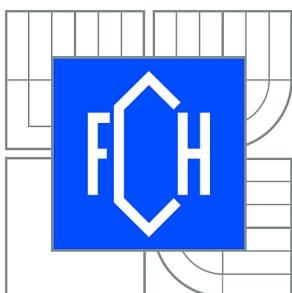




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA CHEMICKÁ
ÚSTAV CHEMIE MATERIÁLŮ

FACULTY OF CHEMISTRY
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE

MECHANICKÉ VLASTNOSTI VLÁKNOVÝCH KOMPOZITŮ PRO AUTOMOBILOVÉ APLIKACE

MECHANICAL PROPERTIES OF FIBER REINFORCED COMPOSITES FOR AUTOMOTIVE
APPLICATIONS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

ADAM BAYER

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. RNDr. JOSEF JANČÁŘ, CSc.

BRNO 2014



Vysoké učení technické v Brně
Fakulta chemická
Purkyňova 464/118, 61200 Brno 12

Zadání bakalářské práce

Číslo bakalářské práce: **FCH-BAK0752/2013** Akademický rok: **2013/2014**
Ústav: Ústav chemie materiálů
Student(ka): **Adam Bayer**
Studijní program: Chemie a chemické technologie (B2801)
Studijní obor: Chemie, technologie a vlastnosti materiálů (2808R016)
Vedoucí práce **prof. RNDr. Josef Jančář, CSc.**
Konzultanti:

Název bakalářské práce:

Mechanické vlastnosti vláknových kompozitů pro automobilové aplikace

Zadání bakalářské práce:

Cílem práce je navrhnout metodiku měření statických mechanických vlastností termoplastických kompozitů vyztužených krátkými deformovatelnými vlákny, provést sérii těchto měření a výsledky interpretovat pomocí existujících teorií.

Termín odevzdání bakalářské práce: 30.5.2014

Bakalářská práce se odevzdává v děkanem stanoveném počtu exemplářů na sekretariát ústavu a v elektronické formě vedoucímu bakalářské práce. Toto zadání je přílohou bakalářské práce.

Adam Bayer
Student(ka)

prof. RNDr. Josef Jančář, CSc.
Vedoucí práce

prof. RNDr. Josef Jančář, CSc.
Ředitel ústavu

V Brně, dne 31.1.2014

prof. Ing. Jaromír Havlica, DrSc.
Děkan fakulty

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá studiem mechanických vlastností vláknových kompozitů, které se lišily objemovým zlomkem a teplotou při měření. Jako matrice byl zvolen PMMA a v roli výztuže figuruje skelná tkanina. Teoretická část shrnuje současnou problematiku polymerních kompozitů v automobilovém průmyslu, jejich výrobní metody a způsoby impregnace. V rámci experimentální části byly připravovány vzorky blokovou polymerací z 30% roztoku PMMA v monomeru s iniciátorem v sušárně při 65 °C, kdy byla tkanina přímo rozložena v roztoku předpolymeru. U těchto vzorků byly prováděny tahové zkoušky na zařízení Zwick a byly porovnány výsledky s teoreticky vypočítanými hodnotami.

Abstract

Bachelor's thesis deals with studying mechanical features of fiber composites. As a matrix was chosen PMMA and as reinforcement was chosen glass fabric. Theoretical part sums up contemporary issues of polymer composites in automotive industry such as their production techniques and methods of impregnation. In experimental part were prepared samples by block polymerization of 30 % solution PMMA in monomer with initiator by 65° Celsius warmth oath, when was fabric directly unfolded in pre-polymer solution. On these samples were executed tensile tests by testing device Zwick and these samples were compared with results of theoretically calculated values.

Klíčová slova

kompozit, skelná tkanina, matrice, modul pružnosti, PMMA, automobilový průmysl, tahová zkouška

Key Words

composite, glass fabric, matrix, tensile modulus, PMMA, automotive industry, tensile test

BAYER, A. *Mechanické vlastnosti vláknových kompozitů pro automobilové aplikace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2014. 39 s. Vedoucí bakalářské práce prof. RNDr. Josef Jančář, CSc..

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citoval. Bakalářská práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího bakalářské práce a děkana FCH VUT.

.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu své práce prof. RNDr. Josefu Jančářovi, CSc. za odborné vedení a za vynaložený čas strávený při konzultacích. Dále bych rád poděkoval Ing. Petru Poláčkovi, Ph.D. a Ing. Radce Bálkové, Ph.D. za proškolení a pomoci při měření na přístrojích, využitých pro tuto práci. A v neposlední řadě také Bc. Marku Zbončákovi za odborné rady a věcné poznámky při experimentální části.

Obsah

Obsah	5
1 ÚVOD	7
2 TEORETICKÁ ČÁST	8
2.1 Kompozitní materiály	8
2.1.1 Rozdělení polymerních kompozitů	8
2.1.1.1 Dělení dle typu matrice	8
2.1.1.2 Dělení dle jiných kritérií	9
2.1.2 Typy vláken	9
2.1.2.1 Skleněná vlákna	9
2.1.2.2 Uhlíková vlákna	9
2.2 Využití kompozitů v automobilovém průmyslu	10
2.2.1 Výroba, trendy	10
2.2.2 Technologie D-LFT a D-LFT/ILC	10
2.2.3 Levná uhlíková vlákna pro automobilový průmysl LCCF	11
2.2.4 BMW i3	12
2.3 Rozhraní matrice – vlákno	12
2.3.1 Smáčení	12
2.3.2 Povrchová úprava vláken	13
2.3.3 Viskozita	14
2.4 Mechanika kompozitů	14
2.4.1 Statické tahové zkoušky	14
2.4.2 Teoretický výpočet modulu pružnosti u FRC	15
3 CÍL PRÁCE	16
4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	16
4.1 Použitý materiál	16
4.1.1 Matrice	16
4.1.2 Výztuž	16
4.1.3 Separátory forem	16
4.1.4 Použité zařízení	17
4.2 Příprava vzorků	17
4.2.1 Syntéza předpolymeru	17
4.2.2 Vytvrzovací reakce PMMA	18
4.2.3 Lisování	19
4.2.4 Řezání a úpravy vzorků před tahovou zkouškou	20
4.3 Proběhlá měření	20

4.3.1	Tahová zkouška	20
4.3.2	Termogravimetrická analýza (TGA)	21
4.3.3	Stanovení modulu pružností dynamickou mechanickou analýzou (DMA)	21
5	VÝSLEDKY A DISKUZE	22
5.1	Výsledky statických a dynamických zkoušek	22
5.2	Výsledky TGA	30
5.3	Porovnání výsledků s teoretickými výpočty	31
5.4	Snímky z CLSM	33
6	Závěr	34
7	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	36
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	38

1 ÚVOD

V průběhu několika posledních desetiletí se kompozitní materiály staly nedílnou součástí průmyslu. V současné době se s nimi setkáváme běžně a díky svým vlastnostem nacházejí využití v různých odvětvích, dokonce i v tak technologicky náročných, jako je letectví nebo kosmonautika. Příčina rozvoje kompozitů je jednoduchá – přidavkem výztuže do plastů nebo jiné spojité fáze měníme atributy tohoto materiálu a můžeme tedy docílit jeho lepších vlastností. Kromě zvýšení mechanických kvalit je v řadě případů vyztužování plastů doprovázeno i snížením výrobních nákladů. Příkladem může být například vrstva podlahovin z polyvinylchloridu plněného vápencem. Tyto materiály však mají i své nevýhody, mezi které patří například jejich recyklovatelnost, složitější teoretické odhady jejich mechanických vlastností nebo pevnost adheze v kontaktu matrice – výztuž.

Bakalářská práce shrnuje některé poznatky z oblasti polymerních kompozitů a poskytuje náhled na současnou problematiku těchto materiálů v automobilovém průmyslu. Experimentální část se věnuje přípravě vzorků PMMA/skelná tkanina a měření mechanických vlastností na univerzálním zařízení Zwick, které jsou srovnány s některými teoriemi pro výpočet teoretických hodnot.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Kompozitní materiály

Kompozitní materiály jsou heterogenní materiály tvořené ze dvou nebo více fází, které dělíme na spojitou a nespojitou. Spojitou fází nazýváme matrice a nespojitou fází výztuž nebo plnivo. Spojitá a nespojitá fáze se obvykle výrazně liší ve fyzikálních a chemických vlastnostech. Matrice je pro použití v konstrukčních aplikacích nevýhodná, neboť je křehká, má nízký modul pružnosti a nízkou pevnost. Vlákna, která se používají jako výztuže, jsou významně pevnější v tahu a obvykle tužší než matrice, avšak je velmi obtížné je udržet v prostorovém uspořádání a jsou velmi náchylná k poškození v agresivních prostředích.

Spojením těchto dvou složek vzniká materiál, který má výrazně lepší vlastnosti než jednotlivé komponenty. Z těchto vlastností je u kompozitních materiálů s polymerní matricí nejčastěji uváděna nízká měrná hmotnost, vysoká pevnost, dobrá houževnatost, odolnost vůči agresivnímu prostředí a další. Dalším specifickým u kompozitních materiálů je mezivrstva. Mezivrstvou rozumíme spojení na rozhraní mezi matricí a povrchem vlákna. U většiny kompozitních materiálů je velmi rozdílné složení matrice a výztuže a tato mezivrstva bývá zesilována úpravou vláken za účelem vytvoření chemických vazeb na rozhraní vlákno-matrice. Slabá mezivrstva má za následek špatný přenos napětí z matrice do výztuže. [1,2]

Pro kompozitní materiály je charakteristický tzv. synergismus, což znamená, že vlastnosti kompozitu jsou lepší, než by odpovídalo pouhému poměrnému sečtení vlastností jednotlivých složek. [3]

2.1.1 Rozdělení polymerních kompozitů

2.1.1.1 Dělení dle typu matrice

Kompozity s reaktoplastickou matricí jsou rozšířenějším typem. V roli matrice se nejčastěji setkáváme s nenasyčenými polyestery (UP), vinylestery (VE), epoxidy (EP) a fenolickými pryskyřicemi (PR). Vytvrzování reaktoplastů je proces, při kterém je v ideálním případě výsledkem jedna makromolekula s nekonečnou molární hmotností. Vytvrzování probíhá při určité teplotě rychlostí závislou na druhu pryskyřice a typu tvrdidla.

Nejčastěji používané *termoplastické kompozity* jsou na bázi polypropylenu (PP), polyamidů (PA), lineárních polyesterů, např. polyethylentereftalát (PET) a polymethylmethakrylát (PMMA). Termoplasty jsou za normální teploty pevné látky a teprve po zahřátí na teplotu zpravidla vyšší než 200 °C jsou dostatečně tekuté a mohou být použity pro aplikaci. [1,4]

2.1.1.2 Dělení dle jiných kritérií

Další dělba může být dle typu nespojité fáze. Setkáváme se s *částicovými*, vyztuženými např. práškovými plnivými a *vláknovými* kompozity. Vláknové kompozity můžeme dělit ještě na *dlouhovláknové* (poměr délka/průměr je větší než 100) a *krátkovláknové* ($L/D < 100$). Další důležitý pojem je pak *lamina*, kterou rozumíme vrstvu kompozitu, která dvěma rozměry mnohonásobně převyšuje jeho tloušťku. *Laminát* je pak kompozit, složený z navrstvených lamin, majících různou orientaci vláken. [1]

2.1.2 Typy vláken

2.1.2.1 Skleněná vlákna

Jsou nejpoužívanější výztuží pro kompozity. Jsou složeny ze skelných oxidů, kdy je nejvíce zastoupena silika (SiO_2), dále Al_2O_3 , CaO , Na_2O , Fe_2O_3 a B_2O_3 a další. Složení oxidů se mění dle požadovaného typu skleněných vláken a tedy i jejich vlastností. Skleněná vlákna dělíme na tři základní typy.

E-sklo je nejběžnějším a nejlevnějším typem, má dobré mechanické a elektrické vlastnosti, je nevodivé. C-sklo je odolné vůči agresivnímu prostředí, jeho mechanické vlastnosti však nedosahují hodnot jako u E-skla. S-sklo je dražší než oba předchozí typy, ale má vyšší pevnost, modul pružnosti a teplotní odolnost. [5]

Skelná vlákna jsou vyráběna tavením směsi oxidů v nádrži, vytahováním vláken ze sklářského kmene a následným splétáním do pramenců.

Existují i další, méně používané druhy skelných vláken, jako například D-sklo (D pro dielektrické vlastnosti), L-sklo (L pro jeho zvýšený obsah olova – *lead* z angličtiny) a další. [4]

2.1.2.2 Uhlíková vlákna

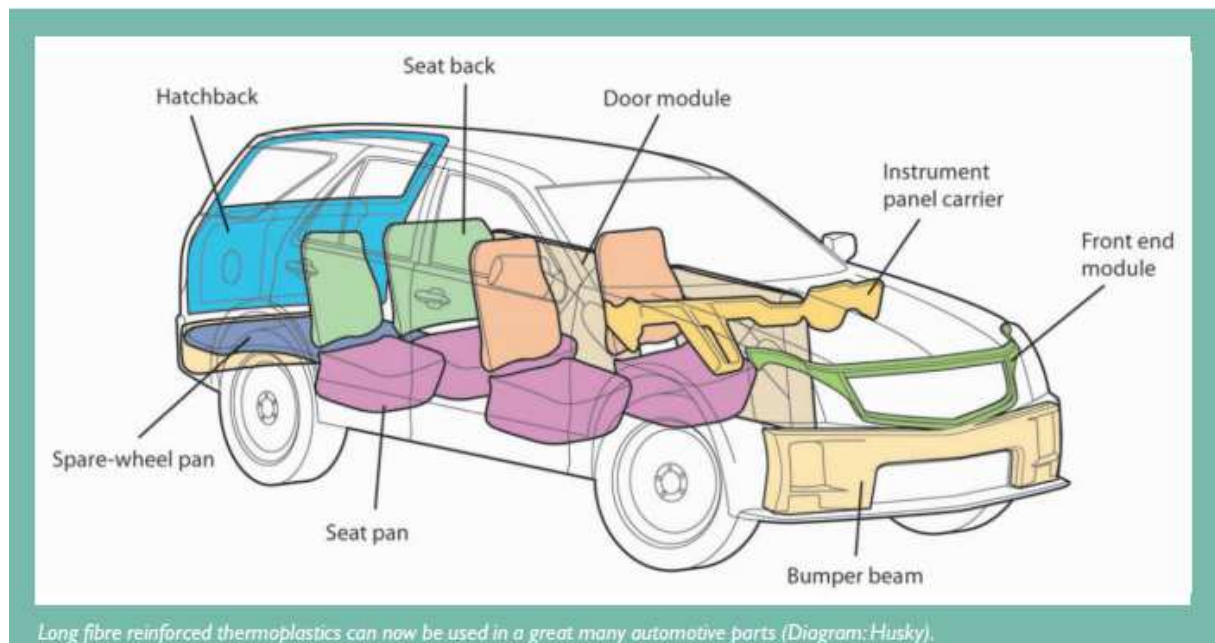
Mají vysokou pevnost, vysoký modul pružnosti, nízkou měrnou hmotnost a vysokou teplotní odolnost (vyrábějí se při teplotě až 2000 °C). Vyrábějí se z viskózních nebo polyakrylonitrilových (PAN) vláken a alternativně z tzv. anizotropní smoly zvláknované v tavenině. Uhlíková vlákna se dnes vyrábí převážně z vláken PAN. Hlavní proces při této výrobě se nazývá karbonizace. Ta probíhá při teplotě od 1000 do 1800 °C, kdy se v inertním prostředí odstraňuje z vláken vodík a snižuje se obsah dusíku a kyslíku. Po karbonizaci se může provést grafitizace, při které se dosahuje ještě vyšších teplot a obsah uhlíku je ještě vyšší než při karbonizaci. Vytvořené mikrokrystaly vedou k větší tuhosti vláken. Jejich cena je však mnohonásobně vyšší. [1]

Mezi další typy vláken, která se často používají, patří např. aramidová (obch. název Kevlar), čedičová, borová, UHMWPE, azbestová a další.

2.2 Využití kompozitů v automobilovém průmyslu

2.2.1 Výroba, trendy

Při výrobě vozidel poháněných na elektrický pohon a automobilů s hybridním pohonem je používáno značné množství kompozitních materiálů. Snížení hmotnosti vozidla umožňuje delší výdrž baterie a jeho dojezd. U běžných automobilů se spalovacím motorem se kompozitní díly zatím využívají především v interiérech a pod karoserií. Samotná karoserie je pak vyráběna z ocelových a hliníkových prvků. Naopak u automobilů konstruovaných pro vysoký výkon a zejména u prototypů jsou z kompozitních dílů vyráběny i karoserie. Podíl vyztužených plastů v automobilovém průmyslu v posledních letech roste a poptávka se zvyšuje. [11]



Obr. 1: příklad využití FRC v automobilech [9]

Mezi nejčastější kompozitní díly u běžných aut patří doplňky, jako například palubové desky, nárazníky, podlahové panely a další...

V roce 2006 byla globální výroba termoplastů, vyztužených dlouhými vlákny asi 160 – 190 kiloton. Přibližně 80 % materiálu bylo pro automobilový průmysl. Tyto hodnoty mají být během dalších pár let ještě ve vzrůstu. [9]

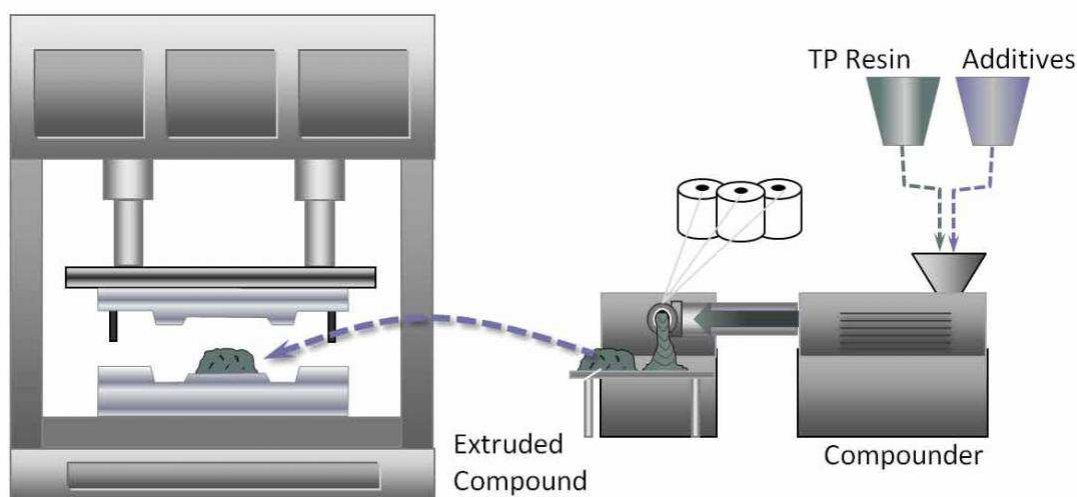
2.2.2 Technologie D-LFT a D-LFT/ILC

Direct long fiber thermoplastic molding (D-LFT) je proces výroby krátkovláknových termoplastických kompozitů, který vychází z metod SMC a BMC. Sestává se ze dvou

extrudérů. V prvním dochází k míchání termoplastické matrice spolu s aditivou. Ve druhém extrudéru jsou přimíchána sekaná vlákna z rovingů a tato směs vychází pomocí šneku na transportní pás k dolisování. Jako matrice se v této výrobní proceduře nejčastěji používá polypropylen. Podíl vyztužených skelných vláken se pohybuje mezi 20 – 40 hm. %. Výhodou tohoto procesu je velmi dobrá reprodukovatelnost, nízká cena surovin pro výrobu a nenáročná obsluha. Nevýhodami jsou cena samotné linky, náročnost na údržbu a vysoká spotřeba energie (vysoké tlaky a plastifikační teplota). [10,11]

ILC (In-line compounding) je ještě vyspělejší metoda. V tomto případě jsou sekané rovingy rovnou přidávány do směsi matrice a aditiv. Proces se tedy odehrává pouze v jednom extrudéru, ze kterého je šnekem vyháněna hmota na vylisování. [9]

Long Fiber Thermoplastic Molding



Obr. 2: linka D-LFT

2.2.3 Levná uhlíková vlákna pro automobilový průmysl LCCF

V roce 2012 byla Oddělením pro energii Spojených států amerických přidělena dotace 9 milionů dolarů firmě The Dow Chemical Company. Ta má ve spolupráci s automobilkou Ford a institucí Oak Ridge National Laboratory provést výzkum v oblasti levných uhlíkových vláken pro automobilový průmysl. Cílem je vyvinout nižší procesní náklady při výrobě uhlíkových vláken použitím polyolefinů místo konvenčního polyakrylonitrilu, kdy má být cena vyráběných kompozitů nižší až o 20 %. Automobilka Ford se zavázla snížit hmotnost automobilů o 340 kg do roku 2020. V nejbližších letech hodlá vyrábět přední kapoty z uhlíkových vláken. [5,7]

2.2.4 BMW i3

Automobilka BMW začala v listopadu roku 2013 sériově vyrábět první elektromobil. Karoserie tohoto vozidla je zhotovena částečně z hliníku a nemalá část je vyrobena z plastu vyztuženého uhlíkovými vlákny. Hmotnost tohoto vozidla je 1195 kg. Na počátku roku 2014 byl tento typ vozidla zpřístupněn i zahraničnímu trhu. [8]



Obr. 3: kompozitní díl BMW i3

2.3 Rozhraní matrice – vlákno

2.3.1 Smáčení

Smáčení je jeden ze základních faktorů určující chování na styku rozhraní matrice-vlákno. Práce, potřebná k rozdělení kapalné a pevné fáze a vytvoření rozhraní kapalina-plyn a pevná látka-plyn, se nazývá adhezní práce. Platí

$$w_a = \gamma_{lg} + \gamma_{sg} - \gamma_{sl}, \quad (1)$$

kde γ je povrchové napětí dvou sousedních fází.

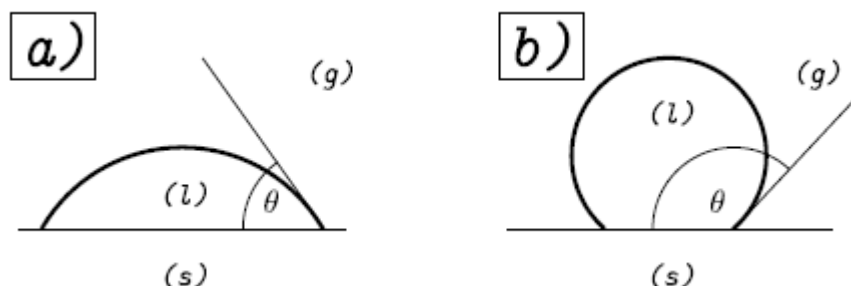
Práce, potřebná k odtržení souvislého sloupce kapaliny o určitém průřezu na dvě části tak, aby mezi nimi zůstal plyn, se nazývá kohezní práce. Pro kohezní práci platí vzorec

$$w_k = 2 \cdot \gamma_{lg} = 2\gamma. \quad (2)$$

Rozdíl mezi adhezní a kohezní prací se nazývá roztírací koeficient

$$S_r = w_a - w_k \quad (3)$$

Při styku kapaliny s povrchem pevné fáze se ustálí rovnováha mezi adhezními a kohezními silami a vytvoří se fázové rozhraní, kde kapalina smáčí povrch pod úhlem θ .



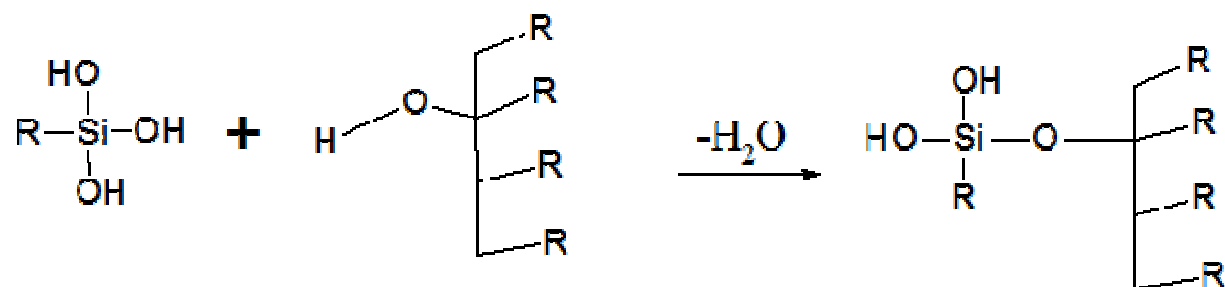
Obr. 4: Smáčení pevné fáze kapalnou [12]

Pokud je roztírací koeficient záporný, na povrchu pevné fáze se utvoří kapky. Je-li roztírací koeficient kladný, kapka bude mít tendenci povrch tuhého tělesa smáčet. Pro určení převažujících sil platí Youngova rovnice

$$\gamma_{sg} = \cos \theta_{lg} + \gamma_{sl} \quad (4)$$

2.3.2 Povrchová úprava vláken

Povrchová úprava vláken je dnes především u skelných vláken samozřejmostí. Tyto úpravy patří do tzv. řízených mezivrstev. Tyto úpravy mají řízenou strukturu a vlastnosti pro povrch vláken. Během procesu výroby se pro úpravu vláken používají tzv. apretace (též šlichty), ty mají za úkol podpořit adhezi vlákna k určitému typu matrice. Nejčastěji se pro tyto účely využívají organosilany, které mají schopnost na povrchu skleněných vláken kondenzovat a vytvářet tak poly-siloxany. Místo atomu křemíku lze použít podobné prvky (např. titan). Při kondenzaci může odstupovat i jiná nízkomolekulární látka, jako například HCl. Hydroxylovou skupinu lze substituovat pomocí např. $ZnCl_2$, $SOCl_2$, PCl_3 , ad ...[2,5]



Obr. 5: Kondenzace silanů na povrchu skla

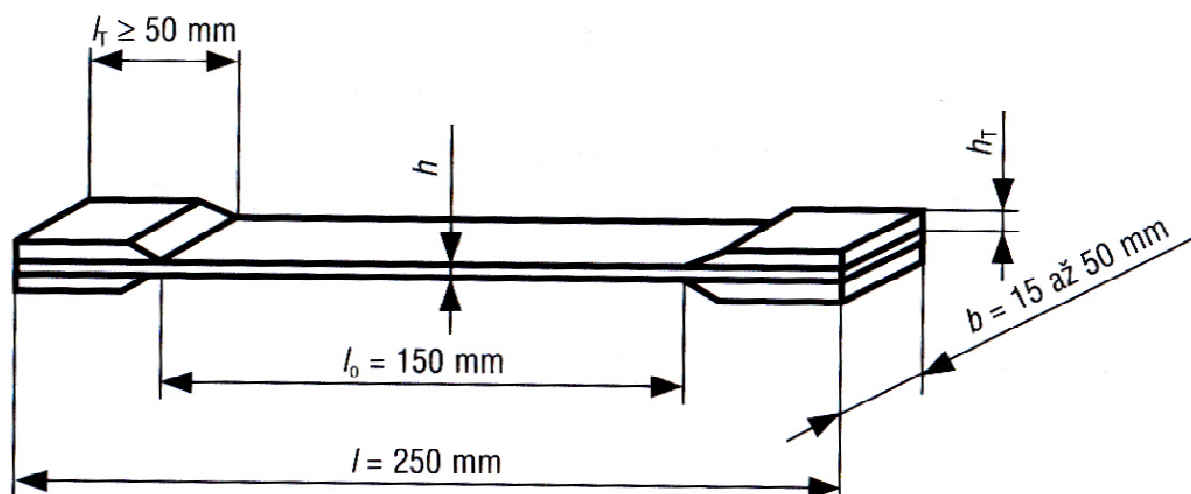
2.3.3 Viskozita

Viskozita je jednou z největších překážek masivnějšího rozmachu termoplastických kompozitů. Termosetické pryskyřice disponují o cca 3 řády vyšší viskozitou taveniny, než je u termoplastů. Díky této skutečnosti se při zpracování tavenin u termoplastů zvyšují energetické náklady, neboť abychom dosáhli dobré impregnace, je nutno taveninu držet při teplotách zpravidla vyšších než 200 °C (záleží na typu matrice). Sofistikovanější technologie při výrobě vyztužených termoplastů využívají i vysokých tlaků.

2.4 Mechanika kompozitů

2.4.1 Statické tahové zkoušky

Statické tahové zkoušky kompozitních materiálů se provádí při upnutí materiálu do čelistí zařízení, kdy je na vzorek vyvíjeno namáhání v tahu. Pro tahové zkoušky kompozitních materiálů jsou navržena tělesa v příslušných normách (ČSN EN ISO 527-1 až 5), zohledňující stavbu kompozitů. U materiálů s tkaninovou výztuží a laminátů jsou vhodná tělesa se zesílenými částmi v místě upnutí.



Obr. 6: Náčrt tělesa pro tahové zkoušky dle normy ISO 527 [2]

Závislost zvyšování napětí materiálu na jeho absolutní prodloužení nám popisuje tahová křivka, která je výstupem tahové zkoušky. Napětím rozumíme velikost vkládané síly na plochu materiálu, které je definováno v pascálech. Absolutní prodloužení je bezrozměrná veličina. Platí tedy

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (5)$$

kde l_0 je původní délka tělesa a Δl je rozdíl délky tělesa prodlouženého a původního. Pro napětí platí vztah

$$\sigma = \frac{F}{S}, \quad (6)$$

kde F [N] je vkládaná síla tahového přístroje a S [m²] je průřez vzorku.

Pro výpočet modulu pružnosti u materiálů používáme *Hookův zákon*.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (7)$$

2.4.2 Teoretický výpočet modulu pružnosti u FRC

Pro teoretický výpočet modulu pružnosti s jednosměrně orientovanými vlákny používáme směšovacího pravidla

$$E = \eta \cdot E_f V_f + E_m V_m, \quad (8)$$

kde V_f a V_m jsou objemové zlomky vláken a matrice. η je parametr efektivnosti výztuže vyjadřující účinnost adheze matrice na výztuž. Tato bezrozměrná veličina nabývá hodnot 0 – 1. Pro dlouhováknové kompozity se pohybuje okolo 0,8. [1]

Pro konstrukční účely byla v roce 1967 Halpinem a Tsaiem odvozena rovnice pro výpočet modulu pružnosti

$$E = \frac{E_m \cdot (1 + \xi \eta V_f)}{(1 - \eta V_f)}, \quad (9)$$

kde parametr efektivnosti výztuže je dán vzorcem

$$\eta = \frac{\frac{E_f}{E_m} - 1}{\frac{E_f}{E_m} + \xi}. \quad (10)$$

Halpinova-Tsaiova rovnice obsahuje konstantu ξ , která je funkcí poměru bočního zkrácení při podélném prodloužení, tedy *Poissonova poměru*. Tuto hodnotu při výpočtu modulu pružnosti u vláknových kompozitů v podélném směru lze zjednodušit jako $\xi = 1$. [5,13]

3 CÍL PRÁCE

Pro experimentální část bakalářské práce byl vybrán kompozit s termoplastickou maticí (PMMA) vyztužený skelnými vlákny. Cílem je připravit sérii vzorků o různých vlastnostech, tyto vlastnosti pak interpretovat pomocí naměřených výsledků a srovnat je s hodnotami teoreticky vypočítanými. Pro přípravu vzorků byla zvolena skelná tkanina s obousměrně orientovanými vlákny. Tkanina byla obstarána v pěti různých gramážích, přičemž ze dvou typů tkanin byly navíc zhotoveny vrstvené lamináty. Pro zjištění potenciálu kompozitů na bázi PMMA a skelných vláken v automobilovém průmyslu je zapotřebí provést tahové zkoušky i při zvýšené teplotě, jakožto simulaci přímého pobytu na slunci.

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

4.1 Použitý materiál

4.1.1 Matrice

Pro přípravu předpolymeru byl použit PMMA ve formě granulátu a tekutý monomer metylmetakrylátu (MMA). Další použitou chemikálií byl iniciátor dibenzoylperoxid (DBP).

Tab. 1: Použité chemikálie

Materiál	Název produktu	Výrobce	CAS	$\rho_{25^\circ\text{C}}$ [g·cm ⁻³]	Mr
PMMA granulát	Plexiglas 8N	Evonik Industries	9011-14-7	1,188	-
MMA	Methyl methacrylate	Sigma – Aldrich	80-62-6	0,936	100,12
DBP	Benzoyl peroxide	Sigma – Aldrich	94-36-0	1,334	242,33

4.1.2 Výztuž

Jako výztuž byla použita skelná, dvousměrná, povrchově upravená tkanina. Dodavatelem je firma DCH Sincolor. Tkanina je z E-skla. Tloušťka jednotlivých vláken ve vlákenných svazcích je 11 μm . Pro zhotovení vzorků byly použity tkaniny o gramážích 80, 110, 140, 220 a 350 g·m⁻². Hustota udávaná výrobcem je 2,6 g·cm⁻³. Modul pružnosti 73 GPa.

4.1.3 Separátory forem

Při vytvrzování ve formě byl použit vosk Mold release od firmy TR Industries. Při lisování za teploty 230 °C byl pro separační účely použit silikonový olej Silkal 93 od firmy Coyote. V obou případech se jedná o prostředky, které nejsou reaktivní s maticí.

4.1.4 Použité zařízení

- Magnetická míchačka
- sušárna s odtahem vzduchu VENTICELL 111 (BMT Medical Technology)
- lis do 300 kN (Fontijne Grotness BV)
- frézovací přístroj MICROMOT 50/E (PROXXON)
- termogravimetr TGA Q500 (TA Instruments)
- univerzální zkušební zařízení ZWICK Z010/TH2A (Zwick-Roell)
- dynamický mechanický analyzátor RSA-G2 (TA Instruments)
- konfokální mikroskop LEXT OLS 3000 (Olympus)

4.2 Příprava vzorků

4.2.1 Syntéza předpolymeru

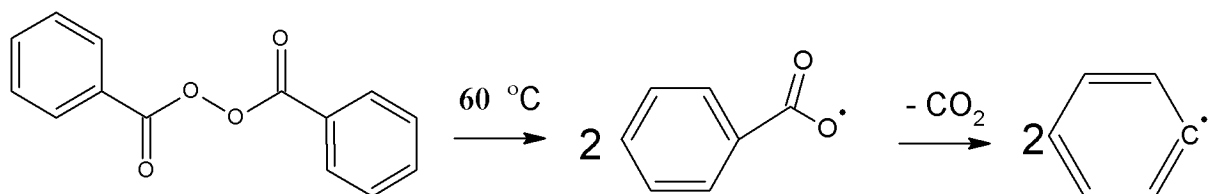
Pro přípravu předpolymeru byl rozpuštěn granulovaný PMMA v roztoku monomeru (MMA) pomocí aparatury pro reflux tak, aby byl hmotnostní zlomek tohoto roztoku 30 %. Tento roztok byl na magnetické míchačce smíchán s práškovým DBP a spolu s tkaninou přenesen do formy natřené separačním voskem Mold Release. Množství DBP bylo vždy 1 % hm. vzhledem k hmotnosti roztoku. Vytvrzování probíhalo v sušárně VENTICELL 111 při teplotě 65 °C.



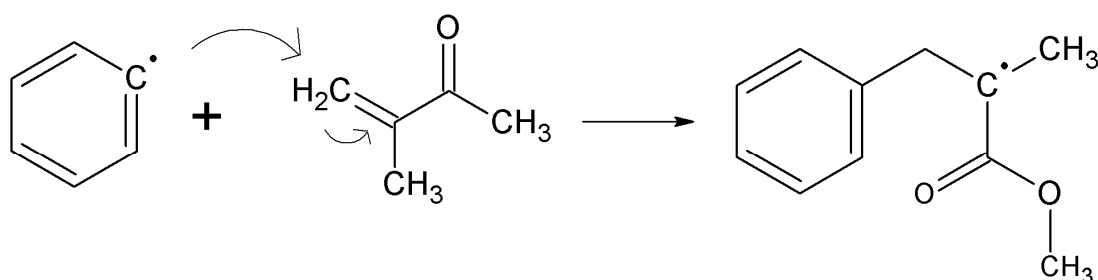
Obr. 7: Roztok PMMA v monomeru a tkanina před vytvrzením

4.2.2 Vytvrzovací reakce PMMA

Polymerace PMMA probíhá podle 3 základních stupňů: iniciace, propagace a terminace. Při teplotě okolo 60 °C se začíná málo stabilní dibenzoylperoxid rozpadat a za úniku CO₂ poskytuje dva volné radikály. Volný radikál atakuje volnou vazbu monomeru a vzniká nové aktivní centrum.

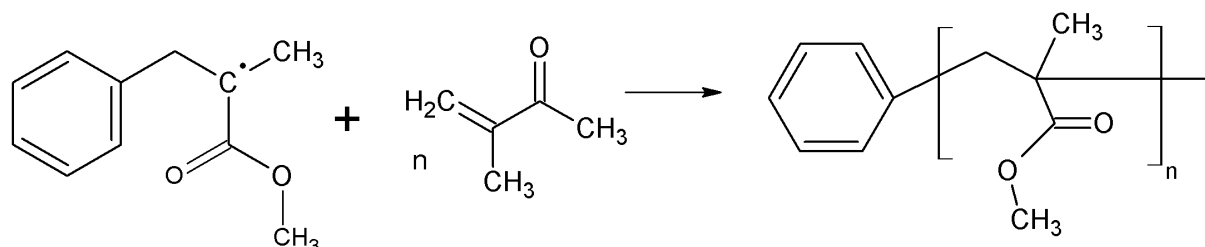


Obr. 8: Iniciace



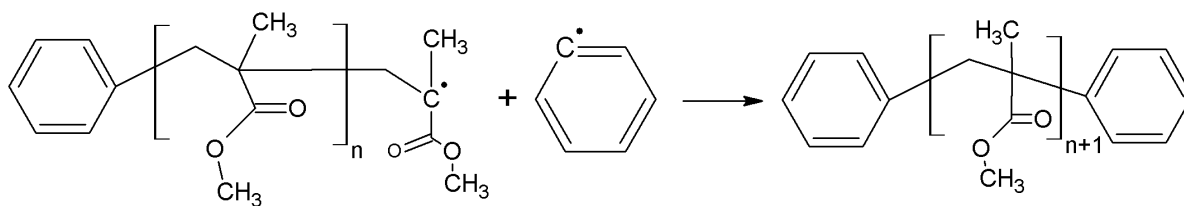
Obr. 9: Vznik aktivního centra

Při propagaci dochází k adici volného radikálu na dvojnou vazbu monomeru a vzniká nové aktivní centrum.



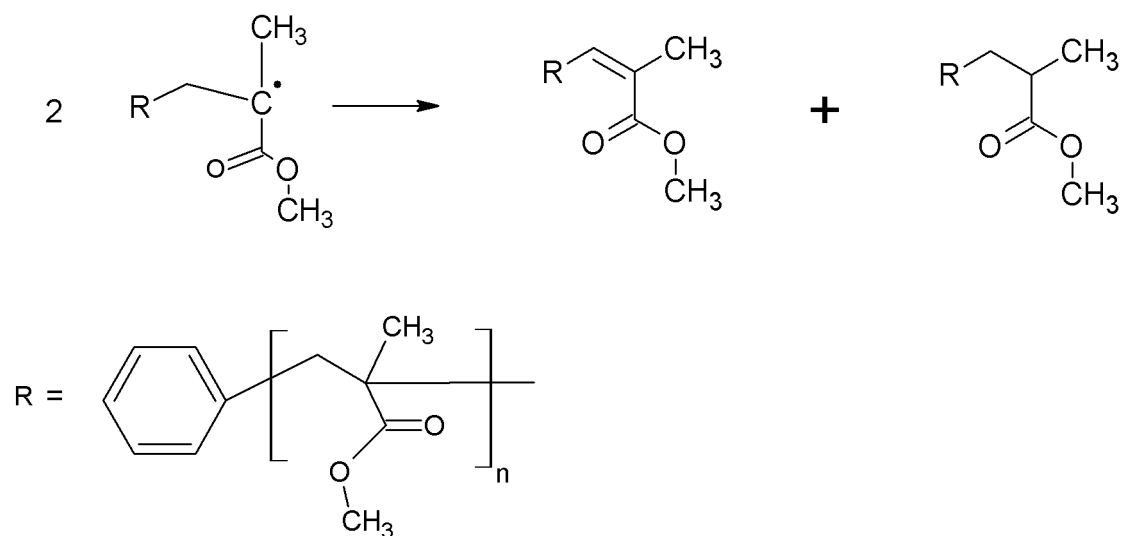
Obr. 10: Propagace

U PMMA jsou dva typy terminace – rekombinace dvou radikálů (častější případ) nebo disproportionace. Při rekombinaci jsou dva radikály spojeny kovalentní vazbou a růst aktivních center je ukončen.



Obr. 11: Terminace rekombinací (jedna z možností)

Při terminaci disproporcionací vznikají dvě makromolekuly, u nichž je jedna zakončena nasycenou koncovou skupinou a druhá je zakončena koncovou skupinou nenasycenou.



Obr. 12: Terminace disproporcionací

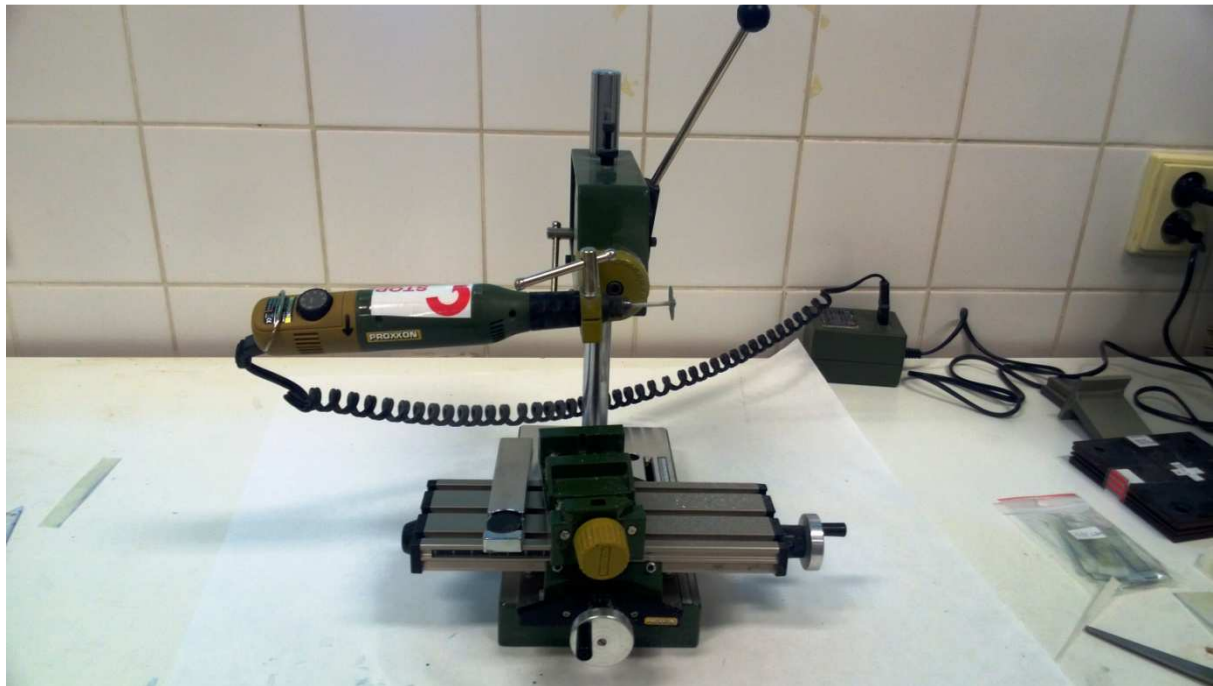
4.2.3 Lisování

Vytvrzené kompozity, které byly vyjmuty z formy po blokové polymeraci, vykazovaly velké množství defektů, způsobených během vytvrzování. Materiál obsahoval hodně bublinek a místa s obnaženou tkaninou, která nebyla dostatečně prosycena matricí. Z tohoto důvodu byly tyto laminy dodatečně prolisovány při zvýšené teplotě v lisu Fontijne. Lisovací teplota byla 235 °C, aby došlo opět k plastifikaci polymeru. Při síle 130 – 170 kN byly laminy lisovány po dobu 10 minut.

Při pokusech o výrobu kompozitu vylisováním dvou PMMA desek a následným slisováním obou desek i s tkaninou bylo dosaženo výrobků s místy obnaženou tkaninou stejně jako při samotné polymeraci v sušárně. Kvalita impregnace byla uspokojivá až tehdy, kdy byly PMMA desky příliš široké a objemový zlomek výztuže v materiálu byl zanedbatelný.

4.2.4 Řezání a úpravy vzorků před tahovou zkouškou

Veškeré vzorky kompozitů byly řezány na frézovacím přístroji s nástavcem pro řezání. U vzorků byly zvoleny rozměry 10x70 mm. Tloušťka se pohybovala v rozmezí 0,4 – 0,9 mm v závislosti na objemovém zlomku tkaniny. Šířka a délka vzorků byly tedy zhruba trojnásobně zmenšeny oproti hodnotám udávaným v normě ČSN ISO 527. Důvodem byla časově náročná příprava kompozitů. Vzorky PMMA bez výztuže byly vyříznuty do tvaru „dogbone“ dle normy udávající tvar těles pro tahové zkoušky polymerů. PMMA za zvýšené teploty na tahové zkoušce byl příliš měkký a jeho modul pružnosti v tahu musel být vyhodnocen pomocí dynamické mechanické analýzy.



Obr. 13: Frézovací zařízení PROXXON MICROMOT 50/e

Vzorky FRC byly jeden cm od každého kraje z obou stran zbroušeny a opatřeny z každé strany další vrstvou ze stejného materiálu. Vrstvy byly přilepeny vteřinovým lepidlem na bázi kyanoakrylátu.

4.3 Proběhlá měření

4.3.1 Tahová zkouška

Tahová zkouška byla provedena při laboratorní teplotě a při teplotě 80 °C na univerzálním zařízení Zwick. Vzorky byly v místech pro upnutí před měřením vždy ještě dodatečně zbroušeny, aby nedocházelo k jejich vykluzování z čelistí.

Tab. 2: Parametry testu

Rychlost zatěžování	5 mm/min
Velikost přepětí	8 N
Rychlost přepětí	1 mm/min
Interval výpočtu modulu pružnosti	$\varepsilon = 0,05 - 0,25 \%$
Zaznamenávání dat po 0,5 s	

4.3.2 Termogravimetrická analýza (TGA)

Pro co nejpřesnější hodnoty objemových zlomků skla ve vzorcích byly vzorky s tkaninou o gramáži 80, 110, 140 g·m⁻² a oba typy laminátů podrobeny termogravimetrické analýze. Vzorky s tkaninou o gramáži 220 a 350 g·m⁻² byly zváženy a zjištěny početně.

Termogravimetrie je metoda, při které můžeme sledovat procesy spojené se změnou hmotnosti měřeného vzorku při postupném zvyšování teploty nebo při izotermickém režimu. Termogravimetrické přístroje disponují vysoce citlivými mikrováhami, které dokážou odečíst i velmi nepatrné změny hmotnosti. Vzorek je umístěn na mikrováhy a software, kterým je přístroj vybaven, zaznamenává data, v našem případě teplotu, hmotnost a čas. [14]

Pro účel bakalářské práce byla zvolena rychlost ohřevu 20 °C/min, koncová teplota byla 460 °C.

4.3.3 Stanovení modulu pružností dynamickou mechanickou analýzou (DMA)

DMA je metoda, která sleduje viskoelastické chování materiálu, kdy kromě zvoleného teplotního programu, je vzorek podroben i oscilující síle o volitelné frekvenci. Touto metodou lze stanovit různé vlastnosti a fázové přeměny, jako např. teplotu skelného přechodu, teplotu tání, viskozitu, krystalizaci materiálu a mimo jiné též *elastický* a *ztrátový modul*. Tyto veličiny představují dva při zvyšující se teplotě měnící procesy: elasticitu a viskozitu. Závislost mezi moduly určíme pomocí tzv. ztrátového činitele $\tan \delta$, pro který platí vztah

$$\tan \delta = \frac{E_{ztr}}{E_{el}}. \quad (11)$$

Výstupem měření jsou 3 křivky. Při určování směsného modulu pružnosti je třeba z vlastností polymeru při dané teplotě určit, kterou křivkou se řídit. [15,16]

5 VÝSLEDKY A DISKUZE

5.1 Výsledky statických a dynamických zkoušek

Pro každý vzorek bylo provedeno celkem 10 měření tahovou zkouškou na univerzálním tahovém zařízení Zwick. Výsledky a parametry jednotlivých vzorků jsou uvedeny v tabulkách níže. Při měření vzorků s tkaninou s gramáží 350 g·m⁻² docházelo k vykluzování vzorku z čelistí. U těchto vzorků je pevnost vyšší než naměřená. Na grafu níže jsou ukázkové tahové křivky pro měření za lab. teploty a za zvýšené teploty. V tabulkách jsou naměřená data. Některé křivky mají zpočátku výrazně nelineární průběh, který je zapříčiněn tím, že některé vzorky byly po vytvrzení lehce zdeformované ohybem. Modul pružnosti byl pak u těchto křivek přepočítán metodou lineární regrese, kdy byla použita data v lineárnější části křivky. Pro srovnání tahových křivek byla pro lepší orientaci v grafech zvolena vždy jedna tahová křivka z jedné sady. Vzájemné srovnání modulů pružnosti mezi vzorky měřenými při laboratorní a zvýšené teplotě je v sloupcovém grafu.

Tab. 3: Hodnoty Youngova modulu, pevnosti a max. prodloužení pro 80 g·m⁻² při laboratorní teplotě a 80 °C

č. vzorku	<i>E</i> -modul [MPa]	<i>R</i> _m [MPa]	ε max [%]	<i>E</i> -modul [MPa]	<i>R</i> _m [MPa]	ε max [%]
teplota [°C]	lab.			80		
1	5481,0	88,9	2,15	2651,8	59,9	2,76
2	6271,2	103,6	2,19	3155,6	85,3	3,92
3	6405,3	94,9	3,33	3196,6	43,4	1,86
4	4610,0	103,4	1,79	2292,4	67,8	3,64
5	6039,6	103,7	3,15	2909,6	81,3	3,84
6	4008,9	85,0	2,24	2166,3	64,6	3,61
7	4725,3	89,4	2,86	2286,5	73,8	3,56
8	4574,3	108,8	2,50	2701,2	77,4	3,59
9	4916,0	103,7	2,68	2481,5	67,1	3,40
10	5962,7	99,9	3,50	2234,9	62,5	3,55
průměr	5299,4	98,1	3,09	2607,6	68,3	3,34
smodch [%]	15,0	7,8	20,1	13,8	16,8	16,6

Tab. 4: Hodnoty Youngova modulu, pevnosti a max. prodloužení pro 110 g·m⁻² při laboratorní teplotě a 80 °C

č. vzorku	<i>E</i> -modul [MPa]	<i>R_m</i> [MPa]	ε max [%]	<i>E</i> -modul [MPa]	<i>R_m</i> [MPa]	ε max [%]
teplota [°C]	lab.			80		
1	5523,3	94,3	2,36	2997,4	88,6	3,97
2	5539,8	94,3	2,36	2481,3	71,8	4,24
3	5735,2	105,6	2,63	3488,4	96,9	3,47
4	4899,2	101,8	3,00	2653,1	72,0	3,40
5	5429,8	109,3	2,86	1965,4	56,0	3,45
6	5330,7	106,7	2,75	3115,0	89,1	3,94
7	4832,9	109,1	3,29	1633,1	61,9	4,00
8	5275,0	87,7	2,21	1958,8	63,9	3,73
9	5503,5	110,9	2,85	3521,8	89,5	3,26
10	5732,3	96,5	2,32	1802,9	57,2	3,80
průměr	5380,2	101,6	2,66	2561,7	74,7	3,73
smodch [%]	5,4	7,4	12,4	26,0	19,2	8,1

Tab. 5: Hodnoty Youngova modulu, pevnosti a max. prodloužení pro 140 g·m⁻² při lab. teplotě a 80 °C

č. vzorku	<i>E</i> -modul [MPa]	<i>R_m</i> [MPa]	ε max [%]	<i>E</i> -modul [MPa]	<i>R_m</i> [MPa]	ε max [%]
teplota [°C]	lab.			80		
1	5496,2	108,3	3,44	3073,4	104,3	4,43
2	5408,7	154,9	4,22	2943,1	81,3	3,20
3	4987,8	141,7	4,57	2451,7	102,3	4,52
4	6015,1	163,2	4,32	3104,1	104,6	4,56
5	5431,5	162,0	4,86	2857,6	107,1	4,23
6	5062,3	112,7	4,08	2778,9	99,1	3,91
7	5107,5	142,2	4,61	3135,3	115,4	4,64
8	5840,3	166,8	4,58	2844,3	94,3	3,90
9	5508,6	141,8	4,56	2775,8	94,8	4,34
10	4976,4	111,3	3,76	2858,1	106,5	4,61
průměr	5383,4	140,5	4,30	2882,2	101,0	4,24
smodch [%]	6,6	15,2	9,6	6,6	8,7	10,1

Tab. 6: Hodnoty Youngova modulu, pevnosti a max. prodloužení pro 220 g·m⁻² při lab. teplotě a 80 °C

č. vzorku	E-modul [MPa]	R _m [MPa]	ε max [%]	E-modul [MPa]	R _m [MPa]	ε max [%]
teplota [°C]	lab.			80		
1	7209,0	91,6	1,98	4590,9	118,8	3,15
2	8170,1	153,5	3,57	3300,5	105,5	4,28
3	7157,6	129,2	3,15	4721,6	148,1	4,00
4	7186,4	115,9	2,76	3662,6	114,6	3,89
5	6917,9	137,7	3,35	3601,8	122,8	4,09
6	6495,5	110,1	2,92	3406,9	122,7	4,29
7	7598,7	117,6	2,52	5151,1	160,3	4,16
8	7325,3	134,9	3,05	4676,6	126,0	3,54
9	6760,6	130,5	2,85	4303,6	121,7	3,59
10	6217,7	131,9	3,46	4009,4	104,2	3,68
průměr	7103,9	125,3	2,96	4142,5	124,5	3,87
smodch [%]	7,4	13,0	15,2	6,6	8,7	9,1

Tab. 7: Hodnoty Youngova modulu, pevnosti a max. naměřeného prodloužení pro 350 g·m⁻² při lab. teplotě a 80 °C

č. vzorku	E-modul [MPa]	R _m > [MPa]	ε > [%]	E-modul [MPa]	R _m > [MPa]	ε > [%]
teplota [°C]	lab.			80		
1	7162,8	130,1	3,13	5497,6	107,9	3,41
2	8313,8	164,4	3,19	5275,5	121,0	3,33
3	9455,4	191,9	3,17	4722,6	120,8	3,32
4	9036,3	182,5	3,55	5603,2	106,0	2,69
5	7382,6	156,8	3,72	5152,0	137,7	3,88
6	8256,6	177,0	3,59	4779,3	103,9	3,44
7	9273,7	169,5	2,85	4642,7	112,5	3,67
8	6701,6	138,6	4,09	4942,5	121,1	3,65
9	7824,0	160,2	3,37	4769,2	114,0	3,71
10	7077,9	148,1	3,48	4484,5	117,0	4,06
průměr	8048,5	161,9	3,42	4986,9	116,2	3,52
smodch [%]	11,5	11,4	9,8	7,2	8,1	10,2

Tab. 8: Hodnoty Youngova modulu, pevnosti a max. prodloužení pro čtyřvrstvý laminát 80 g·m⁻² (0, +45°, -45°, 0) při laboratorní teplotě a 80 °C

č. vzorku	E-modul [MPa]	R _m [MPa]	ε max [%]	E-modul [MPa]	R _m [MPa]	ε max [%]
teplota [°C]	lab.			80		
1	6686,3	162,8	3,93	2814,7	97,8	4,68
2	6466,2	160,2	4,22	2083,6	64,6	5,86
3	4921,0	139,2	3,92	2209,8	73,9	4,29
4	4841,3	115,6	4,18	2118,0	68,6	4,13
5	5135,7	124,3	3,34	2643,5	86,7	4,90
6	5542,7	140,4	3,74	2279,2	72,9	4,67
7	5700,2	141,6	3,86	2626,4	66,2	3,54
8	6054,0	162,4	4,05	2170,4	71,0	4,79
9	5747,1	136,1	3,82	2130,4	67,0	5,11
10	6008,1	147,1	3,77	2301,5	78,5	4,94
průměr	5710,3	143,0	4,03	2337,7	74,7	4,69
smodch [%]	10,9	11,1	6,5	10,6	13,2	12,5

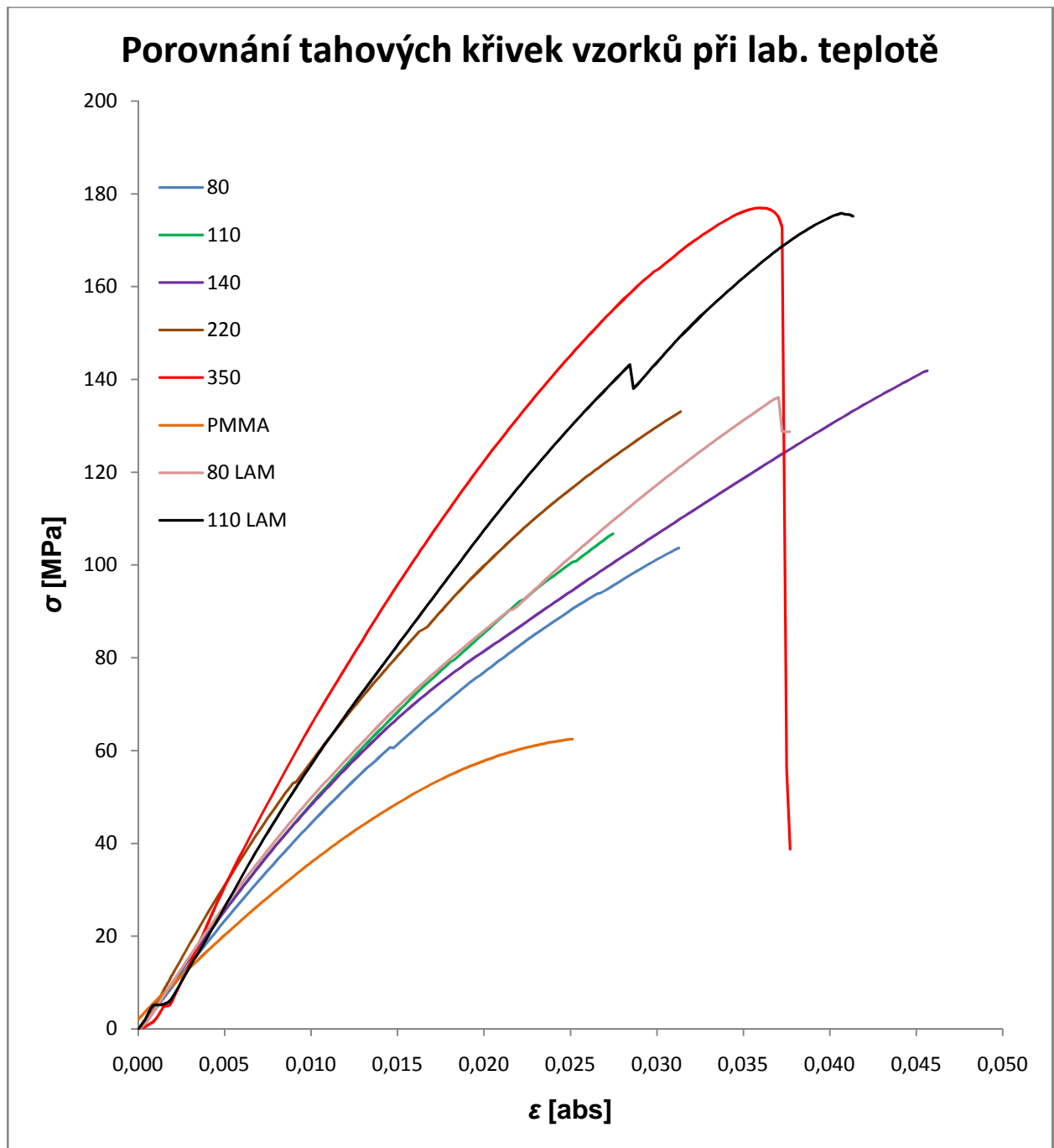
Tab. 9: Hodnoty Youngova modulu, pevnosti a max. prodloužení pro čtyřvrstvý laminát 110 g·m⁻² (0, +45°, -45°, 0) při laboratorní teplotě a 80 °C

č. vzorku	E-modul [MPa]	R _m [MPa]	ε max [%]	E-modul [MPa]	R _m [MPa]	ε max [%]
teplota [°C]	lab.			80		
1	6693,6	156,2	3,96	2289,2	78,5	4,37
2	7090,9	172,9	3,76	2384,3	83,9	4,26
3	6462,5	187,4	4,50	3075,2	94,2	3,90
4	6185,3	134,4	3,92	2639,3	81,4	4,15
5	6248,9	128,5	3,58	2248,0	77,8	4,22
6	6365,6	168,3	4,43	2265,9	73,7	4,60
7	6592,8	137,1	3,31	2287,8	80,0	4,50
8	6217,7	122,8	3,47	2353,0	78,0	4,65
9	6381,7	175,8	4,13	2519,8	92,9	4,84
10	7425,4	206,6	5,08	2332,4	78,8	4,74
průměr	6566,4	159,0	4,02	2439,5	81,9	4,42
smodch [%]	6,2	17,5	13,5	10,4	8,1	6,7

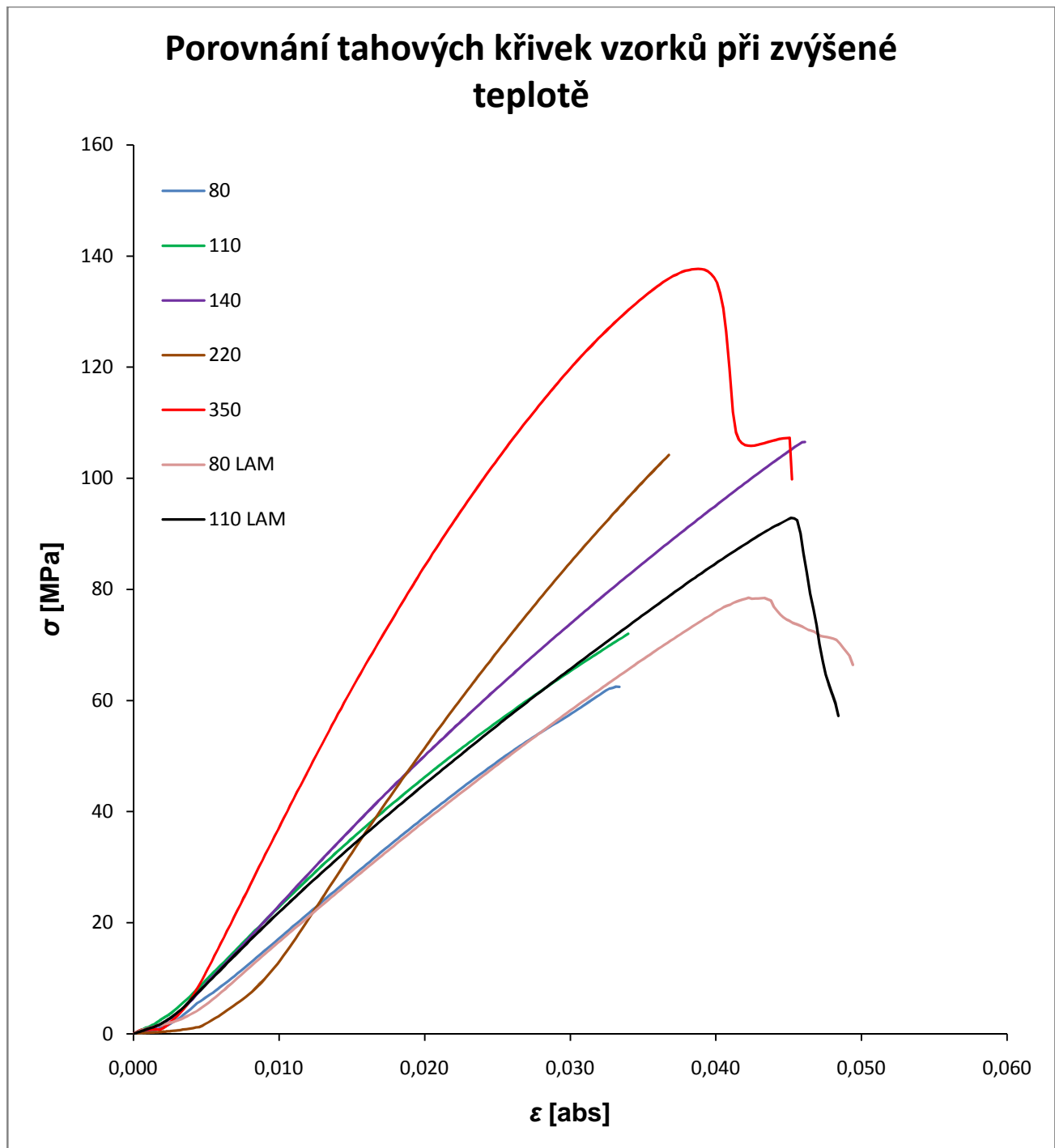
Čistý PMMA bez výztuže byl při laboratorní teplotě měřen ve tvaru tělesa „dogbone“ a měření bylo provedeno pětkrát.

Tab. 10: Hodnoty Youngova modulu, pevnosti a max. prodloužení pro PMMA za laboratorní teploty

č. vzorku	E -modul [MPa]	R_m [MPa]	ε max [%]
teplota [°C]	lab.		
1	3724,5	62,5	2,51
2	3460,9	43,8	1,51
3	3680,8	58,3	1,74
4	3703,8	65,8	2,13
5	3672,9	71,0	3,46
průměr	3648,6	60,3	2,27
smodch [%]	2,9	17,1	33,9

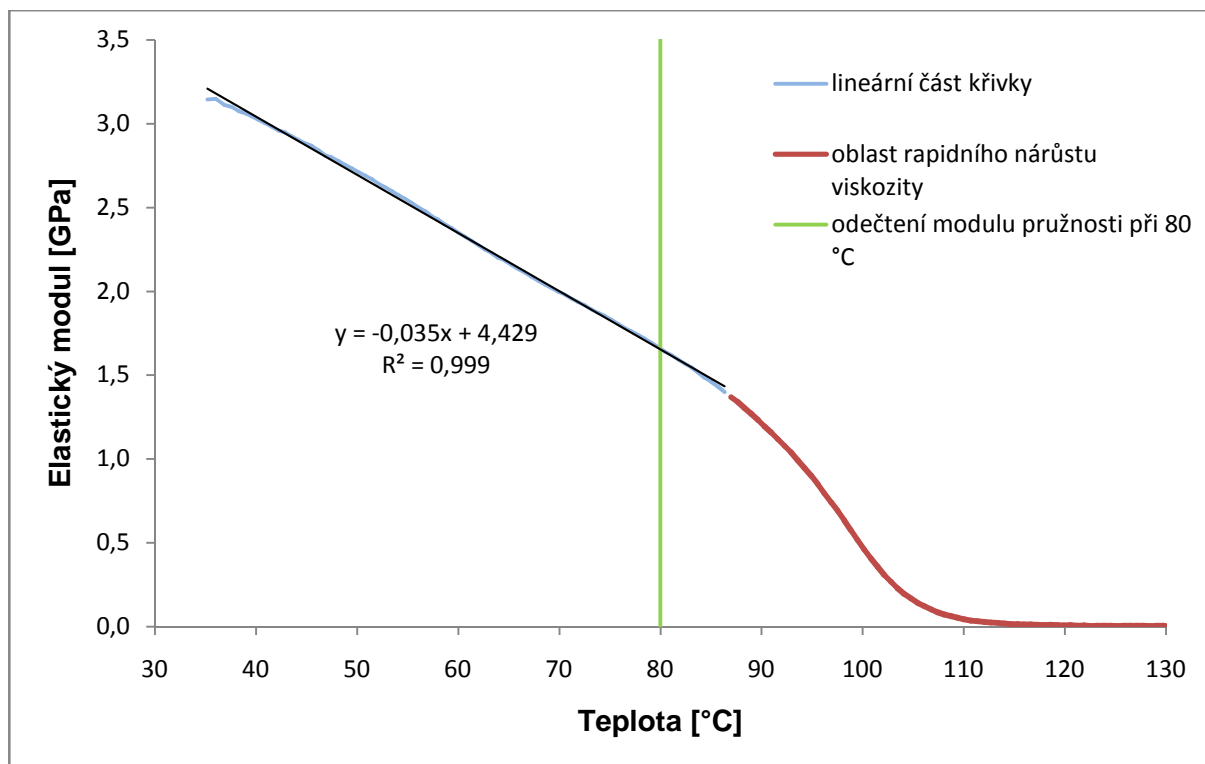


Obr. 14: Tahové křivky při laboratorní teplotě

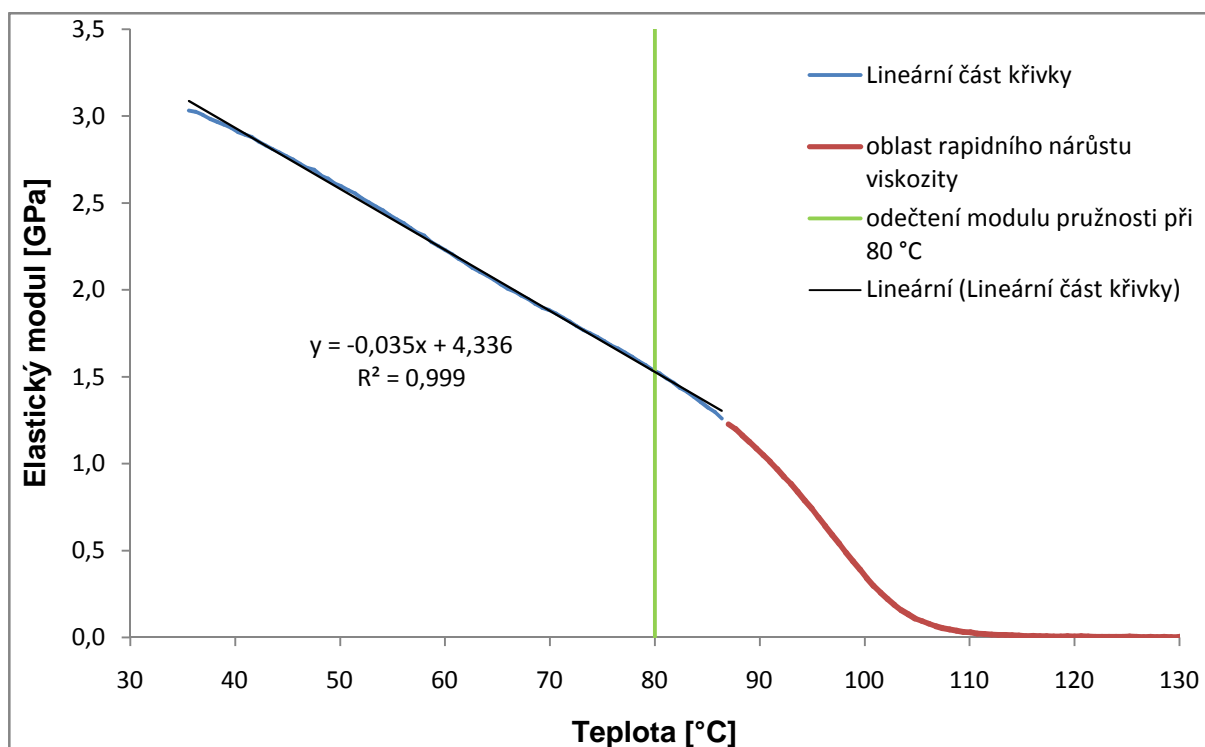


Obr. 15: Tahové křivky při zvýšené teplotě

Pomocí DMA byla změřena teplotní závislost elastického a ztrátového modulu v závislosti na rostoucí teplotě. Z elastického modulu byla lineární část křivky proložena spojnicí trendu a metodou lineární regrese byl stanoven modul pružnosti PMMA při teplotě 80 °C. Měření bylo provedeno dvakrát.



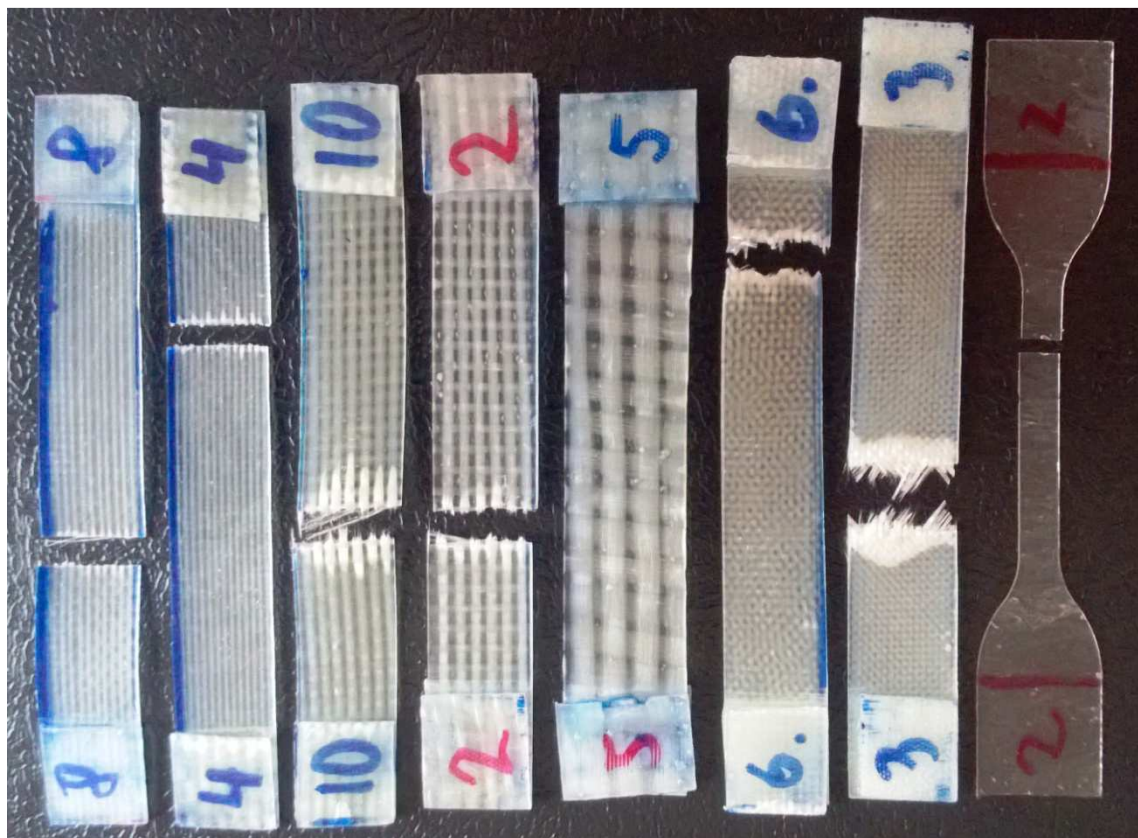
Obr. 16: Výstupní křivka elastického modulu z DMA (1. Měření)



Obr. 17: Výstupní křivka elastického modulu z DMA (2. Měření)

Tab. 11: Odečtené hodnoty z DMA při 80 °C

č. měření	<i>E</i> -modul [MPa]
1	1653,3
2	1528,3
průměr	1590,8



Obr. 18: Vzorky kompozitů a PMMA po tahové zkoušce: (gramáže v $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) zleva: 80, 110, 140, 220, 350 (nepřetržený), 4x80 laminát, 4x110 laminát a PMMA

5.2 Výsledky TGA

Z každé sady desíti vzorků byly vybrány dva (jeden s nejvyšším a jeden s nejnižším modulem pružnosti) pro zjištění přesného obsahu vláken. Tyto hodnoty byly zprůměrovány a použity pro teoretické výpočty. Každé měření bylo provedeno dvakrát. Vzorky FRC s tkaninou o gramáži 220 a 350 nebyly pomocí TGA měřeny, neboť tyto tkaniny disponují příliš širokými mezerami mezi vláknennými svazky a měření by bylo, vzhledem k velikosti plochy pánvičky pro vsazení vzorku, nepřesné.

Tab. 12: Průměrné naměřené hodnoty objemových zlomků (počítáno s hustotou skla $\rho = 2,6 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)

Gramáž tkaniny [$\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$]	$V_f (t = \text{lab.})$	$V_f (t = 80 \text{ }^\circ\text{C})$	Průměr V_f pro výpočty
80	0,040	0,045	0,043
110	0,052	0,051	0,052
140	0,085	0,069	0,077
4x80 laminát	0,114	0,106	0,110
4x110 laminát	0,117	0,121	0,119

Pro výpočet objemového zlomku v tkaninách s gramáží 220 a 350 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ bylo stanoveno množství vlákných svazků v příčném směru v každém vzorku. Vzorky tedy nebyly vyřezávány o stejné šířce, neboť při vytvrzování a následném lisování se tkanina uvnitř matrice mnohdy posunula z původního stavu. Tento postup měl za následek mírné odchylky v rozměrech vzorků, ale ve všech stejné množství výztuže. Lišilo se tedy pouze množství matrice, která ale nemá na mechanické vlastnosti celku takový vliv jako právě výztuž. Pro zjednodušení výpočtů byl brán objemový zlomek vláken v příčném směru jako poloviční z objemového zlomku celkového.

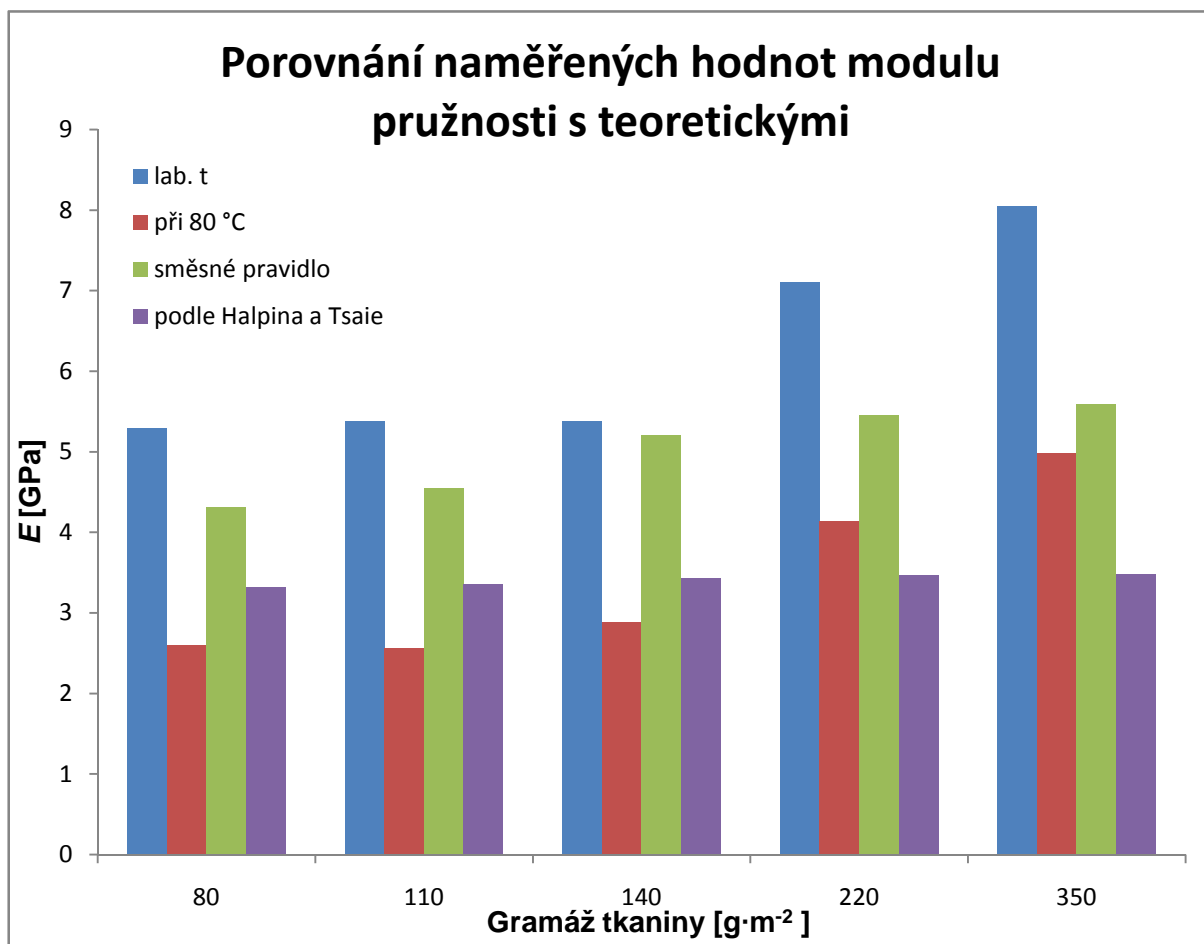
Tab. 13: Vypočítané hodnoty objemových zlomků hrubších tkanin

Gramáž tkaniny [$\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$]	$V_f (t = \text{lab.})$	$V_f (t = 80 \text{ }^\circ\text{C})$	Průměr V_f pro výpočty
220	0,086	0,088	0,087
350	0,092	0,092	0,092

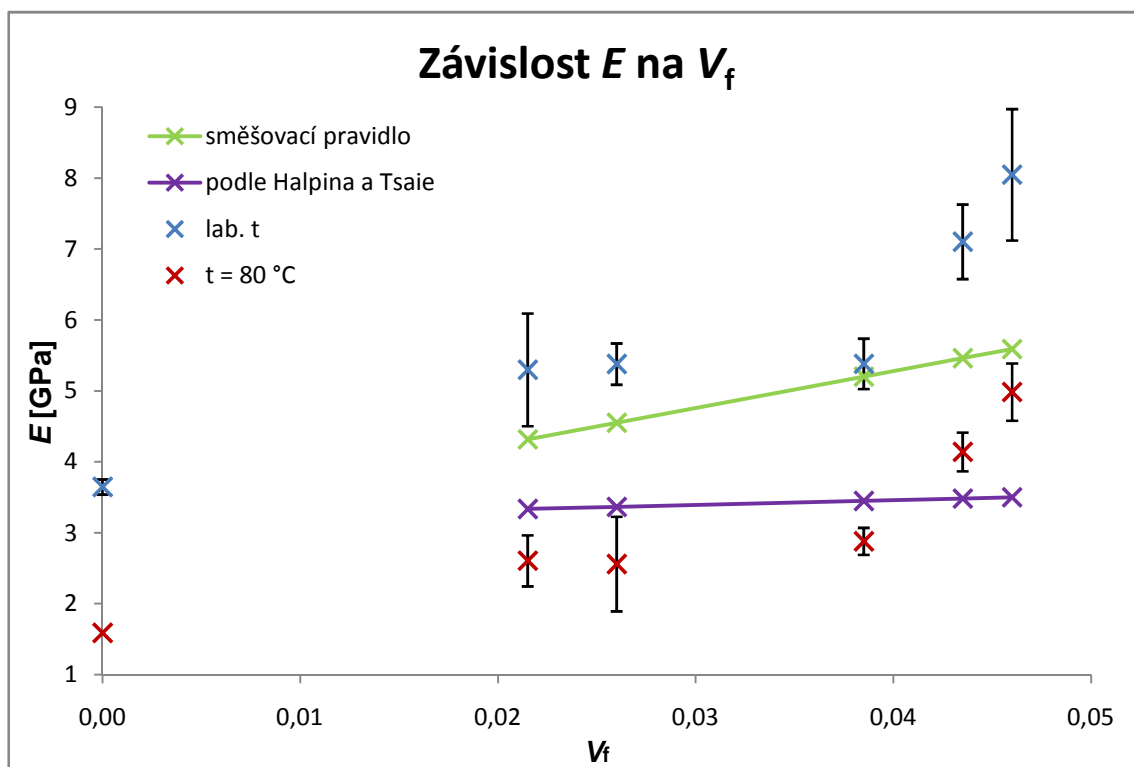
5.3 Porovnání výsledků s teoretickými výpočty

Tab. 14: Teoreticky vypočítané moduly pružnosti

Gramáž tkaniny [$\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$]	$V_f \text{ II}$	$E \text{ [MPa]} (\text{směš. pravidlo})$	$E \text{ [MPa]} (\text{Halpin-Tsai})$
80	0,022	4318	3329
110	0,026	4552	3356
140	0,039	5202	3434
220	0,044	5462	3466
350	0,046	5592	3482



Obr. 19: Srovnání modulů pružnosti



Obr. 20: Závislost modulu pružnosti měřeného při lab. teplotě na objemovém zlomku

Na obrázku 25 sledujeme porovnané hodnoty modulu pružnosti v tahu vzorků FRC, měřené při laboratorní teplotě, při teplotě 80 °C a vypočítané moduly pružnosti dle směšovacího pravidla a Halpin-Tsaiovy rovnice. Zatímco nejmenší modul mají očekávaně vzorky měřené při zvýšené teplotě, kdy začíná PMMA měknout, nejvyšší zaznamenané hodnoty jsou stanovené experimentálně.

5.4 Snímky z CLSM



Obr. 21: Adheze matrice k výztuži



Obr. 22: Adheze matrice k výztuži (2)

Na obrázcích 27 a 28, pořízených konfokálním mikroskopem, lze pozorovat v místě lomu po tahové zkoušce adhezi materiálu k výztuži. Snímku bylo pořízeno vícero, ale zobrazené ukázkové snímky jsou spíše pro ilustraci, neboť bylo zjištěno, že v některých místech lomu byla adheze matrice velmi dobrá (obr. 27), ale v některých místech byla pozorována téměř zcela obnažená tkanina.

6 Závěr

V bakalářské práci byly zhotoveny sady vzorků vláknových kompozitů PMMA/skelná tkanina. Vzorky byly připraveny metodou – ručním kladením a následně slisovány při teplotě 235 °C a tlaku 120 – 170 kN, kdy došlo znovu k plastifikaci polymeru a vysokým tlakem bylo dosaženo lepší impregnace tkaniny. Výztuž byla použita v několika gramážích, aby bylo dosaženo distribuce objemového zlomku. Vzorky byly podrobeny tahovým zkouškám a byly zjištěny hodnoty modulu pružnosti v tahu. Ten byl pomocí softwaru na univerzálním zkušebním zařízení Zwick vypočítáván v intervalu $\varepsilon \in (0,05;0,25)$ %. Vzorky měřené při zvýšené teplotě vykazovaly u nižších obsahů ztrátu modulu pružnosti téměř o jednu polovinu. U vzorků s vyšší gramáží byl modul menší přibližně o jednu třetinu. Z tohoto

poznatku lze předpokládat, že za vyšších teplot při vyšších objemových zlomcích výztuže v kompozitním materiálu klesá procentuální úbytek modulu pružnosti. Toto tvrzení můžeme zdůvodnit tak, že komponentem udávající mechanické vlastnosti materiálu je právě výztuž a na tu nárůst teploty na 80 °C, v případě skelných vláken, nemá vliv. Kromě jednovrstvých vzorků byly připraveny i čtyřvrstvé lamináty. Úhel pootočení jednotlivých lamin byl 0, +45°, -45°, 0. Lamináty nebyly porovnávány s teoretickými výpočty, jelikož jejich výpočet by byl velmi nepřesný a pro jejich výpočet je třeba znát všechny elastické konstanty. Přesných hodnot objemových zlomků u jemnějších tkanin a laminátů bylo dosaženo pomocí termogravimetrické analýzy. Nejvyššího modulu pružnosti bylo dosaženo u tkaniny o gramáži 350 g·m⁻² (8049 MPa). Při srovnání experimentálních a teoretických hodnot byly experimentálně zjištěné hodnoty vyšší v řádu jednotek až desítek procent oproti směšovacímu pravidlu. Tento rozdíl může být způsoben absencí příspěvku vláken v příčném směru ve výpočtech, neboť hodnoty byly počítány pouze z objemového zlomku vláken v podélném směru. Ještě větší rozdíl je oproti Halpin-Tsaiovu modelu. Zde může být odchylka způsobena i v parametru ξ , který souvisí s prostorovým uspořádáním vláken a ne s jeho geometrií. [17]

7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Vyd. 1. Brno : VUT v Brně, Fakulta chemická, 2003. 194 s. ISBN 80-214-2443-5.
- [2] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6
- [3] KRATOCHVÍL, Bohumil, ŠVORČÍK, Václav, VOJTĚCH, Dalibor. *Úvod do studia materiálů*. 1. vyd. Praha : Vysoká škola chemicko-technologická, 2005. 190 s. ISBN 80-7080-568-4.
- [4] KOŘÍNEK, Zdeněk. KOMPOZITY - Doc. Zdenek Korinek [online]. 2008 [cit. 2011-05-11]. Kompozity. Dostupné z WWW: <<http://www.volny.cz/zkorinek> >.
- [5] HULL, D., CLYNE, T.W. *An Introduction to Composite materials*. 2nd edition. Cambridge : Cambridge University press, 1996. 326 s. ISBN 0-521-38855-4.
- [6] FRIEDRICH, Klaus a Abdulhakim A. ALMAJID. Manufacturing Aspects of Advanced Polymer Composites for Automotive Applications. *Applied Composite Materials* [online]. 2013, vol. 20, issue 2, s. 107-128 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s10443-012-9258-7>
- [7] *Reinforced plastics: online magazine for glass & carbon reinforced composites* [online]. 2012, roč. 56, č. 4 [cit. 2014-05-03]. ISSN 0034-3617. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034361712700668>
- [8] *Reinforced plastics: online magazine for glass & carbon reinforced composites* [online]. 2013, roč. 57, č. 6 [cit. 2014-05-03]. ISSN 0034-3617. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034361713701668>
- [9] MARKARIAN, Jennifer. Long fibre reinforced thermoplastics continue growth in automotive. *Plastics, Additives and Compounding* [online]. 2007, vol. 9, issue 2, s. 20-24 [cit. 2014-05-28]. DOI: 10.1016/S1464-391X(07)70025-9. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1464391X07700259>
- [10] KHAN, Laraib Alam, Ali Hasan MAHMOOD, Bilal HASSAN, Tahir SHARIF, Shahaab KHUSHNOD a Zaffar M. KHAN. Cost-effective manufacturing process for the development of automotive from energy efficient composite materials and sandwich structures. *Polymer Composites* [online]. 2014, vol. 35, issue 1, s. 97-104 [cit. 2014-05-28]. DOI: 10.1002/pc.22638. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/pc.22638>

- [11] MM Průmyslové spektrum. *Termoplasty vyztužené dlouhými vlákny*. Praha: Vogel Publishing, 2003, č. 1. DOI: 1212-2572. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/termoplasty-vyztuzene-dlouhymi-vlakny.html>
- [12] MALIJEVSKÝ, Anatol, Josef NOVÁK, Stanislav LABÍK a Ivona MALIJEVSKÁ. *Breviář z fyzikální chemie*. 1. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2000, 280 s. ISBN Breviář fyzikální chemie.
- [13] AFFDL, J. C. Halpin a J. L. KARDOS. The Halpin-Tsai equations: A review. *Polymer Engineering and Science* [online]. 1976, vol. 16, issue 5, s. 344-352 [cit. 2014-05-20]. DOI: 10.1002/pen.760160512. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/pen.760160512>
- [14] Metody termické analýzy. *Centrum materiálového výzkumu* [online]. © 2014 [cit. 2014-05-14]. Dostupné z: <http://www.materials-research.cz/cz/laboratore/laborator-biokoloidu/termicka-analyza-a-kalorimetrie/metody-termicke-analyzy/>
- [15] POLANSKÝ, R. *Viskoelastické chování reaktoplastických kompozitních materiálů při mechanickém zatížení*. [online]. 2010, vol. 12 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/kybernetika--automatizace--merici-technika/10/viskoelasticke-chovani-reaktoplastickykh-kompozitnich-materialu-pri-mechanickem-zatizeni/>
- [16] KUČERÍK, Jiří. Termická analýza – dynamická mechanická analýza (DMA). *ChemPoint* [online]. 2011 [cit. 2014-05-12]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/kucerik-3>
- [17] MIŠKOLCI, M. *Polymerní nanokompozity pro interiérové části automobilů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2009. 31 s. Vedoucí bakalářské práce prof. RNDr. Josef Jančář, CSc.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

PMMA	polymethylmethakrylát
UP	nenasycený polyester
EP	epoxidová pryskyřice
VE	vinylesterová pryskyřice
FR	fenolická pryskyřice
PP	polypropylen
PET	polyethylentereftalát
PA	polyamid
HCl	kyselina chlorovodíková
SiO ₂	oxid křemičitý
Al ₂ O ₃	oxid hlinitý
CaO	oxid vápenatý
Na ₂ O	oxid sodný
Fe ₂ O ₃	oxid železitý
B ₂ O ₃	oxid boritý
ZnCl ₂	chlorid zinečnatý
SOCl ₂	chlorid thionylu
PCl ₃	chlorid fosforitý
PAN	polyakrylonitril
UHMWPE	vysokohustotní polyetylen
FRC	vlákny vyztužený kompozit
SMC	
D-LFT	technologie zpracování dlohvláknových termoplastických kompozitů
LCCF	levná uhlíková vlákna
TGA	termogravimetrická analýza
DMA	dynamická mechanická analýza
CLSM	konfokální laserová rastrovací mikroskopie
$w_{a/k}$	adhezní/kohezní práce
γ	povrchové napětí
S_r	roztírací koeficient
E	modul pružnosti
ε	prodloužení materiálu
σ	napětí
R_m	pevnost
η	parametr efektivnosti výztuže

ξ
SMC/BMC

faktor související s tvarem a prostorovým uspořádáním výztuže
polotovar směsi pryskyřice, aditiv a krátkých vláken