlíkových vláken. Při výrobě uhlíkových vláken vysoké kvality se používají jako vstupní materiál vlákna z polyakrylonitrilu ($-\text{[CH}_2\text{CHCN]}_n-$), což se projevuje na ceně materiálu. Druhým typem jsou méně kvalitní, ale cenově dostupnější, uhlíková vlákna vyráběná pyrolýzou zbytků po destilaci ropy, smol a dehtu. Obecně v průmyslu platí, že uhlíková vlákna se považují za poměrně drahá, a proto se s nimi neseťkáme běžněji. S čistě uhlíkovými vlákny (tkaninami) se téměř neseťkáme, jsou doplňovány jinými materiály. Jako nejideálnější z pohledu vlastností (tvrdost, křehkost, hmotnost, atd.) se jeví využití karbon-kevlarových tkanin (obr. 1.12), které mají své uplatnění v leteckém, automobilovém, sportovním a lodním průmyslu. [2, 3, 4, 5, 9]



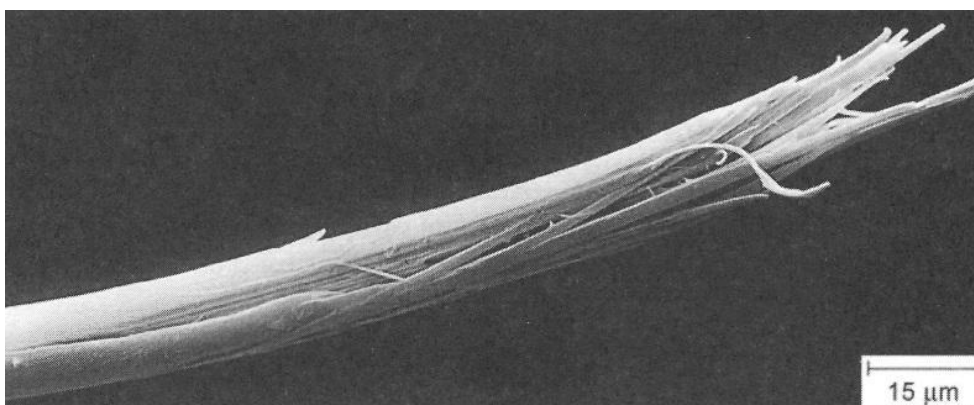
Obr.1.11 Uhlíkové vlákno pod rastrovacím elektronovým mikroskopem [4]



Obr. 1.12 Karbon-kevlarová tkanina [10]

Aramidová vlákna

Aramidová vlákna (obr. 1.13) jsou vlákna na bázi lineárních organických polymerů. Průměr vlákna bývá v rozmezí 5 – 15 μm . Kovalentní vazby jsou orientovány podle osy vlákna. Tato vlákna vynikají vysokou pevností a tuhostí. Výroba spřádáním za tepla není možná z důvodu, že teplota roztavení leží nad teplotou tepelného rozkladu. Vlákna se proto spřádají z vysokoviskozního 20 % roztoku v koncentrované kyselině sírové. Tato vlákna se mohou zpracovávat všemi běžnými reaktivními pryskyřicemi i termoplasty. Hlavními přednostmi jsou vysoká pevnost v tahu a hmotnost. Nevýhodou je, že po vytvrzení se díly z toho materiálu velmi složitě opracovávají, což vede k větším výrobním nákladům spojeným s přesností a precizností. Nejznámějším aramidovým vláknem (para-amid nylon) je Kevlar a jeho ohnivzdorná varianta Nomex. [2, 3, 4, 5, 9]



Obr. 1.13 Aramidové vlákno pod rastrovacím elektronovým mikroskopem [4]

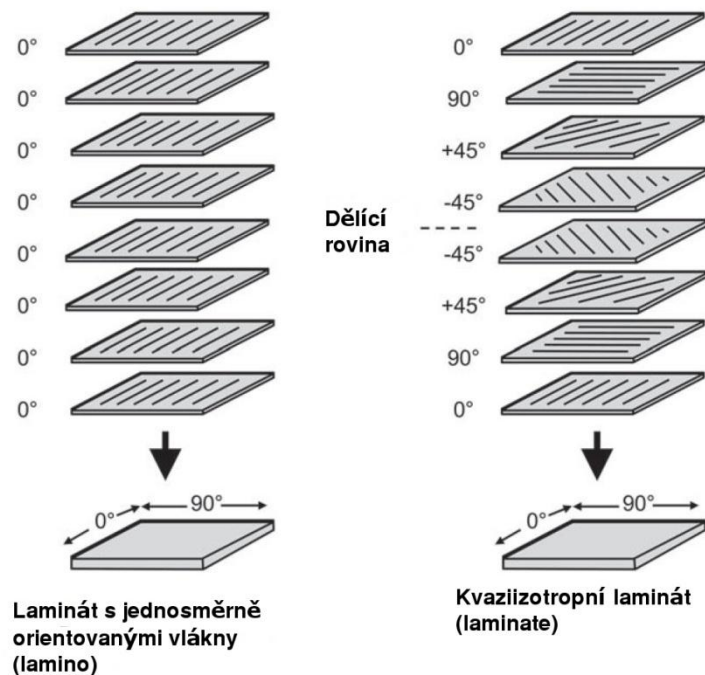
1.5 Technologické způsoby výroby

Způsob výroby kompozitních dílů závisí především na požadavcích na výrobek, ceně a sériovosti zakázky. Snad nejdůležitější roli hraje produktivita. Daný díl by klidně mohl být vyráběn například ruční laminací, avšak kvůli dlouhým výrobním časům se musí začít vyrábět jinou rychlejší metodou jako je například RTM (z anglického *Resin Transfer Molding*). Informace o typu výroby je potřeba znát již při výrobě forem, protože na každý druh výroby je specifickým způsobem vyráběna forma.

Při výrobě dílů v autobusovém průmyslu se nejčastěji setkáváme s metodou prosycování výztuže kapalnou fází, neměli bychom však zapomenout ani na další metody, kterými jsou práškové metody a infiltrace výztuže plynou fází. V další části se budu zabývat pouze metodami výroby, které se v současné době praktikují při výrobě částí autobusů. Mezi tyto metody patří RTM (z anglického *Resin Transfer Molding*), RIM (z anglického *Reaction Injection Molding*), ruční kladení za mokra tzv. laminování, vakuově – vypěňovací technologie a studené lisování. [3, 4, 7, 9, 11, 13, 14]

1.5.1 Ruční kladení za mokra (laminace)

Jedná se o nejstarší, nejjednodušší a nejdostupnější metodou výrobu vláknových kompozitních materiálů ve formě laminátu. Tento druh výroby je vhodný pro malé série, prototypy, velkoplošné díly a pro díly se záporně geometricky uzavřenými plochami (nutnost použití formy z více částí). Pracovní nástroje, jakými jsou štětce, válečky, atd., jsou levné a jednoduché, a proto se i přes větší mzdové náklady jedná o jeden z nejlevnějších výrobních procesů. Proces spočívá v postupném kladení výztuže, prosycování živicemi a válečkování (komprimace) každé vrstvy do předchozí, a tím je i časově náročnější než jiné metody. Díky válečkování se v laminaci zabrání nežádoucí přítomnosti vzduchových bublin a dochází k rovnoměrnému rozmístění živic. Vlastnosti kompozitu jsou závislé na vzájemné poloze těchto vrstev (obr. 1.14), protože výztuž má v podélném směru lepší vlastnosti než v příčném. Je tedy lepší vůči sobě vždy vrstvy natočit, poté mluvíme o tzv. kvaziizotropním laminátu. Lamináty vyrobené tímto způsobem mají větší mechanickou pevnost proti jinak vyrobeným kompozitům stejné tloušťky díky vyššímu obsahu výztuže, který dosahuje až 35 %. Tímto druhem výroby jsou vyráběny především složité díly jak exteriérové, tak interiérové karoserie nebo velké díly, jakými jsou například zadní a přední panely autobusů. [3, 4, 7, 11, 12, 13, 14]



Obr. 1.14 Geometrické uspořádání rovin [12]

1.5.2 RTM

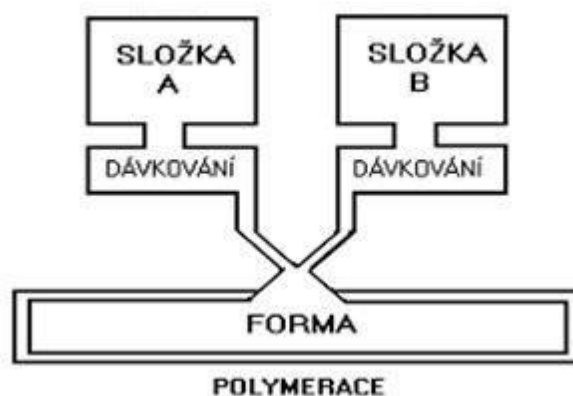
Na výrobní proces RTM (z anglického *Resin Transfer Molding*) je třeba forma tvořená ze dvou částí, formy a víka. Samotná výroba začíná vyložení formy vyztužovací složkou (tkanina nebo rohož) a jejím pečlivým zastřížením. Forma se uzavře víkem, které přesně vymezí tloušťku výrobku. Pomocí vakua či tlaku se víko těsně přisaje a z formy je odčerpán všechen vzduch, který by nám dělal neplechu v samotném výrobku. Mohl by tvořit nežádoucí vzduchové bubliny (vada materiálu). Po zapojení plnicího stroje je pod tlakem vstříknuta do formy směs živic podle předem požadovaného množství, které smočí výtzuž. Z důvodu vstříkování směsi pod tlakem bývá forma vyráběna z hliníku či oceli, čímž roste váha formy. Proto jsou při této výrobě potřebné portálové jeřáby či jiné zvedací stroje. Po naplnění formy směsí živic je forma odpojena od plnicího stroje a zůstává připojena na vakuum až do doby, než může být výrobek odformován. Vstříkovanou matricí bývají epoxidové a polyesterové živice, jako výtzuž se nejčastěji používají skleněná vlákna. Takto vyrobený kompozit je v porovnání s kompozitem vyráběným ručně méně pevný a to zejména kvůli menšímu obsahu skla, který u této výroby dosahuje hodnot kolem 25 %. Tato metoda výroby je vhodná pro díly se sérií přesahující 150 výrobků ročně, pro výrobky, kde je kladen důraz na stejnou tloušťku a rozměry všech dílů. Nejčastější využití je při výrobě blatníků, podběhů, spojlerů a jiných karosářských dílů. [3, 4, 7, 11, 13, 14]



Obr. 1.15 Schéma výroby RTM [11]

1.5.3 RIM

Nutnost zkrátit výrobní cyklus použitím velmi reaktivních pryskyřic vedla k vývoji Technologie RIM (Reaction Injection Moulding). Na rozdíl od technologie RTM, kde se jednotlivé složky nejprve smísí a pak se vstříkují do formy, se u této technologie jednotlivé složky skladují odděleně a mísí se přímo ve formě. Složky jsou vstříkovány do formy přibližně ve stejném množství pod tlakem 14 až 20 Mpa. Toto složky po společném smíšení rychle reagují, nabývají rychle gelové konzistence a vytvrzují se. Výhodou tohoto postupu je dlouhodobá skladovatelnost jednotlivých složek, možnost dosáhnout extrémně krátkých vytvrzovacích časů (v řádu minut) a s tím související nižší cena výrobku. Tímto způsobem se vyrábějí především karosářské díly jako přední a zadní panely autobusů, dveře, blatníky a interiérové doplňky autobusů. [4, 9, 11,13, 14]



Obr. 1.16 Schéma výroby RIM [11]

1.5.4 Vakuově – vypěňovací technologie

Tato technologie je charakteristická tím, že do dvoudílné formy se položí, zastříhne a pečlivě vytvaruje speciální výztuž, na kterou poté ručně nanášíme pryskyřici (obr. 1.17). Poté formu zaklopíme (zavřeme), pomocí vakua je víko pevně přisáto k formě, jsou odvedeny všechny nežádoucí bubliny a je vymezen prostor pro výrobek. Při reakci ve formě nabývá pryskyřice na objemu, čímž zcela zaplní prostor pro výrobek. Výrobek musí dozrát ve formě až do úplného vytvrzení. Takto vyráběné díly jsou křehčí, lehčí, avšak nejsou tak pevné jako jinými způsoby vyráběné díly. Z toho důvodu se spíše využívají jako pohledové díly do autobusů, kde jejich pevnost není nejdůležitější rolí. [4, 9, 11, 13, 14]



Obr. 1.17 Ruční aplikace pryskyřice [13]

1.5.5 Studené lisování

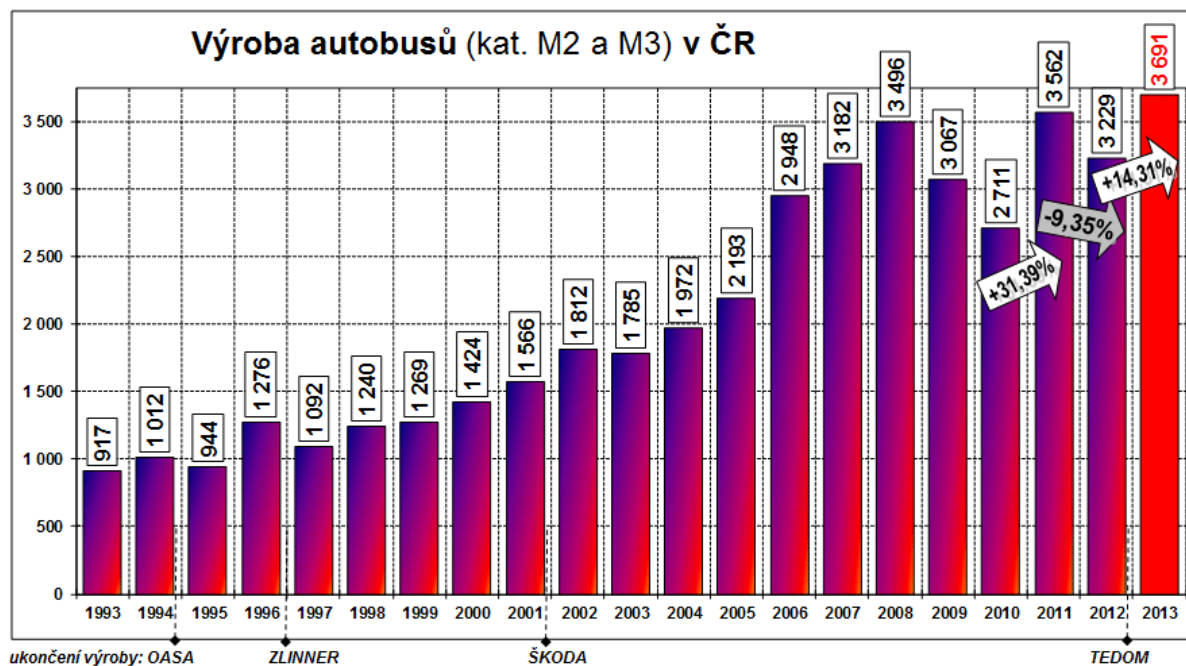
Jedná se o technologii na výrobu nejmenších dílů z kompozitu v autobusovém průmyslu. Tento způsob výroby je využíván u dílů, kde hlavní roli hraje maximální přesnost tloušťky dílu a zároveň kde je na malých formách problém s místem na odtokové kanálky. Do dvoudílné formy se s maximální pečlivostí položí, zastříhne a vytvaruje výztuž, která se poté rovnoměrně prosytí pryskyřicí. Po uzavření je forma stlačována pomocí šroubů či upínek, čímž dochází k prosycení výztuže a vytlačení nežádoucích vzduchových bublin. Výrobek by měl zůstat ve formě až do úplného vytvrzení. Díly takto vyrobené jsou převážně používány do sestav světel jako jejich zadní části. [4, 9, 11, 13, 14]

2. APLIKACE KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ U AUTOBUSŮ

Kompozitní materiály zažívají od svých počátků obrovský rozmach, avšak prozatím častěji u automobilů než u autobusů. Jak ale již historie mnohokrát dokázala, k prostředkům hromadné dopravy vede cesta právě přes automobilový průmysl, což dává naději na stále větší využívání kompozitních materiálů. V dnešní době dopravci a dopravní podniky vybírají svá vozidla podle spolehlivosti, odolnosti, vzhledu, vyprodukovaných emisí a spotřeby paliva na ujetý kilometr. Aby tyto požadavky výrobci splnili, vynakládají nemalé finanční prostředky a snaží se zaměřit na zlepšení efektivity svých pohonných jednotek či vymýšlení alternativního efektivního pohonu. V neposlední řadě se snaží o snížení hmotnosti svých výrobků, aniž by se to jakkoli dotklo bezpečnosti a spolehlivosti. Tento fakt vede právě k využívání kompozitních materiálů ve větší míře než je tomu v současnosti. Je však vždy třeba zvážit, zda dané řešení má více výhod či nevýhod a podle toho se rozhodnout.

2.1 Vývoj využití

V současné době jsou na území České Republiky dva hlavní výrobci autobusů. Jsou jimi Iveco Czech Republic (bývalá Karosa) a SOR Libchavy. Jak je vidět na obrázku 2.1 od roku 1993 výroba autobusů na našem území neustále roste. V letech 1993 až 2013 vzrostla výroba o neuvěřitelných 400 %. Za tyto roky také vzrostl podíl kompozitních dílů u autobusů z původních 7 % na dnešních 12%, a to na úkor kovových materiálů. Je to hlavně tím, že se konstruktéři ve výrobních závodech snaží autobusy odlehčovat a tím pádem splňovat stále přísnější ekologická nařízení.



Obr. 2.1 Výroba autobusů v ČR v letech 1993- 2013 [15]

V současné době jsou kompozitní materiály používány při výrobě všech tvarově náročnějších dílů karoserie, palubních desek, nástupních schodů, krytů klimatizací, stropních panelů, krytů motorů a nádrží na zemní plyn. [15, 16, 17]

2.2 Aspekty využití kompozitů

Při rozhodování o použitém materiálu rozhodují faktory, které musí daná součást splňovat. Každý materiál přináší jak svá pozitiva, tak také své limitující faktory, se kterými je potřeba počítat již při konstrukci samotného dílu. Tyto faktory mohou hovořit jak pro, tak i proti použití kompozitů. Mezi tyto faktory patří například:

- Hmotnost
- Bezpečnost
- Tvarovatelnost
- Cena
- Dopad na životní prostředí

2.2.1 Hmotnost

Hlavní výhodou při porovnání kompozitních a kovových dílů je nižší měrná hustota kompozitu (tab. 2.2). Tento fakt umožňuje výrobcům snižování hmotnosti při zachování či zlepšení pevnostních parametrů. Po přepočítání kompozitních dílů na kovový materiál u výrobce Iveco Czech Republic (Karosa) dojdeme ke zjištění, že autobus je lehčí o více než 400 kg. Díky snižování hmotnosti si mohou výrobci dovolit osazovat autobusy slabšími motory, to se pozitivně odráží do spotřeby paliva, což má za následek menší ekologické zatížení, nižší provozní náklady a jejich větší konkurenceschopnost na trhu. Není to však jediné hledisko, kvůli kterému se výrobci snaží snižovat hmotnost. Díky snižování hmotnosti mají autobusy lepší akceleraci (deceleraci) a mají níže položené těžiště. Oba tyto faktory vedou k pohodlnější a příjemnější jízdě zejména v městském provozu. [4, 16, 18]

Materiál	Ocel	Hliník	Kompozit
Měrná hmotnost [kg/m ³]	7400	2700	1800

tab. 2.2 Měrná hustota vybraných materiálů [18]



Obr. 2.2 Zadní panel autobusu Iveco – Arway [16]

2.2.2 Bezpečnost

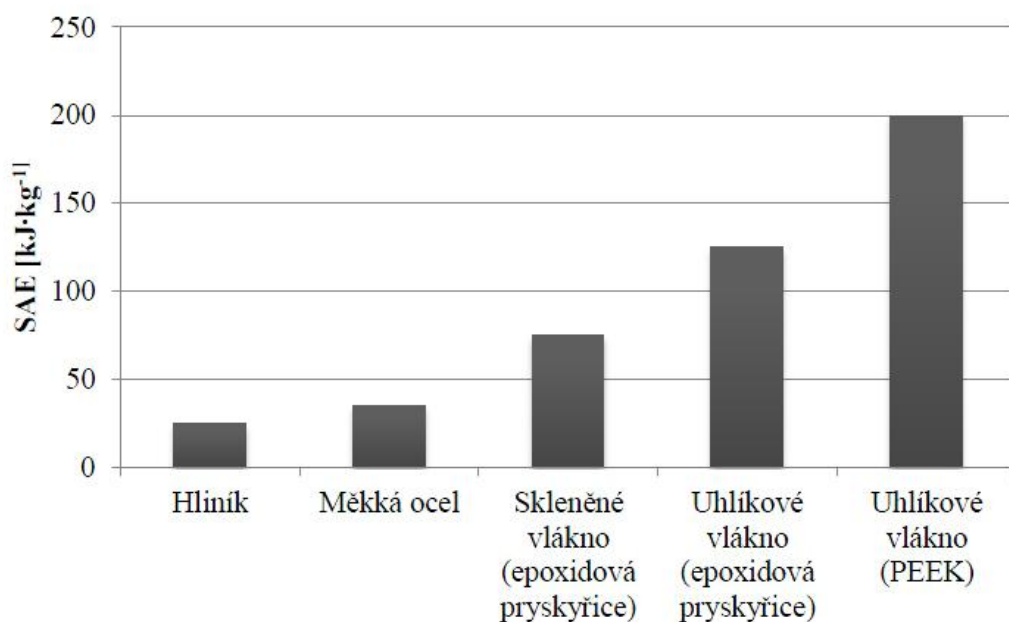
U dopravních prostředků rozeznáváme dva druhy prvků bezpečnosti. Jsou jimi aktivní a pasivní prvky bezpečnosti. Samotné nehodě se snaží nejprve předcházet aktivní prvky, mezi které řadíme různé elektronické asistenty (stabilizační, trakce, parkovací a mnoho dalších). Pokud tyto prvky selžou, dostanou se bohužel do akce prvky pasivní. Jako pasivní prvky označujeme všechny části vozidla, které jsou schopny pohlcovat kinetickou energii, jejich úkolem je zmírnit přetížení na posádku a zamezit deformacím samotného prostoru s pasažéry. U kompozitních materiálů pro jejich rozmanité a nepřeborné množství jen stěží zaujmeme jednoznační pohled, zda svou bezpečnostní stránku splňují či nikoli. Z tohoto důvodu pro jejich porovnání slouží tzv. specifická absorpce energie SAE (Specific Energy Absorption) vyjadřující pohlcenou energii na jednotku hmotnosti zdeformovaného materiálu. Orientační hodnoty SAE pro vybrané materiály můžeme vidět na obrázku (obr. 2.3)

$$SAE = \frac{W}{V \cdot \rho} \quad [KJ \cdot kg^{-1}] \quad (1)$$

Kde W je množství pohlcené energie

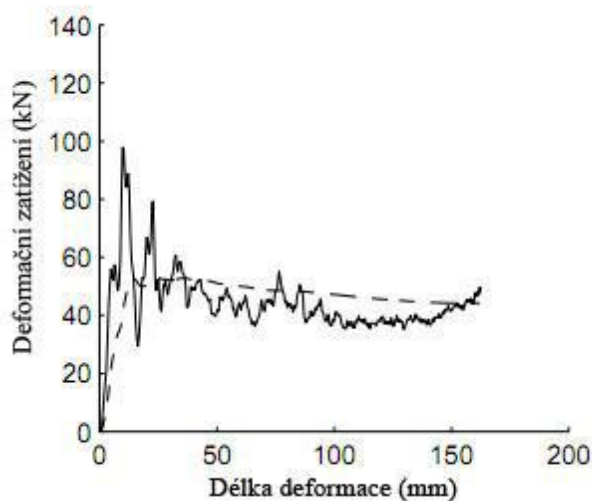
V je objem zdeformovaného materiálu

ρ je hustota zdeformovaného materiálu



Obr. 2.3 Graf znázorňující SAE hodnoty pro různé typy materiálů [20]

V praxi jsou nutné při posuzování volby ideálního materiálu jednak číselné parametry SAE, ale také diagramy s křivkou znázorňující průběh pohlcení energie (obr. 2.3). Takovéto diagramy jsou získávány experimentálně za použití vzorků různých typů materiálů konstrukcí a zatížený staticky nebo dynamicky. Velkou nevýhodou kompozitních materiálů bývá, že pokud se rozlomí, jejich střepy jsou velmi ostré a tím pádem velmi nebezpečné. [4, 7, 19, 20]



Obr. 2.3 Diagram reálného průběhu pohlcení energie při dynamickém zatížení [19]

2.2.3 Tvarovatelnost

S nástupem kompozitních materiálů do dopravního průmyslu se otevřel nový prostor pro tvarovatelnost výrobků. Tvarovatelnost kompozitů je jeden z důležitých, ne-li nejdůležitější aspekt, který mluví pro využívání kompozitů. Výrobu kompozitních materiálů můžeme přizpůsobit tvaru a požadavkům výrobce daleko snáze než tomu bylo u plechových (železných) dílů, kde se muselo přihlížet k vlastnostem materiálu při tvarování (mez kluzu, mez pevnosti, atd.) a dílenským postupům. Dobrá tvarovatelnost se využívá převážně u karosářských dílů, kde se snažíme, aby autobus měl co nejmenší odpor vzduchu a aby nám nevznikaly vzdušné víry, které mají negativní vliv na spotřebu, emise vypouštěné do ovzduší a tím pádem také na provozní náklady. Současné autobusy v porovnání s autobusy vyráběnými před pár desítkami let jsou aerodynamicky čistší, což má vliv, mimo již výše zmíněné vlastnosti, také na hluk a komfort cestujících v autobuse. [4, 7, 19, 20]

2.2.4 Cena

Cena je faktorem, na který zákazník při nákupu hledí snad nejvíce. Do výsledné ceny vstupují ceny jednotlivých dílů, které musí být vyrobeny v kooperaci, cena surovin a následné výroby. Výsledná cena kompozitů představuje největší překážku v jejich masivnějším používání. V porovnání s materiály na bázi kovu jsou nejen pořizovací náklady vyšší, ale v případě nehody, kdy by běžný materiál díky své pružnosti nebylo třeba vyměňovat, musíme u kompozitních dílů zkontrolovat jejich vnitřní strukturu zda nedošlo k poškození, které se provádí důkladnou rentgenovou počítačovou tomografií, která je zdlohavá a velmi nákladná, popřípadě daný díl vyměnit. Z tohoto důvodu se u autobusů setkáváme především s využitím kompozitních dílů pouze na karosářské díly a interiérové doplňky. Pro svou cenu a dostatečné vlastnosti jsou nejčastěji využívány sklolamináty, které na tyto díly svými parametry plně dostačují, není to však budoucnost kompozitních materiálů v autobusovém průmyslu. Větší rozmach nastane ve chvíli, kdy se náklady na uhlíková vlákna sníží, a tím se stanou dostupnějšími pro sériovou výrobu. [4, 9, 18]

2.2.5 Dopad na životní prostředí

V současné době, kdy se na nás ze všech stran hrne nutnost ekologického myšlení, přešel tento trend i do dopravního průmyslu. V současné době jsou autobusy tvořeny asi z 90% z recyklovatelných materiálů. Nejvíce obtížné je recyklování kompozitních materiálů. Z tohoto důvodu jsou recyklovány především materiály s obsahem uhlíkových vláken, kde jsou suroviny na jejich výrobu mnohonásobně dražší než je tomu u klasických skleněných vláken. Při recyklaci ale dochází ke ztrátě mechanických vlastností a to na 80% původních

vlastností. Z toho důvodu není možné recyklovat materiál donekonečna, proto není možné použít čistě recyklovaný materiál jako primární surovinu. Recyklovaný materiál se používá jako příměs do kompozitů a to spíše do matrice, avšak neměl by přesahovat více než 20%. U skelných laminátů využívaných v autobusové dopravě se nejvíce u recyklace využívají spalování a drcení. Při drcení je recyklovaný materiál mechanicky rozdrčen a následně dochází k jeho rozemletí. Právě takto zpracovaný materiál je přidáván do matric jako sekundární doplněk při výrobě nepohledových materiálů. Nepohledových z důvodu drsnější struktury díky použití recyklovaného materiálu. Nesmíme v této kapitole také zapomenout na tvorbu nebezpečných látek při výrobě sklolaminátu, mezi které patří zejména styreny a nebezpečné látky obsažené v matricích a urychlovačích. Tyto látky tím, že jsou těžší než vzduch, musí být při výrobě odsávány kanály v podlaze. K bezpečné likvidaci se používají dva způsoby. Za prvé je to katalytické spalování odsávaných škodlivin při teplotách nad 900 stupňů a za druhé biodegradace v nádržích s živými mikroorganismy. Když bych měl z ekologického hlediska rozhodnout, zda použít kompozitní materiál nebo kovový materiál, osobně bych se přikláněl ke kovovým materiálům. [4, 9, 14, 18]

3. VÝROBA KONKRÉTNÍHO DÍLU ZE SKLOLAMINÁTU

Ve třetí a poslední části, bych rád ukázal na konkrétním dílu ze sklolaminátu, jak poměrně dlouhá a složitá výroba vede od přijetí dat až k samotné expedici hotového výrobku. V této části budu čerpat ze svých zkušeností, které jsem získal během mnohaletých letních brigád ve společnosti Composite Component (dále jen CC). Jedná se o naši rodinnou společnost z Chocně, která vznikla v roce 2007 a její hlavní náplní je výroba kompozitních dílů převážně sklolaminátů pro dva nedaleké autobusové výrobce Iveco Czech Republic (Karosa) a SOR Libchavy a také výrobce do Holandska, kterým je skupina VDL (Berkhof, Bova a Jonckheere). Jako příklad použití kompozitního materiálu pro konkrétní součást autobusu jsem vybral tento popisovaný příklad. Jelikož nejzajímavějším modelem městských autobusů vyráběných ve Francii je model GX 337 výrobce Heuliez bus z Rohrte, rozhodl jsem se zde představit ukázkou výroby zadního panelu tohoto vozidla. Pro výrobu zadního panelu o šíři 2550 mm a délce 1220 mm byl zvolen laminát se skelnou výztuží. Vzhledem k zakázkové výrobě tohoto městského autobusu a ke skutečnosti, že tento díl je vlepován u výrobce pomocí speciálních přípravků na svařovaný nerezový rám vozidla, kdy tloušťka výrobku hraje zanedbatelnou roli, byla po dohodě s výrobcem autobusu zvolena výrobní metoda kladení za mokra (kontaktní laminace). Než se ovšem pustíme podrobněji do samotné výroby, musíme se ještě zastavit u vstupních materiálů, které ještě nebyly zmíněny výše. Podrobněji se na ně podíváme v následující podkapitole.

3.1 Vstupní materiály

Gelcoat

Pojmem gelcoat definujeme barevně pigmentované polyesterové pryskyřice s obsahem barevného pigmentu 8 až 20 % a s přidáním tixotropních činidel a urychlovače. Zacházení s nimi je podobné jako u polyesterových pryskyřic. [9]

Gelcoat může být obarven do různých odstínů stupnice RAL (z německého Reichsausschuss für Lieferbedingungen), a proto se používá jako povrch pohledové části laminátu (obr. 3.1.1). Podle další povrchové úpravy rozpoznáváme dva druhy gelcoatu. Základní, označovaný jako primer, se nanáší v jedné vrstvě a dále je pak díl lakován. Druhým je finální gelcoat, který se nanáší minimálně ve dvou vrstvách a jeho povrch se už nijak dále neupravuje. V porovnání s lakovanými částmi je povrch gelcoatu pevnější, odolnější a trvanlivější.



Obr. 3.1.1 Ukázka probarvení gelcoatu u hotových výrobků

Separátory

Separátory nám zabraňují slepení formy a výrobku a usnadňují nám jejich odformování. Pro každý druh výroby je nutné využívat určitý druh separátoru dle technologického postupu.

Základní dělení:

Voskové separátory: nejvyužívanější separátory za normálních teplot při ručních výrobních procesech. Jejich aktivní část je na bázi vosku. Konzistence těchto separátorů je buď kapalná nebo tuhá.

Polotrvanlivé systémy: tyto separátory se chemickou vazbou přichytnou a přilnou k formě, kde vytváří film. Mezi hlavní výhody těchto separátorů je trvanlivost separační vrstvy a podpora lesku výrobků. Nevýhodou je však vyšší cena.

Filmogenní systém: aktivní část je na bázi polyvinylalkoholu. K odstranění neseparovaného povrchu z výrobku stačí u těchto separátorů pouze opláchnutí vodou, z tohoto důvodu je jejich hlavní využití u dále upravovaných dílů. [9]

Iniciátor

Jako iniciátor se při výrobě sklolaminátu v CC používá organický peroxid, díky kterému dochází k zasítní (vytvrzení) matrice. Bez přidání nebo při nedostatečném dávkování, které by se mělo pohybovat v rozmezí 1 až 3%, nemůže k zasítní vůbec dojít. S větším množstvím iniciátoru dochází k rychlejšímu zasítní, které je u nespotřebované (neaplikované) matrice nežádoucí.

Urychlovače

VCC se nejčastěji používá kobaltový urychlovač o 4% koncentraci. Jedná se o roztok kobaltové soli v etanolu. Kobaltový urychlovač uvolňuje aktivní kyslík z iniciátoru a tím zasítní pryskyřice urychluje. Většina používaných matric a gelcoatů má již od výrobce předem přimíchané doporučené množství urychlovače. Větší množství urychlovače se přidává při drobných opravách u procesu dokončování výrobků, kdy aplikujeme minimální množství směsi, reakci nevzniká tolik tepla, lépe se odvádí do okolí a nehrozí riziko poškození výrobku, případně vznik požáru. [9]

3.2 Výroba formy

Tak jako u každého výrobku ze sklolaminátu bylo po přijetí dat od zákazníka a předpokládané sériovosti výroby rozhodnuto o způsobu výroby. Bylo rozhodnuto o výrobě ruční laminací pro velkou tvarovou rozličnost. Po schválení zákazníkem a technologické modifikaci byla data zaslána k výrobě modelu, který je nezbytný pro výrobu formy. Model je vyráběn frézováním lepených MDF desek na základě obdržení dat (obr. 3.1).



Obr. 3.1 Model vyfrézovaný do lepených MDF desek

Po dodání modelu do výroby je model nejprve natřen přetučenou polyesterovou pryskyřicí RM 568 PA naředěnou acetonem v poměru 1:1. Tento nátěr nám zpevní povrch po strojovém opracování a je možné dobrousit nežádoucí ostřiny a přechody jednotlivých segmentů. Za účelem odstranění pórovitosti povrchu se takto upravený model nastříká dle potřeby jednou až třemi vrstvami polyesterového stříkacího tmelu. Po zatvrdnutí tmelu (alespoň 24 hodin) dochází broušením k odstranění tzv. pomerančové kůry. Zbroušený tmel se musí pečlivě odsát ze všech záhybů a zákoutí modelu. Model se v naprosto bezprašném stříkacím boxu nastříká tenkou vrstvou vrchního laku (používá se Vorgelat T 35) a po zatvrdnutí takto připravený model odchází na modelárnu. Jelikož na kvalitě povrchu modelu závisí kvalita a lesk všech

vyrobených dílů, musí se povrch modelu postupně brousit brusnými papíry zrnitosti 1000 až 1500 dle přání zákazníka. Jelikož ani tímto broušením nedocílíme zcela lesklého povrchu, používáme ještě brusné pasty a leštící kotouče k dosažení zrcadlového lesku. Aby nám lépe šla sejmout forma z modelu, je nutné alespoň 5x neseparovat separátorem celý povrch modelu. K tomu účelu používáme Frekote 700 NC (obr. 3.2), který patří do skupiny polotrvanlivých separátorů. Mezi jednotlivými vrstvami je nutno dodržet alespoň 20 minut, jak je dáno výrobcem.



Obr. 3.2 Používané separátory při výrobě forem

Na takto připravený model nanese dvě vrstvy formového gelcoatu (Norpol GM 9000 S). Mezi jednotlivými nánosy musíme dodržet dobu potřebnou k jeho zasítní. Jako první (nárazníková) vrstva sklovýztuže formy se používá Vlies 30 – 40 g/m², který se precizně položí a prosytí se, aby bez nežádoucích vzduchových bublin přilnul na vrstvy gelcoatu. Po asi 3 hodinách se vyfrézují případné vzduchové bubliny a dolaminují se tři vrstvy rohoží 300 g/m² s minimálními překlady vrstev. Celá takto položená první vrstva se laminuje pro lepší přilnutí a lepší vlastnosti pryskyřicí RM 568 PA. Po vylaminování nárazníkové vrstvy se laminují samotné nosné vrstvy formy, které jsou tři a každá obsahuje tři vrstvy rohože 450 g/m² a je prosycována pryskyřicí RM 2000 (Obr. 3.3).



Obr. 3.3 Laminace nosné vrstvy

Před poležením každé další vrstvy se musíme ujistit, zda předchozí vrstva neobsahuje vzduchové bubliny popřípadě tyto bubliny vyhnat kovovými válečky. Tomuto procesu se říká válečkování. Při laminaci výrobku nesmí dojít k nějaké deformaci formy, a proto se forma vyztužuje žebry, které mohou být z OSB desek (dřevěné), polyuretanové pěny nebo z trubek (obr. 3.4). Výztuž se přilaminuje k poslední vrstvě. Takto dokončená forma je připravena na sejmutí z modelu, následné ořezání neprosycených krajů skelné výztuže a separování formy. Takto dokončená forma je připravena k převzetí do výroby.



Obr. 3.4 Přelaminované výztuže formy

3.3 Ruční laminace výrobku

Do předem naseparované, vyčištěné a vizuálně zkontrolované formy nanášíme čistým, stlačeným vzduchem vyfoukaným štětcem, který musí být opatřen ochranou gumou proti podřetí formy, gelcoat. Gelcoat může být nanesen podle požadavků zákazníka v jedné nebo dvou vrstvách tak, aby bylo pokryto každé místo výrobku takou vrstvou, která nesmí prosvítat. Tato tloušťka musí být v rozmezí 0,5 – 0,8 mm. Samotné laminování výrobku lze provádět až po želatínaci gelcoatu. Při jemném dotyku prstem nesmí zůstat gel na prstu a to na celé ploše výrobku, jinak dochází k nežádoucímu prorýsování sklovýztuže do plochy.



Obr. 3.5 Tahy štětce vzniklé v gelcoatu při jeho aplikaci

Při laminaci tvarově složitých výrobků s malými rádiusy se musí tyto rádiusy vyplnit tzv. tekutou rohoží (Oldopal). Jedná se o polyesterovou pružnou pryskyřici s malým smrštěním, naplněnou sekaným skleněným vláknem. První vrstvu laminace lze provádět až po želatínaci tekuté rohože, aby nedošlo k jejímu vymačkání. Před položením první vrstvy sklovýztuže je nutné povrch gelcoatu pod sklovýztuží smočit pryskyřicí, aby bylo zajištěno spojení s gelcoatu s laminátem. Výrobek je složen ze tří vrstev rohože 450 g/m^2 a je prosycován ortoftalovou pryskyřicí Colpoly 7524. Každá vrstva musí být prosycena a vyválečkována. Laminované vrstvy nesmí vykazovat místa s přebytkem nevyztužené pryskyřice, neboť v těchto místech dochází k zvýšené exotermické reakci (velké zahřátí) a k tvoření deformací na výrobku, což vede ke znehodnocení výrobku. Případnou přebytečnou pryskyřici je nutno suchým válečkem nebo štětcem odstranit. Při laminaci se musí dbát na nežádoucí překlady rohoží, kdy by neměli vznikat více jak 3 vrstvy rohože a to ze stejného důvodu jako u přebytku pryskyřice. Takto hotový výrobek musí dozrát ve formě do úplného vytvrzení. Až poté je možno výrobek odformovat. Výrobek poté putuje na ořez a dokončení. Po odformování práce dělníka nekončí, jak je vidět na obrázku 3.7. Forma je poměrně dost znečištěná a do takto špinavé formy není možné laminovat další výrobek. Při čištění musíme také vizuálně zkontrolovat, zda se nám při odformování neuštípla nějaká část formy. Pokud ano, musí se forma odvézt zpět na modelárnu, kde je daný problém opraven.



Obr. 3.6 Odformovaný výrobek



Obr. 3.7 Znečištění formy po laminaci

3.4 Ořez a dokončení

Tato část výroby začíná ořezáním přetoků materiálu pomocí vzduchem poháněných nástrojů a vyvrtáním konstrukčních otvorů ve vylaminovaném výrobku. Tento proces je velmi prašný a přítomnost prachu při jiných výrobních procesech je nežádoucí. Proto jsou boxy pro ořez vybaveny silnými odsávacími systémy. Výrobky po ořezání mají výsledný tvar daného výrobku. Pracoviště dokončovny pracuje na kompletaci výrobků a lepení konstrukčních zálistků, které slouží k připevnění dílu k nosné konstrukci autobusu. Na tyto lepené spoje se používá dvousložkové lepidlo, které převyšuje mechanickými vlastnostmi vlastnosti sklolaminátu. Aby bylo zaručeno přesné umístění zálistků, používají se lepicí přípravky, které nám pomocí upínek zaručí vždy stejnou polohu vůči laminátovému výrobku (obr. 3.8). Po dokončení všech dokončovacích prací je výrobek umyt od prachu a vyleštěn do vysokého lesku, zkontrolován pracovníky zodpovědnými za kvalitu a je připraven k expedici k zákazníkovi.



Obr. 3.8 Kompletace výrobku



Obr. 3.9 Výrobek připravený k expedici

Závěr

Kompozitní materiály nejsou v autobusovém průmyslu tak rozšířené, jak je tomu v jiných dopravních odvětvích. Vše ale nasvědčuje tomu, že se jich bude využívat stále více, zejména z důvodů snižování hmotnosti autobusů a tím pádem ekologické zátěže. V předložené práci jsem poukázal na výhody i nevýhody, které tyto materiály mají a některé se zde jistě hodí znovu připomenout. Mezi hlavní výhody patří nízká měrná hmotnost, snadná tvarovatelnost, odolnost vůči nepříznivým vnějším vlivům a jednoduchá údržba. Pokud jsem v závěru své práce zmínil výhody, nesmíme opomenout jejich nevýhody. O mnohých z nich si ale myslím, že s příchodem nových technologií a materiálů budou vyřešeny. Jsou jimi například recyklace, jejich druhotné zpracování a poměrně vysoká cena vstupních materiálů.

V práci jsem seznámil čtenáře se základními materiály potřebnými pro výrobu kompozitních dílů a ukázal výhody a nevýhody jednotlivých materiálů. Představil jsem základní výrobní procesy používané pro výrobu a zhodnotil jejich použitelnost při výrobě. V poslední části jsem se zaměřil a prošel jsem se čtenáři výrobou laminátového výrobku od přijetí modelu do výroby až k expedici hotového výrobku, který je připraven k namontování na autobus.

Seznam použité literatury

- [1] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK, VOJTĚCH, Dalibor. *Úvod do studia materiálů* [online]. Vyd. 1. Praha: VŠCHT, 2005, 190 s. [cit. 2014-04-08]. ISBN 80-708-0568-4. Dostupné z: http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_isbn-80-7080-568-4/pages-pdf/171.html
- [2] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK, VOJTĚCH, Dalibor. *Úvod do studia materiálů* [online]. 1.vyd. Praha: VŠCHT, 2005, 190 s. [cit. 2014-04-08]. ISBN 80-708-0568-4. Dostupné z: http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_isbn-80-7080-568-4/pages-pdf/170.html
- [3] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-32.
- [4] EHRENSTEIN, W. G. *Polymerní kompozitní materiály*. 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [5] VRBKA, Jan. *Mechanika kompozitu* [online]. Brno, 2008 [cit. 2014-04-08]. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=52474.
- [6] KOPELIOVICH, Dmitri. Metal Matrix Composites (introduction). *Materials Engineering* [online]. 2012 [cit. 2014-04-08]. Dostupné z: http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=metal_matrix_composites_introduction
- [7] LAŠ, Vladislav. *Mechanika kompozitních materiálů*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2004, 156 s. ISBN 80-704-3273-X.
- [8] Roving. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. 2014. [cit. 2014-04-09]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Roving>
- [9] COMPOSITE COMPONENTS, a. s. *Základy pro výrobu skelného laminátu*. Firemní materiál, Choceň, 2006, 6 s.
- [10] Galerie. Carbon Mods. *Carbon/Kevlar 188g – Plain weave* [online]. 2010 [cit. 2014-04-10]. Dostupné z: <http://www.carbonmods.co.uk/Products/carbon-kevlar-fabric.aspx>
- [11] KOŘÍNEK, Z. *Technologie* [online]. Volny.cz. [cit. 2014-04-11]. Dostupné z: <http://mujweb.cz/zkorinek/technologie.pdf>
- [12] CAMPBELL, F. *Structural composite materials* [online]. Materials Park, Ohio: ASM International, 2010, xiii, 612 p. [cit. 2014-04-11]. ISBN 16-150-3037-9. Dostupný z: http://www.knovel.com/web/portal/browse/display?_EXT_KNOVEL_DISPLAY_bookid=4000&VerticalID=0

- [13] COMPOSITE COMPONENTS, a. s. *Základní rozlišení výrobních procesů*. Firemní materiál, Choceň, 2006, 11 s.
- [14] COMPOSITE COMPONENTS, a. s. *Základní popis procesu*. Firemní materiál, Choceň, 2008, 5 s.
- [15] *Přehledy výroby a odbytu vozidel domácích výrobců* [online]. 2013 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.autosap.cz/sfiles/a1-1.htm#bus>
- [16] *Komponenty automobilů. Autobusů, strojů a ostatní průmyslové díly* [online]. 2014. [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.compositecomponents.eu/cs/komponenty-automobilu-autobusu-stroju-a-ostatni-prumyslove-dily>
- [17] *Glass composite cylinders offer benefits for CNG vehicles* [online]. 2014. [cit. 2014-04-22]. Dostupné z : <http://www.reinforcedplastics.com/view/20540/glass-composite-cylinders-offerbenefits-for-cng-vehicles>
- [18] SHIGLEY, Joseph Edward, MISCHKE, Charles R., BUDYNAS, Richard G. *Konstruování strojních součástí*. 1. vyd. Editor Martin Hartl, Miloš Vlk. Brno: VUTIUM, 2010, 1159 s. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [19] SCHULTZ, R. M. *Energy absorption capacity of graphite-epoxy composite tubes* [online]. 1998. [cit. 2014-04-23]. <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-10498114727/unrestricted/Thesis.pdf>
- [20] PATIL, Praveengouda. *Applications of composite materials in the Automobile industry* [online]. 2010 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: <http://www.scribd.com/doc/32475280/Composites-in-the-Automobile-Industry>.
- [21] CHUNG, DEBORAH D.L. *Composite materials: functional materials for modern technologies*. London: Springer, 2003. 289 s. ISBN 185233665X

Seznam použitých zkratek a symbolů

RIM	[-]	Reaction Injection Molding
RTM	[-]	Resin Transfer Molding
SAE	[J/kg]	Specific Energy Absorption
RAL	[-]	ReichsAusschuss für Lieferbedingungen
UP	[-]	Polyuretan
R_e	[Mpa]	Mez pružnosti
R_m	[MPa]	Mez pevnosti
E	[GPa]	Modul pružnosti v tahu
ρ	[$10^3 kg/m^3$]	Hustota