

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra materiálu a strojírenské technologie



Jan Motýl

**Využití vláknových kompozitů
v konstrukci dopravních prostředků**

Bakalářská práce

2015

Vedoucí práce: Ing. Petr Valášek, Ph.D.

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Technická fakulta

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jan Motýl

Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

Využití vláknových kompozitů v konstrukci dopravních prostředků

Název anglicky

Application of fiber composites in the construction of vehicles

Cíle práce

Cílem bakalářské práce je shromáždit aktuální literární poznatky o možnostech využití vláknových kompozitů v konstrukcích dopravních prostředků, zároveň identifikovat vývojové trendy těchto materiálů ve sledovaných oblastech, především v oblasti automobilového průmyslu.

Metodika

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

Doporučený rozsah práce

30 – 40 stran

Klíčová slova

Automobilový průmysl, konstrukční materiály, mechanické vlastnosti, synergický efekt.

Doporučené zdroje informací

Agarwal, B. D., & Broutman, L. J. (1987). Vláknové kompozity 1. vyd. Praha: Nakladatelství techn. lit..
Časopisy: Applied composite materials, Journal of composite materials, Journal of composites for construction, Manufacturing Technology, Strojírenská technologie.

Gay, D., Hoa, S. V., & Tsai, S. W. (2003). Composite materials: Design and applications 4th ed. Boca Raton: CRC Press.

Hosford, W. F. (2008). Materials for engineers Cambridge ; New York: Cambridge Univ. Press.

Chawla, K. K. (1998). Composite materials: Science and engineering 2. ed. New York: Springer.

Kaw, A. K. (2006). Mechanics of composite materials 2nd ed. Boca Raton: Taylor & Francis.

Kolařík, J. (1984). Vysokomodulová polymerní vlákna a vláknové kompozity 1. vyd. Praha: Academia.

Machek, V., Sodomka, J., & České vysoké učení technické v Praze. Dopravní fakulta. (2008). Polymery a kompozity s polymerní matricí: Václav Machek, Jaromír Sodomka Vyd. 1. Praha: Nakladatelství ČVUT.

Mallick, P. K. (1988). Fiber-reinforced composites: Materials, manufacturing, and design New York: M. Dekker.

Norman, J. C. (1975). Damage resistance of high modulus aramid fiber composites in aircraft applications 1. ed. Warrendale: SAE.

Partridge, I. K. (1989). Advanced Composites 1. ed. London: Elsevier Applied Science.

Shi, C., & Mo, Y. L. (2008). High-performance construction materials: Science and applications Singapore ; Hackensack: World Scientific.

Předběžný termín obhajoby

2015/05 (květen)

Vedoucí práce

Ing. Petr Valášek, Ph.D.

Elektronicky schváleno dne 9. 1. 2014

doc. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 3. 2. 2014

prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan

V Praze dne 01. 04. 2015

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci zpracoval samostatně pod vedením Ing. Petra Valáška, Ph.D. pouze s použitím zdrojů uvedených v seznamu použité literatury.

V Praze 27. března 2015

Mořk

Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval mému vedoucí bakalářské práce, panu Petru Valáškoví, za poskytování zasvěcených rad, věcné připomínky a vstřícný přístup. Poděkování patří též mým rodičům za jejich podporu během mého studia.

Abstrakt

Tato práce si klade za cíl shrnout současné poznatky o aplikaci vláknových kompozitů v konstrukci vozidel, a to především v automobilovém průmyslu. Práce popisuje používané materiály, technologie, aspekty použití vláknových kompozitů a příklady jejich využití, přičemž důraz je kladen především na praktické příklady konkrétních využití v soudobých automobilech. Též jsou popsány perspektivní materiály a nastíněn možný budoucí vývoj v oboru.

Klíčová slova

Automobilový průmysl, konstrukční materiály, mechanické vlastnosti, synergický efekt

Summary

The major goal of this thesis is to summarize current knowledge about application of fiber composites in a construction of vehicles, especially in automotive industry. Thesis consist of a description of used materials and technologies, aspects of usage of fiber composites and examples of their applicatios, while the emphasis is on practical examples of usage in nowadays cars. Perspective materials and brief view to the future are also described.

Key words

Automotive industry, construction materials, mechanical properties, synergy effect

Obsah

1	Úvod	3
2	Cíle a metodika práce	4
3	Definice vláknových kompozitů využívaných v konstrukci dopravních prostředků	5
3.1	Klasifikace kompozitních materiálů	5
3.2	Mechanické vlastnosti vláknových kompozitů	6
3.3	Výztuže používané v automobilovém průmyslu	7
3.3.1	Skleněná vlákna	7
3.3.2	Uhlíková vlákna	8
3.3.3	Aramidová vlákna	8
3.3.4	Přírodní vlákna	8
3.3.5	Ostatní vlákna	9
3.3.6	Jádra pro sendvičové kompozity	9
3.4	Matrice	10
3.4.1	Polymerní matrice	10
3.5	Technologie výroby	10
3.5.1	Ruční kladení	11
3.5.2	Lisování v autoklávu	11
3.5.3	Vysokotlaké vstřikování (RTM – resin transfer molding)	12
3.5.4	Lisování (compression molding)	12
3.5.5	Vstřikování (injection molding)	13
3.5.6	Navíjení (filament winding)	14
3.5.7	Spojování vláknových kompozitů	14
3.5.8	Sériová výroba	15
4	Možnosti a vývojové trendy v oblasti vláknových kompozitů se zaměřením na automobilový průmysl	16
4.1	Aspekty využití kompozitů v automobilech	16
4.2	Historie využití vláknových kompozitů v automobilech	18
4.3	Praktické příklady použití	20
4.3.1	Karoserie	20

4.3.2	Podvozek	23
4.3.3	Hnací řetězec	26
4.3.4	Interiér	27
4.3.5	Formula student ČZU	28
4.4	Budoucnost kompozitů v automobilech	30
5	Závěr	33
6	Seznam literatury	34

1. Úvod

Poptávka po automobilech neustále roste a s tím i nároky na ně. Zákazníci vyžadují vozidla stále výkonnější, komfortnější, bezpečnější a hospodárnější. Navíc je na výrobce automobilů vyvíjen velký tlak na snižování emisí stále se zpřísnující legislativou, zvláště pak normami Evropské unie. Tyto často naprosto protichůdné požadavky by nebylo možné splnit bez výrazného pokroku technologií a materiálového inženýrství. Jednou z možností je použít při konstrukci vozidla namísto tradičních materiálů vláknové kompozity.

Vláknových kompozitů je nespočet druhů a nabízejí kombinaci vlastností nedosažitelných u konvenčních materiálů, především bezkonkurenční poměr mezi pevností a hmotností. Díky tomu se již v dnešní době můžeme setkat v automobilech s širokým spektrem použití vláknových kompozitů – od karosérií, přes přístrojové desky až ke kompozitovým pružinám. Vláknové kompozity mají též velký potenciál do budoucna, jejich vývoj je stále v plném proudu a každým rokem se v nových automobilech objevují jejich další, do té doby nemyslitelné, aplikace.

2. Cíle a metodika práce

Cílem bakalářské práce je shromáždit aktuální literární poznatky o možnostech využití vláknových kompozitů v konstrukcích dopravních prostředků, zároveň identifikovat vývojové trendy těchto materiálů ve sledovaných oblastech, především v oblasti automobilového průmyslu.

Práce je zpracována jako rozbor literárních poznatků (rešerše). Jako zdroje jsou použity odborné knihy, články v odborných časopisech a tiskové materiály automobilek, přičemž velký důraz je kladen na aktuálnost zdrojů. Pro lepší představu jsou některé pasáže doplněny o obrázky s vysvětlením.

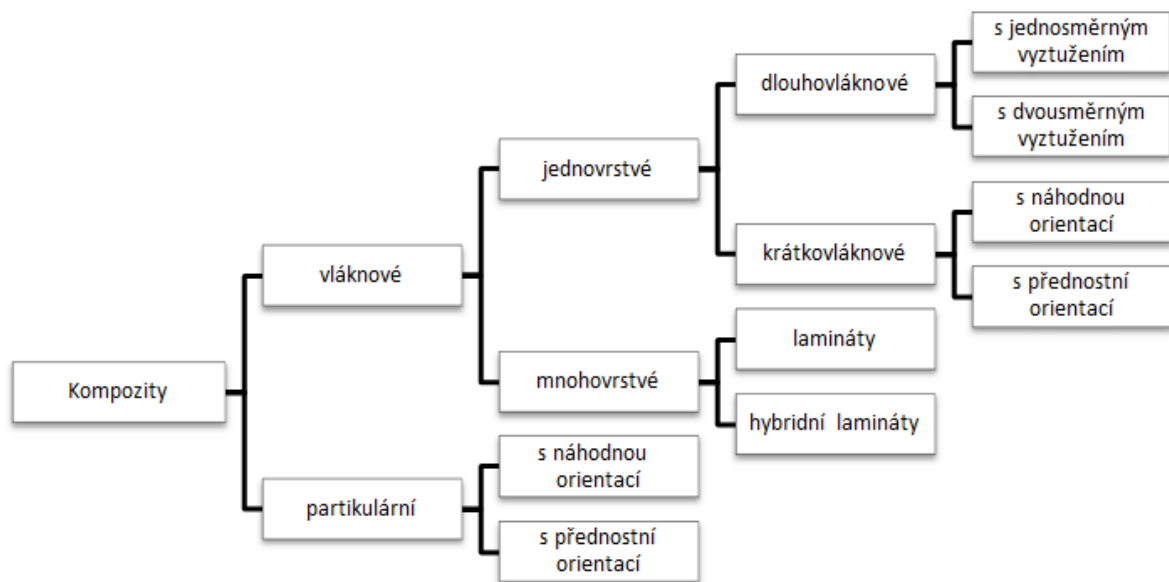
3. Definice vláknových kompozitů využívaných v konstrukci dopravních prostředků

Slovo „kompozitní“ znamená „složený z různých prvků“. Materiál se však označuje jako kompozit pouze, pokud mají jednotlivé fáze výrazně odlišné fyzikální vlastnosti. Kompozity tvoří jedna nebo více nespojitých fází situovaných ve spojitě fázi. Nespojitá fáze je obvykle tvrdší a pevnější než spojitá fáze a nazývá se výztuž nebo vyztužovací materiál, zatímco spojitá fáze se nazývá matrice. [1]

Jak výztuž, tak matrice v kompozitu si udrží své původní rysy, avšak kompozit získává vlastnosti, kterých nelze dosáhnout jednoduchým součtem vlastností jeho složek a které mohou jednotlivé složky významně předčít (synergický efekt). Vlákna zastávají funkci nositele zatížení a matrice slouží k přenosu napětí na vlákna, udržuje je v žádoucí pozici a tím vytváří výsledný tvar výrobku a chrání je před vnějšími vlivy. [2]

3.1 Klasifikace kompozitních materiálů

Kompozit, jehož výztuž může být klasifikována jako částicová, se nazývá partikulární (částicový) kompozit. Částice je definována jako nevláknový útvar nemající žádný dlouhý rozměr. Jako částice jsou též klasifikovány destičky. V případě vláknových kompozitů slouží jako výztuž tenká vlákna z různých materiálů, která mohou být kontinuální, potom mluvíme o dlouhováknovém kompozitu či nasekaná na krátké kousky, poté jde o krátkováknový kompozit. Dále lze vláknové kompozity dělit podle orientace vláken na kompozity s přednostní a s náhodnou orientací vláken a podle počtu vrstev na jednovrstvé a mnohovrstvé. Jednosměrné kompozity mohou být tvořeny několika vrstvami, ale pokud má každá vrstva stejné vlastnosti a orientaci lze kompozit považovat za jednovrstvý, v případě mnohovrstvých kompozitů má každá vrstva jiné vlastnosti (například jinou orientaci vláken). Kompozity používané v konstrukčních aplikacích jsou většinou vícevrstvé, kde každá vrstva (lamina) je jednovrstvý kompozit a orientace jednotlivých vrstev se střídá podle konstrukčního návrhu. Jsou-li materiály složek v každé vrstvě stejné, nazývají se takové kompozity lamináty, pokud je kompozit tvořen vrstvami z různých materiálů, nazývá se hybridní laminát. Klasifikace kompozitů je přehledně znázorněna na obr. 1. [1, 2, 3]



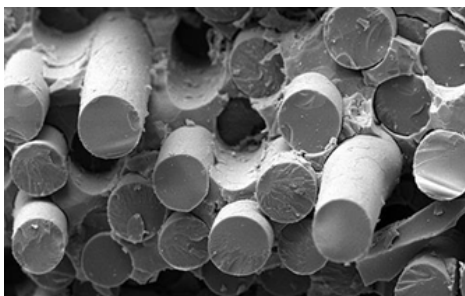
Obr. 1: Klasifikace kompozitních materiálů [1]

3.2 Mechanické vlastnosti vláknových kompozitů

Důvodem používání vláken v automobilovém průmyslu je jejich pevnost, která je daleko větší než u kompaktního materiálu. Pevnost materiálu totiž snižují hlavně vady ve tvaru trhlin kolmé ke směru působícího zatížení. Díky malému průřezu jsou tyto vady minimalizovány, navíc malý průřez vláken též minimalizuje obsažené nečistoty, které také působí negativně na výslednou pevnost. U polymerních vláken je další příčinou vysoké pevnosti přednostní orientace pevných kovalentních mezioatomových vazeb v podélném směru vlákna. V důsledku toho například stejný objem skla může být ve formě vláken více než stokrát pevnější než v kompaktní formě. Navíc pokud se mezi vlákny vyskytne nějaké s výrazně nižší pevností, porušení jednoho vlákna má minimální vliv na pevnost (vláken mohou být miliony na mm^2) a trhlina se nemá jak šířit dál na rozdíl od kovových materiálů, kde i malé trhliny mohou vést po určité době k únavovým lomům. Proto mají kompozity též obecně dobrou únavovou odolnost, často dokonce lepší než u běžně používaných ocelí. [1, 3]

Protože v kompozitech není zatížení aplikováno přímo na vlákna, ale na materiál matrice a z ní je přenášeno na vlákna, je třeba vytvořit optimální mezifázovou vazbu (mezi vlákny a matricí), aby byly maximálně využity vlastnosti vláken. Vazba může být fyzikální nebo chemická. Vlastnosti kompozitu jsou do značné míry ovlivňovány kvalitou mezifázového rozhraní, je-li vazba mezi matricí a výztuží pevná, má kompozit vyšší pevnost a porušuje se křehkým lomem (viz obr. 2), v opačném

případě dochází při porušení k vytahování vláken a kompozit má vyšší lomovou houževnatost, proto se často vlákna povrchově upravují, aby bylo dosaženo pro danou aplikaci optimálního spojení. [1, 4]

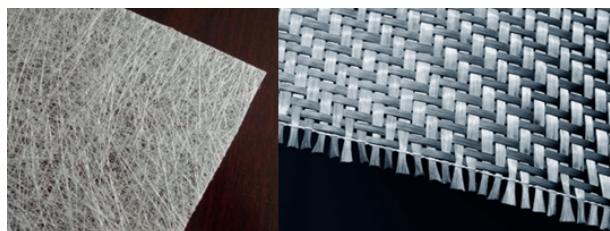


Obr. 2: Křehký lom kompozitu vyztuženého vláknem z SiNC [5]

Významnými faktory ovlivňujícími vlastnosti vláknových kompozitů jsou též podíl vláken (objemový zlomek), homogenita a orientace vláken v kompozitu. Kompozity s přednostní orientací vláken vykazují značně anizotropní vlastnosti. [1, 4]

3.3 Výztuže používané v automobilovém průmyslu

Výztuže (vlákna a jádra) dodávají kompozitu potřebnou tuhost a pevnost. Nejpoužívanější vlákna jsou skleněná, uhlíková a aramidová (Kevlar). Protože syntetická vlákna mají typicky v průměru pouze 5-20 μm , tak se z nich pro účely distribuce a zpracování vytváří tzv. roving, což je svazek vláken bez zákrutu. Samotný roving se používá výjimečně, častěji se z něj tkají tkaniny či se z nasekaného rovingu vytvářejí rohože (viz obr. 3). [6]



Obr. 3: Rohož z nasekaného rovingu (vlevo) a tkanina (vpravo) [6]

3.3.1 Skleněná vlákna

Skleněná vlákna jsou zdaleka nejpoužívanější výztuží kompozitů používaných v automobilovém průmyslu, především díky jejich nízké ceně a relativně jednoduché výrobě. Sklo je amorfní látka na bázi oxidu křemičitého a přidáním různých přísad lze získat různé druhy skla se speciálními vlastnostmi. Nejrozšířenější a nejlev-

nější druh skleněných vláken je E-sklo. Typické složení je 54 % oxidu křemičitého, 15 % oxidu hlinitého, 19 % oxidu vápenatého, 8 % oxidu boritého a 4 % oxidu hořečnatého. Pevnost vláken vyráběných z E-skla je až 3 500 MPa. V náročnějších aplikacích se využívá vláken z vysokopevnostního skla, která dosahují pevnost v tahu až 4 800 MPa. Vyšší pevnosti než u E-skla je dosahováno zvýšením podílu oxidu křemičitého, oxidu hlinitého a oxidu hořečnatého na úkor oxidu vápenatého a oxidu boritého používaného při výrobě E-skla. [3, 6]

3.3.2 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna jsou nejpoužívanější vlákna v náročných aplikacích, kde jsou kladeny vysoké požadavky na pevnost a nízkou hmotnost kompozitu, jako například závodní automobily, ale stále častěji se s jejich použitím lze setkat i v sériově vyráběných vozech. Vlákna se vyrábí karbonizací vláken nejčastěji z polyakrylnitrilu (PAN) za vysoké teploty (až 3000 °C) v inertní atmosféře. Výsledkem je vlákno, které se skládá převážně z atomů uhlíku, které jsou uspořádány paralelně k ose vlákna, což mu dodává mimořádnou pevnost. Uhlíková vlákna dosahují pevnosti v tahu až 7 000 MPa, jejich průměr je 5-10 μm a hustota kolem 2 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Nevýhodou uhlíkových vláken je hlavně jejich vysoká cena a v některých aplikacích může působit problémy i jejich křehkost a elektrická vodivost. Kompozit s uhlíkovými vlákny se označuje CFRP (carbon fibre reinforced plastic). [3, 9]

3.3.3 Aramidová vlákna

Aramid je zkratka pro aromatické polyamidy, nejznámější zástupce této skupiny je Kevlar (obchodní název). Kevlar má pevnost až 3 000 MPa a hustotu 1,45 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (pro srovnání: pevnost oceli může být až 1 500 MPa při hustotě 7,8 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) Výhodou Kevlaru je jeho ohebnost a houževnatost. [3]

3.3.4 Přírodní vlákna

V posledních letech se stále více nahrazují syntetická vyztužující vlákna, zejména skleněná, vlákny přírodními. V případě automobilového průmyslu přispívá ke zvyšování podílu přírodních vláken také směrnice EU 2000/53/EC, požadující, aby k 1. 1. 2015 bylo 95 % hmotnosti vyráběných vozidel recyklovatelných. [7, 8]

Přírodní vlákna se získávají například z juty, lnu, konopí, agáve (sisal) či banánovníku. Výhodou přírodních vláken je, že pochází z obnovitelných zdrojů, jejich nízká cena v porovnání s uměle připravenými vlákny, poměrně dobré mechanické vlastnosti a nízká hustota. Nevýhodou je, že je problematické dosáhnout konzistentní kvality vláken, dále je problém jejich spojení s polymerními maticemi (přírodní vlákna jsou hygroskopická, polymery naopak hydrofobní), jejich nízká tep-

lotní odolnost (vlákna začínají degradovat při teplotě okolo 200°C), dále citlivost vláken na vlhkost a fakt, že mohou podléhat hnilobě. Tyto nevýhody prozatím brání širokému rozšíření přírodních vláken. [8]

Vlákno	Hustota [g·cm ⁻³]	Pevnost v tahu [MPa]	Youngův modul [GPa]	Cena (2011) [USD]
Len	1,50	345-1500	27-39	3,11
Konopí	1,47	550-900	38-70	1,55
Sisal (z agáve)	1,45	468-700	9,4-22	0,65
Abaca (banánové)	1,50	430-813	31-33	0,345
E-sklo	2,55	2000-3500	70-73	2

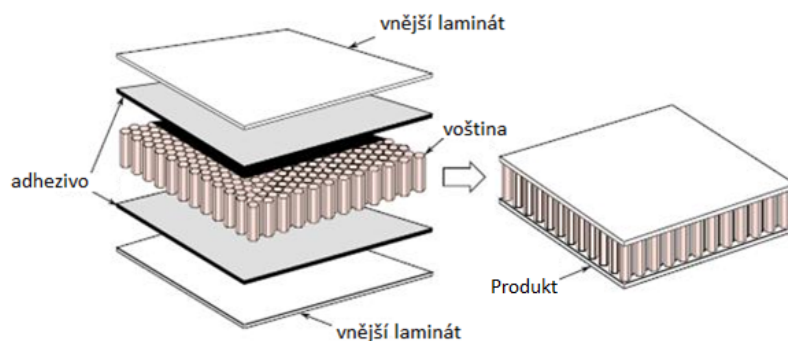
Tabulka 1: Vybrané parametry přírodních vláken v porovnání s E-sklem [8]

3.3.5 Ostatní vlákna

Další druhy vláken, které se používají v kompozitech, jsou vlákna borová, keramická (např. z karbidu křemíku) či oxidová (např. z oxidu hlinitého). Tyto druhy vláken však zaujímají pouze velmi malý podíl na trhu. [3]

3.3.6 Jádra pro sendvičové kompozity

Jádra se používají ve složených kompozitech pro zvýšení tuhosti a snížení hmotnosti. V případě kompozitů se používají dvě vrstvy laminátu, které jsou odděleny vrstvou lehkého materiálu – jádrem (viz obr. 4). Výhody takového „sendviče“ jsou nižší hmotnost při stejné tuhosti, lepší schopnost pohlcování energií v případě nárazu a lepší zvuková a tepelná izolace. Jádro musí mít výrazně nižší hustotu než vnější materiál, musí být dostatečně odolné a v případě automobilového průmyslu musí být i dostatečně levné. Jako materiál jádra se dnes používají různé druhy pěn a voštin (struktura připomínající včelí plástev) [9]



Obr. 4: Sendvičový kompozit, kde je jako jádro použita voština [10]

3.4 Matrice

Matrice slouží k přenosu napětí na vlákna, udržuje je v žádoucí pozici a chrání je před vnějšími vlivy. Matrice vláknových kompozitů používané v automobilovém průmyslu jsou polymerní, keramické či uhlíkové, přičemž zdaleka nejrozšířenější materiál jsou polymery. [9]

3.4.1 Polymerní matrice

Hlavními důvody širokého rozšíření polymerních matric jsou relativní jednoduchost jejich zpracování a nízká cena, dále pak nízká hustota, odolnost proti korozi, a nízký modul pružnosti, který umožňuje dobře přenášet napětí na vlákna prostřednictvím mezivrstvy. Polymerní matrice lze dělit na termoplastové a reaktoplastové. [3, 6]

Termoplastové polymerní matrice

Termoplastové materiály jsou plně polymerizované již v „syrovém“ stavu (od dodavatele). Při zpracování je nutné je zahřát. Zahřátý materiál změkne či se roztaví a je možné ho vytvarovat do požadovaného tvaru či odlít do formy. Po zchladnutí si výrobek ponechá tvar v jakém ztuhl. Tento proces je opakovatelný. V automobilovém průmyslu se používají nejčastěji polyamid či polypropylen. [6, 9]

Reaktoplastové polymerní matrice

Reaktoplastové materiály nejsou plně polymerizované a při zpracování musí dojít k zesítní. Materiál se dodává nejčastěji ve formě pryskyřic. Při zpracování se do pryskyřice přidává tvrdidlo (iniciátor) a dochází k chemické reakci — polymeraci a k vytvoření kovalentních vazeb mezi molekulami reaktoplastu. Tento proces není opakovatelný, vytvrzený reaktoplast má vysoce zasíťovanou strukturu a zahřátí by vedlo pouze k degradaci materiálu. V automobilovém průmyslu jsou nerozšířenější pryskyřice epoxidové, polyesterové, fenolické a polyuretanové. [6, 9]

3.5 Technologie výroby

Všechny technologie výroby kompozitů nutně zahrnují mísení materiálu matrice s vyztužujícími vlákny, což je možné provádět dvěma způsoby, buď zamícháním vláken do matrice a následným zpracováním do požadovaného tvaru či impregnováním již natvarované výztuže. Míchání vláken do matrice je omezeno tím, že s rostoucím podílem vláken ve směsi prudce klesá zpracovatelnost materiálu a tedy lze dosáhnout obsahu výztuže pouze okolo 20 % objemových. Další nevýhodou je obtížná kontrola nad rozmístěním a orientací vláken ve výsledném výrobku a mož-

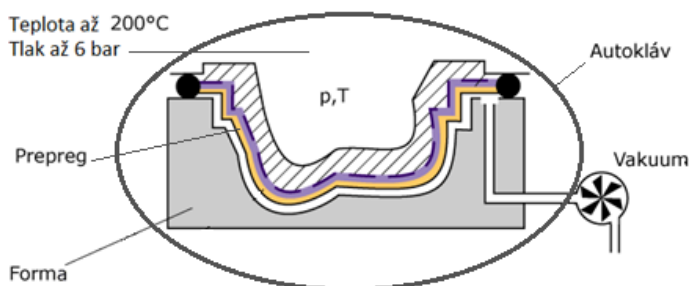
nost použití pouze krátkých vláken (do 50 mm). Příkladem technologií mixování vláken je lisování materiálu BMC (bulk molding compound) a SMC (sheet molding compound). Impregnováním natvarované výztuže lze dosáhnout většího podílu výztuže (až 70 %), limitujícími faktory jsou stlačení vláken (v určitém okamžiku nelze vlákna výztuže dále stlačovat, aniž by byla narušena a tím snížena pevnost výsledného výrobku) a nutnost zachování povrchové vrstvy, která chrání vlákna před vnějšími vlivy. Mezi technologie impregnace natvarované výztuže patří například ruční kladení, lisování v autoklávu a vysokotlaké vstřikování (RTM). [9]

3.5.1 Ruční kladení

Nejstarší a nejjednodušší technologie, spočívá v kladení jednotlivých vrstev výztuže do formy opatřené gelcoatem (gelcoat – nevyztužená vrstva, vytváří povrch výrobku) a jejich prosycování iniciovanou termosetovou pryskyřicí pomocí štětce či nanášecího válečku. Přebytečná pryskyřice se poté vytlačuje rýhovanými válečky. Velká časová náročnost a nepříliš dobré a nekonzistentní mechanické vlastnosti výrobků (typicky lze dosáhnout 30 % objemu výztuže v kompozitu) vylučují použití této technologie v sériové výrobě automobilů, avšak díky jednoduchosti a nízké ceně výrobního zařízení se stále uplatňuje například při výrobě prototypů. [9, 11]

3.5.2 Lisování v autoklávu

Lisováním v autoklávu se vyrábějí díly, u kterých jsou kladeny nejvyšší nároky na kvalitu a mechanické vlastnosti. Výchozím materiálem pro lisování v autoklávu jsou vždy prepregy – výztuž (nejčastěji tkanina z uhlíkových vláken) předimpregnovaná (PREimPREGnated) částečně polymerizovanou reaktoplastovou pryskyřicí. Prepregová tkanina se ručně klade do formy a na poslední vrstvu se pokládá strhávací tkanina či folie. Následuje perforovaná separační folie a odsávací rohož, která vstřebává přebytečné pojivo a nakonec vakuovací folie. Poté je provedeno vakuování a celá forma se vloží do autoklávu (vysokotlaká pec, viz obr. 5), kde probíhá několik hodin vytvrzování za zvýšené teploty a tlaku. [11]

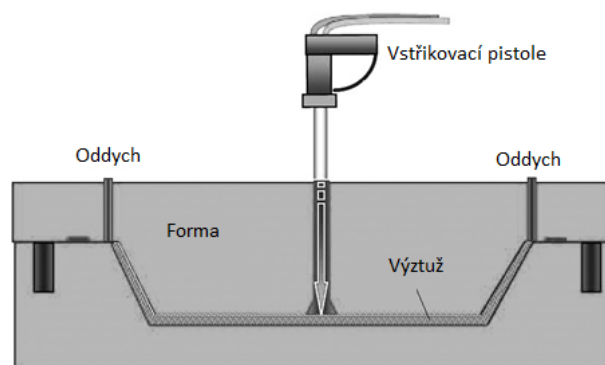


Obr. 5: Lisování v autoklávu [13]

Výhodou je možnost dosažení vysokého obsahu výztuže v kompozitu a minimálního množství vad typu bublin a tím i vynikajících mechanických vlastností. Největší nevýhodou je vysoká cena materiálu a zařízení, velká časová a energetická náročnost a limitovaná skladovatelnost prepregů. Lisování v autoklávu se v automobilovém průmyslu používá především v malosériové výrobě supersportovních aut, kde najde uplatnění nekompromisní pevnost a nízká hmotnost takto vyráběných materiálů a kde naopak náklady hrají jen malou roli. [9]

3.5.3 Vysokotlaké vstřikování (RTM – resin transfer molding)

Do formy opatřené gelcoatem se vkládá suchá výztuž, často ve formě tzv. předlisků, která musí mít strukturu umožňující snadný tok pryskyřice a tím i rychlé prosycení pryskyřicí. Forma je poté uzavřena a vstřikovacím otvorem se přivádí pryskyřice smíšená s iniciátorem (viz obr. 6). [11]



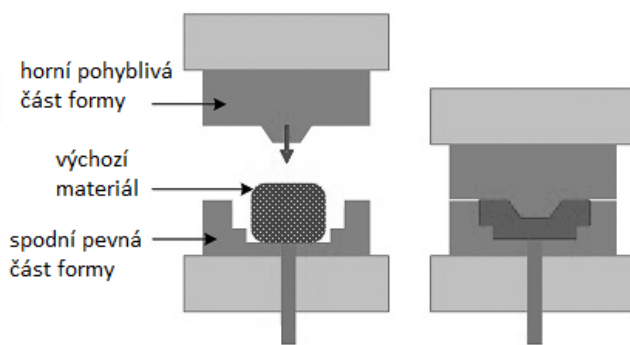
Obr. 6: Vysokotlaké vstřikování [14]

Výhodou je relativní jednoduchost výroby, vysoká kvalita produktů a minimální množství odpadu. Nevýhodou je hlavně vysoká pořizovací cena zařízení. Vysokotlaké vstřikování se hodí pro sériovou produkci přibližně do deseti tisíc kusů ročně a je v automobilovém průmyslu využíváno hlavně při výrobě karoserií. [9]

3.5.4 Lisování (compression molding)

Technologie lisování využívá vertikálních lisů. Do otevřené formy se vpraví přesné množství výchozího materiálu (směs pryskyřice, tvrdidla a skleněných vláken dlouhých cca 50 mm, dodávaná nanesená na fólii a navinutá do rolí), forma se uzavře a materiál vyplní dutinu formy (viz obr. 7). Forma zůstává uzavřena po dobu tvrdnutí materiálu. Pro takto zpracovaný materiál se označuje jako SMC z anglického sheet moulding compound. Výhodou je jednoduchost a schopnost vyrábět opakovaně velká množství výrobků s dostatečnou přesností a rychlostí. Díky tomu je technologie lisování v automobilovém průmyslu již poměrně rozšířená. Nevýhodou

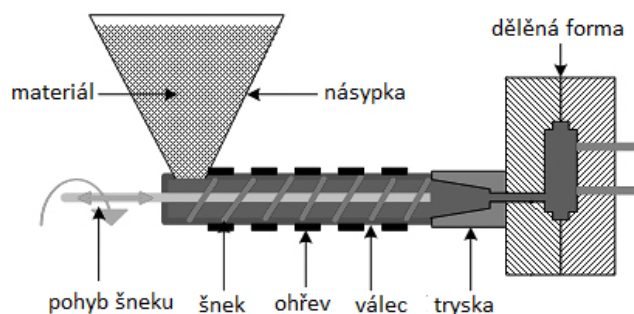
je vysoká pořizovací cena zařízení, dále že doba vytvrzování závisí na tloušťce stěny výrobku a materiál vyztužený vlákny má omezenou schopnost vyplňovat formu. V důsledku těchto omezení lze dostatečně rychle vyrábět pouze tenké a nepříliš komplikované díly jako například vnější panely karoserií. [9, 18]



Obr. 7: Lisování [15]

3.5.5 Vstřikování (injection molding)

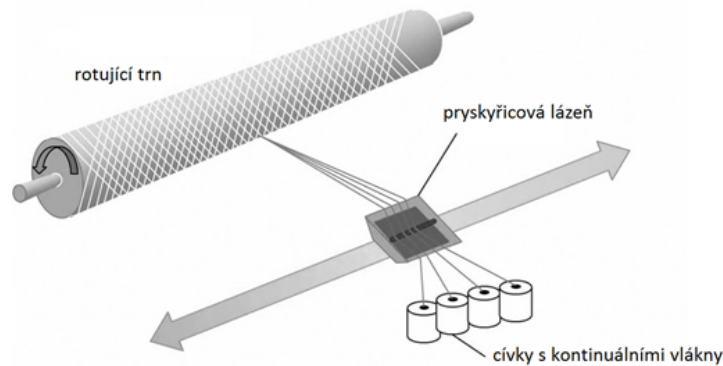
V případě vstřikování je materiál dopravován do formy pomocí šnekového vstřikovače (obr. 8). Technologie vstřikování se používá jak pro termosety, pak mluvíme o tzv. BMC (bulk molding compound) tak pro termoplasty, pak se jedná o GMT (glass mat thermoplastic). Vyztužující vlákna jsou nejčastěji skleněná délky 6-12 mm (delší by byla poškozena) a jejich obsah je okolo 15-20 % objemových. V případě termoplastů je šnek vyhříván na cca 200 °C a roztavený materiál je vstřikován do chladné formy, kde tuhne. V případě použití termosetů má šnek nižší teplotu (do 60 °C) a forma je vyhřívána pro zajištění polymerace. Výhodou oproti lisování je vyšší rychlost procesu, nevýhodou je omezení délky vláken a větší cena zařízení. V automobilovém průmyslu jsou vstřikováním vyráběny např. přístrojové desky, pojistkové skříně, či reflektory světlometů. [9, 11]



Obr. 8: Vstřikování [16]

3.5.6 Navíjení (filament winding)

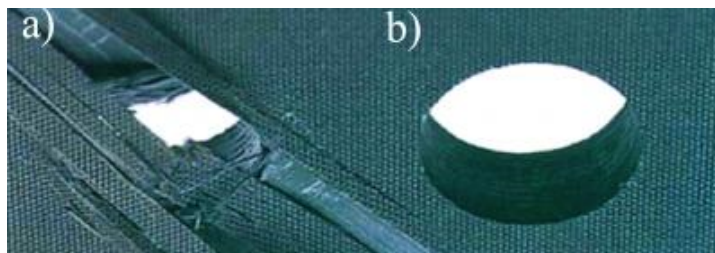
Navíjení je metoda, při níž se kontinuální vlákna navíjejí na otáčející se trn (viz obr. 9). Navíjená vlákna mohou být ve formě prepregu či mohou procházet lázní, kde se na ně aplikuje pryskyřice. Navíjení umožňuje nejlepší kontrolu nad umístěním a orientací vláken ve výrobku a díky tomu mají navíjené výrobky velmi dobré mechanické vlastnosti. Omezením je možnost navíjet pouze duté rotační tvary a velká časová náročnost. Technologií navíjení se vyrábí kupříkladu hřídele pro sportovní vozy nebo nádrže na vodík či CNG pro vozy spalující plynná paliva. [9, 18]



Obr. 9: Navíjení [17]

3.5.7 Spojování vláknových kompozitů

Termoplastové kompozity lze svařet, nejpoužívanější technologie v automobilovém průmyslu jsou vibrační, třecí a ultrazvukové svařování. Reaktoplastové kompozity svařet nelze, je proto nutné použít buď šroubové, či lepené spoje. Šroubové spoje mají výhodu v tom, že jsou rozebíratelné a správnost provedení lze snadno kontrolovat, ale mají i četné nevýhody – mohou způsobovat galvanickou korozi, zvyšují hmotnost konstrukce a vyžadují otvory v materiálu, které je nutné vytvořit již při výrobě dílu nebo je vyvrtat, což narušuje kontinuitu vláken a je třeba zabránit delaminaci materiálu (obr. 10), což zvyšuje náročnost vyvrtávání.



Obr. 10: Otvor v kompozitu s delaminací (a) a bez delaminace (b) [19]

Lepené spoje nezvyšují hmotnost konstrukce, zvyšují její tuhost, nevyžadují žádné otvory a rozkládají zatížení na větší plochu. Nevýhodou je, že spoj nedosahuje úplné pevnosti okamžitě a případné vady spoje se špatně odhalují. V současné době je v případě automobilového průmyslu preferováno použití lepených spojů. [18]

3.5.8 Sériová výroba

Většímu rozšíření kompozitů v masově vyráběných vozidlech brání kromě jejich vysoké ceny také dlouhý čas potřebný k jejich výrobě. Proto byly doposud využívány v sériové výrobě masově především díly z krátkovláknových kompozitů vyráběné vstřikováním a celé karoserie vyrobené z CFRP byly výsadou malosériové výroby sportovních vozů. To se změnilo v roce 2013 s příchodem elektromobilu BMW i3, který se stal prvním velkosériově vyráběným (16 052 kusů prodaných v roce 2014) vozidlem s karoserií vyrobenou z CFRP. [18, 20]

Automobilka BMW musela při vývoji modelu i3 překonat řadu úskalí. Prvním je zajištění uhlíkových vláken v dostatečném množství a kvalitě za přijatelnou cenu (v současné době se cena uhlíkových vláken pro automobilový průmysl pohybuje okolo 20 USD za kilogram a očekává se že bude nadále klesat). BMW proto postavilo vlastní továrnu na uhlíková vlákna v USA ve státě Washington. Čas potřebný k výrobě byl omezen díky rozložení auta do dvou částí–modulů. "Drive Modul" obsahuje motor, hnací řetězec a baterie a je z hliníku. "Life Modul" je prostor pro pasážery vyroben z CFRP (obr. 11). Každý modul vzniká na samostatné lince a v závěru výroby se pomocí lepených spojů a čtyř šroubů spojí. Díky tomu se zkrátila doba potřebná k výrobě vozu na polovinu. Life Modul je vyroben slepením šestnácti jednotlivých dílů vyrobených z epoxidové pryskyřice Araldite a uhlíkových vláken technologií RTM. Díky velkému množství inovací technologie výroby je dnes továrna BMW v Leipzigu schopná produkovat denně 100 vozidel i3. [20]



Obr. 11: Modulární architektura vozidla BMW i3 [22]

4. Možnosti a vývojové trendy v oblasti vláknových kompozitů se zaměřením na automobilový průmysl

4.1 Aspekty využití kompozitů v automobilech

Největší výhodou kompozitních materiálů je vynikající poměr pevnosti a hmotnosti. Díky tomu lze využitím kompozitů snížit hmotnost vozidel při zachování či zlepšení pevnostních parametrů. Redukce hmotnosti vozidla se přímo příznivě projevuje na zvýšení ekonomičnosti provozu (snížení hmotnosti vozidla o deset procent vede ke snížení spotřeby paliva o 5-10 %), navíc lze použít méně výkonné motory, méně robustní hnací ústrojí a menší brzdy při zachování stejných dynamických parametrů a tím dosáhnout dalšího odlehčení vozidla. Také se s odlehčováním snižuje i síla potřebná k řízení automobilů. Vozidla jsou tedy lépe ovladatelná, což vede ke zlepšení aktivní bezpečnosti. [18, 23]

V oblasti pasivní bezpečnosti je přínos vláknových kompozitů ve větším množství pohlcené energie v případě nárazu na jednotku hmotnosti než konvenční materiály jako ocel či hliník. Použití kompozitních deformačních struktur ve vozidle tedy umožňuje v případě havárie zmírnit následky pro posádku. Kinetická energie je u dílů z vláknových kompozitů absorbována prostřednictvím čtyř mechanismů: deformací a lomem vláken, deformací matrice, delaminací a třením. Jelikož množství pohlcené energie závisí na mnoha faktorech, je třeba věnovat mimořádnou pozornost výběru konkrétního kompozitního materiálu pro deformační struktury. [18]

Kompozitní materiály též dávají konstruktérům větší volnost při návrhu tvaru součástí než tradiční materiály. Z kompozitních materiálů lze vyrobit takřka jakýkoli tvar, například kapota vyrobená technologií SMC může být vyrobena jako jeden celek včetně výztuží na rozdíl od kapoty z ocelového plechu, ke které je nutné výztuž dodatečně přimontovat. Široké možnosti tvarování kompozitních materiálů umožňují optimalizovat aerodynamiku vozů – snížit koeficient odporu vzduchu, popřípadě u sportovních vozidel zvýšit přítlak. [9, 23]

Odolnost proti korozi a z toho vyplývající dlouhá životnost je další výhodou kompozitů oproti oceli. U CFRP karoserií dnes vyráběných vozidel se předpokládá minimální životnost třicet let. Skutečná životnost však bude pravděpodobně ještě delší. [9, 23]

Z technologického hlediska je dlouhá životnost kompozitů jednoznačný přínos, paradoxně však může zabránit jejich masovému rozšíření. V roce 2013 prohlásil vedoucí oddělení výzkumu a vývoje společnosti Nissan Mitsuhiko Yamashita, že v automobilech Nissan a Infinity v blízké budoucnosti nebudou použity uhlíkové kompozity kvůli vysoké ceně a příliš dlouhé životnosti. Yamashita řekl, že není v zájmu společnosti Nissan vyrábět vozidla s životností třicet let, protože pak nebude moci následujících třicet let prodat další. [26]

Kompozitní materiály, zvláště pak ty s polymerní maticí, mají také nízkou odolnost proti vysokým teplotám. Existují sice vláknové kompozity s vysokou tepelnou odolností, ale buď se pro svoje specifické vlastnosti dají použít pouze v úzkém spektru aplikací nebo jsou příliš drahé pro komerční využití. [18]

Hlavní důvod proč dnes všichni nejedeme auty z kompozitních materiálů je jejich vysoká cena, dána především vysokou cenou materiálu a časově náročnou výrobou. Zatímco kilogram oceli stojí kolem jednoho Amerického dolaru, kilogram hliníku dva a půl dolaru, tak kilogram skelných vláken stojí okolo dvou dolarů a kilogram uhlíkových vláken od šesti do dvaceti dolarů podle jejich kvality. [23]

Prvotní investice do výroby kompozitů je zpravidla menší než u zpracování oceli. Konkrétní čísla závisí na druhu kompozitu, například stroje na výrobu blatníku technologií SMC jsou třikrát levnější než v případě výroby z oceli. Doba výroby a zpracování kompozitů je však několikanásobně delší. Například výroba jednotlivých dílů karoserie BMW i3 trvá přes pět minut, zatímco při výrobě částí karosérie z oceli se časy pohybují od devadesáti sekund do tří minut. Vyšší variabilní jednotkové náklady a delší produkční časy znamenají, že vyrábět automobily z kompozitů je finančně výhodné pouze v malých sériích, v praxi se tato hranice pohybuje okolo 50 000 kusů za rok. Výjimkou jsou některé krátkovláknové kompozity s maticí z termoplastů, například zpracování polypropylenu vyztuženého skelným vláknem, používaného na součásti interiéru automobilů, netrvá o mnoho déle než výroba nevyztuženého polypropylenu. [9, 25]

Do ceny vozu se promítají také náklady na vývoj. Automobilky při navrhování aut z kompozitních materiálů nemohou čerpat z bohatých zkušeností získaných během minulých let v oblasti zpracování oceli, což vývoj značně prodražuje. [25]

Dalším překážkou pro masové použití kompozitů v automobilovém průmyslu je jejich obtížná recyklace daná jejich heterogenní povahou. V současnosti se uplatňují tři způsoby recyklace kompozitů s polymerními maticemi: mechanická, tepelná a chemická. Mechanická recyklace znamená rozdrčení a rozemletí kompozitu. Drť obsahuje kousky vláken dlouhé do 50 mm a na prášek rozdrčenou matici lze

použit jako plnivo do kompozitů používaných v nenáročných aplikacích. Mechanická recyklace je relativně energeticky náročná. Tepelná recyklace zahrnuje spalování a pyrolýzu. Spalováním lze získat pouze tepelnou energii, při pyrolýze lze získat zpět i skleněná či uhlíková vlákna, která lze po regeneraci opětovně použít jako výztuž. Chemická recyklace obnáší depolymeraci matrice a dnes není příliš rozšířená především díky produkci škodlivých chemikálií. [9, 27]

Opravy kompozitních komponent, zvláště pak karoserií si vyžádaly vyvinutí nových metod. Lamborghini se inspirovalo u Boeingu a disponuje malým týmem specialistů na opravy CFRP karoserií, kteří v případě poškození vozu přicestují k zákazníkovi, na místě vyhodnotí rozsah poškození a pokud to jde, ho i opraví. Takové řešení je však pro velkosériově vyráběné vozy stále příliš nákladné. Servisy BMW řeší opravy karoserie modelu i3 vyříznutím poškozené části karoserie a jejím nahrazením. Rozsah, v jakém se poškozená část vyřezává, je předem daný, což opravu zjednodušuje a umožňuje BMW výrobu unifikovaných náhradních dílů. Zvláštností kompozitů je diagnostika a opravy tzv. neviditelných poškození. Po malém nárazu nemusí například nárazník z CFRP navenek jevit žádné známky poškození, avšak může dojít k vnitřní delaminaci, jež má vliv na jeho pevnost. Diagnostika je možná jedině pomocí nedestruktivních metod a technologie oprav takovýchto poškození není doposud vyvinuta v takové podobě, aby mohla být nasazena do praxe. [18, 32]

Obrábění kompozitů má též svá specifika. Delaminace kompozitů byla již popsána v kapitole 3.5.7. Dále působí obtíže při obrábění nízká tepelná vodivost kompozitů, díky níž lze použít pouze relativně nižší obráběcí rychlosti, aby nedošlo k tepelnému poškození matrice. Z těchto důvodů je obrábění kompozitů ve srovnání s obráběním oceli či hliníku mnohokrát pomalejší, a proto je při navrhování kompozitních dílů nejen pro automobilový průmysl snaha omezit následné obrábění na minimum. [9, 19]

4.2 Historie využití vláknových kompozitů v automobilech

V roce 1941 Henry Ford experimentoval s autem s karosérií z kompozitu z fenolické pryskyřice a konopného vlákna. Projekt však nebyl dotažen do konce. V roce 1943 byla vynalezena polyesterová pryskyřice, což umožnilo vznik kompozitu s polymerní matricí vyztuženou skelným vláknem (GRP–glass reinforced plastic) v podobě, jakou známe dnes. Za války bylo největším odběratelem tohoto materiálu americké letectvo a poté se GRP rozšířil i do automobilového průmyslu. [9, 28]

Automobilka Singer použila na svém modelu Hunter z roku 1954 kapotu a blatníky ze sklolaminátu a společně s Chevroletem a jeho modelem Corvette, patřila

k prvním průkopníkům používání sklolaminátu v automobilech. V roce 1957 sestrojil konstruktér Colin Chapman vůz Lotus Elite se samonosnou karosérií ručně vyrobenou ze sklolaminátu. Lotus Elite bylo elegantní dvojmístné kupé s váhou pouze 500 kilogramů. Vůz dosáhl mnoha úspěchů v závodech a dobové recenze chválily jeho jízdní vlastnosti, pro každodenní použití se však příliš neosvědčil hlavně díky své nespolehlivosti, častou závadou bylo například proražení tlumičů skrz jejich uchycení ve sklolaminátové karoserii. [9, 29]

Většího rozšíření se dočkaly až v osmdesátých letech s rozvojem technologií výroby a zdokonalením karbonových vláken. Firma Pontiac představila v roce 1984 model Fiero, dvojmístný vůz s motorem uprostřed, ocelovým rámem a na něm uchycenou karosérií z kompozitů vyztužených skelným vláknem. Modelu Fiero se do roku 1988 vyrobilo celkem 343 766 kusů, díky čemuž je považováno za první masově vyráběné vozidlo využívající vláknových kompozitů. Další automobily následovaly Fiero vzápětí, například Renault se svým modelem Espace. [9]

McLaren nasadil v roce 1981 do Formule 1 monopost MP4 s monokokem z CFRP, ostatní stáje jej vzápětí následovaly a z Formule 1 se CFRP rozšířil i do sportovních vozů. První silniční auto využívající komponenty z CFRP bylo v roce 1987 Ferrari F40, jež mělo z CFRP například vnitřní panely dveří a v roce 1992 představil McLaren model F1 disponující CFRP monokokem. [9]

Uhlíková vlákna nezůstala výsadou pouze osobních automobilů, německá firma Neoplan v roce 1988 představila autobus MIC (Metroliner im Carbondesign) se samonosnou karosérií z uhlíkových vláken. Metroliner získal ocenění "Bus of the Year 1990", nikdy se však nedočkal většího rozšíření kvůli velmi vysoké ceně. [30]

V osmdesátých letech zažívaly kompozitní materiály období rozmachu a dobové předpovědi tvrdily, že kompozity v konstrukci automobilů brzy nahradí ocel. Byly vyvíjeny karoserie, pružiny, hřídele a další komponenty z polymerů vyztužených skelným vláknem, z nichž některé se dostaly do sériové výroby a používají se dodnes (Chevrolet Corvette disponuje kompozitovými listovými pružinami od roku 1981), ale většina se nasazení do výroby nikdy nedočkala, například přední část karoserie Fordu Escort z roku 1986 vyrobená z vinyl-esterové pryskyřice vyztužená skelným vláknem technologií RTM (viz obr. 12). Karoserie prošla všemi NVH (noise, vibration and harshness) testy a v nárazových testech se blížila k oceli, přičemž byla o třetinu lehčí, ale nasazení do sériové výroby ztroskotalo na příliš pomalé technologii výroby. V devadesátých letech došlo k útlumu využití kompozitů a kompozitní díly se vyskytovaly v automobilech spíše sporadicky. V posledních několika letech je využití vláknových kompozitů ve vozidlech opět na vzestupu. [31]



Obr. 12: Kompozitní přední část karoserie Fordu Escort z roku 1986 [31]

4.3 Praktické příklady použití

Z kapitoly 4.1 vyplývá, že hlavní důvody pro použití kompozitů v automobilech jsou dva – úspora hmotnosti a úspora financí. Úspora hmotnosti komponent vozidel je hlavním důvodem používání kompozitů, často je však vykoupena vysokou cenou materiálu a zpracování, proto se kompozitní materiály používají ve větší míře především u exkluzivních sportovních automobilů, kde náklady nehrají hlavní roli, a u běžných, velkosériově vyráběných, vozidel se s nimi lze setkat pouze v malém množství aplikací. Úspora financí není to, co by nás napadlo jako první, když se řekne kompozit, avšak v malosériové výrobě převáží nízká cena výrobního zařízení nad vysokou cenou materiálu a kompozitní materiály tak mohou být často paradoxně nejlevnější řešení.

Úspora hmotnosti komponent vozidel a úspora financí v případě malosériové výroby samozřejmě nejsou jediné důvody použití kompozitů v automobilech, pokud se v některých specifických aplikacích uplatňují ještě nějaké další, jsou tyto v následujícím přehledu uvedeny u konkrétních příkladů.

4.3.1 Karoserie

Karoserie je část automobilu, mající za úkol chránit před vnějšími vlivy posádku, náklad i jednotlivé části vozidla a zpravidla jsou v ní uložena i převodová ústrojí a poháněcí soustava. Karoserie se dělí na podvozkové a samonosné. Drtivá většina osobních automobilů má dnes samonosnou karoserii, protože je lehčí, tužší, bezpečnější a méně prostorově náročná než podvozková karoserie. [23, 24]

Míra využití vláknových kompozitů v konstrukci karosérií je různá. Samonosné karoserie kompletně z kompozitů jsou spíše výjimkou, u supersportovních aut je dnes normou použití CFRP vany či monokoku chránícího posádku a plnicího nos-

nou funkci, popřípadě nosnou funkci karosérie plní výhradně prostorový rám z ocelových trubek, ke kterému jsou přimontovány vnější panely z kompozitních materiálů. Pokud jde o běžná, velkosériově vyráběná, vozidla, naprostá většina jich disponuje karosérií z ocelových plechů a kompozitní materiály se příliš často nepoužívají a pokud ano, jsou z nich pouze jednotlivé vnější panely karoserie, například blatníky, kapota či střecha. [9, 23]

Použití monokoku je idea převzatá z Formule 1, kde se CFRP monokoky začaly používat v osmdesátých letech, a dnes jimi kromě vozů F1 a jiných závodních speciálů disponuje velká řada sportovních vozidel. K monokoku jsou přimontované pomocné rámy nesoucí hnací ústrojí a nápravy. Pomocné rámy se většinou vyrábějí z hliníku, avšak automobilka Porsche používá u modelů 918 a Carrera GT rám nesoucí hnací ústrojí vyrobený z kompozitu a lze očekávat, že ostatní výrobci v budoucnu rovněž zvolí toto řešení. Jako materiál se používají takřka výhradně uhlíková vlákna a epoxidová pryskyřice (často používaná značka je Araldite od firmy Huntsman), různí výrobci však volí různé technologie výroby, nejpoužívanější jsou technologie lisování v autoklávu a RTM. [12, 23]

Kompozitové monokoky jsou velmi lehké a vynikají velkou torzní tuhostí, která má pozitivní vliv na jízdní vlastnosti vozu. Například CFRP monokok supersportu Lamborghini Aventador (viz obr. 13) váží pouze 147 kilogramů a k jeho zkroucení o jeden stupeň je třeba moment 30 000 Nm, zatímco hliníkový prostorový rám předchozího modelu Gallardo váží 199 kg a k jeho zkroucení o jeden stupeň postačuje moment 23 000 Nm. Monokok je však velmi drahá záležitost, nejenom díky vysoké ceně materiálu, ale i díky složité výrobě, proto jsou monokoky výsadou pouze supersportovních a jiných malosériových vozů sloužících automobilkám jako výkladní skříň použítých technologií. [12, 33]



Obr. 13: Monokok automobilu Lamborghini Aventador [12]

Monokoky jsou doplněny vnějšími panely, opět zpravidla z CFRP i když použití CFRP není jedinou možností, používají se i SMC, hliník a další materiály, vždy jde ale o materiály lehké, aby nepřišla vniveč výhoda nízké hmotnosti samotného CFRP monokoku. [23]

Kompozitních vnějších panelů využívají též sportovní automobily postavené na prostorovém rámu, především malosériových výrobců. Nejznámějším automobilem s prostorovým rámem a kompozitové vnější karoserie je však Chevrolet Corvette, který se této koncepci drží od uvedení první generace v roce 1953. Do roku 1973 byla vnější karoserie Corvette vyráběna ze sklolaminátu, poté výroba přešla v roce 1973 na SMC, které je dodnes hlavním materiálem karoserie i když materiál prošel vývojem, mimo jiné se zvýšil podíl plastu a v roce 1997 se kvůli odlehčení a snížení ceny začalo přidávat plnivo (uhlíčitán vápenatý). Od roku 2004 využívá Corvette u vrcholných specifikací Z06 (viz obr. 14) a kabrioletů též dílů z kompozitů s uhlíkovými vlákny. Z CFRP jsou u těchto modelů přední blatníky a střešní a podlahové panely. Chevrolet Corvette patří s více než šedesátiletou tradicí a 1 595 000 prodaných kusů, z toho 37 288 v roce 2014, k nejúspěšnějším sportovním vozům vůbec a za svůj úspěch vděčí z velké části právě použití vláknových kompozitů. [23, 34]



Obr. 14: Řez Chevroletem Corvette Z06 2015 [35]

V případě vnějších panelů karoserie masově vyráběných vozidel se stále preferuje spíše ocel, z alternativních materiálů pak hliník či nevyztužené termoplasty. Přesto lze najít vozidla, jejichž části karoserie jsou vyrobeny z kompozitních materiálů, především pak z CFRP. [23]

Takto použité jednotlivé kompozitové díly přinášejí snížení hmotnosti, ale automobilkám slouží také jako konstrukční cvičení v použití kompozitů a k získání zkušeností v oblasti jejich výroby a zpracování, které poté mohou zužitkovat při konstrukci celých kompozitních automobilů.

Raritou mezi vláknovými kompozity je SMC, ve kterém jsou skleněná vyztužující vlákna nahrazena uhlíkovými, takový materiál se označuje jako CF-SMC. Au-

tomobilka Dodge jej používala při konstrukci sportovního modelu Viper třetí generace v letech 2003–2007 a v současné době s tímto materiálem experimentuje automobilka Lamborghini. [36]

Od roku 1987, kdy Peugeot uvedl na trh model 405, se běžně používaly kompozitové nárazníky vyrobené z SMC. Problémy s odlupujícími se laky a obtížná recyklace však téměř vytlačily SMC nárazníky z trhu krátce po přelomu tisíciletí a na jejich místo nastoupily nárazníky vyráběné vstřikováním z nevyztužených termoplastů (polypropylen a akrylonitrilbutadienstyren–ABS). Nárazníky z kompozitních materiálů však nevymizely z trhu úplně, preferují se však termoplastické matrice. Také dříve poměrně rozšířené kompozitové páté dveře z SMC dnes prakticky žádný automobil nemá, i když lze najít výjimky. [9, 37]

Materiál SMC se však s úspěchem používá u méně obvyklých komponent karoserie jako jsou ložné plochy a jejich kryty či střechy u vozidel typu pickup nebo skládací střechy pro některé kabriolety (hardtop). Důvodem pro použití SMC na ložné plochy je především jeho odolnost proti korozi. [38]

4.3.2 Podvozek

V případě automobilů se samonosnou karosérií podvozek tvoří přední a zadní náprava, odpružení, kola, brzdová soustava a řízení. [24]

Pokud jde o samotné nápravy, použití vláknových kompozitů se omezuje prakticky pouze na závodní či supersportovní vozy. Kompozitní nápravy pro sériové vozy jsou stále ve vývoji. Jednou z firem, která se angažuje, je ZF Friedrichshafen AG, která v roce 2014 představila těhlici z kombinace CFRP a GFRP, jež by se měla dostat do sériově vyráběných vozů kolem roku 2020. [18, 40]

Odpružení může být realizováno listovými nebo vinutými pružinami, torzními tyčemi, vzduchovými měchy či hydropneumaticky. Dále jsou popsány pouze listové a vinuté pružiny, protože ostatní druhy odpružení v současné době nevyužívají vláknových kompozitů. [24]

Listové pružiny se používají již od dob kočárů tažených koňmi díky své jednoduchosti a odolnosti. Dalšími výhodami jsou menší zástavbové rozměry a snížení polohy těžiště v porovnání s vinutými pružinami. [24]

Mezi výhody kompozitních pružin patří odolnost proti korozi, dobrá tlumící schopnost a větší únavová odolnost, než má ocel. Odolnost listových pružin vyrobených ze GFRP dobře ilustruje fakt, že Chevrolet neeviduje u modelu Corvette, jež disponuje listovými pružinami z GFRP na obou nápravách od roku 1981, jedinou pružinu prasklou v důsledku únavy materiálu. [39]

Společnost Delphi uvedla v osmdesátých letech technologii Liteflex, jež se s ma-

lými modifikacemi používá dodnes. Kompozitové listové pružiny Liteflex se vyrábí ze skleněných vláken a epoxidové pryskyřice navíjením a lisováním a jsou jimi vybaveny například Chevrolety Corvette či Mercedesy Sprinter. Dnes je snaha vyrábět kompozitní listové pružiny technologií RTM z polyuretanové pryskyřice a jako výtzuž používat uhlíková vlákna, přičemž hlavním inovátorem v této oblasti je společnost Henkel. Použitím polyuretanové pryskyřice namísto tradiční epoxidové lze čas výroby jedné pružiny zkrátit až na 7-8 minut oproti 30 minutám, které vyžaduje technologie Liteflex. V současnosti využívá polyuretanové listové pružiny vyztužené uhlíkovým vláknem druhá generace vozu Volvo XC90 (viz obr. 15). [39, 41]



Obr. 15: Zadní náprava vozu Volvo XC90 s kompozitní listovou pružinou [41]

Širšímu nasazení kompozitových listových pružin zabraňuje kromě časově náročné výroby a vysoké ceny také nedůvěra k listovým pružinám obecně. Automobilový průmysl a jeho zákazníci jsou velmi konzervativní a listové pružiny jsou poněkud neprávem považovány za překonanou technologii. [39]

Oproti kompozitovým listovým pružinám, jež mají svoje místo v sériové výrobě již dlouhou dobu, se vinuté pružiny z kompozitů objevily teprve nedávno. V roce 2012 získala italská firma Sofegi patent na vinuté pružiny vyrobené z epoxidové pryskyřice vyztužené skelným vláknem (viz obr. 16). [42]



Obr. 16: Vpravo GFRP pružina Sofegi, vlevo pružina ocelová [42]

Jádro pružiny je vyrobeno stočením rovingu, který je poté naimpregnován epoxidovou pryskyřicí a strojově obalen několika vrstvami vláken pod různým úhlem a vytvrzování probíhá v peci za zvýšené teploty (100 °C). Prvního nasazení v produkčním voze se pružiny od Sofegi dočkaly v červnu roku 2014 ve voze Renault Mégane R.S. 275 Trophy-R. Další vůz využívající těchto pružin je od září roku 2014 Audi A6 Avant 2.0 TDI. Použití GFRP vinutých pružin je prozatím velmi mladá a nepříliš známá technologie, avšak dá se předpokládat, že v blízké době dojde k jejímu širšímu rozšíření. [42]

Součástí odpružení vozidla je též stabilizátor omezující náklony karoserie. Jediná automobilka, která v současnosti používá kompozitový stabilizátor je Audi ve svém elektromobilu R8 e-tron. Celé kompozitové stabilizátory teprve čekají na své rozšíření, ale tyčky stabilizátorů jsou již dnes poměrně běžně vyráběny technologií BMC a SMC z plastů vyztužených skelným vláknem. [43]

První kola z kompozitních materiálů (GFRP) použila automobilka Citroën u soutěžních aut v šedesátých letech. Dnes se používá na kompozitní kola především materiál CFRP. Uspořená hmotnost jde v případě kol na vrub neodpružené rotující hmotě, použitím CFRP kol tedy dochází ke zlepšení dynamických parametrů a komfortu jízdy. Z automobilek používá kola z CFRP (vyrobená lisováním v autoklávu) zatím pouze Koenigsegg, který však vyrábí pouze okolo 12 aut za rok, ale na trhu existuje několik specializovaných výrobců CFRP kol. Cena CFRP kol se pohybuje mezi 12 – 15 000 USD za sadu čtyř kol (je nutné použít speciálních materiálů matrice, jež musí odolat velkému množství tepla vzniklému při brzdění), což prozatím naprosto vylučuje jejich použití pro běžné, velkosériové vozy. Firma BMW plánuje do dvou let snížit cenu na přijatelnou úroveň a používat CFRP kola na svých modelech i8 a i3, buď se má jednat o kola celokompozitová, nebo dvoumateriálová s ráfkem z CF-SMC a středem ze slitiny hliníku. [44, 45]

Pokud jde o brzdy vyrobené z vláknových kompozitů, používají se dva materiály: uhlíko-uhlíkový kompozit (C/C) a uhlíko-keramický kompozit (C/SiC). Výroba těchto materiálů je velmi složitá, zjednodušeně lze říci, že se nejprve uhlíková vlákna naimpregnují uhlíko či karbidotvorným prekurzorem, a poté probíhá pyrolyza, kdy se prekurzor přemění na uhlík či na karbid křemíku (SiC). [46]

Kotouče C/C jsou až čtyřikrát lehčí než litinové a používají se u dopravních letadel a v motorsportu (F1), pro jiné aplikace jsou neúnosně finančně náročné. Kotouče C/SiC jsou přibližně čtyřikrát levnější než brzdy C/C a používají se u produkčních sportovních vozů od roku 2001. Jejich výhodou je kromě úspory neodpružených rotujících hmot a korozivzdornosti hlavně odolnost proti vadnutí či praskání

a dlouhá životnost (brzdový kotouč C/SiC vydrží v běžném provozu po celou životnost vozidla, což by mělo být alespoň 300 000 Km). Nevýhodou je kromě vysoké ceny (okolo 200–300 tisíc korun za kompletní brzdy) horší brzdící účinek studených brzd. [46, 47]

4.3.3 Hnací řetězec

Součástmi hnacího řetězce automobilu jsou motor, spojka, převodovka, rozvodovka a spojovací hřídele. Také se do hnacího řetězce řadí nádrže na pohonné hmoty. [24]

Výroba součástí motoru z vláknových kompozitů není příliš běžná, kvůli obecně nižší teplotní odolnosti polymerových vláknových kompozitů. Z vláknových kompozitů se proto vyrábí pouze méně tepelně namáhané součásti jako jsou například trubky sání, air boxy, kryty motorů a rozvodových řemenů či víka ventilů. Již sice existují prototypy bloku motoru z epoxidové pryskyřice vyztužené uhlíkovým vláknem (s litinovými vložkami válců), ale jejich nasazení do sériové výroby je v lepším případě záležitostí vzdálené budoucnosti, v horším případě utopii. [9, 18, 48]

Sací potrubí a air boxy vyrobené z vláknových kompozitů se však relativně běžně používají, převážně pak v sportovních a závodních vozech. Pokud jde o velké automobilky, trubky sání vyrobené z polypropylenu vyztuženého skelným vláknem používá v koncern Volkswagen od roku 2010, kdy tímto materiálem nahradil do té doby používaný polyamid. Použitím GFRPP bylo dosaženo snížení hmotnosti o 15 % a zlepšení tlumení hluku způsobeného prouděním vzduchu v sání. [49]

Víka ventilů se z vláknových kompozitů vyrábějí již několik desetiletí. Kromě úspory hmotnosti je výhodou kompozitních vík ventilů v malém creepu materiálu, který umožňuje vyrobit víka s velkou přesností a schopností udržet si těsnost po dlouhou dobu. Také dochází k lepšímu tlumení hluku a vibrací než v případě běžně používaných kovových materiálů (především hliníku). [9]

Nepříliš zřejmá aplikace vláknových kompozitů v konstrukci vozidel je spojkové obložení. Dříve se vyrábělo z azbestu, ale poté co se azbest ukázal jako karcinogenní látka, byl zakázán a výrobci museli nalézt jiné řešení. Nejčastěji se dnes používají tzv. organické materiály obložení, což je zpravidla fenolická pryskyřice vyztužená skelnými či minerálními vlákny a mosaznými drátky. Kvůli kombinovanému namáhání obložení jsou vlákna v kompozitu rozložena zpravidla náhodně. [50]

V oblasti závodních a supersportovních vozů se na spojkové obložení často používají kompozitní materiály C/C a C/SiC známé z brzdových kotoučů (viz 7.2). Výhodou je kromě úspory hmotnosti především větší tepelná odolnost než u klasických materiálů. Nevýhodou je kromě velmi vysoké ceny také větší opotřebení setrvačnicku a horší ovládání spojky, zejména za studena. [51]

Hřídele z vláknových kompozitů se používají především jako spojovací hřídele mezi převodovkou a rozvodovkou (popř. mezi motorem a převodovkou v případě koncepce transaxle) u vozidel s pohonem zadních či všech kol. Jako materiál kompozitových hřídelí se výhradně používá epoxid vyztužený uhlíkovým vláknem. [52]

Hřídele z CFRP se vyrábí technologií navíjení a vidlice kardanových kloubů jsou v nich zalepeny či nalisovány. Hlavním důvodem instalace CFRP hřídelí je zlepšení dynamických parametrů prostřednictvím snížení váhy rotujících hmot. Dalšími výhodami CFRP hřídelí jsou schopnost tlumení vibrací a torzních kmitů, delší životnost (CFRP hřídele nemají žádné svary, které by měly tendenci k únavovému lomu) a vyšší kritické otáčky, než u srovnatelně pevných konvenčních ocelových hřídelí. Cena je však zhruba pětikrát vyšší než v případě oceli. [52]

Z kompozitních materiálů, konkrétně z epoxidu vyztuženého uhlíkovými vlákny se také vyrábí palivové nádrže pro vozidla spalující plynná paliva. Nádrže se vyrábějí technologií navíjení. Kompozitní nádrže se zatím příliš nepoužívají, výjimkou je například automobil Toyota Mirai na vodíkový pohon. [53]

4.3.4 Interiér

Na první pohled nepřiliš zřejmou, ale přesto velmi rozšířenou aplikací vláknových kompozitů v konstrukci automobilů, je výroba přístrojových desek, vnitřních panelů karoserie a dalších komponent z polypropylenu vyztuženého skelným vláknem (glass fiber reinforced polypropylene–GFRPP) metodou vstřikování. Polypropylen je lehký, odolný povětrnostním vlivům a korozi, snadno formovatelný a má velkou výhodu oproti ostatním použitelným plastům (PC/ABS, ABS, PA...) ve své nízké ceně. Mechanické vlastnosti samotného polypropylenu však nejsou moc dobré, takže je nutné používat vyztužující vlákna. [25, 54]

Vyztužující vlákna mohou být krátká (do 13 mm) nebo dlouhá (nad 13 mm). Třináct milimetrů je hranice, nad kterou již nelze materiál zpracovávat vstřikováním a je nutné použít lisování či jiný výrobní postup. Již se objevují aplikace, kde se používá dlouhovláknový GFRPP a probíhá intenzivní vývoj metod jeho zpracování, jelikož s rostoucí délkou vláken se zlepšují mechanické vlastnosti výrobků. Podíl vláken se pohybuje zpravidla okolo 20 - 30 % objemových, při vyšším podílu vláken se sice zlepšují mechanické vlastnosti, ale rapidně klesá zpracovatelnost materiálu. V případě, že je použito lisování a výsledný tvar výrobku není příliš složitý, lze obsah vláken zvýšit až na 60 - 70 %. Součásti interiéru vyrobené z různých druhů polypropylenu vyztuženého skelnými vlákny používají prakticky všechny velké automobilky. [54]

Dalším kompozitním materiálem často používaným v interiérech automobilů jsou kompozity vyztužené přírodními vlákny. Z pohledu zákazníka je nevýhodou jejich nepříliš kvalitní a estetický povrch, díky čemuž jsou kompozity s přírodními vlákny používány v nepříliš náročných aplikacích a jejich povrch bývá pokryt dalším materiálem s pohledovou funkcí. Jako příklad aplikací lze uvést vnitřky dveří, či prostor pro rezervu v kufříku. [55]

V oblasti používání přírodních vláken je nejaktivnější automobilkou Mercedes, jejíž modely tříd A (W169) a E (W211) měly již v roce 2002 mnoho dílů především v interiéru vyrobených z biokompozitů vyztužených banánovými, konopnými, lněnými a sisalovými vlákny. V současnosti Mercedes Benz rozšířil použití přírodních kompozitů i na další třídy (E, M, R). Například vnitřní panely dveří těchto modelů jsou vyrobeny z epoxidu vyztuženého vlákny z juty, kenafu, lnu a konopí. Biokompozity jako materiál komponent interiéru využívají dnes také další automobily. [55]

Vnitřní panely z přírodních kompozitů má též BMW i3, kde jsou jako výztuž použita konopná vlákna. Panely z konopí jsou zde záměrně ponechány viditelně na očích ve dveřích a na palubní desce, aby spolu s dalšími přírodními materiály použitými v interiéru demonstrovaly ekologičnost vozu. [57]

V segmentu závodních a sportovních automobilů je velmi rozšířené použití CFRP nejen jako materiál karoserie ale i v interiérových prvcích. U Koenigseggu zašli tak daleko, že jejich model One:1 má z CFRP vyrobené nejen sedačky, volant, a přístrojovou desku, ale i sluneční clony, na každé se díky použití CFRP ušetří okolo sto gramů hmotnosti. Použitím CFRP na díly interiéru se také dosahuje sportovní image, která je pro mnohé zákazníky neméně důležitá. Proto mnohá další sportovní auta mají v interiéru z CFRP různé drobné designové prvky. [58]

Běžná aplikace CFRP v závodních a sportovních vozech jsou skořepinové sedačky, které bývají vyrobeny jako jeden kus CFRP. Z produkčních sériových vozidel má CFRP sedačky zatím pouze BMW i3, které má skořepinu zadních sedaček vyrobenou z polyuretanu vyztuženého uhlíkovým vláknem. [59]

4.3.5 Formula student ČZU

Vláknové kompozity se též v hojně míře používají při konstrukci závodních monopostů vznikajících na ČZU pro Formula Student, což je soutěž založená v roce 1981, které se mohou zúčastnit závodní vozy vytvořené studenty technických univerzit. Cílem je zkonstruovat vlastní monopost a získat v soutěži co nejvíce bodů v různých disciplínách, nejenom v závodních jako je slalom, akcelerace či vytrvalostní závod, ale i ekonomických, jako je třeba poměr cena/výkon u monopostu.

Prozatím vznikly na ČZU tři monoposty, v nichž bylo postupně využíváno stále větší množství komponent z vláknových kompozitů. První vůz měl z kompozitů pouze výztuže příhradového rámu požadované pravidly a sání motoru, vyrobené podle vlastního návrhu za účelem optimalizace toku vzduchu v sání z CFRP a hliníkové voštiny. Druhý vůz měl již kromě sání z CFRP kompletní kapotáž, sedačku a difuzor. Difuzor vznikl za účelem zvýšení přítlaku a též tvořil podlahu vozu, pro zvýšení jeho tuhosti bylo použito jádro z aramidové voštiny. Při výrobě všech dílů bylo použito vakuování pro zvýšení podílu výztuže.

Díky všem nabytým zkušenostem se na třetím monopostu objevily již opravdu funkční klíčové komponenty z kompozitů (viz obr. 17). Výztuže rámu a vrchní díl karoserie byly vyrobeny opět z CFRP a nosná podlaha opět ze sendvičového materiálu (CFRP a aramidová voština). Profily přítláčná křidel byly vyrobeny olaminováním jádra z lehkého extrudovaného polystyrénu tkaninou z uhlíkových vláken a bočnice přítláčných křidel ze sendvičového materiálu, konkrétně z uhlíkových vláken a pěny Airex. Chladiče vzduchu i kapaliny byly uloženy do kompozitních bočnic, které slouží také jako designový prvek. Velmi zajímavá aplikace vláknových kompozitů je tzv. firewall, který dělí řidiče od motorového prostoru, kde dosahují teploty až 600°C. Proto byl firewall vyroben z aramidových vláken a speciální, vysokoteplotní pryskyřice. U třetího vozu byl vyroben z uhlíkových vláken i volant a nášlapy na brzdovém a plynovém pedálu.



Obr. 17: Třetí monopost Formula Student vytvořený na ČZU

V současné době figuruje na žebříčku Formula Student tým ČZU na 135. místě z celkových 511 týmů účastnících se soutěže, což lze vzhledem k relativně velmi skromným podmínkám, v jakých monoposty na ČZU vznikají považovat za vynikající úspěch.

4.4 Budoucnost kompozitů v automobilech

Jak již bylo řečeno v kapitole 4, již několikrát bylo v budoucnosti předpovídáno kompozitním materiálům masivní rozšíření, avšak zatím pokaždé automobilový průmysl zůstal u osvědčené oceli, popřípadě hliníku. [31]

Dnes je opět velmi aktuální snižování spotřeby vozidel, nejen díky vysoké ceně ropy ale také díky tomu, že se emise oxidu uhličitého dávají do spojitosti s globálními klimatickými změnami a na rozdíl od ostatních emisí spalovacích motorů, které lze potlačit vhodnými technickými opatřeními, produkci oxidu uhličitého lze snížit pouze snížením spotřeby. Pro snížení spotřeby je nutné snížit hmotnost vozidel, v čemž nám mohou být nápomocny právě vláknové kompozity. [60]

Dříve preferovaná skleněná vlákna dnes vystřídala vlákna uhlíková, které nabízí podstatně lepší pevnostní vlastnosti. Pro větší využití uhlíkových vláken je však naprosto klíčové snížit jejich cenu.

Skleněná vlákna se používají a pravděpodobně budou používat i nadále ve formě nasekaných vláken jako výztuž do plastových částí interiéru a dalších, především nenosných, komponent automobilů. Lze očekávat že skleněná vlákna budou ve stále větší míře nahrazována vlákny přírodními. Aby se přírodní vlákna mohla v budoucnu více uplatnit ve větší míře je nutné především zajistit jejich stabilní přísun v dostatečné kvalitě. [8, 62]

Přírodní vlákna by mohla sloužit i jako materiál nosných částí automobilů, slibným materiálem je třeba nanocelulóza, jež se svými vlastnostmi blíží kevlarovým vláknům. Prozatím je získávání nanocelulózy z rostlin příliš nákladné, pokud se však v budoucnu podaří její cenu dostatečně snížit, mohla by úspěšně konkurovat umělým vláknům. [61]

Cena vláken však tvoří pouze cca čtvrtinu ceny výsledného výrobku, proto je třeba též snížit ceny pryskyřice a především cenu výroby. Důležitým předpokladem pro snížení ceny výroby je dosažení krátkých produkčních časů, nejlépe do jedné minuty, což je doba taktu výroby dnešních automobilů. Dnes používané pryskyřice však potřebují k vytvrzení alespoň 5 minut, takže zkrácení produkčních časů stále zůstává velkou výzvou, jedno z možných řešení je používání tzv. termoplastových prepregů, polotovarů z vyztužených termoplastů, které by stačilo zahřát a vytvarovat podle potřeby a po zchladnutí by si uchovaly nový tvar bez nutnosti časově náročného vytvrzování. Zatím taková technologie neexistuje v podobě vhodné pro výrobu automobilů, ale probíhá intenzivní vývoj. Zautomatizování výroby je další velmi důležitý předpoklad pro vyrábění vozidel dostatečně rychle a levně při zachování požadované kvality. [62, 63]

Též je třeba získat více zkušeností v oblasti navrhování komponent z vláknových kompozitů. Velké množství dnes vyráběných kompozitových dílů vzniká jako prosté okopírování tvarů kovových součástí (typicky kompozitové blatníky použité na omezených sériích některých vozů) bez plného využití potenciálu, jež kompozity v oblasti tvarování komponent nabízí. Do budoucna je třeba, aby se s využitím kompozitů pracovalo od prvotních návrhů a bylo tak možné naplno využít možnosti kompozitních materiálů. [63]

Podíl kompozitových dílů bude do budoucna nepochybně stoupat, ale v současné době nic nenasvědčuje tomu, že by některá z velkých zavedených automobilů přešla na kompozitní materiály výhradně. Velké automobilky v minulosti investovaly astronomické sumy peněz do vývoje a výrobních zařízení automobilů z oceli či hliníku a zavedení vláknových kompozitů by znamenalo nutnost nového vývoje prakticky od začátku. [65]

Specifická situace panuje na trhu sportovních a supersportovních automobilů, kde se již kompozitní materiály uplatňují ve velké míře a v blízké budoucnosti tomu nejspíše nebude jinak. Cena u sportovních automobilů nehraje příliš velkou roli, důležitější jsou špičkové výkony a těch nelze dosáhnout jinak než použitím špičkových materiálů, jakým kompozitní materiály bezpochyby jsou. [63, 65]

Nedávno automobilky VW a PSA zavedly takzvané modulární platformy, společně pro řadu modelů automobilek a řada dalších podobné platformy vyvíjí. Tyto platformy jsou založené na kovových materiálech, na tradiční hlubokotažné oceli a ve vysoké míře i na oceli vysokopevnostní (např. karoserie Škody Octavia III je ze sedmdesáti procent z oceli se zvýšenou pevností a vysokopevnostních) a také hliníku. I když se modulární platformy zavádí kvůli úspoře nákladů na vývoj jednotlivých modelů, cena za vývoj platformy je stále mimořádně vysoká, a proto je předpoklad, že se dnes vyvinuté platformy budou bez radikálních změn využívat alespoň deset let, aby se jejich vývoj automobilkám zaplatil. Do té doby nelze od velkých automobilek čekat skokový nárůst využívání vláknových kompozitů. [66]

Spousta komponent automobilů se navíc nepodaří odladit při testování, ale až po několika generacích vozidel nasazených do reálného provozu a zákazníci jsou velice konzervativní, takže pokud by se nějaká automobilka i přes enormní náklady odvážila vyrábět své vozy z vláknových kompozitů, mohlo by se jí snadno stát, že díky nedotažení některých komponent by se od ní zákazníci odvrátili, protože dnešní trh s automobily je velmi konkurenční prostředí a chyby se zde neodpouští.

Spíše lze tedy očekávat, že automobilky budou využívat vláknových kompozitů jako náhradu oceli pouze pro jednotlivé modely, často navíc půjde o elektromobily či vozy s jiným alternativním pohonem jako je tomu v případě elektromobilu BMW i3. U takovýchto vozidel lze snadněji obhájit vyšší cenu, protože jsou stále spíše než čistě ekonomickým kalkulem volbou nadšenců a propagátorů alternativních pohonů, kteří jsou ochotni zaplatit vyšší cenu a odpustit případně drobné nedostatky výměnou za určitou výjimečnost, navíc v mnoha zemích se na elektromobily vztahují daňové úlevy. [64]

Pokud přijde v nejbližší době revoluce ve využití vláknových kompozitů ve vozidlech, bude tomu nejspíše ze strany nezávislých či externích vývojářských firem jako je japonská firma Teijin, která v roce 2011 představila koncept vozidla s karosérií z termoplastu vyztuženého uhlíkovým vláknem. Karosérie čtyřsedadlového vozu váží pouhých 47 Kg, avšak mnohem důležitější je, že se Teijinu podařilo prolomit hranici jedné minuty doby výroby. V současnosti spolupracuje Teijin s automobilkou General Motors a v nejbližší době by mělo být jasné, zda tato technologie najde masivnější uplatnění v sériové výrobě. [63, 67]

Jedním z dalších projektů s potenciálem způsobit převratnou změnu v konstrukci automobilů, potažmo ve využití vláknových kompozitů je platforma iSTREAM vyvinutá firmou Gordon Murray Design, již založil Gordon Murray, konstruktér proslavený mimo jiné návrhem supersportu McLaren F1. Jde o laserem svařený prostorový rám z trubek a profilů z vysokopevnostní oceli (iFRAME), na němž jsou připevněny sendvičové (voštinové) panely z CFRP nebo z přírodních vláken inspirované monoposty F1. První vozidlo postavené na platformě iSTREAM by měl být v roce 2018 elektromobil Yamaha MOTIVE.e. Murray doufá, že do budoucna prodá až 35 licencí, jedním z potenciálních kupců je i firma Apple. Nejbohatší technologická firma v současnosti pracuje na elektromobilu a použití hotové platformy je jednou z možností, které Apple jako firma bez zkušeností v automobilovém průmyslu má a iSTREAM se svým názvem přímo nabízí. V tuto chvíli jde pouze o pouhé spekulace, ale pokud by se tak stalo, mohlo by to znamenat revoluci v automobilovém průmyslu. [68, 69]

5. Závěr

Vláknové kompozity za posledních šedesát let prošly velkým vývojem a staly se významnou součástí automobilového průmyslu. I když to na první pohled není zřejmé, v automobilech, které každý den potkáváme na silnicích, se vyskytuje bezpočet aplikací vláknových kompozitů, od karosérií přes přístrojové desky a sedačky až po hřídele, pružiny a mnoho dalších komponent, přičemž preferovány jsou kompozity s polymerní maticí vyztužené uhlíkovými či skleněnými vlákny.

Kompozitní materiály jsou díky svým vlastnostem vhodné též pro sportovní a závodní vozy vznikající v malých sériích, nebo i pouze v jednotlivých exemplářích. Jedním z příkladů takových vozidel je i monopost pro soutěž Formula Student, který vznikl přímo na Technické fakultě ČZU a v jehož konstrukci se uplatňuje mnoho z materiálů a postupů popsanych v této práci.

Ve prospěch vláknových kompozitů hovoří především excelentní poměr pevnosti a hmotnosti umožňující podstatnou redukci hmotnosti vozidel. Dalšími velkými výhodami jsou větší svoboda při navrhování tvarů komponent a odolnost proti korozi. Jako každý jiný materiál mají kompozity také řadu nevýhod, z nichž ty hlavní, které brání jejich širšímu nasazení v sériových vozidlech, jsou vysoká cena materiálu a velmi náročná výroba (finančně i časově).

Kompozity stále nabízí ohromný potenciál do budoucna, ale je třeba překonat množství překážek. V první řadě je třeba vyvinout technologie vhodné pro velkosériovou výrobu a zajistit dostatek materiálu přijatelné kvality za nízkou cenu. Výzvou je dostat výrobu kompozitních vozidel na stejnou úroveň, co do počtu vyrobených kusů, rychlosti a ceny výroby jako je dnes běžná u konvenčních materiálů.

Automobilka BMW v případě modelu i3 prokázala, že se současnými technologiemi lze zvládnout sériovou výrobu třiceti tisíc vozidel s karosérií z uhlíkových vláken ročně a učinila tak výrazný krok směrem k masovému rozšíření kompozitů.

Bylo by tak snadné podlehnout dnešnímu optimismu panujícímu okolo kompozitních materiálů, zejména pak kolem uhlíkových vláken, avšak nelze předpokládat, že nahrazení kovů kompozity je nevyhnutelné a automatické. Počet aplikací kompozitních materiálů bude sice bezpochyby stoupat, ale je třeba mít na paměti, že každý materiál má svůj specifický účel, ke kterému se nejlépe hodí a tradiční materiály ještě dlouho nebudou z trhu vytlačeny.

6. Seznam literatury

- [1] AGARWAL, Bhagwan D. a Lawrence J. BROUTMAN, *Vláknové kompozity: celost. příručka pro vys. školy techn.*, 1. vyd. Praha: SNTL, 1987, 294 s.
- [2] MALLICK, P *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design* . 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2007, 619 s. ISBN 08-493-4205-8.
- [3] BUNSELL, A, J RENARD. *Fundamentals of fibre reinforced composite materials*. Bristol: Institute of Physics Publishing, c2005, xii, 398 p. ISBN 07-503-0689-0.
- [4] CHOTĚBORSKÝ, Rostislav. *Nauka o materiálu*. Vyd. 1. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2011, 1 CD-ROM. ISBN 978-80-213-2236-3.
- [5] Ceramic matrix composites heat up. *Composites World* [online]. 2013 [cit. 2014-12-10]. Dostupné z: <http://www.compositesworld.com/articles/ceramic-matrix-composites-heat-up>
- [6] MAZUMDAR, Sanjay K *Composites manufacturing: materials, product, and process engineering / Sanjay K. Mazumdar*. Boca Raton, Fla.: CRC Press, c2002, 392 p. ISBN 08-493-0585-3.
- [7] Directive 2000/53/EG on end-of-life vehicles. In: *Official journal of the European Union* 269. 2005.
- [8] KORONIS, Georgios, Arlindo SILVA a Mihail FONTUL. Green composites: A review of adequate materials for automotive applications. *Composites Part B: Engineering*. 2013, vol. 44, issue 1, s. 120-127. DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.07.004.
- [9] TUCKER, Nick a Kevin A LINDSEY. *An introduction to automotive composites*. Shrewsbury, U.K.: Rapra Technology, 2002, viii, 196 p. ISBN 1-85957-279-0.
- [10] Sandwich composite and core material. *Fibre reinforced plastics* [online]. 2010 [cit. 2014-12-20]. Dostupné z: <http://www.fibre-reinforced-plastic.com/2010/12/sandwich-composite-and-core-material.html>
- [11] HAVEL, Miroslav. *Havel composites: Technologie výroby kompozitů* [online]. 2011 [cit. 2014-12-10]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/76-Technologie-jejich-popis-a-schemata.html>
- [12] JACOB, Amanda. Built in Italy: the Lamborghini Avendator. *Reinforced Plastics*. 2013, vol. 57, issue 5, s. 29-31. DOI: 10.1016/s0034-3617(13)70153-x.
- [13] DIGITALEN BIBLIOTHEK. *Verfahren: Prepreg* [online]. 2008 [cit. 2014-12-10]. Dostupné z: <http://diglib.ethz.ch/system/temporary/get-urf.ind44.de.htm>

- [14] Resin transfer moulding process. In: *Molding Fiberglass* [online]. 2011 [cit. 2014-12-20]. Dostupné z: <http://www.moldedfiberglass.com/processes/processes/closed-molding-processes/resin-transfer-molding>
- [15] Compression molding of polymers. *Substances and technologies* [online]. 2012 [cit. 2014-12-20]. Dostupné z: <http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=compression-molding-of-polymers>
- [16] Injection molding of polymers. *Substances and technologies* [online]. 2012 [cit. 2014-12-20]. Dostupné z: <http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=injection-molding-of-polymers>
- [17] How are filament winding machines working?. *Hebei Maple Fiberglass Industry Co., Limited* [online]. 2013 [cit. 2014-12-20]. Dostupné z: <http://www.frpmachining.com/faqs/frpgrp-pipe-filament-winding-machine>
- [18] MALLICK, P. *Materials, design and manufacturing for lightweight vehicles*. Oxford: Woodhead, 2010, xii, 369 p. Woodhead Publishing. ISBN 14-398-2972-1.
- [19] SEDLÁČEK, Jan. Nástroje pro obrábění kompozitních materiálů. In: *MM Spektrum* [online]. 2006 [cit. 2015-01-27]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nastroje-pro-obrabeni-kompozitnich-materialu.html>
- [20] Plant Tour: An inside look at BMW's i3 production. In: *CompositesWorld* [online]. 2014 [cit. 2015-01-28]. Dostupné z: <http://www.compositesworld.com/news/plant-tour-an-inside-look-at-bmws-i3-production>
- [21] HOŘČÍK, Jan. BMW chce snížit cenu výroby uhlíkových vláken o 90 %. In: *Hybrid.cz* [online]. 2014 [cit. 2015-01-28]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/bmw-chce-snizit-cenu-vyroby-uhlikovych-vlaken-o-90>
- B
- [22] The future of human mobility: BMW i. In: *BMW* [online]. 2013 [cit. 2015-01-28]. Dostupné z: <http://www.bmw.com/com/en/insights/corporation/bmwi/concept.html>
- [23] DAVIES, Geoff. *Materials for automobile bodies*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2012, p. cm. ISBN 978-0-08-096979-4.
- [24] VLK, František. *Stavba motorových vozidel*. 1. vyd. Brno: František Vlk, 2003, 499 s. ISBN 80-238-8757-2.
- [25] CHEAH, Lynette W. *Cars on a Diet: The Material and Energy Impacts of Passenger Vehicle Weight Reduction in the U.S.* Boston, 2010. Disertační práce. Massachusetts Institute of Technology.
- [26] HALVORSON, Bengt. Nissan R&D Chief: Carbon Fiber Is Good For Pla-

- nes, Not Cars. In: *Green Car Reports* [online]. 2013 [cit. 2015-01-29]. Dostupné z: <http://www.greencarreports.com/news/1088723-nissan-rd-chief-carbon-fiber-is-good-for-planes-not-cars?fbfanpage>
- [27] YANG, Yongxiang. Recycling of composite materials. *Chemical Engineering and Processing*. 2011, č. 51.
- [28] History of automotive composites. In: *Automotive Composites Alliance* [online]. 2009 [cit. 2015-02-01]. Dostupné z: <http://www.autocomposites.org/composites101/history.cfm>
- [29] Lotus sport cars. In: *How Stuff Works* [online]. 2011 [cit. 2015-02-01]. Dostupné z: <http://auto.howstuffworks.com/lotus-sports-cars1.htm>
- [30] Metroliner highlights. *Commercial Motor*. 1988.
- [31] BROSIUS, Dale. Automotive composites: A bit of deja vu?. In: *Composites World* [online]. 2014 [cit. 2015-02-01]. Dostupné z: <http://www.compositesworld.com/articles/automotive-composites-a-bit-of-deja-vu>
- [32] VOSSLER, Chuck. Learn About The BMW i3 Repair Process. In: *BMW Blog* [online]. 2014 [cit. 2015-02-02]. Dostupné z: <http://www.bmwblog.com/2014/07/11/learn-bmw-i3-repair-process/>
- [33] Aventador LP 700-4: Technical Specifications. In: *Lamborghini* [online]. 2011 [cit. 2015-02-22]. Dostupné z: <http://www.lamborghini.com/en/models/aventador-lp-700-4/technical-specifications/>
- [34] Fiberglass to Carbon Fiber: Corvette's Lightweight Legacy. In: *General Motors: media* [online]. 2012 [cit. 2015-02-28]. Dostupné z: <http://media.gm.com/media/us/en/gm/news.detail.html/content/Pages/news/us/en/2012/Aug/0816-corvette.html>
- [35] 2015 Corvette Z06 cutaway allows us to peer beneath the skin In: *Just Car News* [online]. 2015 [cit. 2015-03-03]. Dostupné z: <http://www.justcarnews.com/2015-corvette-z06-cutaway-allows-us-to-peer-beneath-the-skin.html>
- [36] NAITOVE, Matt. Automotive Innovation Trend-Setting Technologies Garner SPE Awards. *Plastics Technology*. 2002, č. 12.
- [37] MALNATI, Peggy. What's new in automotive front-end modules?. In: *Composites World* [online]. 2008 [cit. 2015-02-24]. Dostupné z: <http://www.compositesworld.com/articles/what39s-new-in-automotive-front-end-modules>
- [38] MCCONNEL, Vicky P. SMC has plenty of road to run in automotive applications. In: *Reinforced Plastics* [online]. 2007 [cit. 2015-03-01]. Do-

- stupné z: <http://www.reinforcedplastics.com/view/3883/smc-has-plenty-of-road-to-run-in-automotive-applications/>
- [39] WOOD, Karen. Composite leaf springs: Saving weight in production suspension systems. In: *Composites World* [online]. 2014 [cit. 2015-02-13]. Dostupné z: <http://www.compositesworld.com/articles/composite-leaf-springs-saving-weight-in-production-suspension-systems>
- [40] PETERSON, Zachary. Composites Under the Car. *Automotive Design & Production*. 2014, roč. 2014, č. 3.
- [41] Volvo XC90 features polyurethane composite leaf spring. In: *Reinforced Plastics* [online]. 2014 [cit. 2015-02-13]. Dostupné z: <http://www.reinforcedplastics.com/view/40293/volvo-xc90-features-polyurethane-composite-leaf-spring/>
- [42] Sogefi composite coil spring to be launched by Audi for 2015. In: *Composites World* [online]. 2014 [cit. 2015-02-13]. Dostupné z: <http://www.compositesworld.com/news/sogefi-composite-coil-spring-to-be-launched-by-audi-for-2015>
- [43] SCOLTOCK, James. Audi develops carbon fibre-aluminium anti-roll bar. In: *Automotive Engineer* [online]. 2014 [cit. 2015-02-13]. Dostupné z: <http://ae-plus.com/technology/audi-develops-carbon-fibre-aluminium-anti-roll-bar>
- [44] Aircore Carbon fiber wheels. In: *Koenigsegg* [online]. 2012 [cit. 2015-02-14]. Dostupné z: <http://www.koenigsegg.com/models/agera-r/aircore-carbon-fiber-wheels>
- [45] TAYLOR, Michael. BMW carbon fibre wheels close to production. In: *Auto Express* [online]. 2014 [cit. 2015-02-14]. Dostupné z: <http://www.autoexpress.co.uk/bmw/85858/bmw-carbon-fibre-wheels-close-production>
- [46] WOOD, Karen. Friction products: Carbon fiber stopping power. In: *Composites World* [online]. 2007 [cit. 2015-02-14]. Dostupné z: <http://www.compositesworld.com/articles/friction-products-carbon-fiber-stopping-power>
- [47] Carbon ceramic discs. In: *Brembo* [online]. 2012 [cit. 2015-02-14]. Dostupné z: <http://www.brembo.com/en/car/original-equipment/products/Pages/Carbon%20ceramic%20discs.aspx>
- [48] HOLZBERG. Carbon Fiber Engine Block. In: *The Carbon Fiber Journal* [online]. 2012 [cit. 2015-03-14]. Dostupné z: <http://www.thecarbonfiberjournal.com>

com/?p=770

- [49] Volkswagen switches to polypropylene composite for air intake manifolds. In: *Reinforced Plastics* [online]. 2010 [cit. 2015-03-10]. Dostupné z: <http://www.reinforcedplastics.com/view/11141/volkswagen-switches-to-polypropylene-composite-for-air-intake-manifolds/>
- [50] Different types of clutch facing materials and examples. In: *Products design Funda* [online]. 2012 [cit. 2015-03-14]. Dostupné z: <http://www.productdesignfunda.com/technology/different-types-of-clutch-facing-materials-and-examples>
- [51] Carbon-carbon composites in clutches. In: *High Power Media* [online]. 2011 [cit. 2015-03-14]. Dostupné z: <https://www.highpowermedia.com/blog/3143/carbon-carbon-composites-in-clutches>
- [52] OGANDO, Joseph. Carbon Fibre Driveshaft Systems. *Design News*. 2003, roč. 58, č. 18.
- [53] The Toyota Mirai Brings the Future to Your Driveway. *Journal of Transportation*. 2014, December 6.
- [54] KARIAN, Harutun G. *Handbook of polypropylene and polypropylene composites*. New York: Marcel Dekker, c2003, xiii, 741 p. Plastics engineering (Marcel Dekker, Inc.), 51. ISBN 08-247-4064-5.
- [55] HOLBERY, James a Dan HOUSTON. Natural-Fiber-Reinforced Polymer Composites in Automotive Applications. *Journal of Materials*. 2006, č. 11.
- [56] PILLA, Srikant. *Handbook of Bioplastics and Biocomposites Engineering Applications*. Massachusetts: Scrivener Publishing, 2011. ISBN 9780-470-62607-8.
- [57] GALL, Jared. 2014 BMW i3. In: *Car and Driver* [online]. 2013 [cit. 2015-03-02]. Dostupné z: <http://www.caranddriver.com/reviews/2014-bmw-i3-first-drive-review>
- [58] OKULSKI, Travis. The Koenigsegg One:1 Is Sweden's 280 MPH Carbon Fiber Hypercar. In: *Jalopnik* [online]. 2014 [cit. 2015-03-02]. Dostupné z: <http://jalopnik.com/the-koenigsegg-one-1-is-swedens-280-mph-carbon-fiber-h-1532088783>
- [59] No electric car without plastic. In: *BASF* [online]. 2014 [cit. 2015-03-02]. Dostupné z: http://www.windenergy.basf.com/group/corporate/wind-energy/en_GB/news-and-media-relations/news-releases/P-14-176

- [60] HROMÁDKO, Jan. *Spalovací motory: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. 1. vyd. Praha: Grada, 2011, 296 s. ISBN 978-80-247-3475-0.
- [61] REBOUILLAT, Serge. State of the Art Manufacturing and Engineering of Nanocellulose: A Review of Available Data and Industrial Applications. *Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology*. 2013, vol. 04, issue 02, s. 503-537. DOI: 10.2495/978-1-85312-998-8.
- [62] MANGINO, Enrico, Joe CARRUTHERS a Giuseppe PITARRESI. The future use of structural composite materials in the automotive industry. *International Journal of Vehicle Design*. 2007, vol. 44, 3/4. DOI: 10.1504/ijvd.2007.013640.
- [63] SLOAN, Jeff. Auto composites quest: One-minute cycle time?. In: *Composites World* [online]. 2012 [cit. 2015-03-14]. Dostupné z: <http://www.compositesworld.com/articles/auto-composites-quest-one-minute-cycle-time>
- [64] SMOCK, Doug. What's the future for automotive composites?. In: *Plastics Today* [online]. 2012 [cit. 2015-03-14]. Dostupné z: <http://www.plasticstoday.com/articles/whats-future-automotive-composites0911201201>
- [65] Report: Carbon fiber will be mainstreamed in automotive by 2025. In: *Composites World* [online]. 2015 [cit. 2015-03-14]. Dostupné z: <http://www.compositesworld.com/news/report-carbon-fiber-will-be-mainstreamed-in-automotive-by-2025>
- [66] MIHÁLIK, Miro. PSA Peugeot Citroën EMP2. In: *AutoForum* [online]. 2013 [cit. 2015-03-14]. Dostupné z: <http://www.autoforum.cz/technika/psa-peugeot-citroen-emp2-francouzske-mqb-si-s-multi-linkem-hlavu-nelame/>
- [67] Solutions: Fibers that Create the Future of Mobility. In: *Teijin: Human Chemistry, Human Solutions* [online]. 2011 [cit. 2015-03-14]. Dostupné z: <http://www.teijin.com/solutions/cfrp/>
- [68] What is iSTREAM?. In: *Gordon Murray Design* [online]. 2014 [cit. 2015-03-14]. Dostupné z: <http://www.gordonmurraydesign.com/GMD/iSTREAM.html>
- [69] KORZENIEWSKI, Jeremy. Apple has 'several hundred' employees working on Project Titan electric car. In: *Autoblog* [online]. 2015 [cit. 2015-03-14]. Dostupné z: <http://www.autoblog.com/2015/02/14/apple-car-project-titan-electric-minivan/>

Seznam obrázků

1	Klasifikace kompozitních materiálů [1]	6
2	Křehký lom kompozitu vyztuženého vláknem z SiNC [5]	7
3	Rohož z nasekaného rovingu (vlevo) a tkanina (vpravo) [6]	7
4	Sendvičový kompozit, kde je jako jádro použita voština [10]	9
5	Lisování v autoklávu [13]	11
6	Vysokotlaké vstřikování [14]	12
7	Lisování [15]	13
8	Vstřikování [16]	13
9	Navíjení [17]	14
10	Otvor v kompozitu s delaminací (a) a bez delaminace (b) [19]	14
11	Modulární architektura vozidla BMW i3 [22]	15
12	Kompozitní přední část karoserie Fordu Escort z roku 1986 [31]	20
13	Monokok automobilu Lamborghini Aventador [12]	21
14	Řez Chevroletem Corvette Z06 2015 [35]	22
15	Zadní náprava vozu Volvo XC90 s kompozitní listovou pružinou [41]	24
16	Vpravo GFRP pružina Sofegi, vlevo pružina ocelová [42]	24
17	Třetí monopost Formula Student vytvořený na ČZU	29

Seznam tabulek

1	Vybrané parametry přírodních vláken v porovnání s E-sklem [8]	9
---	---	---