

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Aleš Macoszek**
Studijní program: N3923 Materiálové inženýrství
Studijní obor: 3911T030 Technické materiály
Téma: **Mechanické a tepelné vlastnosti uhlíkových materiálů**
Mechanical and thermal properties of carbon materials

Zásady pro vypracování:

- Literární rešerše
- Experimentální metody diagnostiky laminátu
- Technologie laminování
- Analýza výsledků měření

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] Chawla, K. K., Composite Materials, Science and Engineering. Springer Verlag, New York, 1987, ISBN 0-387-96478-9 .
[2] M.H. Geier.: Quality Handbook for Composite Material. ASM International, 1999.
[3] Machek, V., Sodomka, J. : Polymery a kompozity s polymerní matricí. 4. část, Nauka o materiálu, Praha, Nakladatelství CVUT, 2008.
[4] Korínek Z.: Kompozity – skriptum. <http://www.volny.cz/korinek/>.
[5] Gurit- Guide to composites www.gurit.com.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

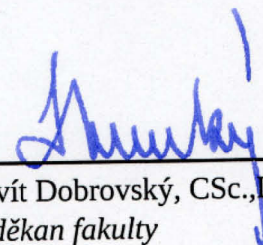
Vedoucí diplomové práce: **prof. RNDr. Pavol Košťál, Ph.D.**

Datum zadání: 15.11.2011

Datum odevzdání: 04.05.2012



prof. Ing. Vlastimil Vodárek, CSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Ludovít Dobrovský, CSc., Dr.h.c.
děkan fakulty

Zásady pro vypracování diplomové práce

I.

Diplomovou prací (dále jen DP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

II.

Uspořádání diplomové práce:

- | | |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list | 5. Obsah DP |
| 2. Zásady pro vypracování DP | 6. Textová část DP |
| 3. Prohlášení + místopřísežné prohlášení | 7. Seznam použité literatury |
| 4. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky | 8. Přílohy |

ad 1) Titulním listem je originál zadání DP, který student obdrží na své oborové katedře.

ad 2) Tyto „Zásady pro vypracování diplomové práce“ následují za titulním listem.

ad 3) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listě (student jej obdrží na své oborové katedře) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání DP. V případě, že DP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnícké nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním DP.

ad 4) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listě česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 5) Obsah DP se uvádí na zvláštním listě. Zahrnuje názvy všech očíslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části DP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 6) Textová část DP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním DP;
 - Vlastní rozpracování DP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
 - Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků DP z hlediska stanoveného zadání.
- DP bude zpracována v rozsahu min. 45 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury). Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující **doporučené** úpravy - písmo Times New Roman (nebo podobné) 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 8).

Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury.

Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

ad 7) DP bude obsahovat alespoň 15 literárních odkazů, z toho nejméně 5 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. **Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690.** Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu DP.

ad 8) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

III.

Diplomovou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra*

uprostřed: *DIPLOMOVÁ PRÁCE*

dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě.

IV.

Diplomová práce, která neodpovídá těmto zásadám, nemůže být přijata k obhajobě. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem magisterského, resp. navazujícího magisterského studia fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2011/2012.

Ostrava 15. 11. 2011

Prof. Ing. Ludovít Dobrovský, CSc., Dr.h.c.
děkan fakulty metalurgie a materiálového inženýrství
VŠB-TU Ostrava

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 - školní dílo);
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB - TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že odevzdáním své diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracoval(a) samostatně.

V Ostravě 4.5.2012


.....
podpis (jméno a příjmení studenta)

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce prof. RNDr. Pavlovi Košťalovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady, čas a vynaloženou energii.

ABSTRAKT

Tato diplomová práce pojednává o uhlíkových materiálech. Přesněji řečeno o laminátech na bázi uhlíkových vláken. V teoretické části je popsána široká škála technických materiálů s označením kompozitní materiály. Praktická část je pak zaměřena na měření mechanických a tepelných vlastností konkrétního materiálu. Jedná se o prepregový kompozit *HexPly M49*

Klíčová slova: kompozitní materiál, prepreg, mechanické vlastnosti, tepelné vlastnosti

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the carbon materials. More precisely about fibreglass based on carbon. In the theoretical part is describes wide range of technical materials called composite materials. The practical part is focused on the measurement of mechanical and thermal properties of a particular material. Concretely, it is a prepreg composite *HexPly M49*.

Keywords: composite material, prepreg, mechanical properties, thermal properties

OBSAH

I. TEORETICKÁ ČÁST	9
1. ÚVOD.....	10
2. KOMPOZITNÍ MATERIÁLY - ÚVOD.....	12
2.1. Polymerní kompozitní materiály.....	13
3. MATRICE	16
3.1. Polymerní matrice	16
3.1.1. Matrice tvořené termosety.....	18
<i>Nenasycené polyesterové pryskyřice.....</i>	<i>18</i>
<i>Vinylesterové pryskyřice</i>	<i>19</i>
<i>Epoxidové pryskyřice</i>	<i>20</i>
<i>Fenolické pryskyřice.....</i>	<i>22</i>
<i>Formaldehydové pryskyřice</i>	<i>22</i>
3.1.2. Matrice tvořené termoplasty.....	23
<i>Vysokopevnostní a špičkové termoplastové kompozity.....</i>	<i>24</i>
4. VYZTUŽUJÍCÍ VLÁKNA	27
4.1. Uhlíková vlákna	28
4.2. Skleněná vlákna.....	31
4.3. Aramidová vlákna.....	33
5. TECHNOLOGIE VÝROBY POLYMERNÍCH KOMPOZITŮ	34
5.1. Výroba prepregů	34
5.2. Ruční kladení za mokra, kontaktní laminování.....	35
5.2.1. Ruční kladení prepregů, vytvrzování v autoklávu.....	35
5.3. Částečně automatizované výrobní postupy	37
5.4. Plně automatizované výrobní postupy	38

5.4.1.	Strojní kladení prepregů, lisování za tepla.....	38
5.5.	Kontinuální postupy	38
5.6.	Speciální technologie.....	39
6.	VYUŽITÍ PREPREGŮ.....	40
6.1.	Letecký průmysl.....	40
6.2.	Automobilový průmysl	41
II.	PRAKTICKÁ ČÁST.....	43
7.	CÍLE EXPERIMENTÁLNÍ PRÁCE	44
8.	POPIS ZKOUMANÉHO MATERIÁLU.....	45
	<i>Hlavní výhody a funkce.....</i>	<i>45</i>
	<i>Vytvrzování prepregu</i>	<i>46</i>
	<i>Skladovatelnost prepregu.....</i>	<i>48</i>
8.1.	Zkušební tělesa	48
9.	ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ.....	49
9.1.	Tahová zkouška	50
9.1.1.	Výsledky.....	51
	<i>Určení Youngova modulu pružnosti.....</i>	<i>54</i>
9.1.2.	Vyhodnocení	54
9.2.	Zkouška tříbodovým ohybem	56
9.2.1.	Výsledky.....	57
9.2.2.	Vyhodnocení	60
9.3.	Tepelné zkoušky	61
	<i>Modelové představy a teoretické základy měření.....</i>	<i>61</i>
	<i>Samotné zpracování dat.....</i>	<i>63</i>
	<i>Zpracování křivek chladnutí.....</i>	<i>64</i>
9.3.1.	Výsledky.....	64
9.3.2.	Vyhodnocení	68

10. ZÁVĚR	69
Seznam použité literatury.....	71
Zbylé zdroje obrázků	73

I. TEORETICKÁ ČÁST

1. Úvod

Kompozitní materiály zná a využívá naše civilizace již od dávnověku. Slovem kompozitní materiál rozumíme materiál složený ze dvou a více chemicky a fyzikálně odlišných složek. Počáteční využívání těchto materiálů bylo ve srovnání s dneškem samozřejmě primitivní, ale již tehdy dokázali lidé ocenit výhody spojení minimálně dvou různých materiálů. Jako příklad může posloužit vysušená hlína s kousky slámy, jejíž pozůstatky byly nalezeny v Izraeli a datovány na stáří 800 let před naším letopočtem.

Je zřejmé, že je osudem člověka využívat a spojovat výhody různých materiálů ke svému prospěchu. V dnešní době, době moderních technologií a mnohdy extrémních aplikačních nároků jsou požadavky na technické materiály využívané především průmyslem, ale i spotřebiteli značné. Proto je výhodné, někdy dokonce i nutné skloubit výhody dvou a více materiálů v materiál jeden, který pro dané použití předčí svými vlastnostmi dosavadně používaný materiál. Takovýmto zvyšováním mechanických vlastností se nám otevírají nové možnosti využitelnosti v moderně řešených strojírenských či stavebních projektech.

Kompozitní materiály se vyznačují řadou velice výhodných vlastností, ve kterých se skrývá jejich pravá síla. Mezi tyto vlastnosti patří nízká hustota, pevnostní charakteristiky, odolnost proti korozi, minimální tepelná vodivost či elektroizolační schopnosti. Nic není dokonalé, a proto mají tyto progresivní typy materiálů i své nevýhody. Mezi hlavní nevýhody patří jejich cena, která je v porovnání např. s ocelmi daleko vyšší. Mezi další nevýhodu můžeme zařadit výrobu kompozitů v jednom kroku s konečným produktem. Zde je pak těžké od sebe oddělit vlastnosti materiálu od užitných vlastností výrobku. Jednoduše řečeno, u kompozitů není zcela vyřešena otázka optimalizace a spolehlivost konstrukčních postupů.

Cílem této diplomové práce je literární rešerše o laminátech na bázi uhlíkových vláken a uvedení do problematiky kompozitních materiálů. V práci je charakterizováno rozdělení kompozitních materiálů, jejich jednotlivé části, složení a možné využití. Značná pozornost je věnována technologii laminování, tedy výrobě a samotnému zpracování. Cílem praktické části jsou pak experimentální metody diagnostiky laminátů, zkoumání a vyhodnocování mechanických a tepelných vlastností konkrétního materiálu. Zkoumaným materiálem je prepreg s komerčním označením *HexPly M49*. Výsledky našich měření jsou vyhodnoceny a zanalyzovány.

Cíle práce jsou v souhrnu následující:

- Literární rešerše polymerních kompozitních materiálů
- Experimentální metody diagnostiky laminátu
- Technologie laminování
- Analýza výsledků měření

2. Kompozitní materiály - úvod

Kompozitním materiálem (dále jen kompozitem) rozumíme materiál, který je složen ze dvou a více složek rozdílných chemických a fyzikálních vlastností. Tato problematika byla sledována v pracích [1-10]. Základem kompozitu je pojivo, kterému říkáme matrice a výztuž. Matrice zastává funkci pojiva výztuže, a zaručuje konečný geometrický tvar kompozitu. Více kapitola č. 2. Výztuž je pak složka, která je pevnější, tvrdší a vůči matrici má několikanásobně lepší mechanické vlastnosti. Pro to, aby byl materiál chápán jako kompozit, musí splňovat jistá kritéria. Mezi tyto kritéria patří minimální podíl výztuže, který musí být větší jak 5% a příprava kompozitu musí být udělána smícháním složek.

Pevnost a tuhost daného kompozitu je v zásadní míře ovlivněna pevností a tuhostí vyztužujícího vlákna. Výsledné mechanické vlastnosti ovlivňuje spousta parametrů. Mezi tyto základní parametry patří:

- Typ a orientace vláken
- Typ matrice
- Přilnavost vláken k matrici, tj. schopnost matrice předávat zatížení vláknům

Vlastnosti výsledného kompozitu jsou pak paradoxně vyšší, než součet jednotlivých vlastností komponent. Tomuto jevu se říká synergický efekt. Slovo synergie pochází z řečtiny a v překladu znamená spolupráce. Synergickým efektem pak rozumíme spolupráci jednotlivých složek kompozitu v takové míře, že zde platí $1+1=3$.

V praxi se setkáváme se obrovskou škálou různých kompozitů. Pro to, aby jsme se v této spleti různých materiálů orientovali se kompozity rozdělují do dvou základních skupin. První skupina vychází ze závislosti na typu matrice, skupina druhá se klasifikuje podle druhu výztuže. Mezi nejnámější kompozity patří materiály počínaje železobetonem, přes různé keramické a kovové kompozity až po polymerní kompozity. Jednotlivé typy se liší typem matrice a v ní uložené výztuže, která pak může nabývat různých tvarů.

Předmětem našeho dalšího zájmu budou pouze polymerní kompozity vyztužené vlákny. Tj. polymerní vláknité kompozity. Pro opravdu široké spektrum kompozitů, se z důvodu zřetelného pochopení dělí i skupina vláknitých kompozitů do tříd. Nejčastějším

kritériem tohoto rozdělení je dělení podle délky a uspořádání vyztužujících vláken. Tímto způsobem pak vláknité kompozity dělíme na [1]:

- Jednosměrné – orientace vláken v jednom směru
 - S krátkými vlákny (poměr délka/průměr je < 100)
 - S dlouhými vlákny (poměr délka/průměr je > 100)
 - Prepregy (předimpregnované vrstvy vláken ve tvaru tenkých pásů s nevytvrzenou pryskyřicí)
 - Tažené profily
- Mnohoseměrné – orientace vláken náhodná či pravidelně orientována dvěma směry
 - S krátkými vlákny (poměr délka/průměr je < 100)
 - S dlouhými vlákny (poměr délka/průměr je > 100)
 - Prepregy (předimpregnované vláknové rohože či tkaniny s nevytvrzenou pryskyřicí)
 - Lamináty (střídání vrstev jednosměrných kompozitů s různými vzájemnými orientacemi výztuže)
 - Tažené profily

2.1. Polymerní kompozitní materiály

Jedná se o plasty vyztužené zpevňujícími vlákny. Plasty vyztužené vlákny obsahují konečná nebo nekonečná vlákna převážně skelná, aramidová nebo uhlíková, uložená v matrici z termoplastu, nebo termosetu. Tato problematika byla sledována v pracích [1], [2], [4], [6], [11]. Výsledkem je pak anizotropní materiál, tedy materiál mající v různých směrech různé vlastnosti. Z aplikačního hlediska se většina kompozitních plastů uspořádává vrstevně a jsou nazývány lamináty. Tyto materiály mají spoustu výhod, ale i nevýhod ovlivňujících možnosti využití na trhu.

Mezi hlavní výhody laminátů patří:

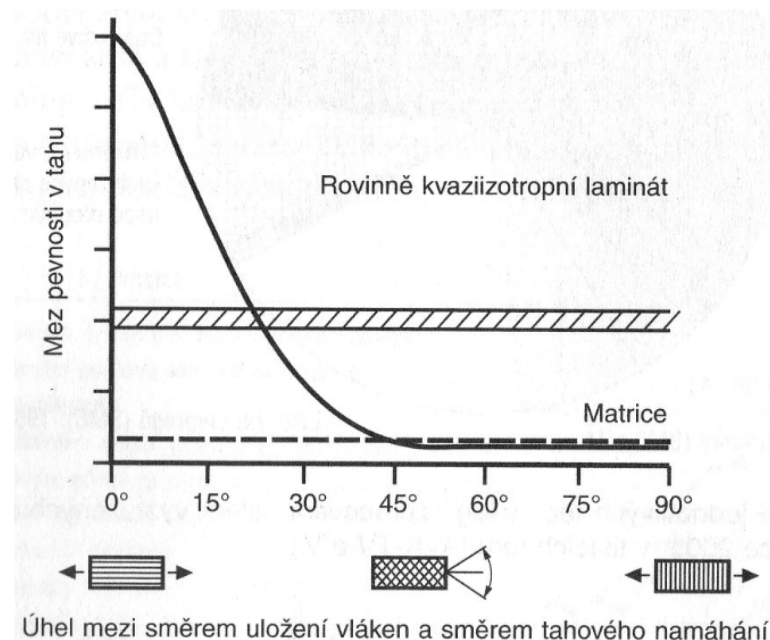
- Vysoká pružnost při deformaci
- Značná přizpůsobivost každému tvaru
- Vysoká pevnost a tuhost při zatížení v tahu ve směru vláken, při nízké hmotnosti kompozitu

- Vysoká odolnost proti korozi a stárnutí
- Nízký součinitel teplotní délkové roztažnosti
- Dobrá surovinová základna

Nevýhody laminátů:

- Množství variant materiálového složení, neexistuje standardní kompozit
- Neobvyklé chování materiálu
- Specifické vlastnosti materiálu a způsoby zpracování
- Nízká pevnost v tahu ve směru kolmém vůči vláknům
- Obtížné nedestruktivní zkoušení materiálu

Jak již bylo zmíněno v 1. kapitole, pevnost a tuhost kompozitu závisí především na pevnosti a tuhosti vláken. Vlákná a jejich orientace pak mají vliv na veškeré mechanické vlastnosti polymerního kompozitu. Lamináty, neboli vrstevně uspořádané kompozity, se jak již z názvu vyplývá, skládají z vrstevně uložených plochých vrstev výztuže a pojiva, které je vzájemně spojuje. Toto pojivo umístěné v mezivrstvách je posuzováno jako nekonečně tenké a odolné proti smyku. To znamená schopné přenést veškerou deformaci jednotlivých vrstev na vrstvy sousední.



Obrázek 1. Závislost meze pevnosti v tahu jednosměrně vyztuženého kompozitu na úhlu orientace vyztužujících vláken[1]

V závislosti na zatížení působícím ve směru vláken, či kolmo na něj dochází k rozdílnému uplatnění pevnosti vláken. Ze studia této problematiky vyplývá, že pouze pro 50% možných směrů zatížení je pro matrici díky jednosměrně uloženým vláknům toto vyztužení skutečně přínosem. Pro dalších 50% směrů je tato výztuž dokonce zodpovědná za celkové snížení pevnosti. Tuto nepříjemnou skutečnost by bylo možné eliminovat rovnoměrným uložením vláken ve všech směrech. Tímto bychom dosáhli značného vyztužení, ale také navýšení měrné hmotnosti a celkových výrobních nákladů. Rozumné je tedy ukládat vlákna pouze v tom směru, kde předem víme o směru působení hlavního namáhání. Tímto dosáhneme úspory vláken i o ¼. Typ matrice, typ vláken, jejich obsah a orientaci volíme pro konkrétní použití daný způsob zatížení. Konstrukční díly z kompozitů musí být spolehlivé a proto je nutné teoretické výpočty mechanických vlastností ověřit experimentálně na dostatečném počtu vzorků. Při výpočtech je nutné zahrnout možné změny teploty, či cyklické namáhání. Vyztužené plasty mají velkou pohltivost energie, nedosahují však houževnatosti kovů. Důvody pro používání kompozitů jsou především ekonomické a to především ve speciálních oborech, jako je kosmonautika či letecký průmysl.

Hlavní přednosti vysokopevnostních kompozitů ve srovnání s kovovými materiály:

- Vysoká pevnost a tuhost při současné nízké měrné hmotnosti
- Velmi dobrá odolnost proti korozi
- Lepší dynamické vlastnosti
- Dobré tlumící vlastnosti
- Vysoká tvarová stálost
- Možnost výroby speciálně tvarovaných kusových výrobků

3. Matrice

Pod pojmem matrice se nerozumí samotné pojivo, ale materiál prosycený systémem vláken a dalších komponent. Tato problematika byla sledována v pracích [1], [3], [5], [6], [7], [8], [9]. Je to tvarově stálý výrobek. Základním úkolem matrice je zaručení geometrického tvaru, funkce pojiva výztuže, přenos sil a ochrana většinou křehkých vláken. Matrice tedy zjišťuje přenos namáhání na vlákna, převedení namáhání z vlákna na vlákno, geometrickou požadovanou polohu vláken a v neposlední řadě ochranu vláken před vlivy okolí.

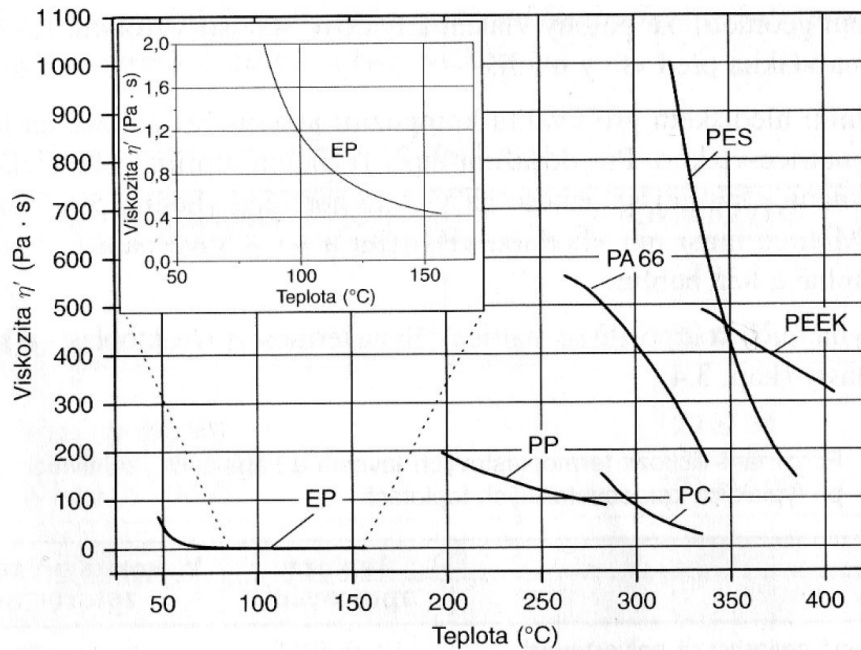
Hlavním hlediskem úspěchu k vytvoření kvalitního kompozitu je zajištění adheze na fázovém rozhraní matric-vlákno. Pro zvýšení této adheze a dosažení lepší fyzikální i chemické vazby na tomto rozhraní se na vlákna nanáší apretace. Velmi důležité je, aby matrice měla vhodnou viskozitu a povrchové napětí, tak aby vlákno ideálně smočila bez výskytu bublin.

Z praktického hlediska využíváme několik druhů matric. Patří zde kovové matrice, keramické a skleněné, silikátové matrice a polymerní matrice. Každá z těchto druhů má své specifické vlastnosti, své výhody ale také nevýhody. Největšího uplatnění a největšího užití se dostává polymerním matricím. Polymerní matrice mají nejdelší tradici.

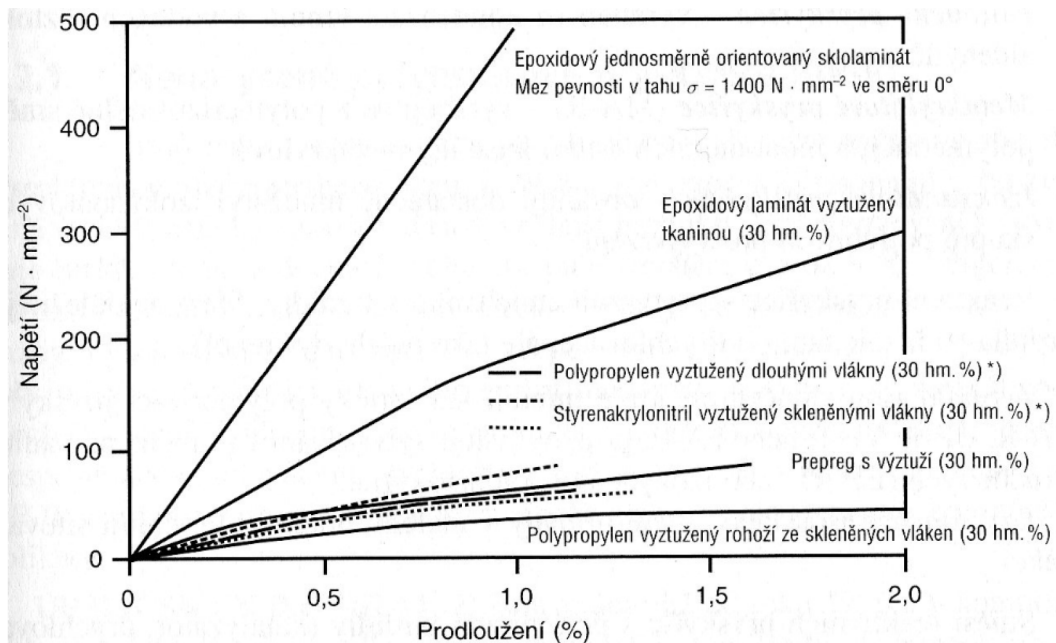
3.1. *Polymerní matrice*

U kompozitů tvořených polymerní matricí se matrice dělí na termosety (reaktoplasty) a termoplasty. Tato problematika byla sledována v pracích [1], [5], [6], [7], [8], [9], [11]. U reaktoplastických matric ne nejvíce využívají nenasycené polyestery (UP), vinylestery (VE) a epoxidy. Z termoplastů se pak nejvíce využívá polypropylen (PP), polyamidy (PA) či polyetylen (PE). Termosety i termoplasty mají své klady i zápory. Termosety se snadněji zpracovávají, lépe prosycují vlákna a snadněji se smáčejí. Je to dáno viskozitou, která je při lití o dva až tři řády nižší v případě termoplastů. Zpracovatelské teploty termoplastů jsou mnohem vyšší a jsou omezeny teplotou rozkladu. Nevýhodou termosetů je pak poměrně vysoká křehkost a nízká tažnost. Oproti tomu jsou termoplasty houževnaté. Kompozity tvořené reaktoplastickou matricí jsou v dnešní době nejrozšířenější. Snaha o ekologii a recyklovatelnost materiálů kompozitních dílů vede však k nahrazování

reaktoplastů termoplasty. A to především levnějšími typy termoplastů vyztuženými krátkými skleněnými či uhlíkovými vlákny.



Obrázek 2. Viskozity termosetů a termoplastů při prosycování vyztužujících vláken [2]



Obrázek 3. Diagram napětí – prodloužení vyztužených kompozitů s termosetickou a termoplastickou maticí [3]

3.1.1. Matrice tvořené termosety

Patří zde skupina reaktivních pryskyřic. Mezi nejdůležitější typy těchto reaktivních pryskyřic patří:

- Nenasycené polyestery (polyesterové pryskyřice) (UP-R)
- Vinylesterové pryskyřice (VE-R)
- Epoxidové pryskyřice (EP-R)
- Metakrylátové pryskyřice (MA-R)
- Formaldehydové pryskyřice (UF a MF)
- Izokyanátové pryskyřice

Nenasycené polyesterové pryskyřice

Jedná se o jednu z nejpoužívanějších pryskyřic a to díky nízké viskozitě, dobrému smáčení vláken a vysoké rychlosti vytvrzování v přijatelném cenovém měřítku. Tato problematika byla sledována v pracích [1], [6], [9]. Jsou to bezbarvé až slabě nažloutlé roztoky v reaktivních rozpouštědlech, které se vytvrzují za normální, či mírně zvýšené teploty. Při vytvrzování se dále uvolňuje reakční teplo a dochází k objemovému smrštění o 5 až 9%. Vlastnosti výsledné pryskyřice lze měnit pomocí různých přísad. Např. viskozita pryskyřice je z velké části závislá na obsahu styrenu, který se pohybuje v obsahu 30 až 50%. Mezi další důležité přísady a plniva patří křída, kaolin a hydroxid hlinitý. Tyto přísady snižují hořlavost pryskyřice, smrštění i součinitel tepelné délkové roztažnosti, zvyšují však viskozitu.

Nenasycené polyesterové pryskyřice se vyrábějí reakcí dikarbonových kyselin s glykoly. K vytvrzování dochází pak radikálovou kopolymerizací dvojných vazeb v pryskyřici a s dvojnými vazbami molekuly styrenu. Katalyzátorem (iniciátorem) této síťovací reakce jsou organické peroxidy a aktivátorem (urychlovačem) je obvykle naftalen kobaltnatý či aminový urychlovač. Přidávání iniciátoru a urychlovače je nutno přidávat odděleně! Nejprve se mísí urychlovač s pryskyřicí, až poté se přidává iniciátor. Pokud se dostane iniciátor a urychlovač do přímého kontaktu, může dojít až k výbušnému rozkladu.

Existuje mnoho druhů polyesterových pryskyřic s nejrůznějšími vlastnostmi. Mezi základní patří např. orthoftalová (nejnižší cena), izoftalová (dražší, ale kvalitnější), fumarová, chlorfalová a tereftalová. Mezi základní vlastnosti polyesterových pryskyřic patří výborná

cena, spolehlivost, velká variabilita při zpracování, možnosti obsahu jednotlivých složek – styrenu a katalyzátoru, velké smrštění při zpracování, dobrá odolnost proti povětrnosti a velké nároky na životní prostředí působením styrenu.

Tabulka 1. Vlastnosti jednotlivých druhů uvedených polyesterových pryskyřic[1]

Vlastnosti / Základní složky	η [mPa·s]	HDT/ T_g [°C]	σ_{Pt} [N·mm ⁻²]	E [N·mm ⁻²]	δ [%]	Použití
Kyselina ortoftalová, standardní glykoly	540 - 610	63/93	70	4300	2,0	Nízko až středně reaktivní, použitelná pro méně namáhané konstrukční prvky
	700 - 900	90/122	85	4400	2,4	Středně až vysoce reaktivní, sklon k vzniku trhlin; nádrže, potrubí
	240 - 290	108/130	80	3470	4,2	Vysoce reaktivní, nízkoviskozní, dobré prosycování při ruční laminaci a injektování
Dicyklopentadien	450 - 1000	70/-	66	3500	3,0	Dobré zesíťování, nízké prorážení výztuže; lodě
Kyselina tereftalová	540 - 610	125/-	60	3350	2,1	Vysoká tepelná odolnost; laminátové nádrže, potrubí
Kyselina maleinová, standardní glykoly	1150 - 1400	145/-	55	3400	1,7	Základní pryskyřice pro lisovací hmoty s malým smrštěním
Kyselina izoftalová, standardní glykoly	3000 - 3600	130/150	60	3700	1,8	Vysokoviskozní pryskyřice pro lisovací hmoty (SMC/BMC), odolné proti hydrolýze

η - viskozita, HDT – tvarová stálost za tepla, T_g - teplota skelného přechodu, σ_{Pt} - mez pevnosti v tahu, E – modul pružnosti v tahu, δ – tažnost.

Vinylesterové pryskyřice

Jedná se o nenasycené estery epoxidových pryskyřic. Tato problematika byla sledována v pracích [1], [6], [7], [9]. Esterové skupiny jsou umístěny až na konci řetězce, proto jsou VE chemicky odolnější a mají oproti UP výrazně vyšší houževnatost. Mimo jiné mají vyšší tepelnou odolnost, než UP. Díky těmto vlastnostem se vinylesterové pryskyřice používají v oblastech s vysokým korozním napadením, např. skladovací nádrže, potrubí, pračky, chladicí věže, chemicky odolné rošty atd. Vinylesterové pryskyřice mají velkou variabilitu při zpracování pomocí dávkování styrenu a urychlovače. Vyrábějí se většinou z bisfenolu.

Tabulka 2. Základní vlastnosti VE pryskyřic [6]

Vlastnosti / Základní složky	Nevytvrzená pryskyřice	Vytvrzená pryskyřice				Použití
	η [mPa·s]	HDT/ T_g [°C]	σ_{Pt} [N· mm ⁻²]	E [N· mm ⁻²]	δ [%]	
Bisfenol A - epoxid	440 - 500	105/130	95	3600	6,1	Středně reaktivní; nádrže, potrubí, sanace kanálů
	360 - 400	105/130	95	3600	6,1	Středně reaktivní, se sníženou emisí styrenu
	650 - 750	107/132	90	3800	3,9	Velmi dobré mech. Vlastnosti a chem. odolnost; prepregy na sanaci kanálů odpadních vod
	400 - 500	115/132	83	3500	4,2	Pryskyřice pro prepregy a lisovací hmoty s vysokou protikorozní chemickou odolností; části automobilů
Bisfenol A - uretan	400 - 500	125/-	85	3300	5 - 6	Vysoká chemická a tepelná odolnost, vhodná pro aramidová vlákna
Flexibilizovaný bisfenol A- uretan	210 – 280	140/150	90	3500	4,0	S velmi vysokou tepelnou a chemickou odolností při současně vysoké pružnosti
Epoxid novolak	1000	135/160	75	3400	2,6	S tepelnou a korozní odolností; nádrže, potrubí, komíny

η - viskozita, HDT – tvarová stálost za tepla, T_g - teplota skelného přechodu, σ_{Pt} - mez pevnosti v tahu, E – modul pružnosti v tahu, δ – tažnost.

Epoxidové pryskyřice

Epoxidové pryskyřice jsou za normální teploty kapalné až pevné látky, které mohou obsahovat přídavné pomocné látky. Tato problematika byla sledována v pracích [1], [9]. Epoxidové pryskyřice představují nejvšestrannější skupinu reaktoplasů pro konstrukční využití. Mají velké spektrum vlastností závislých na přidaných modifikacích. Mají dobrou houževnatost, odolnost proti únavě a tečení, výtečnou chemickou odolnost, dostatečnou tepelnou odolnost, vysokou rozměrovou stálost a vynikající přilnavost k podkladu, respektive k vláknům. Jsou navlhavé, takže za přítomnosti vody je nutno počítat s jejich sníženou tepelnou odolností. Epoxidové pryskyřice mají obecně vyšší viskozitu v nevytvrzeném stavu, než UP a VE.

Epoxidové pryskyřice je v poslední etapě opět nutno vytvrdit. Vlastnosti výsledných vytvrzených pryskyřic jsou ve velkém rozsahu ovlivněny širokou paletou tvrdidel, která jsou většinou přizpůsobeny pro dané speciální aplikace. Pro možnost zkrácení doby vytvrzení je možno použít urychlovače, obvykle BDMA.

Epoxidové pryskyřice mají v technickém směru široké uplatnění. Pro zpracování na vyztužené kompozity se tak používá necelých 10% z celkového objemu. Epoxidy jsou použitelné pro všechny technologie, nicméně jsou dražší než UP a VE a to 3 až 4x.

Dobrá adheze a nízké smrštění jsou dobrým předpokladem pro dobré hodnoty mechanických vlastností. Vzhledem k vysoké kvalitě se EP matrice nejčastěji používají pro drahé výztuže, např. jako uhlíkové kompozity při stavbě letadel. Pro zajištění přesné reprodukovatelnosti skladby laminátu se pro náročné aplikace používají většinou epoxidové prepregy.

Tabulka 3. Základní vlastnosti vybraných typů epoxidů [1]

Vlastnosti / Základní složky	Nevytvrzená pryskyřice	Vytvrzená pryskyřice				Poznámky
	η [mPa·s]	HDT/T _g [°C]	σ_{Pt} [N·mm ⁻²]	E [N·mm ⁻²]	δ [%]	
1) Roztok bromované EP-R	2100 - 2900	135/140	-	-	-	F4R produkt pro prepregy a lamináty; desky pro tištěné spoje
2) Bisfenol A EP-R s formulovaným aminovým tvrdidlem	5200 - 6000	185/195	110 - 120	2800	5,5 – 6,5	Systém s dobrou odolností proti hydrolýze
3) Cykloalifatická pryskyřice s anhydridovým tvrdidlem	150 - 250	188/193	48 - 65	3050	1,8 – 2,5	Nízkoviskozní systém s vysokou tepelnou odolností
4) Bisfenol A EP-R a anhydridovým tvrdidlem	600 - 900	145/153	80 - 90	3200	5,0 – 7,0	Standardní systém vytvrzovaný anhydridem
5) Formulovaná EP-R pryskyřice s cykloalifatickým aminovým tvrdidlem	500 - 700	143/148	71 - 77	2600	4,5 – 5,5	Zpracovatelná technologií RTM pro navíjení, lisování
6) Houževnatá	720 – 860	100/110	120 - 130	2800	9,0 –	Dobré mechanické vlastnosti a

modifikovaná EP-R s aminovým tvrdidlem					12	tažnost
7) Formulovaná EP-R s aminovým tvrdidlem	320 - 380	90/105	125 - 130	2900	7,0 – 12	Nízkoviskozní flexibilní systém pro průmyslové aplikace
8) Tetrafunkční EP-R vytvrzovaná aromatickým polyamidem	7000 - 19000	236	90	3400	2,0 – 3,0	Vícefunkční vysokopevnostní pryskyřice; pro formulování prepregů
9) Dvousložkový systém na bázi bismaleinimidu	800 - 1000	290/300	176	3400	5,0 – 8,0	Systém s vysokou tepelnou odolností
10) Monomer kyanáteteru	100	240/260	162	2900	3,0 – 4,0	Aplikace v leteckém průmyslu

η - viskozita, HDT – tvarová stálost za tepla, T_g - teplota skelného přechodu, σ_{Pt} - mez pevnosti v tahu, E – modul pružnosti v tahu, δ – tažnost.

Fenolické pryskyřice

Jedná se o reaktivní pryskyřice vyráběné kondenzací fenolů a vodných roztoků aldehydů. Tato problematika byla sledována v pracích [1], [6], [9]. Díky různým poměrům fenolu a aldehydu, či více druhů fenolických surovin můžeme vyrobit různé modifikace fenolických pryskyřic lišících se svými vlastnostmi. Při molárním poměru fenol/formaldehyd s přebytkem formaldehydu vznikají rezoly, při nedostatku vznikají novolaky. Pro výrobu laminátů se používají pouze novolakové pryskyřice. Hlavní oblastí používání prepregů s novolakovými fenolickými pryskyřicemi byl pouze letecký průmysl. Nyní se díky svým vlastnostem z bezpečnostních důvodů používají v konstrukci osobních železničních vagónů a pro vozy metra.

Fenolické pryskyřice mají dobrou rozměrovou stálost i za zvýšených teplot, jsou vysoce tepelně a chemicky odolné, mají příznivé chování při požáru a při zachování vysoké zbytkové pevnosti.

Formaldehydové pryskyřice

Jedná se o reaktoplastické pryskyřice vyráběné polykondenzací. Tato problematika byla sledována v pracích [1], [6], [9]. Jsou vhodné pro lisování, technologie RTM a injekční

vstřikování. Dobře odolávají tukům, esterům olejů, alkoholům, petroleji, acetonu a slabým kyselinám a zásadám. Jsou odolné proti poškrábání. Mají dobrou vazbu k vláknům obsahujícím celulózu. Proto se používají k tvorbě kompozitů vyztužených přírodními vlákny. Vzniklé kompozity jsou ohebné a pružné a dobře odolávají únavě.

3.1.2. Matrice tvořené termoplasty

Jak již bylo řečeno v kapitole 2.1, mají termoplasty vůči termosetům jisté výhody, ale i jisté nevýhody. Tato problematika byla sledována v pracích [1], [2], [3], [5], [6], [7], [8], [9]. Termoplasty jsou za normální teploty pevné látky, dostatečně tekutými pro zpracování na kompozity se stávají až od teploty 200°C. Rozpouštědla pro snížení viskozity se u termoplastů nepoužívají. Termoplasty se od termosetů liší svými zpracovatelskými i užitnými vlastnostmi. Pro široké škály obou oblastí je jejich vzájemné porovnání poměrně komplikované a velmi obtížné. Stručné rozdíly mezi vyztuženými termoplasty a termosety jsou však uvedeny v tabulce 4.

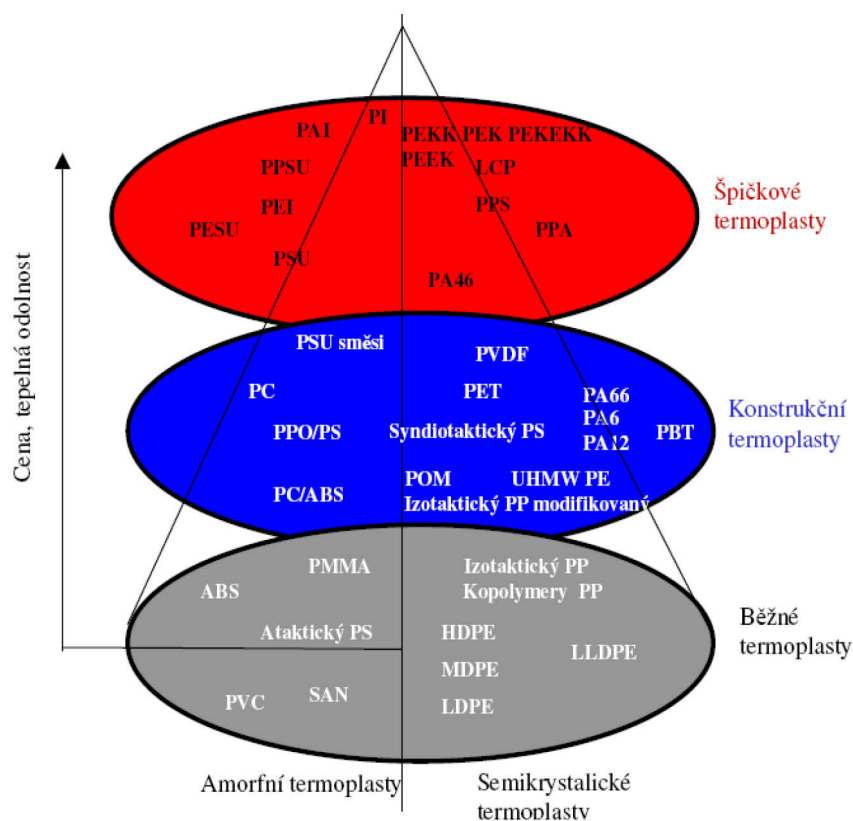
Tabulka 4. Rozdíly mezi vyztuženými termoplasty a termosety [3]

	Termoplasty	Termosety
Matrice	Polymerová, vysokoviskozní tavenina, špatně se spojuje lepením	Nevytvrzená, nízkoviskozní, dobře se spojuje lepením a opatřuje nátěrem
Cena matrice	Nízká, ale i vysoká	Nízká
Předimpregnace	Obtížné smáčení a prosycování	Snadné
Cena předimpregnace	Vysoká	Nízká
Skladování	Neomezeně skladovatelné	Omezená skladovatelnost, reakce pomalu pokračuje
Polotovar	Termoplasty vyztužené skleněnou rohoží (GMT) pásy	Lisovací hmoty SMC (prepregy)
Přímé zpracování	Granulát přímo zpracovatelný dlouhovláknitý polotovar	Výztuž a reaktivní pryskyřice
Teplota při zpracování	Teplota taveniny	Teplota okolí
Tvarování	Vhodné pro velké série	Nevhodné
Ruční kladení	Nevhodné	Vhodné pro velkoplošné díly
Kladení pásů	Vysoká automatizace, malá lepidivost, svařování	Vysoká automatizace, dobrá lepidivost, citlivé vytvrzování

Teplota nástroje při lisování	Teplota taveniny 150 – 180°C	Reakční teplota 140 – 160°C
Lisovací tlak	30 až 300 N · mm ⁻²	20 až 50 N · mm ⁻²
Plocha povrchu	Přiměřená, svařitelná	Dobrá, tvrdá; lze ji lepit a natírat
Mechanické chování	Houževnaté, sklon ke krípu	Dynamicky zatížitelné, křehký lom
Chování za tepla	Výrazné změknutí při T _g	Méně závislé na teplotě
Stárnutí	Málo odolné až odolné	Velmi odolné
Možnost opravy	Omezená	Dobrá

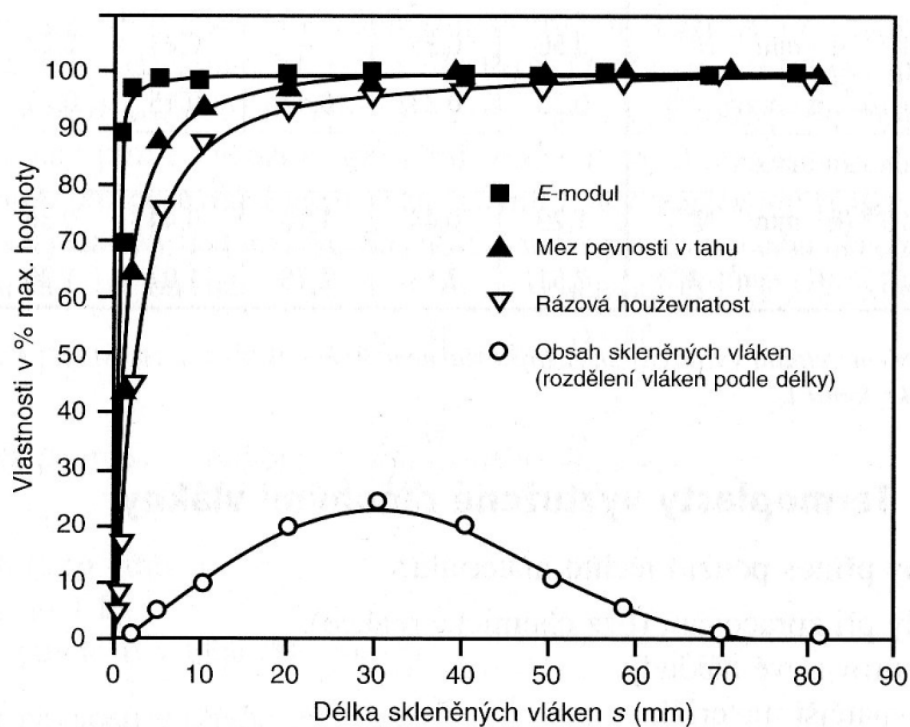
Vysokopevnostní a špičkové termoplastové kompozity

Špičkové termoplasty jako jsou např. polyamidoimid, polyamidy, polyaryetherketony, polyethersulfon, polyetherimididy či polysulfon mají vynikající tepelnou odolnost a jsou nehořlavé. Tato problematika byla sledována v pracích [1], [9]. Tyto termoplasty jsou uvedeny na obrázku 4., kde jsou umístěny v nejnávšně postaveném oválu.

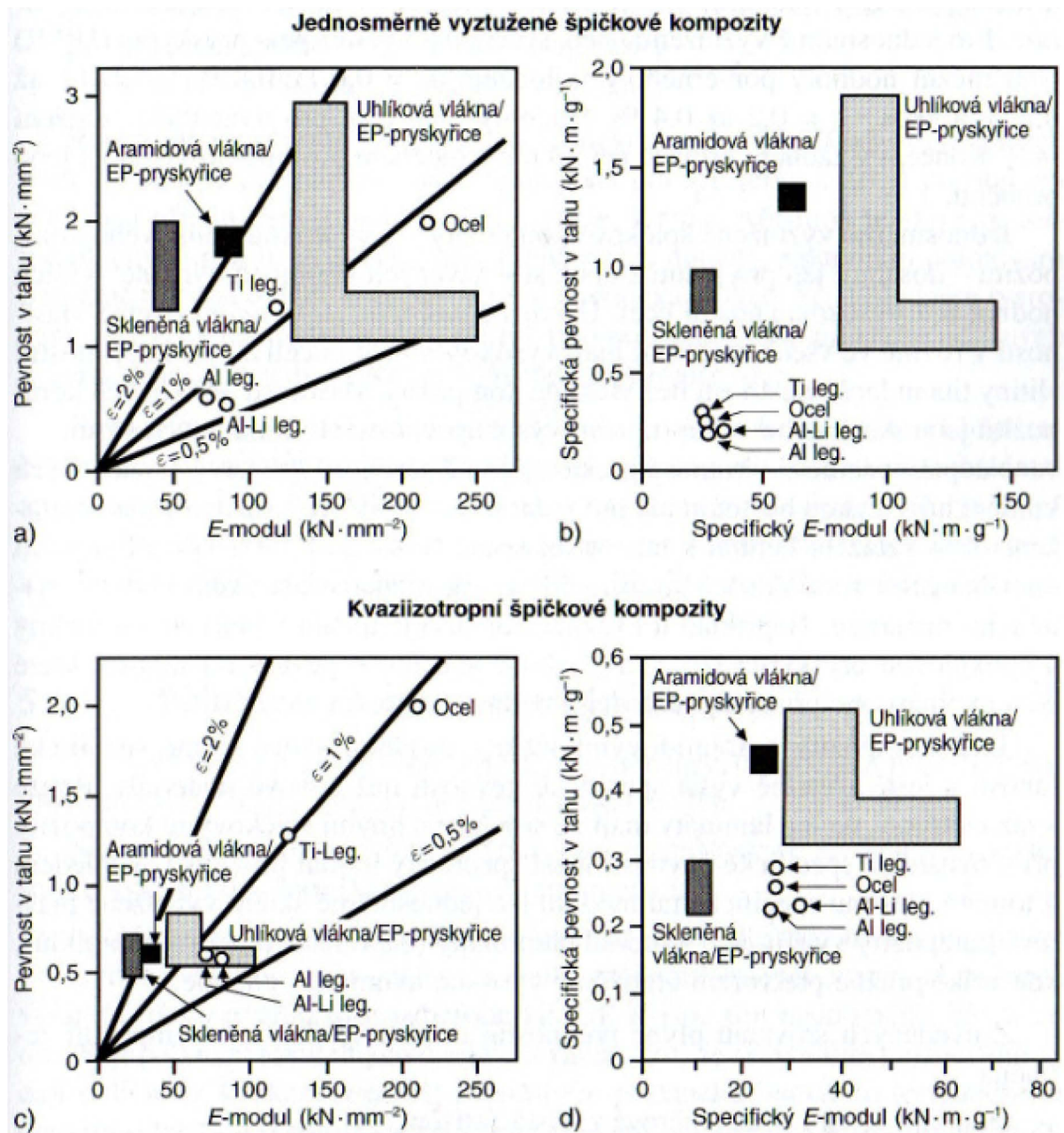


Obrázek 4. Výřez termoplastických matric podle kritéria cena – kvalita [9]

Vysokopevnostní termoplastové kompozity obsahují i 80% vyztužujících vláken. Jsou zpracovávány buď z plošných polotovarů, vyztužených obtížně tvarovatelnou tkaninou, či rohoží s dobrou stékavostí. Výhodné je pak použití dlouhých vláken (až 25mm), kde se dosahuje velmi dobrého vyztužujícího účinku. Většinou se u těchto termoplastických kompozitů používá polypropylen (PP), který se dále vyztužuje prošivanými skleněnými rohožemi, kompozit se pak označuje GMT. Dále se pak nejčastěji vyztužuje dlouhými vlákny, skleněnými či uhlíkovými, výsledný kompozit označujeme LFT. Vliv délky skleněných vláken na mechanické vlastnosti termoplastických kompozitů je pak uveden na následujícím obrázku.



Obrázek 5. Vliv délky skleněných vláken na mechanické vlastnosti termoplastických kompozitů [3]



Obrázek 6. Porovnání vlastností špičkových kompozitů v absolutních (a, c) a specifických (b, d) hodnotách s vysokopevnostními kovy [7]

4. Vyztužující vlákna

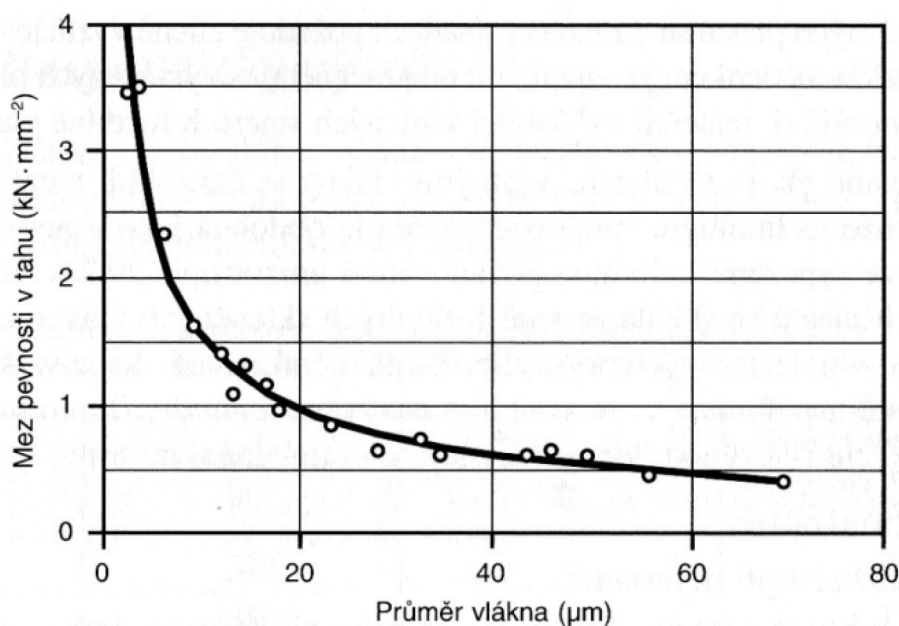
Taktéž, jak tomu bylo v případě matric, i vláken je spousta druhů. Tato problematika byla sledována v pracích [1], [5], [6], [7], [8], [9]. Vlákna můžeme klasifikovat podle jejich původu na organická a anorganická. Do skupiny organických vláken patří například bavlna, vlna, hedvábí, atd. Do skupiny anorganických řadíme pak vlákna skelná, keramická a uhlíková, čedičová, borová atd.

V této práci budeme věnovat pozornost vláknům, která nalézají nejširší uplatnění a vykazují nejlepší mechanické vlastnosti. Jedná se o vlákna uhlíková, skleněná, aramidová a polymerní.

Funkcí vláken v kompozitu je jeho celkové vyztužení. Vyztužením se rozumí zvýšení pevnosti a tuhosti, které vznikne uložením vláken do matrice, přičemž musí být splněny tyto základní podmínky:

- Vyztužující vlákna musí být pevnější, než matrice
- Vyztužující vlákna musí mít vyšší tuhost, než je tuhost matrice
- Matrice se nesmí porušit dříve než vlákno

Průměr vláken je od 1 až 10^2 μm . Kompozitům tvořeným takovýmto typem vláken říkáme mikrokompozity. Některé kompozity obsahují však vlákna o průměru pod $1\mu\text{m}$. Takovýmto kompozitům říkáme nanokompozity. Pevnost samotných vláken je pak vyšší než pevnost materiálu v kompaktní formě. Jedná o paradox vláknité struktury. Čím je vlákno tenčí, tím je jeho pevnost vyšší. Je to dáno minimalizací vrozených vad materiálu a také nebezpečnost povrchových vad je při malých příčných rozměrech menší.



Obrázek 7. Vliv průměru skleněného vlákna na jeho pevnost [5]

4.1. Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna považují za nejprogressivnější typ vláken, protože mají nejširší spektrum mechanických vlastností při poměrně malé hustotě. Tato problematika byla sledována v pracích [1], [6], [9], [11]. Proto se uhlíkovým vláknům budeme věnovat nejvíce. Uhlík, jakožto prvek představuje ohromné množství různých modifikací a tím tak obrovský potenciál pro různé extrémně namáhané aplikační oblasti. Uhlík známe ve formě grafitu, diamantu, fullerenů, nanoturbulární uhlík, pyrolytický uhlík, aktivní uhlík a pak ve formě námi zkoumaných uhlíkových vláken.

Uhlíková vlákna se začala vyrábět v padesátých a šedesátých letech 20. století zejména pro letecký průmysl. Výroba začala v USA, kde se vlákna vyráběla z viskózní tkaniny a v Japonsku, kde se vyráběla z ropné smoly.

Skleněná vlákna jsou na trhu stále dominantní, ale uhlíková vlákna je pomalu začínají vytlačovat. Důvody jsou následující:

- Uhlíková vlákna mají velmi dobré vlastnosti, které jsou pořád zlepšovány.
- Dochází k postupnému snižování nákladů na výrobní proces.

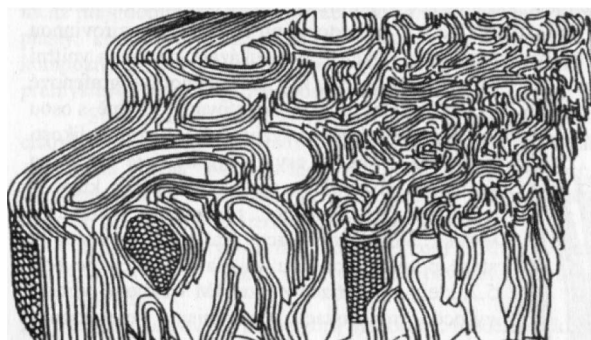
Struktura uhlíkových vláken je většinou turbostratická. V současnosti se mohou uhlíková vlákna rozdělovat do tří kategorií, a to podle použitého prekurzoru.

- a) Vlákna z polyakrylonitrilového prekurzoru (PAN)
 - Zaujímají největší objem, tj. nejběžnější
 - Mají vysokou pevnost v tahu a nízké náklady
- b) Vlákna z dehtového prekurzoru
 - Levné ale se špatnými mechanickými vlastnostmi (isotropní smolná vlákna)
 - Dražší s vysokou pružností v tahu (mezifázová dehtová vlákna)
- c) Vlákna z hedvábného prekurzoru
 - Nejsou tak pevná jako vlákna z PAN
 - Použitelná pro izolaci a kompozity uhlík-uhlík
- d) Vlákna z novoloidového prekurzoru
 - Nejnovější typ vláken

Postup výroby uhlíkového vlákna z PAN se rozděluje do tří etap. První etapa je etapou stabilizace, kde se při teplotách $200 - 300^{\circ}\text{C}$ vlákno stabilizuje. Druhá etapa je etapa karbonizace. Při této etapě je teplota $1000 - 1500^{\circ}\text{C}$ a vlákno dosahuje maximální pevnosti v tahu. Poslední etapa je etapa grafitizace. Tato etapa probíhá při vysokých teplotách $1800 - 3000^{\circ}\text{C}$ a dochází v ní ke zvýšení obsahu uhlíku a vznikají dokonalejší mikrokrystaly.

Uhlíková vlákna je také možno dělit je podle mechanických vlastností, kde se dělí vlákna do tří typů:

Typ I – HM vlákna (Highmodulus) – vysoko modulová vlákna. Youngův modul pružnosti v tahu E dosahuje hodnot až 965GPa (Thornel K-1100, Cytec Engineered Materials).

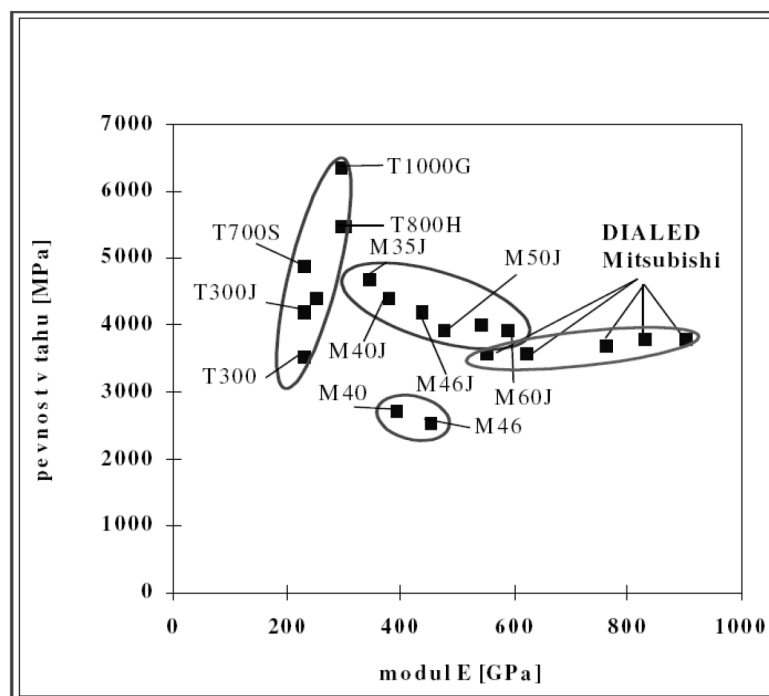


Obrázek 8. Schématický trojrozměrný model vnitřní struktury C-vlákna I. Typu[11]

Typ II –HS (HighStrength) – vysoce pevná vlákna. Tento typ vláken je charakteristický tím, že orientace grafenových vrstev podle osy vlákna je horší, jde spíše o náhodné uspořádání. Tento typ vláken dosahuje pevnosti v tahu až 7000MPa . [11]

Typ III – IM vlákna (InterMediate) – vlákna jejíž mechanické vlastnosti leží mezi *HM* a *HS* [11].

Uhlíková vlákna jsou silně anizotropní, což znamená, že mají zcela odlišné vlastnosti ve směru vláken a ve směru kolmém k vláknům. Uhlíková vlákna jsou dále křehká, mají záporný koeficient teplotní délkové roztažnosti α , tj. při ohřevu se vlákno zkracuje, uhlíková vlákna mají malý elektrický odpor. Rozsah vlastností jednotlivých moderních uhlíkových vláken je znázorněn na obrázku 9.



Obrázek 9. Rozsah vlastností jednotlivých moderních uhlíkových vláken[9]

Tabulka 5. Vlastnosti některých uhlíkových vláken z PAN při teplotě 20°C [9]

	T300	M40J	T800H	T1000G	M60J
Průměr [μm]	7-8	7	5-6	5	4
Hustota [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$]	1,76	1,77	1,81	1,8	1,92
Modul E [GPa]	230	377	294	294	588
Pevnost v tahu [GPa]	3,53	4,41	5,49	5,3-6,8	4,21
Prodloužení při přetržení [%]	1,5	1,2	1,9	2,0-2,5	0,7
Součinitel délkové tepelné roztažnosti [$10^{-6} 1/K$]	-0,7 10	-0,5 7			
Tepelná vodivost [W/mK]	8,5	70	7		
Obsah uhlíku [%]	92-97	99	92-97	96	96

Před samotnou aplikací uhlíkových vláken do kompozitu je nutná úprava povrchu. Účelem je odstranit z povrchu vláken látky bránící kontaktu s matricí, omezit další adsorpci plynů na povrch, zvýšit reaktivitu povrchu vůči vazebným povinnostem k matrici a chránit vlákna před vzájemnou abrazí.

4.2. Skleněná vlákna

Skleněná vlákna mají silikátový základ (SiO_2). Tato problematika byla sledována v pracích [1], [5], [6], [9]. Vyrábějí se tažením taveniny směsi oxidů, kde se žádaného průměru dosahuje dloužením proudu skla vytékajícího tryskami ze dna zvláknovací hlavy. Výsledný průměr vláken je dán rozdílem mezi rychlostí vytékání skloviny z trysek a rychlostí odtahování. V kompozitních materiálech se nejčastěji používají vlákna ze skloviny *E*, *S*, *C*, *ACR* či křemenná vlákna. Skleněná vlákna jsou izotropní.

Skleněná vlákna z *E* skloviny – jsou nejlevnější a přitom mají dobré mechanické a elektrické vlastnosti.

Vlákna z *S* skloviny – jsou dražší z důvodu větší pevnosti a většího modulu pružnosti v tahu. Většinou se používají v kompozitech s epoxidovou matricí, jsou však kompatibilní i s řadou termoplastů.

Vlákna z C skloviny – méně pevná a jejich mechanické vlastnosti rychle klesají s rostoucí teplotou

Křemenná vlákna – dobré tepelné izolanty, dobrá tepelná odolnost, menší koeficient délkové roztažnosti

Tabulka 6. Vlastnosti vybraných druhů skelných vláken vyráběných z výše uvedených sklovin [9]

	Sklo E	Sklo E (Saint-Gobain Vertex, a.s.)	Sklo S	Sklo C	Sklo ACR	Křemenné sklo
Průměr [μm]	9-13	5-16	9-13	9-13		8,9
Hustota [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$]	2,54	2,54	2,49	2,49	2,7	2,19
Modul E [GPa]	72,4	73	85,5	69	75	69
Pevnost v tahu [GPa]	Až 3,45	2-4	Až 4,6	Až 3	1,7	3,45
Prodloužení při přetržení [%]	4,8	1,8-3,2	5,7	4,8		5
Součinitel délkové tepelné roztažnosti [$10^{-6} 1/K$]	5	4,9	5,6	7,2		
Tepelná vodivost [W/mK]	1	1	1	1		
Teplota měknutí [°C]	800	800	970	750		980

Nejběžnější používané průměry skelných vláken jsou od 7 do 15 μm . Je možno vyrobit i vlákna s menším průměrem, která mají lepší pevnosti v tahu, nicméně z technologických důvodů se nevyrábějí.

Po celém výrobním cyklu a ochlazení se každé jednotlivé vlákno musí pokrýt ochranným povlakem. K těmto účelům se používají lubrikační látky (vosk, olej, škrob, želatina), nebo vazebné prostředky s dobrou afinitou ke skleněným vláknům i matrici. Povlaky se na skleněná vlákna nanášejí z důvodu zamezení vzájemné abraze a snížení tak pevnosti, a dále ke snížení adsorbovaného podílu vody.

4.3. Aramidová vlákna

Jedná se o polymerní vlákna vyráběná z aromatických polyamidů, známá především pod názvem *kevlar*. Tato problematika byla sledována v pracích [1], [5], [6], [9]. Tyto vlákna jsou dražší než vlákna skleněná. Jejich hlavní výhodou je malá hustota ($\rho = 1440 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$), velká odolnost proti abrazi a schopnost plastické deformace při zatížení kolmém na osu vláken.

Taktéž, jak tomu bylo u uhlíkových i skleněných vláken se aramidová vlákna musí povrchově ošetřit. Odolnost proti abrazi mají dobrou, nicméně ošetření je nutné ke zvýšení mezifázové adheze.

Tabulka 7. Mechanické vlastnosti vybraných aramidových vláken [6]

	Pevnost v tahu [MPa]	Modul E [GPa]	Prodloužení [%]	Hustota [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$]
HM-50	3100	80	4,2	1,39
Kevlar 29	3600	80	4,0	1,44
Kevlar 49	3600	130	2,5	1,44
Kevlar 149	3400	146	2	1,47
Twaron 900	2800	65	4,3	1,44
Twaron 930	3000	125	2	1,45
Nomex	700	17,3	22,6	1,4
PA66	900	5	13,5	1,14

5. Technologie výroby polymerních kompozitů

V dnešní době máme velké množství různých výrobních postupů přípravy kompozitních dílů. Tato problematika byla sledována v pracích [1], [6], [7], [8], [9], [13]. Jednotlivé postupy se od sebe liší mnoha faktory v závislosti na funkci konečného výrobku. Základní dělení všech technologií je pak možné provést podle formy. Jedná se o otevřenou a uzavřenou formu.

Zpracování vláken a pryskyřic na výrobky zahrnuje přípravu pryskyřičných hmot, prosycení vyztužujících vláken, tvarování vláken s následným vytvrzením a případným dodatečným opracováním vytvrzeného výrobku. Použité pracovní postupy jsou rozmanité a lze je rozdělit na následující postupy:

- Manuální (ruční)
- Částečně automatizované
- Zcela automatizované
- Kontinuální
- zvláštní

5.1. Výroba prepregů

Pro výrobu špičkových kompozitů, a dílů formou lisování, nebo v autoklávu se nejčastěji používá předimpregnovaná výztuž, tzv. prepreg (preimpregnated fibers). Tato problematika byla sledována v pracích [1], [6], [7], [9], [13]. Používání prepregů má tu výhodu, že je oddělen složitý proces prosycování výztuže pojivem od dalšího zpracování. Tento postup má velký vliv na výslednou kvalitu a vlastnosti budoucího výrobku. Provádí se na speciálním zařízení za kontrolovaných a reprodukovatelných podmínek. Prepreg je tedy polotovar, který je určen k dalšímu zpracování na konečný výrobek. Prepregy s reaktivním termosetickým pojivem se musí až do doby dalšího zpracování skladovat při teplotách -20°C . Doba jejich skladovatelnosti je i tak omezena na 6 měsíců. Zhruba 6 hodin před zpracováním prepregu se prepreg rozmrazí, pokud možno bez přístupu vzduchu z důvodu vysrážení

vzdušné vlhkosti na povrchu, a připraví se z něj potřebné přířezy pro laminaci. Hotové výrobky se následně vytvrzují buď v autoklávu, nebo metodou lisování ve vakuu.

5.2. Ruční kladení za mokra, kontaktní laminování

Jedná se o nejjednodušší pracovní postup a metodou ručního kladení výztuže na otevřenou formu lze vyrobit i velmi rozměrné výrobky. Tato problematika byla sledována v pracích [1], [9], [13]. Tato technologie je náročná na odborné kvalifikaci pracovníků. Při výrobě je výztuž v podobě tkaniny, nebo rohože, pryskyřice musí téci. Prosyčování výztuže tekutou pryskyřicí se provádí ručně pomocí štětce či válečku.

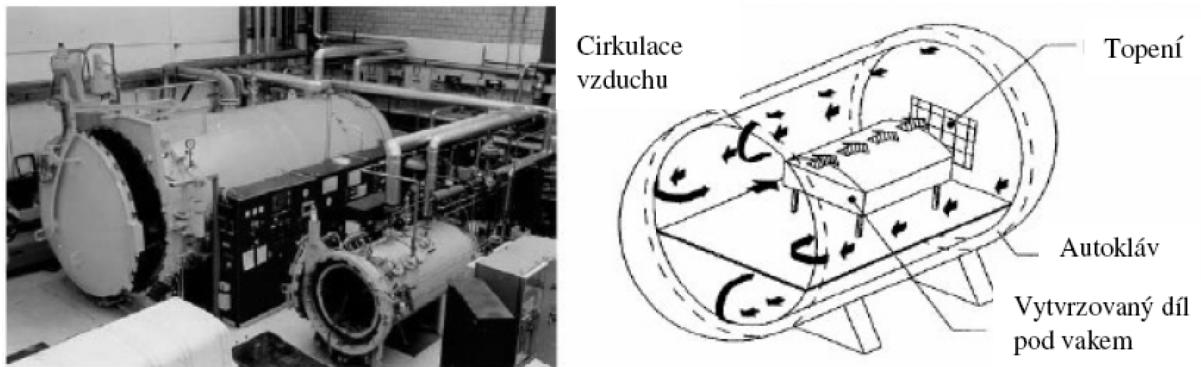
Vyrobené díly se nejčastěji vytvrzují za pokojové teploty a dotvrzují za zvýšené teploty na 80°C. Při ručním kladení za mokra nesmí teplota okolí klesnout pod 15°C. Proces a dobu vytvrzování lze měnit použitím urychlovače.

5.2.1. Ruční kladení prepregů, vytvrzování v autoklávu

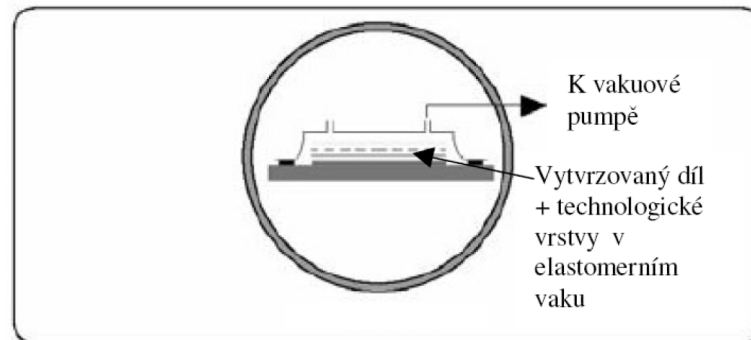
Jde o technologii výhodnou pro kusovou výrobu mechanicky namáhaných kompozitních dílů. Tato problematika byla sledována v pracích [1], [5], [6], [9], [13]. Postup je následující. Do otevřené formy je nejprve vložena odtrhová vrstva tvořená z tkaniny, vláken a separátoru, která má za úkol chránit povrch kompozitu před znečištěním, zabraňuje proražení výztuže na povrch výrobku a může být využita k barevné úpravě povrchu. Následně jsou do formy podle zvolené skladby laminátu pokládány orientované nařezané prepregy. Pro zvýšení lepivosti prepregů je možno použít horký vzduch. Po položení potřebného počtu vrstev prepregů je na vrchní vrstvu opět položena odtrhová vrstva. Po takto připraveném polotovaru je forma vložena do tlakové nádoby, tzv. autoklávu, kde je provedeno vakuování dílu. Dochází k odsátí vzduchu a jednotlivé vrstvy k sobě přitlačuje atmosférický tlak. Konečným stádiem je ohřátí autoklávu na požadovanou teplotu pro vytvrzení pryskyřice (120 – 200°C). Doba působení teploty a přetlaku se volí podle rychlosti vytvrzování pryskyřice. Chladnutí dílu musí být pomalé z důvodu relaxace vnitřních pnutí v laminátu, které je dáno rozdílnou tepelnou roztažností mezi maticí a vlákny.

Zvýšenou pozornost je nutné věnovat při výrobě dílů vyšších tloušťek. Při větší tloušťce laminátu může dojít v důsledku exotermické reakce, která nastává při vytvrzování pryskyřice, k přehřátí středních vrstev laminátu a poklesu jejich mechanických vlastností.

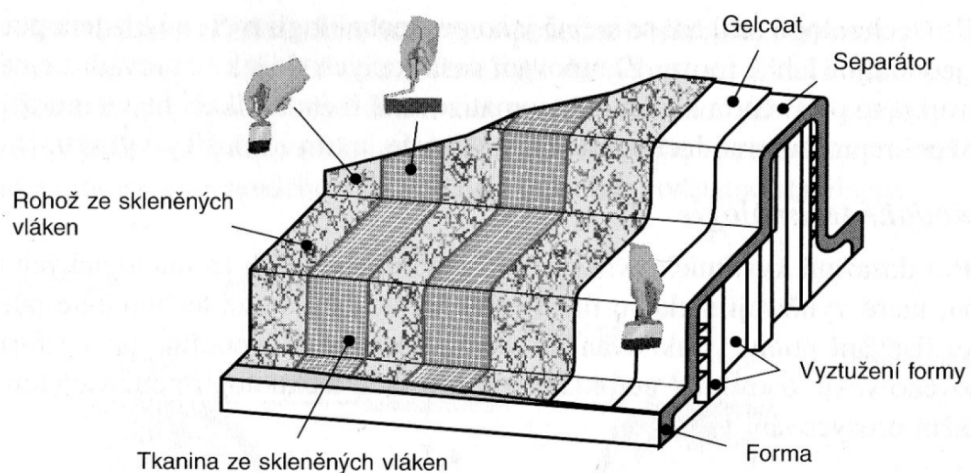
Autokláv a jeho funkce jsou ukázány na následujícím obrázku:



Obrázek 10. Autokláv a oběh vzduchu v autoklávu[9]



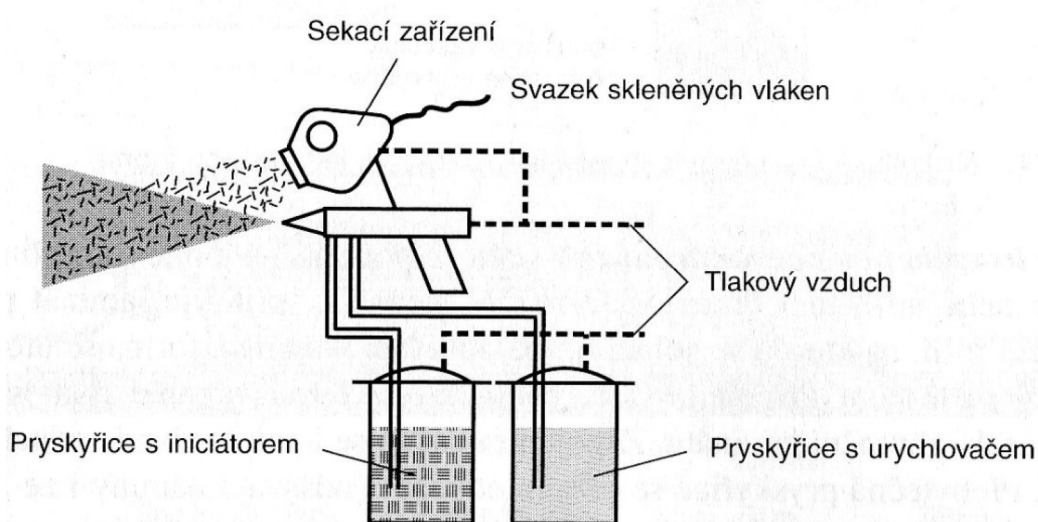
Obrázek 11. Schéma autoklávu[5]



Obrázek 12. Postup ručního kladení[1]

5.3. Částečně automatizované výrobní postupy

Tyto výrobní postupy zahrnují stříkání laminátů částečně mechanizovanou formou ručního kladení. Tato problematika byla sledována v pracích [1], [5], [6], [7], [8], [9]. Tato technologie je opět vhodná pro malé série a velké díly. Pryskyřice a výztuž se nanášejí pomocí stříkacího zařízení na povrch formy. Zařízení se skládá ze dvou nádrží, kde jedna obsahuje směs pryskyřice a iniciátoru, druhá směs pryskyřice a urychlovače. Vlákna se vedou přes sekací zařízení, kde jsou sekaná na délku 20 až 50mm a pomocí tlakového vzduchu se uvedené tři složky stříkají tryskami na povrch formy.



Obrázek 13. Schéma stříkacího zařízení [7]

Po provedení potřebného počtu vrstev nástříků následuje lisování. Lisování se provádí za nízkých tlaků a to několika technologiemi.

- Lisování pomocí vakuového vaku – podobně jako u ručního kladení se používá jednodílná forma, která se vakuuje a působením atmosférického tlaku se výrobek lisuje.
- Lisování pomocí tlakového vaku – obrácená varianta předchozí technologie. Negativní forma je uzavřena krytem tak, aby se dosáhlo rovnoměrného přetlaku.
- Lisování v autoklávu – spojení vakuového a tlakového vaku. Autokláv je vyhřívaná tlaková nádoba, kde je možné přesné řízení teplotních, tlakových a vakuových cyklů.

Díky tomu se dosahuje v autoklávech vysoce kvalitních výlisků. Vytvrzovací teplota se pohybuje kolem 180°C , lisovací tlaky leží mezi 2 a 25 bary, použitý podtlak je $2 \cdot 10^{-3}$ bar.

5.4. Plně automatizované výrobní postupy

Při plně automatizované výrobě jsou ihned po vytvrzení konečným produktem hotové výlisky. Tato problematika byla sledována v pracích [1], [9]. Dodatečné opracování výlisků částečně, nebo zcela odpadá. Tato technologie je vhodná pro velkosériovou výrobu, kde je nutno použít ocelové formy a kde jsou vysoké základní investice na lisy. Při této technologii je možné lisování provádět za tepla, za studena, či tzv. mokré lisování.

5.4.1. Strojní kladení prepregů, lisování za tepla

Jde o technologii s použitím kladečního stroje. Tato problematika byla sledována v pracích [1], [7], [8], [9]. Kladeční stroje jsou plně automatické a jsou řízeny počítačem. Jsou vybaveny kladeční hlavou, která se pohybuje nad otevřenou formou a má dostatečný počet stupňů volnosti. Kladeční hlava sejme separační fólii, prepreg předeheje a kladkou jej přitiskne k předchozím vrstvám. Tloušťky vyráběných dílů mohou být značné. Proces strojního kladení je velice rychlý a vylučuje selhání člověka.

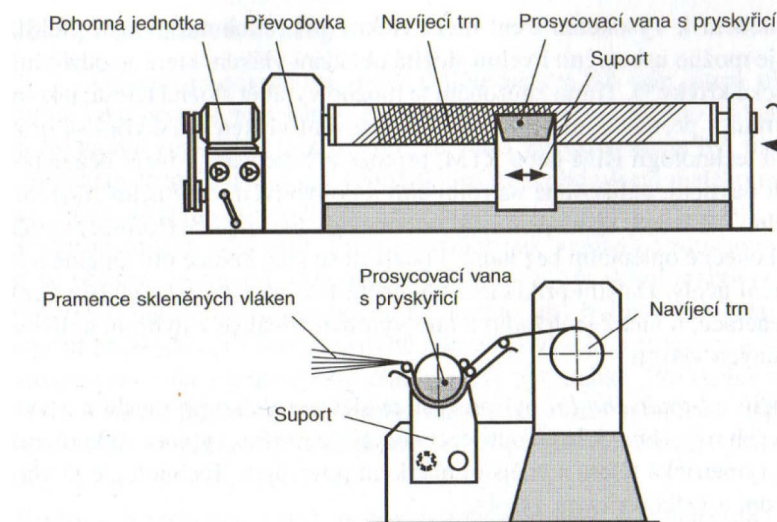
Lisování se provádí výhradně za tepla, kde se používají hydraulické lisy a ocelové formy. V současnosti se využívají plně automatické lisy, které nepotřebují žádnou obsluhu pro zakládání surovin ani pro vyjímání výlisků.

5.5. Kontinuální postupy

Jako kontinuální laminace se označuje výroba plochých, příčně, nebo podélně zvlněných nekonečných pásů s konstantním průřezem. Tato problematika byla sledována v pracích [1], [7], [8], [9]. Na nosnou fólii se nanáší výztuž, která se prosycuje pryskyřicí a následně se pokrývá další fólií. Následuje průchod tvarovacím zařízením a vytvrzovacím tunelem kde se pás odtahuje a navíjí. Orientace vláken závisí na technologii, nicméně převážná orientace je rovnoběžná s podélnou osou profilu.

5.6. Speciální technologie

Mezi speciální technologie se řadí technologie navíjení, kterou se vyrábějí dutá tělesa symetrická k ose otáčení. Tato problematika byla sledována v pracích [1], [7], [8], [9]. Jedná se např. o roury, nádrže či tlakové zásobníky. Je to mechanizovaná tvářecí technologie s vysokou přesností. Při procesu navíjení se vzájemně spojují rotační pohyb trnu s dopředným a zpětným pohybem suportu. Trny jsou vyráběny s mírným úkosem a to z jednoduchého důvodu, důvodu snadnějšího snímání těles. "



Obrázek 14. Navíjení na principu soustruhu [7]

Další technologii, kterou řadíme mezi speciální, je technologie oplétání. Jedná se o značně náročnou technologii vyžadující vysoké investiční náklady. Vyztužující vlákna z posuvného oplétacího zařízení se pokládají pomocí rotující hlavy na nepohyblivé jádro. Tímto způsobem je možno vyrábět i složitá tělesa, jako jsou kolena rour s proměnným průřezem.

Poslední speciální technologií je odstředivé lití. Touto technologií je možno vyrábět velkorozměrová rotačně symetrická tělesa. Tato metoda slouží pak především k výrobě rour pro dopravu agresivních médií.

6. Využití prepregů

Jak již bylo zmíněno v kapitole 4.1, prepregy jsou polotovary k výrobě vláknových kompozitů. Tato problematika byla sledována v pracích [6], [7]. Jejich hlavní složkou je výztuž předimpregnovaná částečně vytvrzenými pryskyřicemi. Slovo prepreg je zkrácený tvar anglického *preimpregnated fibers*, česky tedy *předimpregnovaná vlákna*.

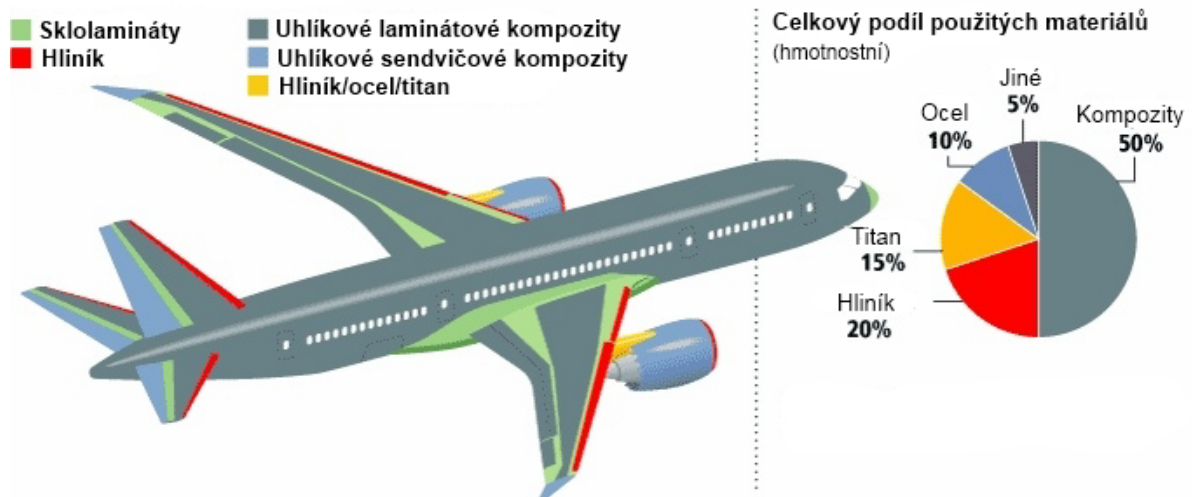
Prepreg jakožto polotovar je připraven k dalšímu zpracování pro konkrétní finální aplikace. Oblast používání je široká, uveďme si nejzákladnější a nejvíce využívané aplikace.

6.1. Letecký průmysl

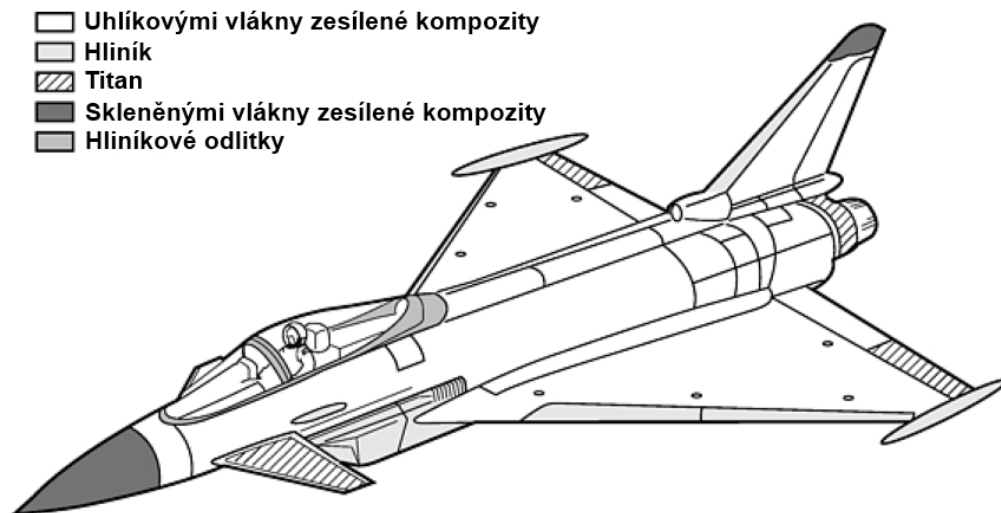
Vláknem vyztužené kompozity se stávají stále více atraktivní alternativou vůči kovům pro mnoho leteckých součástí. Tato problematika byla sledována v pracích [6], [7]. Kompozity jsou pevné, odolné vůči únavě a taktéž bylo prokázáno, že jsou velice trvanlivé. Navíc splňují požadavky na design a jejich nespornou a hlavní výhodou je jejich nízká hmotnost. Z hlediska životnosti leteckého cyklu poskytují kompozity snížení celkových nákladů.

Kompozitní materiály používané v leteckém průmyslu jsou obvykle tvořeny epoxidovou maticí vyztuženou zpevňujícími vlákny. Nejprogresivnějším typem vláken s nejlepšími mechanickými vlastnostmi jsou vlákna uhlíková. Uhlíková vlákna postupně nahrazují vlákna skleněná.

Již v sedmdesátých letech minulého století byly zadávané zakázky pro U.S. Air Force a National Aeronautics and Space Administration (NASA) na výzkum a podporu užití kompozitních materiálů v osobní letecké dopravě. Výsledkem byly první letadla s jistým podílem využití kompozitních dílů, jako *boeing 757*. Mezi novější a moderní osobní letadla využívající z velké části kompozitních dílů patří *boeing 777* a *787*. Pro porovnání, starší model *777* využívá 12% kompozitních dílů, zatímco nový model *787* je tvořen již z 50% kompozitními materiály.



Obrázek 15. Materiály použité na tělo Boeingu 787 [ZO 1]

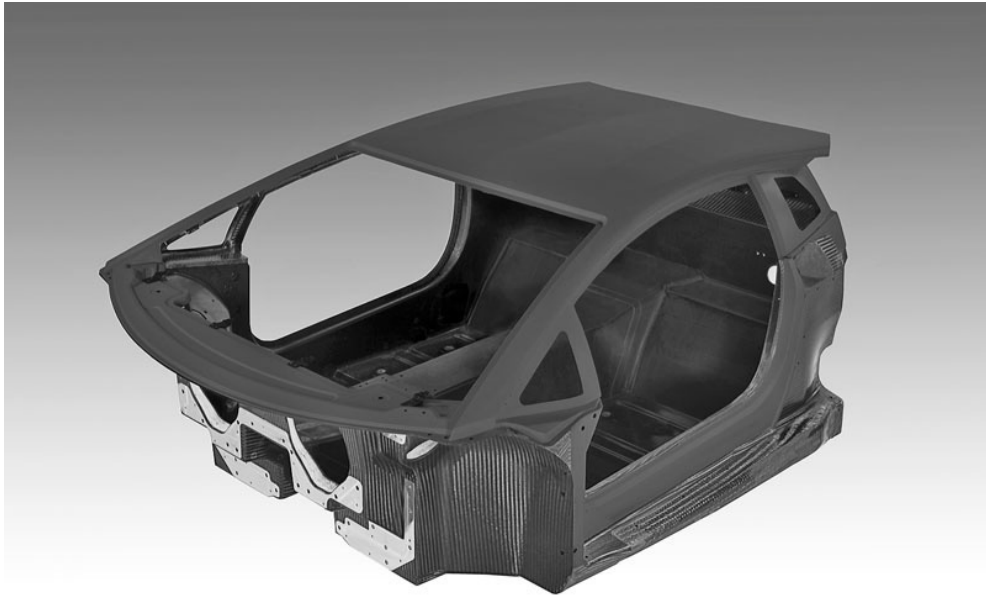


Obrázek 16. Materiály použité na tělo nadzvukového letounu Eurofighter typhoon F2 [6]

6.2. Automobilový průmysl

Kompozitní materiály mají v automobilovém průmyslu dlouhou historii, a to počínaje čtyřicátými lety minulého století. Tato problematika byla sledována v pracích [6], [7]. Henry Ford jako první v roce 1941 představil auto, kde karoserie byla tvořena sójovo-pryskyřiční matricí zesílenou celulóznými vlákny.

V dnešní době se v automobilovém průmyslu využívají nejčastěji uhlíkové kompozity tvořené epoxidovou matricí. Uplatnění nacházejí především u výkonných sportovních automobilů či sportovních speciálů. U těchto typů aut se kompozity využívají mnohdy na celé karoserie, aerodynamické části jako jsou spoilery či difusory, skořepiny sedadel a různé menší doplňky. Důvodem používání a nahrazování těchto částí kompozitními materiály je značné snížení hmotnosti při zachování, či dokonce zvýšení pevnostních charakteristik.



Obrázek 17. Samonosná skořepina střední části supersportovního vozu Lamborghini Aventador

[ZO 2]



Obrázek 18. Skořepiny sedadel pro vůz Nissan GTR [ZO 3]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

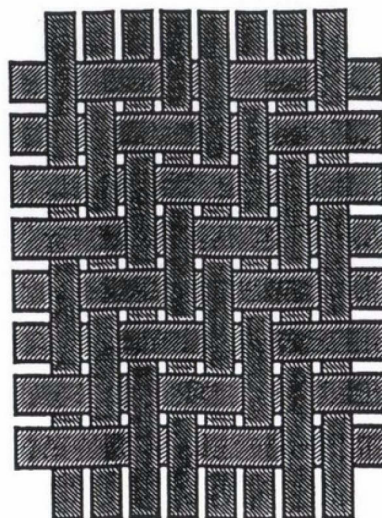
7. Cíle experimentální práce

Cílem experimentální části této diplomové práce je posouzení mechanických a tepelných vlastností kompozitu na bázi prepregu. Tyto vlastnosti byly zkoumány na základě provedených mechanických a speciálních tepelných zkoušek.

Zkoumaným materiálem je prepreg *HexPly* s matricí typu *M49* od firmy Hexcel. Tento typ prepregu je tvořen epoxidovou matricí a vyztužen uhlíkovými vlákny. Jednotlivé vrstvy tohoto prepregu jsou vzájemně splétány formou kepru 2x2. Viz obrázek 19. Způsob výroby prepregových kompozitů je buď ručním laminováním či laminováním strojním. Námi zkoumaný materiál byl vyroben laminováním strojním. Veškeré potřebné informace o zkoumaném prepregu jsou uvedeny v kapitole 8.

Na zkušební vzorky byla aplikována tahová zkouška, tříbodový ohyb a zkoušky tepelných vlastností. U tahové zkoušky jsme zkoumali meze pevnosti v tahu a Youngův modul pružnosti. U tříbodového ohybu jsme zkoumali meze pevnosti v ohybu a orientačně celkový průhyb. V rámci tepelných vlastností jsme zjišťovali tepelnou a teplotní vodivost, měrnou tepelnou kapacitu a celkový koeficient přestupu tepla do okolí.

Ze všech naměřených mechanických a teplotních hodnot byly zhotoveny grafické závislosti, výsledky byly vyhodnoceny a statisticky zpracovány. V závěru bylo konzultováno a popsáno chování materiálu při jednotlivých zkouškách.



Obrázek 19. Forma splétání jednotlivých vrstev prepregu, tzv. kepr 2x2 [ZO 4]

8. Popis zkoumaného materiálu

Jak již bylo řečeno v předchozí kapitole 7, materiál vzorků byl vyráběn strojním kladením a lisován za zvýšené teploty. Více o tomto druhu zpracování kapitole 5.4.1.

Daný produkt se prodává pod označením "prepreg *HexPly* s matricí typu *M49*", vyráběný firmou *Hexcel*.

HexPly M49 je při teplotě vytvrzování 120°C vytvrzená epoxidová matrice s dobrou odolností proti nárazu vhodná pro použití u výkonných aut. Matrice je velmi tolerantní k široké škále výrobků a zařízení díky snadnosti procesu. *HexPly M49* se využívá především v automobilovém průmyslu a to pro kosmetické aplikace jako jsou interiéry aut. Dále se *HexPly M49* využívá na výrobu sportovních potřeb. Výrobky vyrobené z tohoto typu prepregu mají vynikající povrchy. Tato kapitola je materiálovým listem zkoumaného prepregu a informace zde obsažené byly čerpány z citace [14].

Hlavní výhody a funkce

- Vysoce tvrzený epoxid
- Dobrá odolnost proti nárazu
- Samolepící na plástve
- Dobrá odolnost vůči UV záření
- Zpracování v autoklávech a vakuových lisech
- Dlouhá životnost a skladovatelnost při pokojové teplotě
- Vynikající lepivost

Tabulka 8. Vlastnosti pryskyřicové matrice

Barva	<i>průhledná</i>
Hustota [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$]	<i>1,18</i>
Vytvrzovací entalpie [$\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$]	<i>290</i>
Čas zgelovatění při 120°C [min]	<i>12-14</i>
Teplota skelného přechodu [°C]	<i>90</i>
Teplota skelného přechodu po 60 min při 120°C pro vytvrzení [°C]	<i>115</i>

Tabulka 9. Mechanické vlastnosti vytvrzeného prepregu (vytvrzováno při 120°C v autoklávu)

Vlastnosti	Pevnost v tahu ve směru vláken [MPa]	Modul pružnosti [GPa]	Pevnost v tlaku [MPa]	Ohyb [MPa]	Interlaminární smykové napětí (MPa)
	980	69	650	900	59

Tabulka 10. Doplnující informace o prepregu HexPly

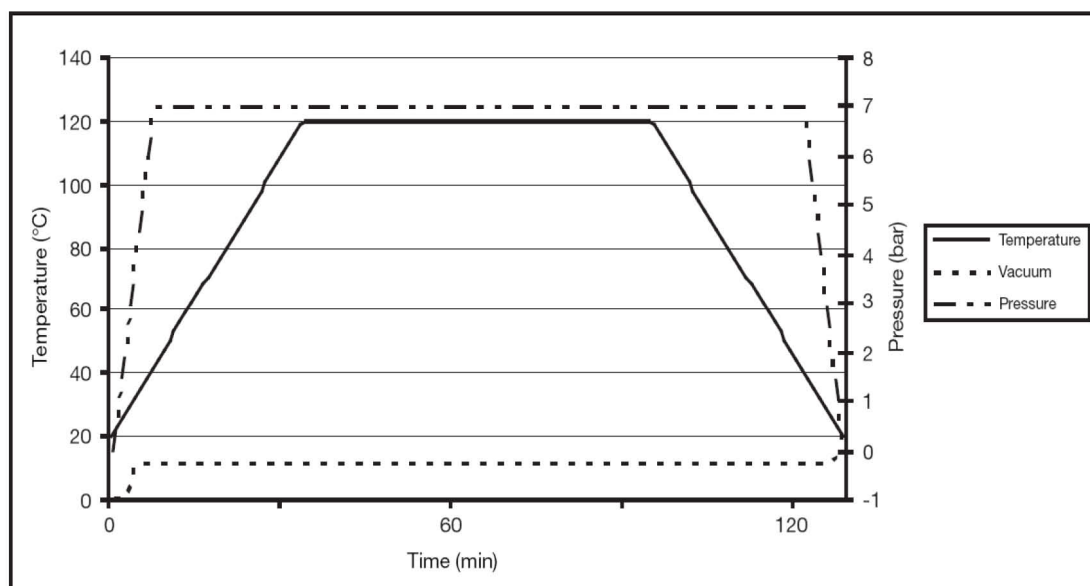
Označení vlákna	Typ použitého vlákna	Styl splétání	Hmotnost [g. m ⁻²]	Jmenovitá tloušťka vrstvy [mm]	Hmotnostní obsah pryskyřice v M49 [%]
245T2	3K vysoce pevný uhlík	Kepr 2x2	245	0,287	42

Vytvrzování prepregu

Pro kosmetické části je doporučeno použití procesu v autoklávu, než-li pouze ve vakuu.

Typický proces vytvrzování v autoklávu pro tenké části je:

- 1) Aplikovat vakuum (0,9 bar)
- 2) Aplikovat v autoklávu měřený tlak 7 bar
- 3) Redukovat vakuum na bezpečnou hodnotu 0,2 bar, když měřidlo v autoklávu ukáže hodnotu 1 bar
- 4) Ohřívat 1-3°C/minutu na 120°C
- 5) Setrvat na teplotě 120°C po dobu 60 minut
- 6) Ochlazování rychlostí 2-5°C/minutu
- 7) Zvyšování tlaku v autoklávu při teplotě komponent 60 a míň °C



Obrázek 20. Grafické znázornění vytvrzování v atoklávu

Rychlost zahřívání je závislá na tloušťce součástí. Pomalá rychlost zahřívání by měla být aplikována na tlustší komponenty a velké nástroje. Přesná teplota měření komponentů by měla být stanovená během cyklu vytvrzování, a to užitím termočlánků. Pro síťové sendvičové panely, tvrzené tlakem 1-2 bar by měla být použita závislost síťové hustoty.

Tabulka 11. Možné alternativní cykly pro vytvrzování:

Vytvrzovací teplota (°C)	Čas (min)
140	30
120	60
100	120
90	360
85	720

Doporučený vakuový cyklus pro tenké části:

- 1) Aplikovat vakuum (0,9 bar)
- 2) Ohřívat 1-2°C/minutu na 120°C
- 3) Setrvat na teplotě 120°C po dobu 60 minut
- 4) Ochlazování rychlostí 2-5°C/minutu

Testování výkonu by mělo být provedeno pro více alternativních vytvrzovacích cyklů, s cílem zajistit vhodnost pro konkrétní použití. Cyklus s nižší teplotou vytvrzování jak 120°C bude vhodný v závislosti na aplikaci, zejména pak na úroveň potřebné teploty T_g.

Skladovatelnost prepregu

OutLife: Je maximální možná doba při pokojové teplotě mezi vyjmutím z chladících boxů a konečným zpracováním. Tato doba je stanovená na 30 dní při teplotě 23°C.

ShelfLife, neboli životnost: Je maximální doba skladovatelnosti prepregu při průběžném skladování v uzavřeném obalu odolném proti vlhkosti při teplotě -18°C.

Skladovací podmínky:

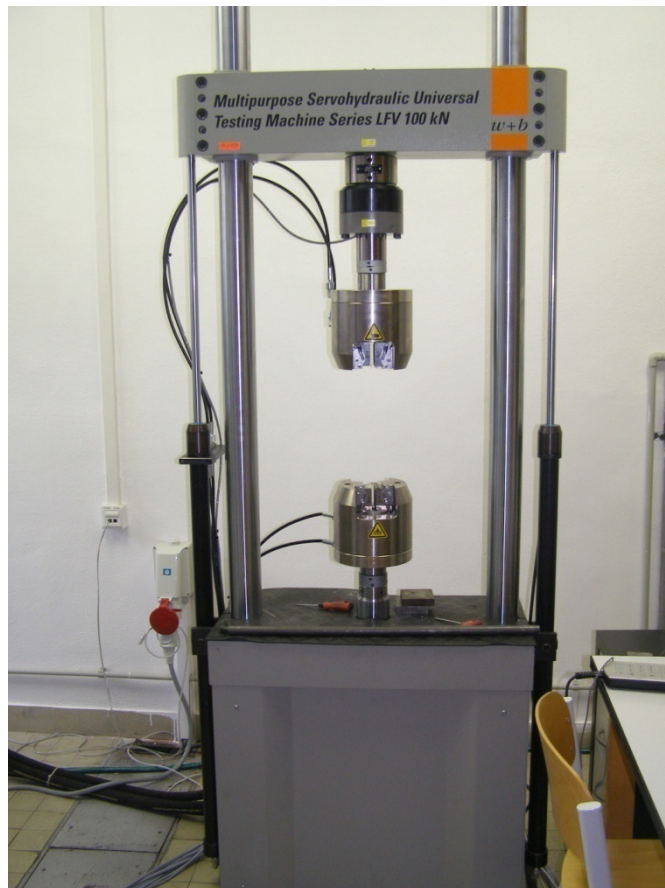
Prepreg *HexPly M49* by měl být uložen na přijatelně chladném a suchém místě nebo v ledničce. Po vyjmutí z chladícího skladu, by měl mít možnost dosáhnout pokojové teploty před samotným otevřením igelitového sáčku, a tak předejít kondenzaci.

8.1. Zkušební tělesa

Pro zkoušku tahem a zkoušku tříbodovým ohybem byly vyrobeny zkušební tělesa ve formě pásků, tedy ploché výrobky. Pro zkoušku tahem měly pásky rozměry 25 x 0,9 x 250 mm, viz obrázky 22,23., pro tříbodový ohyb pak 15 x 0,9 x 50 mm, viz obrázek 28. Pro zkoušky tepelných vlastností byly zhotoveny zkušební tělesa o rozměrech 25x25x0,8mm, přičemž rozměry vzorků pro tepelné vlastnosti nejsou důležité, [15], [16], [18].

9. Zkoušky mechanických vlastností

Jak bylo uvedeno v úvodu praktické části, z mechanických vlastností byla měřena pevnost v tahu, modul pružnosti v tahu, pevnost v ohybu a maximální průhyb. Všechny tyto vlastnosti byly měřeny na univerzálním zkušebním stroji **Multipurpose Servohydraulic Universal Testing Machine Series LFV 100 kN** (Obrázek 21.). Tyto univerzální zkušební stroje jsou navrženy na zkoušení pevnosti v tahu, modulu pružnosti, tažnosti, meze kluzu a určení Poissonova čísla.



Obrázek 21. Univerzální zkušební stroj *Multipurpose Servohydraulic Universal Testing Machine Series LFV 100 kN*

9.1. Tahová zkouška

Zkouška tahem patří díky své jednoduchosti k nejpoužívanějším zkouškám k určení mechanických vlastností materiálu. Při zkoušce tahem se vzorky deformují jednoosým tahovým napětím s konstantní rychlostí zatěžování, která je daná podle norem. Tahová zkouška je převážně ukončena lomem materiálu. Podmínky zkoušky pak závisí na typu použitého materiálu a odpovídající normy. Tato problematika byla sledována v pracích [15], [16], [17].

Námi zkoušený materiál byl testován na mez pevnosti. Tažnost či mez kluzu se u kompozitů neurčují. Mez pevnosti v tahu je smluvní napětí, odpovídající největšímu zatížení $F_{max} \equiv F_m$, které předchází porušení zkušebního tělesa. Během zatěžování dochází také k natahování tyčinky.

Mez pevnosti v tahu se pak vypočítá:
$$R_m = \frac{F_m}{S_0} [\text{MPa}] \quad (1)$$

U jednoho vzorku byl zapojen extenzometr, díky němuž jsme z grafické závislosti a vypočtené lineární regrese určili Youngův modul pružnosti.

Zkouška tahem u laminátů a kompozitních materiálů se provádí podle normy ČSN EN ISO 527-4,5. Podle této normy byly také připraveny zkušební vzorky. Obecný náčrt zkušebního tělesa je uveden na obrázku 22. Zhotovená zkušební tyčinka je pak uvedena na obrázku 23.

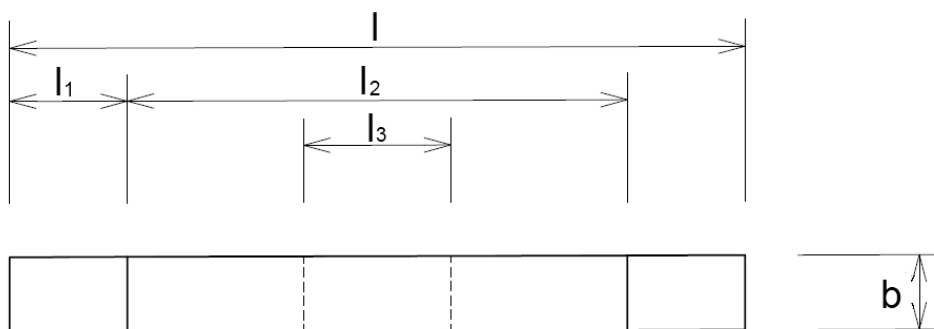
Podle této normy byly stanoveny všechny podmínky zkoušky:

Střední rozměry vzorků: $250 \times 25 \times 0,9 \text{ mm}$

Počáteční délka mezi čelistmi: 170 mm

Rychlost zatěžování: 2 mm/min

Během samotného průběhu zkoušky byl zároveň na monitoru, který je součástí zkušebního stroje, vykreslován tahový diagram, který je zobrazen v grafu 1.



Obrázek 22. Tvar zkušební tělesa z kompozitu

Tabulka 12. Rozměry zkušební tyče z kompozitu [15]

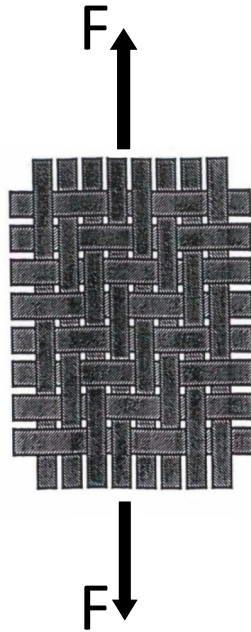
Rozměry [mm]	Hodnota
Celková délka l	250
Pracovní délka l_3	50
Vzdálenost mezi čelistmi l_2	170
Šířka b	25



Obrázek 23. Zhotovená zkušební tyčinka

9.1.1. Výsledky

K dispozici jsme měli 6 vzorků zkoumaného prepregu *HexPly M49*. Tento prepreg je vyztužen uhlíkovými vlákny splétanými formou kepru 2x2. Vzorky byly odebrány tak, že směr zatěžující síly byl pro 50% vláken směrem rovnoběžným se silou zatěžování, na dalších 50% vláken působila síla kolmo. Tento stav zatěžování je zobrazen na obrázku 24. U všech vzorků byly měřeny meze pevností, u jednoho vzorku byl zapojen extenzometr pro určení Youngova modulu pružnosti. Rozměry vzorků a hodnoty mezí pevností v tahu jsou uvedeny v tabulce 12. Průběhy zatěžování až do lomu jsou dále znázorněny v grafu 1.



Obrázek 24. Nákres působení napětí v tahu na keprovou formu splétání

Tabulka 13. Rozměry vzorků a naměřené hodnoty meze pevnosti v tahu

Vzorek	a [mm]	b [mm]	S [mm ²]	σ [MPa]
1	0,91	25,06	22,80	491,00 \pm 22,09
2	0,89	25,40	22,61	382,81 \pm 22,09
3	0,91	25,97	23,63	501,91 \pm 22,09
4	0,90	24,66	22,19	512,90 \pm 22,09
5	0,89	25,75	22,92	522,93 \pm 22,09
6	0,87	25,87	22,51	527,43 \pm 22,09

Tabulka 14 : Směrodatná odchylka a procentuální chyba měření pro pevnosti

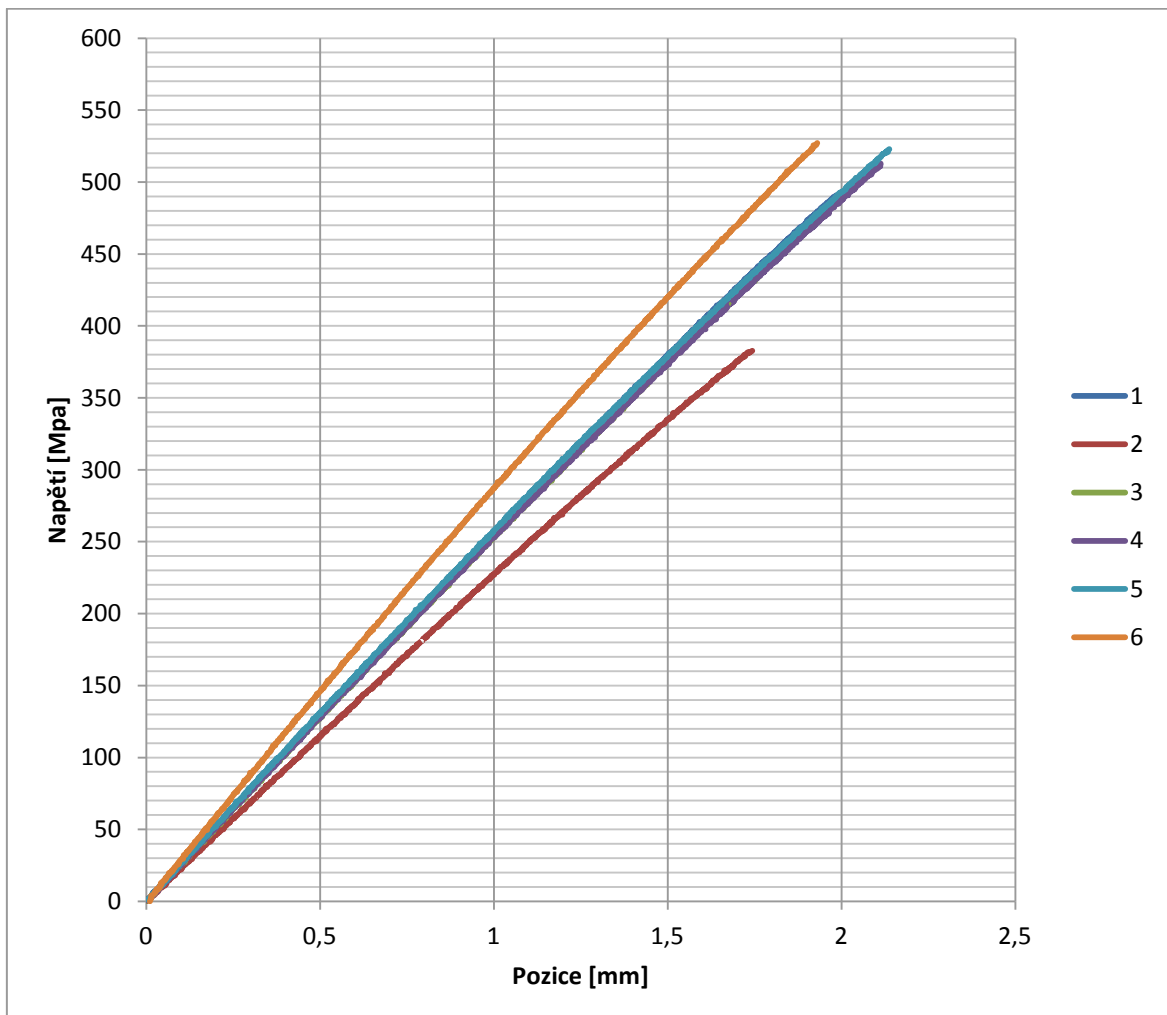
Vzorek	σ [MPa]	$\Delta\sigma$ [MPa]	$\Delta\sigma^2$ [MPa]
1	491,00	1,17	1,3689
2	382,81	-107,02	11453,28
3	501,91	12,08	145,9264
4	512,90	23,07	532,2249

5	522,93	33,1	1095,61
6	527,43	37,6	1413,76
	$\bar{\sigma} = 489,83$		$\sum \Delta\sigma^2 = 14642,17$

$$\delta_{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum \Delta\sigma^2}{n \cdot (n-1)}} = \sqrt{\frac{14642,17}{30}} = 22,09 \text{ [MPa]} \quad (2)$$

$$\sigma = (489,83 \pm 22,09) \text{ [MPa]}$$

$$\rho_{\sigma} = \frac{\delta_{\sigma}}{\bar{\sigma}} \cdot 100\% = \frac{22,09}{489,83} = 4,5\% \quad (3)$$



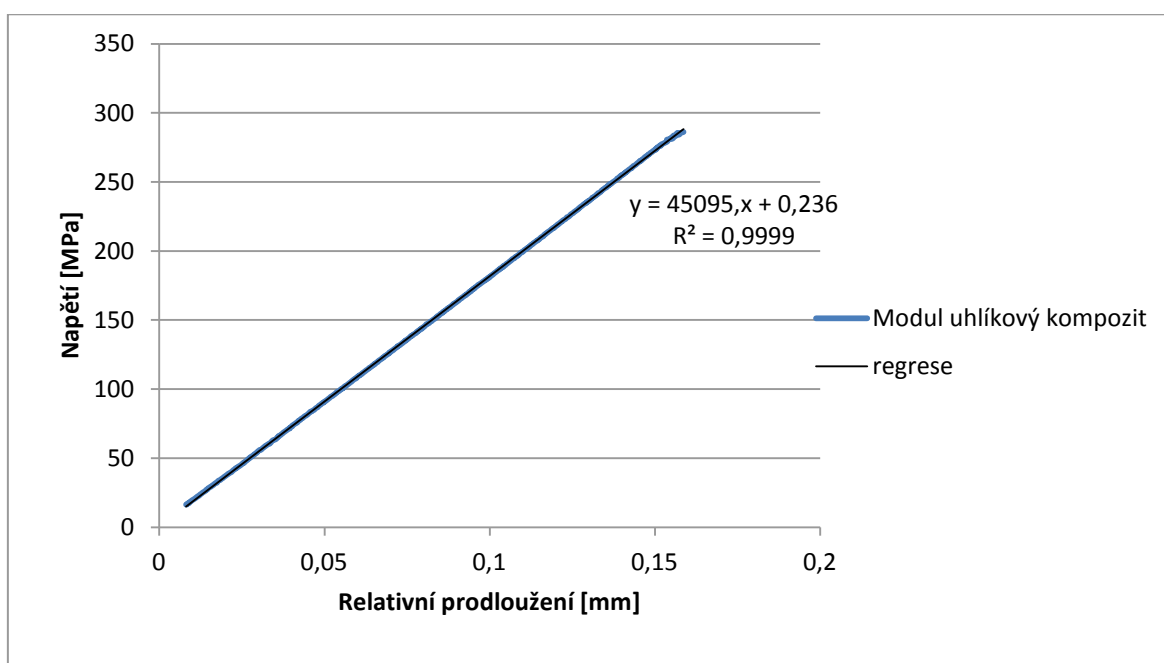
Graf 1. Průběhy tahových zkoušek u jednotlivých vzorků

Určení Youngova modulu pružnosti

Modul pružnosti jsme určili z lineární části tahového diagramu. Pro toto měření jsme si vybrali vzorek 1, a z vytvořeného grafu se modul určí jako směrnice přímky. Tímto způsobem byl pro náš prepreg určen modul pružnosti 45095 MPa. V grafu 2 je pak vynesena závislost napětí versus relativní prodloužení s křivkou regrese.

Tabulka 15. Rozměry vzorků a naměřené hodnoty modulu pružnosti v tahu

Vzorek	a [mm]	b [mm]	S [mm ²]	σ [MPa]	E [GPa]
1	0,91	25,06	22,80	491,00 \pm 22,09	45,1



Graf 2. Napětí versus relativní prodloužení – určování modulu pružnosti E

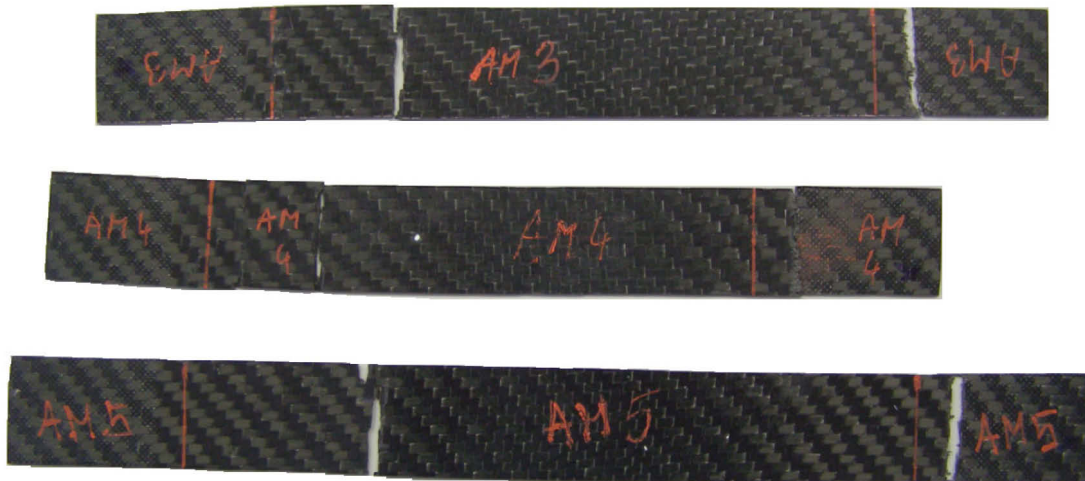
9.1.2. Vyhodnocení

Na šesti vzorcích byly naměřeny hodnoty pevnosti v tahu s průměrnou hodnotou 489 \pm 22,09MPa. Vzorky se trhaly na více místech, lomové plochy jsou rozstřepené. Hodnotu modulu pružnosti E jsme z grafické závislosti určili na 45,1 GPa.

Hodnoty mezí pevností u námi zkoumaných vzorků se výrazně liší od hodnot udávaných výrobcem (tabulka 9). Námi měřené vzorky vykazují pevnosti minimálně o 400 MPa nižší. Domníváme se, že tato výrazná odchylka od udávaných hodnot je způsobena

špatným vytvrzovacím cyklem a nezvládnutím výrobního procesu. Jelikož jsme u výrobního procesu našich vzorků nebyli, je možno předpokládat i jiné, námi nezjistitelné výrobní nejasnosti. Špatným výrobním procesem nejspíše došlo k tomu, že jednotlivé vrstvy prepregu nejsou k sobě dostatečně přilnuty. Důsledkem toho dochází ke ztrátám pevnosti vlivem smyku jednotlivých vrstev po sebe. Špatným výrobním cyklem mohou dále v materiálu vzniknout různé dutiny, které rovněž snižují pevnosti.

Chování a pevnost vícevrstvých kompozitů jsou velice komplikované. Porušení vícevrstvého kompozitu je pak určeno pevností jednotlivých vrstev, přičemž nejdříve se poruší ta vrstva, jejíž mez zatížení je překročena. Vlivem odlišné orientace i vlastností jsou jednotlivé vrstvy ve vícevrstvěném kompozitu různě zatíženy.



Obrázek 25. Porušení zkušebních pásek za mezí pevnosti

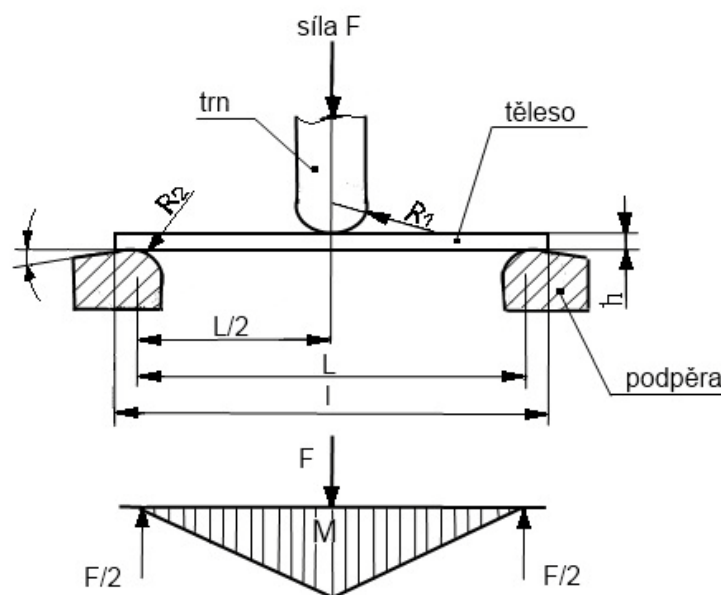


Obrázek 26. Detail porušení zkušebního pásku

9.2. Zkouška tříbodovým ohybem

Zkouška tříbodovým ohybem poskytuje důležité informace pro materiály, které jsou při aplikaci namáhány na ohyb. Cílem zkoušky je zjištění meze pevnosti v ohybu. Při ohybu je napětí rozloženo tak, že v horních vrstvách vzniká napětí tahové a dolní polovině pak napětí tlakové. Tato problematika byla sledována v pracích [16], [17], [18].

Při tříbodové zkoušce ohybem je zkušební těleso podepřeno dvěma podpěrami o stanovené vzdálenosti a konstantní rychlostí zatěžování je prohýbáno tzv. trnem působícím uprostřed rozpětí podpěr, a to do té doby, než se zkušební těleso zcela nezlomí, či nedosáhne předem stanovené hodnoty. Uspřádání podpěr a zatěžovacího trnu uprostřed je znázorněno na obrázku 27. Tato zkouška má význam především u materiálů křehkých a polokřehkých.



R_1 ... poloměr zatěžovacího trnu

R_2 ... poloměr podpěr

h ... tloušťka zkušebního tělesa

l ... délka zkušebního tělesa

L ... rozpětí mezi podpěrami

Obrázek 27. Princip zkoušky tříbodovým ohybem

Maximální pevnost v ohybu se pak vypočte: $R_{mo} = \frac{M_{0 \max}}{W_0} [\text{MPa}]$ (4)

Kde $M_{0 \max}$ je maximální ohybový moment: $M_{0 \max} = \frac{F_{\max} \cdot l}{4} [\text{N} \cdot \text{mm}]$ (5)

A W_0 je průřezový modul v ohybu: $W_0 = \frac{bh^2}{6} [\text{mm}^3]$ (6)

Pro zkouška tříbodovým ohybem existuje u kompozitních materiálů řada norem pro různé druhy vyztužení. Naše zkoušky byly provedeny v souladu s normou ČSN EN ISO 14125.

Podle této normy byly stanoveny všechny podmínky zkoušky:

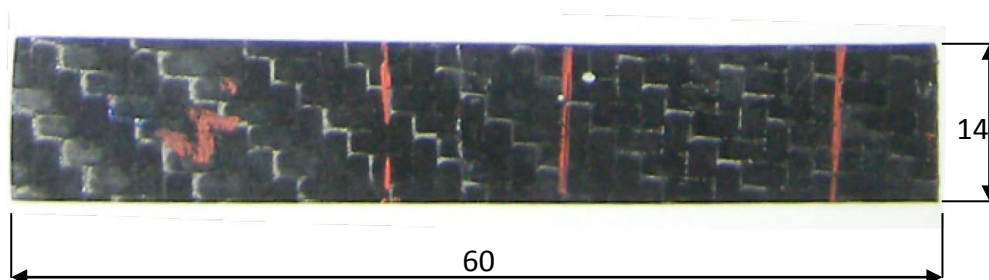
Střední rozměry vzorů: $0,9 \times 14 \times 60 \text{mm}$

Průměr trnu: $7 \cdot tl = 7 \cdot 0,9 = 6 \text{mm}$

Průměr podpěr: 6mm

Vzdálenost mezi podpěrami: $16 \cdot tl = 16 \cdot 0,9 = 14 \text{mm}$

Rychlost zatěžování: 1 mm/min



Obrázek 28. Vyrobena a naznacena zkušební tyčinka pro tříbodový ohyb

9.2.1. Výsledky

K dispozici jsme měli celkem 10 zkušebních vzorků prepregu HexPly M49 se stejným způsobem odebrání jako u zkušebních tyčinek pro zkoušku tahem. Zkušební tyčinky byly prakticky shodné jako pro zkoušku tahem, ale menších rozměrů. Takto vyrobená tyčinka je zobrazena na obrázku 28. Na vzorcích byla měřena maximální pevnost v ohybu a průhyb při maximálním zatížení. Rozměry vzorků a hodnoty napětí jsou uvedeny v tabulce 16. Výsledky jsou dále graficky zpracovány (graf 3 a 4)

Tabulka 16. Rozměry vzorků, pevnosti v ohybu a průhyby

Vzorek	a [mm]	b [mm]	S [mm ²]	p [mm]	σ_{max} [MPa]
1	0,88	14,42	12,69	2,50	765,5 \mp 52,25
2	0,88	14,41	12,68	1,05	693,7 \mp 52,25
3	0,89	15,08	13,42	0,70	518,2 \mp 52,25
4	0,89	15,03	13,38	0,57	339,4 \mp 52,25
5	0,90	14,14	12,73	0,52	403,7 \mp 52,25
6	0,90	14,07	12,66	0,43	225,7 \mp 52,25
7	0,90	14,11	12,70	0,49	443,7 \mp 52,25
8	0,90	14,02	12,62	0,54	370,9 \mp 52,25
9	0,91	14,10	12,83	0,59	462,8 \mp 52,25
10	0,91	14,02	12,76	0,51	343,3 \mp 52,25

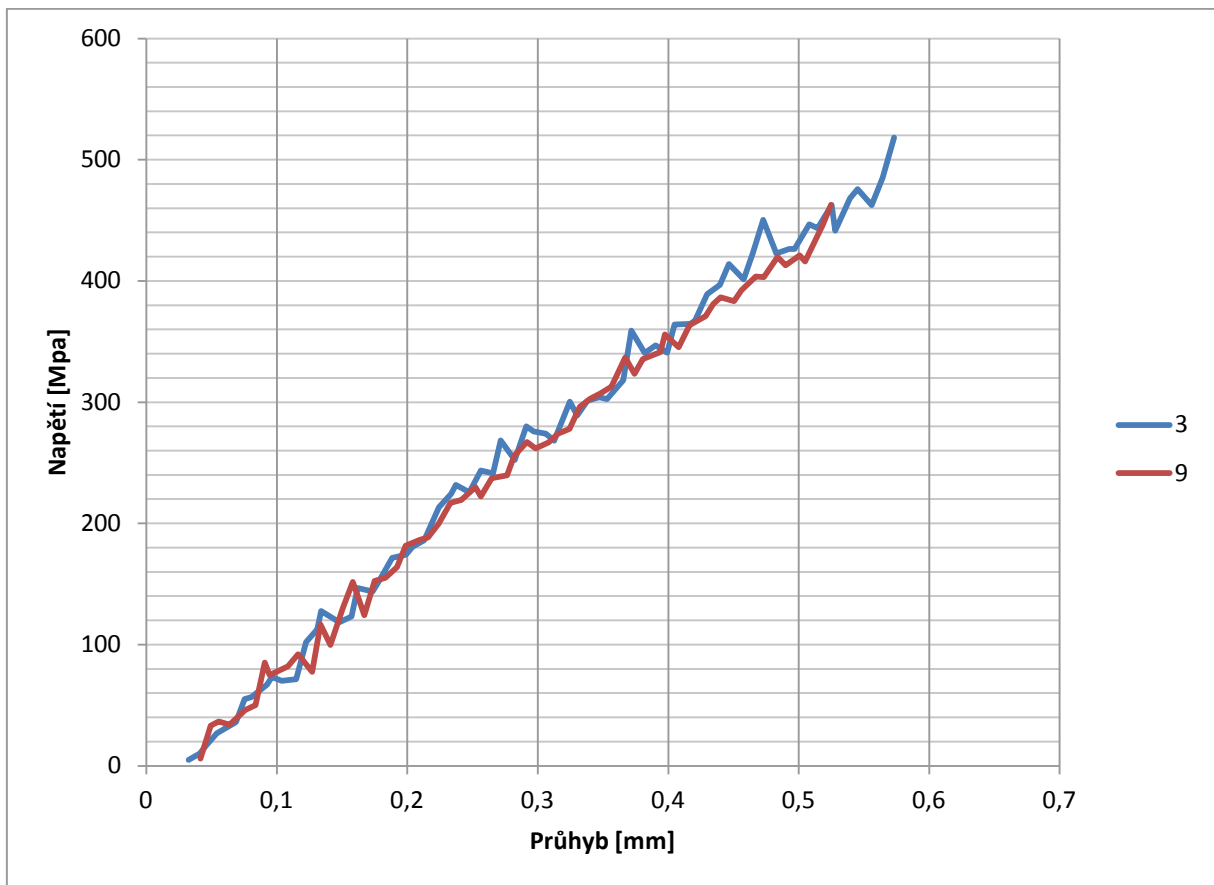
Tabulka 17. Směrodatná odchylka a procentuální chyba měření

Vzorek	σ [MPa]	$\Delta\sigma$ [MPa]	$\Delta\sigma^2$ [MPa]
1	765,5	308,81	95363,62
2	693,7	237,01	56173,74
3	518,2	61,51	3783,48
4	339,4	-117,29	13756,94
5	403,7	-52,99	2807,94
6	225,7	-230,99	53356,38
7	443,7	-12,99	168,7401
8	370,9	-85,79	7359,924
9	462,8	6,11	37,3321
10	343,3	-113,39	12857,29
	$\bar{\sigma} = 456,69$		$\sum \Delta\sigma^2 = 245665,4$

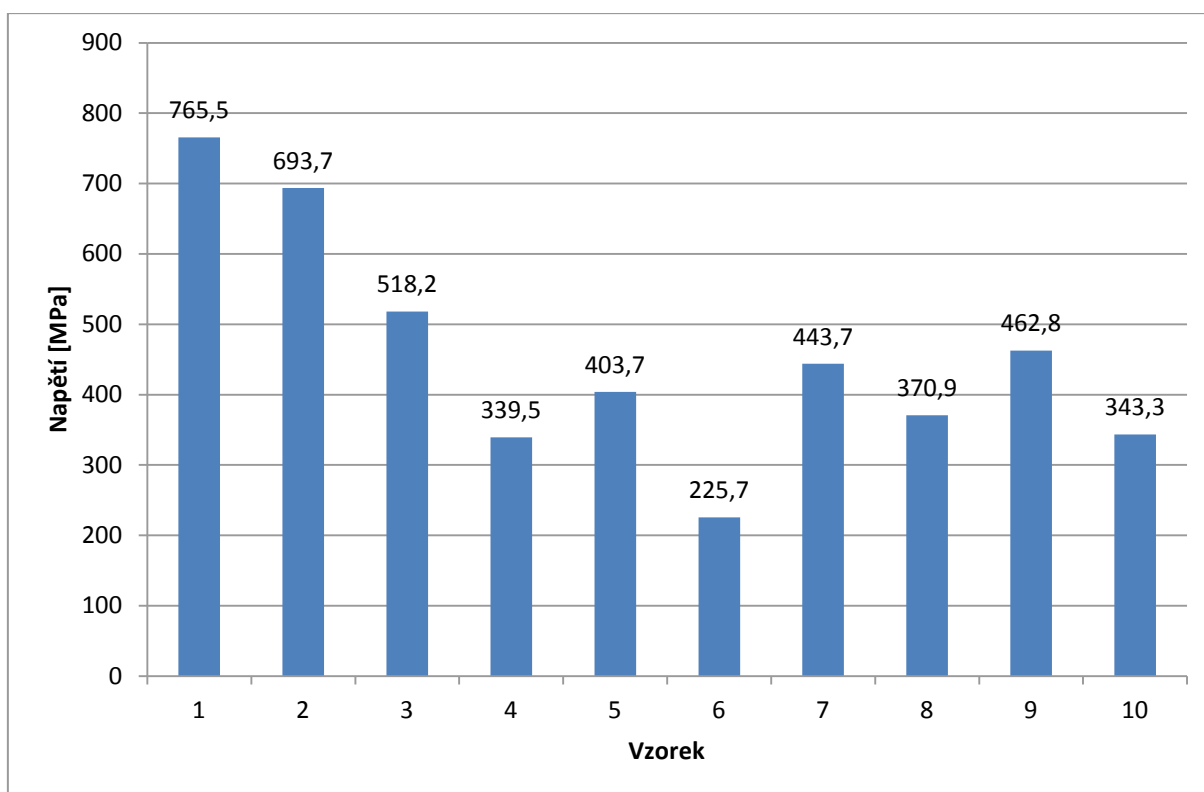
$$\delta_{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum \Delta \sigma^2}{n \cdot (n - 1)}} = \sqrt{\frac{245665,4}{90}} = 52,25 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma = (456,69 \pm 52,25) \text{ [MPa]}$$

$$\rho_{\sigma} = \frac{\delta_{\sigma}}{\bar{\sigma}} \cdot 100\% = \frac{52,25}{456,69} = 11,4\%$$



Graf 3. Příklady průběhu zatěžování při tříbodovém ohybu u dvou vybraných vzorků



Graf 4. Porovnání hodnot maximálních napětí v ohybu u jednotlivých vzorků

9.2.2. Vyhodnocení

Na deseti vzorcích byly naměřeny hodnoty pevnosti v ohybu s průměrnou hodnotou $456,69 \pm 52,25$ MPa. Hodnoty průhybu se pohybovaly od 0,43 do 2,50 mm. K lomu došlo pouze u dvou vzorků (obrázek 29), u zbylých vzorků k lomům nedocházelo, vzorky po překročení kritické hodnoty napětí ztratily svou nosnost a napětí radikálně klesalo. Ve vzorcích došlo k přetrhání určitého procenta uhlíkových vláken, epoxidová matrice však celý vzorek držela, i po zhroucení nosnosti, pohromadě. Při zkoušce tříbodovým ohybem existuje ve zkušebním tělese napjatost s maximálním zatížením a definovaným místem lomu či únosného porušení v bodě zatížení. To znamená ve středu délky tělesa. Maximální smykové napětí leží mezi vrstvami uprostřed tloušťky tělesa.

Hodnoty napětí u zkoušky tříbodovým ohybem vykazovaly značné odchylky (graf 4). Dá se říct, že jednotlivé vzorky se chovaly naprosto nesourodě. Navíc tabulkové hodnoty napětí při ohybu uvedené výrobcem dosahují daleko vyšších hodnot (tabulka 9). Předpokládáme, že tato nesymetrie naměřených hodnot byla způsobena špatným vytvrzovacím cyklem a nezvládnutím technologie vytvrzování u firmy, jež nám vzorky

poskytla. Tímto špatným výrobním procesem došlo k nesprávnému a nedostatečnému přilnutí jednotlivých vrstev na sebe. Nedostatečným přilnutím pak dochází k smykání jednotlivých vrstev po sebe a snižováním tak schopnosti odolávat působení napětí.

Chování a pevnost při tříbodovém ohybu u vícevrstvých kompozitů lze popsat obdobně jako u zkoušky tahem.



Obrázek 29. Lom zkušební tyčinky v tříbodovém ohybu

9.3. Tepelné zkoušky

Z tepelných vlastností jsme pomocí poklesu teploty vzorku, chladnoucího převážně v neinduktivním režimu, určili tepelnou a teplotní vodivost, měrnou tepelnou kapacitu a celkový koeficient přestupu tepla do okolí. Tato problematika byla sledována v pracích [19], [20], [21].

Princip spočívá v zahřátí vzorku v termostatu nad teplotu okolí, a to cca 50°C. Vzorek se následně vloží do adiabatické komory, která se poté uzavře. Pomocí počítače se automaticky spustí načítání časových změn teploty vzorku, které je nastaveno na 5 až 10 minut. Následuje zpracování dat.

Modelové představy a teoretické základy měření

V metodě soustředěné tepelné kapacity se předpokládá:

- Teplotní gradienty je možno v tělese zanedbat
- V tělese neexistují žádné vnitřní zdroje tepla
- Přestup tepla ze vzorku do okolí je kombinací konvektivního a radiačního přestupu tepla

- Teoretická časová závislost teploty je: $y = dT_{\max} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + T_{\text{amb}}$ (7)

dT_{\max} maximální teplotní rozdíl na vyřiznuté části křivky [°C]

τ relaxační čas [s]

t celkový čas [s]

T_{amb} teplota okolí [°C]

- Relaxační čas je pak vyjádřen vztahem: $\tau = (\rho c_p L)/(2h)$ (8)

ρ hustota [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$]

c_p specifická tepelná kapacita [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

L tloušťka vzorku [m]

h celkový koeficient přestupu tepla do okolí [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]

α teplotní vodivost [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$] $\cdot 10^7$

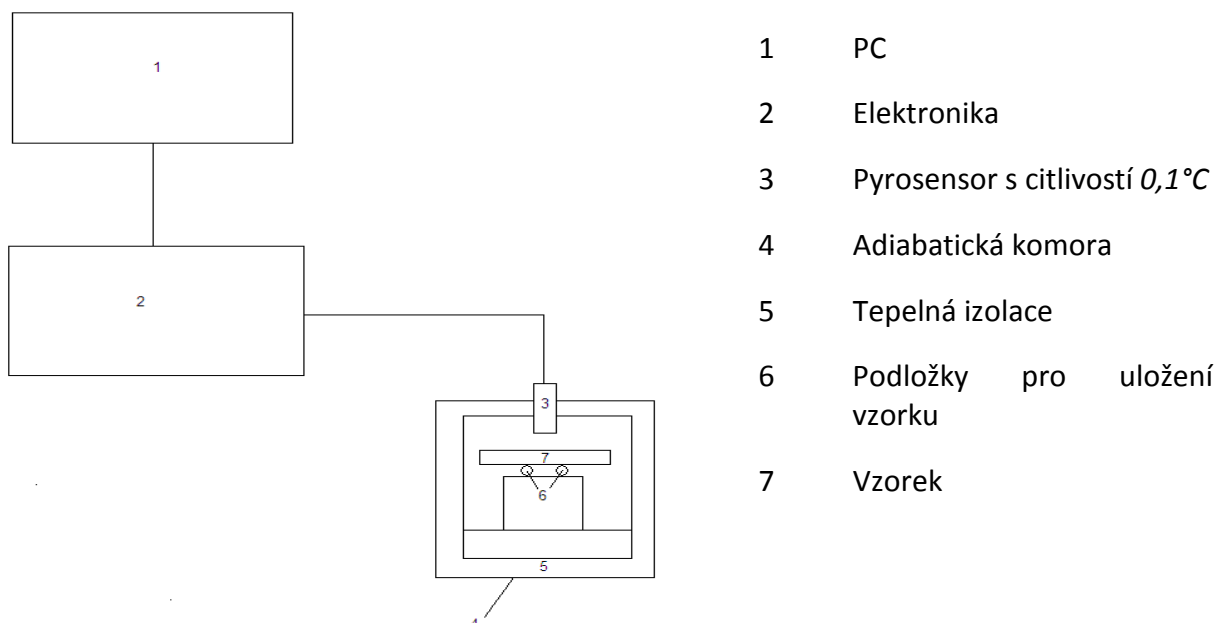
- Tepelná vodivost je vyjádřena vztahem: $k = \alpha \rho c_p$ (9)

- Biotovo číslo je menší než 0,1 : $Bi = \frac{hL}{2k}$ (10)

Požadavky na vzorky

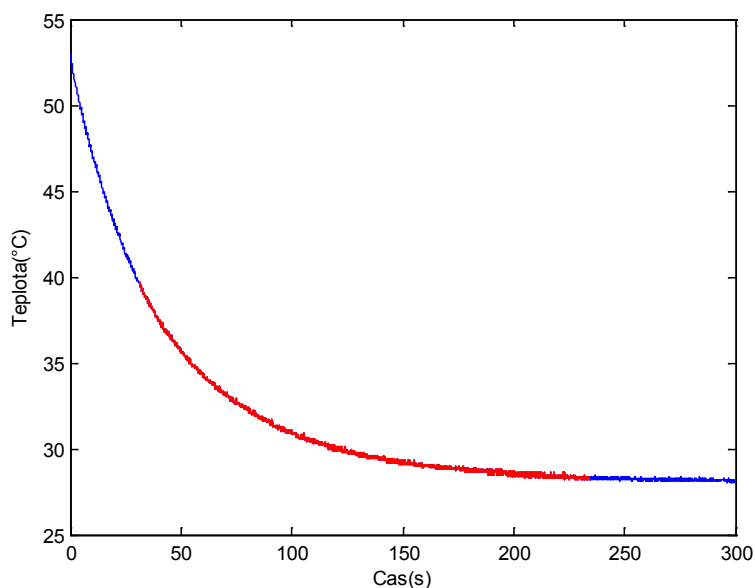
- Jemně broušené, případně leštěné
- Tloušťka vzorku by měla být co nejmenší z důvodu tepelné vodivosti materiálu (čím menší vodivost, tím menší tloušťka)
- Povrch vzorků musí být nastříkaný matným černým lakem (emisivita)

Schéma použité aparatury měření



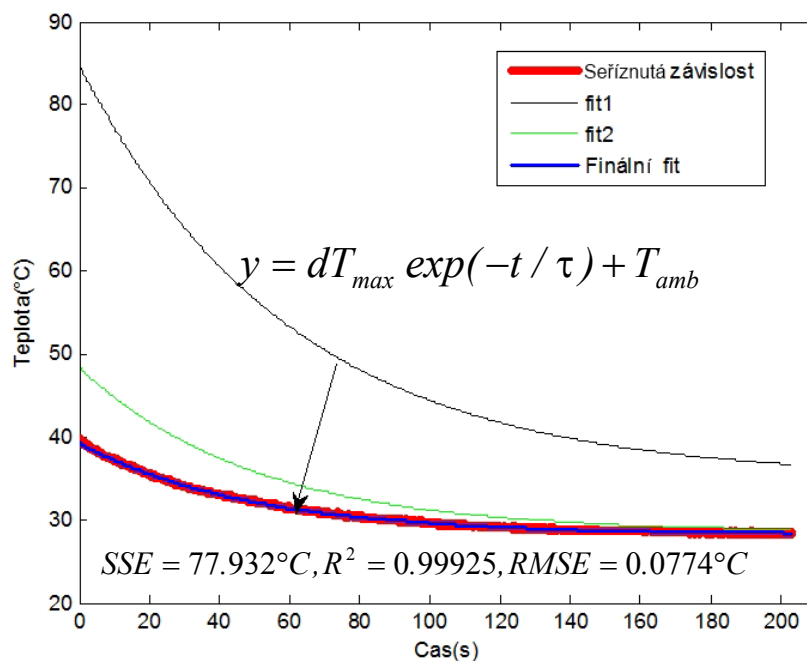
Samotné zpracování dat

- Vytvoření proměnných časů t a teplot T z naměřených dat – grafická závislost teplota-čas. Na obrázku znázorněno modře.
- Seřízení závislosti teplota-čas z ustálené oblasti ochlazování. Na obrázku znázorněno červeně.



Obrázek 30. Průběh celé doby ochlazování

- Následuje tzv. fitovací procedura:



Obrázek 31. Princip fitovací procedury z vyříznutého průběhu ochlazování

Zpracování křivek chladnutí

- Odečtení teplot dT_{max}, τ, T_{amb}
- Fitování experimentální a teoretické křivky s parametry uvedenými na obrázku, z čehož se získají hodnoty dT_{max}, τ, T_{amb} (*fit*)
- Vyjádření relaxačního času pomocí vztahu (2) a získání nové teoretické křivky obsahující 2 parametry h, c_p
- Odhadnutí hodnoty h, c_p podle: http://en.wikipedia.org/wiki/Heat_transfer_coefficient
- Znovu fitování teoretické a experimentální křivky a získání tak hodnot h, c_p (*fit*) s nejmenšími odchylkami.
- Vyjádření měrné tepelné kapacity pomocí vztahu (3) a získání nové teoretické křivky obsahující 2 parametry α, k
- Odhadnutí hodnot α, k
- Znovu fitování teoretické a experimentální křivky a získání tak hodnot α, k (*fit*) s nejmenšími odchylkami.
- Vypočtení hodnoty Biotova čísla pomocí vztahu (4) a porovnání s hodnotou 0,1

9.3.1. Výsledky

Pro spolehlivost měření a korektnost výsledků bylo na měřicí aparatuře provedeno měření na materiálech o známých hodnotách tepelné a teplotní vodivosti, a měrné tepelné kapacity. Pro toto ověření měřicí aparatury byly použity měď a hliník. Naměřené a tabulkové hodnoty s vypočtenou procentuální odchylkou jsou uvedeny v následujících tabulkách:

Tabulka 18. Naměřené a tabulkové hodnoty pro měď

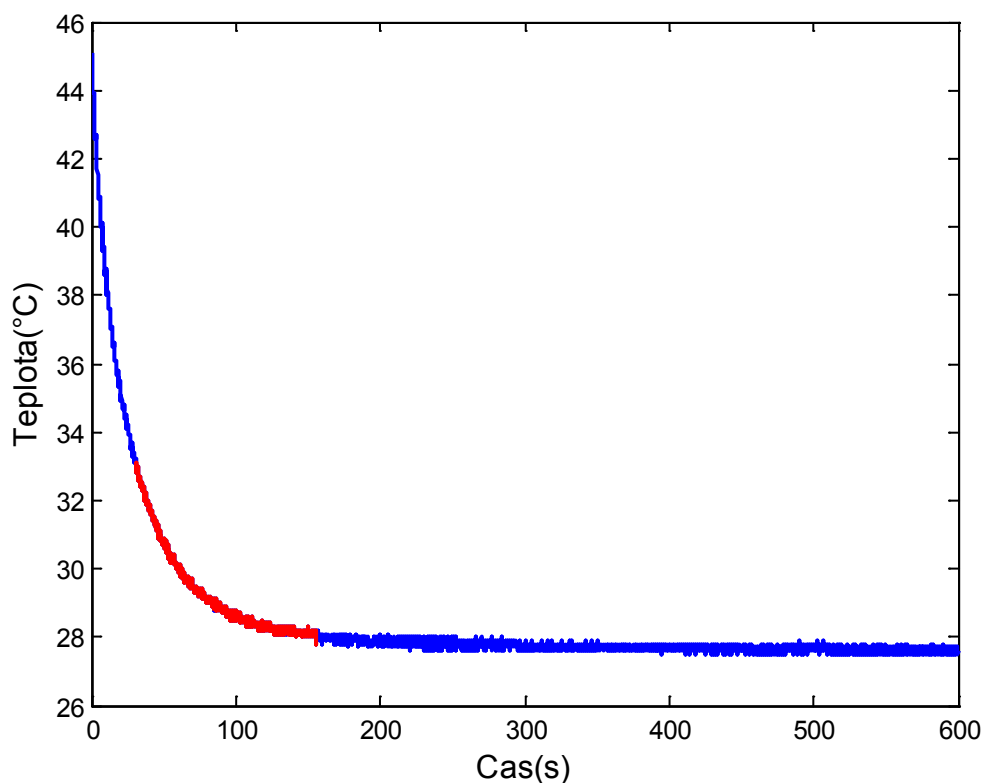
Měď	Naměřené	Tabulkové	Procentuální rozdíl [%]
c_p	375	380	1,32
α	118,5E-06	117,8E-6	0,61
k	387,3	401	0,91
Bi	3,7E-05		

Tabulka 19. Naměřené a tabulkové hodnoty pro hliník

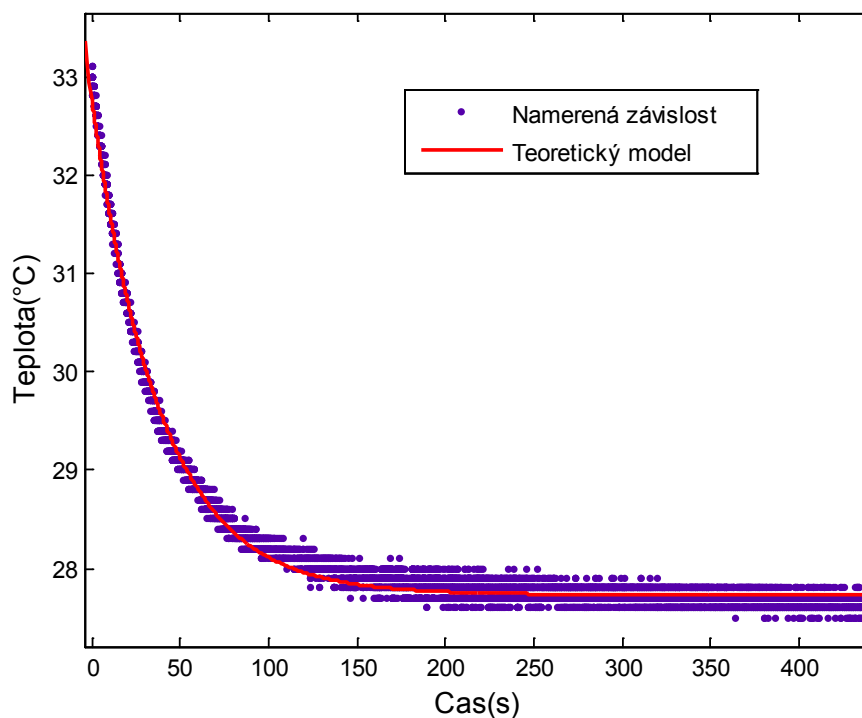
Hliník	Naměřené	Tabulkové	Procentuální rozdíl [%]
c_p	876	897	2,39
α	98,6E-06	99,1E-06	0,53
k	233	237	1,68
Bi	2,9E-04		

Tímto experimentem byla ověřená korektnost měření. Nyní můžeme přistoupit k samotnému měření našeho zkoumaného materiálu.

Tepelnou a teplotní vodivost, měrnou tepelnou kapacitu a celkový koeficient přestupu tepla do okolí našeho zkoumaného prepregu jsme měřili na třech vzorcích. Vzorky byly připraveny podle předchozích požadavků na vzorky. Vzorky měly rozměry cca $25 \times 25 \times 0,8 \text{ mm}$. Emisivita použitého laku na černění činí $0,95$. Vzorky byly zahřáty na teplotu cca 50°C . Posléze byly ochlazovány v adiabatické komoře po dobu 10 minut. Tento průběh ochlazování je znázorněn na následujících obrázcích.



Obrázek 32. Celá křivka ochlazování prepregu



Obrázek 33. Porovnání závislosti ochlazování na čase ve vyseknuté části mezi námi naměřenou závislostí a vypočteným teoretickým modelem

Z vyseknuté části křivky ochlazování jsme určili termofyzikální a další parametry zkoumaného prepregu. Tyto parametry jsou uvedeny v následujících tabulkách 20, 21 a 22.

Tabulka 20. Vzorek 1

Měření	1	2	3	4	Průměr	Směrodatná odchylka	Procentuální chyba [%]
τ [s]	39,02	40,52	40,04	38,24	39,46	0,89	2,25
h [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]	25,96	25,49	25,57	26,14	25,79	0,27	1,04
c_p [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]	1746	1784	1777	1729	1759,0	22,46	1,28
α [$m^2 \cdot s^{-1}$] $\cdot 10^7$	3,777	3,636	3,81	3,934	3,79	0,11	2,80
k [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]	0,9019	0,888	0,9264	0,9306	0,9117	0,018	1,92
Bi [–]	0,0121	0,0121	0,0116	0,0119	0,0119	0,0002	1,70

Tabulka 21. Vzorek 2

Měření	1	2	3	4	Průměr	Směrodatná odchylka	Procentuální chyba [%]
τ [s]	39,28	37,69	39,61	32,35	37,23	2,91	7,82
h [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]	25,59	26,06	25,46	27,57	26,17	0,84	3,20
c_p [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]	1775	1738	1785	1574	1718,0	84,96	4,95
α [$m^2 \cdot s^{-1}$] $\cdot 10^7$	3,768	3,842	3,852	4,2	3,92	0,17	4,28
k [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]	0,9024	0,9007	0,9276	0,8913	0,9055	0,013	1,48
Bi [-]	0,0119	0,0121	0,0115	0,013	0,0121	0,0005	4,42

Tabulka 22. Vzorek 3

Měření	1	2	3	4	Průměr	Směrodatná odchylka	Procentuální chyba [%]
τ [s]	36,92	37,58	43,95	37,22	38,92	2,92	7,49
h [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]	26,24	26	24,04	26,09	25,59	0,90	3,52
c_p [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]	1724	1742	1871	1735	1768,0	59,81	3,38
α [$m^2 \cdot s^{-1}$] $\cdot 10^7$	3,934	3,9	3,733	3,915	3,87	0,08	2,07
k [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]	0,899	0,8995	0,9255	0,8993	0,9058	0,011	1,25
Bi [-]	0,0123	0,0122	0,011	0,0123	0,0120	0,0006	4,70

9.3.2. Vyhodnocení

Byla provedena série měření, jejíž průměrné výsledky, odchylky a procentuální chyby měření jsou uvedeny v tabulce 23.

Tabulka 23. Vyhodnocení tepelných vlastností zkoumaného prepregu + vypočtená hustota

Vzorek	1	2	3	Průměr	Směrodatná odchylka	Procentuální chyba [%]
τ [s]	39,46	37,23	38,92	38,54	0,95	2,46
h [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]	25,79	26,17	25,59	25,85	0,24	0,93
c_p [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]	1759	1718	1768	1748,33	21,76	1,24
α [$m^2 \cdot s^{-1}$] $\cdot 10^7$	3,79	3,92	3,87	3,86	0,05	1,35
k [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]	0,91173	0,9055	0,9058	0,91	0,003	0,32
ρ [$kg \cdot m^{-3}$]	1368,6	1349,7	1325,1	1347,80	-	-

10. Závěr

Tato diplomová práce se zabývala kompozitními materiály, přesněji pak laminátovými materiály s uhlíkovými vlákny. Členění celé práce a jednotlivých kapitol bylo navrženo tak, aby čtenář získal jasnou představu týkající se problematiky kompozitních materiálů.

V teoretické části práce byla vypracována literární rešerše, zahrnující kompozitní materiály jako jeden celek, následně jejich dělení do skupin, jejich jednotlivé části, složení, zpracování a výroba, a nakonec jejich možné využití. Všechny tyto poznatky byly doplněny obrázky ilustrujícími danou problematiku a tabulkami popisujícími různé vlastnosti již hotových kompozitů a laminátů či vlastnosti jejich jednotlivých částí.

V praktické části byl zkoumán materiál na bázi prepregu s označením *HexPly M49*. Na tomto materiálu (dále jen prepregu), byly provedeny zkoušky mechanických a tepelných vlastností. Z mechanických vlastností byla provedena tahová zkouška a zkouška tříbodovým ohybem.

U zkoušky tahem bylo k dispozici 6 vzorků. Na vzorcích kterých byla měřena pevnost v tahu, u jednoho vzorku byl změřen Youngův modul pružnosti E . Naměřená střední hodnota meze pevnosti v tahu činila 490 ± 22 MPa. Naměřená hodnota Youngova modulu pružnosti činila 45,2 GPa. Jak hodnoty pevností, tak hodnota modulu pružnosti, byly značně nižší, než udává materiálový list k danému prepregu dodaný. Dle dodaného listu by měla pevnost v tahu být 980 MPa a modul pružnosti 69 GPa. Naměřené hodnoty pevností dosahují však pouze 50% z tabulkové hodnoty a naměřený modul pružnosti dosahuje 65,5% z udávané tabulkové hodnoty. Nesoulad mezi naměřenými a tabulkovými hodnotami byl zdůvodněn špatným výrobním cyklem, či nedodržením několika částí výrobního cyklu. Pravděpodobně vlivem špatného výrobního cyklu pak mohlo dojít k nesprávnému přilnutí jednotlivých vrstev a vzniku vnitřních vad, jako jsou například vzduchové bubliny.

Nesprávné a nedostačující přilnutí jednotlivých vrstev bylo taktéž potvrzeno při další zkoušce mechanických vlastností, a to při zkoušce tříbodovým ohybem. Při této zkoušce bylo měřeno maximální napětí v ohybu a maximální průhyb. Naměřená střední hodnota napětí v ohybu činil 457 ± 52 MPa. Tato hodnota je opět daleko nižší, než udává materiálový

list. Podle materiálového listu je hodnota napětí v ohybu 900 MPa. Naměřené hodnoty pevností v ohybu vykazují 50,8% z udávané tabulkové hodnoty. Nesprávné a nedostačující přilnutí jednotlivých vrstev se pak projevuje smykem jednotlivých vrstev po sobě a rapidním poklesem napětí.

Poslední část experimentu se zabývala tepelnými vlastnostmi prepregu. Z tepelných vlastností byla z poklesu teploty nahřátého vzorku měřena tepelná a teplotní vodivost, měrná tepelná kapacita a celkový koeficient přestupu tepla do okolí. Pro ověření správnosti měření měřící aparatury byly provedeny měření na materiálech o známých hodnotách zkoumaných tepelných vlastností. Tyto ověřovací měření byly provedeny na hliníku a mědi, kde byla zjištěna dostatečná přesnost měření. Zkoumaný prepreg pak vykazoval tyto tepelné vlastnosti:

- specifická tepelná kapacita $c_p = 1748 \text{ [J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
- celkový koeficient přestupu tepla do okolí $h = 25,8 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$
- teplotní vodivost $\alpha = 3,86 \text{ [m}^2 \cdot \text{s}^{-1}] \cdot 10^7$
- tepelná vodivost $k = 0,91 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$

Seznam použité literatury

- [1] EHRENSTEIN, W., G.: *Polymerní kompozitní materiály*, Praha: Scientia, 2009, ISBN 978-80-86960-29-6.
- [2] DAĐOUREK, K.: *Kompozitní materiály: druhy a jejich použití*, Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007, ISBN 978-80-7372-279-1.
- [3] CHAWLA, K., K.: *Composite Materials, Science and Engineering*, Springer Verlag, New York, 1987, ISBN 0-387-96478-9 .
- [4] A.BAREŠ, R.: *Kompozitní materiály*, Praha, Nakladatelství technické literatury SNTL, 1988.
- [5] GEIER, M., H.: *Quality Handbook for Composite Material*, ASM International, 1999.
- [6] ASM INTERNATIONAL HANDBOOK COMMITTEE. *ASM Handbook Volume 21: Composites*. ASM International, 2001, 1201 s., ISBN 978-0-87170-703-1.
- [7] VASILIEV, V., V. & MOROZOV, E., V.: *Mechanics and Analysis of Composite materials*, Oxford: Elsevier, 2007, ISBN 978-0-08-045372-9.
- [8] CHAPMAN & HALL.: *Handbook of Composites: Second edition*, Londýn: Thomson Science, 1998, ISBN 0-412-54020-7.
- [9] Korínek Z.: *Kompozity – skriptum*, <http://www.volny.cz/zkorinek>.
- [10] JANČÁŘ, J.: *Úvod do materiálového inženýrství kompozitů*, ÚCHM FCH VUT Brno, 1999.
- [11] Machek, V., Sodomka, J. : *Polymery a kompozity s polymerní matricí. 4. část, Nauka o materiálu*, Praha, Nakladatelství ČVUT, 2008.
- [12] WEISS, Z., SIMHA-MARTYNKOVÁ, G., ŠUSTAI, O.: *Nanostruktura uhlíkových materiálů*, Ostrava: Vysokoškolský ústav chemie materiálů a Centrum nanotechnologií CPIT, VŠB-TUO, 2005, ISBN 80-7329-083-9.
- [13] *Composite materials: Fabrication Handbook #2*. Stillwater: Wolfgang Publications, Inc., 2009, ISBN 978-1-929133-93-2.

- [14] HexPly M49. *Hexcel*, [online]. 2008 [cit. 2012-04-14]. Dostupné z: http://hexcel.com/Resources/DataSheets/Prepreg-Data-Sheets/M49_eu.pdf
- [15] ČSN EN ISO 527-5. *Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 5: Zkušební podmínky pro plastové kompozity vyztužené jednosměrnými vlákny*. Zlín: Institut pro testování a certifikaci, 2010.
- [16] PAVEL, K., & KOLEKTIV.: *Materiálová diagnostika I*. Ostrava: Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství VŠB-TUO, 2011, ISBN 978-80-248-2520-5.
- [17] LENERT, J.: *Mechanika kompozitních materiálů*. Ostrava: Fakulta strojní VŠB-TUO, 2002, ISBN 80-248-0026-8.
- [18] ČSN EN ISO 14125. *Vlákny vyztužené plastové kompozity - Stanovení ohybových vlastností*. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [19] SARVAR, F., POOLE, N. J. and WITTING, P. A.,: *Journal o Electronic Materials*, 19, 12, 1345-1350, DOI:10.1007/BF02662823.
- [20] CUGNETET, D.,: *Thermal conductivity of structural glass fiber / epoxy composites a function of fiber orientation*, 2002.
- [21] Heat transfer coefficient in Wikipedia: *the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, [cit. 2012-04-14]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Heat_transfer_coefficient

Zbylé zdroje obrázků

Obrázek 15. *Materiály použité na tělo Boeingu 787*

[ZO 1] WWW: <http://www.faadooengineers.com/content/297-boeing-787-dreamliner-comes-to-india!!>

Obrázek 17. *Samonosná skořepina střední části supersportovního vozu Lamborghini Aventador*

[ZO 2] WWW: http://www.automobilrevue.cz/rubriky/technika/lehke-materialy-nove-pozadavky_40846.html

Obrázek 18. *Skořepiny sedadel pro vůz Nissan GTR*

[ZO 3] WWW: <http://www.gtrshop.cz/products/ostatni-karbonove-dopluky/>

Obrázek 19. *Forma splétání jednotlivých vrstev prepregu, tzv. kepr 2x2*

[ZO 4] WWW: http://www.skolil.cz/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=13&Itemid=122&lang=cz