



Mechanické vlastnosti kompozitů s recyklovanými uhlíkovými vlákny

Diplomová práce

Studijní program:

N3106 Textilní inženýrství

Studijní obor:

Netkané a nanovláknenné materiály

Autor práce:

Bc. Jan Kočib

Vedoucí práce:

Ing. Miroslava Pechočiaková, Ph.D.
Katedra materiálového inženýrství

Konzultant práce:

Ing. Jana Novotná
Katedra materiálového inženýrství



Zadání diplomové práce

Mechanické vlastnosti kompozitů s recyklovanými uhlíkovými vlákny

Jméno a příjmení: **Bc. Jan Kočlb**
Osobní číslo: T18000022
Studijní program: N3106 Textilní inženýrství
Studijní obor: Netkané a nanovláknenné materiály
Zadávací katedra: Katedra netkaných textilií a nanovláknenných materiálů
Akademický rok: **2018/2019**

Zásady pro vypracování:

1. V literární rešerši se zaměřte na témata: uhlík a jeho formy, výroba uhlíkových vláken, kompozitní materiály z uhlíkových vláken a jejich recyklace.
2. Navrhněte a zhotovte vzorky epoxidových kompozitů plněných recyklovanými uhlíkovými vlákny. Vlákna před použitím podrobte mletí.
3. U vyrobených vzorků kompozitů otestujte mechanické vlastnosti (Charpy test, 3bodový ohyb a dynamicko-mechanická analýza)
4. Naměřená data statisticky vyhodnoťte a diskutujte vliv mletí a koncentrace vláken na výsledné mechanické vlastnosti kompozitu.

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy:
Forma zpracování práce:
Jazyk práce:

dle potřeby dokumentace
40-60 dle potřeby
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

1. DAŘOUREK, Karel. Kompozitní materiály – druhy a jejich užití. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007, 114 s. ISBN 978-80-7372-279-1.
2. ASHBY, Michael F. Materials Selection in Mechanical Design. Third Edition. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005, 603 s. ISBN 07-506-6168-2.

Vedoucí práce:

Ing. Miroslava Pechočiaková, Ph.D.
Katedra materiálového inženýrství

Konzultant práce:

Ing. Jana Novotná
Katedra materiálového inženýrství

Datum zadání práce:

20. února 2019

Předpokládaný termín odevzdání: 29. května 2020

Ing. Jana Drašarová, Ph.D.
děkanka



Ing. Jiří Chvojka, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 20. února 2019

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

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

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce. Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s §47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

Datum: 20.5.2020

Bc. Jan Kočib

Poděkování

Děkuji vedoucí práce paní Ing. Miroslavě Pechočiakové, Ph.D. za odborné a profesionální vedení práce, věcné připomínky, dobré rady a vstřícnost při konzultacích, práci v laboratoři a při vypracovávání diplomové práce.

Dále děkuji konzultantce paní Ing. Janě Novotné 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 diplomovou práci.

Abstrakt

Tato diplomová práce byla vypracována v návaznosti na bakalářskou práci „*Analýza vlivu mletí recyklovaných uhlíkových vláken na mechanické vlastnosti epoxidových kompozitů*“, zpracovanou autorem této diplomové práce. Práce prohlubuje poznatky o mechanických vlastnostech kompozitů z recyklovaných uhlíkových vláken.

V této práci se nachází obecné seznámení se studovaným materiálem a dále prohloubení a obohacení poznatků týkajících se mechanických vlastností kompozitů s uhlíkovou výplní. Bylo vytvořeno několik sérií kompozitů s různou koncentrací a velikostí uhlíkové výztuže, na kterých byly testovány mechanické vlastnosti zkouškou rázové houževnatosti, tříbodovým ohybem a DMA analýzou. Práce se dále zabývá analýzou do kompozitů aplikované uhlíkové výztuže a zkoumá její vliv na již zmiňované mechanické vlastnosti.

Naměřené výsledky byly zpracovány a prezentovány v této práci.

Klíčová slova

Uhlíkové vlákno, kompozitní materiál, mechanické vlastnosti, mechanické testování, ohybové vlastnosti.

Abstract

This diploma thesis was elaborated in connection with the bachelor thesis „Analysis of the impact of recycled carbon fibers grinding on the mechanical properties of epoxy composites” by author of this diploma thesis. The work deepens the information about the mechanical properties of recycled carbon fiber composites.

In this work is a general introduction to the studied material, deepening and enriching of knowledge concerning the mechanical properties of carbon-filled composites. It was created several series of composites with different concentrations and sizes of carbon fibers, on which were measured mechanical properties tested by impact toughness test, three-point bending test and DMA analysis. This work also contains the analysis of carbon reinforced composites and examines effect of carbon filler on already mentioned mechanical properties.

The measured results were processed and presented in this thesis.

Key words

Carbon fibre, composite material, mechanical properties, mechanical testing, bending properties.

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratek	12
Úvod	14
1 Literární rešerše	16
1.1 Uhlík.....	16
1.2 Formy uhlíku s krystalografickou strukturou	17
1.3 Uhlíková vlákna	20
1.4 Recyklovaná uhlíková vlákna	23
1.4.1 Zdravotní rizika	25
1.5 Kompozit.....	26
1.5.1 Matrice	28
1.5.2 Výztuž	29
1.5.3 Parametry (vlastnosti) popisující kompozit.....	29
1.5.4 Kompozity v leteckém průmyslu	34
1.5.5 Recyklace kompozitů u letadel.....	35
1.5.6 Recyklace letadel	36
1.5.7 Testování mechanických vlastností kompozitů.....	38
2 Experimentální část	43
2.1 Proces mletí uhlíkových vláken.....	44
2.1.1 Recyklovaná mletá uhlíková vlákna Carbiso	44
2.1.2 Mlýn pro mletí částic	45
2.1.3 Princip při mlecím procesu	46
2.1.4 Postup mlecího procesu	47
2.1.5 Výsledky mlecího procesu.....	47

2.1.6	Vyhodnocení mlecího procesu	50
2.2	Analýza velikosti částic.....	51
2.2.1	Práce s programem.....	51
2.2.2	Výsledky analýzy částic	52
2.2.3	Vyhodnocení analýzy částic	54
2.3	Výroba epoxidových vzorků.....	55
2.3.1	Užité chemické látky pro výrobu vzorků	55
2.3.2	Příprava formy pro epoxidové vzorky	56
2.3.3	Postup výroby epoxidových vzorků.....	57
2.4	Testování Mechanických vlastností	59
2.5	Zkouška rázové houževnatosti Charpyho metodou	60
2.5.1	Výsledky rázové zkoušky	60
2.5.2	Vyhodnocení rázové zkoušky.....	62
2.5.3	Mikroskopická analýza lomů po rázové zkoušce.....	65
2.6	Zkouška ohybových vlastností	68
2.6.1	Výsledky ohybové zkoušky	70
2.6.2	Vyhodnocení ohybové zkoušky.....	73
2.7	Měření mechanických vlastností – DMA.....	78
2.7.1	Výsledky zkoušky DMA	78
2.7.2	Vyhodnocení zkoušky DMA.....	92
	Závěr	93
	Seznam použité literatury	95
	Seznam použitých obrázků.....	100
	Seznam tabulek.....	102

Přílohy.....	103
Seznam příloh	103
A. Protokol přípravy kompozitních vzorků.....	104
B. Rázová houževnatost – nemletá uhlíková vlákna	106
C. Rázová houževnatost – 1× mletá uhlíková vlákna	107
D. Rázová houževnatost – 2× mletá uhlíková vlákna	108
E. Rázová houževnatost – 3× mletá uhlíková vlákna	109
F. SEM snímky výsledků mlecích procesů a lomů materiálu	110
G. Tříbodový ohyb – nemletá uhlíková vlákna.....	111
H. Tříbodový ohyb – 1× mletá uhlíková vlákna	112
I. Tříbodový ohyb – 2× mletá uhlíková vlákna.....	113
J. Tříbodový ohyb – 3× mletá uhlíková vlákna.....	114

Seznam použitých symbolů a zkratek

Zkratka	Popis	Rozměr
A	– rázová houževnatost	[J/m ²]
a	– šířka zkušebního tělesa	[mm]
b	– tloušťka zkušebního tělesa	[mm]
<i>CFRP</i>	– Kompozit s uhlíkovou výztuží	
D	– průměr vlákna	[mm]
E	– deformační energie	[J]
E_f	– modulu pružnosti	[MPa]
E_m	– modul pružnosti matrice	[MPa]
E_v	– modulu pružnosti vláken	[MPa]
E^*	– Komplexní modul pružnosti	[GPa]
F	– zatěžující síla	[N]
F_{max}	– maximální zatěžující síla	[N]
F_p	– parametr příslušnosti	[-]
K	– faktor využití vláken	[-]
L	– délka vláken	[mm]
l	– vzdálenost podpěr	[mm]
l_k	– kritická délka vlákna	[mm]
m	– hmotnost	[g]
r	– poloměr vlákna	[mm]
R_{du}	– napětí ve středu vlákna	[N]
S	– průhyb; dráha	[mm]
<i>SEM</i>	– skenovací elektronový mikroskop	
V_p	– objemové procento	[%]

V_v	- objem vláken	[m ³]
V_k	- celkový objem kompozitu	[m ³]
v_f	- objemový zlomek	[-]
w_f	- hmotnostní podíl	[-]
X	- průhyb	[mm]
α	- tvarový součinitel	[-]
$tg\delta$	- ztrátový činitel modulu pružnosti	[-]
ρ	- hustota	[kg/m ³]
ρ_c	- hustota matrice	[kg/m ³]
ρ_f	- hustota vláken	[kg/m ³]
σ_f	- ohybové napětí	[MPa]
τ_p	- mez kluzu matrice	[N/mm ²]
\emptyset	- průměr	[mm]

Úvod

Uhlíková vlákna mají ve světové produkci široké zastoupení. Jako jeden z příkladů lze uvést letecký průmysl. Výroba a provoz letadel s sebou nese velkou finanční a materiálovou nákladnost pro jejich výrobce i provozovatele, musí být splněno hned několik aspektů: Požadavkem na výrobu letadla je vysoká mechanická odolnost konstrukce letadla, která dokáže odolat například povětrnostním podmínkám, výkyvům počasí, velkému rozptylu teplotních hodnot, změnám tlaku, velkému přetížení při vzletu a přistání, zároveň musí být co nejlehčí, aby došlo k redukci provozních nákladů, spotřebě paliva a menší produkci zplodin vzniklých při spalování.

Pro letecký průmysl jsou proto vhodným řešením kompozitní materiály z uhlíkových vláken. Tyto materiály dosahují nízké měrné hmotnosti a zároveň se vyznačují velkou mechanickou odolností. Není tedy divu, že dnešní konstrukce letadel tvoří díly z uhlíkových laminátů a kompozitů.

Každý materiál má však svou životnost, a výjimkou nejsou ani letadla z lehkých a odolných materiálů. Dojde-li k dovršení životnosti letadla, v současné době dojde k jeho uskladnění na tzv. hřbitovech letadel. Tyto oblasti jsou pak velkou zátěží pro planetu, jelikož dochází k výrobě nového materiálu i přesto, že již vysloužilý materiál lze recyklovat a znovu vyrobit výrobky se stejnými či podobnými vlastnostmi jako má výrobek nový.

Recyklací těchto materiálů by se tak ekologická zátěž snížila. Žijeme však v konzumní společnosti a otázka recyklace tohoto materiálu již byla sice vyřešena, ale její řešení je však pomalé vzhledem k produkci nových výrobků, a to především z finančních důvodů. Recyklace je totiž finančně velice náročná a mnohdy její náklady předčí náklady na výrobu materiálu nového.

Tato diplomová práce je zaměřena na kompozity s výztuží z recyklovaných uhlíkových vláken. Práce zkoumá mechanické vlastnosti těchto kompozitů pomocí testu rázové houževnatosti, tříbodovým ohybem a DMA analýzou. Dále se věnuje analýze výztuže z recyklovaných uhlíkových vláken a její chování na rozhraní matrice/výztuž.

Tato diplomové práce vznikala ve spolupráci s projekty SGS 2019 a SGS 2020 pod vedením Ing. Jany Novotné z katedry KMI TUL. Částečné výsledky tohoto projektu „Influence of carbon fillers plasma treatment on mechanical properties of epoxy resin composites“ byly publikovány na konferencích Polymerní kompozity 2019 v Achen – Dresden – Denkendorf 2019. [1] Taktéž došlo ve spolupráci s dalšími autory k publikaci článku „Analysis of composite materials with plasma treatment recycled carbon fibers“ dostupném na ResearchGate. [2]

1 Literární rešerše

1.1 Uhlík

Uhlík (latinsky Carboneum) je chemický prvek, vyskytující se na planetě Zemi již od dávných dob. Na zemi je patnáctým nejzastoupenějším prvkem obsaženým v zemské kůře a ve vesmíru patří do přední čtveřice prvků (vodík, helium, kyslík, uhlík). Název tohoto prvku vešel ve známost v 18. století a v průběhu následujících let došlo k postupnému objevování možností využití uhlíku ve všech odvětvích průmyslu. Za jeden z velkých milníků využití uhlíku (karbonizovaný bambus) můžeme považovat rok 1879 kdy vědec a fyzik Thomas Alva Edison využil uhlíkové vlákno do žárovky. Další milník byl vytyčen na konci 20. století, kdy došlo k objevu biokompatibility uhlíku, což otevřelo další oblast využití uhlíku v medicíně. V 50. letech 20. století došlo k výrobě uhlíkových vláken z viskózy a o deset let později k vývoji vláken na bázi PAN. Nutno také poukázat na nedávné výzkumy nanotrubic a objev molekul fullerenu. [3]

Uhlíkový prvek je na zemi k nalezení ve všech organických sloučeninách, v litosféře, hydrosféře i v atmosféře ve formě oxidu uhličitého. Čistý uhlík pak nalézáme hned v několika krystalografických modifikacích. Jednou z forem čistého uhlíku je diamant, nejpevnější a nejtvrdší materiál který byl objeven. Další formou uhlíku je grafit, chaoit, londesit a šungit. [3][4]

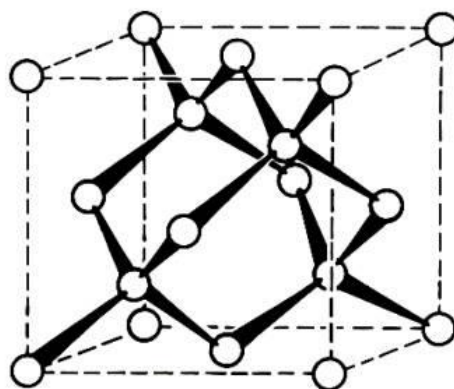
Díky širokému spektru vlastností uhlíku ho v současné době nalézáme v různých formách všude kolem nás. Materiály na uhlíkové bázi jsou schopny odolávat vysokému opakovanému mechanickému namáhání díky vysokému modulu pružnosti, pevnosti v tahu a nízkému koeficientu tření. Odolávají velkému rozsahu nízkých i vysokých teplot se skokovou změnou a vyznačují se chemickou odolností vůči mnoha kyselinám, zásadám a rozpouštědlům. Dále se jedná o nemagnetický materiál s dobrou elektrickou vodivostí. Vyznačují se také nízkou vahou, nehořlavostí a biokompatibilitou. Díky tomu se hojně využívají v medicíně, kosmonautice, automobilovém průmyslu, potravinářském průmyslu ve stavebnictví a více se rozrůstá jeho uplatnění v letectví. [5][3][6]

„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.“ [7]

1.2 Formy uhlíku s krystalografickou strukturou

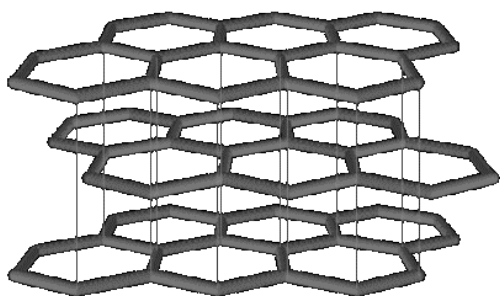
Dvě základní formy uhlíku tvoří diamant a grafit. Diamant je čistý přírodní uhlík vykrytalizovaný ve velkých hloubkách v horninách působením velmi vysokých tlaků a teplot, a jedná se o nejtvrdší nerost této planety. Modul pružnosti diamantu byla změřena na 1050 GPa a jeho tvrdost je zanesena v tabulce tvrdosti minerálů na prvním místě s nejvyšší hodnotou 10 Mohsovi stupnice. Materiál bez nečistot je transparentní s vysokou propustností světelného záření. Má lesklý povrch, je nevodivý a hořlavý s teplotní roztažností stálou do 800 °C. Při teplotách okolo 1500 °C dojde k přeměně diamantu na grafit. Pomocí vysokotlaké syntézy v inertní atmosféře lze diamant uměle vyrobit. Uměle vyrobený diamant lze využít například v jeho aplikaci do diamantových obráběcích, řezných a brusných nástrojů. [4][6][7]

Ve struktuře diamantu jsou atomy uhlíku svázány silnou chemickou kovalentní vazbou vzniklou sdílením elektronů. Diamant je tvořen kubickou mřížkou, kde je každý atom uhlíku vázán se čtyřmi sousedními atomy uhlíku. Na tuto mřížku připadá osm atomů po jejichž spojení s dalšími mřížkami vzniká velmi stabilní struktura s délkou vazby 0,154 nm a hmotností 3,52 g/cm³. Velmi husté uspořádání atomů činící 0,293 g/cm³ zapříčiňuje vysokou pevnost a nízkou stlačitelnost diamantu. [4][6][7]

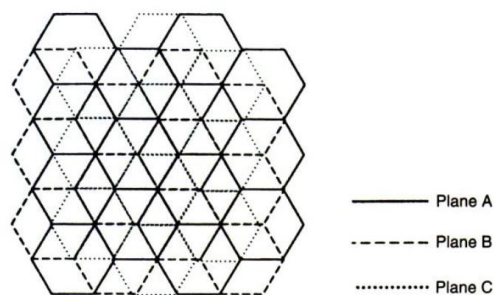


Obrázek 1.2.1 Krystalografické uspořádání diamantu [8]

Další stabilní modifikací uhlíku je grafit. Je to uhlík s hexagonálně uspořádanou strukturou. Tato uhlíková struktura je tvořená jednotlivými vrstvami díky čemuž lze grafit snadno štěpit. Tvrdost grafitu činí 1,2 na Mohsově stupnici tvrdosti. Atomy uhlíku v grafenové vrstvě jsou spojeny stabilní kovalentní vazbou se vzdáleností atomu 0,142 nm a jeden atom uhlíku je navázán touto vazbou na tři další atomy uhlíku. Jednotlivé vrstvy jsou pak provázané van der Waalsovou vazbou, která je však oproti kovalentní vazbě slabší, čemuž odpovídá i vzdálenost jednotlivých vrstev 0,335 nm. Touto slabší vazbou je pak atom uhlíku vázán ke čtvrtému atomu. Vrstvy jsou na sebe skládány hexagonálně, ale jednotlivé vrstvy jsou mezi sebou vyoseny o $1/3$ plochy hexagonu, viz obrázek 1.2.2. a 1.2.3. V této struktuře může docházet i ke strukturním defektům jako je například bodový vakant (volný bod) v krystalografickém uspořádání vzniklá špatným navázáním hexagonů při procesu karbonizace. Dále může dojít k čarové deformaci, kde dojde k dislokaci grafenových vrstev, která je způsobena změnou pořadí těchto vrstev. Dále může docházet k tzv. disklinaci neboli ohybu grafenové vrstvy, což způsobí odchylky mezi jinak rovnoběžnými vrstvami. [4][6][7][8]



Obrázek 1.2.2 Krystalografická struktura grafitu [9]

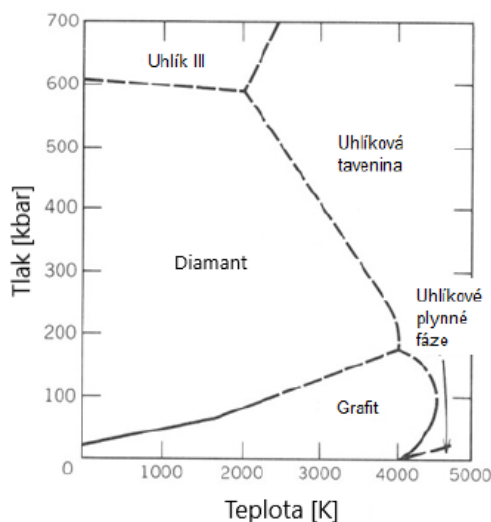


Obrázek 1.2.3 Schéma uspořádání grafenových vrstev [6]

Toto vrstvené uspořádání silně ovlivňuje mechanické vlastnosti, které jsou závislé na směru působení zatížení. Největší zatížení snese grafit ve směru rovnoběžném s rovinami. Grafit se vyznačuje především výbornými tepelnými vlastnostmi jako je žáruvzdornost. Při působení vysokých teplot do 500 °C začne grafit oxidovat a vytvářet tak kolem sebe inertní atmosféru. Poté dochází až do teploty 2500 °C k nárůstu pevnostních charakteristik a grafit pak dokáže odolávat do jeho teploty tání při 4473 °C. Jako u mechanických vlastností tak i zde platí, že ve směru

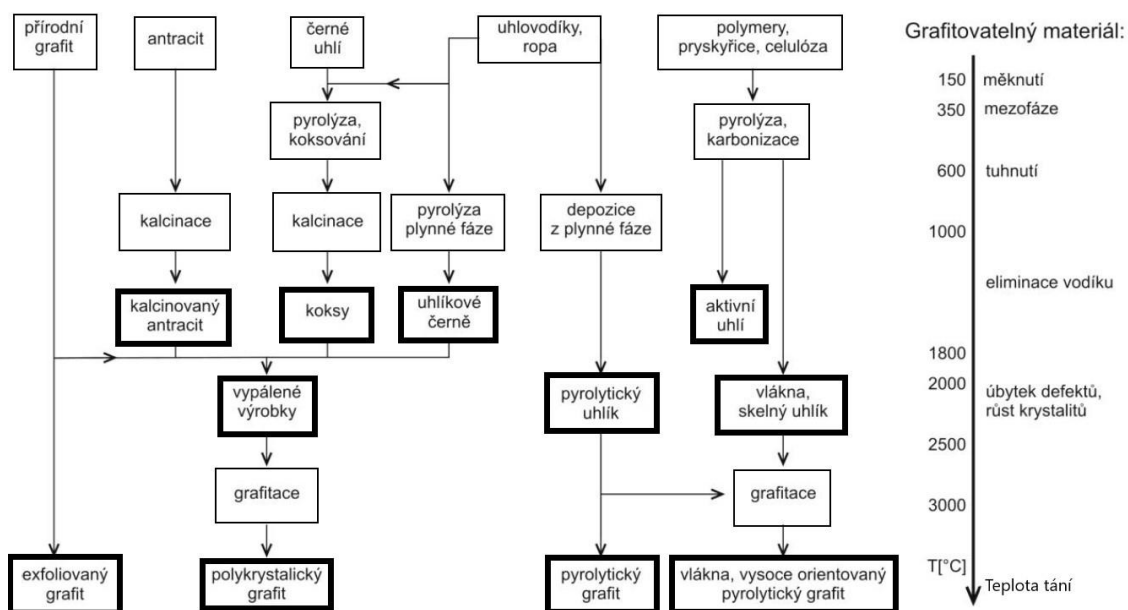
rovnoběžném s rovinami se chová jako tepelný a elektrický vodič a při působení kolmo na tyto vrstvy slouží spíše jako izolant. [4][6][7][8]

Na následujícím fázovém diagramu můžeme pozorovat vyznačená rozhraní stability jednotlivých forem uhlíku udávaná závislostí tlaku a teploty.



Obrázek 1.2.4 Fázový diagram – Uhlík [10]

Kromě přírodního grafitu jsou všechny uhlíkové materiály získávány pyrolýzou přírodního grafitu. Schéma na následujícím obrázku ukazuje postup při výrobě jednotlivých materiálů.



Obrázek 1.2.5 Schéma výroby materiálů na bázi uhlíku

1.3 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna obsahují uhlík v jeho různých modifikacích a jsou vyráběna pyrolýzou z prekurzoru tvaru vlákna na bázi polyakrylonitrilu anebo smol. Výsledkem jsou pak uhlíková vlákna nižších či vyšších parametrů, která v sobě kombinují vysokou pevnost a pružnost při nízké měrné hmotnosti a tepelné odolnosti. Uhlíková vlákna nižších parametrů bývají vyráběna ve formě vláken či plstí na bázi smol s modulem pružnosti do 100 GPa. Tato vlákna bývají užívána jako izolační materiál, betonová výztuž, anebo se používá do elektromagnetických stínidel. [11]

Prekurzorem pro tento druh uhlíkových vláken jsou smoly z černého uhlí a ropy nebo pyrolýze podrobené vedlejší ropné produkty jako je naftalen nebo PVC. Oproti výrobě vláken z PAN mají vlákna ze smol vyšší výtěžnost o 30 %. Nejdůležitějším parametrem procesu je příprava samotné smoly, jelikož se pak od ní odvíjí výsledné vlastnosti uhlíkových vláken. Smola je nejdříve při teplotě 450 °C filtrována, aby došlo k separaci příměsí a netavitelných částic a usnadnil se proces zvláknování. Přefiltrovaná viskózní smola je dále vytlačována skrze trysku s několika kapilárními kanálky rychlostí několik set metrů za sekundu, které udávají průměr vlákna. Pod tryskou dochází k ochlazení a vytvrzení proudem vzduchu a návin na cívku. Při průchodu tryskou a následném ochlazení dojde k orientaci lamel mezofáze podél osy nově vzniklého vlákna. Tyto lamely vznikají shlukováním krystalických molekul v kapalně fázi a výsledkem je pak anizotropní uhlík, který je grafitovatelný. [11]

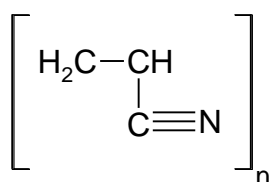
Následuje proces stabilizace oxidací po dobu 2 hodin při 200 – 300 °C a působení tahového napětí, kdy dojde k zesíťování makromolekul, vlákno zčerná a stane se netavitelným. Dále následuje proces karbonizace a grafitizace viz níže. [11]

Uhlíková vlákna vysokých mechanických parametrů se používají pro speciální konstrukce. Vyznačují se vysokým modulem pružnosti do 930 GPa. Tato vlákna pak lze dále dělit na vysoce pevná, středně modulová a vysoko modulová uhlíková vlákna. [11]

Vysoce pevná vlákna mají modul pružnosti okolo 300 GPa. Podobných hodnot dosahují i středně modulová vlákna. Vysoko modulová vlákna dosahují modulu

pružnosti 400 GPa a vlákna s ultra vysokým modulem dosahují hodnot přes 500 GPa. To z těchto uhlíkových vláken dělá materiál dvakrát pevnější než ocel a až pětkrát pevnější než speciální lehké slitiny. Výhodou je pak také jejich hustota 1,8 g/cm³, která je téměř čtyřikrát nižší než u oceli. [11]

Jako prekurzor se užívá PAN vlákno, které vzniká zvlákněním z roztoku. Po zvláknění následuje odtah na cívku, který může probíhat buď ve srážecí lázni anebo v proudu vzduchu, aby došlo k ochlazení vláken a k odpaření rozpouštědel. Vlákna se dále proplachují a dlouží při 100 °C. PAN vlákno má tažnost 15 %, pevnost v tahu 600 MPa a hustotu 1,2 g/cm³. [11]

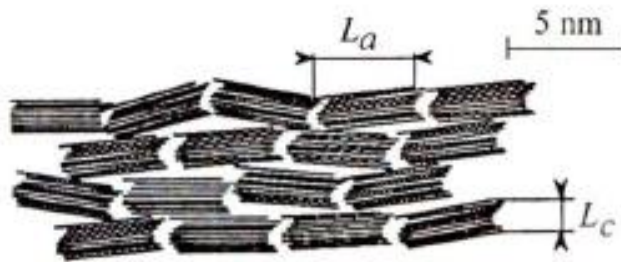


Obrázek 1.3.1 Chemický strukturní vzorec PAN

Toto vlákno pak projde procesem stabilizace, kdy dojde při teplotě 200 °C k jeho měknutí a napínání, aby bylo zamezeno nežádoucímu smršťování. Reakce probíhá za přítomnosti kyslíku. Po ukončení stabilizace dostáváme nehořlavé vlákno černé barvy s hustotou 1,4 g/cm³, pevností v tahu 200 GPa a tažností vlákna 4 %. [11]

Následuje proces karbonizace při 1200 – 1500 °C v inertní dusíkové atmosféře, aby došlo k zamezení hoření. Rozklad makromolekul odstraní z vlákna vodík a sníží obsah dusíku a kyslíku čímž získáme vlákno tvořené 80 – 95 % uhlíku, tedy uhlíkové vlákno nižších parametrů. Pevnost v tahu u takto upravených vláken dosahuje 2000 GPa, hustota činí 1,74 g/cm³ a tažnost 1 %. [5][11]

Na karbonizovaná vlákna pak lze aplikovat proces grafitizace, ve kterém dojde k trojrozměrnému uspořádání krystalických grafenových rovin a k jejich přiblížení. Toto uspořádání je však závislé na vnitřním uspořádání z předchozích procesů zpracování. Orientace těchto lamel vzhledem k ose vlákna pak ovlivňuje především tuhost vlákna. [5][11]



Obrázek 1.3.2 Vnitřní uspořádání grafitového vlákna – bazální roviny [12]

Proces grafitizace probíhá při teplotách 2400 – 3000 °C v inertní atmosféře, jehož výsledkem je 99 % obsah uhlíku ve vláknech. Tato vlákna se nazývají vysoko modulová a vyznačují se hustotou 1,8 g/cm³, vyšším modulem pružnosti, ale nižší tažností (nad 350 GPa) oproti uhlíkovým vláknům s nízkými parametry. [7][11][12]

Vlivem procesu výroby uhlíkových vláken dochází díky uspořádání vnitřní struktury k deformacím, které se na finálním vlákně projevují ve formě mikropórů o velikosti 1,6 nm, ale mohou dosáhnout i velikosti dutinek s průměrem 7,5 μm. Nejen z tohoto důvodu se vlákna v poslední fázi výroby opatřují povrchovou úpravou. Nejdříve dochází při procesu oxidace ke zvyšování povrchové energie vláken. Oxidace probíhá v plynné fázi obohacené kyslíkem, anebo v kapalně fázi za účasti oxidačních činidel například kyseliny dusičné HNO₃. Možností je pak i oxidace působením plazmy. Poté jsou opatřovány tenkou vrstvou epoxidové pryskyřice, tzv. sizingem. Epoxidová pryskyřice se nanáší elektrolyticky a chrání vlákna před poškozením, zvyšuje adhezi povrchu při užití těchto vláken jako výztuže do kompozitu s epoxidovou matricí. [7][11][12]

Tabulka 1.3.1 Vlastnosti vybraných druhů vláken [11]

Vlákno	Uhlíkové	Grafitové	Whiskery	Skleněné	Ocelové
Průměr [μm]	7 – 10	5 – 7	0,2	12 – 20	13
Hustota [g/cm 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	

Tabulka 1.3.1. porovnává uhlíková a grafitová vlákna s dalšími druhy hojně užívaných vláken v kompozitech.

Takto upravená vlákna se využívají převážně k výrobě kompozitů. Díky svým izolačním a nehořlavým vlastnostem mohou nahrazovat v mnoha oblastech například zdravotně závadný azbest. Uplatňují se jako retardéry hoření a tepelná ochrana při svařování. Vyrábí se z nich některé výrobky určené záchranným složkám, například výstroj pro hasiče. V leteckém průmyslu jsou díky své nízké váze součástí sedadel. Dále se užívají ve filtrech pro plynové masky či v klimatizacích. V medicíně a farmacii se užívají jako náhrada aktivního uhlí, jako filtry pro čištění krve, náhrady vaziv a v kostních náhradách. Pro svou dobrou elektrickou vodivost se užívají i jako vodivé textilie, v automobilovém průmyslu pak jako vyhřívání sedadel a nalézáme pro ně stále více uplatnění. [3][7][6]

1.4 Recyklovaná uhlíková vlákna

Po recyklaci kompozitních 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.[9]

Kompozitní materiály s výztuží z uhlíkových vláken se recyklují a znovu využívají nejvíce v porovnání s dalšími kompozity, což je dáno vlastnostmi uhlíku. Materiál vhodný pro recyklaci je ve sběrnách odpadního materiálu tříděn a dále distribuován do společností věnujících se recyklaci kompozitů. Zde jsou pak na uhlíkové kompozity aplikovány metody recyklace, které odstraní polymerní matrici a ojednotí uhlíkovou výztuž, která může být nadále využita pro nové výrobky.

Základním technologickým recyklačním procesem pro kompozity je spalování, pyrolýza, drcení a chemické procesy zpracování. Pro uhlíkové kompozity je to pak pyrolýza a proces spalování. [13][14]

Proces spalování je jednou z nejjednodušších recyklačních metod pro vysloužilé kompozitní materiály, u kterých již bylo dosaženo kritických hodnot užitných vlastností, a tak jsou spalovány ve spalovnách za účelem výroby tepelné energie. Spalovny tohoto materiálu musí být vybaveny speciálním filtračním zařízením pro neutralizaci toxických látek škodlivých pro životní prostředí, které jsou při tomto procesu uvolňovány a obsaženy ve spalinách. [13][14]

Další metodou recyklace je pyrolýza, při které dochází ke štěpení látek ale zachování uhlíkových a vodíkových vazeb, čímž dojde k odstranění kompozitní matrice. Tato matrice se odpaří za doprovodu plynů a kapalin z epoxidové matrice a zůstane pouze uhlíková výztuž, kterou lze využít při výrobě nových výrobků. Pyrolýza probíhá při teplotách pod 500 °C (nízkoteplotní), nebo při teplotách do 800 °C (středně teplotní) a při vysokých teplotách nad 800 °C. Problémem je pokles mechanických hodnot uhlíkových vláken při tomto separačním procesu. Taktéž nedojde ke kompletnímu ojednocení vláknenné výztuže kompozitu, ale zůstává tuhý zbytek ve formě vláken spečených v hrudky. [13][14]

Novou metodou při recyklaci vyřazených kompozitů s uhlíkovou vláknennou výztuží je chemická recyklace, která je energeticky málo náročná a šetrná k uhlíkovým vláknům. Při tomto procesu je kompozit zahříván na teplotu 200 °C, při které dojde k přeměně polymerní matrice na molekuly alkoholů a následnému odloučení od uhlíkových vláken pomocí vody nebo ethanolu. [15][16]

Proces byl dále zdokonalen i o recyklaci samotné matrice aplikací chloridu zinečnatého a ethanolu/vody. Na vysloužilý uhlíkový kompozit bylo působeno roztoky $ZnCl_2$ / ethanol a $ZnCl_2$ / H_2O . Nejdříve dojde ke krátkému ohřevu na 200 °C a následně probíhá chemická reakce při pokojové teplotě po dobu 5 hodin. Působením teploty a chemické látky dojde k botnání kompozitu s polymerní matricí, což umožní intenzivní vnikání chemikálie do objemu kompozitu. Výsledkem této recyklace je nerozpustná část skládající se z uhlíkové výztuže recyklovaného kompozitu se zbytky nerozložené epoxidové matrice a roztok matrice s chloridem zinečnatým. Tento roztok je dále filtrován rotační vakuovou odparkou, čímž dojde k zisku rozloženého matricového polymeru, který je dále vysrážen ethanolem nebo vodou a sušen při 70 °C ve vakuové peci po dobu 12 hodin. Na konci tohoto

recyklačního procesu získáváme recyklovanou uhlíkovou výztuž, polymerní matici ve formě hnědého prášku a recyklovaný katalyzátor $ZnCl_2$ taktéž ve formě prášku žluté barvy. [13][15][16]

Po těchto chemických úpravách tak lze znovu využít nejen uhlíková vlákna, ale i polymerní matici původního kompozitu, která si dle autorů tohoto výzkumu udržuje i po recyklaci velmi dobré mechanické vlastnosti.

Výhodou tohoto procesu recyklace je nízké riziko ovlivnění mechanických vlastností výztuže z uhlíkových vláken, čímž se výrazně prodlužuje jejich životnost a znovu uplatnění na podobných místech jako výchozí kompozit. Aplikací tohoto recyklačního procesu na vysloužilé kompozity by došlo k nemalým úsporám na výrobu nových výrobků z uhlíkových materiálů. [13][15][16]

1.4.1 Zdravotní rizika

Práce s recyklovanými uhlíkovými vlákny délky 100 μm či s mletými uhlíkovými částicemi, které po několika procesech mletí dosahují plošné velikosti i 0,75 μm^2 , nesou i značná zdravotní rizika. Jelikož se jedná o velice malé částice, může docházet k šíření tohoto materiálu vzduchem. Při manipulaci tak může dojít k vdechování těchto částic do dýchacího ústrojí člověka kde se usazují. Usazování vláken v plicích je nejvýraznější u částic s malým průměrem, zpravidla 0,5 – 1 μm . Tyto částice s vysokou biologickou odolností mohou mít nežádoucí karcinogenní účinek a způsobovat respirační potíže. Poločas rozpadu tohoto materiálu probíhá v řádu desítek až stovek dnů a poločasem rozpadu je myšlena doba za kterou dojde k snížení vdechnutého množství na polovinu. Vzniklá onemocnění se odvíjí od množství inhalovaného materiálu a také od iterace inhalačního procesu. [17][18]

Pro předejití inhalace uhlíkových částic je nutné užití ochranných prostředků jako jsou například roušky a respirátory FFP3, které zabraňují průniku mikročástic do dýchacích cest schválené normou EN149:2001. Vhodným ochranným prostředkem jsou také latexové rukavice zabraňující přímého styku s materiálem, což snižuje riziko přenosu na lidské tělo. V neposlední řadě je vhodné užití ochranných brýlí a štítů, chránících zrak nebo celý obličej před odletujícími částicemi zdraví škodlivého materiálu. [19][20]

1.5 Kompozit

Kompozit je materiál složený ze dvou anebo více komponent, které se odlišují chemicky i fyzikálně, mají tedy odlišné vlastnosti. Spojením těchto komponent dohromady dostáváme kompozit kombinující vlastnosti jednotlivých komponent což vede ke vzniku jedinečné materiálové struktury s jedinečnými vlastnostmi, které většinou nemohou být dosaženy kteroukoliv složkou samostatně. Složky v kompozitech se vzájemně úplně neslučují, ačkoliv na své okolí působí součinně. Mezi složkami existuje rozhraní a zároveň lze každou použitou složku fyzikálně identifikovat. [12][21]

Kompozit je složen z matrice a výztuže. Matrice propojuje výztuž a působí při přenosu příčného a smykového zatížení, zatímco výztuž přenáší zatížení v podélném směru. Díky kombinaci těchto vlastností lze takový kompozit využít jako vysoce výkonný konstrukční materiál. Kompozity jsou velmi efektivní pro tenké a lehké struktury díky svojí vysoké odolnosti, malému objemu a nízké váze v porovnání s tradičními kovovými strukturami. [21][22]

Jednou z hlavních výhod užití kompozitu je právě váha materiálu. Při konstrukci z oceli je dosaženo vysoké pevnosti a tuhosti konstrukce. Její váha však bude velmi vysoká a jednou z mála možností je odlehčit konstrukci ubráním materiálu sérií výřezů v tělese. Pokud je vyroben totožný výrobek z kompozitu, je docíleno mnohonásobně nižší hmotnosti tělesa (až 4x lehčí než ocel) a materiálovými vlastnostmi se lze ocelové konstrukci přiblížit. Kompozit je sám o sobě lehký a chceme-li docílit lepších mechanických vlastností, lze aplikovat větší počet vrstev kompozitu. [21][22][23]

Výhodou kompozitu je taktéž odolnost vůči korozi a nižší nároky na údržbu, což výrazně zvyšuje životnost konstrukce. Z hlediska mechanických vlastností pak kompozit vyniká svou nízkou teplotní dilatací a vysokou odolností proti vibracím. Vyniká i dobrou rázovou pevností, jelikož při rázu dojde k pseudoplastickému chování a nemusí tak při malých silách dojít nutně k nevratné destrukci tvaru tělesa, kdežto u kovového materiálu dojde k plastické deformaci. [22]

Nespornou výhodou kompozitu oproti kovu je nízká ztráta elektromagnetického záření. Uplatnění těchto vlastností je například velmi důležité v telekomunikacích

a v letectví. Z kompozitních materiálu jsou vytvářeny kryty telekomunikačních antén a radarů, čímž nedochází ke ztrátám a zkreslování signálu, což usnadňuje vyšší přenosy a navigaci, která je v letectví klíčová. [22][23]

Problém u kovových konstrukcí také nastává při tvorbě spojů. Tyto konstrukce je možno překládat, svařovat šroubovat apod. Každý spoj však pro konstrukci představuje potenciálně slabé místo, ve kterém může dojít k porušení celé konstrukce při přílišném působení vnějších sil. Což úzce souvisí i s tvarovou náročností tělesa, jelikož kovová tělesa nejde snadno tvarovat do složitých tvarů bez užití spojů. Výhodou je oproti tomu kompozit, který lze při výrobě tělesa složitě tvarovat a vytvořit tak těleso s minimem spojů. Příkladem může být například srovnání rámu horského kola vyrobeného z kovu a z kompozitního materiálu s výztuží z uhlíkových vláken viz snímky 1.5.1 a 1.5.2. [22][23][24]



Obrázek 1.5.1 Rám z kovového materiálu [25]



Obrázek 1.5.2 Rám z kompozitního materiálu [26]

Výhodou je pak také ekonomický aspekt výroby kompozitů díky jednodušší výrobě složitě tvarovaných dílů, a tím i menšímu množství odpadů.

U kompozitu je však velice nutné před samotnou výrobou provést velké množství konstrukčních výpočtů a simulací, aby bylo docíleno požadovaných výsledných vlastností. Při výrobním procesu je nutné striktně dodržovat nastavené parametry výroby, jelikož jsou kompozity velice náchylné na okolní prostředí jako je teplota či vlhkost. Důležité je také dodržení přesného poměru matrice a výztuže, v opačném případě pak může dojít k nežádoucí ztrátě mechanických vlastností výrobku. [22][21][23][24]

Kompozity lze dělit dle druhu matrice na kompozity s polymerní matricí, kovovou matricí, keramickou matricí a anorganickou matricí. V této práci byla užitá polymerní reaktoplastická matrice z epoxidové pryskyřice. [23][27]

Kompozity lze kvalifikovat i dle druhu užití výztuže a její geometrie. Jedná se o výztuže částicové s nahodilým nebo pravidelným uspořádáním. Dále pak může být použita vlákenná výztuž taktéž s nahodilou nebo pravidelnou orientací. Lze rozeznávat kompozity s krátko vláknennou výztuží s nahodilou orientací, dlouho vláknennou výztuží většinou již však jednosměrně orientovanou nebo kompozity s tkaninovou výztuží, která má nejčastěji plátňovou vazbu. [23][27]

Díky výztuži lze vytvořit kompozitní vrstvu (lamino), která obsahuje výztuž uloženou ve více vrstvách. Složením jednotlivých kompozitních vrstev pak vznikají lamináty a při kombinaci vrstev s různým materiálovým složením vznikne hybridní kompozit. V této práci byly vytvořeny ploché kompozity (lamina) s krátko vláknennou nahodilou orientací. Postupně pak vlivem mletí výztuže vznikaly kompozity s částicovou uhlíkovou výztuží. [23][27]



Obrázek 1.5.3 Dělení kompozitů dle druhu a uspořádání výztuže [27]

1.5.1 Matrice

Matrice kompozitního materiálu je spojitá složka, jejíž funkcí je spojení výztuže v kompaktní celek a přenos zatížení mezi vyztužujícími prvky, které je díky ní rovnoměrnější. Samostatná matrice je obvykle poddajnější spojitá složka než výztuž, což umožňuje matrici dobře prosytit výztuž a zajistit tak kompaktnost celku. Výztuž je pak naopak tvrdší, tužší, pevnější a obvykle nespojitá složka. Matrice taktéž udržuje výztuž na svém místě a zajišťuje její požadovanou orientaci. Matricí jsou pak určeny i vlastnosti kompozitu jako je teplotní odolnost, odolnost působením vnějších vlivů či chemická odolnost. [23]

Epoxidová pryskyřice zařazená do skupiny reaktoplastů je viskózní kapalina, která zajistí dobré prosycení výztuže a po jejím vytvrzení zůstane v tuhé fázi. Vytvrzení je zajištěno přidáním tužidla, které funguje jako iniciátor a katalyzátor chemické reakce, načež dojde při zvýšené teplotě k vytvoření makromolekulární polymerní sítě, která zajistí celkovou soudržnost výsledného kompozitu, a to i při dalším teplotním působení, není-li překročena teplota degradace tohoto materiálu. [23]

Z důvodu snahy lepší recyklovatelnosti kompozitů lze užít jako matici kompozitu termoplastickou epoxidovou pryskyřici, kterou lze následně snáze recyklovat. Bohužel by však zde mohlo docházet k nestabilitě mechanických vlastností vlivem tečení, smršťování, při měnících se teplotách, vlhkosti a namáhání což by mohlo mít neblahý vliv na bezpečnost letadel. [23]

1.5.2 Výztuž

Samotná matrice je omezena jejími mechanickými vlastnostmi, proto jsou tyto vlastnosti vylepšovány použitím vlákenné výztuže, kterou lze orientovat pro zlepšení mechanických vlastností v daném směru viz obrázek 1.5.3. Vlákenná výztuž pak určuje tahovou, tvarovou a ohybovou pevnost kompozitu. Tyto vlastnosti jsou však ovlivněny několika parametry. [23]

1.5.3 Parametry (vlastnosti) popisující kompozit

Prvním z parametrů je prostorové zaplnění kompozitu vyztužujícími částicemi/vláknami a jejich objem. Ten je vyjádřen objemovým procentem (1), kde V_v [m^3] je objem vláken a V_k [m^3] objem celkový.

$$V_p = \frac{V_v}{V_k} \cdot 100 \quad (1)$$

Nebo může být vyjádřen jako hmotnostní podíl výztuže v kompozitu (2)

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

kde, ρ_f, ρ_c [kg/m^3] je hustota materiálu matrice a vláken a v_f [-] je objemový zlomek vláken. Hmotnostní podíl je z technologického hlediska přípravy kompozitu přesnější.

Množství částic musí být voleno tak, aby nedošlo ke zhoršení mechanických vlastností celého kompozitu. Dojde-li totiž k aplikaci přílišného množství výztuže,

nedojde k dobrému prosycení výztuže matricí, což vede ke shlukování částic. Velký shluk částic se pak může negativně projevit na pevnosti kompozitu, jelikož matrice nedokáže přenést silové namáhání na všechny části ve shluku, ale pouze na povrch částic tohoto shluku. Tím může dojít k vzájemnému posunu částic ve shluku a k tvorbě vzduchové mezery, která bude působit jako slabé místo v celé struktuře a může dojít k deformaci výrobku. Prostorové uspořádání částic/vláken s nahodilou orientací je zajištěno vmícháním výztuže do matrice při výrobě kompozitu. Pokud bude do kompozitu aplikováno příliš malé množství výztuže, působení vnějších sil nedokáže být rovnoměrně roz distribuováno na výztuž a větší část sil tak přenáší samotná matrice, která je oproti výztuži většinou méně pevná a vzniká zde tak potenciálně slabé místo výrobku. [7]

Dále jsou vlastnosti kompozitu ovlivněny velikostí částic. U vláknenné výztuže je její pevnost závislá především na jejich délce, jelikož čím vyšší délka vláken je užitá, tím nižší pevnost tato vlákna mají. Pro zjištění kritickou délky vláken l_k [mm] lze užít vzorec (3) který říká, že je-li ve středu vlákna dosaženo napětí R_{du} [N], vlákno praskne.

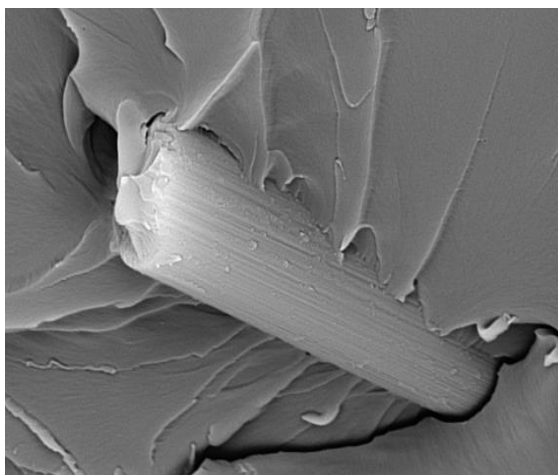
$$l_k = R_{du} \cdot \frac{r}{2 \cdot \tau_p} \quad (3)$$

Tečné napětí neboli mez kluzu matrice je vyjádřeno τ_p [N/mm²] a poloměr vlákna vyjadřuje r [mm]. [28]

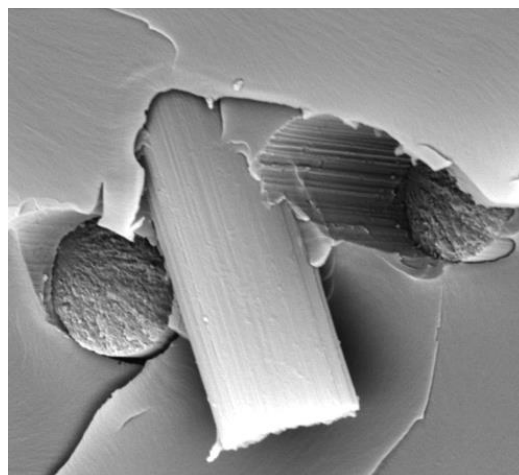
Nejdůležitějším parametrem je však mikroskopická oblast na rozhraní matrice/ vlákno, které je specifické pro každou matrici a výztuž. Dochází zde ke skokové změně chemických a fyzikálních vlastností vlivem povrchových sil. Při prosycení vláken matricí zde vznikají povrchové vady, mikroskopické dutinky orientované podél osy vláken, což vede k ovlivnění mechanických vlastností kompozitu. Tvorba vad může být u vláken částečně eliminována sizingem uhlíkových vláken při jejich výrobě, což zapříčiní lepší přechodové vlastnosti na rozhraní vlákno/matrice, jelikož epoxidová matrice se bude chemicky a fyzikálně vázat na epoxidový sizing jímž je vlákno potaženo. [3][21][23][24][27]

U částicové výztuže pak může dojít k potlačení tvorby mikrotrhlin na tomto rozhraní vlivem mikro/nano velikosti částic čímž dojde k méně výraznému poklesu mechanických hodnot kompozitu. [3][21][23][24][27]

Pevnost chemických a fyzikálních vazeb na rozhraní matrice/ vlákno je dána především adhezí mezi těmito složkami. Mechanické rozhraní, které vzniklo mezi matricí a nemletými recyklovanými uhlíkovými vlákny lze dobře pozorovat v detailu snímku 1.5.5., kde lze pozorovat mikroskopické drážky na uhlíkovém vlákně a jejich otisk i na epoxidové matrici, což svědčí o dobrém prosycení vláken matricí při výrobě kompozitu.

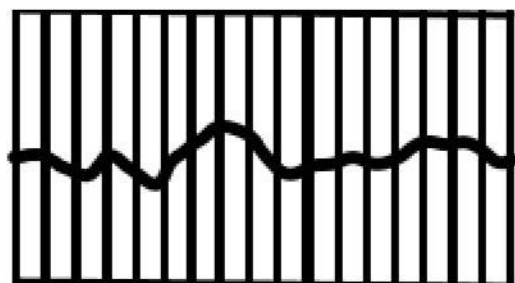


Obrázek 1.5.4 Rozhraní matrice/vlákně

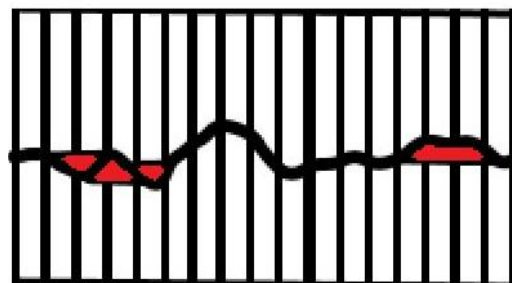


Obrázek 1.5.5 Adheze matrice/vlákně

Kromě mechanické a chemické adheze je zde souvislost se smáčením a kontaktním úhlem, viskozitou matrice při zpracování a elektrostatickou přitažlivostí mezi výztuží a matricí. Na základě toho pak lze rozeznat kompozity se slabým rozhráním, které mají nízkou pevnost a tuhost, nedochází ke správnému přenosu působících sil na výztuž a mechanické hodnoty jsou ovlivněny především matricí viz obrázek 1.5.7. [29][30][31]



Obrázek 1.5.6 dokonalá mechanická adheze rozhraní

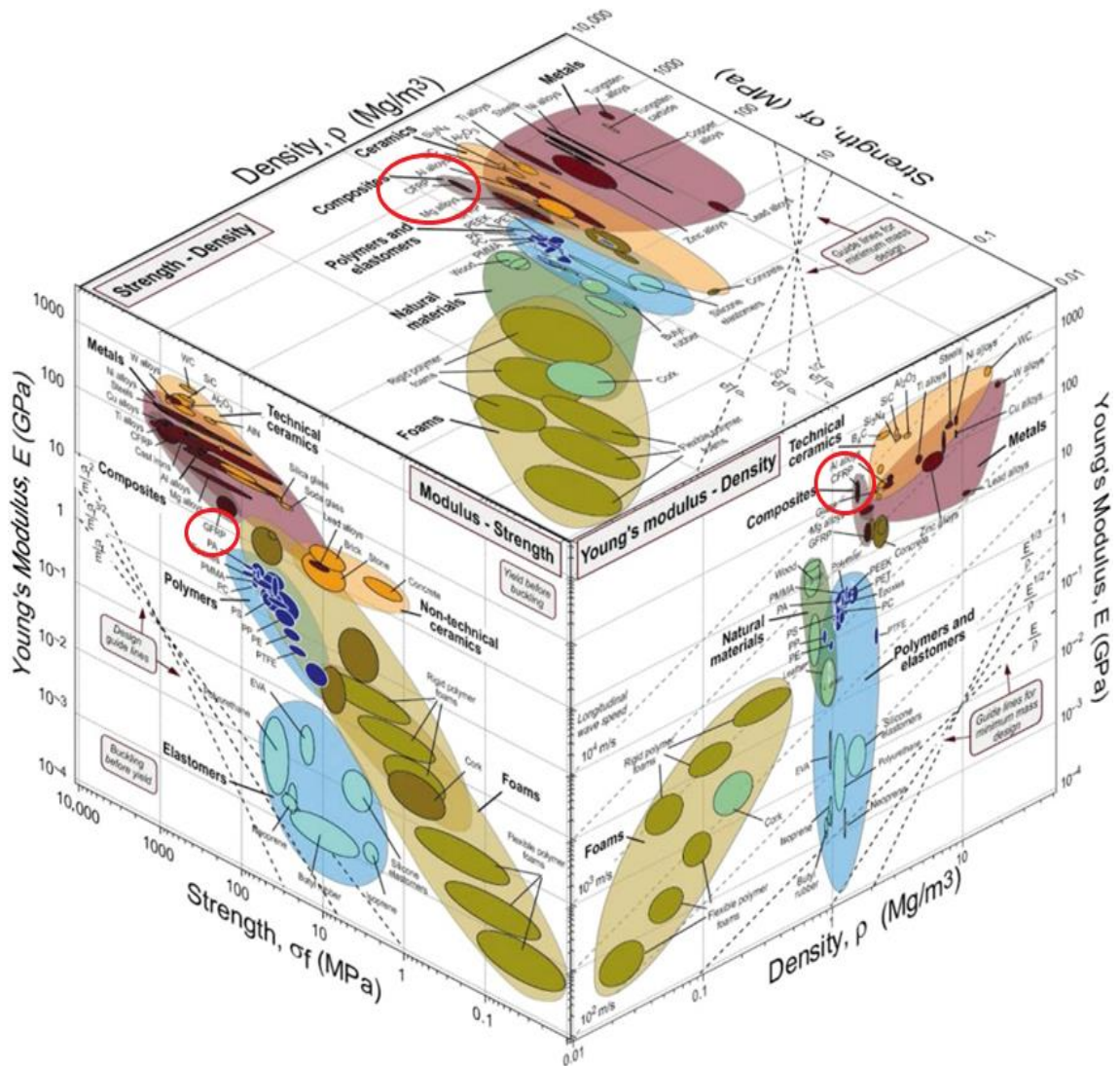


Obrázek 1.5.7 Nedokonalá mechanická adheze rozhraní

Dále rozeznáváme kompozity se silným rozhráním, kde dochází k přenosu sil z matrice na povrch vláken, ale i na jeho konce kde se koncentruje vysoké napětí.

Tyto kompozity pak mají vyšší mechanické hodnoty a je zde docíleno synergického efektu viz obrázek 1.5.6. [3][21][23][24][27][30][31]

V neposlední řadě ovlivňuje pevnost kompozitu teplota a vlhkost prostředí při jeho přípravě. [29]



Obrázek 1.5.8 Různé mechanické vlastnosti pro různé konstrukční materiály [31]

Kompozity s uhlíkovým plnivem patří k jedněm z nejlepších materiálu pro vysoce namáhané konstrukce, a proto se stále častěji využívají nejen v leteckém průmyslu. To demonstruje i kubické schéma na obrázku 1.5.8. Kompozit s uhlíkovou výztuží je značen CFRP. [31]

Jednotlivé kompozitní díly se vyrábějí mnoha technologiemi a dělí se dle formy na otevřenou anebo uzavřenou výrobu. Mezi základní technologie patří ruční kladení.

Otevřená forma tvořící tvarový negativ budoucího výrobku je povrchově ošetřena separátorem, který zabraňuje přílišnou adhezi kompozitu k formě. Dále jsou do formy kladeny vrstvy výztuže většinou ve formě rohoží či tkanin s požadovanou orientací vláken. Tyto vrstvy jsou prosycovány epoxidovou pryskyřicí a přitlačovány válečkem. Vrstvy lze vzájemně překládat. S počtem aplikovaných vrstev pak nabývá i tloušťka výrobku. [29][21][32]

Ruční kladení lze zautomatizovat technologií stříkání pistolí. Do speciální dvoukomorové pistole je do jedné komory přiváděna epoxidová pryskyřice a do druhé komory uhlíkové vlákno, které je v pistoli kráceno a strháváno proudem vzduchu do formy, kde dojde k jeho spojení s epoxidovou pryskyřicí, která je do formy taktéž aplikována tlakem. [32]

Kompozit může být vyroben i technologií lisování za studena nebo za tepla, kdy jsou obě části formy vyhřívány z pravidla elektrickým médiem. Mezi tyto dvě formy je připravena kompozitní vrstva, která je následně lisována pomocí hydraulických čelistí. [21][32]

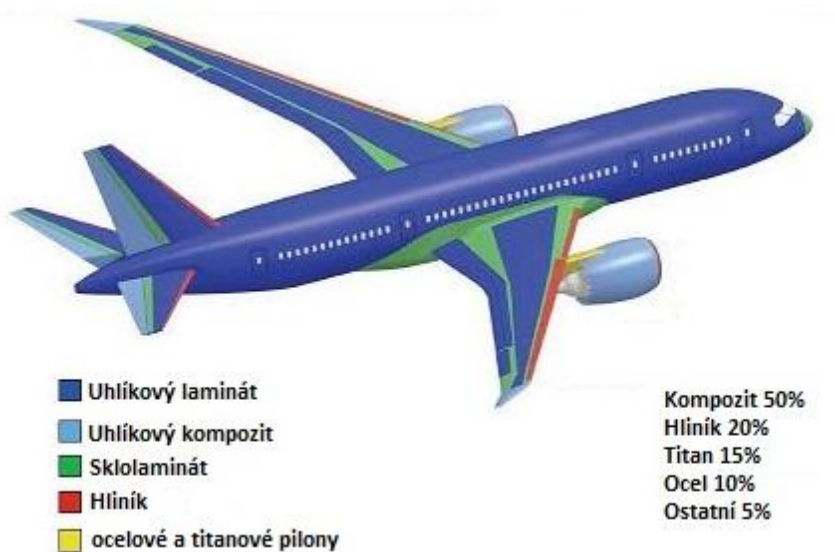
Do uzavřených forem lze kompozitní směs vstříkovat za vysokého tlaku anebo vpravovat polymerní směs za pomoci vakuového podtlaku.

Pro výrobu kompozitových profilů s konstantním průřezem se využívá technologie tažení. Výztuž je předehřáta a následně v průvlaku, který určuje průřez materiálu spojena s epoxidovou pryskyřicí. Hmota je dále odtahována čelistmi a na konci procesu krácena na požadované vzdálenosti. Výroba dutých trubíc s požadovanou světlostí se provádí technologií navíjení. Výztuž v nekonečně dlouhém provazci projde lázní s epoxidovou pryskyřicí, která je prosytí a následně je navíjena pod různými úhly na rotační formu, která tvoří vnitřek trubice. Pro výrobu dutých těles se taktéž může využít odstředivé lití kdy je polymerní směs s vlákny konečné délky vstříkována do rotující formy, ve které dojde vlivem gravitace k tvorbě rovnoměrné kompozitní vrstvy. [21][32]

Další výrobní technologií výroby kompozitu je odlévání, kdy je do negativu formy odlita směs polymerní matrice a výztuže. Z pravidla se takto vyrábějí plošné kompozitní útvary. [21][32]

1.5.4 Kompozity v leteckém průmyslu

V současné době nacházíme v leteckém průmyslu nemalé uplatnění kompozitních materiálů, především pak kompozitů s uhlíkovou výztuží. Jak již bylo řečeno v úvodu, takový kompozit musí odolávat mnoha fyzikálním, chemickým a mechanickým vlivům, aby bylo zajištěna bezpečnost leteckého provozu a letadel samotných. Příkladem může být známý dopravní letoun Boeing 787 Dreamliner na obrázku 1.5.9. [33]

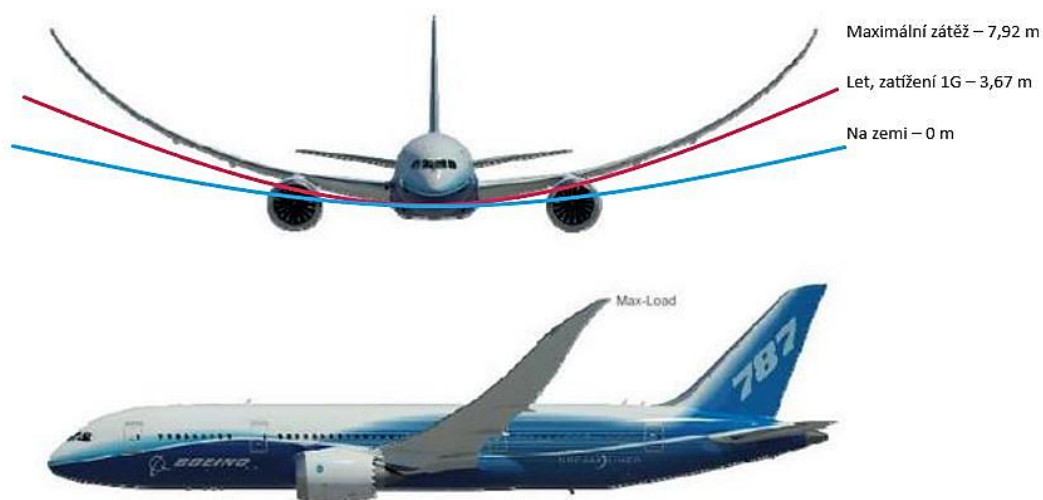


Obrázek 1.5.9 Materiály užití pro stavbu letounu Boeing 787 Dreamliner [9]

Tento moderní letoun byl vybudován jako ukázka schopností a možností novodobých technologií, a kromě pokročilých řídicích systémů a ovládání je unikátní hlavně svojí konstrukcí trupu letadla. Při konstrukci letadla bylo spoléháno převážně na vlastnosti uhlíkových kompozitů, ze kterých se letadlo skládá z 50 %. Pro srovnání s předchozími letouny (Boeing 777) zde došlo k navýšení užití kompozitů o 38 %. [33]

Díky užití kompozitů je celková hmotnost letadla 135 500 kg, která může být navýšena na 254 011 kg. To je téměř dvojnásobek, což vypovídá o mechanických možnostech uhlíkových kompozitů. Tyto možnosti se pak dále odráží ve flexibilitě kompozitových křídel tohoto letounu zobrazených na obrázku 1.5.10. [33]

Při testování ohybu křídel výrobcem byl na tomto stroji naměřen maximální ohyb křídla 7,92 m což je mezní hodnota, nad kterou by již došlo k nevratnému poškození křídel letounu. Při běžném provozu dochází k ohybu křídel pouze do 4 m.



Obrázek 1.5.10 Boeing 737 Dreamliner – wing flex test [34]

Tento ohyb křídel nahoru a dolů umožňuje přizpůsobení letadla letovým podmínkám, pomáhá při stabilizaci, usnadňuje ovládání a snižuje provozní náklady. Přizpůsobení křídel za letu dokáže eliminovat část působících sil na letoun, které tak nemusejí být překonávány tahovou silou motorů. [33][34]

Z kompozitních materiálů s uhlíkovým plnivem lze u letounů nalézt další funkční komponenty jako například trup letadla, směrovky, kryt radaru, ocasní křídlo a další součásti.

1.5.5 Recyklace kompozitů u letadel

Kompozitní materiál kombinuje mnohé vlastnosti, které nelze získat užitím pouze jednoho druhu materiálu, anebo by výroba tohoto výrobku byla příliš náročná. U konstrukce tak docílíme požadované odolnosti a nízké váhy, což jsou vhodné vlastnosti pro výrobek a toho všeho je dosaženo při relativně nízkých výrobních a provozních nákladech ve srovnání s jinými materiály. [35]

Úskalím využívání kompozitů však zůstává jejich opotřebení a životnost. Zůstaneme-li u leteckého průmyslu, na naší planetě nalezneme již zmiňované hřbitovy letadel. Jedná se o rozsáhlé plochy o rozloze několik desítek plošných kilometrů, obsahujících tisíce vysloužilých letadel, které jsou velkou ekologickou zátěží. Ačkoliv se jedná o jakési skladiště použitého a již nepotřebného materiálu,

oblasti jsou stále střeženy aktivní ochranou, jelikož se na nich nachází velké množství materiálu v hodnotě miliard dolarů. [35]

Na tyto hřbitovy se dostávají letadla, která jsou již za hranicí své životnosti. Životnost letadel je výrobcí uváděna na 30 let a 60 tisíc letových hodin. Díky pravidelným kontrolám a odstraňování závad je pak dosaženo životnosti na téměř dvojnásobek letových hodin. Tato životnost je posuzována z několika hledisek. Nejvýstižnějším hlediskem je technická životnost. Ta je posuzována především u částí letadla, které nelze jednoduše vyměnit. Příkladem zde může být například trup letadla. Dalším hlediskem je morální životnost. Ta vstupuje v platnost dojde-li k vývoji nové technologie výroby letadel, která překonává technologii stávající. Dále se také posuzuje, zda letadlo stále vyhovuje platným regulím a bezpečnostním předpisům. V neposlední řadě se pak hledí na ekonomickou životnost spojenou s provozními náklady. [35]

Letadlo je tedy nejdříve využíváno komerčními aerolinkami. Po určité době, kdy už nesplňuje všechny aspekty pro rozumný provoz je přeprodáváno do zemí třetího světa. Později je pak stroj přestaven na nákladní letadlo a poté končí na hřbitově letadel. V současné době dochází k masivnímu zvětšování těchto letadlových uložišť, jelikož končí životnost letadel vyrobených v 70. letech. Recyklací kompozitů z těchto letadel by mohl být recyklát znovu uplatněn pro výrobu nových výrobků, a došlo by k výraznému zmírnění ekologického dopadu na zemi. [35]

1.5.6 Recyklace letadel

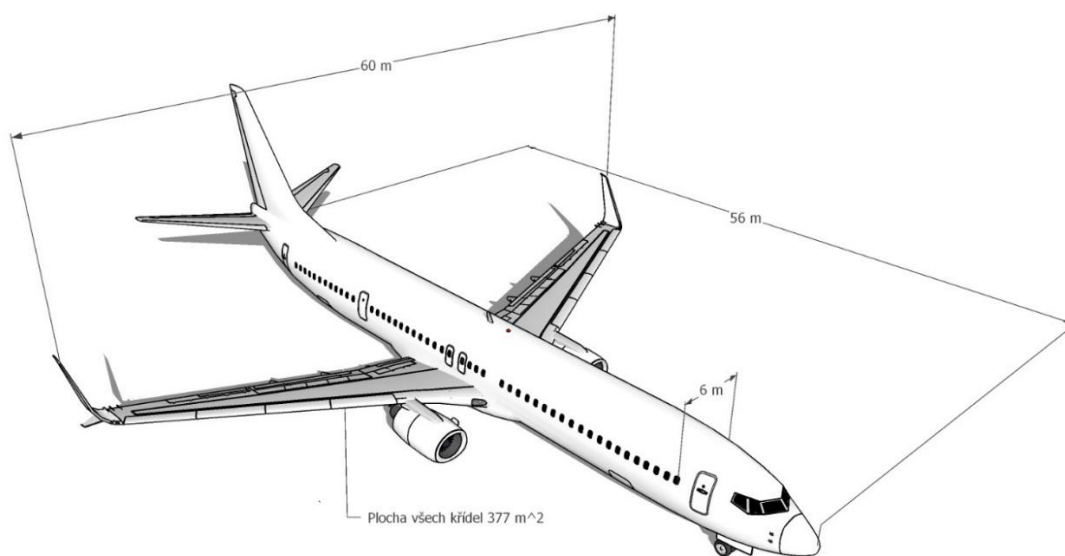
Samotná recyklace letadel se skládá z mnoha po sobě jdoucích operací. Prvním krokem je posouzení stavu letadla, na jehož základě společnost zabývající se recyklací stanovuje, jaké součástky je možno odprodat výrobcům letadel pro jejich znovu užití pro nové stroje. Tyto součástky jsou pak z letadla odmontovány, přezkoušeny, rozříděny, štítkovány a rozprodány. Většinou se jedná o počítačové systémy, systémy avioniky a další součástky. [36]

Dále dojde k demontáži interiéru letadla. Odstraní se všechny interiérové bloky, sedačky, kilometry kabelů a veškeré příslušenství, které je dále rozebráno a tříděno dle použitých materiálů. Současně dojde k demontáži motorů a k jejich úplnému

rozebrání na jednotlivé součástky, které jsou pracovníky firmy tříděny dle materiálu, z něhož jsou vyrobeny. V některých případech jsou motorové bloky v dobrém stavu, a tak dochází po důkladném přezkoušení taktéž k odprodání pro montáž na nová letadla. [36]

Po odstranění všech částí, které lze znovu použít anebo recyklovat zůstává pouze samotný trup letadla, který je vyroben z kompozitních materiálů převážně s uhlíkovými plnivými. Podíváme-li se na trup letadla a parametry jednoho ze známých dopravních letounů Boeing 787 Dreamliner, který se vyznačuje jeho složením převážně z kompozitních materiálů s uhlíkovou výztuží, je možno zhruba vypočítat kolik kompozitu může být recyklováno. [33]

Na obrázku 1.5.11. jsou zobrazeny některé rozměry letadla udávané výrobcem, z nichž lze po zjednodušení provést potřebné výpočty.



Obrázek 1.5.11 Kótovaný model dopravního letounu Boeing 787 Dreamliner

Plochy jednotlivých křídel jsou definovány z technických parametrů udávaných výrobcem. Plochu trupu letadla lze vypočítat po zjednodušení tvaru na válec. Celková plocha letadla tak činí 1489 m². Výpočet objemu tohoto materiálu by byl poněkud složitější, jelikož prostorová tuhost všech komponent je tvořena velkým množstvím výztuh a přepážek. Pokud dojde opět ke zjednodušení výpočtu a budeme počítat, že tloušťka stěny je ve všech místech konstantní a stanovíme ji na 5 cm. Dostaneme velice orientační, a především subjektivně odhadovaný výsledek objemu, který činí cca. 75 m³ kompozitu, který je potřeba recyklovat. [33][37]

Takto připravené letadlo je pomocí manipulátorů s čelistí mechanicky děleno na menší části, které jsou následně drceny a stříhány na menší kusy, které jsou dále tříděny.

Veškeré tříděné kovové části jsou roztaveny a odlity do ingotů, které jsou dále prodány různým průmyslovým společnostem pro další výrobu. Kompozitní materiály jsou poté recyklovány výše popsányými postupy a recyklát je taktéž prodáván pro výrobu nových výrobků. Recyklace jednoho dopravního letadla trvá šest až deset týdnů a jedná se o velmi drahý proces. [36]

1.5.7 Testování mechanických vlastností kompozitů

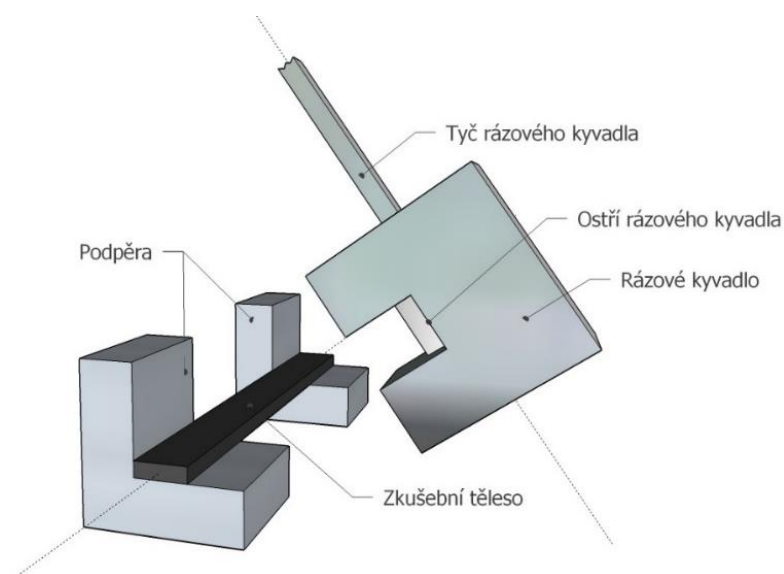
V této kapitole jsou popsány běžné metody testování kompozitních materiálů.

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.“ [38]

Zkouška rázové houževnatosti spočívá v mechanickém namáhání velmi krátce vyvinutou silou související s deformačními vlastnostmi tělesa. Tato zkouška simuluje schopnost okamžité absorpce energie rázovou silou. „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.“ [9]

Pro testování se používají normované testovací vzorky s šířkou 10 mm a délkou 100 mm. Takto připravený vzorek je uložen na dvě podpory větší plochou vzorku směrem dolů, tak jak je znázorněno na schématu 1.5.12., a poté je přeražen kyvadlovým kladivem na užší nebo širší straně tělesa. [9]



Obrázek 1.5.12 Schéma zkoušky rázové houževnatosti Charpyho metodou [9]

Výsledkem zkoušky jsou naměřené hodnoty rázové houževnatosti A [J/m^2], která je definovaná jako kinetická energie potřebná k porušení tělesa ve vztahu na plochu příčného průřezu tohoto tělesa: [9]

$$A = \frac{E}{a \cdot b} \quad (4)$$

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

a ... šířka zkušebního tělesa v [mm]

b ... tloušťka zkušebního tělesa v [mm]

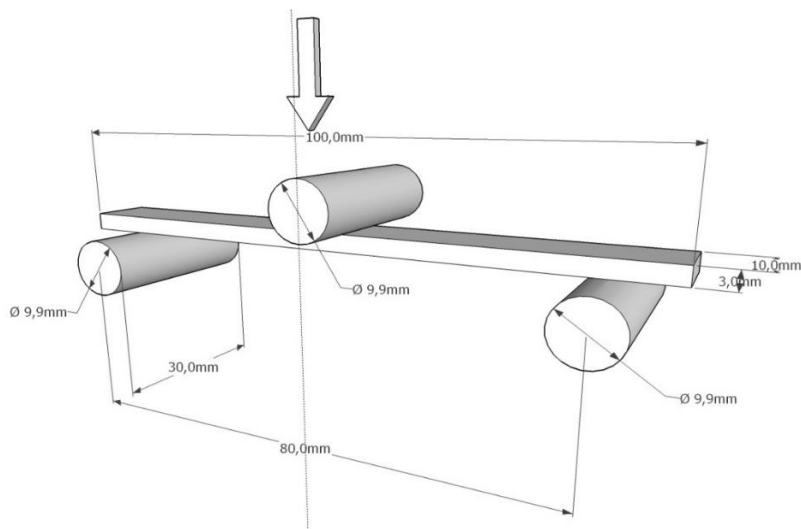
Zkouška ohybových vlastností tříbodovým ohybem

Pro testování ohybových vlastností je obvykle volena metoda tříbodového ohybu ČSN EN ISO 14125, která je určena pro reaktoplastové a termoplastové kompozity s vláknennou výztuhou včetně uhlíkových a aramidových vláken. [39]

Zkouška tříbodovým ohybem je statická zkouška, jejíž aplikací dojde ke stanovení průhybu testovaného materiálu. Síla působící na těleso ložené na dvou podporách působí mezi podpory uprostřed, díky čemuž je rozloženo namáhání tak, že maximální namáhání je vyvinuto na vrstvy materiálu dál od středu tělesa, a právě ve středu zůstane vrstva neutrální. Testovaný vzorek s rozměry totožnými jako při rázové zkoušce je vložen do testovacího přípravku, kde dojde k jeho ohybu konstantní rychlostí do přerušeni deformací vzorku, anebo po dosažení předem

stanovených hodnot průběhu zkoušky, viz schéma na obrázku 1.5.13. Výstupem této zkoušky je hodnota průhybu a deformační síly působící na testovací těleso z nichž lze stanovit pevnost v ohybu. Testovací těleso je namáháno tlakem tak, aby nedocházelo ke smykové deformaci. [40]

Z výsledků zkoušky tříbodovým ohybem lze vypočíst dle vzorců (5) a (6) ohybové napětí σ_f [MPa] a modul pružnosti E_f [MPa].



Obrázek 1.5.13 schéma zkoušky tříbodovým ohybem ČSN EN ISO 14125 [9]

Pro výpočet hodnoty ohybového napětí lze použít následující vzorec stanovující pevnost v ohybu testovaného tělesa ve střední vzdálenosti mezi podpěrami.

$$\sigma_f = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 a \cdot b^2} \quad (5)$$

Kde σ_f je ohybové napětí v [MPa], F je zatěžující síla [N], l je vzdálenost podpěr [mm], a je šířka zkušební tělesa [mm] a b je tloušťka zkušební tělesa [mm]. Dále je využíváno vzorce pro výpočet modulu pružnosti stanovující poměr rozdílu napětí a rozdílu deformací v odpovídajících bodech.

$$E_f = \frac{F \cdot l^3}{4 \cdot X \cdot a \cdot b^3} \quad (6)$$

Kde E_f je modul pružnosti v [MPa], F je zatěžující síla [N], X je průhyb [mm], l je vzdálenost podpěr [mm], a je šířka zkušební tělesa v [mm] a b je tloušťka zkušební tělesa [mm]. [39][41][8]

Měření mechanických vlastností – DMA

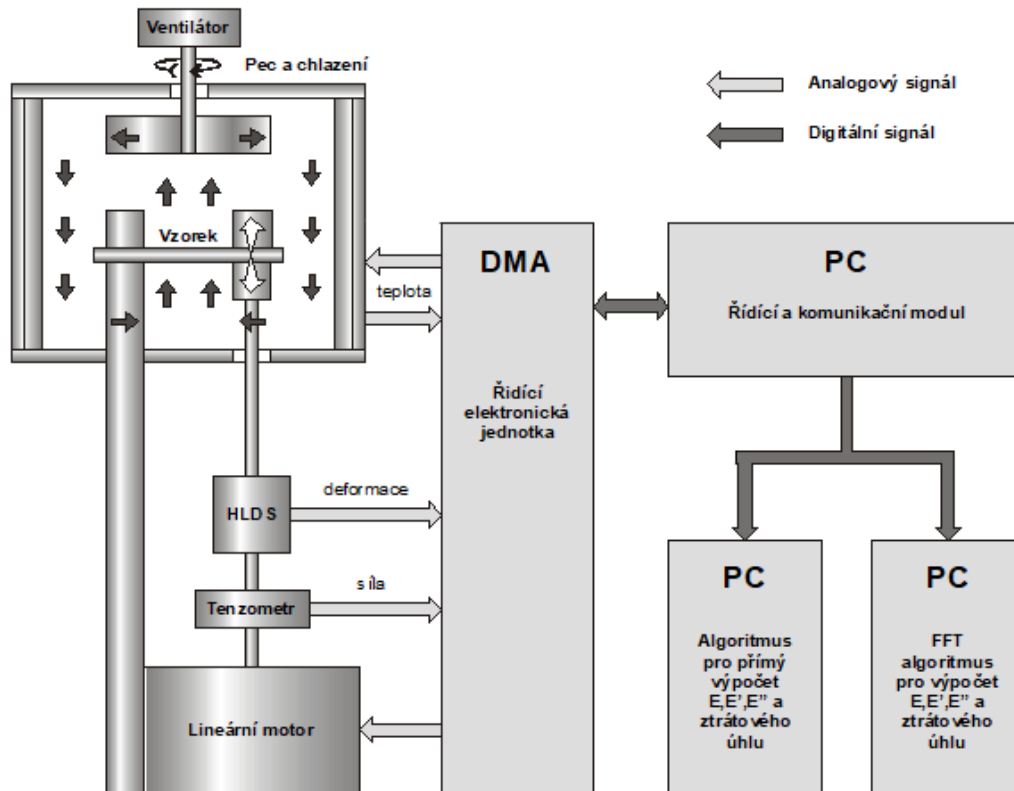
Dynamické mechanické vlastnosti měřené na velice citlivém analyzátoru jsou zjišťovány při podrobení materiálu cyklicky opakovanému deformačnímu namáhání, při kterém je zaznamenáván průběh síly a deformace. Pomocí této metody lze charakterizovat závislost modulu a mechanického tlumení na teplotě (volitelně) a čase u testovaného materiálu a jeho plniva. [42][43]

Princip měření spočívá obvykle v aplikaci deformačního napětí a v detekci odezvy této deformace v testovaném materiálu, tedy měření tlakové relaxace napětí. Deformační napětí je velice nízké a pohybuje se v oblasti Hookova zákona pro tlak popisující pružnou vratnou deformaci materiálu. [43][44]

Přímo z průběhu síly a deformace při zvolené frekvenci lze určit reálnou složku neboli komplexního modulu pružnosti popisující krystalickou část, která je v oblasti Hookova zákona elastická. Taktéž lze stanovit imaginární složku modulu pružnosti popisující amorfní část, která je pro oblast Hookova zákona plastická. Ztrátový modul udává maximální hodnotu při zvolené frekvenci. Při nízké frekvenci se materiál chová kaučkovitě a při aplikaci vysoké frekvence je pak ve sklovitém stavu. [44][45]

Měřením lze stanovit teploty skelného přechodu, bod měknutí a tání. Dále lze stanovit tlumící schopnost materiálu či postupnou změnu rozměrů materiálu při zatěžování a dlouhodobou teplotní stabilitu. Vhodným nastavením přístroje je možno i uměle simulovat stárnutí testovaného materiálu. [42][44][45]

Testovaný vzorek je umístěn a upnut na dvě ramena umístěná na čepech tvořených torzními pružinami. Upnutý vzorek tvoří rezonanční systém závislý na frekvenci a amplitudě. Deformace vzorku je způsobena dvěma protichůdnými momenty o stejné velikosti působící v místě upnutí vzorku. Přístroj pak dokáže přímo určit modul pružnosti z amplitudy a deformace. Průběh síly působící na vzorek může být generován se sinusovým, trojúhelníkovým či obdélníkovým průběhem, anebo jako rostoucí a klesající pila s rozsahem od -10 N do 10 N při frekvenčním rozsahu 0,0001 až 100 Hz. Při zařazení teploty do měření lze aplikovat teplotní rozsah od -120 °C do 500 °C s různou rychlostí ohřevu. [42][43][44][45]



Obrázek 1.5.14 blokové schéma dynamického mechanického analyzátoru [42]

V přístroji lze testovat tlakem, tahem, tříbodovým ohybem a smykem. Je zde možnost umístění vzorku jako jednoduše anebo dvojité větknutý nosník. [45]

Dynamické testování materiálu má význam především pro využití výrobku v praxi, jelikož při jeho užívání je výrobek vystaven dlouhodobému dynamickému zatížení ve větší míře než zatížení statické, zvláště pak v letectví.

2 Experimentální část

Experimentální část této práce se skládá z několika na sebe navazujících kroků. Prvním krokem je příprava materiálu, která spočívá v navážení potřebného množství výchozího materiálu v podobě recyklovaných mletých uhlíkových vláken Carbiso, které je vkládáno do mlecích misek. Toto plnivo v mlecích miskách je vloženo do mlýnu, kde je podrobena procesu mletí při 850 ot/min po dobu 5 minut. Na plnivo je postupně aplikován proces mletí až 3×.

Výchozí materiál i mleté částice z jednotlivých procesů mletí jsou dále nasnímány skenovacím elektronovým mikroskopem SEM. Následně probíhá analýza velikosti částic pomocí počítačového softwaru Image J.

Dalším krokem je samotná výroba kompozitního materiálu s uhlíkovým plnivem v epoxidové matrici. Výroba spočívá v přesném odvážení mísených látek: uhlíkové plnivo; epoxidová pryskyřice a tužidlo. Tyto látky jsou následně smíseny a odlity do předem vyseparované formy kruhového tvaru, ve které proběhne tvrzení materiálu při pokojové teplotě po dobu 24 hodin. Dále následuje dodatečné vytvrzení při 60 °C po dobu 15 hodin v horkovzdušné peci načež je kompozitní vzorek vyjmut z formy.

Takto připravené vzorky jsou na stolní kotoučové pile nařezány na požadované rozměry zkušebních vzorků pro jednotlivé mechanické zkoušky. První mechanickou zkouškou uhlíkového kompozitu je zkouška rázové houževnatosti dle ČSN EN ISO 179-1. Po ukončení této zkoušky jsou rázem přeražené vzorky vloženy do SEM, kde jsou snímány a analyzovány jednotlivé lomové plochy testovacích vzorků.

Druhou mechanickou zkouškou je testování kompozitních vzorků tříbodovým ohybem dle ČSN EN ISO 14125. Třetí mechanickou zkouškou je dynamická mechanická analýza DMA dle ČSN EN ISO 472 (610001).

Veškeré získané snímky elektronovou mikroskopií a naměřené hodnoty z mechanického testování jsou analyzovány a zpracovány. Tento postup byl aplikován na vzorky bez plniva, s nemletým a 1 – 3× mletým plnivem o koncentraci 1 – 5 hm.% uhlíkového plniva.

2.1 Proces mletí uhlíkových vláken

Na začátku experimentu bylo připraveno plnivo v podobě mletých uhlíkových vláken. Jako výchozí surovina pro mletí byla použita recyklovaná mletá uhlíková vlákna Carbiso Mil 100 μm vyrobená společností Easycomposites zabývající se recyklací uhlíkových vláken, která jsou dodávána jako plnivo do kompozitních materiálů. Samotný proces mletí byl realizován v mlecím mlýnu firmy Fritsch. Tento proces byl několikrát opakován a výsledkem pak byly částice různé velikosti. [46]

2.1.1 Recyklovaná mletá uhlíková vlákna Carbiso



Obrázek 2.1.1 Recyklovaná mletá uhlíková vlákna Carbiso Mil 100 μm [47]

Tato recyklovaná uhlíková vlákna byla dodavatelem distribuována formou prachových částic černé barvy o délce 100 μm . Prekurzorem pro tato uhlíková vlákna je PAN. Vlákna dokáží odolat tahové síle až 3150 MPa. Další materiálové vlastnosti udávané výrobcem v technickém listu reprezentuje tabulka 2.1.1. [46]

Tabulka 2.1.1 Carbiso – Materiálové vlastnosti [46]

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

2.1.2 Mlýn pro mletí částic

Pro mletí recyklovaných uhlíkových vláken za účelem zmenšení částic, než jakou má výchozí surovina Carbisio, byl použit nano mlýn firmy Fritsch, Pulverisette 7 premium line.



Obrázek 2.1.2 Nano mlýn Fritsch, Pulverisette 7 premium line [48]

Zpracovávaný materiál je vsypán do dvou nerezových mlecích misek, které jsou z vnitřní strany opatřeny centimetr silným korundovým (Al_2O_3) povlakem. Spolu s materiálem je do misek vložen stejný počet korundových mlecích kuliček stejného průměru. Tyto misky jsou uzavřeny tlakovým uzávěrem a vloženy do mlýnu, kde dojde následně k jejich mechanickému zajištění. Na elektronickém displeji jsou pak navoleny veškeré procesní parametry jako je počet otáček přístroje, průměr vložených mlecích kuliček a časový údaj trvání celého mlecího procesu. [48]



Obrázek 2.1.3 Mlecí miska s kuličkami [48]

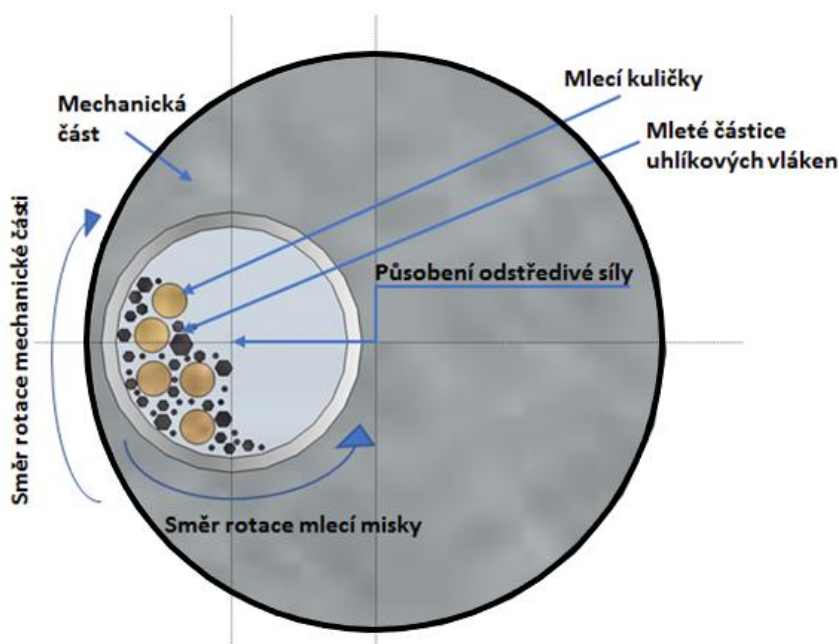
Po uplynutí délky mlecího procesu jsou mlecí misky vyjmuty a odstaveny z důvodu snížení teploty a tlaku, které byly zvýšeny fyzikálními vlastnostmi při procesu mletí.

Následně je možné tlakové víko odjistit a vyjmout namletý materiál, ze kterého se oddělí mlecí kuličky. Posledním krokem je pak důkladné čištění mlecích misek, aby nedošlo při dalším procesu mletí k ovlivnění výsledků vlivem mikroskopických usazenin z předchozího mletí.

2.1.3 Princip při mlecím procesu

Principem mlecího procesu je setrvání výchozí suroviny ve stavu mletí po určitou dobu za účelem získání různě velkých částic tohoto materiálu, z pravidla však získání částic menších než je velikost částic výchozí suroviny. Při prodloužení časové závislosti, lze dosáhnout u částic rozměrů v rozmezí velikosti mikro až nano. [49]

Celý proces je znázorněn na obrázku 2.1.4.



Obrázek 2.1.4 Názorné vyobrazení principu mlýnu [9]

Při procesu mletí dochází k protichůdným rotacím mlecí misky a mechanické části mlýnu, ve kterém jsou misky umístěny. Mlecí miska obsahuje mletý materiál a korundové mlecí kuličky, na které působí odstředivá síla. Díky této síle a protisměrným rotacím dochází k pohybu částic a kuliček. Kuličky svým pohybem naráží do dalších mlecích kuliček v misce a taktéž naráží do stěn mlecí misky. Při každém takovém dopadu kuličky dojde k drcení uhlíkového materiálu, který se

nachází v prostoru mezi kuličkami a stěnami misky, čímž dochází i ke zmenšování velikosti mletých částic. [49][48]

Pohybem všech částic uvnitř misky a samotnou rotací misky dochází k vysokému tření, což vede k exponenciálnímu zvyšování teploty a tlaku uvnitř misky. Proto je časový interval procesu nastaven na dobu 5 min. Pokud by toto časové opatření nebylo nastaveno, došlo by k takovému navýšení teploty, že by se částice uvnitř misky začaly spékat a tvořit hrudky. Také by došlo k poškození mlecí misky a mlecích kuliček. [49][48]

2.1.4 Postup mlecího procesu

Pro účely experimentu bylo odváženo na laboratorních vahách množství 15 g uhlíkových vláken Carbiso, které bylo vsypáno do mlecí misky. Do misky bylo přidáno 12 kusů korundových mlecích kuliček s průměrem 10 mm. Stejný postup byl aplikován i při plnění druhé mlecí misky. Obsah mlecích misek byl tlakově uzavřen víky a obě misky byly vloženy do mechanického ústrojí mlýnu a zajištěny.

Dále byly nastaveny parametry mlecího procesu. Rychlost otáčení mechanického ústrojí spolu s předem vloženými mlecími miskami byla nastavena na 850 ot/min a délka mlecího procesu byla nastavena na dobu 5 min. Posledním nutným parametrem bylo zadání průměru korundových mlecích kuliček v mlecích miskách. Poté došlo k uzavření mlýnu a k samotnému procesu mletí. Všechny parametry procesu včetně odváženého množství materiálu a dalších potřebných proměnných byly stanoveny na základě výsledků předchozích měření pracovníky laboratoře a tyto parametry se jeví jako nejvhodnější pro zpracování recyklovaných uhlíkových vláken Carbiso.

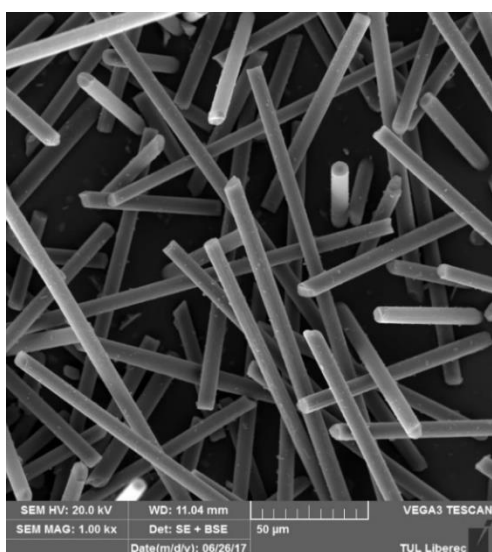
2.1.5 Výsledky mlecího procesu

Pro účely této práce prošla mletá recyklovaná uhlíková vlákna mlecím procesem celkem třikrát. Výsledkem procesu byl namletý materiál s různě velkými uhlíkovými částicemi. Materiál byl následně vložen pod skenovací elektronový mikroskop a byly pořízeny mikroskopické snímky, které znázorňují uhlíková vlákna Carbiso o původní délce 100 μm a průměru 7,5 μm po jednotlivých průchodech mlýnem. Mikroskopické snímky byly pořízeny při stonásobném a pětisetnásobném zvětšení.

Na následujících snímcích je možno pozorovat snímky z SEM sestupně vzhledem k jednotlivým průchodům mlýnem.

Nemletá uhlíková vlákna

Snímek 2.1.5 a 2.1.6. dokumentují výchozí materiál Carbiso, který byl dále vkládán do mlýnu. Na snímcích lze pozorovat neporušená recyklovaná uhlíková vlákna. Na snímku 2.1.6. s pětisetnásobným zvětšením lze pozorovat malé částičky materiálu, které se na povrch uhlíkových vláken adherovaly již při procesu krácení vláken výrobcem na požadovanou délku 100 μm .

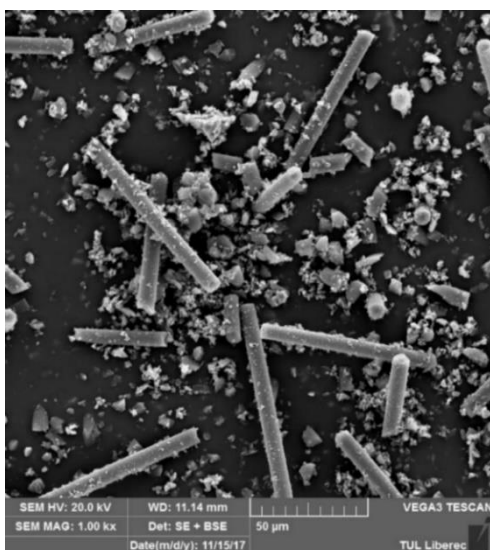


Obrázek 2.1.5 Uhlíková vlákna Carbiso 1000 \times zvětšeno

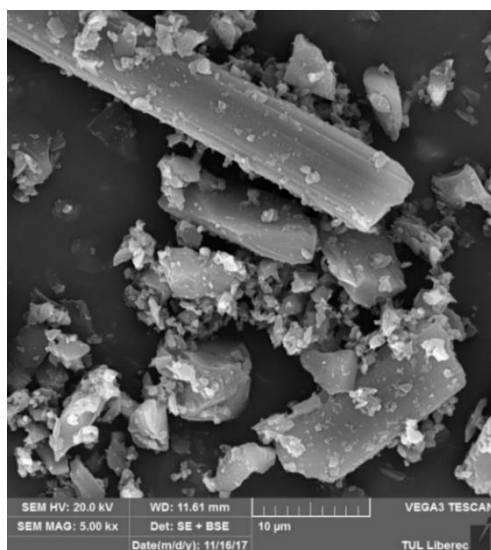


Obrázek 2.1.6 Uhlíková vlákna Carbiso 5000 \times zvětšeno

1 \times mletá uhlíková vlákna



Obrázek 2.1.7 Uhlíková vlákna 1 \times mletá 1000 \times zvětšeno



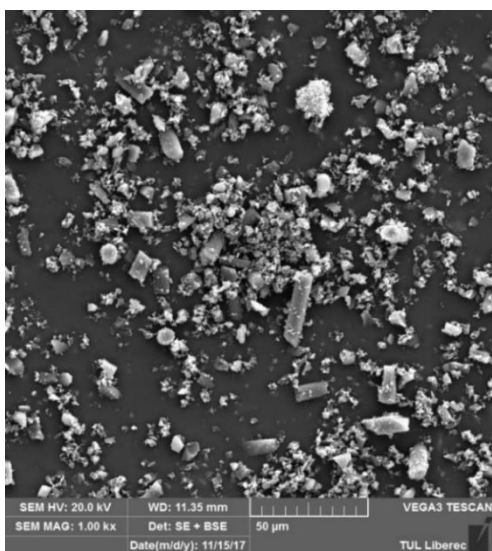
Obrázek 2.1.8 Uhlíková vlákna 1 \times mletá 5000 \times zvětšeno

Výchozí materiál Carbiso byl podroben procesu mletí po dobu 5 min při 850 ot/min. Výsledek po prvním průchodu strojem zobrazují snímky 2.1.7. a 2.1.8.

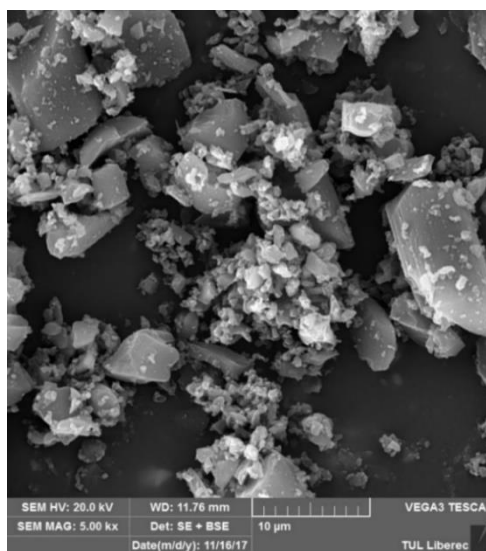
Ze snímků je patrné, že vlivem mletí došlo ke zmenšení uhlíkových částic. Na snímcích lze pozorovat, že nedošlo k rozemletí všech vláken, jelikož namletý materiál stále obsahuje téměř nepoškozená uhlíková vlákna Carbiso. Nedokonalé rozemletí materiálu bylo zapříčiněno krátkou dobou mlecího procesu vzhledem k množství 15 g vloženého materiálu do mlecí misky. Jak již bylo řečeno, kratší doba mletí byla stanovena především z důvodu rychle se zvyšující teploty v průběhu procesu mletí, která by mohla ovlivnit výsledně zpracovaný materiál a taktéž by měla negativní dopad na správnou funkčnost a chod stroje. Geometrie částic materiálu je nestejněměrná, což je dále potvrzeno i analýzou částic v kapitole 2.2.

2× mletá uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna po prvním mletí byla vložena do mlýnu a rozemleta znovu. Výsledek druhého procesu mletí dokumentují následující snímky, z nichž je patrné, že došlo k dalšímu rozmělnění uhlíkových částic. Geometrie materiálu dosahuje větší stejnoměrnosti, i přesto však lze pozorovat nerozemleté úlomky výchozího materiálu.



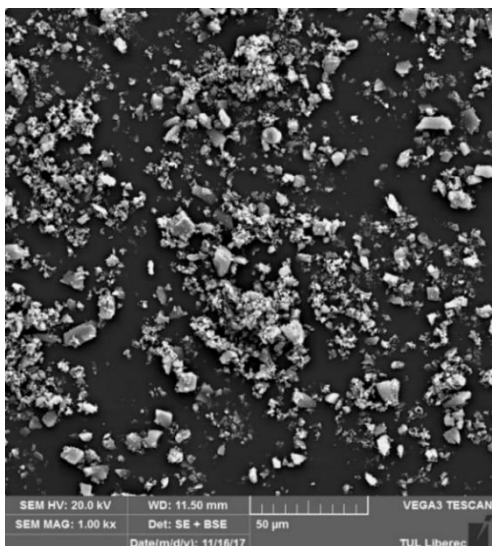
Obrázek 2.1.9 Uhlíková vlákna 2× mletá 1000× zvětšeno



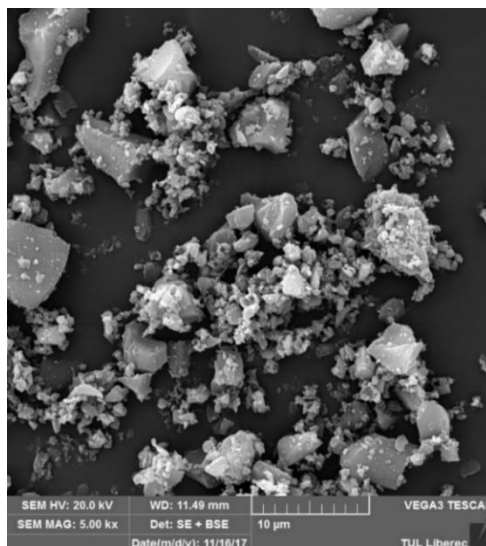
Obrázek 2.1.10 Uhlíková vlákna 2× mletá 5000× zvětšeno

3× mletá uhlíková vlákna

Třetí mlecí proces zapříčinil velice dobrou stejnoměrnost mletého materiálu v porovnání s předchozími mlecími procesy viz obrázky 2.1.11. a 2.1.12.



Obrázek 2.1.11 Uhlíková vlákna 3× mletá 1000× zvětšeno



Obrázek 2.1.12 Uhlíková vlákna 3× mletá 5000× zvětšeno

2.1.6 Vyhodnocení mlecího procesu



Obrázek 2.1.13 Přehled postupně mletého materiálu 1000× zvětšeno ¹

Po srovnání všech získaných snímků recyklovaných mletých uhlíkových vláken z elektronové mikroskopie je patrné, že při opakování procesu mletí jednoho hmotnostního vzorku materiálu došlo k postupnému zmenšování uhlíkových částic. Užití mlecího procesu v mlýnu je vzhledem k výslednému množství materiálu, a taktéž k časové náročnosti celého procesu vhodnější spíše k laboratorním účelům.

¹ Obrázek 2.1.13 ve zvětšeném formátu k nalezení v příloze práce

Zařazením mlecího procesu do průmyslové výroby by musely být aplikovány mlýny s možností vložení větší kapacity zpracovávaného materiálu.

Celý proces by pak mohl být obohacen o lepší možnost chlazení mlecích misek, například užitím chladícího média na bázi vody či oleje. „Dalším intenzifikátorem mlecího procesu by mohla být výměna korundových mlecích kuliček za mlecí kuličky vyrobené z jiného materiálu. Z podstaty korundu by však při použití jiných materiálů jako jeho náhrady, docházelo k rychlejšímu opotřebení mlecích kuliček, a tudíž k neekonomické bilanci. Srovnatelným materiálem ke korundu dle jeho tvrdosti je chrom“. [9]

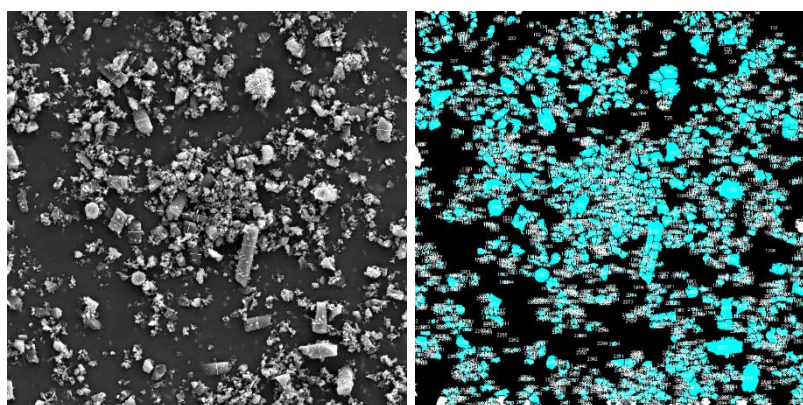
2.2 Analýza velikosti částic

Pro analýzu velikosti částic bylo využito softwarového programu Image J. Byly proměřeny všechny druhy vzorků od nemletých recyklovaných vláken až po 3× mletá vlákna. Naměřené hodnoty byly následně porovnány.

Veškeré naměřené hodnoty byly zpracovány a zaneseny do tabulek 2.2.1. a 2.2.2.

2.2.1 Práce s programem

Do rozhraní programu byl vložen obrázek, který byl nejdříve kalibrován. Na snímku došlo k detekci všech jednotlivých částic recyklovaných uhlíkových vláken. Dále došlo k proměření velikosti plochy pro jednotlivé částice a celkové porovnání těchto ploch vzhledem k celkové zobrazené ploše.



Obrázek 2.2.1 Práce s programem – detekce částic

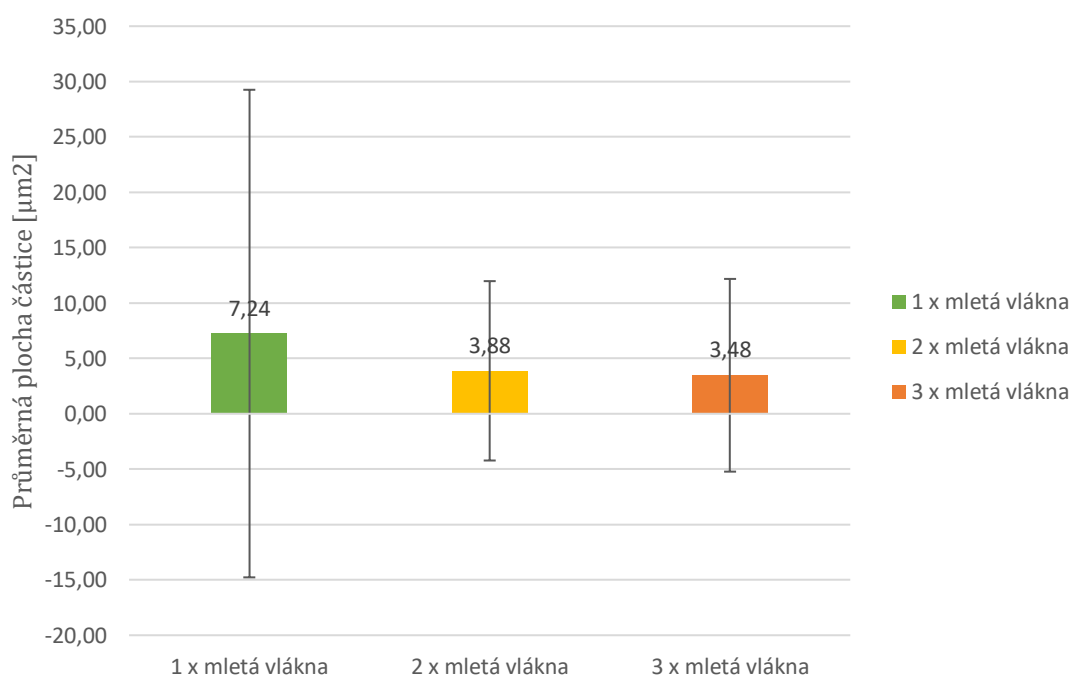
Dalším typem analytického měření bylo proměření šířky částic. Na mikroskopickém snímku bylo vybráno 100 náhodných míst s částicemi, které byly analyzovány. Měření šířky proběhlo ručně pomocí programové funkce „měření“.

2.2.2 Výsledky analýzy částic

Z naměřených hodnot v tabulce 2.2.1 lze pozorovat, že se zvyšujícím se počtem průchodů mlecím zařízením stoupá počet detekovaných částic. S tím úzce souvisí i průměrná plocha částic jejíž hodnoty taktéž postupně klesají. Interval spolehlivosti pak dokazuje různorodou velikost částic.

Tabulka 2.2.1 Průměrná velikost plochy částic

Název	Počet průchodů mlýnkem	Počet detekovaných částic na snímku	Průměrná plocha částice [μm^2]	Variační koeficient [%]	Interval spolehlivosti 95 % [μm^2]
Nemletá vlákna	0	XX	XX	XX	XX
1 x mletá vlákna	1	1645	7,24	6288,7	<-14,8 - 29,2>
2 x mletá vlákna	2	2710	3,88	5546,3	<-4,2 - 11,9>
3 x mletá vlákna	3	2958	3,48	6944,9	<-5,2 - 12,2>



Obrázek 2.2.2 Průměrná velikost částic

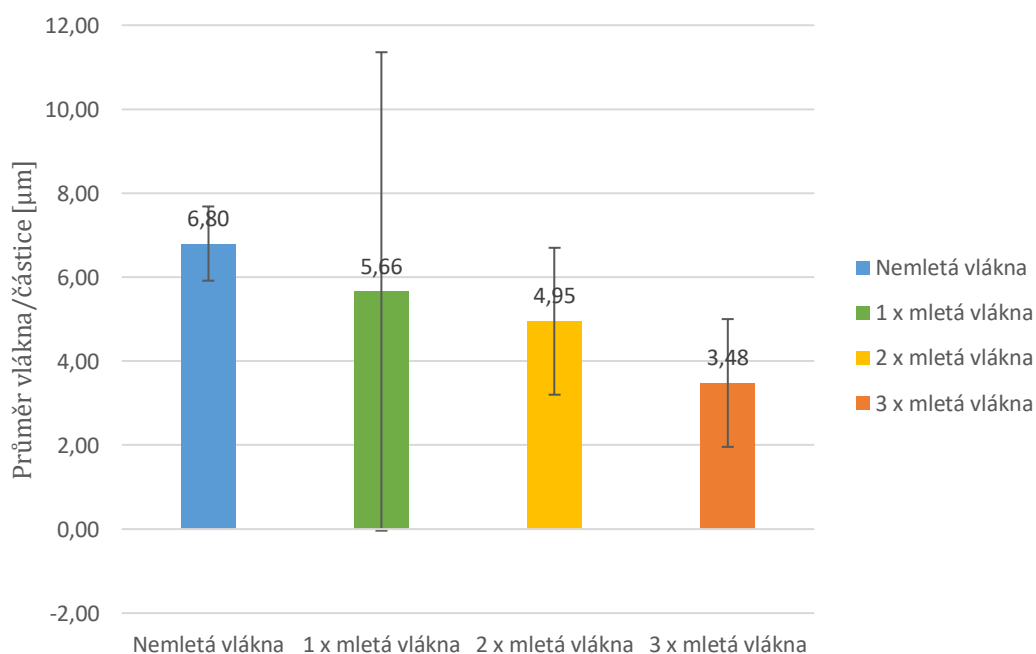
Po jednom průchodu mlecím zařízením byly detekovány částice dosahující malých rozměrů, ale také nerozemletá vlákna. 1× mleté částice tedy mají velkou různorodost částic, což je dáno krátkým časovým intervalem při mletí částic. To také potvrzuje velmi rozsáhlý interval spolehlivosti.

U 3× mletých vláken je však možno pozorovat mnohem větší stejnoměrnost částic, viz obrázek 2.2.2 Nemletá vlákna nebylo možno touto metodou ze snímků proměřit, jelikož na snímku není zachyceno ani jedno celé uhlíkové vlákno, ale vždy jen určité části vláken.

Tabulka 2.2.2 Analýza průměrné šířky vlákna/částice

Název	Počet průchodů mlýnkem	Průměrná šířka vlákna/částice [μm]	Variační koeficient [%]	Interval spolehlivosti 95 % [μm]
Nemletá vlákna	0	6,80	66,3	< 5,9 – 7,7 >
1 x mletá vlákna	1	5,66	513,5	< 0,0 – 11,4 >
2 x mletá vlákna	2	4,95	180,4	< 3,2 – 6,7 >
3 x mletá vlákna	3	3,48	176,2	< 1,9 – 5,0 >

Šířka částic koresponduje s naměřenými hodnotami v předešlém měření plochy. Průměrná šířka nemletých vláken činí 6,8 μm. Výrobce recyklovaných uhlíkových vláken Carbiso udává šířku vláken 7,5 μm. Od dat udaných technickým listem výrobce se naměřená hodnota liší o 0,7 μm. Tato odchylka může být dána především chybou při měření, respektive zanesením nepřesností lidským faktorem při proměřování šířek vláken.



Obrázek 2.2.3 Průměr částic

U 1× mletých vláken je detekována průměrná šířka částice 5,66 μm . Oproti předchozí hodnotě tedy došlo ke zmenšení částic vlivem procesu mletí. Všechny naměřené průměry částic vypovídají o zmenšení částic vždy cca o 1 μm .

Intervaly spolehlivosti opět vypovídají o variabilitě velikostí částic po jednotlivých procesech mletí.

2.2.3 Vyhodnocení analýzy částic

Z naměřených dat vyplývá, že se zvyšujícím se počtem mlecích procesů dochází ke zmenšování velikosti částic. Tento závěr byl dokázán na aplikaci tří měřících metod pro měření velikosti: metoda měření velikosti plochy částic, metoda měření průměru částic a metoda optická v kapitole 2.1.5.

U nemletých vláken pozorujeme malou variabilitu velikosti vláken, jelikož byly užity jako výchozí materiál a výrobce je dodává o stejné délce a šířce. U 1× mletých vláken je největší variabilita velikosti částic ze všech měřených vzorků. To je dáno krátkou délkou procesu mletí. Vlákna tak nebyla rozemleta dostatečně a ve vzorku se nacházela jak vlákna nerozemletá, tak i malé úlomky vláken. U 2× a 3× mletých vláken se částice postupně zmenšovaly a nejmenší variabilita částic byla právě u 3× mletých vláken, jelikož více násobné opakování mlecího procesu zmenšuje částice na rovnoměrnější velikost.

V rámci analýzy částic byla aplikována metoda frakcionace, při které byl namletý materiál frakcionován soustavou několika sít s postupně se snižujícími velikostmi síťových ok za účelem rozdělení mletého materiálu do několika tříd s odlišnou velikostí částic. Při tomto pokusu však docházelo ke shlukování částic. Částice vlivem mletí získaly ostré hrany a výběžky, které se při kontaktu s dalšími částicemi se do sebe vzájemně mechanicky zaklesávaly. Toto shlukování částic zamezilo prostupu uhlíkového mletého materiálu oky jednotlivých sít a většina shlukovaných částic tak zůstala již v prvním síťovém patře. Dle analýzy velikosti částic v kapitole 2.2. však mělo dojít i k propadu části materiálu do nižších pater frakcionátoru. Výsledky frakcionace tak nebyly do práce použity, jelikož měření bylo vlivem shlukování mletých uhlíkových částic velmi zkresleno a nemělo by patřičnou vypovídající hodnotu.

2.3 Výroba epoxidových vzorků

Připravená recyklovaná uhlíková vlákna, která prošla několika procesy mletí, byla užita jako plnivo při výrobě epoxidových vzorků, které následně prošly sérií různých mechanických měření. Pro výrobu epoxidových kompozitních vzorků s uhlíkovou výztuží byla užita výrobní metoda odlévání.

Výroba vzorků spočívá v postupném mísení přesně odvážených specifikovaných chemických látek dávkovaných za neustálého míchání. Poté dojde k odlití připravené směsi do předem připravené formy, ve které je vzorek nejdříve ponechán při pokojové teplotě po 24 hodin, a poté dojde k dodatečnému vytvrzení v horkovzdušné peci při teplotě 60 °C.

2.3.1 Užité chemické látky pro výrobu vzorků

Následující specifikace užitých chemických látek jsou vytvořeny na základě technických listů dodaných jednotlivými výrobci těchto látek.

Epoxidová pryskyřice

Epoxidová pryskyřice L 285 (MGS) je laminační pryskyřice vhodná pro výrobu výrobků s vláknennou výplní v podobě kevlarových, skleněných a uhlíkových vláken. Tato pryskyřice je nejvyužívanější v současném leteckém průmyslu a byla jí udělena certifikace německým federálním úřadem pro letectví.

Vyznačuje se vysokými statickými a dynamickými vlastnostmi a velmi dobré kompatibilitě s výztuží. Dle technického listu výrobce může epoxidová pryskyřice bez výztuže dosáhnou modulu pružnosti 3300 MPa a pevnosti v ohybu do 14 MPa.

Barva pryskyřice je transparentní a její zpracovatelnost je max. 5 hodin při teplotě 10 – 50 °C. Hustota pryskyřice činí 1,23 g/cm³ při 25 °C. [50]

Epoxidová pryskyřice byla zvolena pro předpoklad dobrých konstrukčních mechanických vlastností a houževnatosti matrice. Uhlíková výztuž byla zvolena pro svou pevnost, tuhost a únavovou odolnost, tedy všechny vlastnosti důležité v leteckém průmyslu a konstrukci letadel.

V rámci laboratorního experimentu byla pokusně použita i BIO epoxidová pryskyřice jako matrice. Její testované mechanické vlastnosti však nebyly

srovnatelné se vzorky z reaktoplastická pryskyřice. Totožných vlastností bylo dosaženo až se zvýšeným množstvím výztuže, proto nebylo testování s touto maticí zařazeno do experimentu této práce.

Tužidlo

Tužidlo H 508 je tvrdidlo pro epoxidové pryskyřice, které iniciuje chemickou reakci mezi epoxidovou pryskyřicí a tužidlem. Doba zpracovatelnosti epoxidové pryskyřice po přidání tužidla by neměla překročit 20 minut, jinak se celý laminační systém stává obtížně zpracovatelným. [50]

Laminační systém

Laminační systém vzniklý smísením tužidla epoxidové pryskyřice v poměru 40:100 g ($\pm 0,2$ g) daný výrobcem má v době zpracovatelnosti 20 minut a při pokojové teplotě viskozitu vhodnou pro rychlé a téměř dokonalé prosycení přidané vlákně výztuže. [50]

2.3.2 Příprava formy pro epoxidové vzorky

Formu pro odlití vzorku představuje skleněná Petriho miska o vnitřním průměru 15 cm.

Forma musí být před odlitím vzorku vyčištěna, aby nedošlo ke kontaminaci vzorku cizí látkou a nedošlo tak k ovlivnění konzistence vzorku. Forma byla taktéž vyseparována separačním roztokem Frekote, aby nedošlo k vytvoření pevného spoje mezi miskou a laminačním systémem pryskyřice a výsledný vzorek šlo jednoduše vyjmout. Aplikace separačního roztoku do formy proběhla celkem třikrát za sebou po desetiminutových intervalech. Délka časového intervalu byla dostatečná pro tvorbu tenké zaschlé laminační vrstvy separátoru ve formě.

Jako separátor byl užit chemický separátor Frekote 770NC běžně užívaný pro odlučování většiny epoxidových pryskyřic. [51]

2.3.3 Postup výroby epoxidových vzorků

Prvním krokem bylo navážení 28 g ($\pm 0,2$ g) epoxidové pryskyřice do kádinky. Do druhé kádinky bylo naváženo na laboratorních vahách 8 g ($\pm 0,2$ g) tužidla. Do této kádinky vložen magnet, je položena na elektromagnetické míchadlo, které je zapnuto. Do kádinky s tužidlem je přidána epoxidová pryskyřice a vzniklá směs je míchána po dobu 3 minut.

Po uplynutí doby míchání je magnet vyjmut z kádinky a pryskyřice odlita do připravené formy. Odlití musí proběhnout do 20 minut (gel time) od smísení obou komponent, jinak dojde k chemické reakci zesíťováním polymerů pryskyřice a tužidla, a směs začne tuhnout a nelze s ní nadále pracovat. Samotná forma musí být uložena na vyvážené laboratorní desce, kde bude směs tvrdnout po dobu 24 hodin v laboratorních podmínkách a při pokojové teplotě. Po uplynutí 24 hodin došlo k dodatečnému vytvrzení v horkovzdušné peci po dobu 15 hodin při 60 °C.

Takto připravený vzorek o průměru 15 cm a tloušťce 3 mm ($\pm 0,5$ mm) je následně vyjmut z formy.

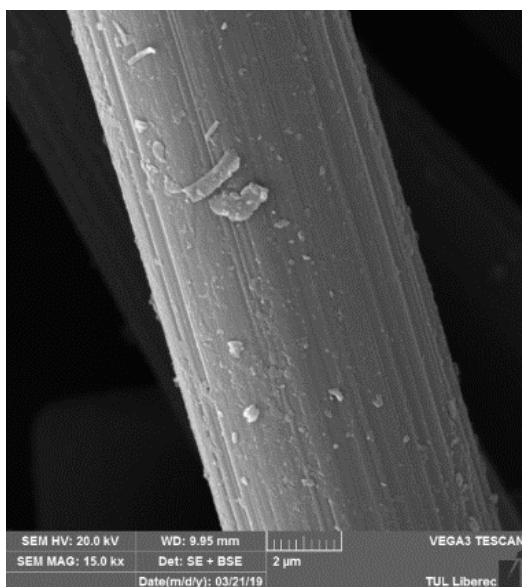
Příprava vzorků s plnivem z mletých recyklovaných uhlíkových vláken je obdobná. Bylo připraveno několik sérií vzorků o různých koncentracích uhlíkového plniva, které prošly postupně několika procesy mletí viz příloha A. Stanovené množství uhlíkového plniva je vmícháno na magnetickém míchadle do odváženého množství tužidla. Po dostatečném prosycení plniva tužidlem (z pravidla do 2 minut) je přidána pryskyřice a směs je míchána po dobu 3 minut. Poté dojde opět k odlití stejným způsobem jako již bylo popsáno výše. Takto byly připraveny vzorky s koncentrací 0; 1; 2; 3; 4 a 5 hm.%. Nebyly připravovány koncentrace převyšující 5 hm.% obsahu uhlíkových částic z důvodu skokového zvyšování viskozity po překročení 4 hm.% plniva. Připraven byl i vzorek epoxidové pryskyřice bez příměsí.

Výsledkem jsou vzorky černé barvy s lesklým povrchem a ostrými hranami, jejichž průsvitnost se snižuje se zvyšujícím se hm.% uhlíkové výztuže.

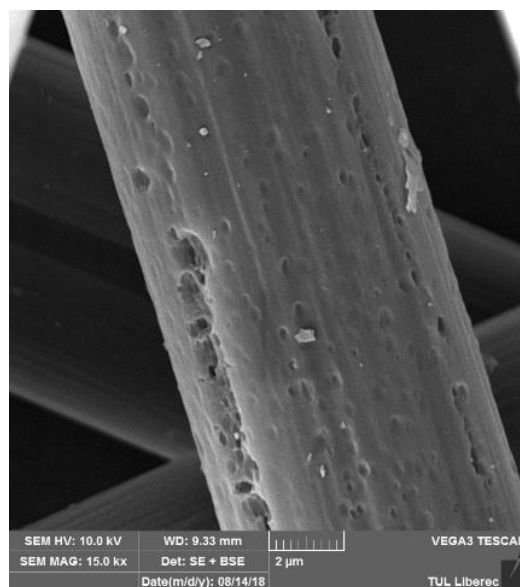
Při přípravě vzorků je důležité nepřekračovat dobu míchání a výroba vzorků by měla probíhat do teploty 25 °C. Po smísení všech komponent dojde při následné chemické reakci k uvolňování energie ve formě tepla. Pokud dojde k prodloužení

doby míchání dojde ke zvýšení celkové teploty vlivem vzájemného tření částic systému. Po odlití pak může dojít i k varu, což vede ke znehodnocení celého vzorku. Zvýšení teploty systému taktéž probíhá i při teplotách okolí vyšších než 25 °C, nebo pokud na odložené vzorky při době tvrdnutí dopadá přímé sluneční záření. Teplotu lze naopak snižovat vložením formy s odlitým vzorkem do Petriho misky s větším průměrem, která je zalita studenou vodou, tak aby nedošlo k přelití vody do vzorku. Kapalina chladicího systému však musí být po určitém čase vyměněna, jelikož dochází k jejímu postupnému ohřívání.

Pro lepší distribuci vlákenné výztuže v kompozitu byl aplikován laboratorní pokus míchání vlákenné výztuže ultrazvukem. Vlákenná výztuž byla nejdříve rozmíchána v tužidle. Poté byla přidána epoxidová pryskyřice a míchání této směsi probíhalo v ultrazvukové lázni. Míchání ultrazvukem však způsobilo velký pohyb částic ve směsi čímž, došlo k výraznému zvýšení teploty ve směsi. Po odlití do připravené formy došlo vlivem vysoké teploty k varu odlité směsi a k znehodnocení kompozitního vzorku. Vzorek se začal vařit i v případě, že byla forma chlazená vodou. Z tohoto důvodu bylo od přípravy směsi touto formou upuštěno.



Obrázek 2.3.1 Uhlíkové vlákno plazmaticky neošetřeno



Obrázek 2.3.2 Uhlíkové vlákno ošetřené plazmou

V rámci projektu [1] byla snaha o zlepšení adheze mezi vlákennou výztuží a matricí. Vlákenná výztuž byla před její aplikací do kompozitu vystavena působení plazmy v argonové atmosféře. Vlivem tohoto působení došlo k narušení povrchu uhlíkového vlákna. Předpokladem pro tuto operaci byla lepší adheze

matrice/vlákno vlivem prosycení vzniklých mikroskopických dutin na povrchu vlákna matricí, čímž by došlo k dosažení větší kontaktní plochy mezi vláknem a matricí. Na snímcích 2.3.1 a 2.3.2. lze pozorovat vliv plazmatické úpravy.

Plazmaticky upravená vlákna byla aplikována do testovacího vzorku, který byl podroben mechanickému testu Charpyho metodou. Naměřené hodnoty rázové houževnatosti u vzorků s plazmatickou úpravou však byly nižší než u vlákně výtzuže bez plazmatické úpravy. Vlákněná výtzuž s plazmatickou úpravou tedy nebyla dále předmětem diplomové práce.

2.4 Testování Mechanických vlastností

Připravené kompozitní materiály s uhlíkovým plnivem byly testovány několika normovanými způsoby a výsledky byly následně analyzovány a vyhodnoceny.

Tato diplomová práce zahrnuje normované zkoušky materiálu:

- 1) Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy ČSN EN ISO 179-1.
- 2) Stanovení ohybových vlastností metodou tříbodového ohybu ČSN EN ISO 14125.
- 3) Měření mechanických vlastností na dynamickém termomechanickém analyzátoru ČSN EN ISO 472 (640001).

Tabulka 2.4.1 Přehled všech testovaných vzorků

Číslo vzorku	Procento uhlíkových vláken [hm.%]	Číslo vzorku	Procento uhlíkových vláken [hm.%]
Epoxy	0	2x 1	1
0x 1	1	2x 2	2
0x 2	2	2x 3	3
0x 3	3	2x 4	4
0x 4	4	2x 5	5
0x 5	5	3x 1	1
1x 1	1	3x 2	2
1x 2	2	3x 3	3
1x 3	3	3x 4	4
1x 4	4	3x 5	5
1x 5	5		

2.5 Zkouška rázové houževnatosti Charpyho metodou

Nejdříve byly epoxidové vzorky rozřezány na kotoučové pile na normované testovací vzorky s šířkou 10 mm a délkou 100 mm. Vzorek byl vždy před vložením do stroje změřen posuvným měřidlem a hodnoty byly zaneseny do tabulky viz příloha. B – E.

Přesnost jednotlivých rozměrů u těchto vzorků byla ovlivněna rozkmitem kotouče, a to i přes relativně přesné nastavení potřebných měřidel.

Takto připravený vzorek byl uložen na dvě podpory větší plochou vzorku směrem dolů, tak jak je znázorněno na schématu 1.5.12 v kapitole 1.5.7., a poté byl přeražen kyvadlovým kladivem na užší straně tělesa tedy „edgewise“.

Měření probíhalo na laboratorním zařízení firmy LaborTech – LabTest CHK 50J při teplotním rozsahu 20 – 30 °C, s přesností měření ($\pm 0,05$ J) a vlhkostí vzduchu v rozsahu 45 – 55 %. Všechny tyto parametry měření byly voleny dle normy a technického listu stroje. [52]

Aby došlo k zaručení naměření co nejlépe vypovídajících hodnot, byly vzorky po rozřezání na normou stanovené rozměry, vybírány náhodně. Tímto způsobem bylo provedeno vždy pět měření vzorků s totožnou koncentrací uhlíkového plniva a postup byl takto aplikován na všechny vzorky.

Jednotlivé výsledky zkoušky rázové houževnatosti jsou uvedeny v přílohách B – E.

2.5.1 Výsledky rázové zkoušky

Nemletá uhlíková vlákna

Následující tabulka 2.5.1. zobrazuje naměřené výsledky rázovou zkouškou u vzorků obsahujících plnivo z nemletých uhlíkových vláken Carbiso. V tabulce jsou taktéž zaneseny hodnoty referenčního vzorku z čisté epoxidové pryskyřice bez plniva.

Z naměřených hodnot vyplývá, že testovaný vzorek s 4 hm.% příměsí uhlíkového plniva dosáhl nejvyšší houževnatosti. Podobné houževnatosti dosáhl i vzorek s 3 % příměsí. Naopak nejnižší hodnoty byly naměřeny u referenčního vzorku bez příměsí.

Tabulka 2.5.1 Vypočtené hodnoty rázové houževnatosti kompozitu s nemletými uhlíkovými vlákny

Číslo vzorku	Procento obsažených uhlíkových vláken [hm. %]	Průměrná rázová houževnatost A [J/m ²]	Variační koeficient [%]	Interval spolehlivosti 95 % rázové houževnatosti [J/m ²]
Epoxy	0	37,4	11,7	<32,0 - 42,8>
0x 1	1	44,9	38,4	<23,5 - 66,3>
0x 2	2	40,2	25,7	<27,4 - 53,0>
0x 3	3	55,0	31,2	<33,7 - 66,3>
0x 4	4	57,0	28,5	<36,8 - 77,2>
0x 5	5	49,0	9,9	<43,0 - 55,1>

1× mletá uhlíková vlákna

V tabulce 2.5.2. jsou zaneseny hodnoty naměřené u vzorků s výztuží o koncentraci 1 – 5 hm.% recyklovaných uhlíkových vláken které prošly jedním procesem mletí.

Tabulka 2.5.2 Vypočtené hodnoty rázové houževnatosti kompozitu s 1× mletými uhlíkovými vlákny

Číslo vzorku	Procento obsažených uhlíkových vláken [hm. %]	Průměrná rázová houževnatost A [J/m ²]	Variační koeficient [%]	Interval spolehlivosti 95 % rázové houževnatosti [J/m ²]
1x 1	1	38,7	42,6	<18,3 - 59,9>
1x 2	2	18,4	27,5	<12,1 - 24,7>
1x 3	3	32,5	77,6	<1,2 - 63,8>
1x 4	4	36,7	30,0	<23,0 - 50,3>
1x 5	5	28,8	62,8	<6,3 - 51,2>

Všechny naměřené hodnoty jsou v porovnání s referenčním vzorkem nižší. Výjimkou je pouze vzorek s 1 hm.% plniva s hodnotou 38,7 J/m².

2× mletá uhlíková vlákna

O testování vzorků s plnivem, které prošlo procesem mletí 2×, vypovídá tabulka 2.5.3., z níž vyplývá, že naměřené hodnoty rázové houževnatosti dosahují podobných velikostí jako u vzorků s nemletými vlákny.

Tabulka 2.5.3 Vypočtené hodnoty rázové houževnatosti kompozitu s 2× mletými uhlíkovými vlákny

Číslo vzorku	Procento obsažených uhlíkových vláken [hm.%]	Průměrná rázová houževnatost A [J/m ²]	Variační koeficient [%]	Interval spolehlivosti 95 % rázové houževnatosti [J/m ²]
2x 1	1	48,0	43,3	<22,2 - 73,9>
2x 2	2	45,9	42,3	<21,8 - 70,0>
2x 3	3	58,0	12,5	<49,0 - 67,0>
2x 4	4	18,6	73,7	<1,6 - 35,7>
2x 5	5	31,9	71,5	<3,6 - 60,3>

3× mletá uhlíková vlákna

U vzorků s 3× mletým plnivem byla zaznamenána nejvyšší naměřená hodnota 59,3 J/m², a to u vzorku s obsahem 1 hm.% plniva.

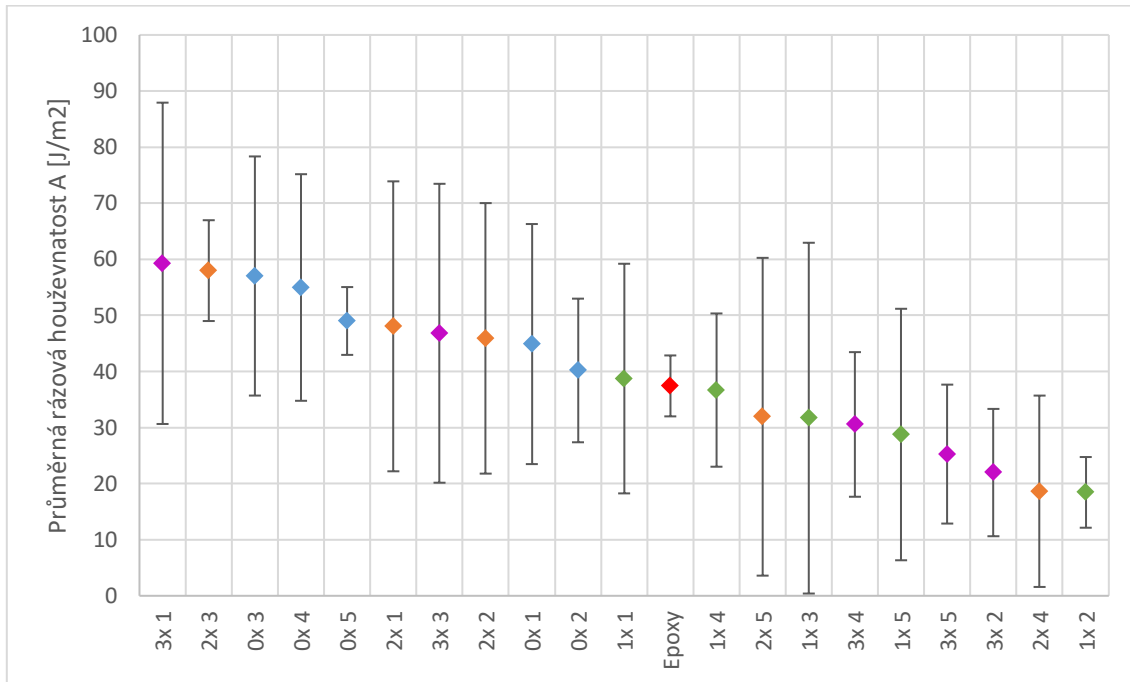
Tabulka 2.5.4 Vypočtené hodnoty rázové houževnatosti kompozitu s 3× mletými uhlíkovými vlákny

Číslo vzorku	Procento obsažených uhlíkových vláken [hm.%]	Průměrná rázová houževnatost A [J/m ²]	Variační koeficient [%]	Interval spolehlivosti 95 % rázové houževnatosti [J/m ²]
3x 1	1	59,3	38,9	<30,6 - 87,9>
3x 2	2	22,0	41,6	<10,6 - 33,3>
3x 3	3	46,8	45,9	<20,2 - 73,5>
3x 4	4	30,6	33,9	<17,7 - 43,5>
3x 5	5	25,3	39,5	<12,9 - 37,7>

2.5.2 Vyhodnocení rázové zkoušky

V grafu na obrázku 2.5.1. lze pozorovat hodnoty dosažené rázové houževnatosti u všech testovaných vzorků. Vzorky jsou seřazené sestupně zleva od nejvyšší dosažené hodnoty po hodnotu nejnižší. Červenou barvou je reprezentován referenční vzorek z epoxidové pryskyřice bez obsahu plniva z mletých recyklovaných uhlíkových vláken.

Modrou barvou jsou označeny vzorky s nemletými vlákny Carbiso. Zeleně jsou označeny vzorky s plnivem, které prošlo jedním procesem mletí. Vzorky s mletými vlákny jsou dále reprezentovány oranžovou a fialovou barvou.



Obrázek 2.5.1 Grafické vyhodnocení výsledků všech vzorků rázové zkoušky

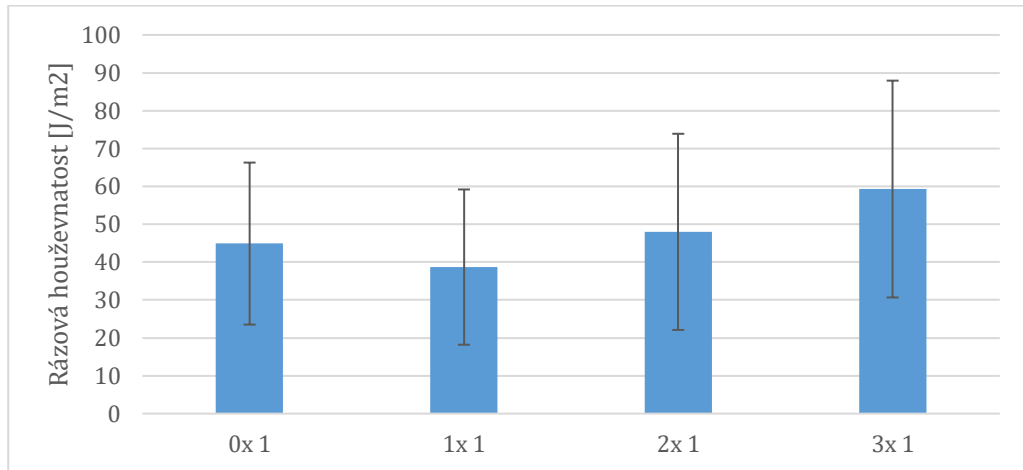
Nejvyšší hodnoty dosáhl vzorek s 3× mletými uhlíkovými vlákny o koncentraci 1 hm.%. Nepatrně nižších hodnot dosáhl vzorek s 2× mletým plnivem o koncentraci 3 hm.% a vzorek s nemletým plnivem se stejnou koncentrací jako vzorek předchozí.

Všechny vzorky obsahující výchozí plnivo Carbiso dosáhly vyšších hodnot rázové houževnatosti než referenční vzorek z epoxidové pryskyřice.

Vzorky s 1× mletým plnivem dosáhly naopak nižších hodnot než referenční vzorek. Výjimku tvoří pouze vzorek s koncentrací 1 hm.%, který však dosáhl hodnoty vyšší pouze o 1,3 J/m².

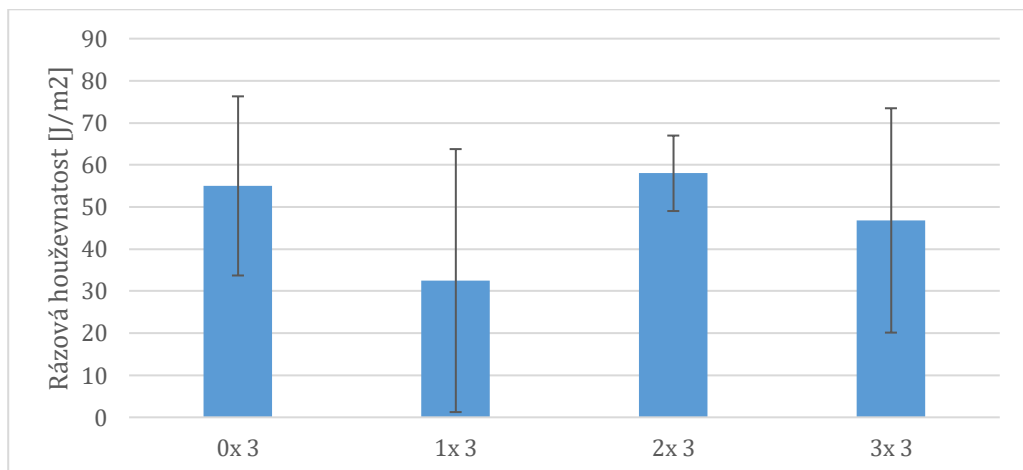
Vzorky s 2× a 3× mletými uhlíkovými vlákny jsou pak v grafu rozmístěny do pozic s vyššími i nižšími hodnotami rázové houževnatosti oproti referenčnímu vzorku. Tento referenční vzorek dosáhl totožných hodnot jako byly hodnoty naměřené výrobcem epoxidové pryskyřice.

Obrázek 2.5.2. analyzuje naměřené hodnoty rázové houževnatosti u všech vzorků s koncentrací plniva 1 hm.%. Z grafu je patrné, že rázová houževnatost testovaných vzorků se postupně zvyšovala se zvyšujícím se počtem průchodů plniva mlecím procesem. Výjimku tvoří pouze vzorek s 1× mletým uhlíkovým plnivem. U tohoto vzorku došlo k poklesu naměřených hodnot vlivem neregulárnosti velikosti částic plniva.

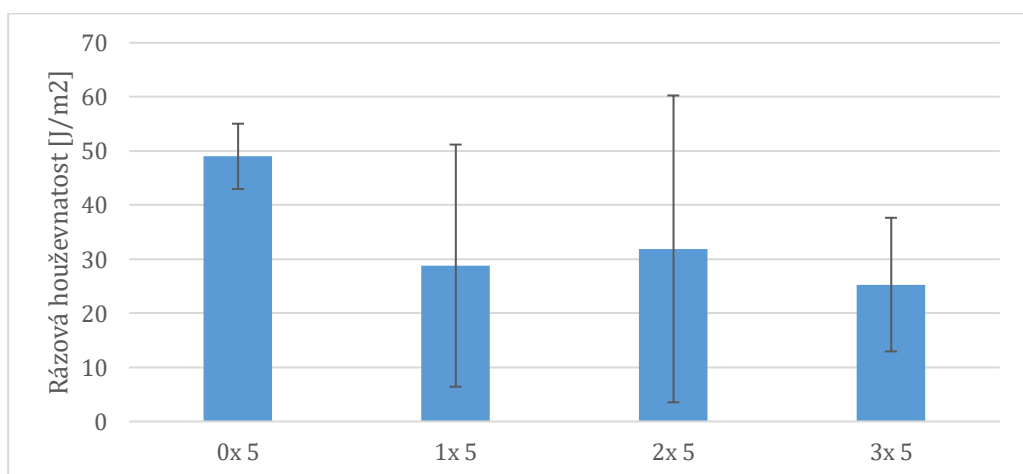


Obrázek 2.5.2 Grafické vyhodnocení výsledků rázové zkoušky pro vzorky s koncentrací 1 hm.% plniva

U vzorků s koncentrací 3 hm.% plniva dochází k nepatrnému nárůstu rázové houževnatosti pouze u vzorku s 2× mletým uhlíkovým plnivem.



Obrázek 2.5.3 Grafické vyhodnocení výsledků rázové zkoušky pro vzorky s koncentrací 3 hm.% plniva



Obrázek 2.5.4 Grafické vyhodnocení výsledků rázové zkoušky pro vzorky s koncentrací 5 hm.% plniva

U vzorků s koncentrací uhlíkového plniva 5 hm.% dochází k výraznému poklesu rázové houževnatosti u všech vzorků oproti vzorku s nemletými uhlíkovými vlákny.

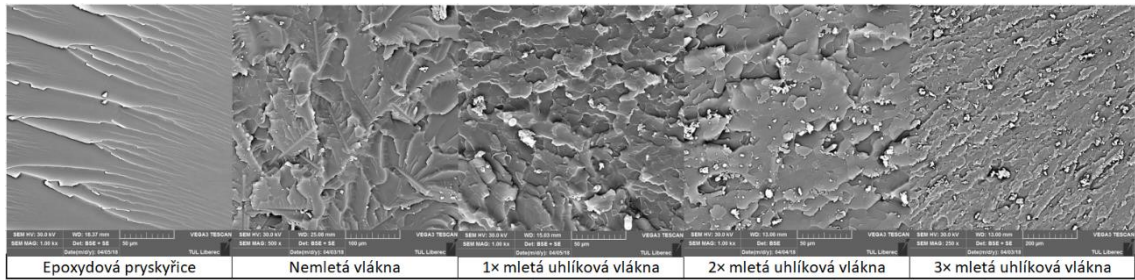
Naměřené výsledky rázové houževnatosti dokazují, že opakovaný proces mletí jednoznačně zvyšuje křehkost materiálu a je závislý na koncentraci plniva. Dále výsledky dokazují vliv geometrie částic plniva na výsledné mechanické vlastnosti kompozitu. Referenční vzorek neobsahuje žádné částice plniva, a proto je jeho geometrie stejnoměrná. U vzorků s nemletými uhlíkovými vlákny je geometrie taktéž stejnoměrná, jelikož tato vlákna mají vždy totožný průměr a jejich délku. Po prvním procesu mletí došlo ke znehodnocení stejnoměrnosti, jelikož plnivo obsahovalo různorodé částice plniva a ve výztuži tak vznikala slabá místa. U vzorků s 2× mletými vlákny došlo k vylepšení stejnoměrnosti částic. Stále jsou však v plnivu k nalezení větší částice vláken. K dobré stejnoměrnosti plniva došlo u 3× mleté výztuže. Částice zde dosahují podobné velikosti a ve správné koncentraci s epoxidovou pryskyřicí tak může celý tento systém tvořit dobrou soudržnost a lépe přenášet vyvinuté zatížení na vzorek.

Při samotném měření mohlo dojít k ovlivnění vlivem náhodné orientace vláken v kompozitu v místě přeražení vzorku kladivem. Hodnoty mohly být ovlivněny již při přípravě vzorku vlivem uvolňování sil mezi částicemi a matricí či shlukováním částic při prosycování plniva při výrobě. Vlivem odlévání do formy také mohlo dojít k tvorbě mikroskopických vzduchových bublin, které mohly výrazně ovlivnit výši naměřených hodnot rázové houževnatosti.

Z grafů na obrázcích 2.5.1. až 2.5.4. lze vyčíst, že proces mletí recyklovaných uhlíkových vláken má patrný vliv na mechanické vlastnosti výsledného kompozitu.

2.5.3 Mikroskopická analýza lomů po rázové zkoušce

Po provedení rázové zkoušky byly provedeny snímky vniklých lomů materiálu pro jednotlivé skupiny vzorků. Analyzován byl referenční vzorek a vzorky s plnivem vždy o koncentraci 3 hm.%. Analýza proběhla za účelem zobrazení kompozitu zevnitř a taktéž jako zobrazení způsobu tvorby trhlin v materiálu.



Obrázek 2.5.5 Přehled lomů materiálu pro všechny testované vzorky ²

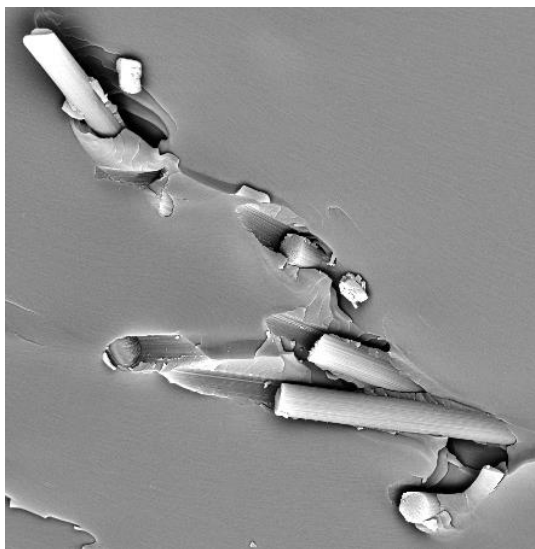
U epoxidové pryskyřice bez příměsi lze pozorovat tvorbu trhlin ve směru rázu kladiva. Nejdříve došlo k tvorbě velkých trhlin v materiálu, které se postupně větvyly a zmenšovaly. Tvorba velkých trhlin byla způsobena absorpcí počáteční síly kladiva materiálem. Při postupu kladiva materiálem docházelo ke zmenšování působení síly, a proto se nadále tvořily menší trhliny. Větvení trhlin je způsobenou změnou směru rázu kladivem, jelikož dráha kladiva kopíruje kružnici. Změna směru je na malém vzorku v řádu desetin stupňů, ale i tuto změnu lze na snímku pozorovat.

U kompozitu s výztuží z nemletých uhlíkových vláken nedošlo k vytvoření téměř jednosměrně orientovaných trhlin, jako v případě předchozího vzorku. Trhliny byly orientovány do všech směrů, a to právě díky výztuži. Po nárazu kladiva na materiál vznikla trhlina, která se šířila materiálem do té doby, než narazila na místa s uhlíkovými vlákny, kde došlo k větvení této trhliny. Ze snímku tak lze pozorovat vznik mikroskopických ostrovů oddělených trhlínami, které vznikly obklopením výztuže z uhlíkových vláken. Na snímku je možno dobře pozorovat i distribuci výztuže napříč materiálovým spektrem.

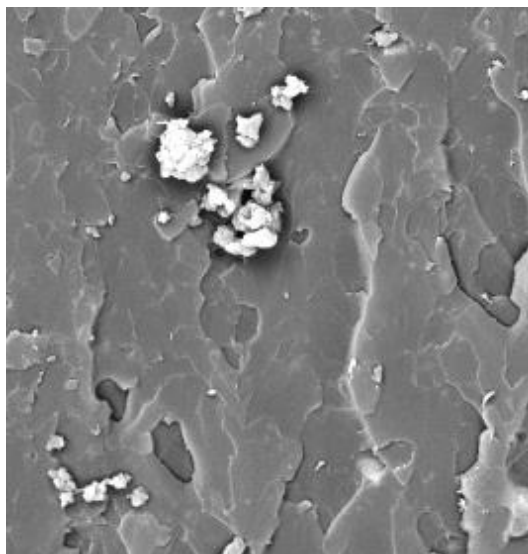
U kompozitu s 1× lze taktéž pozorovat tvorbu ostrovů. Ostrovy jsou však oproti nemleté výztuži menších rozměrů. Stejně tak je tomu u 2× mleté výztuže.

U výztuže, která prošla procesem mletí 3× lze pozorovat podobnost v tvorbě trhlin jako u referenčního vzorku. Trhliny jdou u tohoto vzorku taktéž téměř jedním směrem. Samozřejmě zde dochází k tvorbě mikroskopických ostrůvků, které jsou však v porovnání s ostatními ostrůvků mnohem menší.

² Obrázek 2.5.5. ve větším formátu k nalezení v příloze práce



Obrázek 2.5.6 Detail nemletá vlákna v kompozitu



Obrázek 2.5.7 Detail 3× mletá vlákna v kompozitu

Na detailních snímcích 2.5.6. s 2.5.7. lze pozorovat výztuž napříč spektrem materiálu.

Nemletá vlákna jsou rozložena v materiálu relativně rovnoměrně a nedochází k jejich shlukování a porušení při vyvinutí dostatečné síly, která způsobí nevratnou deformaci materiálu. To vypovídá o faktu, že slabým místem při porušení je epoxidová pryskyřice, jejíž trhliny byly usměrňovány částičky plniva ve směru rázu. Naopak u 3× mletých vláken dochází ke shlukování těchto částiček při míchání všech komponent před odlitím do formy. Mleté částičky mají ostré hrany a výstupky, které se do sebe při vzájemném kontaktu zaklesnou, což napomáhá shlukování. Malé částičky materiálu tak nejsou rozmístěny rovnoměrněji v materiálu, ale dochází k tvorbě větších částic složených z množství malých částic. Pokud by se podařilo zajistit zabránění shlukování těchto částic, rozložení deformační síly by bylo lepší a došlo by tak zřejmě k naměření vyšších hodnot rázové houževnatosti testovaného materiálu.

2.6 Zkouška ohybových vlastností

Tato zkouška byla zařazena do série testovacích procesů, protože na základě znalostí o kompozitních materiálech s vláknennou výztuží se lze domnívat, že testované vzorky mají malou tažnost. Při tahu by aplikovaná tahová síla působila především na matici materiálu a výztuž z recyklovaných mletých uhlíkových vláken by odolnosti proti tahu výrazně nepomohla. Zvláště pak u vícekrát mleté výztuže by hodnoty nabývaly velice nízkých hodnot a testována by byla spíše matrice dodaná výrobcem. Výhodou je možnost dosažení velkých ohybových momentů i při malé zatěžující síle. [40]

Z naměřených výsledků bylo vypočítáno dle vzorců (5) a (6) ohybové napětí σ_f [MPa] a modul pružnosti E_f [MPa], které byly porovnávány.

Těleso je do stroje volně vloženo na dvě podpory tvaru válce o průměru 9,9 mm a délky 30 mm. Aplikováno bylo vždy 5 měření pro sérii vzorků s rozdílnou koncentrací mletých recyklovaných uhlíkových vláken. Nejdříve došlo k přeměření vzorku posuvným měřidlem s přesností ($\pm 0,02$ mm), a tyto rozměry byly zaneseny do tabulek měření.

Pohyb příčnicku stroje, který aplikoval deformaci na testovaný vzorek byl nastaven na maximální posuv o 1,5 mm, tak aby nedošlo vlivem zkoušky k destrukci vzorku a nedošlo k ovlivnění zkoušky zvyšující se teplotou při namáhání.

Zkouška tříbodovým ohybem bylo provedeno na zkušebním stroji Tiratest 2300. Dále byl proveden výpočet pro určení obecných mechanických vlastností. Jednalo se o teoretický kontrolní výpočet modulu pružnosti pro kompozity vyztužené krátkými vlákny. Tento výpočet byl aplikován pro zjištění hodnoty E_f [MPa] pro sérii vzorků s nemletými recyklovanými uhlíkovými vlákny, kde jsou výrobcem dány parametry potřebné k výpočtu. Jelikož je tento vzorec vztažen k vláknenné výztuži určité délky, nebyl aplikován na vlákna, která prošla procesem mletí, jelikož plnivo zde není geometricky uniformní, viz analýza velikosti částic v kapitole 2.2. Pro tento výpočet byla použita série vzorců (7–10).

Tvarový součinitel je definován jako poměr průměru vlákna D [mm] výztuže a jeho délky L [mm].

$$\alpha = \frac{L}{D} \quad (7)$$

Z něj pak lze vypočítat parametr příslušnosti F_p násobením číslem 2, aby mohl být použit do vzorce (8) pro výpočet faktoru využití vláken K , kde E_v [MPa] je modul pružnosti vláken, E_m [MPa] je modul pružnosti matrice a F_p je parametr příslušnosti.

$$K = \frac{\frac{E_v}{E_m} - 1}{\frac{E_v}{E_m} + F_p} \quad (8)$$

Tento faktor je pak užit v následujícím vzorci pro výpočet modulu pružnosti kompozitu s nemletými uhlíkovými vlákny E_f [MPa], kde kromě již známých parametrů vystupuje objemový podíl částic výztuže V_f [m³] získaný vzorcem (10)

$$E_f = K \cdot E_v \cdot v_f + E_m \cdot (1 - v_f) \quad (9)$$

$$v_f = \frac{m}{\rho} \quad (10)$$

Kde m [g] je hmotnost vlákenné výztuže a ρ [kg/m³] je hustota výztuže.

Veškeré potřebné číselné parametry stanoveny výrobcem nemletých recyklovaných uhlíkových vláken Carbiso a výrobcem užití epoxidové pryskyřice jsou uvedeny v práci v kapitole 2.1.1. a 2.3.1.

Po aplikaci vzorců (7–10) na vzorek s 1 hm.% nemletých uhlíkových vláken dostáváme hodnotu teoretického modulu pružnosti E_f 3300,021 MPa. U vzorku s obsahem 5 hm.% nemletých vláken byl modul pružnosti E_f 3300,104 MPa. Hodnoty se od sebe liší o 0,083 MPa. Teoretický výpočet ukazuje nepatrné navýšení modulu pružnosti při zvyšování hm.% výztuže v kompozitu. Navýšení hodnot je však nepatrné a převážně odpovídá uvedenému modulu pružnosti matrice. Dle tohoto výpočtu by tak výztuž neměla v kompozitu velký přínos a působící vnější napětí by bylo přenášeno převážně pomocí matrice. V teoretickém výpočtu se však nikde nepočítá se silou fyzikálních a chemických vazeb, adhezí a dalšími parametry uvedenými v kapitole o kompozitech. Proto jsou pak při ohybové zkoušce naměřené hodnoty modulu pružnosti vyšší než u teoretického výpočtu.

2.6.1 Výsledky ohybové zkoušky

Nemletá uhlíková vlákna

Následující tabulky zobrazují naměřené hodnoty ohybového napětí a modulu pružnosti získané zkouškou ohybem u vzorků obsahujících plnivo z nemletých uhlíkových vláken Carbiso. V tabulce jsou taktéž zaneseny hodnoty referenčního vzorku z čisté epoxidové pryskyřice bez plniva.

Tabulka 2.6.1 Hodnoty ohybového napětí kompozitu s nemletými uhlíkovými vlákny

Číslo vzorku	Procento obsažených uhlíkových vláken [hm.%]	Průměrné ohybové napětí σ_f [MPa]	Variační koeficient ohybového napětí [%]	Interval spolehlivosti 95 % ohybového napětí [MPa]
Epoxy	0	13,3	5,9	<12,4 - 14,3>
0x 1	1	10,0	33,1	<5,9 - 14,2>
0x 2	2	11,7	38,2	<6,1 - 17,1>
0x 3	3	15,1	8,9	<13,5 - 16,8>
0x 4	4	12,8	14,2	<10,5 - 15,0>
0x 5	5	15,4	7,5	<14,0 - 16,8>

Tabulka 2.6.2 Hodnoty modulu pružnosti kompozitu s nemletými uhlíkovými vlákny

Číslo vzorku	Procento obsažených uhlíkových vláken [hm.%]	Průměrný modul pružnosti E_f [MPa]	Variační koeficient modulu pružnosti [%]	Interval spolehlivosti 95 % modulu pružnosti [MPa]
Epoxy	0	3431,7	3,6	<3276,9 - 3586,5>
0x 1	1	2812,3	41,2	<1373,1 - 4251,5>
0x 2	2	2762,5	38,5	<1441,4 - 4083,6>
0x 3	3	3916,9	2,2	<3810,3 - 4023,5>
0x 4	4	3651,2	5,5	<3402,0 - 3900,7>
0x 5	5	3843,8	2,5	<3723,9 - 3963,8>

Z tabulky 2.6.1. vyplývá, že nejvyšší ohybové napětí bylo naměřeno u vzorků s příměsí 5 a 3 hm.% plniva. Tomu odpovídají i hodnoty modulu pružnosti v tabulce 2.6.2. Naopak nejnižší hodnoty byly zaznamenány u vzorku s obsahem 2 hm.% výztuže.

1× mletá uhlíková vlákna

Tabulka 2.6.3 Hodnoty ohybového napětí kompozitu s 1× mletými uhlíkovými vlákny

Číslo vzorku	Procento obsažených uhlíkových vláken [hm. %]	Průměrné ohybové napětí σ_f [MPa]	Variační koeficient ohybového napětí [%]	Interval spolehlivosti 95 % ohybového napětí [MPa]
1x 1	1	12,5	8,8	<11,1 - 13,9>
1x 2	2	12,5	18,2	<9,6 - 15,3>
1x 3	3	11,1	25,8	<7,5 - 14,6>
1x 4	4	14,5	8,4	<13,0 - 16,1>
1x 5	5	11,7	24,0	<8,2 - 15,2>

Nejvyššího modulu pružnosti bylo naměřeno u vzorku s 4 hm.% plniva. Všechny další testované vzorky s 1× mletými uhlíkovými vlákny nedosáhly hodnoty modulu pružnosti jako referenční vzorek z epoxidové pryskyřice bez příměsi. Nejvyšší ohybové napětí bylo naměřeno u vzorku se 4 hm.% plniva.

Tabulka 2.6.4 Hodnoty modulu pružnosti kompozitu s 1× mletými uhlíkovými vlákny

Číslo vzorku	Procento obsažených uhlíkových vláken [hm. %]	Průměrný modul pružnosti E_f [MPa]	Variační koeficient modulu pružnosti [%]	Interval spolehlivosti 95 % modulu pružnosti [MPa]
1x 1	1	3398,8	8,3	<3046,7 - 3750,8>
1x 2	2	3164,3	14,4	<2600,0 - 3728,6>
1x 3	3	2818,1	23,7	<1989,7 - 3646,4>
1x 4	4	3527,6	8,3	<3164,7 - 3890,4>
1x 5	5	2881,2	23,4	<2043,0 - 3719,5>

2× mletá uhlíková vlákna

Tabulka 2.6.5 Hodnoty ohybového napětí kompozitu s 2× mletými uhlíkovými vlákny

Číslo vzorku	Procento obsažených uhlíkových vláken [hm. %]	Průměrné ohybové napětí σ_f [MPa]	Variační koeficient ohybového napětí [%]	Interval spolehlivosti 95 % ohybového napětí [MPa]
2x 1	1	12,3	23,4	<8,8 - 15,9>
2x 2	2	14,5	5,2	<13,6 - 15,5>
2x 3	3	14,0	7,1	<12,8 - 15,2>
2x 4	4	14,4	5,9	<13,4 - 15,5>
2x 5	5	11,5	38,5	<6,0 - 16,9>

Nejvyššího ohybového napětí bylo dosaženo u vzorku se 2 hm.% uhlíkového plniva.

Tabulka 2.6.6 Hodnoty modulu pružnosti kompozitu s 2× mletými uhlíkovými vlákny

Číslo vzorku	Procento obsažených uhlíkových vláken [hm. %]	Průměrný modul pružnosti E_f [MPa]	Variační koeficient modulu pružnosti [%]	Interval spolehlivosti 95 % modulu pružnosti [MPa]
2x 1	1	3218,1	21,3	<2368,1 – 4068,2>
2x 2	2	3696,4	2,5	<3581,0 – 3811,8>
2x 3	3	3462,2	5,7	<3218,8 – 3705,6>
2x 4	4	3593,7	3,1	<3454,5 – 3732,9>
2x 5	5	2753,4	37,6	<1469,5 – 4037,3>

U kompozitů s 2× mletou vlákenou výztuží byla naměřena nejvyšší hodnota modulu pružnosti u 2 hm.% výztuže. Vyjma vzorku se 4 hm.% výztuže všechny ostatní testované vzorky nedosáhly hodnot modulu pružnosti jako hodnoty pro referenční vzorek.

3× mletá uhlíková vlákna

Tabulka 2.6.7 Hodnoty ohybového napětí kompozitu s 3× mletými uhlíkovými vlákny

Číslo vzorku	Procento obsažených uhlíkových vláken [hm. %]	Průměrné ohybové napětí σ_f [MPa]	Variační koeficient ohybového napětí [%]	Interval spolehlivosti 95 % ohybového napětí [MPa]
3x1	1	13,17	19,10	<10,1 – 16,3>
3x2	2	14,16	8,90	<12,6 – 15,7>
3x3	3	12,87	17,43	<10,1 – 15,7>
3x4	4	13,36	5,16	<12,5 – 14,2>
3x5	5	13,14	2,71	<12,7 – 13,6>

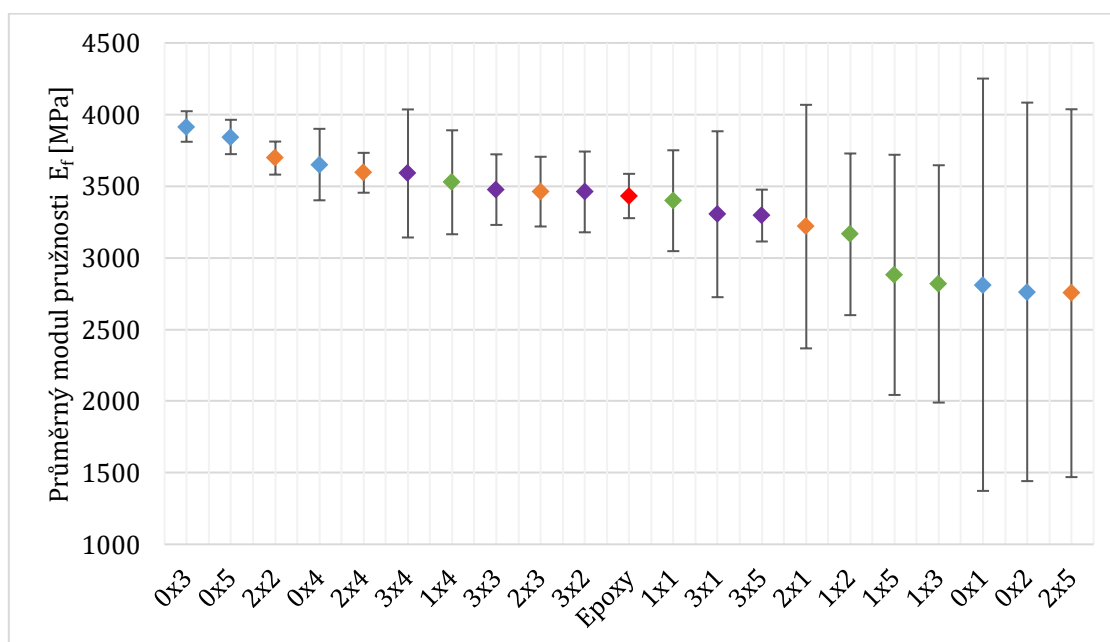
Tabulka 2.6.8 Hodnoty modulu pružnosti kompozitu s 3× mletými uhlíkovými vlákny

Číslo vzorku	Procento obsažených uhlíkových vláken [hm. %]	Průměrný modul pružnosti E_f [MPa]	Variační koeficient modulu pružnosti [%]	Interval spolehlivosti 95 % modulu pružnosti [MPa]
3x1	1	3304,50	14,12	<2725,3 – 3883,7>
3x2	2	3460,23	6,56	<3178,3 – 3742,2>
3x3	3	3476,25	5,71	<3229,9 – 3722,6>
3x4	4	3589,07	10,03	<3142,2 – 4035,9>
3x5	5	3295,20	4,42	<3114,2 – 3476,2>

U kompozitů s 3× mletou vláknennou výztuží byla naměřena nejvyšší hodnota modulu pružnosti u 4 hm.% výztuže. Nejvyššího ohybového napětí dosáhl vzorek 2 hm.% plniva.

2.6.2 Vyhodnocení ohybové zkoušky

Na obrázku 2.6.1. lze pozorovat grafické vyobrazení naměřených výsledků modulů pružnosti pro všechny testované vzorky. Modrou barvou jsou zobrazeny kompozity s nemletou uhlíkovou výztuží Carbiso. Zelená barva reprezentuje kompozit s 1× mletou vláknennou výztuží. Oranžová barva označuje vzorky s 2× mletými vlákny a fialová barva vzorky s 3× mletou výztuží. Červeně je označen referenční vzorek z epoxidové pryskyřice bez uhlíkové příměsi.

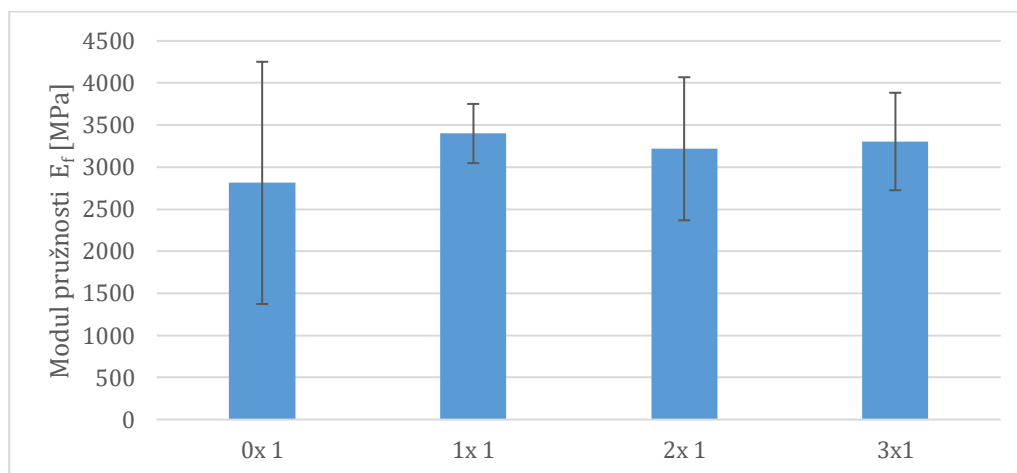


Obrázek 2.6.1 Grafické vyobrazení výsledků modulu pružnosti pro všechny testované vzorky

Nejvyšší hodnoty modulu pružnosti dosáhl vzorek s koncentrací 3 hm.% nemleté uhlíkové výztuže. Podobné hodnoty dosáhl i vzorek s 5 hm.% nemletých vláken. Vzorky s výztuží, která prošla pouze jedním procesem mletí vyjma koncentrace 5 hm.% plniva dosáhly nižších hodnot než referenční epoxidový vzorek.

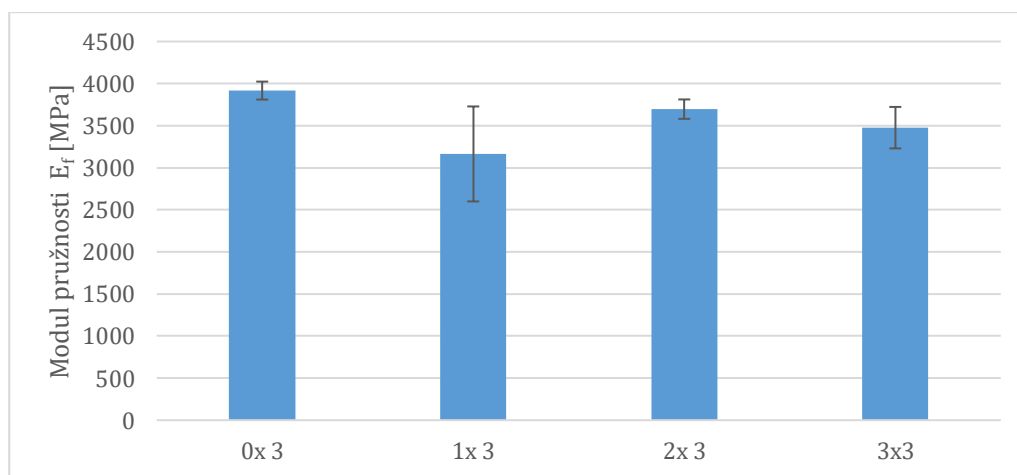
Graf na obrázku 2.6.2. analyzuje naměřené hodnoty modulu pružnosti u všech vzorků s koncentrací plniva 1 hm.%. Z grafu je patrné, že rázová houževnatost testovaných vzorků se postupně zvyšovala se zvyšujícím se počtem průchodů plniva

mlecím procesem. Výjimku tvoří pouze vzorek s 2× mletým uhlíkovým plnivem. Intervaly spolehlivosti naměřených hodnot se však vzájemně překrývají.



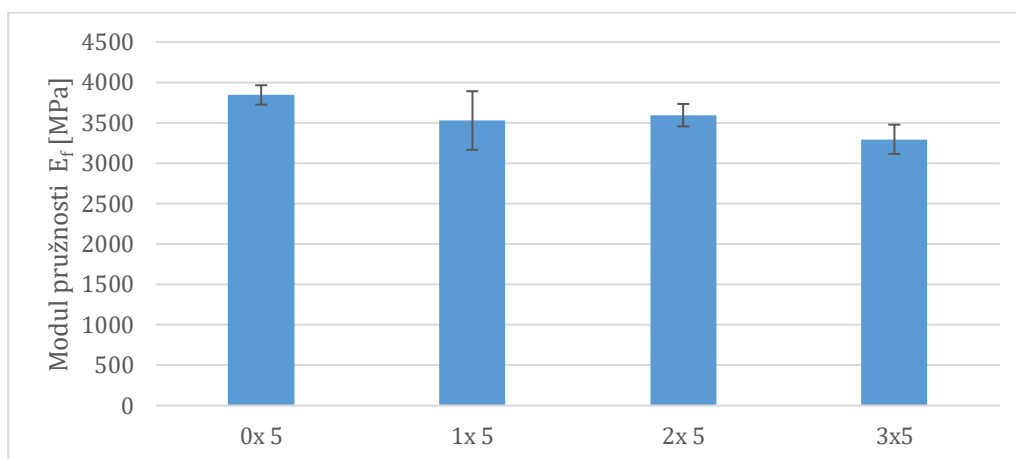
Obrázek 2.6.2 Grafické vyhodnocení modulů pružnosti pro vzorky s koncentrací 1 hm.% plniva

U vzorků s koncentrací 3 hm.% plniva dochází k nepatrnému poklesu modulu pružnosti oproti vzorku s nemletým uhlíkovým plnivem Carbiso. U vzorku s plnivem, které prošlo jedním procesem mletí je tento pokles hodnot výraznější díky nestejnóměrnosti velikosti částic u tohoto vzorku.



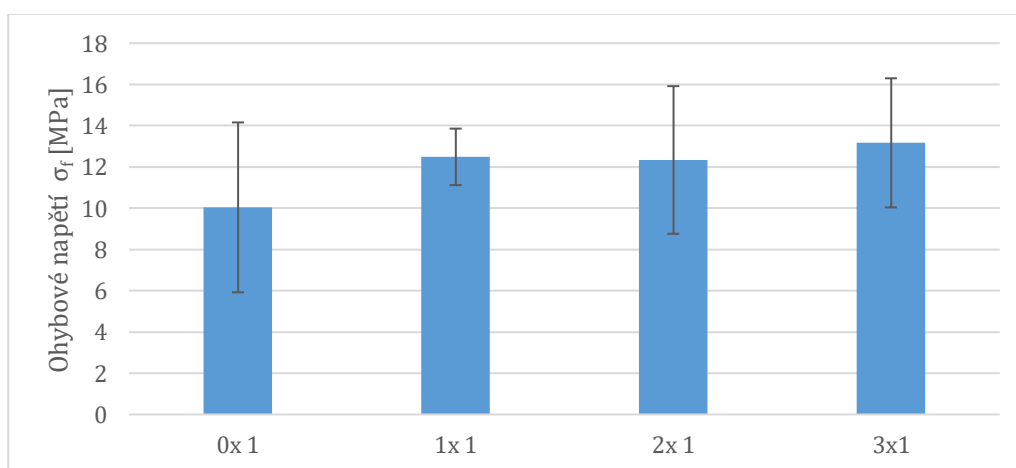
Obrázek 2.6.3 Grafické vyhodnocení modulů pružnosti pro vzorky s koncentrací 3 hm.% plniva

U vzorků s koncentrací 5 hm.% plniva lze pozorovat velice mírně klesající průběh hodnot postupně se zvyšujícím se počtem procesů mletí.



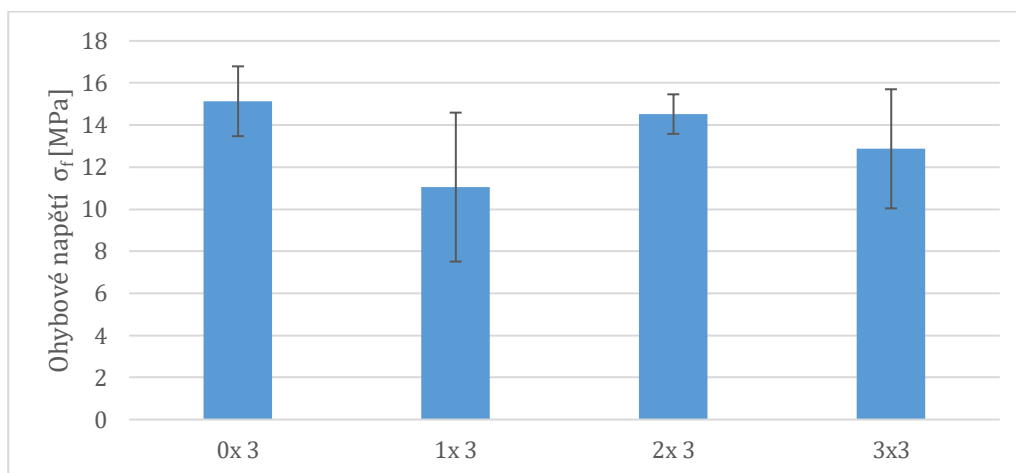
Obrázek 2.6.4 Grafické vyhodnocení modulů pružnosti pro vzorky s koncentrací 5 hm.% plniva

Chybové úsečky jednotlivých měření vypovídají o variabilitě velikosti částic plniva u jednotlivých vzorků. U nemletých vláken je velikost částic podobná. U 2× mletých vláken začíná velikost částic nabývat podobných hodnot. U 3× mletých vláken jsou uhlíkové částice podobných rozměrů, dochází zde však ke shlukování těchto částic, které v kompozitu tvoří místa s rozptýlenými částicemi a místa se shluky tvořící větší částice. V těchto místech shluků dochází k nedokonalému mechanickému zaklesnutí jednotlivých částic a shluk tak obsahuje mikroskopické mezery. Tyto mezery nedokáže epoxidová matrice při výrobě kompozitu dobře prosytit, a proto zde vznikají potencionálně slabá místa. Tyto shluky nedokáží přenášet napětí vlivem zatížení tak, jako samostatná částice a kompozit tak nedokáže snést mnohonásobně vyšší hodnoty zatížení než samotná epoxidová matrice. Proto se hodnoty modulu pružnosti u 3× mleté uhlíkové výztuže pohybují v okolí referenčního epoxidového vzorku.



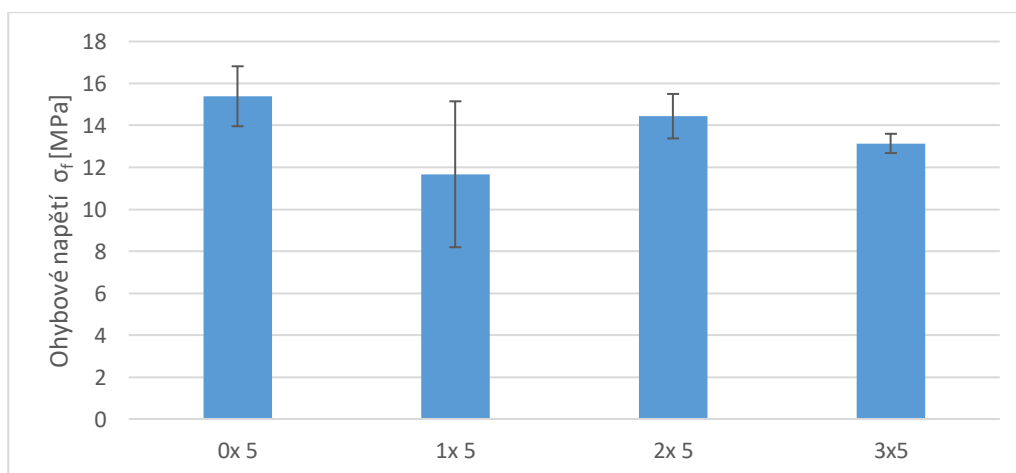
Obrázek 2.6.5 Grafické vyhodnocení ohybového napětí pro vzorky s koncentrací 1 hm.% plniva

Při měření ohybového napětí došlo u všech vzorků s koncentrací plniva 1 hm.% k nárůstu hodnot oproti kompozitu s nemletou výztuží.



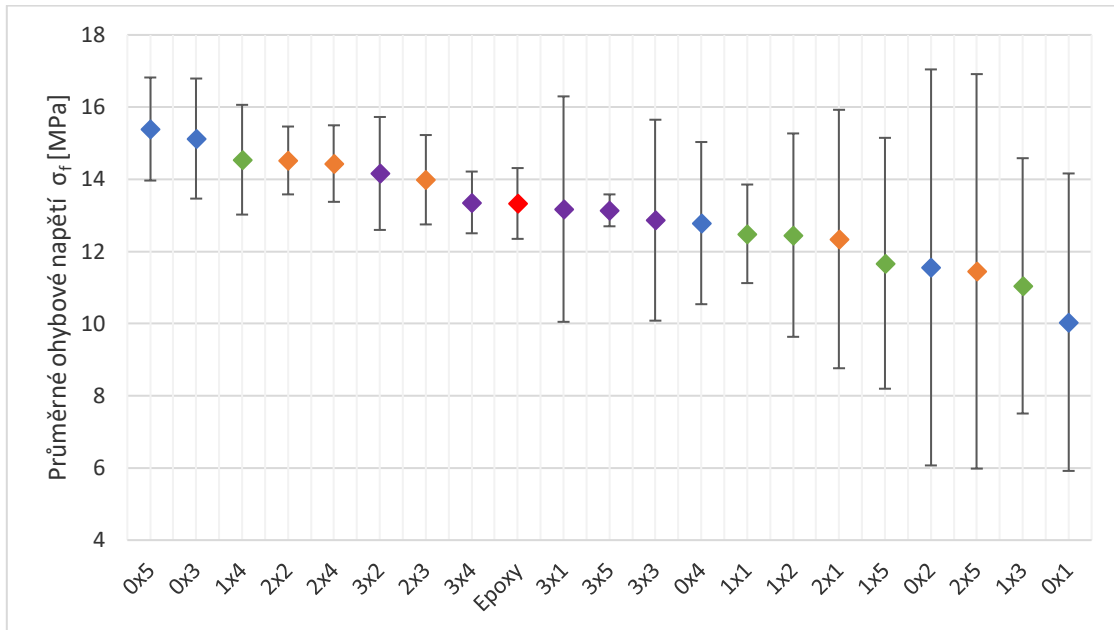
Obrázek 2.6.6 Grafické vyhodnocení ohybového napětí pro vzorky s koncentrací 3 hm.% plniva

U vzorků s koncentrací plniva 3 hm.% bylo u vzorku s 2× mletou výztuží naměřeno podobných hodnot jako u vzorku s nemletou výztuží. U dalších vzorků byl zaznamenán pokles. Totožný průběh naměřených hodnot lze pozorovat i na obrázku 2.6.7. zobrazující kompozity s 5 hm.% uhlíkové výztuže.



Obrázek 2.6.7 Grafické vyhodnocení ohybového napětí pro vzorky s koncentrací 5 hm.% plniva

U vzorku s 3 a 5 hm.% plniva lze pozorovat v rámci chybových úseček téměř totožné hodnoty ohybového napětí s mírným poklesem hodnot oproti kompozitu s nemletými uhlíkovými vlákny, což dokazuje vliv koncentrace a velikosti částic plniva na výsledné vlastnosti kompozitu.



Obrázek 2.6.8 Grafické vyobrazení výsledků ohybového napětí pro všechny testované vzorky

Veškeré hodnoty ohybového napětí jsou graficky znázorněny na obrázku 2.6.8. fungující na stejném principu jako grafické vyobrazení pro hodnoty modulu pružnosti 2.6.1.

Naměřené výsledky z obou grafů dokazují značný vliv geometrie částic plniva na výsledné mechanické vlastnosti vyrobeného kompozitu.

Při samotném měření mohlo dojít k ovlivnění vlivem náhodné orientace vláken v kompozitu. Hodnoty mohly být taktéž ovlivněny již při výrobě vzorku vlivem uvolňování sil mezi částicemi a matricí či shlukováním částic při prosycování plniva. Vlivem odlévání do formy také mohlo dojít k tvorbě mikroskopických vzduchových bublin, které mohly výrazně negativně ovlivnit naměřené hodnoty.

2.7 Měření mechanických vlastností – DMA

Pro dynamicko-mechanickou analýzu je zapotřebí příprava vzorku materiálu šířky 10 mm (± 1 mm) a délky 50 mm (± 1 mm). Tento vzorek je vložen do přístroje na dvě statické podpěry. Poté byly nastaveny parametry frekvence 1 Hz, časový údaj o délce průběhu zkoušky 30 min a teplota 25 °C (pokojová). Přístroj byl spuštěn a vzorek byl cyklicky zatěžován tlakovou silou. Průběh měření bylo možné sledovat na počítačové obrazovce vykreslující dvě sinusové křivky, z čehož jedna reprezentovala aplikované tlakové napětí a druhá elastickou odezvu materiálu. Testováno dle ČSN EN ISO 472 (64001) – obor plasty a polymery.

2.7.1 Výsledky zkoušky DMA

Tato kapitola obsahuje analýzu naměřených dat na dynamickém termomechanickém analyzátoru. Všechna tato měření proběhla při frekvenci 1 Hz a na vzorky bylo působeno konstantním průběhem síly 100 Pa a měřena deformační odezva po dobu 30 minut. Data byla dále přepočítána, viz tabulky 2.7.1 – 2.7.9 a jednotlivé průběhy měření byly zaznamenány do grafů 2.7.1 – 2.7.12.

Výsledky zkoušky měření komplexního modulu pružnosti

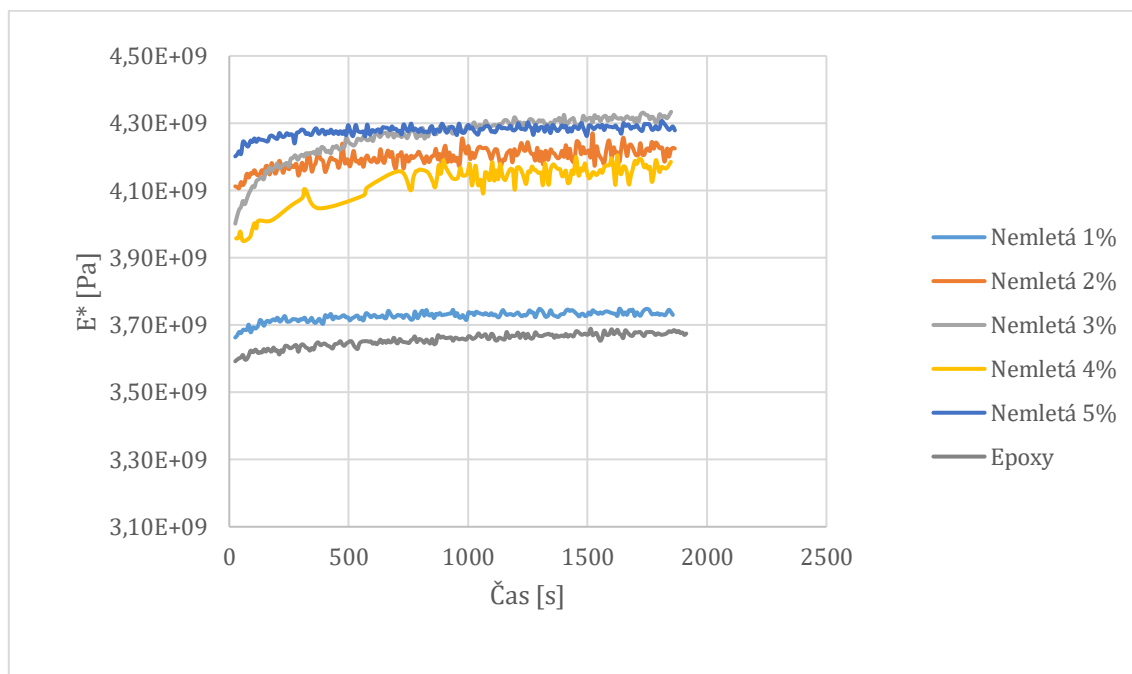
Nemletá uhlíková vlákna

Tabulka 2.7.1. zobrazuje naměřené výsledky dynamického namáhání v testovaném kompozitním materiálu s výztuží z nemletých recyklovaných uhlíkových vláken.

Tabulka 2.7.1 Vypočtené hodnoty komplexního modulu pružnosti v kompozitu s nemletými uhlíkovými vlákny

Číslo vzorku	Procento obsažených uhlíkových vláken [hm.%]	Střední hodnota komplexního modulu pružnosti E* [GPa]	Variační koeficient [%]	95% interval spolehlivosti E* [GPa]
Epoxy	0	3,66	0,3	<3,662 – 3,664>
0x1	1	3,73	0,2	<3,731 – 3,733>
0x2	2	4,20	0,5	<4,206 – 4,210>
0x3	3	4,29	0,4	<4,290 – 4,293>
0x4	4	4,15	0,5	<4,151 – 4,155>
0x5	5	4,28	0,2	<4,283 – 4,284>

Z výsledků měření lze pozorovat, že nejvyšších hodnot komplexního modulu pružnosti dosáhl vzorek s obsahem 3 hm.% uhlíkového plniva. Podobných hodnot dosahuje také vzorek s 5 hm.% koncentrací plniva.



Obrázek 2.7.1 Průběh měření komplexního modulu pružnosti v kompozitu s nemletými uhlíkovými vlákny

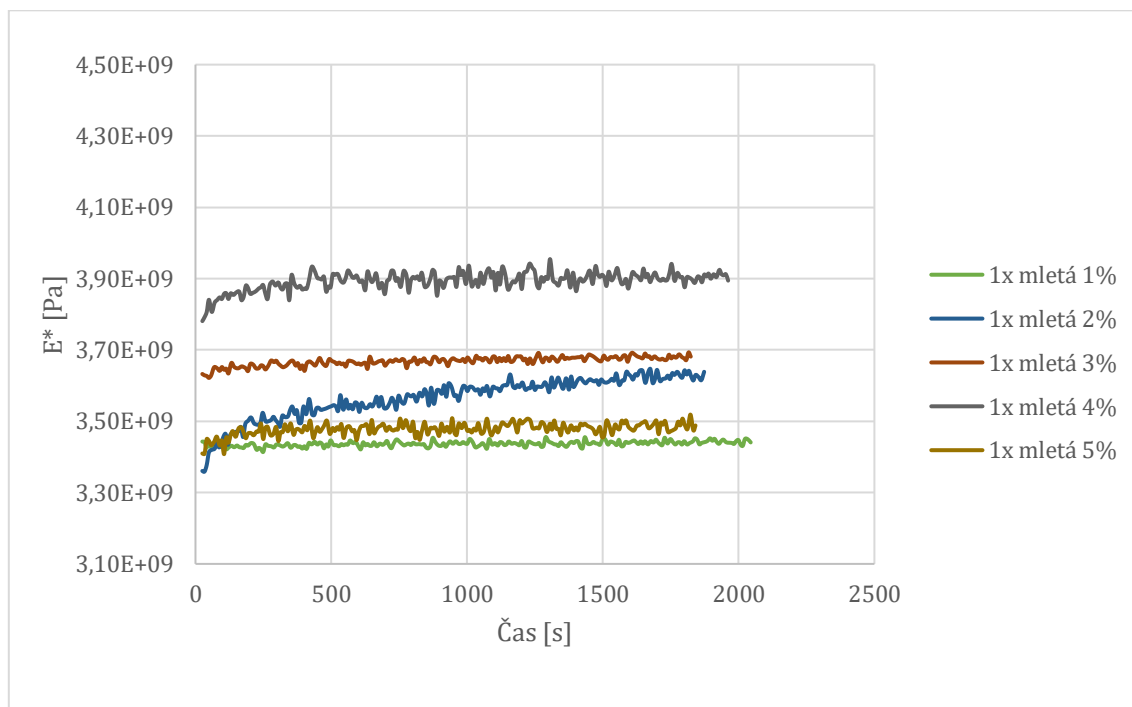
1× mletá uhlíková vlákna

Tabulka 2.7.2. porovnává naměřené výsledky modulu pružnosti pro kompozity s recyklovanými uhlíkovými vlákny, která prošla jedním procesem mletí.

Tabulka 2.7.2 Vypočtené hodnoty komplexního modulu pružnosti v kompozitu s 1× mletými uhlíkovými vlákny

Číslo vzorku	Procento obsažených uhlíkových vláken [hm.%]	Střední hodnota komplexního modulu pružnosti E* [GPa]	Variační koeficient [%]	95% interval spolehlivosti E* [GPa]
1x1	1	3,43	0,19	<3,436 – 3,436>
1x2	2	3,58	0,71	<3,588 – 3,593>
1x3	3	3,67	0,22	<3,672 – 3,674>
1x4	4	3,89	0,49	<3,899 – 3,903>
1x5	5	3,48	0,38	<3,482 – 3,484>

U kompozitů s 1× mletým uhlíkovým plnivem dosahuje nejvyšších hodnot vzorek s 4 hm.% plniva. Všechny další naměřené hodnoty z této série však dosahují hodnot nižších, nebo srovnatelných s modulem pružnosti jako u vzorku bez příměsi uhlíkových vláken.



Obrázek 2.7.2 Průběh měření komplexního modulu pružnosti v kompozitu s 1× mletými uhlíkovými vlákny

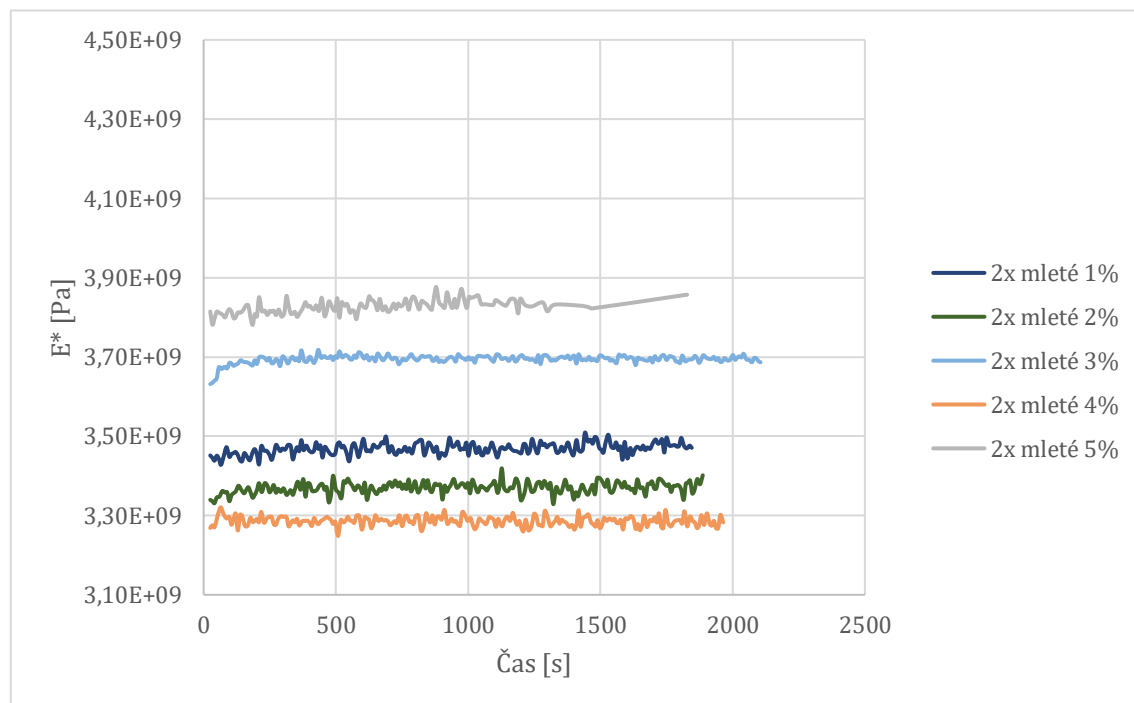
2× mletá uhlíková vlákna

Zde je možné pozorovat výsledky měření u kompozitů s 2× mletým uhlíkovým plnivem.

Tabulka 2.7.3 Vypočtené hodnoty komplexního modulu pružnosti v kompozitu s 2× mletými uhlíkovými vlákny

Číslo vzorku	Procento obsažených uhlíkových vláken [hm.%]	Střední hodnota komplexního modulu pružnosti E* [GPa]	Variační koeficient [%]	95% interval spolehlivosti E* [GPa]
2x1	1	3,47	0,39	<3,471 – 3,473>
2x2	2	3,37	0,41	<3,371 – 3,373>
2x3	3	3,69	0,16	<3,696 – 3,697>
2x4	4	3,28	0,35	<3,285 – 3,287>
2x5	5	3,83	0,35	<3,835 – 3,838>

Z tabulky je patrné, že nejvyšší hodnoty dosáhl kompozitní vzorek s obsahem 5 hm.% plniva. Společně se vzorkem s obsahem 3 hm.% plniva pak překročili hodnoty naměřené u vzorku z čisté pryskyřice bez příměsi plniva.



Obrázek 2.7.3 Průběh měření komplexního modulu pružnosti v kompozitu s 2× mletými uhlíkovými vlákny

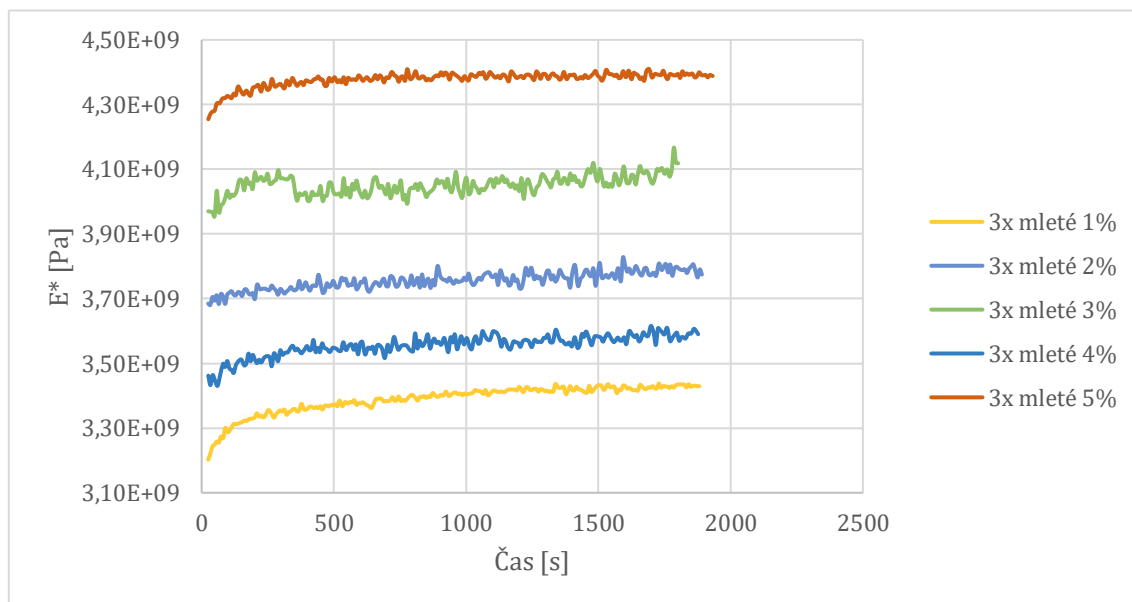
3× mletá uhlíková vlákna

V tabulce 2.7.4. jsou uvedeny naměřené výsledky z měření kompozitů obsahujících 3× mleté plnivo.

Tabulka 2.7.4 Vypočtené hodnoty komplexního modulu pružnosti v kompozitu s 3× mletými uhlíkovými vlákny

Číslo vzorku	Procento obsažených uhlíkových vláken [hm.%]	Střední hodnota komplexního modulu pružnosti E* [GPa]	Variační koeficient [%]	95% interval spolehlivosti E* [GPa]
3x1	1	3,40	0,46	<3,406 – 3,409>
3x2	2	3,76	0,45	<3,762 – 3,765>
3x3	3	4,05	0,56	<4,052 – 4,056>
3x4	4	3,56	0,47	<3,566 – 3,569>
3x5	5	4,38	0,19	<4,386 – 4,388>

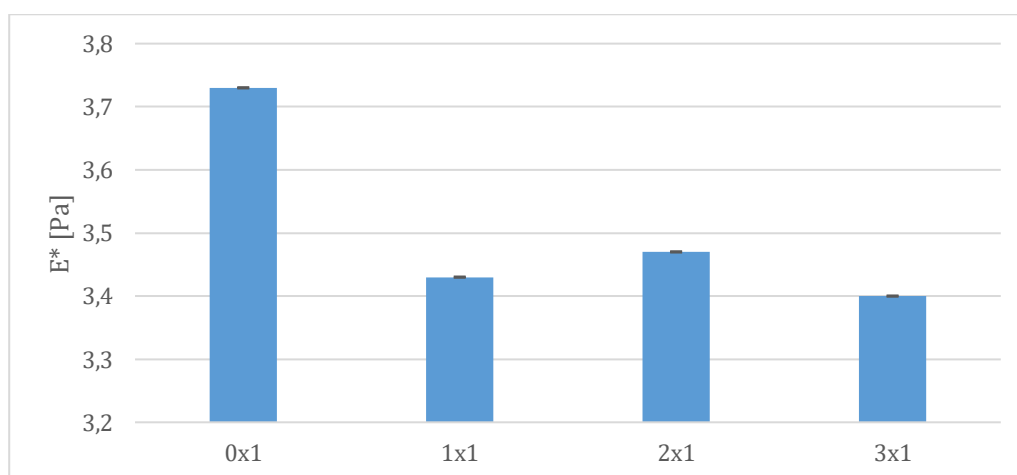
Z naměřených dat vyplývá, že nejvyšších naměřených hodnot dosáhl vzorek s obsahem 5 hm.% výztuže. Nejnižších hodnot dosáhl vzorek s 1 hm.% 3× mletých uhlíkových vláken.



Obrázek 2.7.4 Průběh měření komplexního modulu pružnosti v kompozitu s 3× mletými uhlíkovými vlákny

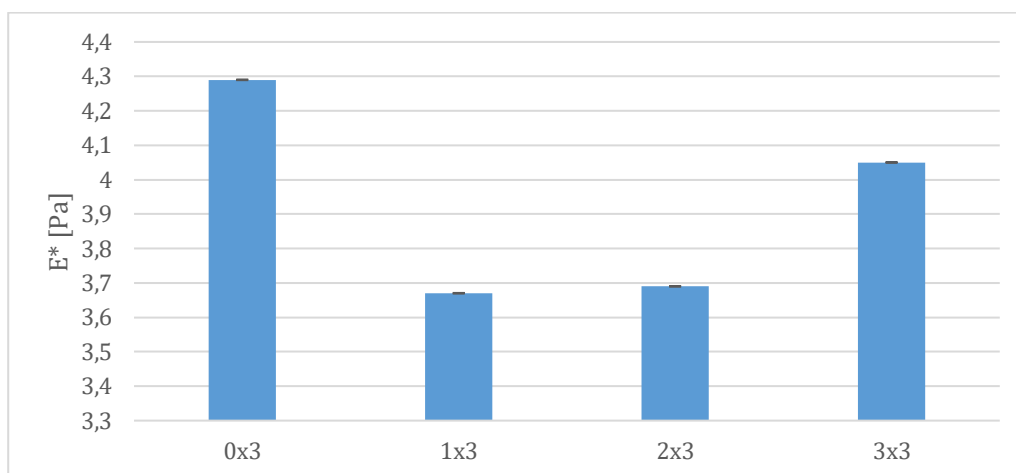
Zhodnocení výsledků měření komplexního modulu pružnosti

Naměřené hodnoty komplexního modulu pružnosti pro koncentrace uhlíkových vláken 1; 3; 5 hm.% zobrazují grafy 2.7.5 až 2.7.7.



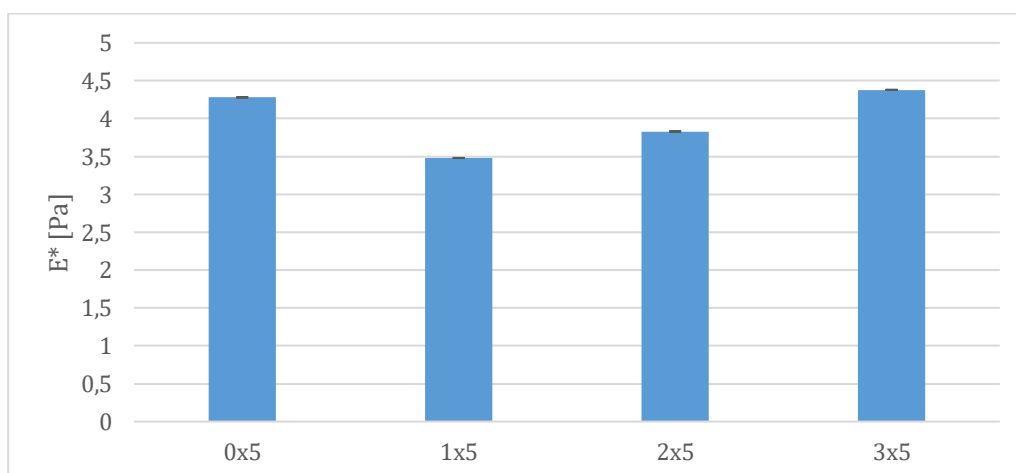
Obrázek 2.7.5 Naměřené hodnoty komplexního modulu pružnosti pro vzorky s koncentrací 1 hm.% plniva

Z porovnaných výsledků pro koncentraci 1 hm.% plniva je patrné že obsah plniva mletých částic je nedostatečný, jelikož hodnoty u kompozitu s nemletými vlákny dosahují výrazně vyšších hodnot komplexního modulu pružnosti.



Obrázek 2.7.6 Naměřené hodnoty komplexního modulu pružnosti pro vzorky s koncentrací 3 hm.% plniva

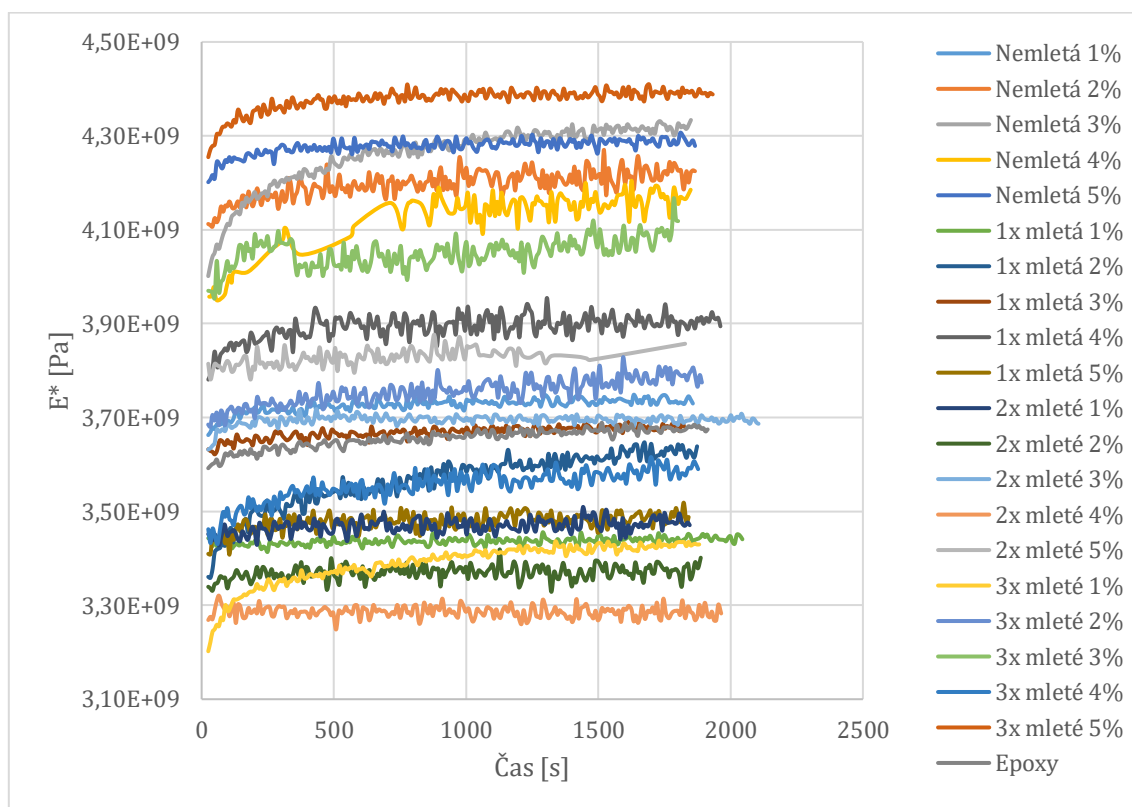
Z obrázku 2.7.6. vyplývá že koncentrace plniva výrazně ovlivňuje mechanické vlastnosti jednotlivých vzorků. Oproti 1 hm.% koncentraci na obrázku 2.7.5. došlo k navýšení hodnot komplexního modulu pružnosti u všech vzorků. Výraznější nárůst nastal u vzorků s nemletými a 3× mletými vlákny. K tomuto nárůstu došlo vlivem stejnoměrnosti velikosti částic.



Obrázek 2.7.7 Naměřené hodnoty komplexního modulu pružnosti pro vzorky s koncentrací 5 hm.% plniva

U vzorků s 5 hm.% došlo k navýšení hodnot komplexního modulu pružnosti u všech vzorků. U kompozitu s 3× mletými vlákny došlo k naměření nejvyšších hodnot. Nepatrně nižší hodnoty pak dosáhl vzorek s nemletým uhlíkovým plnivem.

Všechny průběhy měření komplexního modulu pružnosti pro všechny vzorky byly zaznamenány do grafu na obrázku 2.7.8. a tabulky 2.7.5.



Obrázek 2.7.8 Grafické vyobrazení naměřených výsledků komplexního modulu pružnosti

Tento grafický přehled zobrazuje, že nejlepší mechanické odolnosti dosáhl kompozit s 5 hm.% obsahem 3× mletých recyklovaných uhlíkových vláken. Grafický přehled je pak dále doplněn o přehled číselný viz. tabulka 2.7.5. V tabulce nalézáme všechny naměřené hodnoty seřazené sestupně od nejvyšší naměřené hodnoty po nejnižší naměřenou hodnotu reálné složky modulu pružnosti.

Tabulka 2.7.5 Tabulkový přehled naměřených výsledků komplexního modulu pružnosti – seřazeno sestupně

Číslo vzorku	Střední hodnota komplexního modulu pružnosti E* [GPa]	Číslo vzorku	Střední hodnota komplexního modulu pružnosti E* [GPa]	Číslo vzorku	Střední hodnota komplexního modulu pružnosti E* [GPa]
3x5	4,38	2x5	3,83	3x4	3,56
0x3	4,29	3x2	3,76	1x5	3,48
0x5	4,28	0x1	3,73	2x1	3,47
0x2	4,20	2x3	3,69	1x1	3,43
0x4	4,15	1x3	3,67	3x1	3,40
3x3	4,05	Epoxy	3,66	2x2	3,37
1x4	3,89	1x2	3,58	2x4	3,28

Nejlepší naměřená hodnota činí 4,4 GPa. O hodnotu 0,1 GPa a méně, dosáhly dobré odolnosti proti mechanickému působení vzorky obsahující nemletá recyklovaná uhlíková vlákna v koncentracích 2 – 5 hm.%. Referenční vzorek vyrobený z čisté pryskyřice s 0 hm.% příměsí uhlíkových vláken, dělí tabulku naměřených hodnot téměř na polovinu. V porovnání se vzorkem vykazujícím nejlepší naměřené mechanické vlastnosti zde nacházíme nárůst hodnot o 0,82 GPa. Zhoršených mechanických vlastností oproti referenčnímu vzorku dosáhl vzorek s 4 hm.% koncentrací 2× mletých uhlíkových vláken, a to o hodnotu necelých 0,4 GPa.

Výsledky zkoušky měření ztrátového činitele modulu pružnosti

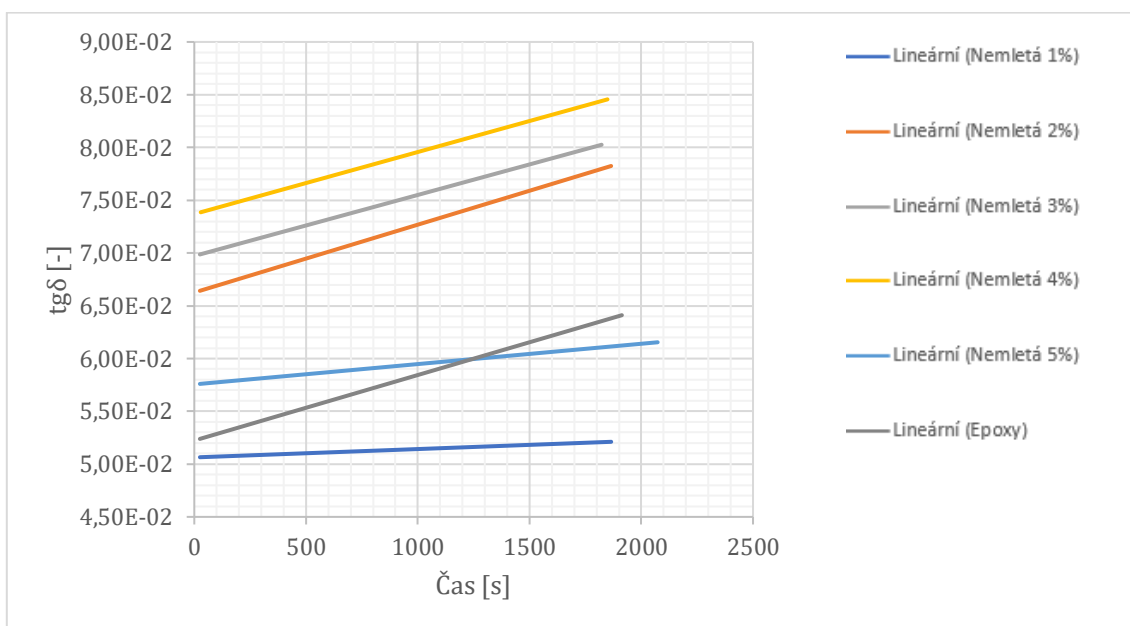
Nemletá uhlíková vlákna

V tabulce 2.7.6. jsou zobrazeny naměřené výsledky dynamického namáhání v testovaném kompozitním materiálu s výztuží z nemletých recyklovaných uhlíkových vláken.

Tabulka 2.7.6 Vypočtené hodnoty ztrátového činitele modulu pružnosti v kompozitu s nemletými uhlíkovými vlákny

Číslo vzorku	Procento obsažených uhlíkových vláken [hm.%]	Střední hodnota ztrátového činitele modulu pružnosti $tg\delta$ [-]	Variační koeficient [%]	95% interval spolehlivosti $tg\delta$ [-]
Epoxy	0	0,059	3,26	<0,060 – 0,061>
0x1	1	0,060	4,67	<0,060 – 0,061>
0x2	2	0,073	3,33	<0,073 – 0,074>
0x3	3	0,077	4,37	<0,076 – 0,077>
0x4	4	0,082	3,25	<0,082 – 0,083>
0x5	5	0,051	2,96	<0,051 – 0,052>

Nejvyšší ztrátový činitel modulu pružnosti byl naměřen u vzorku s 4 hm.% zastoupením plniva. Vzorek s 5 hm.% nemletých uhlíkových vláken vykazuje nižší hodnoty než referenční vzorek vyrobený z čisté epoxidové pryskyřice bez příměsí uhlíkových vláken.



Obrázek 2.7.9 Průběh měření ztrátového činitele modulu pružnosti v kompozitu s nemletými uhlíkovými vlákny

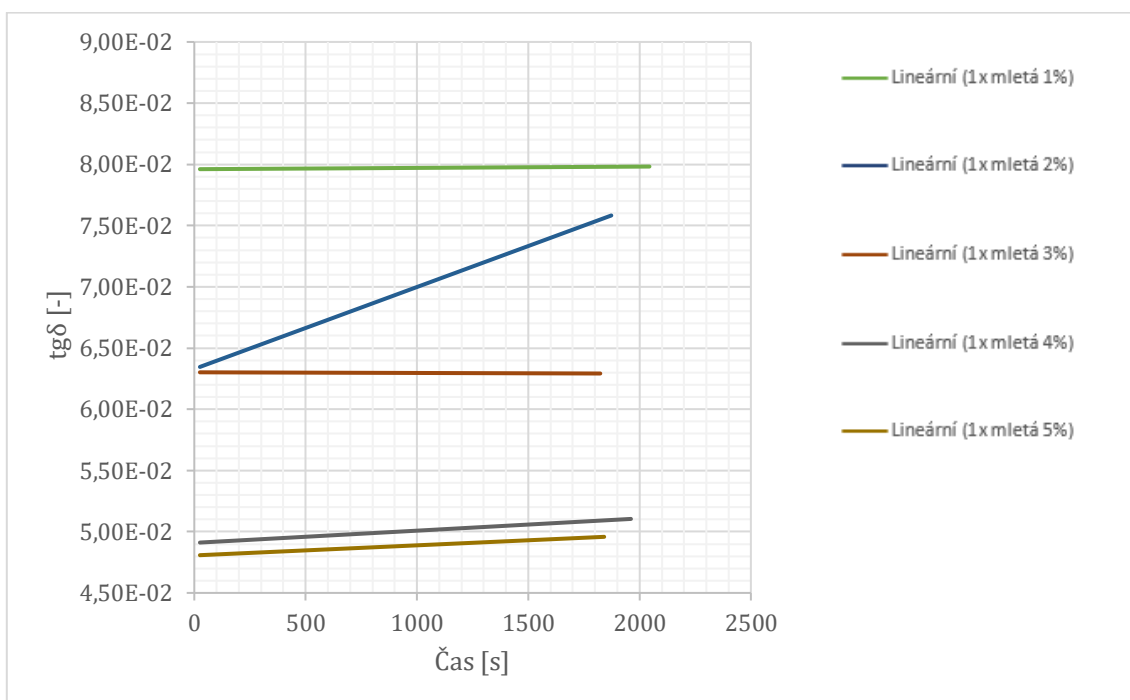
1× mletá uhlíková vlákna

Tabulka 2.7.7. zobrazuje naměřené hodnoty ztrátového činitele modulu pružnosti pro kompozity s recyklovanými uhlíkovými vlákny, která byla jednou mleta.

Tabulka 2.7.7 Vypočtené hodnoty ztrátového činitele modulu pružnosti v kompozitu s 1× mletými uhlíkovými vlákny

Číslo vzorku	Procento obsažených uhlíkových vláken [hm.%]	Střední hodnota ztrátového činitele modulu pružnosti $tg\delta$ [-]	Variační koeficient [%]	95% interval spolehlivosti $tg\delta$ [-]
1x1	1	0,079	1,73	<0,079 - 0,080>
1x2	2	0,071	4,86	<0,071 - 0,072>
1x3	3	0,062	4,49	<0,063 - 0,064>
1x4	4	0,050	5,68	<0,050 - 0,051>
1x5	5	0,049	5,70	<0,049 - 0,050>

Nejvyšší naměřené hodnoty dosáhl kompozit s obsahem 1 hm.% plniva. Vzorky s obsahem plniva 1 hm.% až 3 hm.% vykazují vyšší naměřené hodnoty, než je hodnota ztrátového činitele modulu pružnosti u referenčního vzorku. Naopak vzorek s 5 hm.% plniva dosáhl nejnižší hodnoty ze všech měřených vzorků.



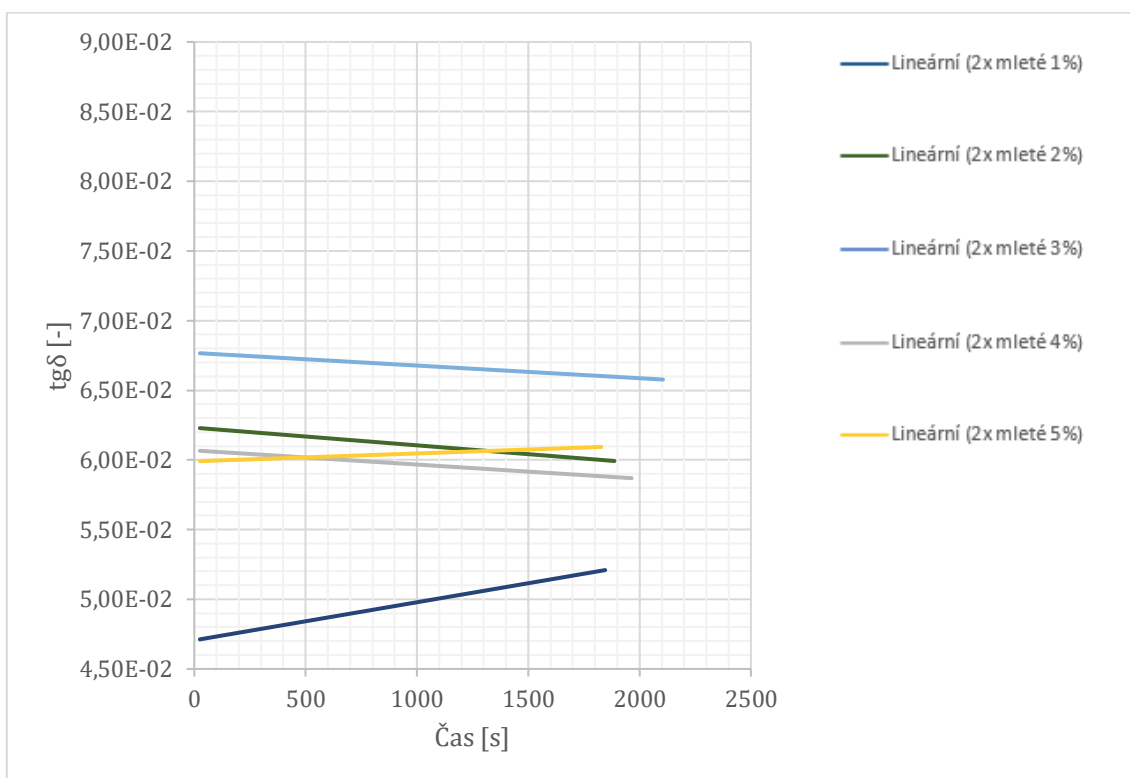
Obrázek 2.7.10 Průběh měření ztrátového činitele modulu pružnosti v kompozitu s 1× mletými uhlíkovými vlákny

2× mletá uhlíková vlákna

Zde lze pozorovat výsledky měření u vzorků s 2× mletým uhlíkovým plnivem.

Tabulka 2.7.8 Vypočtené hodnoty ztrátového činitele modulu pružnosti v kompozitu s 2× mletými uhlíkovými vlákny

Číslo vzorku	Procento obsažených uhlíkových vláken [hm.%]	Střední hodnota ztrátového činitele modulu pružnosti $tg\delta$ [-]	Variační koeficient [%]	95% interval spolehlivosti $tg\delta$ [-]
2x1	1	0,050	1,73	<0,050 – 0,051>
2x2	2	0,060	4,86	<0,060 – 0,061>
2x3	3	0,066	4,49	<0,066 – 0,067>
2x4	4	0,059	5,68	<0,059 – 0,060>
2x5	5	0,061	5,70	<0,060 – 0,061>



Obrázek 2.7.11 Průběh měření ztrátového činitele modulu pružnosti v kompozitu s 2× mletými uhlíkovými vlákny

Nejvyšší hodnoty dosáhl vzorek s obsahem 3 hm.% uhlíkového plniva. Všechny další naměřené hodnoty v této sérii svou hodnotou oscilují okolo hodnoty referenčního vzorku.

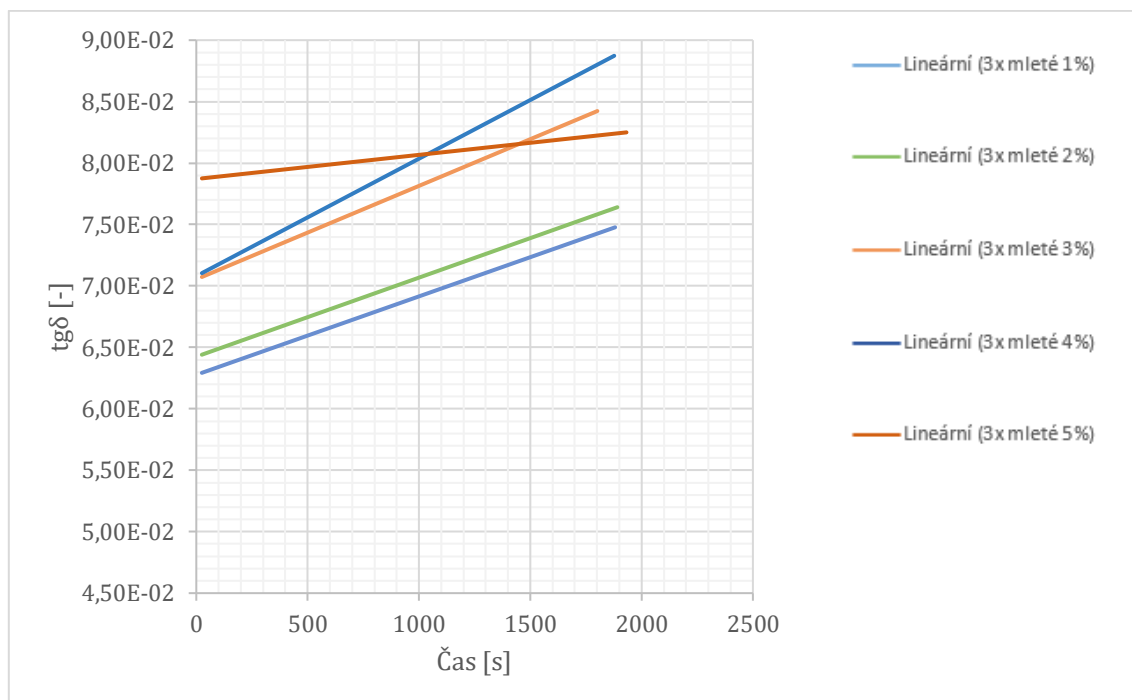
3× mletá uhlíková vlákna

V následující tabulce 2.7.9. jsou uvedeny naměřené hodnoty z měření kompozitů obsahujících 3× mleté uhlíkové plnivo.

Tabulka 2.7.9 Vypočtené hodnoty ztrátového činitele modulu pružnosti v kompozitu s 3× mletými uhlíkovými vlákny

Číslo vzorku	Procento obsažených uhlíkových vláken [hm.%]	Střední hodnota ztrátového činitele modulu pružnosti tgδ [-]	Variační koeficient [%]	95% interval spolehlivosti tgδ [-]
3x1	1	0,070	3,11	<0,070 - 0,071>
3x2	2	0,072	4,32	<0,071 - 0,072>
3x3	3	0,079	4,71	<0,078 - 0,080>
3x4	4	0,081	4,08	<0,081 - 0,082>
3x5	5	0,080	1,92	<0,081 - 0,082>

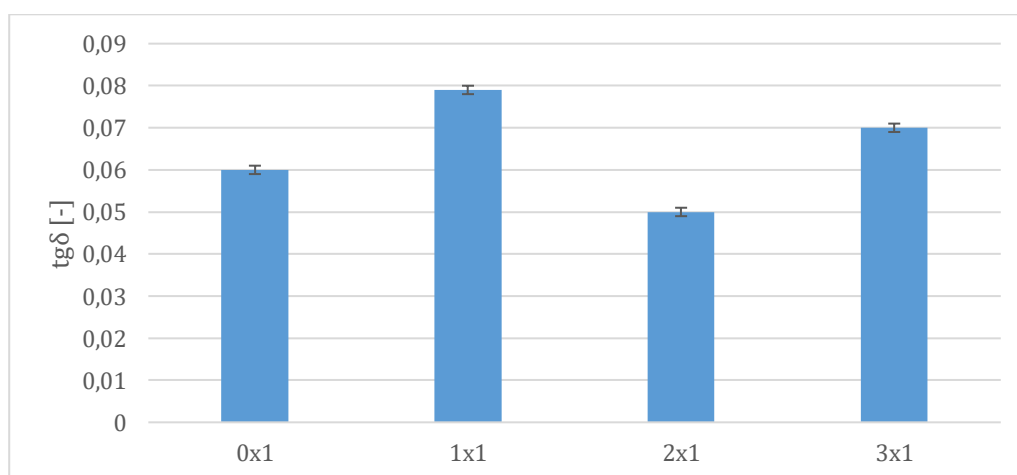
Z naměřených hodnot vyplývá, že nejvyšší mechanické odolnosti dosáhl vzorek s obsahem 4 hm.% uhlíkových vláken. To je dobře viditelné i na grafu vyobrazeném na obr. 2.7.12.



Obrázek 2.7.12 Průběh měření ztrátového činitele modulu pružnosti v kompozitu s 3x mletými uhlíkovými vlákny

Zhodnocení výsledků měření ztrátového činitele modulu pružnosti

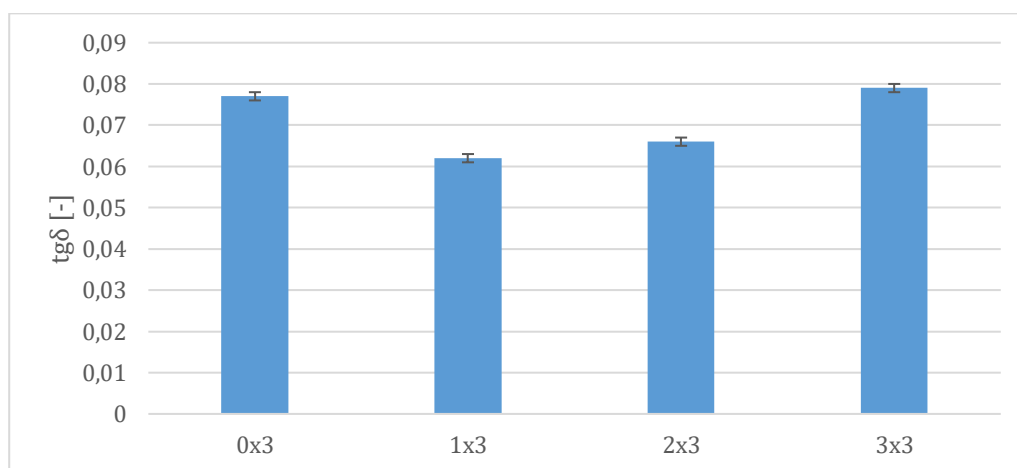
Naměřené hodnoty ztrátového činitele modulu pružnosti pro koncentrace uhlíkových vláken 1; 3; 5 hm.% zobrazují grafy 2.7.13 až 2.7.15.



Obrázek 2.7.13 Naměřené hodnoty ztrátového činitele modulu pružnosti pro vzorky s koncentrací 1 hm.% plniva

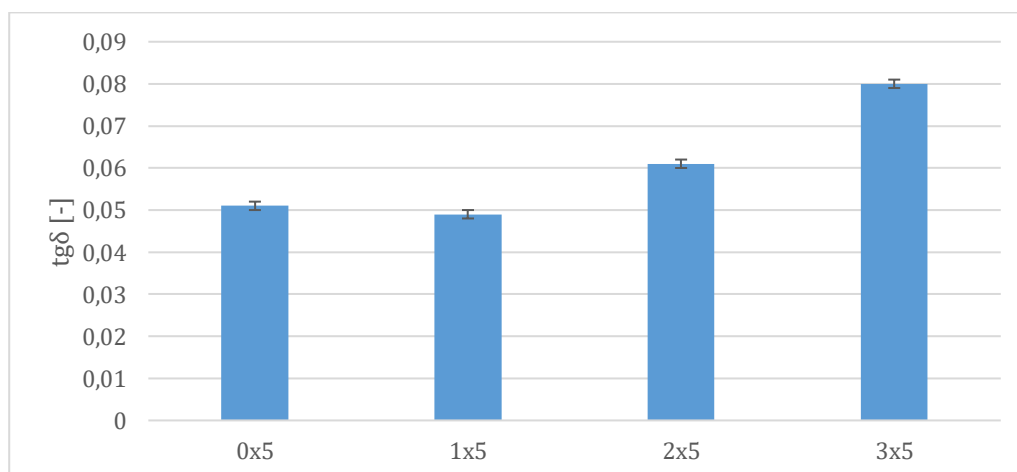
U vzorků s 1 hm.% plniva došlo k detekci nejvyšší ztrátové složky u vzorku s plnivem, které prošlo jedním procesem mletí. Nejnižší hodnoty byly naměřeny u vzorku s 2× mletým uhlíkovým plnivem. Tyto hodnoty byly ovlivněny především nízkou koncentrací plniva v kompozitech.

U vzorků s 3 hm.% plniva došlo k naměření nejvyššího ztrátového činitele modulu pružnosti u vzorku s 3× mletými vlákny. Podobných hodnot bylo naměřeno i u vzorku s nemletými uhlíkovými vlákny.



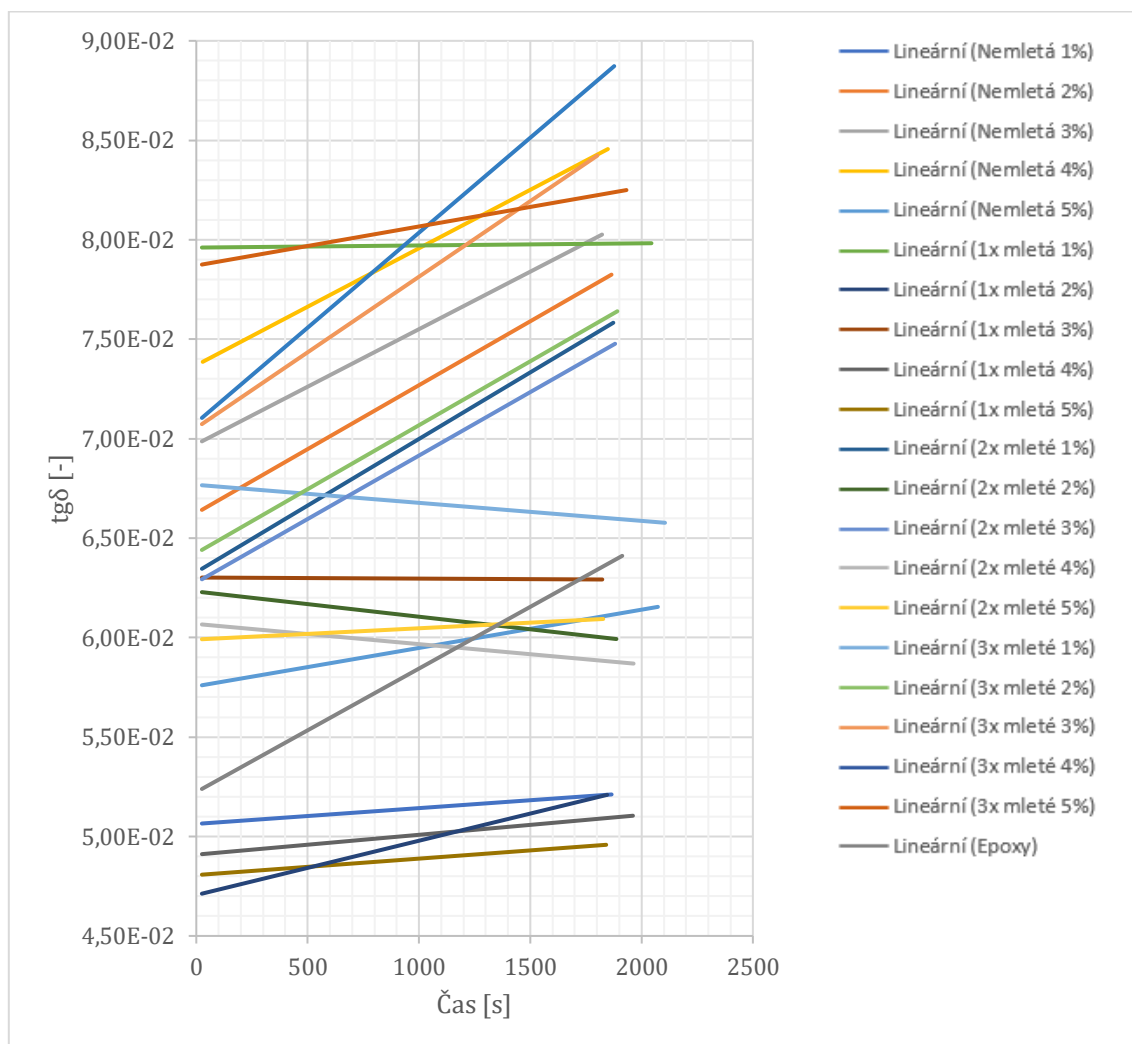
Obrázek 2.7.14 Naměřené hodnoty ztrátového činitele modulu pružnosti pro vzorky s koncentrací 3 hm.% plniva

U vzorků s 5 hm.% plniva došlo k postupnému nárůstu hodnot ztrátového činitele modulu pružnosti se zvyšujícím se počtem průchodů plniva mlýnem.



Obrázek 2.7.15 Naměřené hodnoty ztrátového činitele modulu pružnosti pro vzorky s koncentrací 5 hm.% plniva

Všechna měření zachycující ztrátový činitel modulu pružnosti byla pro celkový přehled zanesena do grafu na obrázku 2.7.16 a tabulky 2.7.10. Data byla proložena přímkou z důvodu lepší interpretace výsledků.



Obrázek 2.7.16 Grafické vyobrazení naměřených výsledků ztrátového činitele modulu pružnosti

Z grafického přehledu lze rozeznat, které ze vzorků překročily hodnoty ztrátového činitele modulu pružnosti naměřené u referenčního vzorku. Pro lepší přehled jsou hodnoty zaneseny do tabulky 2.7.10. a to sestupně od nejvyšší po nejnižší naměřenou hodnotu modulu pružnosti.

Nejvyšší naměřenou hodnotu vykazoval kompozit s příměsí 4 hm.% nemletých vláken. Velice podobných hodnot dosáhly vzorky s příměsí z 3× mletých vláken o obsahu 4 hm.% a 5 hm.%. U dalších vzorků docházelo k postupnému snižování mechanické odolnosti. Hodnot nižších, než dosahoval referenční vzorek bylo naměřenou pouze u 1/3 vzorků.

Tabulka 2.7.10 Tabulkový přehled naměřených výsledků ztrátového činitele modulu pružnosti– seřazeno sestupně

Číslo vzorku	Střední hodnota ztrátového činitele modulu pružnosti $tg\delta$ [-]	Číslo vzorku	Střední hodnota ztrátového činitele modulu pružnosti $tg\delta$ [-]	Číslo vzorku	Střední hodnota ztrátového činitele modulu pružnosti $tg\delta$ [-]
0x4	0,082	3x2	0,072	0x1	0,060
3x4	0,081	1x2	0,071	Epoxy	0,059
3x5	0,080	3x1	0,070	2x4	0,059
1x1	0,079	2x3	0,066	0x5	0,051
3x3	0,079	1x3	0,062	2x1	0,050
0x3	0,077	2x5	0,061	1x4	0,050
0x2	0,073	2x2	0,060	1x5	0,049

2.7.2 Vyhodnocení zkoušky DMA

Z naměřených hodnot obou složek modulu pružnosti, lze pozorovat, že výsledky vykazují přímou souvislost se stejnoměrností velikosti částic obsažených v epoxidové pryskyřici. U nemletých vláken jsou v matrici částice se stejnou velikostí a celý systém tak dokáže vhodně rozložit dynamické mechanické namáhání. U vzorků obsahujících recyklovaná uhlíková vlákna, která prošla jedním procesem se nachází částice plniva různé velikosti. Proto u těchto vzorků z pravidla nedochází k absorpci tak velkého zatížení. Stejně je tomu u 2× mletých vláken, kde se vyskytují stále nestejně velké velikosti částic. U vzorků s 3× mletými uhlíkovými vlákny je již plnivo homogennější, a proto dokáže tento vzorek lépe snášet mechanické zatížení. Je však zapotřebí vyšší koncentrace takto připraveného mletého plniva.

Proto dosahují nejlepších hodnot dynamického mechanického zatížení kompozity s nemletými a 3× mletými recyklovanými uhlíkovými vlákny. Dynamické vlastnosti tedy velmi závisí na struktuře částic (velikost a tvar) v daném testovaném vzorku a na jejich koncentraci.

Závěr

Práce zkoumá mechanické vlastnosti kompozitů s výztuží z recyklovaných mletých uhlíkových vláken, které byly podrobeny opakovanému procesu mletí. Dále práce analyzuje vnitřní uspořádání výztuže v kompozitu, morfologii částic a její chování při mechanickém namáhání kompozitu. V neposlední řadě pak prohlubuje znalosti v oblasti kompozitů s uhlíkovou výztuží, která je vztažena k současné modernizaci v leteckém průmyslu a k recyklaci již vysloužilých kompozitních výrobků s uhlíkovým plnivem.

Procesem mletí vzniklá výztuž z recyklovaných uhlíkových vláken byla obrazově analyzována. Mechanické vlastnosti laboratorně připravených kompozitních vzorků byly podrobeny testování zkouškou rázové houževnatosti, zkouškou tříbodového ohybu a DMA analýze (v testovacím módu tříbodového ohybu).

Hodnoty z výsledků všech postupů analýzy dokazují pozitivní vliv užití uhlíkové výztuže na mechanické vlastnosti uhlíkových kompozitů. Z analýz dále vyplývá, že adheze částic k matici je lepší u mletých částic, jelikož došlo k lepšímu vzájemnému zaklesnutí obou struktur do ostrých a více strukturovaných částí částic.

Aplikací mletých uhlíkových částic jako výztuže došlo jednoznačně ke zvýšení křehkosti materiálu. Taktéž bylo mechanickými testy dokázáno, že nestejnornost částic v kompozitu přispívá k poklesu mechanických vlastností. Díky zvyšující se křehkosti kompozitu se zvyšujícím se počtem mletí uhlíkových částic docházelo k postupnému snižování modulu pružnosti při zkoušce tříbodovým ohybem. U testování DMA byl pozorován vliv stejnoměrnosti velikosti částic a jejich koncentrace na mechanické vlastnosti. Mechanické vlastnosti ovlivňuje nedostatečná koncentrace částic a nestejnornost velikosti částic. Bohužel se zvyšující se koncentrací prudce roste viskozita směsi a zhoršují se tak podmínky zpracovatelnosti materiálu při výrobě kompozitu.

Při rázové zkoušce dosáhl nejvyšší rázové houževnatosti vzorek s 3× mletými uhlíkovými vlákny o koncentraci plniva 1 hm.%. Podobných hodnot dosáhl vzorek s koncentrací 3 hm.% 2× mletého plniva. Při testování tříbodovým ohybem bylo naměřeno nejvyšší ohybové napětí u vzorků s nemletými vlákny o koncentraci

plniva 3 a 5 hm.%. Tyto vzorky dosáhly při této zkoušce i nejvyšších modulů pružnosti. Při testování dynamickou mechanickou analýzou byl naměřen nejvyšší komplexní modul pružnosti u vzorku s 3× mletými uhlíkovými vlákny o koncentraci 5 hm.%. Podobných hodnot komplexního modulu pružnosti bylo dosaženo u vzorků s nemletými vlákny s koncentrací uhlíkového plniva 3 a 5 hm.%. Nejlepší ztrátový činitel modulu pružnosti byl naměřen u vzorku s 1 × mletými uhlíkovými vlákny o koncentraci 5 hm.%.

Naměřené výsledky nebyly jednoznačné, jelikož jsou ovlivněny mnoha již popsanými faktory.

Kompozitní materiály s uhlíkovou výztuží nalézají stále širší uplatnění ve všech průmyslových odvětvích. Jejich výroba však přináší obtíže, jelikož s rostoucí koncentrací výztuže roste viskozita materiálu při zpracování. Další obtíží jsou i zdravotní rizika při zpracovávání mikroskopických částecek uhlíkové výztuže, které se mohou usazovat v lidském těle kde mají negativní vliv. Důležitým aspektem je ekonomická náročnost výroby, a proto je kladen stále větší důraz na jejich recyklaci a znovu využití při výrobě nových výrobků. V současné době nalézáme v krajině rozlehlá skladiště vysloužilých kompozitních materiálů, jejichž recyklace by této ekologické zátěži ulevila a mohla dát za vznik novým uplatnění tohoto recyklátu.

Jako možné použití testovaných kompozitů se jeví jejich využití pro zlepšení mechanických vlastností mezifáze při výrobě nových kompozitních vzorků s uhlíkovou výztuží. Tuto diplomovou práci lze doplnit měřením elektrických vlastností těchto epoxidových kompozitů s výztuží z mletých recyklovaných uhlíkových vláken.

Seznam použité literatury

- [1] NOVOTNÁ, Jana, Jan KOČÍB, Hana ŠOURKOVÁ, Jan GRÉGR, Miroslava PECHOČIAKOVÁ a Blanka TOMKOVÁ. Influence of carbon fillers plasma treatment on mechanical properties of epoxy resin composites. In: [online]. Liberec: Liberec TUL, 2019. Dostupné z: doi:10.13140/RG.2.2.24924.54402
- [2] NOVOTNÁ, Jana, Jan KOČÍB, Jan GREGR a Blanka TOMKOVÁ. Analysis of composite materials with plasma treatment recycled carbon fibers [online]. 2019. Dostupné z: doi:10.13140/RG.2.2.24924.54402
- [3] GRÉGR, Jan. *Povrchové vlastnosti uhlíkových vláken* [online]. 2004. Dostupné z: <http://docplayer.cz/10797731-Povrchove-vlastnosti-uhlikovych-vlaken.html>
- [4] PRÁŠEK, Jan. UHLÍKOVÉ NANOČÁSTICE: Grafen, Nanotrubice, Fulereny [online]. 2011, 22. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/nanoteam/data/soubory/CTN_grafen_fullerenCNTs+grafen+fullereny.pdf
- [5] FITZER, E a L.M MANOCHA. *Carbon reinforcement and Carbon-Carbon composites*. 1998. ISBN 3-540-62933-5.
- [6] PIERSON, H.O. *Handbook of Carbon, Graphite, Diamond and Fullerenes: properties, Processing and Applications*. First. New Jersey: Noyes publications, 1993. ISBN 0-8155-1339-9.
- [7] MORGAN, Peter. *Carbon fibers and their composites*. Boca Raton, Florida: Taylor & Francis Group, 2005. ISBN 0824709837, 9780824709839.
- [8] MASARYKOVA UNIVERZITA V BRNĚ FAKULTA PŘÍRODOVĚDECKÁ. *Fyzikální základy vědy o materiálu* [online]. 2012 [vid. 2020-04-05]. Dostupné z: <http://www.ped.muni.cz/wphy/fyzvla/fmkomplet4.htm>
- [9] KOČÍB, Jan. *Analýza vlivu mletí recyklovaných uhlíkových vláken na mechanické vlastnosti epoxidových kompozitů*. B.m., 2018. Technická Univerzita v Liberci.
- [10] VÁVRA, V a Z LOSOS. *Mineralogie - Fázové diagramy* [online]. 2013 [vid. 2020-04-14]. Dostupné z: https://www.sci.muni.cz/mineralogie/kap_6_5_diagram/obrazek65_1.htm
- [11] SODOMKA, Lubomír. *Stupeň grafitizace uhlíkových vláken* [online]. 2005. Dostupné z: <https://www.xray.cz/ms/bul2005-2/sodomka.pdf>

- [12] DAĐOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Liberec: Technická universita v Liberci, 2007. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [13] LEGENDRE, André. *Uhlíkové materiály: Od černé keramiky k uhlíkovým vláknům*. Praha: INFORMATORIUM, 2001. ISBN 80-86073-82-3.
- [14] *Uhlíkové vlákno jako produkt recyklace* [online]. 2006 [vid. 2020-04-12]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/uhlikove-vlakno-jako-produkt-recyklace_16717.html
- [15] SIEMENS. Recyklovaný uhlík jako nový. *Siemens, s.r.o.* [online]. 2014 [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
- [16] TUAN, L, Z MENG a ET AL. Mild chemical recycling of aerospace fiber/epoxy composite wastes and utilization of the decomposed resin. *Polymer degradation and Stability* [online]. 2017, **139**, 20–27. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141391017300708>
- [17] ENVIWEB.CZ. *Rizika nanočástic pro zdraví a jak jim čelit* [online]. 2006 [vid. 2020-04-04]. Dostupné z: <http://www.enviweb.cz/58528>
- [18] LOUDA, Petr. Zdravotní rizika nanomateriálů. In: [online]. B.m. Dostupné z: [https://nanoed.tul.cz/pluginfile.php/1633/mod_resource/content/0/Zdravotní rizika nanočástic 1.pdf](https://nanoed.tul.cz/pluginfile.php/1633/mod_resource/content/0/Zdravotní_rizika_nanočástic_1.pdf)
- [19] ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. ČSN EN 149:2001. 2019.
- [20] DTEST. *Roušky a respirátory* [online]. 2009 [vid. 2020-04-04]. Dostupné z: <https://www.dtest.cz/clanek-673/rousiky-a-respiratory>
- [21] CHUNG, Deborah. *Composite materials: functional materials for modern technologies*. London: Springer, 2003. ISBN 185233665X.
- [22] JONES, R.M. *Mechanical of Composite Materials*. 2. vyd. Philadelphia: Tailor Francis, 1999. ISBN 1-56032-712-X.
- [23] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. První. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2003. ISBN 80-214-2443-5.
- [24] KOŘÍNEK, Zdeněk. *Kompozity - vlákna pro kompozity* [online]. 2016. Dostupné z: https://drive.google.com/file/d/0B8vQSuH1vI_vV115RHg1SIFPNW8/view

- [25] TITANIUMEXPOSED.COM. Welding titanium is the ultimate challenge for the professional welder [online]. 2003. Dostupné z: <https://www.titaniumexposed.com/welding-titanium.html>
- [26] *Carbon frame* [online]. [vid. 2020-04-13]. Dostupné z: <https://www.dhgate.com/product/27-5er-mountain-bike-ud-carbon-fiber-frames/401117203.html#seo=WAP>
- [27] TOMKOVÁ, Blanka. Kompozity s textilní výztuží. In: . Liberec. 2019.
- [28] DAŘOUREK, Karel. Kompozitní materiály -Nespojitá vlákna. *KMI TUL* [online]. 2008 [vid. 2020-05-01]. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/KM/KompozityDad/11kratvlakna.pdf
- [29] SPRENGER, S, H.M KOTHMANN a Volker ALTSTAEDT. No TitleCarbon fiber-reinforced composites using an epoxy resin matrix modified with reactive liquid rubber and silica nanoparticles. *Composites Science and Technology* [online]. 2014, **105**, 86–95. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0266353814003571>
- [30] TIAN, Yan, Hui ZHANG a ET AL. High strain rate compression of epoxy based nanocomposites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* [online]. 2016, **90**, 62–70. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X16301865>
- [31] ASHBY, Michael F. *Materials Selection in Mechanical Design*. Third. 2005. ISBN 0 7506 6168 2.
- [32] VRBKA, Jan. *Mechanika kompozitů* [online]. Brno: VUT Brno, 2008. Dostupné z: <http://docplayer.cz/19075854-Mechanika-kompozitu-prof-rndr-ing-jan-vrbka-drsc-ustav-mechaniky-teles-mechatroniky-a-biomechaniky-fakulta-strojního-inženýrství-vut-v-brně.html>
- [33] MODERN AIRLINERS. *Boeing 787 Dreamliner Specs* [online]. 2020 [vid. 2020-03-31]. Dostupné z: <https://modernairliners.com/boeing-787-dreamliner/boeing-787-dreamliner-specs/>
- [34] EINSETLER, Laura. *Wings bend* [online]. 2014 [vid. 2020-04-21]. Dostupné z: <http://www.captainlaura.com/2014/10/02/wings-bend/>

- [35] ŽEŽULA, Jiří. Životnost dopravních letadel. *Svět letecké dopravy* [online]. 2019. Dostupné z: <https://www.flying-revue.cz/zivotnost-dopravnich-letadel>
- [36] J. DOUGLAS SCROGGINS & BENJAMIN BROWN. *AFRA - Aircraft Fleet Recycling Association* [online]. 2014. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=4VdcA5PZzQA>
- [37] BOEING. Boeing 787. 2020 [online]. [vid. 2020-03-31]. Dostupné z: <https://www.boeing.com/commercial/787/>
- [38] ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. ČSN EN ISO 179-1. 2011. Česká republika.
- [39] ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT. ČSN EN ISO 14125. 1999. Česká republika.
- [40] UNIVERZITA TOMÁŠE BATI VE ZLÍNĚ FAKULTA TECHNOLOGICKÁ. Statické zkoušky krátkodobé. In: *Kontrolní a zkušební metody* [online]. B.m.: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně Fakulta technologická, nedatováno, s. 23. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_09.pdf
- [41] STŘEDNÍ ŠKOLA STROJÍRENSKÁ A ELEKTROTECHNICKÁ BRNO. *Mechanické zkoušky* [online]. Brno: Střední škola strojírenská a elektrotechnická Brno, 2003. Dostupné z: http://www.sssebrno.cz/files/ovmt/zkouska_o_hybem.pdf
- [42] R.M.I. ELECTRONIC MEASURING INSTRUMENT. Dynamický termomechanický analyzátor a fft spektrometr DMA DX04T.
- [43] MERNA, Jan. *Dynamický mechanický analyzátor DMA DX04T* [online]. 2014 [vid. 2020-04-03]. Dostupné z: <https://pol.vscht.cz/vyzkum/vybaveni/mechanicke>
- [44] VONDRÁČEK, P. *Metody studia a charakterizace struktury polymerů*. B.m.: VŠCHT, 1988. ISBN 80-7080-087-9.
- [45] VANÍČEK, Jiří. Metody termické analýzy -Dynamicko-mechanická analýza (DMA). In: [online]. Liberec. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/49431/%5B16%5D.pdf?sequence=6&isAllowed=y>
- [46] EASYCOMPOSITES. *Milled Carbon Fibre Powder* [online]. 2015 [vid. 2020-04-03]. Dostupné z: <http://www.easycomposites.co.uk/#!/resin-gel-silicone-adhesive/filler-powders-and-additives/general-fillers-and-additives/milled-carbon-fibre-powder.html>

- [47] EASYCOMPOSITES. Carbiso Milled Carbon Fibre [online]. 2011. United Kingdom. Dostupné z: <http://www.elgcf.com/products/carbiso-milled-fibre>
- [48] FRITSCH GMBH. *Planetary Micro Mill Pulverisette 7 premium line* [online]. 2018 [vid. 2020-04-03]. Dostupné z: <http://www.fritsch-international.com/sample-preparation/milling/planetary-mills/details/product/pulverisette-7-premium-line/>
- [49] ROWE, W.B. *Principles of Modern Grinding Technology*. 1. vyd. Oxford: Wiliam Andrew, 2009. ISBN 978-0-81-552018-4.
- [50] MGS KUNSTAHARZPRODUKTE GMBH. 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.
- [51] FREKOTE. Separační prostředek pro formy. Česká republika.
- [52] LABORTECH. LaborTech - Labtest CHK 50J [online]. 2017. Czech Republic. Dostupné z: <http://www.labortech.cz/wp-content/uploads/2019/01/CHK-50J-v1.0-2017.pdf>

Seznam použitých obrázků

OBRÁZEK 1.2.1 KRYSTALOGRAFICKÉ USPOŘÁDÁNÍ DIAMANTU [8]	17
OBRÁZEK 1.2.2 KRYSTALOGRAFICKÁ STRUKTURA GRAFITU [9].....	18
OBRÁZEK 1.2.3 SCHÉMA USPOŘÁDÁNÍ GRAFENOVÝCH VRSTEV [6]	18
OBRÁZEK 1.2.4 FÁZOVÝ DIAGRAM – UHLÍK [10].....	19
OBRÁZEK 1.2.5 SCHÉMA VÝROBY MATERIÁLŮ NA BÁZI UHLÍKU	19
OBRÁZEK 1.3.1 CHEMICKÝ STRUKTURNÍ VZOREC PAN	21
OBRÁZEK 1.3.2 VNITŘNÍ USPOŘÁDÁNÍ GRAFITOVÉHO VLÁKNA – BAZÁLNÍ ROVINY [12].....	22
OBRÁZEK 1.5.1 RÁM Z KOVOVÉHO MATERIÁLU [25].....	27
OBRÁZEK 1.5.2 RÁM Z KOMPOZITNÍHO MATERIÁLU [26].....	27
OBRÁZEK 1.5.3 DĚLENÍ KOMPOZITŮ DLE DRUHU A USPOŘÁDÁNÍ VÝZTUŽE [27]	28
OBRÁZEK 1.5.4 ROZHŘANÍ MATRICE/VLÁKNO	31
OBRÁZEK 1.5.5 ADHEZE MATRICE/VLÁKNO.....	31
OBRÁZEK 1.5.6 DOKONALÁ MECHANICKÁ ADHEZE ROZHŘANÍ	31
OBRÁZEK 1.5.7 NEDOKONALÁ MECHANICKÁ ADHEZE ROZHŘANÍ	31
OBRÁZEK 1.5.8 RŮZNÉ MECHANICKÉ VLASTNOSTI PRO RŮZNÉ KONSTRUKČNÍ MATERIÁLY [31]	32
OBRÁZEK 1.5.9 MATERIÁLY UŽITÉ PRO STAVBU LETOUNU BOEING 787 DREAMLINER [9]	34
OBRÁZEK 1.5.10 BOEING 737 DREAMLINER – WING FLEX TEST [34]	35
OBRÁZEK 1.5.11 KÓTOVANÝ MODEL DOPRAVNÍHO LETOUNU BOEING 787 DREAMLINER	37
OBRÁZEK 1.5.12 SCHÉMA ZKOUŠKY RÁZOVÉ HOUŽEVNATOSTI CHARPYHO METODOU [9]	39
OBRÁZEK 1.5.13 SCHÉMA ZKOUŠKY TŘÍBODOVÝM OHYBEM ČSN EN ISO 14125 [9]	40
OBRÁZEK 1.5.14 BLOKOVÉ SCHÉMA DYNAMICKÉHO MECHANICKÉHO ANALYZÁTORU [42].....	42
OBRÁZEK 2.1.1 RECYKLOVANÁ MLETÁ UHLÍKOVÁ VLÁKNA CARBISO MIL 100 μM [47]	44
OBRÁZEK 2.1.2 NANO MLÝN FRITSCH, PULVERISETTE 7 PREMIUM LINE [48]	45
OBRÁZEK 2.1.3 MLECÍ MISKA S KULIČKAMI [48].....	45
OBRÁZEK 2.1.4 NÁZORNÉ VYOBRAZENÍ PRINCIPU MLÝNU [9].....	46
OBRÁZEK 2.1.5 UHLÍKOVÁ VLÁKNA CARBISO 1000× ZVĚTŠENO	48
OBRÁZEK 2.1.6 UHLÍKOVÁ VLÁKNA CARBISO 5000× ZVĚTŠENO	48
OBRÁZEK 2.1.7 UHLÍKOVÁ VLÁKNA 1× MLETÁ 1000× ZVĚTŠENO.....	48
OBRÁZEK 2.1.8 UHLÍKOVÁ VLÁKNA 1× MLETÁ 5000× ZVĚTŠENO.....	48
OBRÁZEK 2.1.9 UHLÍKOVÁ VLÁKNA 2× MLETÁ 1000× ZVĚTŠENO.....	49
OBRÁZEK 2.1.10 UHLÍKOVÁ VLÁKNA 2× MLETÁ 5000× ZVĚTŠENO	49
OBRÁZEK 2.1.11 UHLÍKOVÁ VLÁKNA 3× MLETÁ 1000× ZVĚTŠENO	50
OBRÁZEK 2.1.12 UHLÍKOVÁ VLÁKNA 3× MLETÁ 5000× ZVĚTŠENO	50
OBRÁZEK 2.1.13 PŘEHLED POSTUPNĚ MLETÉHO MATERIÁLU 1000× ZVĚTŠENO	50
OBRÁZEK 2.2.1 PRÁCE S PROGRAMEM – DETEKCE ČÁSTIC	51
OBRÁZEK 2.2.2 PRŮMĚRNÁ VELIKOST ČÁSTIC	52
OBRÁZEK 2.2.3 PRŮMĚR ČÁSTIC	53
OBRÁZEK 2.3.1 UHLÍKOVÉ VLÁKNO PLAZMATICKY NEOŠETŘENO.....	58
OBRÁZEK 2.3.2 UHLÍKOVÉ VLÁKNO OŠETŘENÉ PLAZMOU.....	58
OBRÁZEK 2.5.1 GRAFICKÉ VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ VŠECH VZORKŮ RÁZOVÉ ZKOUŠKY	63
OBRÁZEK 2.5.2 GRAFICKÉ VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ RÁZOVÉ ZKOUŠKY PRO VZORKY S KONCENTRACÍ 1 HM.% PLNIVA.....	64
OBRÁZEK 2.5.3 GRAFICKÉ VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ RÁZOVÉ ZKOUŠKY PRO VZORKY S KONCENTRACÍ 3 HM.% PLNIVA.....	64

OBRÁZEK 2.5.4 GRAFICKÉ VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ RÁZOVÉ ZKOUŠKY PRO VZORKY S KONCENTRACÍ 5 HM.% PLNIVA.....	64
OBRÁZEK 2.5.5 PŘEHLED LOMŮ MATERIÁLU PRO VŠECHNY TESTOVANÉ VZORKY	66
OBRÁZEK 2.5.6 DETAIL NEMLETÁ VLÁKNA V KOMPOZITU	67
OBRÁZEK 2.5.7 DETAIL 3× MLETÁ VLÁKNA V KOMPOZITU	67
OBRÁZEK 2.6.1 GRAFICKÉ VYOBRAZENÍ VÝSLEDKŮ MODULU PRUŽNOSTI PRO VŠECHNY TESTOVANÉ VZORKY	73
OBRÁZEK 2.6.2 GRAFICKÉ VYHODNOCENÍ MODULŮ PRUŽNOSTI PRO VZORKY S KONCENTRACÍ 1 HM.% PLNIVA	74
OBRÁZEK 2.6.3 GRAFICKÉ VYHODNOCENÍ MODULŮ PRUŽNOSTI PRO VZORKY S KONCENTRACÍ 3 HM.% PLNIVA	74
OBRÁZEK 2.6.4 GRAFICKÉ VYHODNOCENÍ MODULŮ PRUŽNOSTI PRO VZORKY S KONCENTRACÍ 5 HM.% PLNIVA	75
OBRÁZEK 2.6.5 GRAFICKÉ VYHODNOCENÍ OHYBOVÉHO NAPĚTÍ PRO VZORKY S KONCENTRACÍ 1 HM.% PLNIVA	75
OBRÁZEK 2.6.6 GRAFICKÉ VYHODNOCENÍ OHYBOVÉHO NAPĚTÍ PRO VZORKY S KONCENTRACÍ 3 HM.% PLNIVA	76
OBRÁZEK 2.6.7 GRAFICKÉ VYHODNOCENÍ OHYBOVÉHO NAPĚTÍ PRO VZORKY S KONCENTRACÍ 5 HM.% PLNIVA	76
OBRÁZEK 2.6.8 GRAFICKÉ VYOBRAZENÍ VÝSLEDKŮ OHYBOVÉHO NAPĚTÍ PRO VŠECHNY TESTOVANÉ VZORKY	77
OBRÁZEK 2.7.1 PRŮBĚH MĚŘENÍ KOMPLEXNÍHO MODULU PRUŽNOSTI V KOMPOZITU S NEMLETÝMI UHLÍKOVÝMI VLÁKNY.....	79
OBRÁZEK 2.7.2 PRŮBĚH MĚŘENÍ KOMPLEXNÍHO MODULU PRUŽNOSTI V KOMPOZITU S 1× MLETÝMI UHLÍKOVÝMI VLÁKNY.....	80
OBRÁZEK 2.7.3 PRŮBĚH MĚŘENÍ KOMPLEXNÍHO MODULU PRUŽNOSTI V KOMPOZITU S 2× MLETÝMI UHLÍKOVÝMI VLÁKNY.....	81
OBRÁZEK 2.7.4 PRŮBĚH MĚŘENÍ KOMPLEXNÍHO MODULU PRUŽNOSTI V KOMPOZITU S 3× MLETÝMI UHLÍKOVÝMI VLÁKNY.....	82
OBRÁZEK 2.7.5 NAMĚŘENÉ HODNOTY KOMPLEXNÍHO MODULU PRUŽNOSTI PRO VZORKY S KONCENTRACÍ 1 HM.% PLNIVA.....	82
OBRÁZEK 2.7.6 NAMĚŘENÉ HODNOTY KOMPLEXNÍHO MODULU PRUŽNOSTI PRO VZORKY S KONCENTRACÍ 3 HM.% PLNIVA.....	83
OBRÁZEK 2.7.7 NAMĚŘENÉ HODNOTY KOMPLEXNÍHO MODULU PRUŽNOSTI PRO VZORKY S KONCENTRACÍ 5 HM.% PLNIVA.....	83
OBRÁZEK 2.7.8 GRAFICKÉ VYOBRAZENÍ NAMĚŘENÝCH VÝSLEDKŮ KOMPLEXNÍHO MODULU PRUŽNOSTI	84
OBRÁZEK 2.7.9 PRŮBĚH MĚŘENÍ ZTRÁTOVÉHO ČINITELE MODULU PRUŽNOSTI V KOMPOZITU S NEMLETÝMI UHLÍKOVÝMI VLÁKNY.....	86
OBRÁZEK 2.7.10 PRŮBĚH MĚŘENÍ ZTRÁTOVÉHO ČINITELE MODULU PRUŽNOSTI V KOMPOZITU S 1× MLETÝMI UHLÍKOVÝMI VLÁKNY.....	87
OBRÁZEK 2.7.11 PRŮBĚH MĚŘENÍ ZTRÁTOVÉHO ČINITELE MODULU PRUŽNOSTI V KOMPOZITU S 2× MLETÝMI UHLÍKOVÝMI VLÁKNY.....	88
OBRÁZEK 2.7.12 PRŮBĚH MĚŘENÍ ZTRÁTOVÉHO ČINITELE MODULU PRUŽNOSTI V KOMPOZITU S 3× MLETÝMI UHLÍKOVÝMI VLÁKNY.....	89
OBRÁZEK 2.7.13 NAMĚŘENÉ HODNOTY ZTRÁTOVÉHO ČINITELE MODULU PRUŽNOSTI PRO VZORKY S KONCENTRACÍ 1 HM.% PLNIVA	89
OBRÁZEK 2.7.14 NAMĚŘENÉ HODNOTY ZTRÁTOVÉHO ČINITELE MODULU PRUŽNOSTI PRO VZORKY S KONCENTRACÍ 3 HM.% PLNIVA	90
OBRÁZEK 2.7.15 NAMĚŘENÉ HODNOTY ZTRÁTOVÉHO ČINITELE MODULU PRUŽNOSTI PRO VZORKY S KONCENTRACÍ 3 HM.% PLNIVA	90
OBRÁZEK 2.7.16 GRAFICKÉ VYOBRAZENÍ NAMĚŘENÝCH VÝSLEDKŮ ZTRÁTOVÉHO ČINITELE MODULU PRUŽNOSTI... 91	91

Seznam tabulek

TABULKA 1.3.1 VLASTNOSTI VYBRANÝCH DRUHŮ VLÁKEN [11]	22
TABULKA 2.1.1 CARBISO - MATERIÁLOVÉ VLASTNOSTI [46]	44
TABULKA 2.2.1 PRŮMĚRNÁ VELIKOST PLOCHY ČÁSTIC.....	52
TABULKA 2.2.2 ANALÝZA PRŮMĚRNÉ ŠÍŘKY VLÁKNA/ČÁSTICE	53
TABULKA 2.4.1 PŘEHLED VŠECH TESTOVANÝCH VZORKŮ	59
TABULKA 2.5.1 VYPOČTENÉ HODNOTY RÁZOVÉ HOUŽEVNATOSTI KOMPOZITU S NEMLETÝMI UHLÍKOVÝMI VLÁKNY	61
TABULKA 2.5.2 VYPOČTENÉ HODNOTY RÁZOVÉ HOUŽEVNATOSTI KOMPOZITU S 1× MLETÝMI UHLÍKOVÝMI VLÁKNY	61
TABULKA 2.5.3 VYPOČTENÉ HODNOTY RÁZOVÉ HOUŽEVNATOSTI KOMPOZITU S 2× MLETÝMI UHLÍKOVÝMI VLÁKNY	62
TABULKA 2.5.4 VYPOČTENÉ HODNOTY RÁZOVÉ HOUŽEVNATOSTI KOMPOZITU S 3× MLETÝMI UHLÍKOVÝMI VLÁKNY	62
TABULKA 2.6.1 HODNOTY OHYBOVÉHO NAPĚTÍ KOMPOZITU S NEMLETÝMI UHLÍKOVÝMI VLÁKNY	70
TABULKA 2.6.2 HODNOTY MODULU PRUŽNOSTI KOMPOZITU S NEMLETÝMI UHLÍKOVÝMI VLÁKNY	70
TABULKA 2.6.3 HODNOTY OHYBOVÉHO NAPĚTÍ KOMPOZITU S 1× MLETÝMI UHLÍKOVÝMI VLÁKNY	71
TABULKA 2.6.4 HODNOTY MODULU PRUŽNOSTI KOMPOZITU S 1× MLETÝMI UHLÍKOVÝMI VLÁKNY	71
TABULKA 2.6.5 HODNOTY OHYBOVÉHO NAPĚTÍ KOMPOZITU S 2× MLETÝMI UHLÍKOVÝMI VLÁKNY	71
TABULKA 2.6.6 HODNOTY MODULU PRUŽNOSTI KOMPOZITU S 2× MLETÝMI UHLÍKOVÝMI VLÁKNY	72
TABULKA 2.6.7 HODNOTY OHYBOVÉHO NAPĚTÍ KOMPOZITU S 3× MLETÝMI UHLÍKOVÝMI VLÁKNY.....	72
TABULKA 2.6.8 HODNOTY MODULU PRUŽNOSTI KOMPOZITU S 3× MLETÝMI UHLÍKOVÝMI VLÁKNY.....	72
TABULKA 2.7.1 VYPOČTENÉ HODNOTY KOMPLEXNÍHO MODULU PRUŽNOSTI V KOMPOZITU S NEMLETÝMI UHLÍKOVÝMI VLÁKNY.....	78
TABULKA 2.7.2 VYPOČTENÉ HODNOTY KOMPLEXNÍHO MODULU PRUŽNOSTI V KOMPOZITU S 1× MLETÝMI UHLÍKOVÝMI VLÁKNY.....	79
TABULKA 2.7.3 VYPOČTENÉ HODNOTY KOMPLEXNÍHO MODULU PRUŽNOSTI V KOMPOZITU S 2× MLETÝMI UHLÍKOVÝMI VLÁKNY.....	80
TABULKA 2.7.4 VYPOČTENÉ HODNOTY KOMPLEXNÍHO MODULU PRUŽNOSTI V KOMPOZITU S 3× MLETÝMI UHLÍKOVÝMI VLÁKNY.....	81
TABULKA 2.7.5 TABULKOVÝ PŘEHLED NAMĚŘENÝCH VÝSLEDKŮ KOMPLEXNÍHO MODULU PRUŽNOSTI – SEŘAZENO SESTUPNĚ.....	84
TABULKA 2.7.6 VYPOČTENÉ HODNOTY ZTRÁTOVÉHO ČINITELE MODULU PRUŽNOSTI V KOMPOZITU S NEMLETÝMI UHLÍKOVÝMI VLÁKNY.....	85
TABULKA 2.7.7 VYPOČTENÉ HODNOTY ZTRÁTOVÉHO ČINITELE MODULU PRUŽNOSTI V KOMPOZITU S 1× MLETÝMI UHLÍKOVÝMI VLÁKNY.....	86
TABULKA 2.7.8 VYPOČTENÉ HODNOTY ZTRÁTOVÉHO ČINITELE MODULU PRUŽNOSTI V KOMPOZITU S 2× MLETÝMI UHLÍKOVÝMI VLÁKNY.....	87
TABULKA 2.7.9 VYPOČTENÉ HODNOTY ZTRÁTOVÉHO ČINITELE MODULU PRUŽNOSTI V KOMPOZITU S 3× MLETÝMI UHLÍKOVÝMI VLÁKNY.....	88
TABULKA 2.7.10 TABULKOVÝ PŘEHLED NAMĚŘENÝCH VÝSLEDKŮ ZTRÁTOVÉHO ČINITELE MODULU PRUŽNOSTI – SEŘAZENO SESTUPNĚ.....	92

Přílohy

Seznam příloh

- A. Protokol přípravy kompozitních vzorků
- B. Rázová houževnatost – nemletá uhlíková vlákna
- C. Rázová houževnatost – 1× mletá uhlíková vlákna
- D. Rázová houževnatost – 2× mletá uhlíková vlákna
- E. Rázová houževnatost – 3× mletá uhlíková vlákna
- F. SEM snímky výsledků mlecích procesů a lomů materiálu
- G. Tříbodový ohyb – nemletá uhlíková vlákna
- H. Tříbodový ohyb – 1× mletá uhlíková vlákna
- I. Tříbodový ohyb – 2× mletá uhlíková vlákna
- J. Tříbodový ohyb – 3× mletá uhlíková vlákna

A. Protokol přípravy kompozitních vzorků

Tabulka. A Protokol přípravy kompozitních vzorců Nemletá, 1× a 2× mletá uhlíková vlákna

Protokol měření: Nemletá vlákna

Vzorek	Pryskyřice [g]	Tužidlo [g]	Celkem [g]	Carbiso [g]	Carbiso [hm.%]	Klimatické podmínky	
						Teplota [°C]	Vlhkost vzduchu [%]
Epoxy	20	8	28	0,00	0	24	30
0 x 1	20	8	28	0,28	1	26	20
0 x 2	20	8	28	0,56	2	24	30
0 x 3	20	8	28	0,84	3	24	30
0 x 4	20	8	28	1,12	4	23	45
0 x 5	20	8	28	1,40	5	23	45

Protokol měření: 1× mletá vlákna

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

Protokol měření: 2× mletá vlákna

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

Tabulka. B Protokol přípravy kompozitních vzorců 3× mletá uhlíková vlákna

**Protokol měření:
3× mletá vlákna**

Vzorek	Pryskyřice [g]	Tužidlo [g]	Celkem [g]	Carbiso [g]	Carbiso [hm.%]	Klimatické podmínky	
						Teplota [°C]	Vlhkost vzduchu [%]
3x 1	20	8	28	0,28	1	19	40
3x 2	20	8	28	0,56	2	19	40
3x 3	20	8	28	0,84	3	19,6	39
3x 4	20	8	28	1,12	4	19,6	39
3x 5	20	8	28	1,40	5	21,2	43

B. Rázová houževnatost – nemletá uhlíková vlákna

Tabulka zobrazuje jednotlivé výsledky testování rázové houževnatosti Charpyho metodou pro kompozitní materiál s nemletými uhlíkovými vlákny.

Tabulka. C Výsledky měření rázové houževnatosti kompozitu s nemletými uhlíkovými vlákny

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

C. Rázová houževnatost – 1× mletá uhlíková vlákna

Tabulka zobrazuje jednotlivé výsledky testování rázové houževnatosti Charpyho metodou pro kompozitní materiál s 1× mletými uhlíkovými vlákny.

Tabulka. D Výsledky měření rázové houževnatosti kompozitu s 1× mletými uhlíkovými vlákny

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

D. Rázová houževnatost – 2× mletá uhlíková vlákna

Tabulka zobrazuje jednotlivé výsledky testování rázové houževnatosti Charpyho metodou pro kompozitní materiál s 2× mletými uhlíkovými vlákny.

Tabulka. E Výsledky měření rázové houževnatosti kompozitu s 2× mletými uhlíkovými vlákny

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

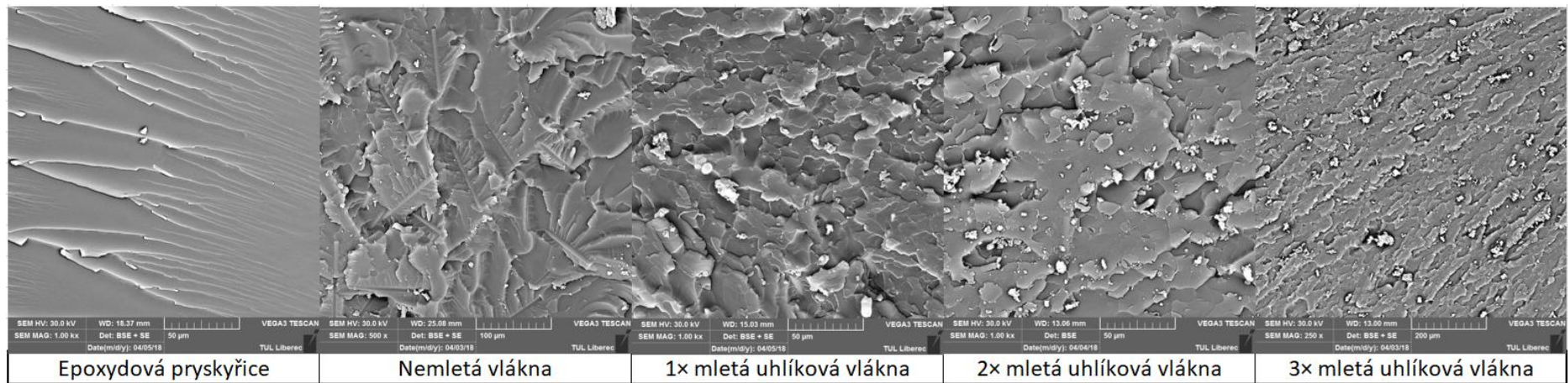
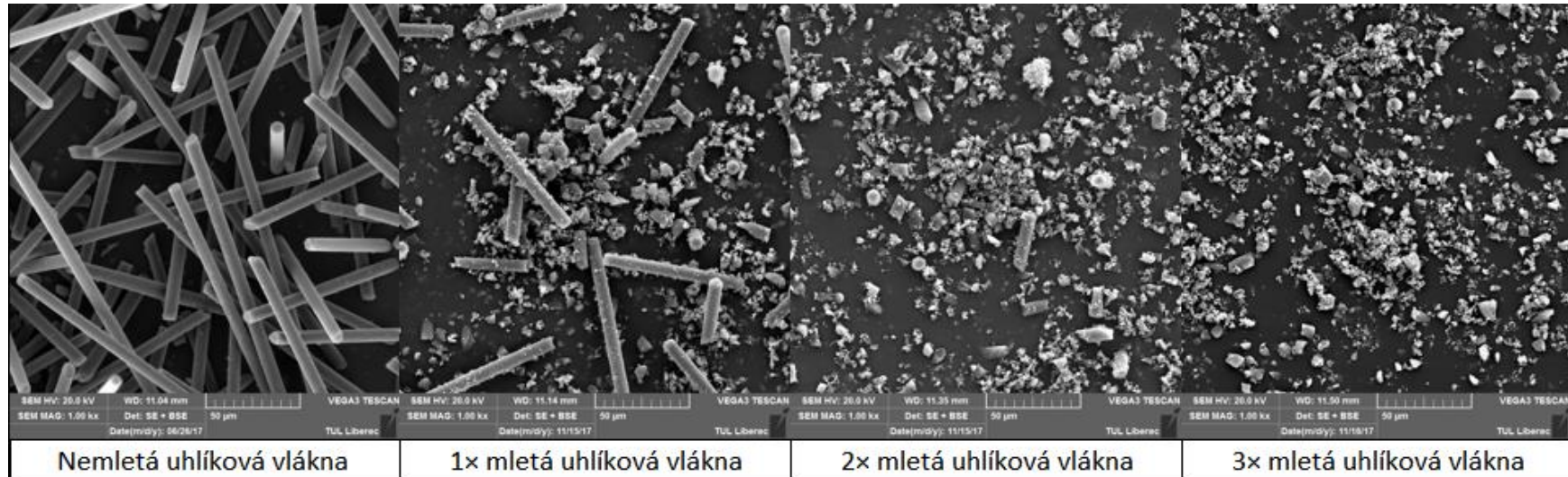
E. Rázová houževnatost – 3× mletá uhlíková vlákna

Tabulka zobrazuje jednotlivé výsledky testování rázové houževnatosti Charpyho metodou pro kompozitní materiál s 3× mletými uhlíkovými vlákny.

Tabulka. F Výsledky měření rázové houževnatosti kompozitu s 3× mletými uhlíkovými vlákny

Číslo vzorku	Procento obsažených uhlíkových vláken [hm.%]	Tloušťka [mm]	Šířka [mm]	Deformační energie E [J]	Rázová houževnatost A [J/m ²]
3x 1 A	1	2,41	10,22	1,93	78,36
3x 1 B	1	2,76	10,21	0,67	23,78
3x 1 C	1	2,67	10,22	1,33	48,74
3x 1 D	1	2,73	10,13	2,12	76,66
3x 1 E	1	2,81	10,23	1,98	68,88
3x 2 A	2	3,02	10,18	0,65	21,14
3x 2 B	2	3,00	10,23	0,23	7,49
3x 2 C	2	3,03	10,21	0,89	28,77
3x 2 D	2	2,84	10,24	0,63	21,66
3x 2 E	2	2,92	10,23	0,92	30,80
3x 3 A	3	2,69	10,21	0,82	29,86
3x 3 B	3	2,96	10,23	0,57	18,82
3x 3 C	3	2,69	10,13	1,61	59,08
3x 3 D	3	2,44	10,22	1,74	69,78
3x 3 E	3	2,66	10,11	1,52	56,52
3x 4 A	4	2,63	10,09	1,16	43,71
3x 4 B	4	2,72	10,19	0,59	21,29
3x 4 C	4	2,73	10,13	0,59	21,33
3x 4 D	4	2,43	10,15	0,67	27,16
3x 4 E	4	2,65	10,09	1,05	39,27
3x 5 A	5	2,71	10,18	0,61	22,11
3x 5 B	5	2,72	10,22	0,49	17,63
3x 5 C	5	2,69	10,26	0,61	22,10
3x 5 D	5	2,74	10,15	1,19	42,79
3x 5 E	5	2,62	10,20	0,58	21,70

F. SEM snímky výsledků mlecích procesů a lomů materiálu



G. Třibodový ohyb – nemletá uhlíková vlákna

Tabulka zobrazuje jednotlivé výsledky testování ohybových vlastností pro kompozitní materiál s nemletými uhlíkovými vlákny.

Tabulka. G Výsledky měření ohybových vlastností kompozitu s nemletými uhlíkovými vlákny

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

H. Tříbodový ohyb – 1× mletá uhlíková vlákna

Tabulka zobrazuje jednotlivé výsledky testování ohybových vlastností pro kompozitní materiál s 1× mletými uhlíkovými vlákny.

Tabulka. H Výsledky měření ohybových vlastností kompozitu s 1× mletými uhlíkovými vlákny

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

I. Třibodový ohyb – 2× mletá uhlíková vlákna

Tabulka zobrazuje jednotlivé výsledky testování ohybových vlastností pro kompozitní materiál s 2× mletými uhlíkovými vlákny.

Tabulka. 1 Výsledky měření ohybových vlastností kompozitu s 2× mletými uhlíkovými vlákny

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

J. Třibodový ohyb – 3× mletá uhlíková vlákna

Tabulka zobrazuje jednotlivé výsledky testování ohybových vlastností pro kompozitní materiál s 3× mletými uhlíkovými vlákny.

Tabulka. J Výsledky měření ohybových vlastností kompozitu s 3× mletými uhlíkovými vlákny

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]
3x1 A	1	2,87	10,17	10,03	1,50	14,37	3561,72
3x1 B	1	2,98	10,64	11,73	1,50	14,90	3554,41
3x1 C	1	2,92	10,14	11,23	1,50	15,59	3796,69
3x1 D	1	2,51	10,2	5,27	1,50	9,84	2789,69
3x1 E	1	2,82	10,33	7,65	1,50	11,17	2819,97
3x2 A	2	2,94	10,25	9,80	1,50	13,27	3212,60
3x2 B	2	2,81	10,03	8,80	1,50	13,33	3375,89
3x2 C	2	3,07	10,24	12,36	1,50	15,37	3563,98
3x2 D	2	2,94	10,24	11,58	1,50	15,70	3799,13
3x2 E	2	2,79	10,19	8,68	1,50	13,13	3349,55
3x3 A	3	3,05	10,11	12,14	1,50	15,49	3612,96
3x3 B	3	2,48	10,12	5,82	1,50	11,22	3221,69
3x3 C	3	2,87	10,31	10,64	1,50	15,03	3726,99
3x3 D	3	2,47	10,2	6,20	1,50	11,96	3444,12
3x3 E	3	2,24	9,83	4,37	1,50	10,63	3375,51
3x4 A	4	2,78	10,21	8,63	1,50	13,12	3357,65
3x4 B	4	2,74	10,35	8,51	1,50	13,14	3414,00
3x4 C	4	2,52	10,22	7,05	1,50	13,04	3678,19
3x4 D	4	2,48	10,21	7,63	1,50	14,58	4181,21
3x4 E	4	2,77	10,21	8,43	1,50	12,91	3314,28
3x5 A	5	2,75	10,22	8,75	1,50	13,59	3514,76
3x5 B	5	2,88	10,29	9,31	1,50	13,09	3231,99
3x5 C	5	2,87	10,29	8,97	1,50	12,70	3150,08
3x5 D	5	2,83	10,29	9,20	1,50	13,40	3366,12
3x5 E	5	2,86	10,25	9,03	1,50	12,92	3213,06