



Analýza vlivu mletí recyklovaných uhlíkových vláken na mechanické vlastnosti epoxidových kompozitů

Bakalářská práce

Studijní program: B3107 – Textil
Studijní obor: 3106R016 – Textilní technologie, materiály a nanomateriály
Autor práce: **Jan Kočib**
Vedoucí práce: Ing. Jana Novotná
Konzultant práce: Ing. Miroslava Pechočiaková, Ph.D.





Analysis of the impact of recycled carbon fibers grinding on the mechanical properties of epoxy composites

Bachelor thesis

Study programme: B3107 – Textil
Study branch: 3106R016 – Textile Technologies, Materials and Nanomaterials
Author: **Jan Kočib**
Supervisor: Ing. Jana Novotná
Consultant: Ing. Miroslava Pechočiaková, Ph.D.



Technická univerzita v Liberci
Fakulta textilní
Akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan Kočib**
Osobní číslo: **T15000235**
Studijní program: **B3107 Textil**
Studijní obor: **Textilní technologie, materiály a nanomateriály**
Název tématu: **Analýza vlivu mletí recyklovaných uhlíkových vláken na mechanické vlastnosti epoxidových kompozitů**
Zadávající katedra: **Katedra netkaných textilií a nanovláknenných materiálů**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Literární rešerše k problematice mechanických vlastností kompozitů z recyklovaných uhlíkových materiálů.
2. Návrh experimentu mletí uhlíkových recyklovaných materiálů. Optimalizace procesu mletí pro tento druh materiálů, za účelem dosažení mikro až nanorozměrů.
3. Zhotovení vzorků epoxidových kompozitů plněných mletými recyklovanými uhlíkovými vlákny o různých koncentracích a proměření mechanických vlastností.
4. Vyhodnocení a diskuze výsledků.

Rozsah grafických prací: dle potřeby dokumentace

Rozsah pracovní zprávy: 40-60 dle potřeby

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

- 1) ELSEVIER, Miaocai, G. et al.: Simultaneously increasing the electrical conductivity and fracture toughness of carbon-fibre composites by using silver nanowires-loaded interleaves, Composites Science and Technology, 97 (2014), 27-33
- 2) Fitzer, E. Manocha, L.M. 1998: Carbon reinforcement and Carbon-Carbon composites. Springer-verlag berlin, ISBN 3-540-62933-5.
- 3) Morgan, P. 2005: Carbon fibers and fiber composites, Boca Raton Florida: Taylor and Francis group, ISBN 10 0-8247-0983-9.

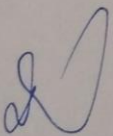
Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jana Novotná

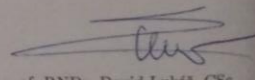
Katedra materiálového inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: 13. října 2017

Termín odevzdání bakalářské práce: 4. května 2018


Ing. Jana Drašarová, Ph.D.
děkanka




prof. RNDr. David Lukáš, CSc.
vedoucí katedry

V Liberci dne 13. října 2017

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 - školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 3.5.2018

Podpis:

Poděkování

Děkuji vedoucí práce paní Ing. Janě Novotné za odborné a profesionální vedení práce, věcné připomínky, dobré rady a vstřícnost při konzultacích, práci v laboratoři a při vypracovávání bakalářské práce.

Dále děkuji konzultantce paní Ing. Miroslavě Pechočiakové, Ph.D. za odbornou pomoc, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích a při měření a práci na testovacích laboratorních zařízeních.

Také děkuji paní Ing. Janě Grabmüllerové za odbornou pomoc a vstřícnost při tvorbě mikroskopických vyobrazení studovaného materiálu a za jejich poskytnutí pro tuto bakalářskou práci.

Abstrakt

Tato bakalářská práce je zaměřena na problematiku mechanických vlastností kompozitů z recyklovaných uhlíkových vláken. V první části práce je obecné seznámení s kompozitními materiály a uhlíkovými vlákny. Dále je zde popisován proces mletí uhlíkových vláken a tvorba kompozitních vzorků které jsou následně mechanicky testovány. Výsledky testování jsou analyzovány.

Předpokladem pro tuto práci je, že množství mletí recyklovaných uhlíkových vláken a jejich koncentrace v epoxidových kompozitech mají vliv na mechanické vlastnosti materiálu.

Klíčová slova

Kompozit, uhlíkové vlákno, mletí, epoxidová pryskyřice, mechanické vlastnosti

Abstract

This bachelor thesis focuses on the mechanical properties of composites from recycled carbon fibres. In The first part of the thesis deals with composite materials and carbon fibres. After that, the process of carbon fibre milling and the formation of composite samples which are subsequently mechanically tested. Finally, the test results are described.

The premise of this thesis is that the amount of grinding of recycled carbon fibres and their concentration in epoxy composites affect the mechanical properties of the material.

Key words

Composite, carbon fibre, grinding, epoxy resins, mechanical properties

Obsah

Prohlášení	5
Poděkování	6
Abstrakt	7
Seznam použitých symbolů a zkratk	11
Úvod	12
1 Kompozity	13
1.1 Epoxidové pryskyřice	14
1.2 Výztuže	15
2 Uhlík	16
2.1 Formy uhlíku	17
2.2 Vlastnosti a využití uhlíkových vláken a kompozitů	19
2.3 Uhlíková vlákna	19
2.3.1 Uhlíková vlákna z PAN	21
2.4 Recyklovaná uhlíková vlákna	22
2.4.1 Spalování a pyrolýza	23
2.4.2 Chemické zpracování	24
3 Experimentální část	25
3.1 Mletí uhlíkových vláken	27
3.2 Mletá uhlíková vlákna Carbiso	27
3.3 Mlýnek pro mletí uhlíkových vláken	28
3.4 Princip mletí uhlíkových vláken	29
3.5 Zhodnocení mlecího procesu uhlíkových vláken	30
4 Epoxidové vzorky	34
4.1 Specifikace užitých chemických látek	34

4.1.1	Tužidlo	34
4.1.2	Epoxidová pryskyřice	35
4.1.3	Laminační systém pryskyřice	35
4.2	Výroba epoxidových vzorků.....	35
4.2.1	Postup výroby čistého epoxidového vzorku	36
4.2.2	Postup výroby epoxidového vzorku s příměsí uhlíkových vláken	37
4.3	Příprava formy	38
4.3.1	Chemický separátor Frekote	38
4.4	Magnetické míchadlo	38
5	Testování mechanických vlastností.....	39
5.1	Zkouška rázové houževnatosti Charpyho metodou.....	39
5.1.1	Podstata zkoušky.....	39
5.1.2	Příprava materiálu.....	40
5.1.3	Průběh zkoušky	41
5.2	Výsledky zkoušky rázové houževnatosti Charpyho metodou	42
5.2.1	Zhodnocení výsledků zkoušky rázové houževnatosti	45
5.2.2	SEM Snímky lomů.....	46
5.3	Zkouška ohybových vlastností tříbodovým ohybem.....	52
5.4	Podstata zkoušky.....	52
5.5	Průběh zkoušky	53
5.6	Výsledky zkoušky tříbodového ohybu	54
5.6.1	Zhodnocení výsledků zkoušky tříbodového ohybu.....	57
6	Závěr	59
	Seznam literatury	60
	Seznam obrázků	64

Seznam tabulek	66
Přílohy	68
Seznam příloh	68
A. Rázová houževnatost – nemletá uhlíková vlákna	69
B. Rázová houževnatost – 1× mletá uhlíková vlákna	70
C. Rázová houževnatost – 2× mletá uhlíková vlákna	71
D. Tříbodový ohyb – nemletá uhlíková vlákna.....	72
E. Tříbodový ohyb – 1× mletá uhlíková vlákna	73
F. Tříbodový ohyb – 2× mletá uhlíková vlákna.....	74
G. Protokol přípravy kompozitních vzorků	75

Seznam použitých symbolů a zkratek

Zkratka	Popis	Rozměr
A	– rázová houževnatost	[J/m ²]
a	– šířka zkušebního tělesa	[mm]
b	– tloušťka zkušebního tělesa	[mm]
ČSN EN ISO	– označení převzaté evropské normy	
E	– deformační energie	[J]
E _f	– modulu pružnosti	[MPa]
F	– zatěžující síla	[N]
ks	– kus	
l	– vzdálenost podpěr	[mm]
Mt	– megatuna	
ot/min	– otáčky za minutu	
PAN	– polyakrylonitril	
S	– průhyb; dráha	[mm]
SEM	– skenovací elektronový mikroskop	
3D	– trojrozměrný	
Ø	– průměr	[mm]
σ _f	– ohybové napětí	[MPa]

Úvod

V historii vývoje konstrukčních a stavebních materiálů či nejen v průmyslové výrobě, byli inženýři a konstruktéři odkázáni na tradiční materiály jako je železo, ocel či beton a další „základní“ materiály a s postupem času docházelo k vývoji nových a nových konstrukčních materiálů. Po druhé světové válce došlo k rozvoji konstrukčních materiálů na bázi polymerů a jejich modifikací. Tyto materiály jsou využívány ve všech odvětvích výroby a člověk je jimi obklopen téměř všude.

Polymerní materiály tak dokázaly v mnoha případech nahradit spoustu dříve užívaných materiálů, nicméně i tyto plasty nelze užít všude. Polymery jsou totiž limitovány svou pevností, tuhostí, tepelnou odolností a dalšími podstatnými vlastnostmi.

Pokud však do polymeru přidáme aditivum neboli formu výztuže v podobě prášku či vláken, lze získat vysoce odolné materiály, jedná se pak o kompozitní materiály.

Výhodou těchto kompozitních materiálů je jejich flexibilita a rozsáhlá škála užitečných vlastností. Při širokém uplatnění kompozitů ve výrobě však narážíme na jedno úskalí, a tím je jejich životnost a opotřebení. Žádný materiál není věčný a kompozity nejsou výjimkou.

Jako příklad nám může posloužit letecký průmysl. Všechna moderní letadla jsou vyrobena z kompozitních materiálů, především z uhlíkových vláken. V současné době dochází k postupnému nahrazování stávajících letadel, letadly novými právě z důvodu opotřebení. Opotřebovaná letadla jsou tak odstavena na tzv. hřbitovy letadel. Tato místa dosahují nepředstavitelných rozloh a jsou ekologickou zátěží. Kompozitní materiály vhodné pro recyklaci však nacházíme i v dalších odvětvích lidské činnosti.

Praktická část této práce je pak znázorněna na schématech A. a B. v kapitole 3.

1 Kompozity

Kompozit je takový materiál, který obsahuje dvě nebo více komponent, které jsou svými chemickými i fyzikálními vlastnostmi odlišné. Smísením těchto komponent pak dojde k vytvoření materiálu (kompozitu), který kombinuje vlastnosti výchozích mísených komponent a dá vzniknout jedinečné materiálové struktuře jedinečných vlastností. Tento výsledný produkt pak lze využít v konstrukčních materiálech na rozdíl od čisté pryskyřice (polymeru), která takových vlastností nedosahuje.

Výhoda kompozitních materiálů spočívá právě v možnosti kombinace komponent s odlišnými vlastnostmi. Další výhodou je pak samotná pryskyřice, též nazývaná jako matrice neboli polymerní pojivo. Pryskyřici lze tvarovat do složitých tvarů, což výrazně rozšiřuje využití a aplikaci kompozitních materiálů.

Kompozity lze dělit do několika skupin. Např. dle materiálu výztuže a matrice, podle geometrického tvaru výztuže a podle použití kompozitu ve výrobku.

Tyto vlastnosti umožňují vyrobit výrobek se sníženou hmotností, čímž dojde k úspoře materiálu a k celkové úspoře energie.

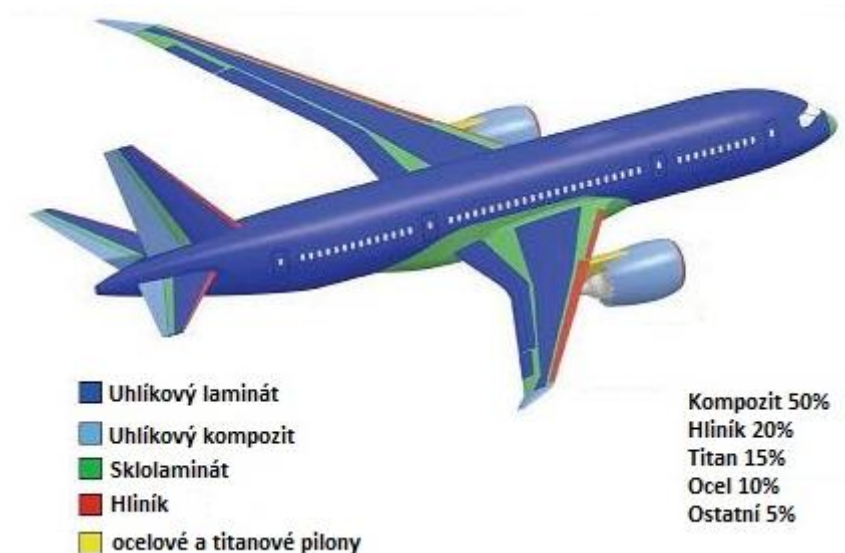
V této práci je popisován kompozitní materiál, jehož matici tvoří organický polymer neboli epoxid. Výztuží jsou pak několikanásobně mletá uhlíková vlákna, která jsou v kompozitu náhodně orientovaná. (Meissner a Zilvar 1987); (Jančář 2003)



Obrázek 1 Silniční kolo z uhlíkových kompozitů (Cube 2017)



Obrázek 2 Závodní automobil F1 2017 (Bull 2016)



Obrázek 3 Materiálové složení dopravního letounu Boeing 787 převzato a přepracováno z: (Cabrnach 2012)

1.1 Epoxidové pryskyřice

Epoxidová pryskyřice slouží v kompozitním materiálu jako matrice. Zajišťuje celistvost kompozitu a spojuje výztuž v kompaktní celek. Zároveň přenáší napětí při zatížení mezi jednotlivá vlákna výztuže a dokáže i zacelit trhliny v samotných vláknech.

Epoxidová pryskyřice je organickou polymerní matricí a řadí se do skupiny termosetů. Termosety jsou viskózní kapaliny, které po vytvrzení za pokojové nebo zvýšené teploty zůstávají v tuhé fázi i při dalším působení zvýšených teplot. Tím je dosaženo vyšší odolnosti vůči tečení a vyšším teplotám. Při působení vyšších teplot na výrobek by tedy nedošlo k tání materiálu, ale k jeho degradaci¹.

K samotnému vytvrzení termosetu nedojde bez přidání katalyzátoru a iniciátoru. Katalyzátor je chemická látka, která urychluje chemický proces a iniciátor tento proces iniciuje. V případě epoxidových pryskyřic se jedná o tužidlo. Po smísení pryskyřice a tužidla dojde k tzv. zesítnění, tedy k tvorbě makromolekulární polymerní sítě, která zajišťuje soudržnost kompozitu. Díky tužidlu se proces vytvrzení urychlí, ale zároveň má pak vzniklá látka omezenou dobu zpracovatelnosti. Tato doba se nazývá gel-time a bývá obvykle 15–30 min. (Jančář 2003)

¹ Nežádoucí změna vlastností polymerního materiálu spojená se změnou struktury a molekulové hmotnosti polymeru.

1.2 Výztuže

Použití samotné epoxidové pryskyřice je omezeno jejími mechanickými vlastnostmi. Pokud tyto vlastnosti chceme zlepšit, je do ní přidávána výztuž, která pak napomáhá lepším výsledným vlastnostem kompozitu. Objem výztuže je vyjadřován v objemových procentech a vychází z objemového zlomku (1).

$$\frac{\text{Objem vláken}}{\text{Celkový objem kompozitu}} \cdot 100\% \quad (1)$$

Obsah vláken v kompozitu lze udávat jako hmotnostní podíl (w_f) vláken v kompozitu. Pak platí vztah mezi objemovým a hmotnostním zlomkem (2).

$$w_f = \frac{\rho_f}{\rho_c} \cdot v_f \quad (2)$$

Kde ρ_f , ρ_c , jsou hustoty materiálu vláken a matrice a v_f je objemový zlomek vláken. Hmotnostní podíl je z technologického hlediska přípravy kompozitu přesnější.

Výztuže se v matrici mohou vyskytovat ve formě vláken s různým geometrickým uspořádáním. Buď se jedná o samostatná vlákna určité délky, nebo se jako výztuže využívají tkaniny či rohože.

Orientací vláken v kompozitu lze cíleně upravovat jeho vlastnosti ve směru předpokládaného zatížení. Tímto krokem dojde ke zlepšení mechanických vlastností u výrobku. Působení krátkých vláken v kompozitu na výsledné vlastnosti, se odlišuje oproti zmiňovaným tkaninám a rohožím.

Vyvíjené zatížení na kompozitní materiál působí nejdříve na matrici a v ní je přenášena síla na vlákna. Tato síla pak působí na válcový povrch vlákna, ale i na jeho konce.

(Jančář 2003); (Meissner a Zilvar 1987), (Morgan 2005)

2 Uhlík

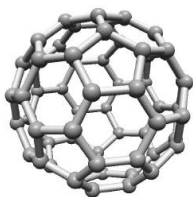
Uhlík (latinsky Carboneum) se na planetě Zemi vyskytuje od pradávna. Již v pravěku byl využíván v podobě dřevěného uhlí a sazí. Jeho název jakožto prvku, pak vešel ve známost v 18. století. V průběhu dalších let došlo k desítkám objevů možnosti využití uhlíku. Roku 1879 došlo k objevu prvního uhlíkového vlákna Thomasem Alvou Edisonem, kdy toto vlákno použil do žárovky. O století později v 60. letech, byla úspěšně vyvíjena uhlíková vlákna na bázi PAN a izotropních smol. V roce 1970 došlo k objevu biokompatibility uhlíku, což otevřelo další oblast využití uhlíku v medicíně. K dalším významným posunům vpřed na poli uhlíku došlo před několika lety s výzkumem nanotrubic a jejich použití, či s objevem molekul fullerenu².

„Elementární uhlík byl dokázán ve vesmíru: na Slunci, hvězdách, kometách a v atmosféře planet“. (Grégr 2004) To jen dokazuje, že uhlík je jedním ze základních prvků, který nás obklopuje naprosto všude. „Uhlík nám dává: Nejpevnější vlákna, nejlepší lubrikant – grafit, nejpevnější a nejtvrdší materiál – diamant, nejlepší absorbent plynů – aktivní uhlí, nejlepší heliovou bariéru – skelný uhlík a rozšiřuje svou působnost s objevem molekul fullerenu a nanotrubic.“ (Grégr 2004)

Na zemi se tento prvek vyskytuje jen v omezené míře, ale i přes toto malé množství výskytu tvoří základ všech organických sloučenin a ve formě oxidu uhličitého se nachází v atmosféře. Čistý uhlík nalézáme v několika jeho krystalografických modifikacích. A to ve formě diamantu, grafitu, chaoitu, lonsdaleitu a přírodního fullerenu známého jako šungit. Dále pak nalézáme množství nerostů, které uhlík obsahují.

Světové zásoby grafitu jsou odhadovány na 71 Mt. V roce 2015 dosáhla světová těžba 1,19 Mt. a celková poptávka dosahovala 12 mld. USD. Největší naleziště grafitu

² Fulleren je druh molekulární struktury uhlíku tvořené grafenovou vrstvou, která je zaobalená do uzavřeného sférického tvaru. (Grégr, 2004)



(Prášek, 2011)

se nachází v Číně (78 % odhadovaných zásob grafitu). Další velká naleziště najdeme v Brazílii, Severní Koreji, Indii, Turecku a v Kanadě.³ V České Republice je evidováno 8 ložisek s přítomností grafitu.

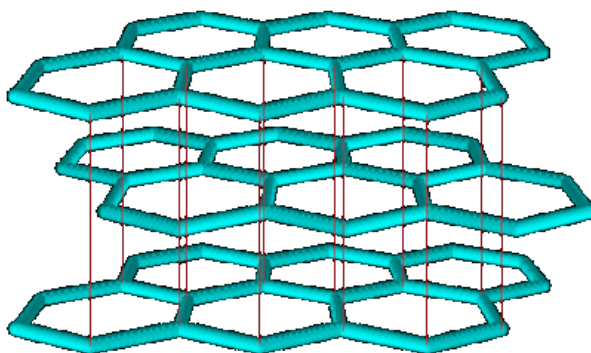
(Prášek 2011); (Grégr 2004); (Kulveitová 2010); (U.S. Department of Interior 2016); (Jirásek et al. 2016)

2.1 Formy uhlíku

Dvěma základními formami uhlíku je grafit a diamant.

Grafit

Grafit je modifikace uhlíku s šesterečnou strukturou uspořádání ve tvaru šestiúhelníku. Struktura je tvořena uhlíkovými atomy ve vrstvách. Díky tomuto krystalografickému uspořádání lze grafit snadno štěpit.



Obrázek 4 Krystalografické uspořádání grafitu

Jednotlivé uhlíky v jedné grafenové vrstvě jsou spojeny pevnými kovalentními vazbami⁴, čímž je vytvořena šesterečná síť grafenu. Takto vytvořené vrstvy jsou pak vzájemně provázány slabými van der Waalsovými vazbami⁵, čímž vzniká 3D struktura grafitu. Vrstvy jsou dále vůči sobě posunuty o polovinu hexagonu. Vzdálenost dvou uhlíků na jedné straně hexagonu čítá 0,142 nm. Jednotlivé vrstvy jsou pak od sebe vzdálené 0,335 nm.

³ Data převzatá z U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey 2016.

⁴ Kovalentní vazba – jedná se o chemickou vazbu mezi atomy vytvořenou sdílením elektronů. (The Editors of Encyclopaedia Britannica, 2018)

⁵ Van der Waalsovy síly – jedná se o slabé interakce mezi libovolnými molekulami či atomy. Velikost těchto sil závisí na vzájemné poloze a vzdálenosti molekul. (Bojkovský, 2009)

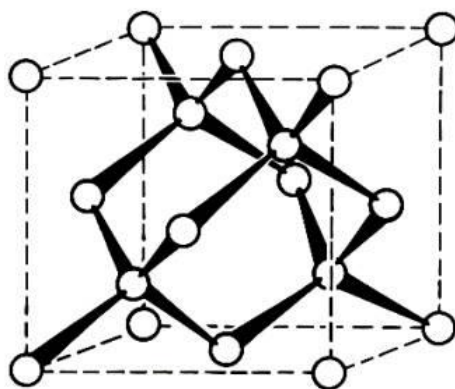
V grafenových vrstvách může docházet i k několika strukturním defektům. Z pravidla nejmenší jsou bodové defekty. Jedná se o volná místa tzv. vakanty v krystalografickém uspořádání grafitu. Vznikají špatným navázáním již zmiňovaných šestiúhelníků, čímž se vytvoří volné místo ve struktuře. Dochází k nim při procesu karbonizace.

Dalšími deformacemi jsou deformace čarové. U nich dochází k dislokacím jednotlivých grafenových vrstev způsobených změnou jejich pořadí. Větší mírou deformovaná struktura vzniká při disklinaci, kdy dochází k ohybu jedné či více grafenových vrstev, čímž dojde k odchylkám v jejich rovnoběžnosti.

Mechanické namáhání závisí především na směru jeho působení vzhledem ke krystalografickému uspořádání. Pouze slabé zatížení snese grafit působí-li zatížení ve směru kolmém k jednotlivým vrstvám. Dojde-li však k působení zatížení, které je rovnoběžné s vrstvami, snese grafit vysoké zatížení. Jeho tvrdost je pak dle Mohsovi stupnice⁶ 1,2.

Diamant

Ve struktuře diamantu působí mezi atomy uhlíku pevné kovalentní vazby. Každý atom uhlíku se váže se čtyřmi sousedními atomy uhlíku. Diamant vytváří kubickou mřížku a v přírodě vznikl vykrystalizováním v horninách hluboko pod povrchem, za velmi vysokých tlaků a teplot. Diamant je tak nejtvrdějším nerostem, který se vyskytuje v přírodě o tvrdosti 10 Mohsovi stupnice, kterou tak uzavírá.



Obrázek 5 Krystalografické uspořádání diamantu (Masarykova Univerzita v Brně Fakulta přírodovědecká 2012)

⁶ Mohsova stupnice slouží pro měření tvrdosti minerálů na stupnici od 1 do 10, kde vyšší číslo vyjadřuje vyšší stupeň tvrdosti. (Mohsova stupnice tvrdosti, 2016)

Diamant má průzračnou barvu a lesklý povrch. Lze ho uměle vyrobit z grafitu při vysoké teplotě a tlaku s absencí vzduchu. Sám o sobě je nevodivý, hořlavý a stálý do 800 °C. Při vystavení diamantu teplotě 1500 °C dojde k jeho změně na grafit.

(Morgan 2005); (Kulveitová 2010); (Prvky.com 2016); (Bojkovský 2009); (The Editors of Encyclopaedia Britannica 2018); (Masarykova Univerzita v Brně Fakulta přírodovědecká 2012)

2.2 Vlastnosti a využití uhlíkových vláken a kompozitů

Využití materiálů na bázi uhlíku je velice rozsáhlé především díky jeho užitným vlastnostem. Tyto materiály se vyznačují vysokým modulem pružnosti, pevností v tahu a nízkým koeficientem tření. Jsou tak schopné odolávat opakovanému mechanickému namáhání. Dále jsou materiály na uhlíkové bázi odolné vůči mnoha rozpouštědlům, kyselinám a zásadám a lze jich užít v medicíně díky jejich biokompatibilitě.

Uhlíkové materiály také odolávají nízkým a vysokým teplotám a vyznačují se i vysokou tepelnou vodivostí. Jejich teplota tání je 3825 °C a teplota varu 4827 °C. V neposlední řadě mají dobrou elektrickou vodivost a jsou nemagnetické.

Díky kombinaci těchto vlastností jsou uhlíkové materiály využívány v mnoha odvětvích. V letectví a kosmonautice především díky své lehkosti, odolnosti vůči nízkým i vysokým teplotám či nehořlavosti. Uhlíkové kompozity nalézáme i ve sportovní výrobě, strojírenství, stavitelství nebo v medicíně.

Aplikace uhlíkových vláken a kompozitů pak dala za vznik nemálo výrobkům, jako jsou měřidla, kalibry, ložiska a těsnění, filtrační materiály, izolační materiály, elektrody, chemické články, antény a mnohé další. (Morgan 2005); (Grégr 2004); (Guo et al. 2014); (Fitzer a Manocha 1998)

2.3 Uhlíková vlákna

Uhlíkové vlákno je druh vlákna obsahující uhlík v jeho různých modifikacích, spojující nízkou měrnou hmotnost, vysokou pevnost, modul pružnosti a tepelnou odolnost. Atomy uhlíku spojené v krystaly jsou paralelně orientovány s osou vlákna. Toto makroskopické uspořádání dává poměrně tenkým vláknům vysokou pevnost.

Uhlíková vlákna lze vyrábět z polyakrylonitrilových (PAN) či z viskóзовých vláken anebo se dají zvlákňovat v tavenině z anizotropní smoly.

Prvním výrobním krokem je tzv. karbonizace prekurzoru, kterým je výchozí materiál. Při procesu karbonizace dojde k převodu prekurzoru na uhlíkové vlákno. Tento proces se provádí při teplotách od 1000 °C do teplot 2000 °C, a to výhradně v inertní atmosféře bez přístupu kyslíku, aby došlo k zamezení hoření. Při procesu dojde k odstranění většiny neuhlíkových atomů a výsledné vlákno tak obsahuje až 95 % uhlíku.

Takto vzniklé uhlíkové vlákno se nazývá vysokopevnostní neboli uhlíkové vlákno nižších parametrů. Vyznačuje se pevností v tahu do 1000 MPa a modulem pružnosti až do 100 GPa. Tato vlákna se používají v tepelných izolacích a v materiálech stínících elektromagnetické pole, kde je využíván princip Faradayovy klece⁷. (Lepil a Šedivý 2010)

Uhlíková vlákna prošla procesem karbonizace, lze ještě dál upravovat na vlákna grafitová. Tato úprava probíhá procesem grafitizace. Grafitizace se provádí při teplotách v rozmezí od 2400 °C do 3000 °C v inertní atmosféře. Během procesu dojde k nárůstu krystalů, trojrozměrnému uspořádání grafenových rovin a ke snížení vzdálenosti mezi jednotlivými rovinami. Po dokončení dojde k navýšení obsahu uhlíku ve vláknech až na 99 %. Tato transformace je závislá především na předchozím uspořádání krystalů a na procesní teplotě.

Vlákna, která projdou i tímto volitelným procesem jsou nazývána uhlíková vlákna s vysokými mechanickými vlastnostmi neboli vysokomodulová. Tato vlákna mají menší tahovou pevnost, ale vyšší modul pružnosti a oproti vysokopevnostním uhlíkovým vláknům jsou dražší.

Uhlíková vlákna tak dělíme na vysokopevnostní, vysokomodulová a dále se pak dělí dle prekurzoru ze kterého byla vyrobena.

V uhlíkových vláknech dochází vlivem výše popisovaným deformacím ke vzniku pórů. Jedná se o mikropóry průměru 1,6 nm až po dutinky dosahující více jak 7,5 μm.

⁷ Faradayova klec – Uzavřená plocha tvořená vodivým materiálem. Tento jev byl poprvé popsán Michaelem Faradayem v 19.století. (Lepil a Šedivý, 2010)

V následující tabulce 1. je přehledné porovnání uhlíkových a grafitových vláken. Pro představu jsou pak tato ještě dále porovnávána s některými druhy vláken využívaných v kompozitních materiálech.

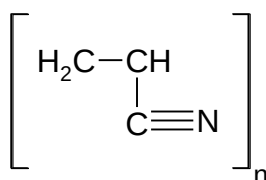
Tabulka 1 Vlastnosti některých druhů vláken (Jančář 2003)

Vlákn	Uhlíkové	Grafitové	Whiskery ⁸	Skleněné	Ocelové
Průměr [μm]	7-10	5-7	0,2	12-20	13
Hustota [Kg · m ⁻³]	1,6	2,0	2,26	2,5	7,87
Pevnost v tahu [GPa]	2,5-3,5	2-2,5	20	3,5	4,2
Modul pružnosti [GPa]	250-300	400-500	500-1000	70-85	210
Teplota tání [°C]	3650	3650	3650	700	1400
Tep. odolnost inertní [°C]	2000	2000	2000	500	
Tep. odolnost vzduch [°C]	350	350	350	300	

(Morgan 2005);(Jančář 2003); (Legendre 2001); (Kořínek 2016)

2.3.1 Uhlíková vlákna z PAN

V této práci bylo využíváno recyklovaných uhlíkových vláken z PAN prekurzoru.



Obrázek 6 Chemický strukturní vzorec PAN

PAN vlákna jsou získávána z akrylového vlákna a jsou jedním z nejvíce vyráběných vláken. Nejdříve je vyrobeno PAN vlákno ve formě kabelu metodou zvlákňování z taveniny s následným dloužením. Hustota vlákna se pohybuje mezi 1,20 a 1,22 g/cm³, pevnost v tahu činí přes 600 MPa a tažnost 15 %.

⁸ Whiskery – monokrystalické vlákno s vysokým poměrem délka / tloušťka, vyráběné převážně z grafitu.

Takto připravené vlákno prochází procesem stabilizace. Vláknem je stabilizováno teplotou nad 200 °C. Jelikož však při této teplotě dochází k měknutí a smršťování PAN, musí být vlákno v průběhu tohoto procesu napínáno, aby nedošlo k jeho smrštění. Proces probíhá v oxidačním prostředí za odvodu reakčního tepla. Na konci procesu stabilizace získá vlákno černou barvu a stává se nehořlavým. Hustota vlákna dosahuje 1,40 g/cm³. Pevnost v tahu se snižuje na hodnoty do 200 GPa a tažnost vlákna 4 %.

Po procesu stabilizace na vzduchu následuje proces karbonizace. Vláknem je zde vystavováno teplotám 1000–1800 °C a probíhá v inertní dusíkové atmosféře. Ve vláknech dochází k uspořádání makromolekul do základní grafické struktury. Tím dochází nejen ke strukturním změnám, ale i ke změně fyzikálních a mechanických vlastností. Hustota karbonizovaného vlákna vzrostla na 1,74 g/cm³, pevnost v tahu na 2000 GPa a tažnost se snížila na 1 %.

Vláknem dále prochází procesem grafitizace při teplotě 1400–2000 °C. Při těchto teplotách vznikají ve struktuře dokonalejší mikrokristaly a dochází ke změně jejich orientace působením tahového napětí na vlákna. Touto orientací dojde ke zvýšení modulu v tahu na více než 350 GPa. Hustota grafitizovaného vlákna je 1,8 g/cm³ a tažnost 1 %. Tento proces trvá jen několik desítek sekund.

V poslední fázi výroby uhlíkových vláken z PAN procházejí vlákna povrchovou úpravou. Nejdříve se zvyšuje povrchová energie vláken oxidací a následně se vlákna opatřují tzv. sizingem. Jedná se o elektrolytické nanesení tenké povrchové vrstvy epoxidové pryskyřice, která chrání uhlíková vlákna před poškozením a zvyšuje adhezi povrchu monofilů. Ty tak drží pohromadě v káblu. (Morgan 2005); (Sodomka 2005); (The Editors of Encyclopaedia Britannica 2014); (Center 2018)

2.4 Recyklovaná uhlíková vlákna

Využití kompozitních materiálů ve světě stále roste především díky jejich unikátním vlastnostem a relativně nízkým výrobním a provozním nákladům v porovnání s ostatními materiály. Kompozitní materiály vykazují unikátní vlastnosti, ale každý výrobek má svou omezenou životnost a není tomu jinak ani u kompozitů.

Po uplynutí doby životnosti je nutné tyto materiály různými způsoby likvidovat či recyklovat, jak již bylo uvedeno dříve. Po recyklaci těchto materiálů dojde k opětovnému využití recyklovaného materiálu. Recyklát, ale nedosáhne totožných vlastností jako výchozí materiál. Proto musejí být recykláty užity na místech, pro které budou jejich nové vlastnosti dostačující. Opakovanou recyklací lze zpracovávat materiál až na kritické minimum jejich užitných vlastností. Po překročení tohoto kritického minima, již nelze materiály užít pro výrobu a lze je využít jen pro výrobu energie spalováním.

Recyklace kompozitních materiálů na bázi uhlíkových vláken se užívá ve srovnání s ostatními kompozity asi nejvíce. To je dáno hlavně vlastnostmi uhlíku. Recyklace začíná sběrem a tříděním odpadních materiálů. Firmy zabývající se recyklací kompozitů pak ze sběrných míst odebírají uhlíkové kompozity a aplikují na ně různé technologie recyklace. Nejzákladnějšími technologiemi pro recyklaci kompozitů jsou pyrolýza, spalování, drcení a chemické zpracování. Pro uhlíkové kompozity se pak nejčastěji využívá procesu spalování a pyrolýzy. (Legendre 2001); (ANON. 2006)

2.4.1 Spalování a pyrolýza

Metoda spalování je jednou ze základních a nejjednodušších metod recyklace odpadů. Tímto procesem lze zpracovávat vysloužilé kompozitní materiály, které dosáhly již zmiňované kritické hodnoty užitých vlastností. Kompozity jsou využity jako topný materiál za účelem výroby tepelné energie ve spalovnách.

Při procesu spalování se uvolňují toxické látky, které jsou škodlivé pro životní prostředí a obyvatelstvo. Proto jsou spalovny vybaveny speciálními zařízeními pro neutralizaci těchto škodlivin, a to jak uvolňovaných při spalování, tak obsažených ve spalinách.

Pyrolýza je alternativní metodou rozkladu k procesu spalování. Při pyrolýze je zamezen přístup médiím obsahující kyslík. U kompozitních uhlíkových materiálů je samotnou podstatou procesu štěpení látek, při zachování vazeb mezi uhlíkem a vodíkem. Dojde tak k odstranění matrice kompozitu odpařením za doprovodu plynů a kapalin z pryskyřice. Nesmí být však překročena teplota rozkladu uhlíkové výztuže.

Dle teploty lze dělit pyrolýzu na nízkoteplotní (pod 500 °C), středně teplotní (500–800 °C) a vysokoteplotní (nad 800 °C). Tuhým zbytkem jsou pak uhlíková vlákna. Ta lze využít při dalším procesu výroby kompozitů na uhlíkové bázi. Problémem však zůstává, že u takto separovaných vláken klesají mechanické hodnoty. Dále nejsou vlákna zcela osamocena a vyskytují se zde spečené hrudky vláken. (Legendre 2001)

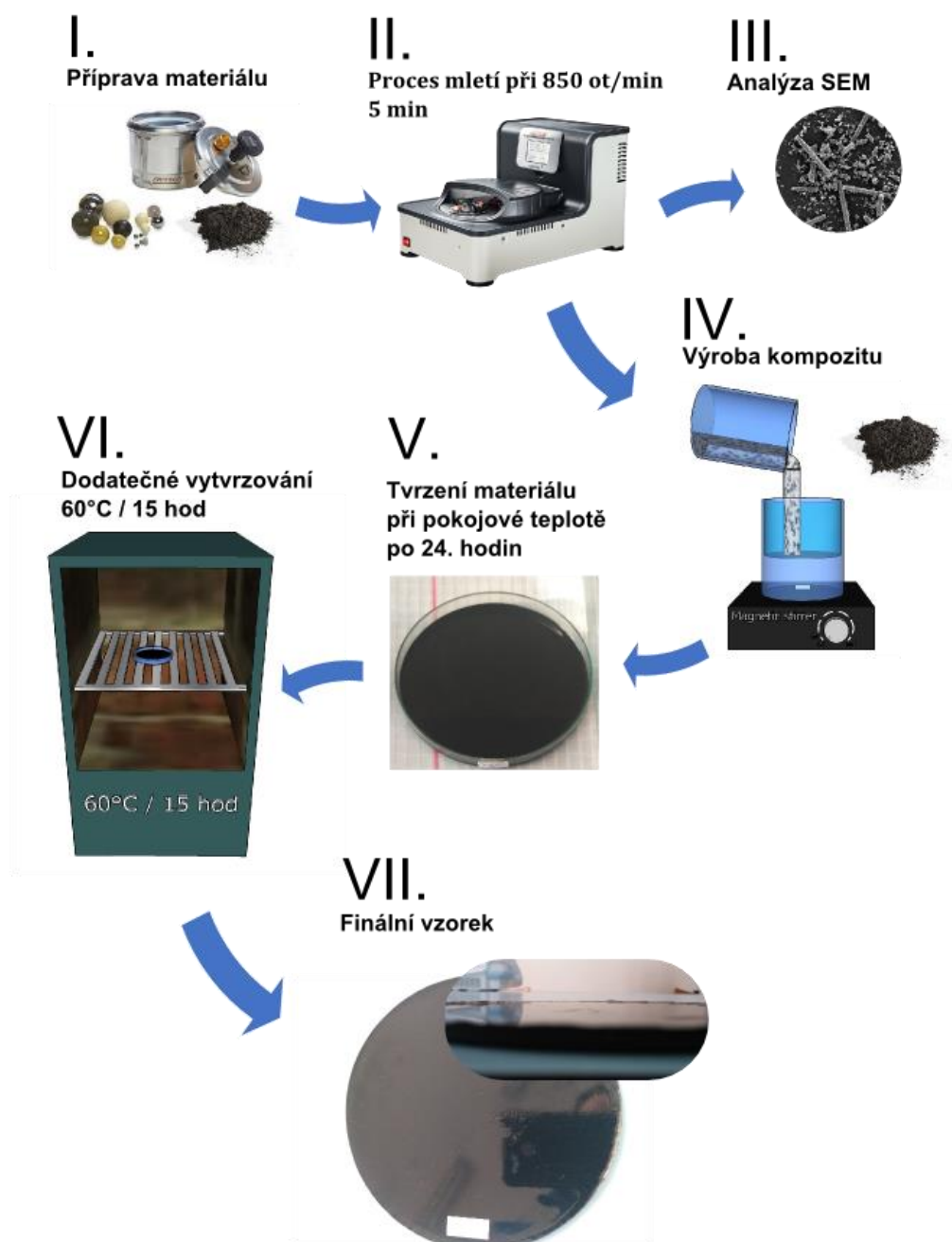
2.4.2 Chemické zpracování

Chemické zpracování uhlíkových kompozitních materiálů je poměrně novou metodou vyvinutou ve společnosti Siemens. Oproti předchozí pyrolýze skrývá tato metoda několik výhod. Těmi jsou nízká energetická náročnost, a především maximální šetrnost k uhlíkovým vláknům.

Při tomto procesu dochází k zahřívání uhlíkových kompozitů na teplotu 200 °C, kdy se začne polymerní materiál přeměňovat na mnohem menší molekuly alkoholů a následně je pomocí vody odlučován od uhlíkové výztuže. Nedojde tak k výraznému ovlivnění mechanických vlastností uhlíkových vláken. Díky tomu se výrazně prodlužuje jejich životnost a rozšiřuje se pole jejich využití jakožto recyklátu. Vlákná tak mohou být znovu využita na podobné konstrukční prvky jako vlákna prvovýrobní. Pokud by byl tento proces aplikován na vysloužilé uhlíkové kompozity, mohlo by dojít k obrovským úsporám jinak vynaloženým na zpracování a výrobu nových uhlíkových vláken. (Siemens 2014)

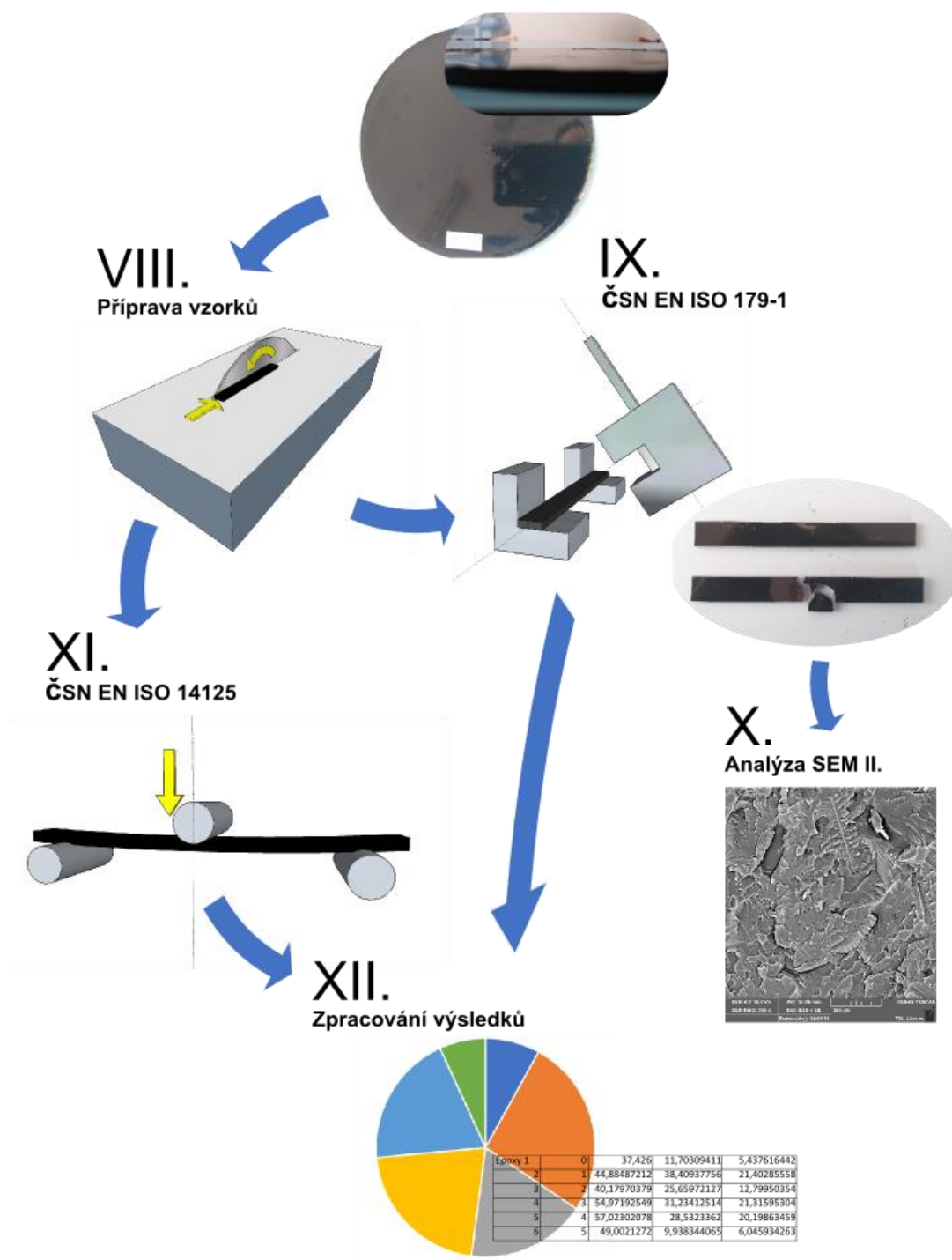
3 Experimentální část

A. Příprava vzorků



Obrázek 7 Schéma praktické části bakalářské práce A

B. Mechanické testování vzorků



Obrázek 8 Schéma praktické části bakalářské práce B

3.1 Mletí uhlíkových vláken

Procesu mletí lze využít za účelem získání menších částic materiálu, než je velikost částic materiálu vstupního. Pokud prochází výchozí materiál mlecím procesem a setrvá v něm po určitou dobu, lze získat různé velikosti částic mletého materiálu.

V této práci byla mleta recyklovaná uhlíková vlákna Carbiso a pro mletí bylo užito speciálního laboratorního zařízení pro mletí částic. Proces mletí byl několikrát opakován, díky čemuž bylo dosaženo různých velikostí částic viz kapitola 3.4. (Rowe 2009)

3.2 Mletá uhlíková vlákna Carbiso

Výchozí surovinou pro mletí byla využita již mletá uhlíková vlákna Carbiso. Mletá uhlíková vlákna Carbiso Mil 100 μm vyrobená firmou Easycomposites. Tato předem mletá uhlíková vlákna mají dobrou dispergovatelnost⁹ a jsou kompatibilní s matricí většiny termosetů. Mletá uhlíková vlákna jsou distribuována ve formě velice jemného černého prášku. Prekurzorem pro tato uhlíková vlákna je PAN.



Obrázek 9 Carbiso Mil 100 μm (Easycomposites 2015)

Následující tabulka prezentuje materiálová data a mechanické vlastnosti mletých uhlíkových vláken Carbiso Mil 100 μm udávané v technickém listu výrobcem. (Easycomposites 2011)

⁹ Rozptýlení pevných částic čímž nedochází k jejich shlukování.

Tabulka 2 Materiálová data a mechanické vlastnosti – Carbiso (Easycomposites 2011)

Vlastnosti	Jednotka	Hodnota
Obsah uhlíkových vláken	%	>95
Obsah dalších vláken	%	<5
Průměr vlákna	μm	7,5
Délka vlákna	μm	100
Objemová hustota	g/l	400
Kovové příměsi	-	<0,5g/1000 g
Tahová síla	MPa	3150
Tahový modul	GPa	200
Hustota vláken	Kg/m ³	1800

3.3 Mlýnek pro mletí uhlíkových vláken

Pro mletí uhlíkových vláken byl využit nano mlýnek Pulverisette 7 premium line firmy Fritsch. Přístroj se dělí na počítačovou část, která řídí celý proces a na mechanickou část ve které probíhá samotné mletí.



Obrázek 10 Mlýnek Fritsch Pulverisette 7 (Fritsch GmbH 2018)

Do mechanického ústrojí jsou vkládány dvě mlecí misky. Do mlecích misek, které mají vnitřní povrch ze zirkonového materiálu je vsypán materiál, který bude semlet a přesný počet zirkonových¹⁰ mlecích kuliček o stejném průměru. Mlecí misky jsou uzavřeny tlakovým víčkem a zasazeny do mechanického ústrojí stroje. Na řídicí jednotce přístroje je pak zvolen průměr mlecích kuliček, požadovaný počet otáček za minutu a délka trvání procesu mletí v minutách. Po semletí je veškerý obsah mlecí misky vyjmut a pomocí síta

¹⁰ Jedná se o přírodní minerál čtvercového průřezu vyznačující se velkou tvrdostí téměř dosahující tvrdosti přírodního diamantu. Zirkon 8,5 a diamant 10 Mohsovy stupnice [-].

oddělen na semletý materiál a mlecí kuličky. Na konci celého procesu jsou mlecí misky čištěny. (Fritsch GmbH 2018); (Prvky.com 2012)



Obrázek 11 Mlecí miska, mlecí kuličky a materiály: převzato a přepracováno (Fritsch GmbH 2018); (Easycomposites 2015)

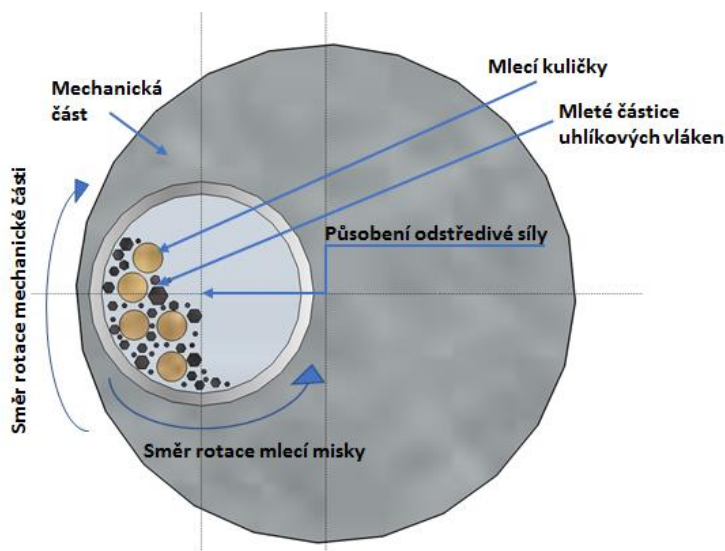
3.4 Princip mletí uhlíkových vláken

Do mlecí misky je vsypáno odvážené množství 15 g uhlíkových vláken Carbiso a 12 ks. mlecích kuliček o průměru 10 mm. Mlecí miska o obsahu 80 ml je uzavřena tlakovým uzávěrem a je vložena do mechanické části stroje. Do mechanické části stroje lze vložit dvě uzavřené mlecí misky. Obě misky musí obsahovat stejné množství kuliček totožného průměru. Po vložení mlecích misek do přístroje následuje nastavení mlecích parametrů. Je nastavena rychlost otáčení mechanické části na hodnotu 850 ot/min. Dále je nastaven průměr kuliček na hodnotu 10 mm a doba trvání procesu mletí na 5 min. Stroj je uzavřen a probíhá proces mletí.

Při procesu mletí dochází k rotaci mechanické části ve směru hodinových ručiček o rychlosti 850 ot/min. Směr rotace mlecí misky je protichůdný oproti rotaci mechanické části. Uvnitř mlecí misky působí odstředivá síla na mlecí kuličky a mleté částice uhlíkových vláken. Díky působení odstředivé síly a protichůdným rotacím mechanické části a mlecí misky dochází k mletí uhlíkových částic mlecími kuličkami. Mlecí kuličky rotují a poskakují v mlecí misce a narážejí do kuliček okolních a do stěn mlecí misky. Kuličky mezi sebou mají uhlíkové částice, které jsou soustavnými nárazy kuliček drceny a mlety na mnohem menší částice, než byla velikost uhlíkových částic na začátku procesu mletí.

Parametry nastavení přístroje byly provedeny na základě předchozích měření pracovníky laboratoře, při kterých byly právě tyto parametry vypočítány jako nejvhodnější pro tento typ zpracovávaného materiálu.

Princip mletí kuliček je přesněji znázorněn na následujícím schématu.



Obrázek 12 Schéma principu mletí uhlíkových vláken v mlýnku

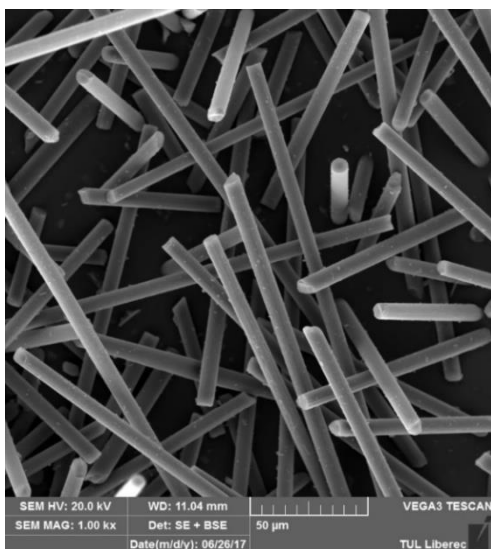
(Rowe 2009); (Fritsch GmbH 2018)

3.5 Zhodnocení mlecího procesu uhlíkových vláken

Pro účely této práce byla mleta uhlíková vlákna Carbiso v mlýnku celkem 3×. Následně byl namletý materiál vložen pod skenovací elektronový mikroskop¹¹, kde byly pořízeny mikroskopické snímky. Snímky zachycují a znázorňují materiál po jednotlivých průchodech mlýnkem.

Následující vyobrazení z elektronového mikroskopu znázorňuje stav mletých uhlíkových vláken Carbiso o délce 100 μm a průměru 7,5 μm dodávaných výrobcem. Vlákna byla nasnímaná vždy při 100násobném a 500násobném zvětšení.

¹¹ Skenovací elektronový mikroskop (SEM) – využívá k zobrazení sledovaného vzorku usměrněného svazku elektronů, které vysílá proti pozlacenému vzorku. Obraz je sestaven na základě průchodu a odrazu elektronových paprsků testovaným materiálem. Více v publikaci Elektronová mikroskopie dostupné na: http://old.vscht.cz/nmr/mol_model_bioinfo/lekce/mikroskopie.pdf



Obrázek 13 Uhlíková vlákna Carbiso 1000× zvětšená



Obrázek 14 Uhlíková vlákna 100 μm 5000× zvětšená

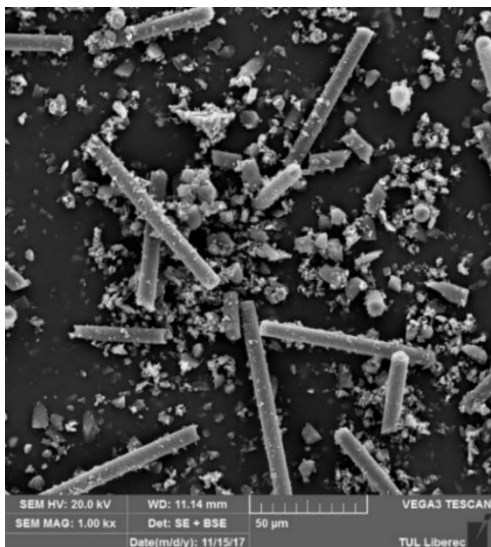
Na prvních snímcích z elektronového mikroskopu můžeme pozorovat uhlíková vlákna, která jsou neporušená. Na povrchu vláken jsou k vidění malé uhlíkové částice, které se na vlákno přichytily již při krácení vláken výrobcem na požadovanou délku 100 μm.

Následující snímky dokumentují stav vláken po prvním průchodu výchozí látky procesem mletí v mlýnku.

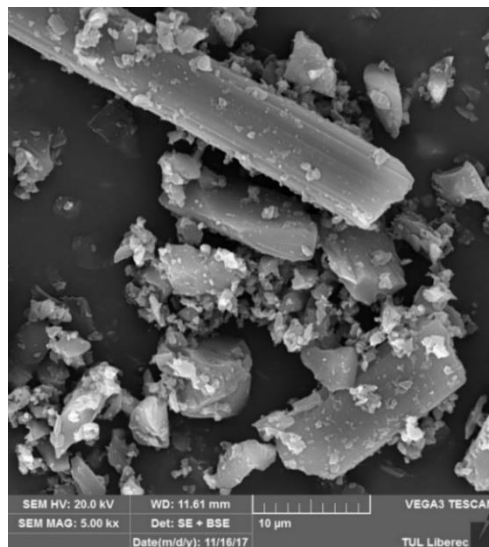
1× mletá uhlíková vlákna

Vlivem prvního procesu mletí uhlíkových vláken došlo ke zkrácení vláknenného materiálu na menší částice. Původní uhlíková vlákna byla drcena zirkonovými kuličkami v mlýnku. Z mikroskopických snímků je patrné, že nedošlo k úplnému rozemletí všech vláken. To bylo zapříčiněno krátkou dobou mlecího procesu v porovnání s vkládaným množstvím materiálu do mlýnku.

Kratší doba mlecího procesu byla stanovena z důvodu velkého uvolňování energie při procesu mletí převážně v podobě tepla. Přílišná zvyšující se teplota při chodu stroje by mohla zapříčinit negativní vliv na práci stroje a mohla by ovlivnit zpracovávaný materiál, při překročení stanovené doby mletí.



Obrázek 15 Uhlíková vlákna 1× mletá 1000× zvětšená

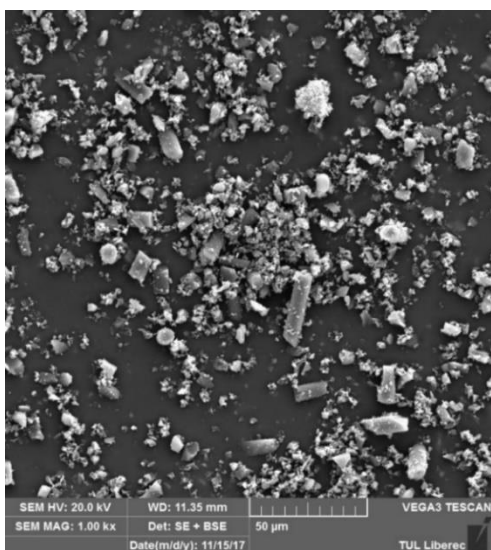


Obrázek 16 Uhlíková vlákna 1× mletá 5000× zvětšená

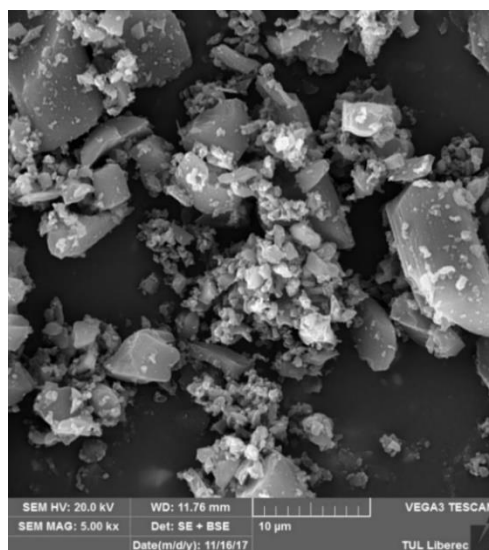
Ze snímků 17. a 18. je patrné, že nedošlo k úplnému rozemletí uhlíkových vláken. Po prvním procesu mletí se v mletém materiálu vyskytují neporušená uhlíková vlákna a částice uhlíkových vláken vzniklé jejich rozemletím. Geometrie uhlíkových částic je tak neregulérná. Průměrná velikost částic činí 6,5 μm . (Föcke 2018)

2× mletá uhlíková vlákna

Při druhém procesu mletí uhlíkových vláken došlo k rozemletí částic na ještě menší. Z obrázků 19. a 20. vyplývá, že podruhé mletý materiál je tvořen převážně menšími mletými částicemi, stále však můžeme v rozemletém materiálu pozorovat malé kousky nerozemletých vláken. Průměr mletých částic činí 3,8 μm a geometrie materiálu dosahuje větší stejnoměrnosti.



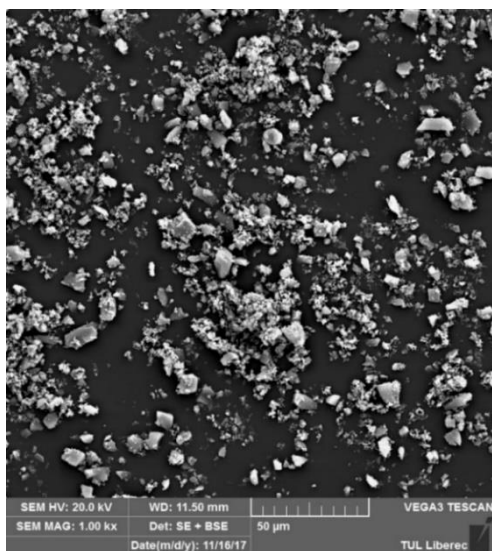
Obrázek 17 Uhlíková vlákna 2× mletá 1000× zvětšená



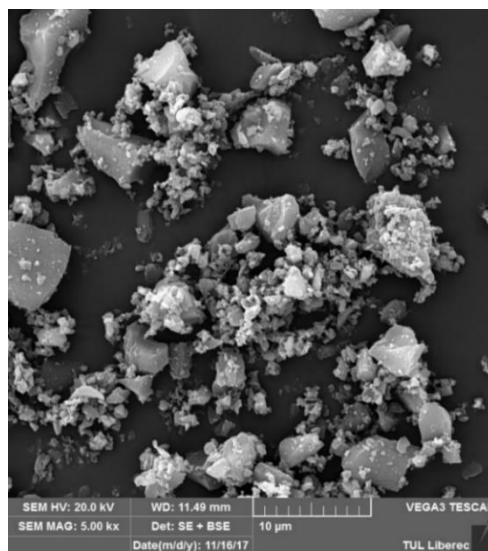
Obrázek 18 Uhlíková vlákna 2× mletá 5000× zvětšená

3× mletá uhlíková vlákna

Při třetím procesu mletí již došlo k plnému rozemletí uhlíkových vláken na malé částice dosahujících svou průměrnou naměřenou velikostí 3,6 μm . Ve skutečnosti zde nalézáme částice mnohem menší. Měřicí přístroj však detekoval mnoho shlukovaných částic, a proto je průměrná hodnota takto vysoká ve srovnání s 2× mletými částicemi.



Obrázek 19 Uhlíková vlákna 3× mletá 1000× zvětšená



Obrázek 20 Uhlíková vlákna 3× mletá 5000× zvětšená

Při porovnání všech snímků lze ověřit, že s opakujícím se procesem mletí aplikovaným na jeden hmotnostní vzorek materiálu dochází ke zmenšování uhlíkových částic na částice s rozměry jednotek mikrometrů.

Proces mletí uhlíkových vláken v mlýnku je vzhledem k časové náročnosti a výslednému množství, vhodný spíše pro laboratorní účely. Pokud bychom chtěli tento proces uplatnit při průmyslové výrobě, museli bychom využít mlecí stroje s větším mlecím ústrojím, kam by mohlo být vloženo větší množství zpracovávaného materiálu.

Intenzifikací mlecího procesu by mohlo být lepší řešení odvodu tepelné energie vznikající při mlecím procesu. Řešením tohoto problému by mohlo být například chladící médium na bázi vody či oleje, které by obklopovalo mlecí misku a proces jejího zahřívání by mohl být zpomalen. Při nastavování parametrů přístroje, by musel být brán zřetel na přítomnost těchto médií, zvláště pak při nastavování otáček mlecí misky.

Dalším intenzifikátorem mlecího procesu by mohla být výměna zirkonových mlecích kuliček za mlecí kuličky vyrobené z jiného materiálu. Z podstaty zirkonu by však při

použití jiných materiálů jako jeho náhrady, docházelo k rychlejšímu opotřebení mlecích kuliček, a tudíž k neekonomické bilanci. Srovnatelným materiálem k zirkonu dle jeho tvrdosti je chrom.

Vlákna, která prošla třetím procesem mletí, nebyla při následující výrobě epoxidových vzorků užitá z důvodu časové náročnosti experimentu. Budou použita pro přípravu dalších vzorků pro diplomovou práci.

4 Epoxidové vzorky

Výroba epoxidových vzorků probíhá postupným mísením několika níže specifikovaných chemických látek, dávkovaných v přesném množství a pořadí za neustálého míchání. Následuje odlití připravené epoxidové pryskyřice do předem připravené formy, ve které je připravovaný vzorek dále tepelně upravován. Po tepelné úpravě, lze vzorek snadno vyjmout z formy a dále s ním lze pracovat pro potřeby mechanického testování.

Samotný čistý epoxidový vzorek vznikne smísením určitého množství epoxidové pryskyřice a tužidla. Pro tvorbu epoxidového vzorku s příměsí uhlíkových vláken jsou do tužidla tato vlákna aplikována, a to před přidáním epoxidové pryskyřice. Veškeré mísení probíhá za neustálého míchání na magnetickém míchadle.

4.1 Specifikace užitých chemických látek

Zde jsou uvedeny a blíže specifikovány chemické látky užitá pro výrobu epoxidových vzorků jejich mísením. Specifikace jsou vyhotoveny na základě technických listů vydaných výrobcem těchto látek.

4.1.1 Tužidlo

Přesné označení Tužidlo H 508 je kapalné tvrdidlo pro epoxidové pryskyřice. Tužidlo je vyrobeno na bázi cykloalifitického polyaminu¹². Látka má transparentní modrou barvu a iniciuje a urychluje chemickou reakci mezi tužidlem a epoxidovou pryskyřicí.

¹² Speciální polymer vhodný pro vláknotvorné plasty

4.1.2 Epoxidová pryskyřice

Přesné označení epoxidová pryskyřice L 285 (MGS) je laminační pryskyřice schválená německým federálním úřadem pro letectví. Je vhodná pro zapracování příměsí do pryskyřice v podobě sklených, kevlarových a uhlíkových vláken. Tato laminační pryskyřice je nejvyužívanějším systémem dnešního leteckého průmyslu díky vysokým statickým a dynamickým vlastnostem a extrémně dobré fyziologické kompatibilitě.

Doba zpracovatelnosti samotné pryskyřice je do 5 hodin v závislosti na typu užitého tužidla. Po smíchání pryskyřice s tužidlem je pak doba zpracovatelnosti do 20 minut.

Pryskyřice má transparentní neutrální barvu a hustotu $1,18 - 1,23 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ při $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Teplota zpracovatelnosti je mezi $10-50 \text{ }^\circ\text{C}$. Odlitý vzorek se vytvrzuje při pokojové teplotě anebo ve formě při vysokých teplotách.

Dle mechanických testů provedených výrobcem má epoxidová pryskyřice modul pružnosti 3300 MPa a pevnost v ohybu 12–14 MPa.

4.1.3 Laminační systém pryskyřice

Laminační systém pryskyřice vzniká po smísení epoxidové pryskyřice a tužidla v poměru 100: 40 ($\pm 0,2 \text{ g}$). V době zpracovatelnosti do 20 minut má systém viskozitu, která je optimální pro rychlé a dokonalé prosycení vláken přidaných do hmoty jako plnivo. (MGS Kunstharzprodukte GmbH nedatováno)

4.2 Výroba epoxidových vzorků

Pro výrobu vzorků byly využívány skleněné chemické kádinky, které byly vždy důkladně vymyty, aby nedošlo ke kontaminaci vyráběných vzorků nežádoucími látkami a nedošlo tak ke zkreslení výsledných hodnot celého procesu. Dále byly využívány skleněné Petriho misky jako formy, do kterých byly pryskyřice vylity. Petriho misky byly opět důkladně vyseparovány chemickou látkou známou pod obchodním názvem Frekote. Dalšími laboratorními pomůckami byly skleněné tyčinky, laboratorní váha a elektromagnetické míchadlo s magnetem a magnetickou tyčinkou.

Hmotnostní poměr tužidla a epoxidové pryskyřice je dán předpisem výrobce uvedeném v technickém listu. Hmotnostní množství pak bylo stanoveno na základě testovacích

pokusů provedených před samotnou výrobou epoxidových vzorků a po konzultaci s vedoucím práce.

Protokol z přípravy epoxidových vzorků je k nahlédnutí v příloze. Viz příloha G.

4.2.1 Postup výroby čistého epoxidového vzorku

Na laboratorní váze navážíme do kádinky 28 g ($\pm 0,2$ g) epoxidové pryskyřice L 258 (MGS), dále jen pryskyřice. Do druhé kádinky navážíme 8 g ($\pm 0,2$ g) tužidla H 508, dále jen tužidlo. Kádinku s tužidlem vložíme na elektromagnetické míchadlo. Do kádinky s tužidlem vložíme magnet a míchadlo zapneme. Do kádinky s tužidlem přidáme předem navážené množství pryskyřice a obě látky necháme míchat po dobu 3 minut při laboratorních podmínkách.

Po uplynutí doby míchání vypneme magnetické míchadlo a z kádinky vyndáme magnet pomocí magnetické tyčinky. Pryskyřici z kádinky přelijeme do připravené formy uložené na laboratorní desce, která je vodorovně vyvážená. Proces odlití vzorku musí proběhnout do 15 minut od smísení tužidla a epoxidové pryskyřice, tzv. gel time. Po uplynutí této doby dojde k nevratné chemické reakci zesíťováním prepolymerů¹³ tužidla a pryskyřice. Výsledná látka tak začne tuhnout a nelze ji odlít do připravené formy tak, aby došlo k rovnoměrnému rozlití ve formě. U vzorku by tak nebylo dosaženo konstantní vrstvy o stejné tloušťce a vzorek by byl nevhodný pro následné mechanické testování.

Ve formě je pak pryskyřice ponechána po dobu 24 hodin při laboratorních podmínkách a pokojové teplotě. Po 24 hodinách je naplněná forma vložena do horkovzdušné pece a tvrzena po dobu 15 hodin při teplotě 60 °C. Po uplynutí doby vytvrzování je pryskyřice z formy jednoduše vyjmuta.

Na konci tohoto procesu vznikne epoxidový vzorek kruhového tvaru o průměru 15 cm a konstantní tloušťce 3 mm ($\pm 0,5$ mm). Výsledný vzorek má vysoce lesknoucí, nelepivý povrch s ostrými hranami. Takto připravený vzorek je připraven pro další zpracování.

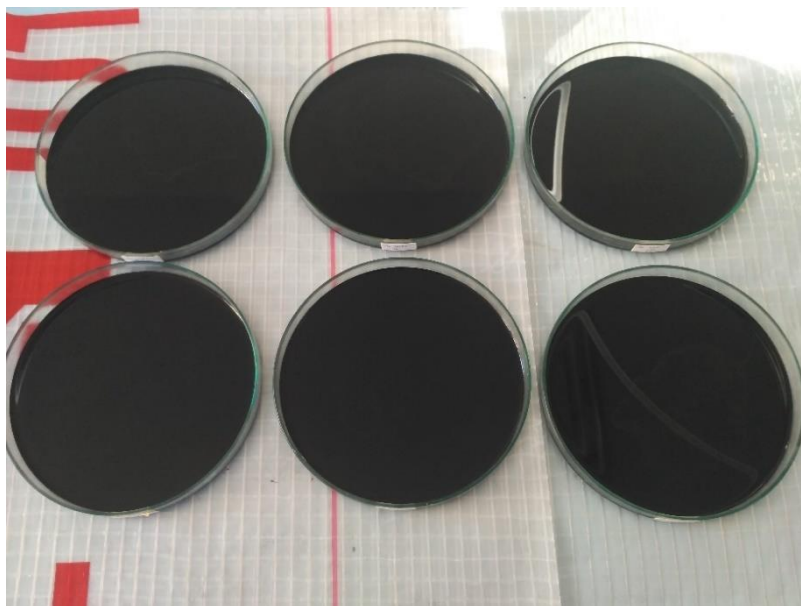
¹³ Jedná se o stabilní částečně polymerizovanou chemickou látku, která může být plně polymerizovatelná při adici dalších monomerů.

4.2.2 Postup výroby epoxidového vzorku s příměsí uhlíkových vláken

Postup výroby epoxidových vzorků s příměsí mletých uhlíkových vláken je velice obdobný jako při výrobě čistých epoxidových vzorků, tedy vzorků bez příměsí. Hmotnostní poměry a hmotnostní množství bylo stanoveno po konzultaci s vedoucím práce.

Na laboratorní váze je naváženo stejné množství tužidla i pryskyřice jako při výrobě vzorku bez příměsí. Po vložení kádinky s tužidlem na magnetické míchadlo a vložení magnetu je do tužidla přisypáno určité množství mletých uhlíkových vláken. Míchadlo necháme pomalu promíchávat obě látky do doby, než dojde alespoň k částečnému promísení obou látek. Z pravidla dojde k promísení obou látek téměř okamžitě nejpozději do 2 minut. Poté přidáme odvážené množství pryskyřice a necháme míchat po dobu 3 minut.

Po uplynutí doby míchání vypneme magnetické míchadlo a z kádinky vyndáme magnet pomocí magnetické tyčinky. Připravenou látku přelijeme z kádinky do připravené formy. S formou je pak nakládáno naprosto totožně jako s formou při tvorbě epoxidových vzorků bez příměsí. Velký důraz musíme klást na pořadí vzorků, jelikož hotové vzorky jsou od sebe nerozeznatelné.



Obrázek 21 Vzorky s příměsí uhlíkových vláken po vyndání z pece

4.3 Příprava formy

Formy, do kterých byly odlévány epoxidové vzorky musely být nejdříve řádně vyčištěny a vyseparovány, aby nedošlo ke kontaminaci epoxidových vzorků cizími látkami, nedošlo tak ke zkreslení výsledků celého procesu a aby bylo možné hotové epoxidové vzorky jednoduše vyjmout z formy.

Pro separaci forem bylo užito chemického separátoru Frekote. Separátor byl aplikován v malém množství do formy a důkladně roznesen pěnovým válečkem po vnitřním obvodu a po dnu formy.

Aplikace proběhla třikrát za sebou v deseti minutových intervalech. Díky časovým intervalům mezi jednotlivými aplikacemi přípravku došlo vždy k zaschnutí slabé vrstvy přípravku na aplikovaných místech v misce. Po důkladné separaci a vyschnutí, byly formy připraveny pro vylití epoxidovou pryskyřicí.

4.3.1 Chemický separátor Frekote

Frekote 770 NC je bezbarvý, separační prostředek pro formy. Používá se pro odlučování většiny epoxidových pryskyřic. Obsahuje alifatický uhlovodík, který je rozpouštějící látkou. (Frekote nedatováno)

4.4 Magnetické míchadlo

Pro potřeby práce bylo užito magnetické míchadlo HI 190M od firmy Hanna instruments. Míchadlo se skládá z míchadla, magnetu na míchání a magnetické tyčinky. Otáčky magnetu v kádince nastavujeme na míchadle tak, aby se magnet v kádince plynule otáčel uprostřed kádinky. Při vysokých otáčkách přístroje nebo při špatném umístění kádinky na míchadlo může dojít ke kontaktu magnetu se stěnami kádinky a k následnému vylétnutí magnetu z kádinky, či k převržení kádinky z míchadla odstředivou silou magnetu. (Hanna Instruments nedatováno)



Obrázek 22 Magnetické míchadlo HI 190M

5 Testování mechanických vlastností

Uhlíkové kompozitní materiály lze mechanicky testovat hned několika normovanými způsoby. V této bakalářské práci byly provedeny zkoušky:

- Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy ČSN EN ISO 179-1
- Stanovení ohybových vlastností metodou tříbodového ohybu ČSN EN ISO 14125

5.1 Zkouška rázové houževnatosti Charpyho metodou

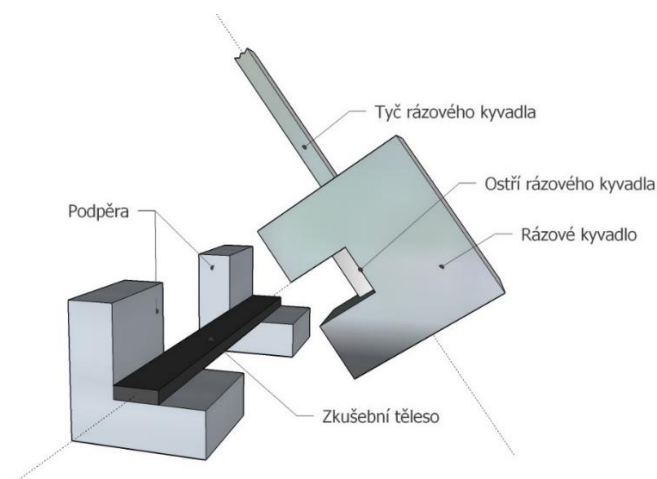
„Tato metoda ČSN EN ISO 179-1 je vhodná pro zkoušení materiálů vykazujících mezi vrstvý smykový lom a je určena pro kompozitní materiály plněné vlákny na bázi reaktoplastů nebo termoplastů vyztuženými v jednom nebo více směrech.“
(Český normalizační institut 2011)

5.1.1 Podstata zkoušky

„Zkušební těleso umístěné vodorovně na podpěrách je přeraženo úderem rázového kyvadla, přičemž směr rázu je veden středem vzdálenosti mezi podpěrami.“
(Český normalizační institut 2011)

Zkouška rázové houževnatosti spočívá v mechanickém namáhání tělesa silou, vyvinutou po velmi krátkou dobu. Souvisí s deformačními vlastnostmi testovaného tělesa,

schopností rychlé absorpce energie, tedy deformovat se určitou rychlostí. S navyšující se rychlostí rázového kyvadla, a tedy i s navyšujícím se namáháním, se testované materiály stávají křehčími. Testované těleso je pak přeraženo snáze než při nižších rychlostech rázového kyvadla. O velikosti energie spotřebované na přeražení tělesa vypovídá i rozdíl výšky kladiva před začátkem zkoušky a po zkoušce.



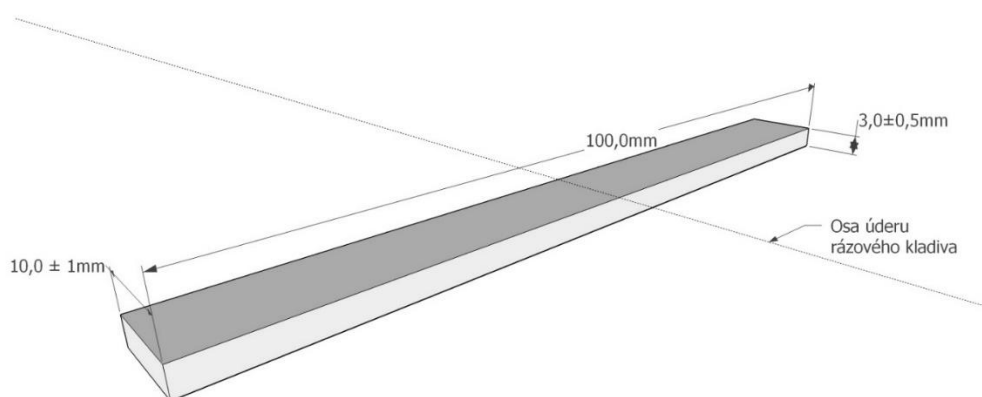
Obrázek 23 Schéma Charpyho rázové zkoušky ČSN EN ISO 179-1

Zkušební těleso bylo uloženo na podpěrách dle obr. 25. Samotný ráz byl pak proveden na užší stranu („edgewise“) zkušebního tělesa.

5.1.2 Příprava materiálu

Zkušební vzorky byly připraveny na normou stanovené rozměry.

Epoxidové vzorky o průměru 15 cm byly rozřezány na stolní cirkulární pile. Rozměry testovaných vzorků jsou vyobrazeny na následujícím schématu.



Obrázek 24 Schéma zkušební vzorku

Přesné rozměry vzorků jsou zapsány vždy v tabulkách u jednotlivých mechanických zkoušek v příloze. Nepřesné rozměry vzorků, především pak jejich šířka byla ovlivněna stolní cirkulární pilou. Rozkmitem kotouče pily při jejím zapnutí a též vlivem obtížného nastavování měřidla vymezujícího šířku vzorku.

5.1.3 Průběh zkoušky

Bylo provedeno vždy 5 měření vzorku stejných rozměrů viz obrázek 26. o stejné koncentraci příměsi uhlíkových vláken. Takto byly otestovány všechny skupiny vzorků o rozdílných koncentracích uhlíkových vláken.

Před vložením na podpěry byl testovaný vzorek přeměřen posuvným měřítkem. Byla zjišťována šířka tělesa uprostřed jeho délky, tedy v místě, kde došlo k přeražení úderem rázového kyvadla. Ve stejném místě byla zjišťována i tloušťka materiálu. Měření vzorků proběhlo s přesností ($\pm 0,02$) mm. Rozměry vzorků jsou udány vždy v tabulkovém přehledu naměřených hodnot v příloze.

Výsledkem zkoušky byly hodnoty rázové houževnatosti A [J/m^2] vynaložené při mechanickém porušení testovaného vzorku.

Rázová houževnatost je zde definována jako kinetická energie rázového kyvadla potřebná k porušení testovaného vzorku vztažena na jeho plochu příčného průřezu:

$$A = \frac{E}{a \cdot b} \left[\frac{J}{m^2} \right] \quad (3)$$

kde

E ... deformační energie potřebná k mechanickému porušení zkušebního tělesa odečtená ze zkušebního zařízení v [J]

a ... šířka zkušebního tělesa v [mm]

b ... tloušťka zkušebního tělesa v [mm]

5.2 Výsledky zkoušky rázové houževnatosti Charpyho metodou

V následující kapitole jsou analyzovány celkové výsledky průběhů zkoušek rázové houževnatosti Charpyho metodou. Tyto výsledky byly přepočítány z výsledků jednotlivých měření a dále zpracovány do grafického porovnání výsledků rázové zkoušky. Viz obr 27. Výsledky jednotlivých měření jsou k nalezení v příloze.

Nemletá uhlíková vlákna

Následující tabulka 3. zobrazuje naměřené a vypočítané výsledky pro testovaný kompozitní materiál obsahující nemletá recyklovaná uhlíková vlákna.

Z tabulky v příloze A, která znázorňuje výsledky dílčích měření rázové houževnatosti byla dle vzorce (4) vyjádřena rázová houževnatost.

Výpočet rázové houževnatosti (aritmetický průměr):

$$\bar{x} = \frac{\sum A_n}{n} \quad (4)$$

Kde A_n jsou jednotlivé naměřené rázové houževnatosti a n je počet měření pro vzorky se stejnou koncentrací recyklovaných uhlíkových vláken.

Dále byl pro statistické zpracování využit vzorec pro variační koeficient v (5).

$$v = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100 [\%] \quad (5)$$

Kde

s ... směrodatná odchylka

$\bar{x}$... aritmetický průměr

Pro výpočet směrodatné odchylky s bylo využito vzorce (6).

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (x_i - \bar{x})^2} \quad (6)$$

Kde

n ... počet měření

$\bar{x}$... aritmetický průměr

x_i ... naměřené hodnoty

Pro výpočet Intervalu spolehlivosti 95 % byl použit vzorec (7).

$$IS95\% = \bar{x} \pm \left(t_{1-\frac{\alpha}{2}} \cdot \left(\frac{s}{\sqrt{n}} \right) \right) \quad (7)$$

Kde

$\bar{x}$... aritmetický průměr

$t_{1-\frac{\alpha}{2}}$... studentova konstanta pro střední výběr ($t_{1-\frac{\alpha}{2}} = t_{1-\frac{0,05}{2}} = t_{0,975}$)

s ... směrodatná odchylka

n ... počet měření

α ... hladina významnosti ($\alpha = 0,05$)

Vzorce (4); (5); (6) a (7) byly využity i pro následující tabulky v kapitole 5.2 a 5.6 této práce.

Tabulka 3 Vypočtené hodnoty rázové houževnatosti kompozitu s nemletými uhlíkovými vlákny

Číslo vzorku	Procento obsažených uhlíkových vláken [%]	Celková rázová houževnatost A [J/m ²]	Variační koeficient [%]	Interval spolehlivosti 95 %
Epoxy 1	0	37,4	11,70	<31,96 – 42,84>
2	1	44,9	38,41	<23,50 – 66,30>
3	2	40,2	25,66	<27,40 – 53,00>
4	3	55,0	31,23	<33,68 – 76,32>
5	4	57,0	28,53	<36,80 – 77,20>
6	5	49,0	9,94	<42,95 – 55,05>

Dle tabulky 3. je patrné, že nejvyšší houževnatosti dosáhl testovaný vzorek s 4 % příměsí recyklovaných uhlíkových vláken. Z tabulky dále vyplývá, že hodnota houževnatosti stoupala s přibývajícím procentem výztuže, a to až do 4 %. Od 4 % výztuže došlo k poklesu hodnot houževnatosti materiálu. Výjimku tvoří pouze materiál s 3 % výztuže kde došlo k nepatrnému poklesu houževnatosti. Nejnižší hodnoty houževnatosti pak dosahovala čistá epoxidová pryskyřice bez příměsí uhlíkových vláken, což bylo očekáváno dle teoretických poznatků o epoxidových pryskyřicích.

1× mletá uhlíková vlákna

Následující tabulka 4. zobrazuje naměřené výsledky pro testovaný kompozitní materiál obsahující recyklovaná uhlíková vlákna o různé koncentraci, která prošla jedním mlecím procesem.

Tabulka 4 Vypočtené hodnoty rázové houževnatosti kompozitu s 1× mletými uhlíkovými vlákny

Číslo vzorku	Procento obsažených uhlíkových vláken [%]	Celková rázová houževnatost A [J/m ²]	Variační koeficient [%]	Interval spolehlivosti 95 %
Epoxy 1	0	37,4	11,70	<31,96 – 42,84>
1x 2	1	38,7	42,57	<18,23 – 59,17>
1x 3	2	18,4	27,52	<12,10 – 24,70>
1x 4	3	32,5	79,86	<0,30 – 64,70>
1x 5	4	36,7	29,99	<23,04 – 50,36>
1x 6	5	28,8	62,81	<6,38 – 51,22>

Tabulka 4. ukazuje, že hodnoty celkové rázové houževnatosti klesaly oproti hodnotě, které dosáhla epoxidová pryskyřice. Nepatrně vyšší hodnoty dosáhl pouze vzorek s 1 % koncentrací uhlíkových vláken.

2× mletá uhlíková vlákna

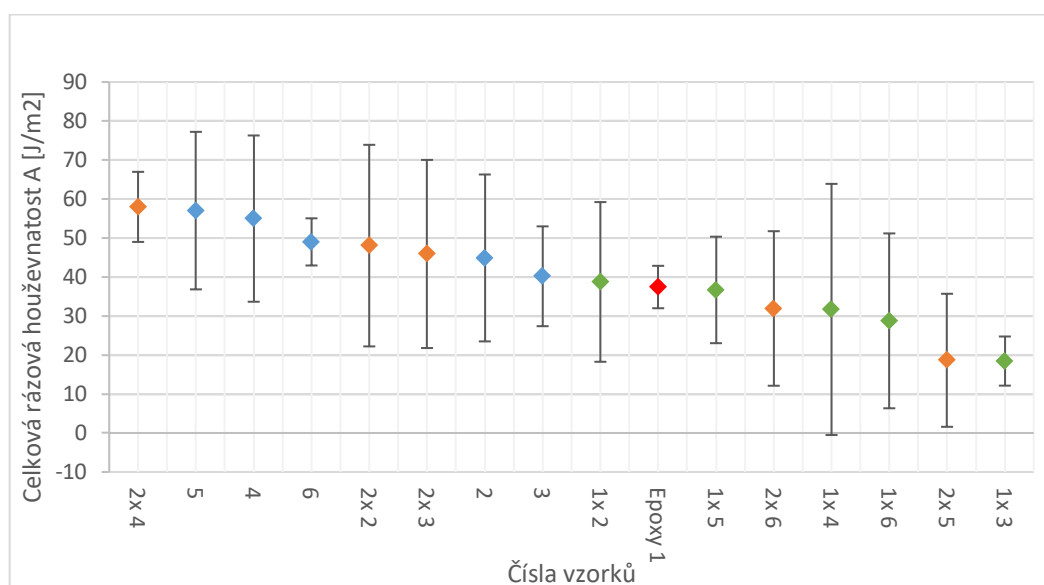
Následující tabulka 5. zobrazuje výsledky pro testovaný kompozitní materiál obsahující recyklovaná uhlíková vlákna o různé koncentraci, která prošla dvěma procesy mletí.

Tabulka 5 Vypočtené hodnoty rázové houževnatosti kompozitu s 2× mletými uhlíkovými vlákny

Číslo vzorku	Procento obsažených uhlíkových vláken [%]	Celková rázová houževnatost A [J/m ²]	Variační koeficient [%]	Interval spolehlivosti 95 %
Epoxy 1	0	37,4	11,70	<31,96 – 42,84>
2x 2	1	48,0	43,33	<22,15 – 73,85>
2x 3	2	45,9	42,33	<21,78 – 70,02>
2x 4	3	58,0	12,49	<49,01 – 66,99>
2x 5	4	18,6	73,71	<1,54 – 35,66>
2x 6	5	31,9	49,99	<12,09 – 51,71>

Z tabulky 5. vyplývá, že s 1 a 3 % koncentrací došlo ke zvýšení rázové houževnatosti kompozitu. U 2 % koncentrace došlo k navýšení houževnatosti, ale hodnota nepřekročila hodnoty u 1 a 3 % koncentrace. U testovaných vzorků 5 a 6 došlo k výraznému poklesu houževnatosti.

5.2.1 Zhodnocení výsledků zkoušky rázové houževnatosti



Obrázek 25 Grafické vyobrazení všech výsledků rázové houževnatosti u testovaných vzorků

Obrázek 27. graficky znázorňuje hodnoty rázové houževnatosti seřazené sestupně zleva dle dosažených hodnot při testování Charpyho metodou. Červenou barvou je označena rázová houževnatost čistého epoxidového vzorku bez výztuže. Modrou barvou jsou označeny vzorky s nemletými uhlíkovými vlákny. Zeleně a oranžově jsou označeny vzorky s mletými vlákny.

Nejvyšší hodnoty dosáhl vzorek o 3 % koncentraci s dvakrát mletými uhlíkovými vlákny. Nepatrně nižších hodnot pak dosáhly vzorky č. 5. a 4. ve kterých byla aplikována nemletá uhlíková vlákna.

Všechny vzorky s nemletými uhlíkovými vlákny dodané výrobcem dosáhly vyšších hodnot houževnatosti než čistý epoxidový vzorek. Naopak všechny vzorky s 1× mletými uhlíkovými vlákny dosáhly nižších hodnot rázové houževnatosti nežli vzorek bez výztuže z uhlíkových vláken. Výjimkou byl pouze vzorek č. 2. s houževnatostí vyšší o 1,3 [J/m²].

Naměřené výsledky u čistého epoxidového vzorku jsou totožné s naměřenými hodnotami výrobcem epoxidové pryskyřice viz kapitola 4.1.2.

Dle výsledků má na mechanické vlastnosti kompozitu vliv geometrie částic obsažených v epoxidové pryskyřici. Geometrie vzorků s nemletými uhlíkovými vlákny je

stejněměrná. Nemletá uhlíková vlákna jsou ve tvaru válce o průměru 7,5 μm a o délce 100 μm . Veškerá nemletá uhlíková vlákna jsou tedy stejného tvaru. U vláken, která prošla jedním mlecím procesem je geometrie částic nestejněměrná. V kompozitu jsou obsaženy malé částičky rozemletých vláken tak i velké válcové části vláken. U 2 $\times$ mletých uhlíkových vláken lze opět hovořit o stejnoměrné geometrii mletých částic. Viz kapitola 3.4.

Hodnoty výsledků mechanického testování mohly být ovlivněny konkrétní náhodnou orientací vláken v kompozitním materiálu v místě přeražení vzorku Charpyho kladivem. Ovlivnění hodnot mohlo být způsobeno procesem tuhnutí matrice kompozitu při jeho výrobě, kdy mohlo dojít k pohybu vláken v matrici vlivem uvolňování vnitřních sil mezi částicemi. K ovlivnění hodnot mohlo také dojít nedostatečným rozmícháním uhlíkových vláken a také tokem materiálu při jeho vlévání do formy anebo díky odlišným laboratorním podmínkám při tvorbě kompozitů.

Z tohoto měření vyplývá, že mlecí proces recyklovaných uhlíkových vláken má vliv na mechanické vlastnosti, čímž se potvrzuje předpoklad popsany již v abstraktu této práce.

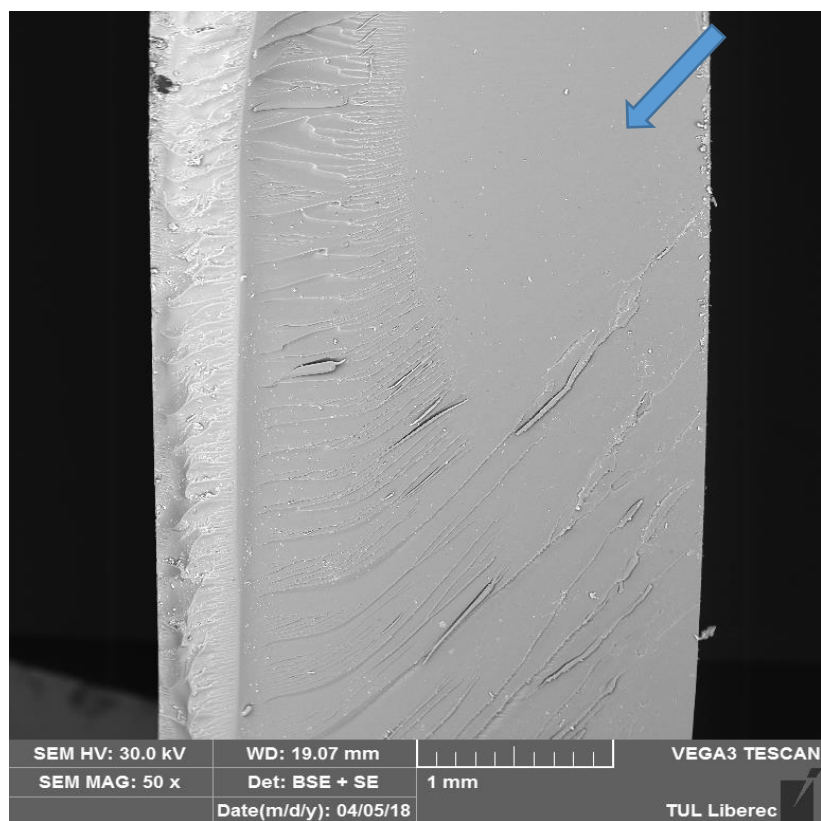
5.2.2 SEM Snímky lomů

V této kapitole jsou zobrazeny a popsány snímky lomů vzniklých na vzorcích po rázové zkoušce Charpyho metodou.

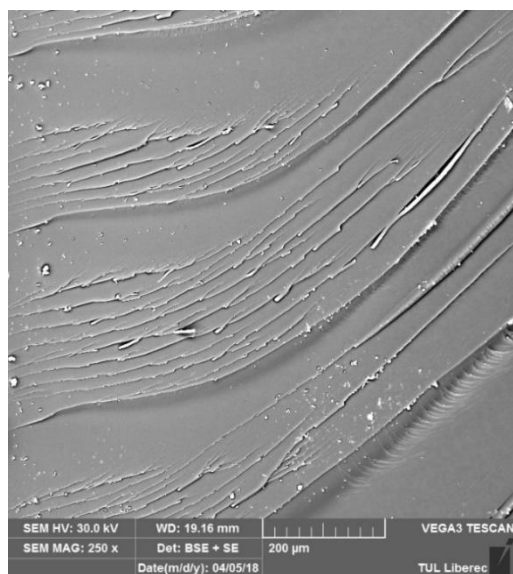
Epoxidový vzorek bez uhlíkové výztuže

Na následujícím snímku 28. můžeme pozorovat lom vzorku vyrobeného z čisté epoxidové pryskyřice. Na snímku, je označeno šipkou odkud došlo k šíření působení mechanické síly. Kyvadlo Charpyho kladiva udeřilo nejdříve do místa v pravém horním rohu na snímku. Odtud došlo k šíření mechanické síly do nitra vzorku.

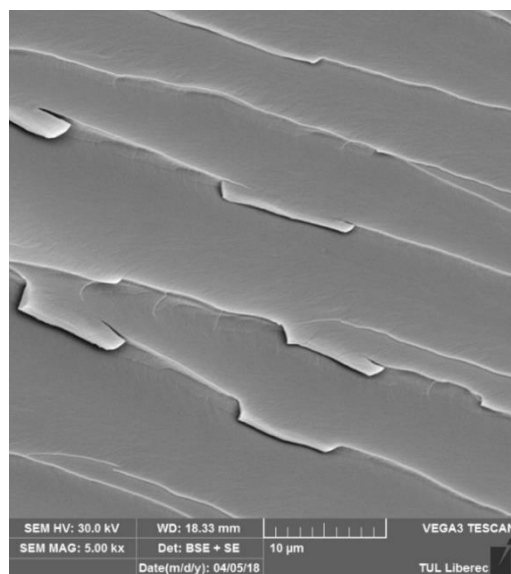
Ve směru působení síly můžeme pozorovat malé trhliny ve vzorku. Trhliny dosahují délky až 3 mm. Tento druh mechanického poškození byl způsoben nárazem kyvadla do vzorku. Došlo tak k porušení celistvosti struktury a k nevratné deformaci vzorku. Detailní vyobrazení trhlín zobrazuje obrázek 29 a 30.



Obrázek 26 Zkouška rázové houževnatosti – lom čisté pryskyřice



Obrázek 27 Detailní vyobrazení trhlin – 250× zvětšeno

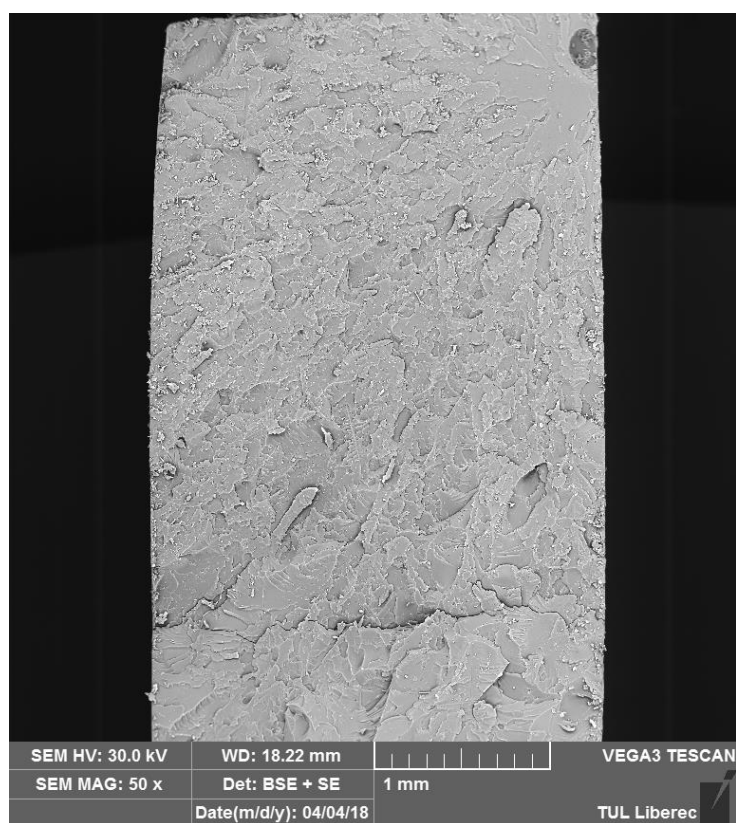


Obrázek 28 Detailní vyobrazení trhlin – 5000× zvětšeno

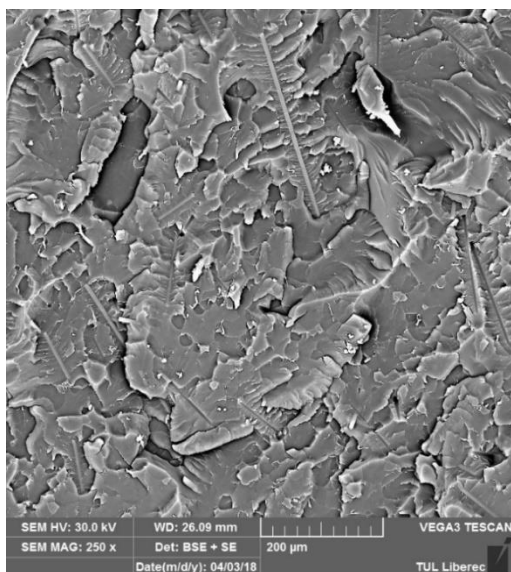
V blízkosti trhlin můžeme pozorovat i malé úlomky materiálu, které byly uvolněny při lomu.

Kompozitní materiál s nemletými uhlíkovými vlákny

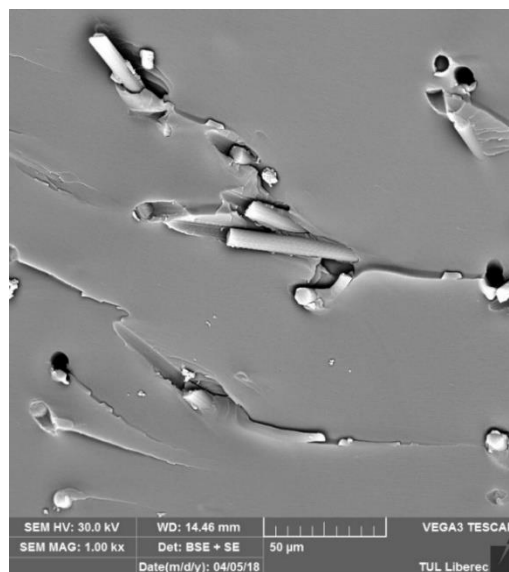
Na obrázku 31. nedošlo k tvorbě jednosměrně orientovaných trhlin, jako tomu bylo u čisté pryskyřice. Došlo zde k tvorbě trhlin orientovaných všemi směry. Trhliny vytvářejí jakési ostrovy, což je způsobeno právě výztuží z uhlíkových vláken. Při nárazu kladiva na vzorek došlo k tvorbě trhliny, ta se vlivem působení síly šířila dál od místa nárazu kladiva. Takto rozrůstající se trhlina narážela na místa s uhlíkovými vlákny, o která se větvila a došlo tak k vytvoření ostrovů s vlákny obklopenými trhlínami.



Obrázek 29 Zkouška rázové houževnatosti – lom materiálu s nemletými vlákny



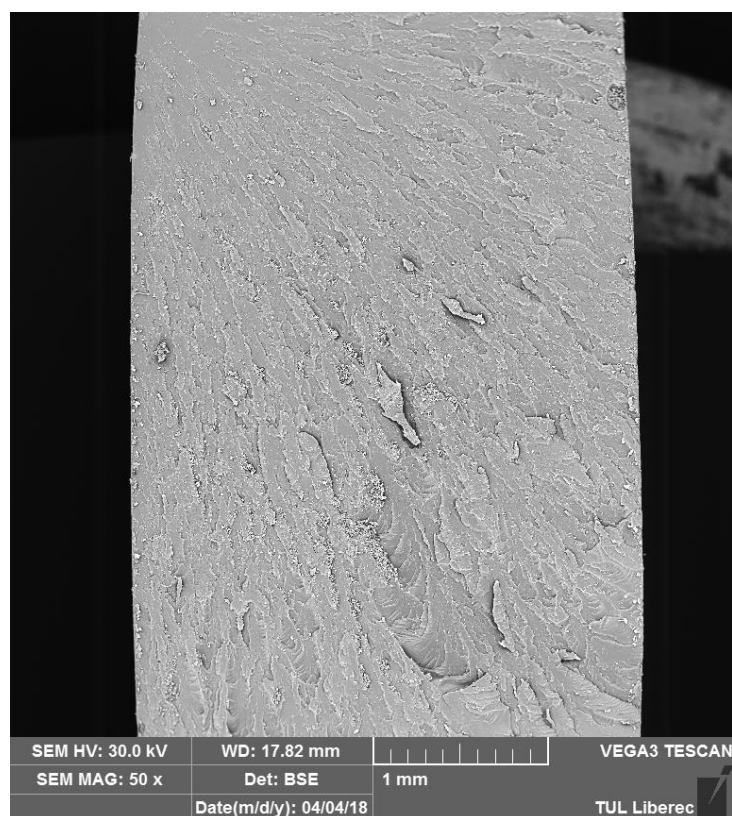
Obrázek 30 Detailní vyobrazení vzorku 250× zvětšeno



Obrázek 31 Detailní vyobrazení vzorku 1000× zvětšeno

Ze snímků 32. a 33. je dobře viditelná přítomnost uhlíkových vláken. Na snímku 32. jsou dobře viditelné rozsáhlé struktury trhlin způsobených úderem kladiva.

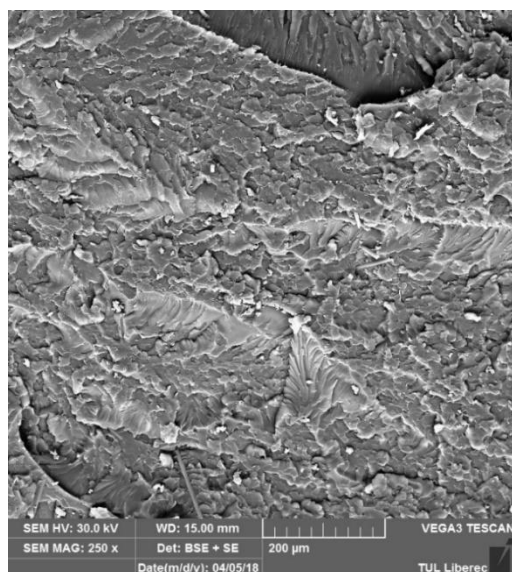
Kompozitní materiál s 1× mletými uhlíkovými vlákny



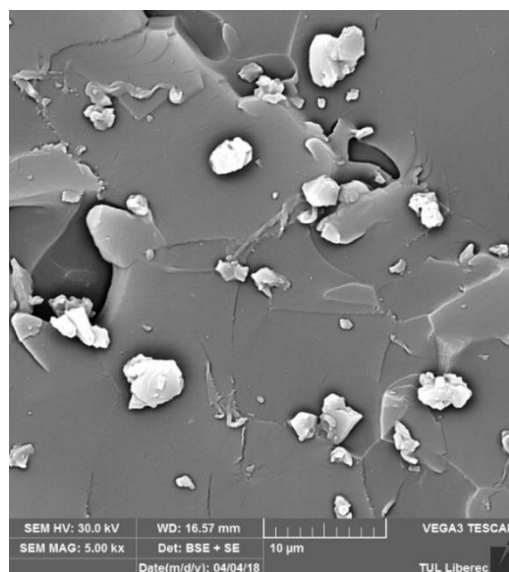
Obrázek 32 Zkouška rázové houževnatosti – lom materiálu s 1× mletými vlákny

Snímek 34. zobrazuje opět tvorbu trhlin. V porovnání s materiálem obsahujícím nemletá uhlíková vlákna jsou zde trhliny lineárnější od směru nárazu kladiva. Tento jev způsobují

menší částice mletých vláken. Trhlina tak při jejím šíření nemusí obcházet tak velký kus vláknů jako tomu bylo u předchozího vzorku. Stále však dochází k tvorbě ostrovů.



Obrázek 33 Detailní vyobrazení vzorku – 250× zvětšeno



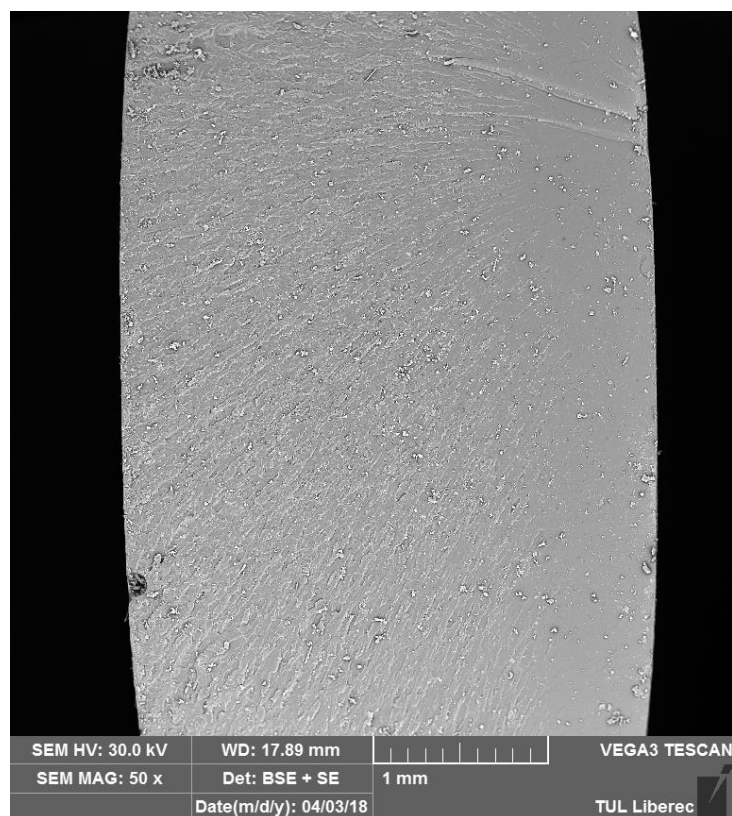
Obrázek 34 Detailní vyobrazení vzorku – 5000× zvětšeno

Na snímku 35. jsou viditelné rozemleté částice uhlíkových vláken, tak i nerozemletá vlákna. Další snímek 36. pak zobrazuje rozemleté částice při větším zvětšení.

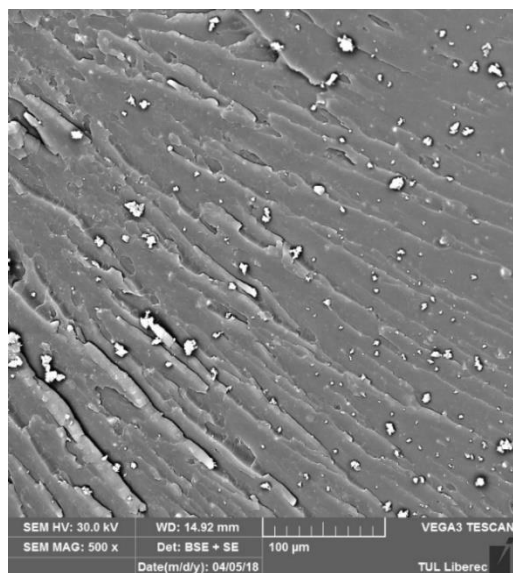
Kompozitní materiál s 2× mletými uhlíkovými vlákny

V kompozitním materiálu na snímku 37. jsou viditelné miniaturní trhliny, které jsou lineárního průběhu ve srovnání s předchozími vzorky obsahujícími výztuž. To je způsobeno obsahem mletých uhlíkových vláken se stejnými rozměry.

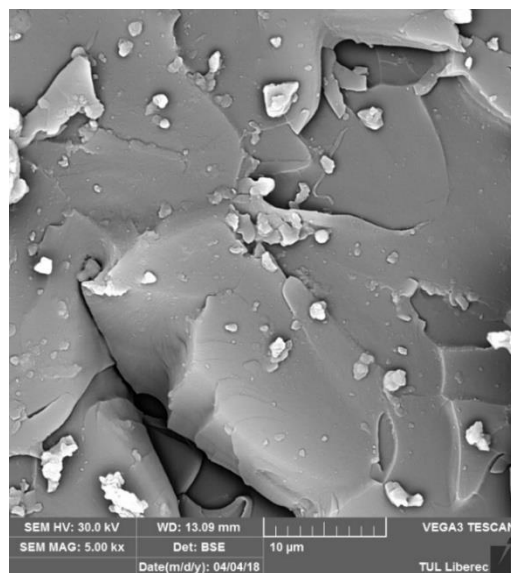
Obrázek 38. ukazuje detailněji lineárnost trhlín od směru nárazu kladiva. Též jsou zde k vidění rozemleté částice uhlíkových vláken. Na snímku 39., který byl zvětšen 5000×, lze také pozorovat rozemleté částice uhlíkových vláken.



Obrázek 35 Zkouška rázové houževnatosti – lom materiálu s 2x mletými vlákny



Obrázek 36 Detailní vyobrazení vzorku – 500x zvětšeno



Obrázek 37 Detailní vyobrazení vzorku – 5000x zvětšeno

Ze snímků vyplývá, že obsah uhlíkových vláken v kompozitním materiálu má vliv na jeho vnitřní uspořádání a na jeho strukturní vlastnosti.

(Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně Fakulta technologická nedatováno);

(Český normalizační institut 2011)

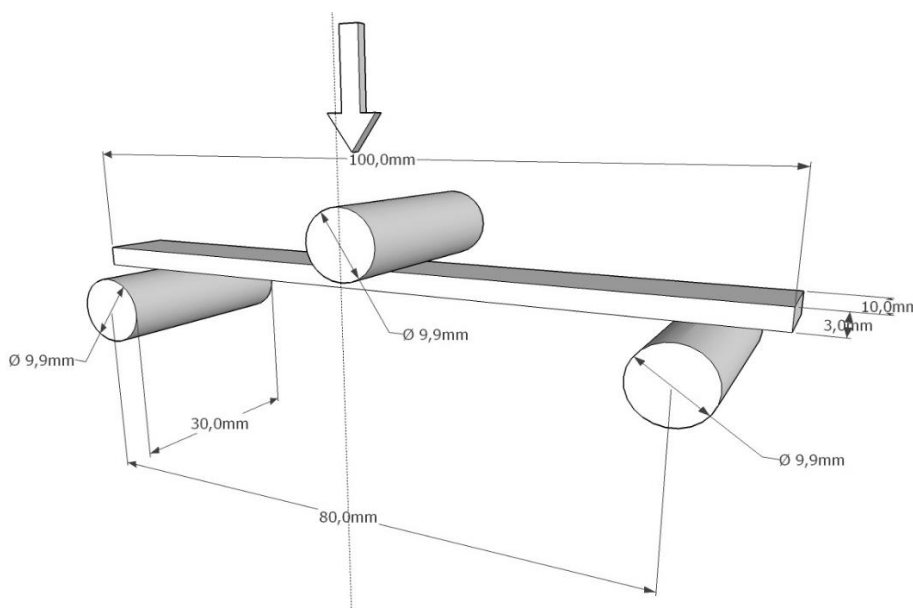
5.3 Zkouška ohybových vlastností tříbodovým ohybem

Tato metoda ČSN EN ISO 14125 je určena pro vlákny vyztužené plastové kompozity na bázi reaktoplastů a termoplastů. Do této normy jsou zahrnuty i nové typy vláken využívaných v kompozitech, uhlíková a aramidová.

5.4 Podstata zkoušky

Jedná se o statickou zkoušku, jejímž cílem je stanovení průhybu testovaného materiálu. Zkušební těleso je umístěno ve zkušebním přípravku, kde je ohýbáno konstantní rychlostí, dokud nedojde k jeho porušení nebo dokud deformace nedosáhne předem stanovených hodnot. V průběhu zkoušky se měří průhyb a síla působící na těleso.

Zkouška tříbodového ohybu slouží ke zjištění ohybových vlastností testovaného tělesa. Výsledkem zkoušky je stanovení pevnosti v ohybu. Těleso leží volně na dvou podporách a je zatěžováno uprostřed vzdálenosti mezi podporami, směrem proti podporám. Průběh zkoušky je volen tak, aby nedocházelo ke smykovým deformacím.



Obrázek 38 schéma zkoušky tříbodovým ohybem ČSN EN ISO 14125

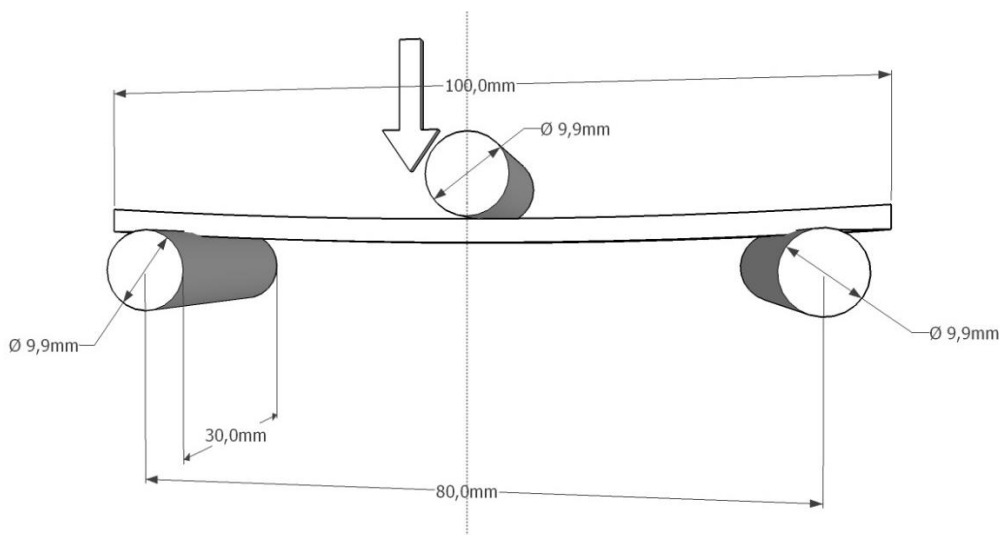
5.5 Průběh zkoušky

Bylo provedeno vždy 5 měření vzorku stejných rozměrů viz obrázek 26. o stejné koncentraci příměsi uhlíkových vláken. Takto byly otestovány všechny skupiny vzorků o rozdílných koncentracích uhlíkových vláken v matrici.

Před vložení na podpěry byl testovaný vzorek přeměřen posuvným měřítkem. Byla zjišťována šířka tělesa uprostřed jeho délky, tedy v místě působení síly na materiál. Směr působení síly je znázorněn na obrázku 40. a 41. šipkou. Ve stejném místě byla zjišťována i tloušťka materiálu. Měření vzorků proběhlo s přesností ($\pm 0,02$) mm. Rozměry vzorků jsou udány vždy v tabulkovém přehledu naměřených hodnot v příloze.

Maximální zatěžování testovaného vzorku bylo nastaveno tak, aby nedošlo k destrukci vzorku. Příčník stroje se posouval ve směru šipky z výchozí polohy na obrázku 40. o 1,5 mm do polohy vyobrazené na obrázku 41. V průběhu testování byla zaznamenávána data, která byla vyhodnocena v kapitole 5.6.

Výsledkem zkoušky byly hodnoty ohybového napětí σ_f [MPa] a modulu pružnosti E_f [MPa].



Obrázek 39 Schéma průběhu zkoušky – maximální zatížení vzorku

Ohybové napětí

Veličina vyhodnocená při statické ohybové zkoušce. Jedná se o napětí neboli pevnost v ohybu zkušebního tělesa ve střední vzdálenosti mezi podpěrami. Ohybové napětí je dáno vzorcem (7).

$$\sigma_f = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 a \cdot b^2} \quad [\text{MPa}] \quad (7)$$

kde

σ_f ... ohybové napětí v [MPa]

F ... zatěžující síla [N]

l ... vzdálenost podpěr [mm]

a ... šířka zkušebního tělesa v [mm]

b ... tloušťka zkušebního tělesa v [mm]

Modul pružnosti

Veličina vyhodnocená při statické ohybové zkoušce vyjadřující poměr rozdílu napětí a odpovídajícího rozdílu deformací vyjádřené v MPa. Veličinu stanovuje vzorec (8).

$$Ef = \frac{F \cdot l^3}{4 \cdot X \cdot a \cdot b^3} \quad [\text{MPa}] \quad (8)$$

kde

Ef ... modul pružnosti v [MPa]

F ... zatěžující síla [N]

X ... průhyb [mm]

l ... vzdálenost podpěr [mm]

a ... šířka zkušebního tělesa v [mm]

b ... tloušťka zkušebního tělesa v [mm]

(Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně Fakulta technologická nedatováno); (Český normalizační institut 1999); (Střední škola strojírenská a elektrotechnická Brno 2003)

5.6 Výsledky zkoušky tříbodového ohybu

V následující kapitole jsou analyzovány průběhy zkoušek tříbodového ohybu pro kompozitní materiály s různou koncentrací uhlíkových vláken. Jednotlivé průběhy zkoušek byly přepočítány a dále zpracovány do grafického porovnání výsledků. Viz obr. 42. a 43. Tabulky s rozměry testovaných vzorků a dílčí naměřené hodnoty jsou přiloženy v příloze.

Nemletá uhlíková vlákna

Následující tabulka 6. a 7. zobrazují naměřené výsledky ohybového napětí a modulu pružnosti pro testovaný kompozitní materiál obsahující nemletá recyklovaná uhlíková vlákna.

Tabulka 6 Vypočtené hodnoty ohybového napětí kompozitu s nemletými uhlíkovými vlákny

Číslo vzorku	Procento obsažených uhlíkových vláken [%]	Celkové ohybové napětí σ_f [MPa]	Variační koeficient ohybového napětí [%]	Interval spolehlivosti 95 % ohybového napětí
Epoxy 1	0	13,33	5,93	<12,35 – 14,31>
2	1	10,04	33,07	<5,92 – 14,16>
3	2	11,56	38,24	<6,07 – 17,05>
4	3	15,13	8,86	<13,47 – 16,79>
5	4	12,79	14,16	<10,54 – 15,04>
6	5	15,39	7,47	<13,96 – 16,82>

Tabulka 7 Vypočtené hodnoty ohybového napětí kompozitu s nemletými uhlíkovými vlákny

Číslo vzorku	Procento obsažených uhlíkových vláken [%]	Celkový modul pružnosti E_f [MPa]	Variační koeficient modulu pružnosti [%]	Interval spolehlivosti 95 % modulu pružnosti
Epoxy 1	0	3431,70	3,63	<3276,88 – 3586,52>
2	1	2812,33	41,22	<1373,12 – 4251,54>
3	2	2762,52	38,52	<1441,43 – 4083,61>
4	3	3916,91	2,19	<3810,28 – 4023,51>
5	4	3651,19	5,50	<3401,96 – 3900,69>
6	5	3843,81	2,51	<3723,8 – 3963,82>

Z tabulek vyplývá, že nejvyššího modulu pružnosti dosáhl vzorek obsahující 3 % příměs uhlíkových vláken a nejnižších hodnot dosáhl vzorek s 2 % příměsí. Největší ohybové napětí bylo naměřeno u vzorku č. 4. a naopak nejnižších hodnot dosáhl vzorek č. 2.

1× mletá uhlíková vlákna

Následující tabulky 8. a 9. zobrazují naměřené výsledky pro testovaný kompozitní materiál obsahující recyklovaná uhlíková vlákna o různé koncentraci, která prošla jedním mlecím procesem.

Tabulka 8 Vypočtené hodnoty ohybového napětí kompozitu s 1× mletými uhlíkovými vlákny

Číslo vzorku	Procento obsažených uhlíkových vláken [%]	Celkové ohybové napětí σ_f [MPa]	Variační koeficient ohybového napětí [%]	Interval spolehlivosti 95 % ohybového napětí
Epoxy 1	0	13,33	5,93	<12,35 – 14,31>
1x 2	1	12,49	8,81	<11,12 – 13,86>
1x 3	2	12,45	18,23	<9,63 – 15,27>
1x 4	3	11,05	25,80	<7,51 – 14,59>
1x 5	4	14,54	8,42	<13,02 – 16,06>
1x 6	5	11,67	23,99	<8,19 – 15,15>

Tabulka 9 Vypočtené hodnoty modulu pružnosti kompozitu s 1× mletými uhlíkovými vlákny

Číslo vzorku	Procento obsažených uhlíkových vláken [%]	Celkový modul pružnosti E_f [MPa]	Variační koeficient modulu pružnosti [%]	Interval spolehlivosti 95 % modulu pružnosti
Epoxy 1	0	3431,70	3,63	<3276,88 – 3586,52>
1x 2	1	3398,76	8,34	<3046,68 – 3750,84>
1x 3	2	3164,29	14,36	<2600,03 – 3728,55>
1x 4	3	2818,05	23,68	<1989,67 – 3646,43>
1x 5	4	3527,55	8,28	<3164,72 – 3890,38>
1x 6	5	2881,24	23,44	<2042,97 – 3719,51>

Z tabulek je patrné, že nejvyššího modulu pružnosti dosáhl vzorek s 4 % koncentrací uhlíkových vláken. Ostatní vzorky nedosáhly hodnot modulu pružnosti, které dosáhl čistý epoxidový vzorek. Stejně tak tomu bylo i při ohybovém napětí.

2× mletá uhlíková vlákna

Následující tabulky 10. a 11. zobrazují naměřené výsledky pro testovaný kompozitní materiál obsahující recyklovaná uhlíková vlákna o různé koncentraci, která prošla dvakrát mlecím procesem.

Tabulky ukazují, že nejvyššího modulu pružnosti i ohybového napětí dosáhl testovaný vzorek s 2 % koncentrací vláken.

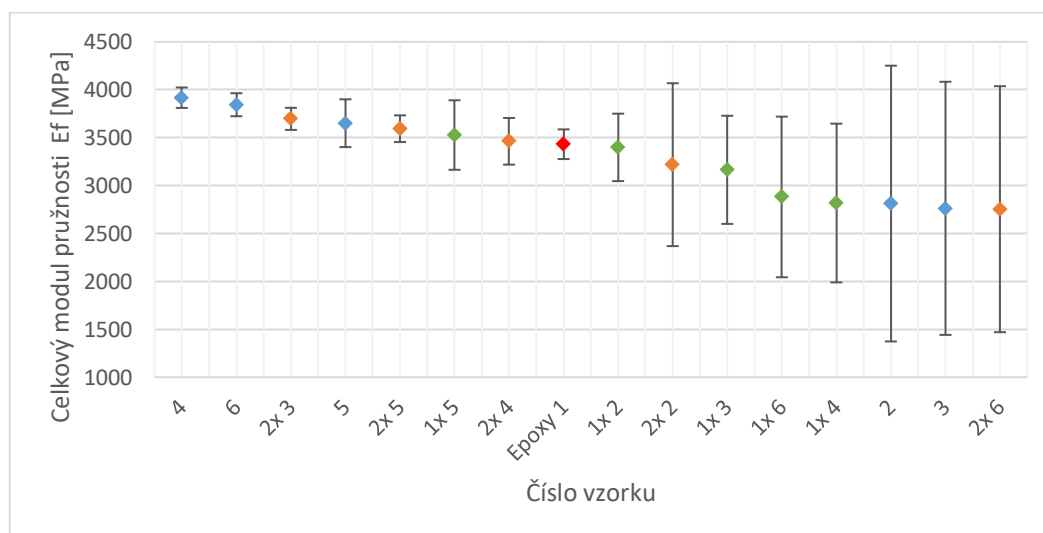
Tabulka 10 Vypočtené hodnoty ohybového napětí kompozitu s 2× mletými uhlíkovými vlákny

Číslo vzorku	Procento obsažených uhlíkových vláken [%]	Celkové ohybové napětí σ_f [MPa]	Variační koeficient ohybového napětí [%]	Interval spolehlivosti 95 % ohybového napětí
Epoxy 1	0	13,33	5,93	<12,35 – 14,31>
2x 2	1	12,34	23,37	<8,76 – 15,92>
2x 3	2	14,52	5,22	<13,58 – 15,46>
2x 4	3	13,99	7,13	<12,75 – 15,23>
2x 5	4	14,44	5,92	<13,38 – 15,50>
2x 6	5	11,45	38,46	<5,98 – 16,92>

Tabulka 11 Vypočtené hodnoty kompozitu s 2× mletými uhlíkovými vlákny

Číslo vzorku	Procento obsažených uhlíkových vláken [%]	Celkový modul pružnosti E_f [MPa]	Variační koeficient modulu pružnosti [%]	Interval spolehlivosti 95 % modulu pružnosti
Epoxy 1	0	3431,70	3,63	<3276,88 – 3586,52>
2x 2	1	3218,12	21,28	<2368,06 – 4068,18>
2x 3	2	3696,42	2,51	<3581,02 – 3811,82>
2x 4	3	3462,20	5,66	<3218,82 – 3705,58>
2x 5	4	3593,73	3,12	<3454,54 – 3732,92>
2x 6	5	2753,38	37,56	<1469,48 – 4037,28>

5.6.1 Zhodnocení výsledků zkoušky tříbodového ohybu



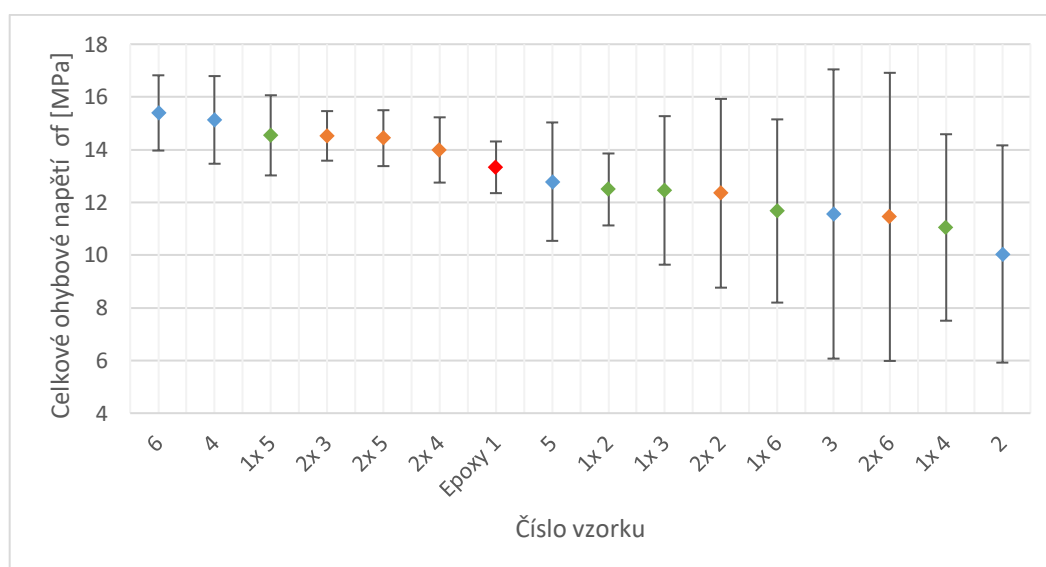
Obrázek 40 Grafické vyobrazení celkových výsledků modulu pružnosti u testovaných vzorků

Obr. 42. graficky znázorňuje vypočtené hodnoty modulu pružnosti seřazené sestupně zleva dle dosažených hodnot modulu pružnosti při testování zkouškou tříbodového ohybu. Červenou barvou je označen modul pružnosti čistého epoxidového vzorku bez

výztuže. Modrou barvou jsou označeny vzorky s nemletými uhlíkovými vlákny. Zeleně a oranžově jsou označeny vzorky s mletými vlákny.

Nejvyšší hodnoty dosáhl vzorek o 3 %-ní koncentraci s nemletými uhlíkovými vlákny. Vysokých hodnot dosahovaly i další vzorky s nemletými a 2× mletými vlákny. Vzorky s 1× mletými vlákny dosáhly nižších hodnot modulu pružnosti v porovnání s ostatními vzorky.

To je opět dáno nestejnoměrnou geometrií částic. O tom vypovídají i úsečky 95 % intervalu spolehlivosti. U všech vzorků s 1× mletými vlákny jsou tyto úsečky delší, než u testovaných vzorků vyznačených v grafu na obr. 42. vlevo od epoxidového vzorku Epoxy1. To znamená, že rozptyly naměřených dílčích hodnot pro dané 1× mleté vzorky se výrazně lišily, což bylo nejspíše způsobeno již zmiňovanou geometrií částic výztuže.



Obrázek 41 Grafické vyobrazení všech výsledků ohybového napětí u testovaných vzorků

Graf na obrázku 43. je postaven na stejném principu jako na obr. 42. Tento graf však zobrazuje vypočtené ohybové napětí vyjadřované v MPa.

Nejvyšších hodnot ohybového napětí dosáhl vzorek č. 6. s nemletými uhlíkovými vlákny. Nepatrně nižší hodnoty vykazoval i vzorek č. 4. s 3 % koncentrací nemletých vláken. Zbylé vzorky s nemletými uhlíkovými vlákny nedosáhly hodnoty ohybového napětí čisté epoxidové pryskyřice. U těchto zbylých vzorků můžeme pozorovat vysoké rozdíly naměřených dílčích hodnot. Veškeré naměřené hodnoty mohly být ovlivněny mnoha aspekty zmiňovanými v textu výše.

6 Závěr

Uhlíkové kompozity jsou v dnešní době široce užívaným materiálem k výrobě a konstrukci. Jsou široce užívány v mnoha odvětvích průmyslu. Dříve se využívaly tyto materiály především v kosmonautice a letectví. Dnes je nalézáme v širokém zastoupení i v automobilovém, strojním, vojenském či sportovním průmyslu.

Práce se zabývá vlivem mletí recyklovaných uhlíkových vláken na uhlíkové kompozitní materiály. Z těchto mletých vláken byly vyrobeny vzorky o různých koncentracích a následně byly testovány jejich mechanické vlastnosti.

Mechanické vlastnosti byly testovány rázovou zkouškou Charpyho metodou a zkouškou tříbodového ohybu.

Obrazová analýza společně s naměřenými hodnotami mechanického testování dokazují vliv mletých uhlíkových vláken na mechanické vlastnosti epoxidových kompozitů.

Optimální koncentrace uhlíkových vláken v kompozitu činila 5 % nemletých vláken nebo 3 % 2xmletých uhlíkových vláken. Tyto uvedené koncentrace se jeví jako vhodné pro zlepšení mechanických vlastností v uhlíkových kompozitech. Obsahují vhodné množství uhlíkových částic se stejnoměrnou geometrií, které vylepšují námi testované mechanické vlastnosti.

Uhlíkové kompozity vynikají unikátními vlastnostmi, ale jejich výroba je obtížná a ekonomicky náročná. V poslední době stále roste poptávka po těchto materiálech. Proto se klade stále větší důraz na recyklaci těchto materiálů. Již dnes nalézáme mnohá skladiště vysloužilých výrobků z kompozitních materiálů, která jsou velkou ekologickou zátěží. Recyklace takovýchto materiálů je však obtížná, především díky složení kompozitu, který je složen z více materiálů odlišných chemických i fyzikálních vlastností.

Na tuto práci bude tematicky navázáno v diplomové práci. Při výrobě epoxidových vzorků dojde k uplatnění připravených 3xmletých uhlíkových vláken. Míchání uhlíkových částic do pryskyřice bude prováděno v ultrazvukovém míchadle. Pro zvýšení kompatibility povrchu částic s pryskyřicí bude použito plazmy.

Seznam literatury

1. ANON., 2006. *Uhlíkové vlákno jako produkt recyklace* [online] [vid. 2018-03-15]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/uhlikove-vlakno-jako-produkt-recyklace_16717.html
2. BOJKOVSKÝ, Martin, 2009. *Termodynamika - Van der Waalsovy síly* [online]. Dostupné z: <http://fikus.omska.cz/~bojkovsm/termodynamika/vdws.html>
3. BULL, Sean, 2016. *F1 2017* [online]. Dostupné z: <https://www.behance.net/gallery/41561629/F1-2017-Livery-Concepts>
4. CABRNOCH, Bohuslav, 2012. Současný stav a výhledy použití kompozit-ních materiálů v konstrukci velkých doprav-ních letadel. *Transfer - výzkum a vývoj pro letecký průmysl* [online]. **17**, 45. Dostupné z: <http://docplayer.cz/4111863-Transfer-vyzkum-a-vyvoj-pro-letecky-prumysl-c-17-2012.html>
5. CENTER, Polymer Science Learning, 2018. *Polyacrylonitrile* [online] [vid. 2018-04-10]. Dostupné z: <http://pslc.ws/macrog/pan.htm>
6. ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 1999. ČSN EN ISO 14125. Česká republika, 1999.
7. ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2011. ČSN EN ISO 179-1. Česká republika, 2011.
8. CUBE, 2017. *Silniční kolo - karbon* [online] [vid. 2018-01-15]. Dostupné z: <http://www.ped.muni.cz/wphy/fyzvla/fmkomplet4.htm>
9. EASYCOMPOSITES, 2011. Carbiso Milled Carbon Fibre [online]. United Kingdom, 2011. Dostupné z: <http://www.elgcf.com/products/carbiso-milled-fibre>
10. EASYCOMPOSITES, 2015. *Milled Carbon Fibre Powder* [online] [vid. 2018-01-05]. Dostupné z: <http://www.easycomposites.co.uk/#!/resin-gel-silicone-adhesive/filler-powders-and-additives/general-fillers-and-additives/milled-carbon-fibre-powder.html>
11. FITZER, E a L.M MANOCHA, 1998. *Carbon reinforcement and Carbon-Carbon composites*. B.m.: Springer-verlag berlin. ISBN 3-540-62933-5.
12. FÖCKE, Vojtěch, 2018. *Porovnání měřících metod pro mikro a nanočástice a zdravotní rizika*. B.m. Technická univerzita v Liberci.
13. FREKOTE, nedatováno. Separační prostředek pro formy. Česká republika,

14. FRITSCH GMBH, 2018. *Planetary Micro Mill Pulverisette 7 premium line* [online] [vid. 2018-02-05]. Dostupné z: <http://www.fritsch-international.com/sample-preparation/milling/planetary-mills/details/product/pulverisette-7-premium-line/>
15. GRÉGR, Jan, 2004. *Povrchové vlastnosti uhlíkových vláken* [online]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/10797731-Povrchove-vlastnosti-uhlikovych-vlaken.html>
16. GUO, Miaocai, Xiaosu YI, Gang LIU a Lipeng LIU, 2014. Simultaneously increasing the electrical conductivity and fracture toughness of carbon–fiber composites by using silver nanowires-loaded interleaves. *Composites Science and Technology* [online]. **97**, 27–33. ISSN 02663538. Dostupné z: doi:10.1016/j.compscitech.2014.03.020
17. HANNA INSTRUMENTS, nedatováno. *HI 190M magnetic mini stirrer* [online] [vid. 2018-02-05]. Dostupné z: <http://www.hannainstruments.co.uk/1l-magnetic-mini-stirrers-with-speedsafe.html>
18. JANČÁŘ, Josef, 2003. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. První. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická. ISBN 80-214-2443-5.
19. JIRÁSEK, Jakub, Martin SIVEK a Petr LÁZNIČKA, 2016. *Ložiska nerostů - nerudy* [online] [vid. 2018-03-13]. Dostupné z: http://geologie.vsb.cz/loziska/loziska/loziska_nerud.html#GRAFIT
20. KOŘÍNEK, Zdeněk, 2016. *Kompozity - vlákna pro kompozity* [online]. Dostupné z: https://drive.google.com/file/d/0B8vQSuH1vI_vV1I5RHg1SIFPNW8/view
21. KULVEITOVÁ, Hana, 2010. *Anorganická chemie nekovů* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická Univerzita Ostrava. ISBN 978-80-248-1322-6. Dostupné z: <http://www.studopory.vsb.cz/studijnimaterialy/Chemiell/Chemiell.pdf>
22. LEGENDRE, André, 2001. *Uhlíkové materiály: Od černé keramiky k uhlíkovým vláknům*. Praha: INFORMATORIUM. ISBN 80-86073-82-3.
23. LEPIL, Oldřich a Přemysl ŠEDIVÝ, 2010. *Fyzika pro gymnázia - Elektřina a magnetismus*. 6. vyd. Praha: Prometheus. ISBN 978-80-7196-385-1.

24. MASARYKOVA UNIVERZITA V BRNĚ FAKULTA PŘÍRODOVĚDECKÁ, 2012. *Fyzikální základy vědy o materiálu* [online] [vid. 2018-02-23]. Dostupné z: <http://www.ped.muni.cz/wphy/fyzvla/fmkomplet4.htm>
25. MEISSNER, Bohumil a Václav ZILVAR, 1987. *Fyzika polymerů, Struktura a vlastnosti polymerních materiálů*. První. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, n.p.
26. MGS KUNSTAHARZPRODUKTE GMBH, nedatováno. L A M I N A Č N Í P R Y S K Y Ř I C E L 285 T U Ž I D L A 285 , 286 , 287 Návod k použití , technické listy. Germany,
27. MORGAN, Peter, 2005. *Carbon fibers and their composites*. Boca Raton, Florida: Taylor & Francis Group. ISBN 0824709837, 9780824709839.
28. PRÁŠEK, Jan, 2011. UHLÍKOVÉ NANOČÁSTICE: Grafen, Nanotrubice, Fulereny [online]. 22. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/nanoteam/data/soubory/CTN, grafen, fullerenCNTs+grafen+fullereny.pdf>
29. PRVKY.COM, 2012. *Zirkonium* [online]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/40.html>
30. PRVKY.COM, 2016. *Mohsova stupnice tvrdosti* [online]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/mohsova-stupnice.html>
31. ROWE, W.B., 2009. *Principles of Modern Grinding Technology*. 1. vyd. Oxford: Wiliam Andrew. ISBN 978-0-81-552018-4.
32. SIEMENS, 2014. Recyklovaný uhlík jako nový. *Siemens, s.r.o.* [online] [vid. 2018-04-11]. Dostupné z: https://w5.siemens.com/web/cz/cz/corporate/portal/home/o_nas/inovace/archiv/Pages/uhlik-jako-novy.aspx
33. SODOMKA, Lubomír, 2005. *Stupeň grafitizace uhlíkových vláken* [online]. Dostupné z: <https://www.xray.cz/ms/bul2005-2/sodomka.pdf>
34. STŘEDNÍ ŠKOLA STROJÍRENSKÁ A ELEKTROTECHNICKÁ BRNO, 2003. *Mechanické zkoušky* [online]. Brno: Střední škola strojírenská a elektrotechnická Brno. Dostupné z: http://www.sssebrno.cz/files/ovmt/zkouska__ohybem.pdf

35. THE EDITORS OF ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA, 2014. *Polyacrylonitrile, chemical compound* [online]. B.m.: Encyclopædia Britannica, inc. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/polyacrylonitrile>
36. THE EDITORS OF ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA, 2018. *Covalent bond* [online]. B.m.: Encyclopædia Britannica, inc. [vid. 2018-03-13]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/covalent-bond>
37. U.S. DEPARTMENT OF INTERIOR, 2016. *Mineral commodity summaries 2016* [online]. Dostupné z: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2016/mcs2016.pdf>
38. UNIVERZITA TOMÁŠE BATI VE ZLÍNĚ FAKULTA TECHNOLOGICKÁ, nedatováno. Dynamické zkoušky. In: *Kontrolní a zkušební metody* [online]. 1. vyd. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně Fakulta technologická. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_11.pdf
39. UNIVERZITA TOMÁŠE BATI VE ZLÍNĚ FAKULTA TECHNOLOGICKÁ, nedatováno. Statické zkoušky krátkodobé. In: *Kontrolní a zkušební metody* [online]. 1. vyd. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně Fakulta technologická. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_09.pdf

Seznam obrázků

Obrázek 3 Silniční kolo z uhlíkových kompozitů (Cube 2017)	13
Obrázek 4 Závodní automobil F1 2017 (Bull 2016)	13
Obrázek 5 Materiálové složení dopravního letounu Boeing 787 převzato a přepracováno z:(Cabrnach 2012).....	14
Obrázek 6 Krystalografické uspořádání grafitu	17
Obrázek 7 Krystalografické uspořádání diamantu (Masarykova Univerzita v Brně Fakulta přírodovědecká 2012)	18
Obrázek 8 Chemický strukturní vzorec PAN	21
Obrázek 9 Schéma praktické části bakalářské práce A	25
Obrázek 10 Schéma praktické části bakalářské práce B	26
Obrázek 11 Carbiso Mil 100 µm (Easycomposites 2015)	27
Obrázek 12 Mlýnek Fritsch Pulverisette 7 (Fritsch GmbH 2018).....	28
Obrázek 13 Mlecí miska, mlecí kuličky a materiály: převzato a přepracováno (Fritsch GmbH 2018); (Easycomposites 2015)	29
Obrázek 14 Schéma principu mletí uhlíkových vláken v mlýnku.....	30
Obrázek 15 Uhlíková vlákna Carbiso 1000× zvětšená	31
Obrázek 16 Uhlíková vlákna 100 µm 5000× zvětšená.....	31
Obrázek 17 Uhlíková vlákna 1× mletá 1000× zvětšená.....	32
Obrázek 18 Uhlíková vlákna 1× mletá 5000× zvětšená.....	32
Obrázek 19 Uhlíková vlákna 2× mletá 1000× zvětšená.....	32
Obrázek 20 Uhlíková vlákna 2× mletá 5000× zvětšená.....	32
Obrázek 21 Uhlíková vlákna 3× mletá 1000× zvětšená.....	33
Obrázek 22 Uhlíková vlákna 3× mletá 5000× zvětšená.....	33
Obrázek 23 Vzorky s příměsí uhlíkových vláken po vyndání z pece	37
Obrázek 24 Magnetické míchadlo HI 190M	39
Obrázek 25 Schéma Charpyho rázové zkoušky ČSN EN ISO 179-1	40
Obrázek 26 Schéma zkušebního vzorku	40
Obrázek 27 Grafické vyobrazení všech výsledků rázové houževnatosti u testovaných vzorků	45
Obrázek 28 Zkouška rázové houževnatosti – lom čisté pryskyřice.....	47

Obrázek 29 Detailní vyobrazení trhlin – 250× zvětšeno.....	47
Obrázek 30 Detailní vyobrazení trhlin – 5000× zvětšeno.....	47
Obrázek 31 Zkouška rázové houževnatosti – lom materiálu s nemletými vlákny.....	48
Obrázek 32 Detailní vyobrazení vzorku 250× zvětšeno	49
Obrázek 33 Detailní vyobrazení vzorku 1000× zvětšeno.....	49
Obrázek 34 Zkouška rázové houževnatosti – lom materiálu s 1× mletými vlákny	49
Obrázek 35 Detailní vyobrazení vzorku – 250× zvětšeno.....	50
Obrázek 36 Detailní vyobrazení vzorku – 5000× zvětšeno.....	50
Obrázek 37 Zkouška rázové houževnatosti – lom materiálu s 2x mletými vlákny	51
Obrázek 38 Detailní vyobrazení vzorku – 500× zvětšeno.....	51
Obrázek 39 Detailní vyobrazení vzorku – 5000× zvětšeno.....	51
Obrázek 40 schéma zkoušky tříbodovým ohybem ČSN EN ISO 14125	52
Obrázek 41 Schéma průběhu zkoušky – maximální zatížení vzorku.....	53
Obrázek 42 Grafické vyobrazení celkových výsledků modulu pružnosti u testovaných vzorků	57
Obrázek 43 Grafické vyobrazení všech výsledků ohybového napětí u testovaných vzorků	58

Seznam tabulek

Tabulka 1 Vlastnosti některých druhů vláken (Jančář 2003)	21
Tabulka 2 Materiálová data a mechanické vlastnosti – Carbiso (Easycomposites 2011)	28
Tabulka 3 Vypočtené hodnoty rázové houževnatosti kompozitu s nemletými uhlíkovými vlákny	43
Tabulka 4 Vypočtené hodnoty rázové houževnatosti kompozitu s 1× mletými uhlíkovými vlákny	44
Tabulka 5 Vypočtené hodnoty rázové houževnatosti kompozitu s 2× mletými uhlíkovými vlákny	44
Tabulka 6 Vypočtené hodnoty ohybového napětí kompozitu s nemletými uhlíkovými vlákny	55
Tabulka 7 Vypočtené hodnoty ohybového napětí kompozitu s nemletými uhlíkovými vlákny	55
Tabulka 8 Vypočtené hodnoty ohybového napětí kompozitu s 1× mletými uhlíkovými vlákny	56
Tabulka 9 Vypočtené hodnoty modulu pružnosti kompozitu s 1× mletými uhlíkovými vlákny	56
Tabulka 10 Vypočtené hodnoty ohybového napětí kompozitu s 2× mletými uhlíkovými vlákny	57
Tabulka 11 Vypočtené hodnoty kompozitu s 2× mletými uhlíkovými vlákny	57
Tabulka 12 Výsledky jednotlivých měření rázové houževnatosti nemletých uhlíkových vláken v kompozitu	69
Tabulka 13 Výsledky jednotlivých měření rázové houževnatosti 1× mletých uhlíkových vláken v kompozitu	70
Tabulka 14 Výsledky jednotlivých měření rázové houževnatosti 2× mletých uhlíkových vláken v kompozitu	71
Tabulka 15 Výsledky jednotlivých měření třibodového ohybu nemletých uhlíkových vláken v kompozitu	72
Tabulka 16 Výsledky jednotlivých měření třibodového ohybu 1× mletých uhlíkových vláken v kompozitu	73

Tabulka 17 Výsledky jednotlivých měření tříbodového ohybu 2× mletých uhlíkových vláken v kompozitu	74
--	----

Přílohy

Seznam příloh

- A. Rázová houževnatost – nemletá uhlíková vlákna
- B. Rázová houževnatost – 1× mletá uhlíková vlákna
- C. Rázová houževnatost – 2× mletá uhlíková vlákna
- D. Tříbodový ohyb – nemletá uhlíková vlákna
- E. Tříbodový ohyb – 1× mletá uhlíková vlákna
- F. Tříbodový ohyb – 2× mletá uhlíková vlákna
- G. Protokol přípravy kompozitních vzorků

A. Rázová houževnatost – nemletá uhlíková vlákna

Následující tabulka zobrazuje dílčí výsledky měření rázové houževnatosti Charpyho metodou pro kompozitní materiál s nemletými uhlíkovými vlákny.

Tabulka 12 Výsledky jednotlivých měření rázové houževnatosti nemletých uhlíkových vláken v kompozitu

Číslo vzorku	Procento obsažených uhlíkových vláken [%]	Tloušťka [mm]	Šířka [mm]	Deformační energie E [J]	Rázová houževnatost A [J/m2]
Epoxy 1A	0	4,92	9,70	2,15	45,05
Epoxy 1B	0	2,78	9,93	0,95	34,41
Epoxy 1C	0	2,80	9,60	0,95	35,35
Epoxy 1D	0	2,77	10,10	0,97	37,12
Epoxy 1E	0	2,90	9,90	0,95	35,2
2A	1	4,34	10,62	1,87	40,57
2B	1	4,03	10,64	1,91	44,54
2C	1	4,33	10,58	3,38	73,78
2D	1	4,22	10,61	1,67	37,30
2E	1	3,91	10,60	1,17	28,23
3A	2	2,82	11,20	0,98	31,03
3B	2	3,06	10,58	1,29	39,85
3C	2	3,01	10,70	1,29	40,05
3D	2	2,44	11,36	0,91	32,83
3E	2	3,07	10,66	1,87	57,14
4A	3	2,82	10,55	2,47	83,02
4B	3	3,16	10,65	1,56	46,35
4C	3	2,69	10,62	1,52	53,21
4D	3	3,05	10,66	1,21	37,22
4E	3	2,58	10,70	1,52	55,06
5A	4	3,06	10,67	2,43	74,43
5B	4	3,01	10,65	1,36	42,43
5C	4	2,55	10,66	1,02	37,52
5D	4	3,02	10,64	1,99	61,93
5E	4	2,98	10,68	2,19	68,81
6A	5	3,07	10,67	1,52	46,40
6B	5	3,03	10,69	1,71	52,79
6C	5	2,94	10,71	1,75	55,58
6D	5	2,97	10,66	1,44	45,48
6E	5	2,84	10,70	1,36	44,75

B. Rázová houževnatost – 1× mletá uhlíková vlákna

Následující tabulka zobrazuje dílčí výsledky měření rázové houževnatosti Charpyho metodou pro kompozitní materiál s 1× mletými uhlíkovými vlákny.

Tabulka 13 Výsledky jednotlivých měření rázové houževnatosti 1× mletých uhlíkových vláken v kompozitu

Číslo vzorku	Procento obsažených uhlíkových vláken [%]	Tloušťka [mm]	Šířka [mm]	Deformační energie E [J]	Rázová houževnatost A [J/m ²]
Epoxy 1A	0	4,92	9,70	2,15	45,05
Epoxy 1B	0	2,78	9,93	0,95	34,41
Epoxy 1C	0	2,80	9,60	0,95	35,35
Epoxy 1D	0	2,77	10,10	0,97	37,12
Epoxy 1E	0	2,90	9,90	0,95	35,2
2A	1	2,99	10,91	1,48	45,37
2B	1	2,92	10,87	1,67	52,61
2C	1	3,01	10,87	1,75	53,49
2D	1	2,70	10,89	0,69	23,47
2E	1	2,66	10,84	0,54	18,73
3A	2	2,98	10,92	0,83	25,51
3B	2	2,94	10,96	0,47	14,59
3C	2	3,11	10,88	0,69	20,39
3D	2	2,62	10,90	0,36	12,61
3E	2	3,11	10,93	0,65	19,12
4A	3	3,02	10,87	1,75	53,31
4B	3	2,55	10,88	1,83	65,96
4C	3	2,75	10,91	0,43	14,33
4D	3	3,08	10,93	0,50	14,85
4E	3	2,69	10,92	0,41	13,96
5A	4	2,82	10,85	1,21	39,55
5B	4	2,60	10,91	1,52	53,59
5C	4	2,94	10,81	0,76	23,91
5D	4	2,91	10,96	1,02	31,98
5E	4	3,01	10,92	1,13	34,38
6A	5	2,78	10,87	1,21	40,04
6B	5	2,94	10,91	1,75	54,56
6C	5	2,76	10,87	0,47	15,67
6D	5	2,56	10,90	0,61	21,86
6E	5	2,84	10,88	0,36	11,65

C. Rázová houževnatost – 2× mletá uhlíková vlákna

Následující tabulka zobrazuje dílčí výsledky měření rázové houževnatosti Charpyho metodou pro kompozitní materiál s 2× mletými uhlíkovými vlákny.

Tabulka 14 Výsledky jednotlivých měření rázové houževnatosti 2× mletých uhlíkových vláken v kompozitu

Číslo vzorku	Procento obsažených uhlíkových vláken [%]	Tloušťka [mm]	Šířka [mm]	Deformační energie E [J]	Rázová houževnatost A [J/m ²]
Epoxy 1A	0	4,92	9,70	2,15	45,05
Epoxy 1B	0	2,78	9,93	0,95	34,41
Epoxy 1C	0	2,80	9,60	0,95	35,35
Epoxy 1D	0	2,77	10,10	0,97	37,12
Epoxy 1E	0	2,90	9,90	0,95	35,2
2A	1	2,76	10,82	1,29	43,20
2B	1	2,26	10,92	1,71	69,29
2C	1	2,93	10,92	0,69	21,57
2D	1	3,08	10,92	1,25	37,17
2E	1	2,81	10,88	2,11	69,02
3A	2	2,57	10,78	1,52	54,86
3B	2	2,87	10,83	0,54	17,37
3C	2	2,70	10,89	1,71	58,16
3D	2	3,13	10,87	2,19	64,37
3E	2	2,92	10,84	1,10	34,75
4A	3	3,05	11,06	1,83	54,25
4B	3	2,68	11,01	2,07	70,15
4C	3	2,62	10,69	1,56	55,70
4D	3	2,52	11,16	1,64	58,31
4E	3	2,66	11,10	1,52	51,48
5A	4	3,06	11,13	1,44	42,28
5B	4	2,66	11,08	0,25	8,48
5C	4	2,61	11,52	0,32	10,64
5D	4	2,85	11,15	2,59	81,50
5E	4	2,45	11,11	0,36	13,23
6A	5	3,13	11,40	0,95	26,62
6B	5	2,72	11,01	1,83	61,11
6C	5	2,90	11,25	0,36	11,03
6D	5	2,99	11,18	1,67	49,96
6E	5	2,62	11,19	0,32	10,91

D. Tříbodový ohyb – nemletá uhlíková vlákna

Následující tabulka zobrazuje dílčí výsledky měření ze statické mechanické zkoušky tříbodovým ohybem pro kompozitní materiál s nemletými uhlíkovými vlákny.

Tabulka 15 Výsledky jednotlivých měření tříbodového ohybu nemletých uhlíkových vláken v kompozitu

Číslo vzorku	Procento obsažených uhlíkových vláken [%]	Tloušťka [mm]	Šířka [mm]	Maximální síla F [N]	Průhyb S [mm]	Ohybové napětí σ [MPa]	Modul pružnosti E_f [MPa]
Epoxy 1A	0	2,79	10,62	9,21	1,50	13,36	3385,87
Epoxy 1B	0	2,69	10,66	7,99	1,50	12,43	3294,15
Epoxy 1C	0	2,81	10,61	8,85	1,50	12,66	3357,46
Epoxy 1D	0	2,84	10,65	10,21	1,50	14,26	3595,87
Epoxy 1E	0	2,84	10,64	9,97	1,50	13,94	3525,14
2A	1	2,38	10,29	5,49	1,50	11,29	3553,47
2B	1	2,71	10,48	8,17	1,50	12,74	3375,51
2C	1	2,61	10,39	7,00	1,50	11,85	3256,11
2D	1	2,58	10,32	5,68	1,50	9,93	3118,17
2E	1	4,34	10,69	7,37	1,50	4,39	758,37
3A	2	2,84	11,88	6,48	1,50	8,11	2040,09
3B	2	3,09	11,67	5,94	1,50	6,39	1468,41
3C	2	3,11	11,01	10,17	1,50	11,46	2641,38
3D	2	3,04	10,64	13,77	1,50	16,79	3960,72
3E	2	2,92	10,66	11,39	1,50	15,04	3702,00
4A	3	2,84	10,64	11,43	1,50	15,97	4027,83
4B	3	2,83	10,60	10,76	1,50	15,20	3837,71
4C	3	2,94	10,64	12,55	1,50	16,37	3988,78
4D	3	2,37	10,64	6,43	1,50	12,90	3879,27
4E	3	2,87	10,64	11,10	1,50	15,19	3850,95
5A	4	2,61	10,57	7,78	1,50	12,96	3558,14
5B	4	2,88	10,64	10,31	1,50	14,02	3632,54
5C	4	2,13	10,65	4,16	1,50	10,33	3429,78
5D	4	2,29	10,58	5,43	1,50	11,75	3662,77
5E	4	2,68	10,64	9,48	1,50	14,87	3972,74
6A	5	2,93	10,67	12,04	1,50	15,76	3834,46
6B	5	2,93	10,72	12,54	1,50	16,35	3997,17
6C	5	2,75	10,73	10,02	1,50	14,81	3863,42
6D	5	3,12	10,65	14,14	1,50	16,36	3760,15
6E	5	2,60	10,64	8,21	1,50	13,68	3763,85

E. Tříbodový ohyb – 1× mletá uhlíková vlákna

Následující tabulka zobrazuje dílčí výsledky měření ze statické mechanické zkoušky tříbodovým ohybem pro kompozitní materiál s 1× mletými uhlíkovými vlákny.

Tabulka 16 Výsledky jednotlivých měření tříbodového ohybu 1× mletých uhlíkových vláken v kompozitu

Číslo vzorku	Procento obsažených uhlíkových vláken [%]	Tloušťka [mm]	Šířka [mm]	Maximální síla F [N]	Průhyb S [mm]	Ohybové napětí σ_f [MPa]	Modul pružnosti E_f [MPa]
Epoxy 1A	0	2,79	10,62	9,21	1,50	13,36	3385,87
Epoxy 1B	0	2,69	10,66	7,99	1,50	12,43	3294,15
Epoxy 1C	0	2,81	10,61	8,85	1,50	12,66	3357,46
Epoxy 1D	0	2,84	10,65	10,21	1,50	14,26	3595,87
Epoxy 1E	0	2,84	10,64	9,97	1,50	13,94	3525,14
2A	1	2,64	10,92	8,13	1,50	12,82	3468,75
2B	1	2,51	10,80	6,58	1,50	11,59	3304,18
2C	1	2,86	10,82	10,37	1,50	14,06	3538,17
2D	1	2,50	10,79	7,13	1,50	12,68	3647,82
2E	1	2,66	10,83	7,21	1,50	11,29	3034,89
3A	2	2,80	10,74	8,79	1,50	12,53	3206,59
3B	2	2,99	10,78	11,40	1,50	14,19	3417,30
3C	2	3,05	10,88	12,29	1,50	14,58	3411,68
3D	2	2,67	10,91	5,73	1,50	8,84	2367,56
3E	2	2,53	10,87	7,05	1,50	12,12	3418,33
4A	3	2,96	10,87	7,12	1,50	8,97	2349,26
4B	3	2,74	10,85	8,31	1,50	12,24	3201,92
4C	3	2,96	10,88	6,24	1,50	7,86	1917,21
4D	3	3,07	10,83	12,87	1,50	15,13	3552,21
4E	3	2,56	10,91	6,57	1,50	11,03	3069,66
5A	4	2,99	10,66	11,81	1,50	14,86	3533,84
5B	4	2,96	10,86	9,93	1,50	12,50	3060,82
5C	4	2,94	10,85	11,62	1,50	14,87	3621,76
5D	4	2,97	10,84	11,69	1,50	14,67	3556,00
5E	4	2,94	10,82	12,32	1,50	15,81	3865,33
6A	5	2,92	10,81	7,56	1,50	9,83	2430,72
6B	5	2,91	10,87	6,40	1,50	8,34	2053,92
6C	5	2,88	10,85	8,34	1,50	11,12	2796,18
6D	5	2,91	10,78	10,93	1,50	14,36	3550,59
6E	5	2,96	10,81	11,61	1,50	14,71	3574,80

F. Tříbodový ohyb – 2× mletá uhlíková vlákna

Následující tabulka zobrazuje dílčí výsledky měření ze statické mechanické zkoušky tříbodovým ohybem pro kompozitní materiál s 2× mletými uhlíkovými vlákny.

Tabulka 17 Výsledky jednotlivých měření tříbodového ohybu 2× mletých uhlíkových vláken v kompozitu

Číslo vzorku	Procento obsažených uhlíkových vláken [%]	Tloušťka [mm]	Šířka [mm]	Maximální síla Fmax [N]	Průhyb S [mm]	Ohybové napětí σ_f [MPa]	Modul pružnosti Ef [MPa]
Epoxy 1A	0	2,79	10,62	9,21	1,50	13,36	3385,87
Epoxy 1B	0	2,69	10,66	7,99	1,50	12,43	3294,15
Epoxy 1C	0	2,81	10,61	8,85	1,50	12,66	3357,46
Epoxy 1D	0	2,84	10,65	10,21	1,50	14,26	3595,87
Epoxy 1E	0	2,84	10,64	9,97	1,50	13,94	3525,14
2A	1	2,84	10,81	10,32	1,50	14,21	3570,86
2B	1	2,94	10,82	11,06	1,50	14,19	3465,64
2C	1	2,54	10,76	7,43	1,50	12,83	3609,38
2D	1	2,60	10,80	4,44	1,50	7,30	1999,51
2E	1	2,76	10,80	9,05	1,50	13,20	3445,24
3A	2	2,89	10,86	11,46	1,50	15,16	3759,93
3B	2	2,66	10,88	8,96	1,50	13,97	3750,46
3C	2	2,83	11,10	11,06	1,50	14,92	3780,25
3D	2	3,02	10,76	12,34	1,50	15,09	3583,41
3E	2	2,67	10,84	8,68	1,50	13,47	3608,05
4A	3	2,92	11,06	10,89	1,50	13,86	3410,32
4B	3	2,98	11,00	11,56	1,50	14,20	3415,08
4C	3	2,88	11,09	11,53	1,50	15,05	3761,70
4D	3	2,77	11,02	8,72	1,50	12,38	3222,27
4E	3	2,97	11,02	11,71	1,50	14,46	3501,62
5A	4	2,75	11,01	9,34	1,50	13,44	3501,43
5B	4	3,00	11,00	12,73	1,50	15,43	3680,61
5C	4	2,87	11,08	10,47	1,50	13,75	3446,23
5D	4	2,84	11,02	10,69	1,50	14,43	3650,65
5E	4	2,92	10,93	11,74	1,50	15,12	3689,74
6A	5	2,98	11,23	12,10	1,50	14,55	3484,12
6B	5	2,98	11,23	7,81	1,50	9,40	2339,19
6C	5	2,98	11,11	11,98	1,50	14,56	3507,15
6D	5	3,06	11,23	12,38	1,50	14,13	3320,87
6E	5	2,98	11,81	4,03	1,50	4,60	1115,59

G. Protokol přípravy kompozitních vzorků

Protokol měření:
Nemletá vlákna

							Klimatické podmínky	
Vzorek	Pryskyřice [g]	Tužidlo [g]	Celkem [g]	Carbiso [g]	Carbiso [%]	Datum	Teplota [°C]	Vlhkost vzduchu [%]
Epoxy 1	20	8	28	0,00	0	05.11.2017	24	30
2	20	8	28	0,28	1	11.08.2017	26	20
3	20	8	28	0,56	2	05.11.2017	24	30
4	20	8	28	0,84	3	05.11.2017	24	30
5	20	8	28	1,12	4	28.11.2017	23	45

Protokol měření:
1× mletá vlákna

							Klimatické podmínky	
Vzorek	Pryskyřice [g]	Tužidlo [g]	Celkem [g]	Carbiso [g]	Carbiso [%]	Datum	Teplota [°C]	Vlhkost vzduchu [%]
1x 2	20	8	28	0,28	1	28.11.2017	23	45
1x 3	20	8	28	0,56	2	11.12.2017	19,7	38
1x 4	20	8	28	0,84	3	11.12.2017	19,7	38
1x 5	20	8	28	1,12	4	11.12.2017	19,7	38
1x 6	20	8	28	1,40	5	18.12.2017	19,5	38

Protokol měření:
2× mletá vlákna

							Klimatické podmínky	
Vzorek	Pryskyřice [g]	Tužidlo [g]	Celkem [g]	Carbiso [g]	Carbiso [%]	Datum	Teplota [°C]	Vlhkost vzduchu [%]
2x 2	20	8	28	0,28	1	20.12.2017	18	39
2x 3	20	8	28	0,56	2	20.12.2017	18	39
2x 4	20	8	28	0,84	3	20.12.2017	18	39
2x 5	20	8	28	1,12	4	06.02.2018	20,7	31
2x 6	20	8	28	1,40	5	06.02.2018	20,7	31